

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**VARIABILIDAD ESPACIAL DEL RENDIMIENTO
Y SU CORRELACIÓN CON LOS ATRIBUTOS EDÁFICOS
Y DE MANEJO DEL CULTIVO DE ARROZ**

por

Juan Ignacio SARTORI OLIVERI

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

2023

Tesis aprobada por:

Director: -----
Ing. Agr. (PhD.) José Alfredo Terra Fernández

Ing. Agr. (PhD.) Guillermo Siri-Prieto

Ing. Agr. (MSc.) (PhD.) Guillermina Cantou

Fecha: 21 de febrero de 2023

Autor: -----

Juan Ignacio Sartori Oliveri

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, mis hermanos, mis amigos y a todos los que quisieron y me apoyaron para que cerrar esta etapa.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES... ..	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO	3
2.2. AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y MANEJO SITIO ESPECÍFICO	4
2.2.1. <u>¿Qué es la agricultura de precisión o manejo sitio específico?</u>	4
2.2.2. <u>Zona de manejo</u>	5
2.2.3. <u>Etapas para llevar a cabo el manejo sitio específico</u>	6
2.2.4. <u>Beneficios de la agricultura de precisión</u>	7
2.3. MEDICIÓN DE LA VARIABILIDAD.....	8
2.3.1. <u>Espectrómetro infrarrojo</u>	9
2.3.2. <u>Medidores de conductividad eléctrica</u>	10
2.3.3. <u>Medición de la actividad clorofiliana</u>	11
2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	13
2.4.1. <u>Geoestadística</u>	13
2.4.2. <u>Análisis de clústeres o conglomerados</u>	15
2.4.3. <u>CART 16</u>	
2.5. ANTECEDENTES.....	17
2.6. FACTORES QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DEL CULTIVO DE ARROZ.....	22
2.6.1. <u>Disponibilidad de nutrientes (N, P, K, Zn)</u>	22
2.6.2. <u>pH</u>	24
2.6.3. <u>Textura</u>	24
2.6.4. <u>Control de malezas</u>	25
2.6.5. <u>Control de enfermedades</u>	26
2.6.6. <u>Sistema de laboreo</u>	26
2.7. ANTECEDENTES DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL CULTIVO DE ARROZ	27

3.	<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	33
3.1.	MARCO LOCATIVO Y EXPERIMENTAL	33
3.2.	DESCRIPCIÓN Y TIPO DE SUELOS.....	33
3.3.	ROTACIÓN.....	34
3.4.	MANEJO DEL CULTIVO	35
3.4.1.	<u>Manejo productivo - UPAG 3</u>	36
3.4.2.	<u>Manejo productivo - UPAG 4</u>	36
3.5.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	37
3.6.	DETERMINACIONES	37
3.6.1.	<u>Clima</u>	38
3.6.2.	<u>Determinaciones en suelo</u>	39
3.6.3.	<u>Determinaciones en el cultivo</u>	39
3.6.4.	<u>Análisis de correlación espacial</u>	41
3.7.	ANÁLISIS DE DATOS.....	44
3.7.1.	<u>Análisis estadístico descriptivo</u>	44
3.7.2.	<u>Análisis de correlación de Pearson</u>	45
3.7.3.	<u>Análisis de clúster</u>	46
3.7.4.	<u>Análisis de varianza (ANAVA)</u>	47
3.7.5.	<u>Árbol de regresión de CART</u>	47
3.7.6.	<u>Balance simple de nutrientes</u>	48
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	49
4.1.	CLIMA.....	49
4.1.1.	<u>Precipitaciones</u>	49
4.1.2.	<u>Temperatura</u>	50
4.1.3.	<u>Heliofanía</u>	51
4.2.	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	51
4.2.1.	<u>Determinaciones en suelo: propiedades fisicoquímicas</u>	51
4.2.2.	<u>Niveles de enmalezamiento, riego y SPAD</u>	71
4.2.3.	<u>Componentes del rendimiento, la calidad molinera y el contenido de nutrientes</u>	75
4.3.	ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ESPACIAL.....	78
4.4.	ANÁLISIS DE CORRELACIONES DE PEARSON	81
4.4.1.	<u>Propiedades edáficas</u>	81
4.4.2.	<u>Parámetros de crecimiento, calidad molinera, contenido de nutrientes y SPAD</u>	82
4.4.3.	<u>Parámetros de manejo del cultivo</u>	83

4.5.	ANÁLISIS DE CLÚSTER.....	84
4.6.	ANÁLISIS DE VARIANZA	87
4.7.	ANÁLISIS DE CART	88
4.8.	BALANCE SIMPLE DE NUTRIENTES.....	90
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	92
6.	<u>RESUMEN</u>	94
7.	<u>SUMMARY</u>	95
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	96

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.		Página
1.	Chacra, superficie, antecesor y grupo de suelos CONEAT del ensayo en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	34
2.	Propiedades químicas de los potreros UPAG 3 y UPAG 4 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	34
3.	Secuencia de cultivos y pasturas UPAG 3 y UPAG 4 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	35
4.	Parámetros “Active Lag Distance” y “Lag Class Interval” designados por defecto por el software GS+ en chacras con diferente pastura antecesora e intensidad de muestreo en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	42
5.	Escala de puntuación de las propiedades inferidas registradas en el cultivo.....	44
6.	Parámetros considerados en el análisis de CART.....	48
7.	Precipitaciones registradas durante la zafra 2008-2009 y serie histórica 1973-2009 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	49
8.	Temperatura media, máxima media, mínima media durante la zafra 2008-2009 y serie histórica 1973-2009 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	50
9.	Heliofanía registrada durante la zafra 2008-2009 y serie histórica 1973-2009 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	51

10.	Estadística descriptiva de las propiedades fisicoquímicas del suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	52
11.	Estadística descriptiva: variabilidad textural en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	53
12.	Estadística descriptiva: concentración de $P_{\text{citríco}}$ (ppm) de 0 a 15 cm de profundidad en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	55
13.	Concentración de $P_{\text{citríco}}$ (ppm) en las chacras UPAG 3 y UPAG 4 con diferente pastura antecesora, durante la zafra 2003-2004, en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	56
14.	Estadística descriptiva: concentración de K (mEq/100 g de suelo) de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	57
15.	Concentración media y coeficiente de variación de K en UPAG 3 y UPAG 4 en zafra 2003-2004 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	58
16.	Estadística descriptiva: contenido de carbono orgánico de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	59
17.	Estadística descriptiva: contenido de N total de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	59
18.	Estadística descriptiva: pH de 0 a 15 cm de profundidad en chacras con diferente pastura	

	antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	62
19.	Comparación de media y coeficiente de variación del pH del suelo en las chacras UPAG 3 y UPAG 4 con diferente pastura antecesora, durante la zafra 2003-2004 y 2008-2009 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	63
20.	Estadística descriptiva: conductividad eléctrica de 0 a 30cm de profundidad en el suelo en chacras con diferentes pasturas antecesoras en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	64
21.	Estadística descriptiva: implantación del cultivo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	66
22.	Estadística descriptiva: No. de tallos/m ² en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	68
23.	Estadística descriptiva: rendimiento en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	69
24.	Estadística descriptiva: nivel de enmalezamiento en primordio en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	72
25.	Estadística descriptiva: altura de lámina de agua en chacras con distinta pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	73
26.	Estadística descriptiva: actividad clorofiliana (SPAD) en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	75
27.	Estadística descriptiva: componentes del rendimiento en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	76

28.	Estadística descriptiva: parámetros de calidad molinera en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	77
29.	Estadística descriptiva: contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en planta y en grano en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	78
30.	Resumen de parámetros de los semivariogramas en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	81
31.	Resumen de parámetros correlacionados significativamente ($p\text{-valor}\leq 0,05$) con rendimiento en chacra con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	84
32.	Análisis de la varianza del rendimiento por clúster en chacra con antecesor raigrás en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	87
33.	Análisis de la varianza del rendimiento por clúster en chacra con antecesor pradera en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	88

Figura No.		
1.	Semivariograma teórico y sus componentes.....	15
2.	Gráfico de cajas de contenido de arcilla en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres	53
3.	Gráfico de cajas de concentración de $P_{\text{citríco}}$ en ppm de 0 a 15cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	55
4.	Gráfico de cajas de concentración de K (mEq/100 g de suelo) de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres	57
5.	Gráfico de cajas de contenido de carbono orgánico de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	59
6.	Gráfico de cajas de contenido de nitrógeno total de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	61
7.	Gráfico de cajas de PH_{h20} de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	63
8.	Gráfico de cajas de conductividad eléctrica del suelo de 0 a 30 cm de profundidad en el suelo en chacras con diferente pastura antecesora, durante la zafra 2003-2004 y 2008-2009 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	65
9	Evolución de la producción de MS/ha promedio en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	66

10.	Evolución del No. de tallos/m ² promedio en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	67
11.	Gráfico de cajas de rendimiento en kg/ha en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	70
12.	Variabilidad de nivel de enmalezamiento en primordio en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	72
13.	Gráfico de cajas de nivel de riego durante primordio floral en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	74
14.	Variograma isotrópico de pH de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacra con antecesor raigrás en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	79
15.	Variograma isotrópico de Ce en chacra con antecesor pradera en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	80
16.	Variograma isotrópico de rendimiento en chacra con antecesor raigrás en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	80
17.	Índices de performance de NCE y FPI de análisis de cluster en chacra con antecesor raigrás en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	85
18.	Índices de performance de NCE y FPI de análisis de cluster en chacra con antecesor pradera en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	85
19.	Boxplot de rendimiento por clúster de propiedades de suelo en chacra con antecesor raigrás en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	86
20.	Boxplot de rendimiento por clúster de propiedades edáficas en chacra con antecesor pradera en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	86

21.	Árbol de clasificación y regresión de rendimiento (kg/ha) en chacras con antecesor pradera y raigrás en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	90
22.	Gráfico de cajas de balance simple de nitrógeno, fósforo y potasio en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres.....	91

1. INTRODUCCIÓN

La evolución de la agricultura a través de los años ha sido impulsada por la necesidad de aumentar la producción de alimentos para abastecer la demanda de la población que se incrementa día a día en el planeta. El desafío de la investigación a nivel nacional e internacional ha sido el de brindar nuevas estrategias productivas para alcanzar incrementos en la producción y al mismo tiempo ser viables desde el punto de vista económico y ambiental.

En el pasado, la incorporación de la siembra directa significó un salto a nivel productivo y ambiental muy importante. Actualmente la acotada rentabilidad de ciertos cultivos y la creciente preocupación ambiental impulsan nuevamente la búsqueda de tecnologías que mejoren la productividad, la eficiencia en el uso de los recursos, y disminuyan el costo productivo que tiende a incrementarse en el tiempo (tierra, combustibles, fertilizantes, etc.).

En este contexto, toma fuerza la implementación de una nueva modalidad en el manejo de cultivos agrícolas conocida como “manejo sitio específico”, también llamada “agricultura de precisión”. Su propósito es el de ajustar los requerimientos de los cultivos a los distintos ambientes edáficos de una chacra, y en consecuencia utilizar más eficientemente los insumos empleados en el proceso productivo. De esta manera se pretende alcanzar un aumento en el rendimiento o una reducción de los costos de producción que derive en la mayor eficiencia en el uso de los recursos que permitiría disminuir el impacto ambiental.

El proceso para llevar a cabo la agricultura de precisión fue resumido por Mantovani et al. (2006) en tres etapas: recolección de datos, procesamiento e interpretación de la información, y, por último, aplicación de insumos a tasa variable.

Para más del 40 % de la población mundial, el arroz (*Oryza sativa*) representa el 80 % de su dieta. Su producción genera una gran actividad económica y social, alimentando y generando trabajo a cientos de miles de personas. Uruguay se sitúa como el principal exportador de arroz en América Latina y séptimo a nivel mundial. Anualmente la exportación de este grano genera ingresos al país valorados en más de 200 millones de dólares (INIA, 2006).

En la zafra 2008-2009 se sembraron 167 488 hectáreas del cultivo, registrando un descenso del 3,2 % con respecto a la zafra 2007-2008. El precio provisorio recibido por los productores en el 2008-2009 por la venta del grano fue 28 % inferior al precio definitivo recibido por la venta de la cosecha 2007-2008. Sumado a esto, en la zafra mencionada se registró un aumento considerable de los costos de producción que alcanzó un 86 % (particularmente durante la

siembra del año 2008) con lo cual los márgenes del negocio se vieron drásticamente disminuidos al finalizar la zafra (Salgado, 2009).

Estos datos ilustran parte de la problemática generada por el incremento de los costos de producción y la oportunidad para explorar el manejo sitio específico en el cultivo de arroz en Uruguay.

Para hacer frente a esta problemática, se han llevado a cabo a nivel nacional, una serie de trabajos de investigación con el objetivo de validar y calibrar la tecnología en los cultivos de arroz, maíz, sorgo, soja y trigo, entre otros.

El Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (en adelante INIA) de Uruguay desarrolló un proyecto dentro del Programa Arroz de INIA Treinta y Tres, en el cual se estudió la implementación de la agricultura de precisión en dicho cultivo. Consecuentemente, se presentaron una serie de objetivos planificados para cumplirse de manera secuencial, con el fin de lograr un eventual uso de la tecnología del manejo sitio específico en chacras de arroz en el Uruguay en el caso de confirmarse su viabilidad.

La finalidad del Programa Arroz en esta temática fue la determinación y la cuantificación de los factores que afectaron la variabilidad del rendimiento de este cultivo en chacras comerciales.

En esta línea, el objetivo del presente trabajo de tesis es aportar nueva información acerca de la identificación y cuantificación de las causas de la variación del rendimiento en dos chacras de arroz semi comerciales durante una zafra, en una zona de producción de arroz tradicional uruguaya.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La variabilidad del rendimiento de los cultivos a nivel de chacra es ampliamente conocida y es en parte consecuencia de la gran heterogeneidad de ambientes edáficos. Se produce a causa de la interacción entre los procesos de formación del suelo, el clima y las prácticas del hombre asociadas a la agricultura a lo largo del tiempo. Entender sus características y su dinámica ayudará a tomar decisiones de manejo acertadas que permitirán mejorar la productividad de los cultivos y reducir la contaminación ambiental (Plant, citado por Pravia, 2009).

Tradicionalmente, en cultivos extensivos el agregado de nutrientes deficitarios mediante la fertilización se ha realizado de forma homogénea, sin considerar las fluctuaciones de fertilidad a lo largo de una chacra. De esta manera, durante la fertilización se producían ineficiencias en cuanto a los requerimientos nutricionales reales de los cultivos (Pravia, 2009). En la actualidad, en un escenario de incremento de costos, la delimitación y fertilización por ambientes adquiere relevancia por presentarse como una vía para alcanzar mejores resultados económicos y ecológicos (Plant, 2001).

2.1. VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO

La formación del suelo es el resultado de la interacción entre el clima, la vegetación y el tiempo. Estos elementos actúan sobre el material geológico parental en las diferentes posiciones topográficas. Las características principales de los suelos están influenciadas por el material parental. Los mismos pueden ser clasificados por pH, materia orgánica, color, textura, estructura, saturación en bases, capacidad de intercambio catiónico, capacidad de almacenamiento de agua, así como otras propiedades químicas y físicas (Mulla y McBratney, 2002).

Dentro de un predio o en distancias cortas, las propiedades edáficas muestran variaciones significativas a pesar de encontrarse en una misma clasificación de suelos. Estas pueden referir a diferencias en el contenido de carbono orgánico, textura, profundidad del horizonte A, nutrientes, entre otros, donde en numerosas ocasiones las diferencias se asocian con las distintas posiciones topográficas de una extensión (Mulla y McBratney, 2002).

La actividad del hombre asociada a la producción agrícola también es responsable de cambios en las propiedades químicas y físicas del suelo (Mulla y McBratney, 2002).

Existen numerosas tareas que modifican las características del suelo para favorecer la producción de alimentos. La disponibilidad de nutrientes está directamente afectada por la fertilización, la porosidad del suelo —determinada

por la preparación de la cama de siembra— y la humedad —relacionada a los residuos de cosecha del último cultivo—, entre otros factores.

Según Kravchenco y Bullock, Li et al., Bronson et al., citados por Terra et al. (2006), la variabilidad espacial de los suelos a nivel de un predio es la principal causa de las diferencias en el rendimiento de los cultivos.

La cantidad de agua almacenada en él, inclusive en zonas con abundantes precipitaciones, es otro de los factores íntimamente relacionados con la variación espacial (Paz et al., Li et al., citados por Terra et al., 2006). El rendimiento del cultivo está ligado a sus características y a la heterogeneidad topográfica (Kravchenco y Bullock, Li et al., Bronson et al., citados por Terra et al., 2006).

Mantovani et al. (2006) definen la variabilidad espacial como la expresión de las diferencias productivas en un mismo campo, en una misma campaña y cosecha. Por otro lado, definen la variabilidad temporal como los cambios de producción de un mismo campo, en distintas campañas de cosecha.

Los cultivos presentan alta variabilidad espacial y temporal (Pocknee et al., Roel et al., citados por Roel y Terra, 2006c). Una de las mayores complicaciones aparece cuando los patrones de variabilidad espacial interactúan con las condiciones climáticas. Por ejemplo, las zonas de alto rendimiento en años con precipitaciones por debajo de lo normal pueden transformarse en zonas de bajo rendimiento en años con precipitaciones excesivas. Por lo tanto, en estos casos, la variabilidad espacial del rendimiento cambia de una zafra a otra (Roel y Terra, 2006c).

Para realizar acciones económica y ambientalmente apropiadas se debe realizar un manejo diferencial, tomando en cuenta la variabilidad espacial y temporal. Por lo tanto, es necesario contar con análisis científicos de tratamientos que consideren ambos tipos de variación (Whelan y McBratney, citados por Pravia, 2009).

2.2. AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y MANEJO SITIO ESPECÍFICO

2.2.1. ¿Qué es la agricultura de precisión o manejo sitio específico?

La agricultura de precisión surge del estudio de la variabilidad del suelo para optimizar la utilización de los recursos. Involucra el uso de información georeferenciada obtenida con la ayuda de instrumentos tecnológicos de reciente difusión, utilizados para recabar información del suelo y del cultivo que permiten llevar a cabo decisiones de manejo localizadas (Mantovani et al., 2006).

La agricultura de precisión ha sido definida por un gran número de investigadores durante su evolución, dando lugar a enfoques diversos pero que convergen en la definición de los conceptos básicos.

Para Plant (2001) la agricultura de precisión es el manejo de los cultivos agrícolas a una escala menor a la de una chacra. En tanto Vanden Heuvel (1996) relaciona este concepto con las aplicaciones de insumos a tasa variable en un predio según la necesidad en cada sitio.

Mantovani et al. (2006) describen a la agricultura de precisión como el conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola.

La aplicación del proceso de agricultura de precisión supone un incremento de la productividad, un mantenimiento de esta o una reducción de los costos, sustentada en el aumento de eficiencia del uso de insumos (Mantovani et al., 2006). Esta tecnología se ha desarrollado e implementado en gran medida en la aplicación variable de fertilizantes, pero también ha tomado relevancia en la aplicación de insecticidas, fungicidas y herbicidas (Bongiovanni, 2006a).

Miller et al., citados por Plant (2001), mencionan tres condiciones fundamentales que se deben cumplir para que la adopción de la agricultura de precisión resulte viable. En primera instancia, deben existir fuentes de variabilidad significativa que generen diferencias en el rendimiento. En segundo lugar, las mismas deben poder ser identificadas y medidas. Por último, la información recabada podrá ser utilizada para modificar las prácticas de manejo tradicionales y posibilitar que a su vez generen un incremento en las ganancias o una disminución del impacto ambiental.

2.2.2. Zona de manejo

Las zonas de manejo son subáreas delimitadas dentro de una chacra que expresan una combinación relativamente homogénea de factores limitantes del rendimiento para las que sería apropiado un manejo similar del suelo y de los cultivos (Kitchen et al., citados por Terra et al., 2008).

Para cada zona de manejo existe una cantidad de insumos que maximiza la eficiencia de aprovechamiento (Doerge, Vridnts et al., citados por Li et al., 2007).

Según Fraisse et al., Plant et al., citados por Roel y Terra (2006c), los principales requerimientos que las zonas de manejo deben cumplir para ser consideradas como tales son: a) las diferencias de rendimientos entre zonas de

manejo deben ser mayores que las diferencias dentro de la zona; y b) los factores limitantes de rendimiento dentro de la zona deben ser los mismos.

Es también conocido que las zonas de manejo pueden ser muy 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. Las mismas no son necesariamente estáticas y posiblemente varíen ante cambios en las prácticas de manejo general de los productores (Roel y Terra, 2006c).

2.2.3. Etapas para llevar a cabo el manejo sitio específico

Existen tres etapas básicas que están involucradas en la implementación de la agricultura de precisión. La primera consiste en la recolección de información de la chacra en la que se pretende desarrollar las estrategias de manejo localizado. Le sigue el análisis y procesamiento de los datos recolectados. Finalmente, y en base a las conclusiones arribadas en los pasos previos, se procede a realizar el manejo agronómico sitio específico en los distintos ambientes productivos de un predio. En caso de no llegar a ninguna resolución, el ciclo comienza de nuevo (Mantovani et al., 2006).

Respecto a la primera etapa, el método más tradicional de relevamiento del nivel de nutrientes del suelo ha sido el calado con extracción de muestras de tierra. Implica el análisis químico de una muestra compuesta de numerosas colectas de suelo al azar en una chacra. Para identificar la variabilidad espacial de un predio, esta metodología obliga a tomar un gran número de muestras georeferenciadas. La desventaja de este método es la demanda de tiempo y dinero para tomar las muestras y realizar los análisis en laboratorios (Plant 2001, Roel y Terra 2006c).

Los avances tecnológicos han propiciado la creación de nuevas herramientas para medir parámetros de utilidad, lo cual favoreció una mejoría en el proceso de recolección de información. Actualmente se cuenta con diversos instrumentos para realizar los relevamientos de información con mayor practicidad y menor costo. Uno de los más frecuentes suele ser el monitor de rendimiento, diseñado para registrar el rendimiento a lo largo de una chacra mientras es cosechada (Bragachini et al., 2006). El monitor permite crear mapas de rendimiento. Este proceso presenta la ventaja de ser sencillo y no implica cambios en las prácticas de manejo tradicional del cultivo. Provee información sobre la variabilidad espacial y temporal de un predio a través de la colecta de mapas de sucesivas cosechas. Esta herramienta requiere que la maquinaria de cosecha esté equipada con instrumentos tales como los sensores de rendimiento, elementos que desde algunos años se utilizan en masa en distintas partes del mundo.

En la segunda etapa se procede a analizar la información relevada. Los aportes más significativos en este paso provienen de la industria del software a través del desarrollo de nuevos programas. Estos están especialmente diseñados para el procesamiento de un gran volumen de información y para resumir e ilustrar los resultados facilitando su interpretación (Mantovani et al., 2006).

En esta etapa juega un rol fundamental la geoestadística, rama aplicada de la estadística que cuantifica la dependencia y la estructura espacial de un parámetro medido en el espacio. A su vez, puede usar la estructura espacial para predecir los valores de la propiedad en sitios no muestreados. La cuantificación de la dependencia y de la estructura espacial forman parte del proceso de modelación espacial. A la predicción de valores a través de la interpolación espacial se la denomina “kriging” (Mulla y McBratney, 2002).

En la última etapa se da cierre al ciclo y se procede a llevar a cabo el manejo diferencial en las distintas zonas de la chacra. Una de las tareas más comunes suele ser la aplicación de fertilizantes a tasa variable. A nivel comercial, hoy también se realizan aplicaciones variables de insecticidas, herbicidas y semillas.

El proceso de la agricultura de precisión no necesariamente implica el uso de mapas de rendimiento o la toma de muestras. Existen equipamientos para realizar las tres etapas en tiempo real. Es decir, adquirir la información del cultivo, procesarla en un sistema informático previamente calibrado y realizar una acción de dosificación variable en el cultivo en una sola acción (Mantovani et al., 2006).

2.2.4. Beneficios de la agricultura de precisión

Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2006b) reconocen que la agricultura de precisión beneficia las siguientes tres áreas: a) productiva, b) administrativa y c) ecológica.

La primera refiere a las actividades económicas y productivas que intentan mejorar la ecuación económica. Algunas de las técnicas que se aplican son: la reducción de costos, el aumento en la producción, el control de calidad, la trazabilidad de la producción, el control de plagas y enfermedades y la fertilización con dosis variable (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006b). Esta última es en la que más foco se ha hecho en los últimos años.

En el área administrativa la agricultura de precisión puede ser adoptada como una herramienta de gestión para registrar datos, supervisar empleados, controlar actividades, fiscalizar a los contratistas y capacitar a los operarios (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006b).

En el área ecológica, es una herramienta útil para proteger el medio ambiente y contribuir a la sustentabilidad de la agricultura (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, citados por Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006b).

Algunos beneficios del manejo diferencial del cultivo por ambientes productivos fueron cuantificados por Koch et al. (2004) en el trabajo en un cultivo de maíz (*Zea mays*) bajo riego, ubicado en la región Noroeste de Colorado, EE. UU. En el mismo se compararon los resultados físicos y económicos de dos manejos de fertilización: uniforme y por ambientes. En términos físicos, se redujo la aplicación de nitrógeno entre un 6,3 % y un 46,1 % en el manejo por ambientes. En términos económicos, el margen a favor del manejo por ambientes fue entre US\$ 4,7 y US\$ 15,67 superior al manejo uniforme.

Pampolino et al., citados por Buresh et al. (2007a), reportaron beneficios productivos y económicos al aplicar las técnicas de manejo localizado en pequeños productores arroceros de Asia. Se encontraron aumentos en rendimiento de 0,9 t/ha en el Delta de Cauvery en el Sur de India, 0,7 t/ha en Luzón Central en las Filipinas y 0,7 t/ha en el Delta de Mekong en el Sur de Vietnam. Además, los autores reportaron valores de incremento en el margen de productores que realizaron manejo localizado frente a los márgenes del manejo tradicional de US\$/ha 168 en India, US\$/ha 106 en Filipinas y US\$/ha 34 en Vietnam. A su vez, se produjo un menor impacto ambiental al utilizar menos pesticidas y una menor emisión de óxido nitroso por unidad de grano producido.

Durigon (2007), trabajando con arroz irrigado en Santa María, Brasil, comparó dos métodos de aplicación de carbonato de calcio. El ensayo mostró un mejor resultado económico con la aplicación variable, la cual logró reducir la cantidad de calcáreo necesario cuando se la comparó con la aplicación uniforme.

2.3. MEDICIÓN DE LA VARIABILIDAD

La variabilidad puede ser estimada utilizando muestreos discretos o continuos. En los continuos se obtienen los valores para un parámetro del suelo en todos los puntos de la chacra. Generalmente se realiza a partir del análisis de imágenes satelitales o aéreas y a través de la obtención de información del suelo mediante técnicas no invasivas utilizando sensores remotos. Un ejemplo de ello son las mediciones de conductividad eléctrica en el suelo. Los muestreos continuos brindan información para todos los sitios de una superficie bajo estudio, sin la necesidad de realizar interpolación de datos entre medidas o de diseñar estrategias de muestreo (Mulla y McBratney, 2002).

Los muestreos discretos generalmente se llevan a cabo a través de la toma de muestras de suelo o plantas en ubicaciones y profundidades predeterminadas mediante técnicas de muestreo destructivos. A diferencia de los

continuos, solo se logra visualizar una porción de una población. Se necesita tomar una cantidad de muestras suficiente que permita inferir sobre el resto de la población no muestreada mediante el uso de técnicas estadísticas (Mulla y McBratney, 2002).

Dentro del conjunto de métodos discretos, el muestreo dirigido en suelos o partes de plantas es la forma tradicional de recolección de información. Se utiliza para la cuantificación de la variabilidad de propiedades físicas y químicas, como la concentración de nutrientes, textura, pH y conductividad eléctrica (Plant, 2001).

En los últimos años se han incorporado instrumentos que han logrado una gran adopción. Los mismos proveen información de suelo y plantas a través del contacto directo o muy próximo mediante sensores remotos. Surgen con el propósito de sustituir y complementar el muestreo de suelos y plantas y los análisis de laboratorio, que conllevan una cantidad de tiempo y dinero considerable (Plant, 2001). Los instrumentos incorporados son: el espectrómetro infrarrojo para la determinación del estatus hídrico, los medidores de inductancia del suelo, y los medidores de la actividad clorofiliana.

2.3.1. Espectrómetro infrarrojo

Los datos obtenidos de sensores remotos, ya sea por satélites o por aviones, son una alternativa válida para obtener información detallada y de bajo costo sobre las condiciones de un suelo o de crecimiento de un cultivo (Plant, 2001).

La radiación emitida en bandas calóricas rojas e infrarrojas del espectro electromagnético se utiliza para estimar la actividad fotosintética de los cultivos. Estas mediciones generalmente se expresan como índices vegetativos, que son combinaciones algebraicas de las medidas de reflectancia de la canopia de los cultivos. Uno de los índices utilizados es el NVDI (del inglés Normalized Difference Vegetative Index, Plant, 2001). Existen diversos trabajos en los que se demuestra el éxito de los índices vegetativos para estimar condiciones de cultivos y el rendimiento de estos (Plant, 2001).

Alves y Mantovani (2006) mencionan una serie de ensayos en los que trabajaron con sensores remotos para la determinación de características físicas y químicas del suelo como la materia orgánica, la textura, la permeabilidad, etc.

Por su parte, López-Lozano et al. (2007), trabajando en el cultivo de maíz, lograron establecer exitosamente una relación matemática para estimar el índice de área foliar (IAF o LAI, del inglés Leaf Area Index) a partir de imágenes satelitales "Quickbird" (satélite comercial de teledetección propiedad de Digital

Globe que fue puesto en órbita en 2001). Gracias a la correlación entre el IAF y la productividad se consiguió estimar el rendimiento del cultivo.

2.3.2. Medidores de conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de un material de conducir una corriente eléctrica. Su magnitud medida en el suelo varía con la textura, la salinidad, el contenido de agua, la compactación y la cantidad de materia orgánica en el suelo. Algunos factores como la temperatura y el remanente de rastrojos en la superficie influyen en el registro de los datos (Sarec et al. 2002, Sudduth et al. 2005).

El censo de suelo Veris® Tech 3100 es una de las herramientas diseñada para medir la conductividad eléctrica en el suelo. Presenta características similares a una pequeña disquera, que cuenta con una fila de seis discos con electrodos que registran la conductividad eléctrica del suelo a 30 y a 90 cm de profundidad. Esta herramienta es arrastrada por un vehículo equipado con un GPS, lo cual permite registrar valores de conductividad eléctrica georreferenciados.

En el manejo por ambientes, los mapas de conductividad eléctrica proporcionan información complementaria a los mapas de rendimiento. Esto resulta útil para la toma de decisiones en la identificación de ambientes productivos de una chacra (Sarec et al. 2002, Sudduth et al. 2005, Corwin y Plant 2005b).

Diferentes trabajos en los que se ha utilizado la conductividad eléctrica para determinar características físicas como el contenido de materia orgánica (Jaynes et al., citados por Sarec et al., 2002), contenido de arcilla (Williams y Hoey, citados por Sarec et al., 2002) y capacidad de intercambio catiónico. Las características mencionadas tienen una relación importante con la capacidad de retención de agua de un suelo, que suele ser uno de los factores principales en la determinación del rendimiento, sobre todo en cultivos de secano.

Esta herramienta fue utilizada para identificar zonas con alta salinidad (Rhoades y Corwin, citados por Sarec et al., 2002) y otra serie de características físicas, incluyendo el contenido de humedad del suelo (Kachanoski et al., citados por Sarec et al., 2002), Ca y Mg intercambiable (Doolittle et al., citados por Sarec et al., 2002) y capacidad de originación de nitrógeno.

Terra et al. (2006), trabajando en el cultivo de algodón en Alabama, EE. UU., encontraron la relación entre la conductividad eléctrica y algunas características del terreno, entre ellas el contenido de arcilla ($r=0.43$) y la pendiente ($r=0.66$). En referencia a la temperatura, los autores detectaron

imprecisiones en las mediciones cuando se realizaron a 0°C. A su vez, los autores observaron que, en presencia de grandes cantidades de rastros de cultivos antecesores, pueden registrarse valores de conductividad eléctrica poco precisos.

Existen trabajos nacionales en los que se utilizó la conductividad eléctrica como herramienta tentativa para la delimitación de zonas de manejo (Roel y Plant 2004a, Roel 2005, Pravia 2009).

2.3.3. Medición de la actividad clorofiliana

La fertilización nitrogenada es una tarea de gran relevancia, dada su incidencia en la producción de cereales. Su calibración ha sido objeto de estudio de investigadores que han buscado mejorar el resultado productivo, económico y ambiental de la actividad. Nuevos métodos para estimar los requerimientos de nitrógeno en tiempo y cantidad adecuados produjeron mejoras en esta área. Estos métodos se basan en la estimación de forma periódica de la actividad clorofiliana en los cultivos. Complementan los diagnósticos tradicionales que involucran sustracción de suelo o tejidos vegetales y análisis de laboratorio, que implican mayor inversión de tiempo y dinero.

Existen dos formas de medición indirecta de los niveles de la clorofila que han logrado una adopción importante en el manejo sitio específico. Estos son: SPAD (del inglés, Soil Plant Analysis Development) y LCC (del inglés, Leaf Color Chart). La practicidad de estas herramientas y sus beneficios económicos han conducido a una rápida adopción por parte de productores agrícolas en un gran número de países (Turner y Jund 1994, Singh et al. 2002).

Minolta SPAD 502 es un medidor electrónico portátil del verdor de las hojas que permite estimar la actividad clorofiliana. Esta herramienta no muestra la cantidad de nitrógeno necesaria a agregar, sino que indica cuándo es esperable obtener respuesta al agregado de este elemento. No sustituye a los métodos de diagnóstico tradicionales, sino que los complementa (Turner y Jund 1994, Singh et al. 2002).

La lógica del uso de este instrumento está dada por la correlación positiva entre el contenido de nitrógeno en las plantas, el verdor de estas y el rendimiento del cultivo (Turner y Jund, 1994).

Los valores del SPAD dependen de una serie de factores que deben considerarse a la hora de tomar las medidas. Estos factores son: la cantidad de nitrógeno aplicado previamente, el estado fenológico de la planta, la posición de la hoja en la que se realiza la lectura, la posición de la medida en la hoja, variedad,

el momento en el día que se toma la medida, la densidad de plantas y la presencia de síntomas de clorosis provocados por otros factores.

Turner y Jund (1994) estudiaron el uso del SPAD 502 para adaptar las medidas de verdor a la necesidad de nitrógeno en los cultivos de arroz. En este estudio se determinó que, en un período de 10 días previos y posteriores a la diferenciación de la panícula, las mediciones de SPAD permitieron identificar los rangos de valores en los que era esperable observar respuesta al agregado de nitrógeno.

El costo del SPAD puede ser restrictivo para el alcance económico de algunos productores, por lo que el LCC se considera como una alternativa confiable de bajo costo para utilizar como guía que suministre nutrientes a los cultivos (Singh et al. 2002, Buresh 2008).

El LCC consiste en una cartilla que presenta cuatro o seis niveles de intensidad de verde asignada a una numeración del uno al cuatro o al seis, siendo uno el nivel de menor intensidad y cuatro o seis el mayor. Cada nivel de la cartilla representa la intensidad de la actividad clorofiliana de la hoja que se contrasta. El nivel de verdor se identifica a campo contrastando el verdor de la cartilla con los de las hojas de las plantas de arroz. Esta herramienta se utiliza con previa calibración de los niveles de verdes y según la necesidad de nitrógeno (Singh et al. 2002, Buresh et al. 2007a, Buresh 2008).

Motivados por la baja eficiencia de las fertilizaciones nitrogenadas en cereales y por los riesgos de polución de los cursos de agua de las zonas agrícolas, Singh et al. (2002) estudiaron el uso del SPAD y el LCC. Realizaron pruebas de fertilización en trigo y arroz en el Noroeste de India, donde habitan un gran número de productores agrícolas.

En cuatro años de evaluación, manejando cuatro cultivares, y con la utilización del SPAD y el LCC para determinar el agregado de nitrógeno, se lograron rendimientos similares a los obtenidos con las recomendaciones habituales. Respecto a la cantidad de fertilizante nitrogenado utilizado, se redujo entre un 12,5 % y un 25 % la dosis recomendada habitualmente para el arroz. Los ensayos que se condujeron en trigo lograron un aumento en la producción de un 20 %, lo cual está también asociado a un uso más eficiente del nitrógeno (Singh et al., 2002).

El IRRI (por su sigla en inglés, International Rice Research Institute), en asociación con otros organismos, ha fomentado el uso de técnicas y herramientas para maximizar la utilización de los nutrientes en el cultivo de arroz. El uso del LCC forma parte de las recomendaciones para facilitar la toma de

decisiones sobre el agregado de nitrógeno en los cultivos de arroz (Buresh et al. 2007b, Buresh 2009).

2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Existen diversos enfoques para abordar un análisis estadístico a la hora de describir la variabilidad de una propiedad del suelo o de un cultivo cuando se trabaja en un predio. El enfoque tradicional muestra la frecuencia de la distribución de una población, pero no brinda información acerca de la distribución espacial de los sitios muestreados (Mulla y McBratney, 2002). En la agricultura de precisión es esencial proporcionar información respecto de la ubicación de cada punto en el espacio y determinar la relación entre ellos. Al análisis de datos con un componente espacial se lo denomina geoestadística (Plant, 2001).

2.4.1. Geoestadística

Normalmente, la magnitud de una propiedad en dos sitios que se encuentran próximos tiende a ser más similar que la magnitud relevada en sitios más distantes. No se encuentran distribuidas de forma aleatoria o, dicho de otra manera, se encuentran espacialmente correlacionadas (Oliver, citado por Mulla y McBratney, 2002). Por el contrario, en largas distancias los valores de las propiedades tenderán a ser diferentes o espacialmente no correlacionadas (Mulla y McBratney, 2002).

La geoestadística es una rama aplicada de la estadística que cuantifica la dependencia y la estructura espacial y utiliza la estructura para predecir los valores en sitios no muestreados. A estos dos procesos se los denomina modelación (variografía) e interpolación espacial (kriging) respectivamente (Mulla y McBratney, 2002).

En geoestadística el término autocorrelación significa la correlación de una variable con respecto a si misma a través del espacio. Existen dos razones para determinar la autocorrelación de una propiedad: a) medir la fuerza de la autocorrelación espacial dentro de un mapa; b) probar el supuesto de independencia o de aleatoriedad de los datos (Best y León, 2006).

2.4.1.1. Variograma o semivariograma

Un variograma o semivariograma es una descripción matemática de la relación entre la varianza entre pares de observaciones (datos) y la distancia que los separa (Best y León, 2006). Teóricamente debería ser igual a la varianza de la población cuando la separación es muy grande (Mulla y McBratney, 2002). Mide la disimilitud promedio entre pares de datos separados por el vector de distancia (Wollenhaupt et al., 1997).

Se calcula como la mitad del cuadrado de la diferencia entre los componentes de pares de datos:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z_i - Z_{i+h})^2$$

Siendo $N(h)$ la cantidad de pares de datos separados a una distancia h , y Z_i y Z_{i+h} el valor de los puntos de muestreo separados por la distancia h . Los semivariogramas suelen aumentar su valor a medida que la distancia h se incrementa hasta una distancia de h tan grande que se estabiliza (Wollenhaupt et al., 1997).

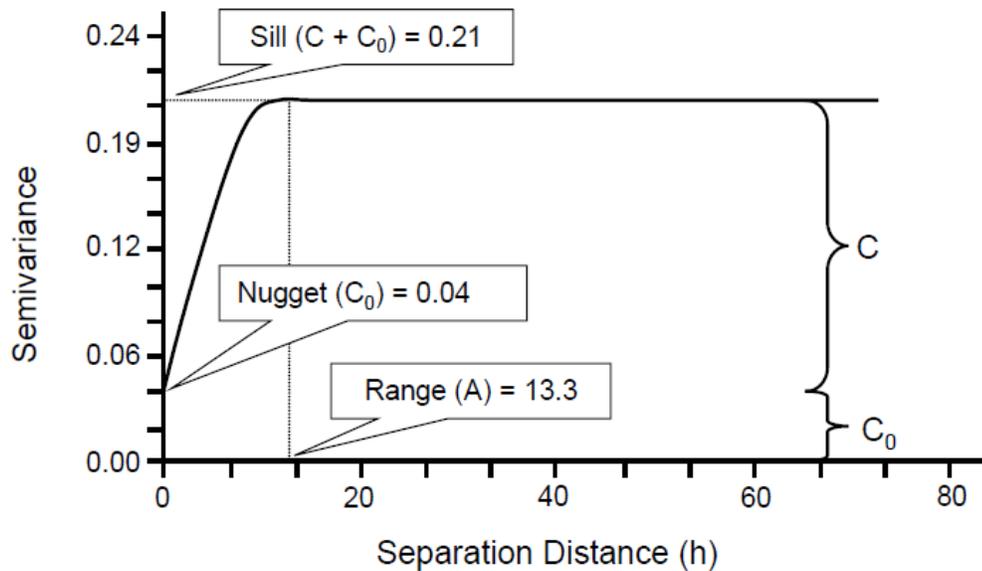
Existen diferentes modelos teóricos que se utilizan para describir la semivarianza de poblaciones de datos. Entre los más frecuentes se encuentran: el lineal, el esférico, el exponencial y el gaussiano (Mulla y McBratney 2002, Best y León 2006).

La modelación espacial consiste en elegir la función matemática que mejor describa la semivarianza de un set de datos. El mejor o peor ajuste a la curva de semivarianza real se puede evaluar comparando la magnitud del coeficiente de determinación (R^2) y de la suma de cuadrados residuales de cada uno de los modelos (Robertson 2008, Mayer, citado por Pravia 2009).

La función teórica de la semivarianza presenta ciertos parámetros característicos que sirven para cuantificar la dependencia y la estructura espacial de una población cualquiera (véase figura 1).

Estos parámetros son:

- el efecto pepita (en inglés, nugget), que corresponde al valor de semivarianza cuando la distancia entre pares de datos es cero (C_0) y representa el error de tipo experimental. Existen situaciones en las que se observa un “efecto pepita puro”, donde su valor se asemeja a la varianza de la población. En estas situaciones la autocorrelación no existe.
- La meseta (en inglés, sill), valor en el cual la semivarianza deja de aumentar ($C + C_0$), y que corresponde a la varianza de la población.
- El rango (en inglés, range), que es la distancia a partir de la cual no aumenta más la semivarianza (Wollenhaupt et al., 1997). Este valor representa la distancia a partir de la cual la propiedad deja de estar espacialmente correlacionada.



Sill ($C + C_0$) = asíntota. Nugget (C_0) = Pepita. Range (A) = rango. Semivariance = semivarianza. Separation Distance (h) = distancia.

Figura 1. Semivariograma teórico y sus componentes

Fuente: Robertson (2008).

La semivarianza del efecto pepita (n), expresado como porcentaje de la semivarianza total o asíntota (s), permite comparar el peso relativo de los errores de tipo experimental en la varianza de las propiedades (Trangmar et al., citados por Cambardella et al., 1994).

Cambardella et al. (1994) utilizaron la relación $(n/s) \times 100$ para clasificar el grado de dependencia espacial en cada una de las propiedades de la siguiente manera: $n/s \leq 25\%$ corresponde a una dependencia espacial fuerte; si la relación está comprendida entre 25% y 75% la dependencia espacial es moderada; y si la relación es mayor a 75% , la dependencia espacial es débil.

El rango de la correlación también constituye un parámetro de clasificación del alcance de esta, siendo un parámetro de gran utilidad a la hora de definir estrategias de muestreo (Mulla y McBratney, 2002).

2.4.2. Análisis de clústeres o conglomerados

Un análisis de clúster o conglomerados es una técnica de análisis exploratorio de datos que se utiliza para resolver problemas de clasificación. El

propósito de este tipo de análisis es el de ordenar objetos, en este caso valores numéricos en grupos, con la condición de que el grado de asociación-similitud entre integrantes del clúster sea más fuerte que entre clústeres (Villardón, s.f.).

Consiste en una serie de algoritmos que realizan el agrupamiento de datos en grupos, teniendo en cuenta un tipo de medición de similitud dentro de los grupos y de diferencia fuera de estos. Esta técnica suele ser el punto de partida de trabajos de investigación para generar hipótesis. El algoritmo que realiza las divisiones busca minimizar la varianza dentro de los grupos y maximizarla entre los grupos (Roel, 2006b).

Para Roel y Terra (2006c), el análisis de clústeres es una de las herramientas más difundidas para la creación de zonas manejo debido a su objetividad y neutralidad en el procedimiento.

2.4.3. CART

El término CART proviene del inglés “Classification and Regression Tree”. CART es un método estadístico no paramétrico desarrollado por Breiman et al. (1994) que utiliza una estructura de árbol para resolver problemas de clasificación y regresión (Pravia, 2009).

El análisis de CART es un conjunto de técnicas estadísticas que permite modelar y explorar la existencia de múltiples relaciones causa-efecto, tanto en el tiempo como en el espacio, dentro de una misma base de datos (Roel, 2006b).

Este método utiliza algoritmos de particiones binarias recursivas, para crear una llave dicotómica que describa las relaciones como el rendimiento y los factores que lo influyen (Plant, 2001).

Está diseñado para trabajar con bases de datos que puedan tener múltiples estructuras a diferentes escalas espaciales y temporales (Roel y Plant, citados por Roel, 2006b).

Roel (2006b) indica que si la variable de respuesta es nominal u ordinal (por ejemplo, nivel de riego alto, medio o bajo) se aplica el método de clasificación. En caso de que la variable de respuesta sea numérica continua (por ejemplo, rendimiento) se aplica el método de regresión.

CART se presenta como un método relativamente didáctico a la hora de explicar los resultados de estudios exploratorios en los que el rendimiento depende de un gran número de variables y se pretende explicar la importancia relativa de cada una de estas.

Según Plant (2001), CART presenta numerosas ventajas sobre los métodos de regresión clásicos: 1) no hay necesidad de especificar una función y verificar si se ajusta a los datos; 2) realiza una selección automática de datos; 3) minimiza el efecto de los datos “fuera de tipo” (en inglés, “outliers”) aislándolos en nodos más pequeños; y 4) al aislar el efecto de las variables en ramas del árbol, puede mostrar un contexto de dependencia e interacciones entre variables.

2.5. ANTECEDENTES

En las últimas décadas se condujeron numerosos estudios orientados a descubrir y cuantificar las causas de la variación del rendimiento de cultivos de interés comercial. Estos trabajos tienen en común el estudio exhaustivo del suelo y la cuantificación de la variabilidad de sus propiedades físicas y químicas. Con esta información analizaron la conexión con la variación del rendimiento y su potencial uso para mejorar la ecuación económica y productiva.

Melchiori et al. (2000) realizaron un ensayo en trigo (*Triticum aestivum*) en un establecimiento ubicado en la localidad de Balcarce, provincia de Buenos Aires, Argentina, para identificar las correlaciones existentes entre diversas propiedades del suelo y el rendimiento del cultivo. En este experimento, se determinó el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio catiónico, la concentración de cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K), la profundidad del suelo y el contenido de carbono orgánico, fósforo y nitrógeno como nitrato a 60 cm de profundidad.

Los resultados mostraron en primera instancia cierta dependencia espacial del rendimiento de trigo. Algunas características como la profundidad del suelo y el contenido de nitrógeno a la siembra, no presentaron correlación alguna con los datos de rendimiento. Por otro lado, las concentraciones de los cationes K, Ca y Mg se correlacionaron con el rendimiento cuando se los analizó mediante un modelo de regresión múltiple o como la relación $K^+/(Ca + Mg)$, lo cual explicó entre el 70 % y el 74 % de la variación del rendimiento.

En un estudio similar, López-Lozano et al. (2007) en Huesca, España, analizaron la incidencia de la variabilidad edáfica en el desarrollo de un cultivo de maíz bajo riego en un área de 60 hectáreas durante dos zafas de verano (2004 y 2005). El objetivo fue estimar correctamente la producción de maíz a partir de imágenes satelitales Quickbird y estudiar su relación con los rasgos edáficos. Para esto se cartografió el IAF (Índice de Área Foliar) y se realizaron muestreos georreferenciados de la concentración de nutrientes (Na, K, Mg, P y Ca), la conductividad eléctrica, el contenido de arena y arcilla y la topografía del terreno.

En los sitios de conductividad eléctrica más alta se encontraron que los niveles de producción y de IAF fueron los más bajos. Los altos registros de

conductividad eléctrica se hallaron en zonas con mayor contenido de sodio y magnesio. López-Lozano et al. (2007) mencionan que este comportamiento se explica por el hecho de que los suelos salino-sódicos presentan alto contenido de sodio y otros cationes en exceso que resultaron contraproducentes para el desarrollo de las plantas.

Los resultados en dos años con registro pluviométrico dispar sugirieron que el relieve del terreno afectó el desarrollo del cultivo, inclusive en situaciones con riego. En el año donde las precipitaciones fueron escasas (2005) se produjo una deficiencia hídrica mayor en los sitios más elevados. En dichas zonas, la granulometría del suelo no permitió la retención de agua, provocando que los rendimientos en el cultivo de maíz fueran inferiores a las zonas más bajas o con mayor capacidad de acumulación de agua. Contrariamente, en el año lluvioso (2004) el exceso de lluvias evidenció regiones en las que se produjeron encharcamientos prolongados que afectaron el normal desarrollo del cultivo al impedir que las raíces pudieran absorber nutrientes correctamente (López-Lozano et al., 2007).

En la investigación de la siembra directa como sistema alternativo al convencional, Terra et al. (2006) estudiaron los efectos de la variabilidad espacial del suelo y los atributos del terreno en la productividad de semilla de algodón (*Gossypium sp.*) y maíz comparando los dos sistemas de laboreo en un predio de nueve hectáreas de Alabama, EE. UU., durante tres años.

En el cultivo de algodón el rendimiento fue afectado por el año y por el sistema de laboreo, no habiendo encontrado diferencias en el uso de abonos para esa serie de años.

En tres años el rendimiento promedio de los tratamientos con siembra directa fue 14 % superior a los tratamientos con laboreo convencional.

Se notaron ciertas diferencias entre los distintos años de producción. En 2001 y 2002 el registro de precipitaciones fue sustancialmente inferior al 2003 y en consecuencia los tratamientos bajo siembra directa presentaron una ventaja notoria sobre los de laboreo convencional. En el 2003 (año húmedo) el contenido de arcilla, la conductividad eléctrica y la pendiente se correlacionaron negativamente con el rendimiento, dado que las áreas con estas características generalmente se encontraron con un mayor nivel de erosión. Estas zonas se correspondieron con suelos de peor calidad, y por lo tanto con mayor probabilidad de presentar limitantes en la capacidad de retención de agua y deficiencia de algunas propiedades químicas (Terra et al., 2006).

En los tratamientos con laboreo convencional, los suelos más erosionados y degradados resultaron determinantes en la variación del

rendimiento en los años secos y se correlacionaron de forma negativa. Además, los factores drenaje y humedad del suelo tuvieron alta correlación en los sistemas de laboreo, pero no para la siembra directa (Terra et al., 2006).

El drenaje fue el factor de mayor incidencia en el rendimiento para el año 2003 (año húmedo) en laboreo convencional y sobre todo en cero laboreos, donde mostró una correlación negativa a consecuencia de producir excesos hídricos que disminuyeron el rendimiento (Terra et al., 2006).

Otro aspecto de particular importancia entre los tratamientos mencionados fue la variación de rendimiento intra-chacra en los distintos años. Los resultados mostraron que en los sistemas de cero laboreos la variabilidad del rendimiento fue menor que en aquellos con laboreo (Terra et al., 2006).

En el cultivo de maíz se realizaron las mismas tareas de muestreo, cosecha y búsqueda de correlaciones entre las variables analizadas. Al igual que en la producción de semilla de algodón, el cero laboreo logró una productividad 12 % mayor que el laboreo convencional (Terra et al., 2006).

También se observó una disminución en la variabilidad de los rendimientos entre parcelas y entre los distintos años de las parcelas con cero laboreos (Terra et al., 2006).

A nivel nacional, Del Campo (2007) realizó un estudio preliminar de los principales factores asociados a la variación del rendimiento del cultivo de maíz comercial típico de Uruguay.

El objetivo del trabajo de Del Campo (2007) fue evaluar propiedades químicas, físicas, hídricas y topográficas. Obtuvo como resultado, que las propiedades de mayor impacto fueron la topografía y la textura. La elevación y la pendiente del terreno se correlacionaron fuertemente con el rendimiento del cultivo con un $r=0,65$ y $r=-0,45$ respectivamente. En base a un modelo de regresión múltiple, Del Campo (2007) determinó que la elevación contribuyó a explicar de forma moderada ($r^2=0,42$) parte del rendimiento.

Por su parte, Pravia (2009) evaluó el efecto de las prácticas de manejo del suelo en el rendimiento del sorgo granífero (*Sorghum bicolor*) a escala de chacra en el departamento de Treinta y Tres durante tres zafas de verano. En el ensayo se evaluaron tres sistemas de rotación utilizando cultivos continuos (sorgo y soja) con pasturas de corta y larga duración. La variabilidad en las propiedades edáficas se identificó mediante un muestreo en grilla donde se midieron el carbono orgánico, la concentración de fósforo y potasio, y la conductividad eléctrica.

Para los tres años de estudio, la mayor variabilidad del rendimiento se observó entre años (variabilidad temporal) y estuvo asociada a las diferencias de precipitaciones de zafra. Los atributos del terreno y la conductividad eléctrica explicaron el 77 % de la variación y determinaron entre un 14 y un 69 % del rendimiento dentro de las chacras. La delimitación de zonas de manejo a partir de la disponibilidad de nutrientes no fue posible. Tampoco se detectaron correlaciones entre C orgánico, P, K y la productividad del cultivo de sorgo (Pravia, 2009).

Resultados similares fueron obtenidos en el cultivo de soja (*Glycine max*) en la zafra 2007-2008 por Otaño y Saruki (2010), los cuales trabajaron en dos chacras comerciales en el departamento de Soriano, Uruguay. En el mismo se estudió la interacción entre variabilidad espacial de un terreno a cuatro niveles de fertilidad (refiere a cuatro niveles de fertilización fosfatada) del suelo y la productividad del cultivo. Las propiedades fisicoquímicas y topográficas del sitio bajo estudio se exploraron mediante muestreos intensivos georreferenciados y mapas topográficos donde entre otras variables se midieron las concentraciones de nutrientes, la conductividad eléctrica, la disponibilidad de agua en el suelo, la posición topográfica y la pendiente.

La conductividad eléctrica explicó entre un 15 % y 50 % de la variación del rendimiento para el sitio 1 y 2 respectivamente. A su vez, en el sitio 1 la conductividad eléctrica, el contenido de agua potencialmente disponible y el nivel de fertilidad explicaron el 73 % de la variación del rendimiento. Otaño y Saruki (2010) llegaron a la conclusión, al igual que el estudio de Pravia (2009), de que los atributos del terreno (pendiente y elevación) fueron los principales determinantes del rendimiento de soja, dejando en un segundo plano la fertilidad natural o artificial.

Respecto al uso de monitores de rendimiento, Coitiño y Mazzoni (2011) estudiaron la respuesta productiva del cultivo de trigo en dos ambientes (A y B) delimitados por mapas de rendimiento, a distintas combinaciones de fertilización con P, K y S en una chacra comercial situada en Río Negro, Uruguay.

Los testigos sin fertilizar mostraron la existencia de dos ambientes ($B=3538$ kg/ha y $A=4645$ kg/ha) y confirmaron la factibilidad del uso de los mapas de rendimiento para la delimitación de zonas de manejo (Coitiño y Mazzoni, 2011).

De la combinación de tratamientos y la dosis de nutrientes se observó que la mayor respuesta se asoció al K, con un porcentaje del 26 % (1090 kg/ha) cuando fue agregado en combinación con P, y del 19 % (806 kg/ha) cuando fue agregado con P y S (Coitiño y Mazzoni, 2011).

Coitiño y Mazzoni (2011) determinaron mayor respuesta a la fertilización del ambiente B (1062 kg/ha) frente al A (115 kg/ha). Ambos llegaron a rendimientos muy similares. Esto indicó la existencia de distintos factores limitantes entre ambientes, donde determinadas situaciones pudieron revertirse, y de allí la factibilidad de realizar manejos diferenciales en una misma chacra.

En el departamento de Treinta y Tres, Bonilla y Feuer (2011) evaluaron la respuesta vegetal en cultivos de soja y sorgo bajo distintos criterios y métodos de fertilización con NPK en diferentes rotaciones agrícolas de siembra directa. También estudiaron la variabilidad espacial de atributos edáficos y productivos.

Para esto Bonilla y Feuer (2011) condujeron tres ensayos en los que se encontró que el sistema de fertilización variable logró un menor coeficiente de variación en el rendimiento, pero no siempre significó una mayor producción. El sistema de fertilización variable fue superior o igual al sistema uniforme en rendimiento cuando no hubo interacción criterio-sistema.

En los potreros bajo evaluación, el contenido de P fue mayor y menos variable en la rotación de cultivos continuos debido a un mayor número de aplicaciones del nutriente necesarias en este tipo de rotación. En los ensayos de rotaciones con pasturas observaron mayor variabilidad causada por la presencia de animales pastoreando que redistribuyeron el P con las heces y también debido a la movilidad del fertilizante aplicado (fosforita) en las pasturas. Se aplicó más P en el sistema variable que en el uniforme en potreros en rotación cultivo-pastura (Bonilla y Feuer, 2011).

Los niveles de K en los suelos fueron inferiores a 0,35 mEq/100 g de suelo y fueron parejos entre los tres ensayos debido a que no se habían realizado aplicaciones del nutriente en los últimos diez años. Por esto, no observaron diferencias entre la fertilización variable y la uniforme (Bonilla y Feuer, 2011).

La fertilización con N a V6 fue levemente superior en la rotación sorgo-cultivo continuo que en sorgo-rotación corta, no habiendo encontrado diferencias entre sistemas de fertilización (Bonilla y Feuer, 2011).

La variabilidad espacial de las propiedades del suelo como la topografía, la conductividad eléctrica y la capacidad de almacenaje de agua pudieron afectar los resultados de los tratamientos. Además de los factores mencionados, existieron condiciones ambientales (exceso hídrico y enmalezamiento) que también incidieron en los tratamientos (Bonilla y Feuer, 2011).

Los estudios mencionados hicieron referencia a una serie variada de factores limitantes del rendimiento, en su gran mayoría en cultivos de secano. Cuando se dejaron de lado ciertos factores de manejo del cultivo como el control

de malezas o la densidad de siembra —entre los más frecuentes—, se encontraron los factores asociados a la capacidad de retención de agua tales como la topografía, la textura e inclusive al grado de erosión de los suelos. Todos vinculados a la capacidad de retención de agua y, consecuentemente, al balance hídrico de los ambientes productivos en los cuales se desarrollan los cultivos. En los casos en que el agua no fue el factor limitante, se lograron detectar propiedades químicas que limitaron el rendimiento. Esto permitió delimitar zonas de manejo.

2.6. FACTORES QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DEL CULTIVO DE ARROZ

El ambiente y el manejo agronómico del cultivo de arroz han llevado a que Uruguay se ubique entre los países con mayor rendimiento por hectárea. En el período que va desde el 2000 hasta el 2013, el aumento del rendimiento promedio anual fue de 1,88 %. Se lograron niveles actuales del entorno de los 8 mil kg/ha de promedio nacional (Pérez de Vida, 2014).

Se estima que en las condiciones agroclimáticas de Uruguay hay un potencial de producción de entre 11 mil y 12 mil kg/ha (Pérez de Vida, 2011). Es evidente que existen factores que reducen el rendimiento potencial al rendimiento de chacra. Tanto la radiación, las precipitaciones o la temperatura afectan el rendimiento y no es posible modificarlas. Pero sí es posible incidir en factores como la concentración de nutrientes, la densidad de plantas, el control de malezas y enfermedades o el aporte de agua. En la siguiente sección se mencionaron algunas consideraciones agronómicas en el manejo del cultivo de arroz en Uruguay.

2.6.1. Disponibilidad de nutrientes (N, P, K, Zn)

La deficiencia de nutrientes limita la productividad de cualquier cultivo; por esto, la fertilización ha sido objeto de estudio desde los inicios de la agricultura. En Uruguay existen cuatro nutrientes de gran relevancia en el manejo comercial de la nutrición del cultivo de arroz: nitrógeno, fósforo, potasio y zinc.

El ajuste de la fertilización nitrogenada en el país se ha desarrollado en base a una serie de ensayos realizados por el INIA. Tradicionalmente el aporte de N ha consistido en el fraccionamiento de 100 kg/ha de urea (46 % de N) en las etapas de macollaje y primordio sin considerar antecesor, variedad, historia, manejo del suelo o fertilidad natural (Castillo et al., 2012). Sin embargo, en los últimos años se han estudiado otros métodos para estimar los requerimientos de N. Castillo et al. (2014), luego de tres años de evaluación en diferentes condiciones, encontraron que el potencial de mineralización de nitrógeno (en adelante PMN) medido en macollaje (V5) y el porcentaje de N absorbido en primordio (R0) pueden ser utilizados como criterio de fertilización de N con mayor

precisión. El valor de PMN por encima del cual no se espera respuesta al agregado de N es de 50 g/kg NH₄.

El fósforo es otro de los nutrientes esenciales que se tiene en cuenta previo a la instalación del cultivo. En Uruguay, los suelos sin historia agrícola reciente presentan niveles en el entorno de las 3 ppm, dependiendo del material formador. Valores superiores a estos se encuentran luego de varios años en secuencia agrícola o con pasturas sembradas a raíz de sucesivas fertilizaciones con fertilizantes fosfatados. El nivel crítico de referencia para el P es de 6 a 7 ppm medido por el método de ácido cítrico o Bray 1 (Hernández y Berger, citados por Méndez et al., 2015). Estudios llevados a cabo por Deambrosi et al. (2011) indican que se necesitan 11 y 16 kg/ha P₂O₅ para elevar 1 ppm por el método de Bray 1 y ácido cítrico respectivamente.

Según Barbazán et al. (2011), el nivel crítico de potasio para los cultivos de secano más sembrados en Uruguay (soja, trigo, maíz, girasol, sorgo) es de 0,34 mEq/100 g suelo y existen cinco millones de hectáreas deficitarias de este nutriente. Deambrosi et al. (2001b) realizaron catorce ensayos en tres años de respuesta al agregado de K en los cultivares de arroz más sembrados en su momento (El Paso 144, INIA Olimar e INIA Tacuarí). En estos no se observó respuesta en rendimiento a niveles superiores a 0,15 mEq/100 g suelo. Por el contrario, se encontró respuesta en niveles comprendidos entre 0,11 y 0,13 mEq/100 g de suelo. Adicionalmente se observó una menor incidencia del manchado de vainas en INIA Tacuarí al fertilizar con K con un nivel en suelo de 0,16 mEq/100 g de suelo, pero sin respuesta en rendimiento.

La inclusión del zinc en el aporte de nutrientes al cultivo de arroz en Uruguay surge luego de años de investigación de suelos con problemas serios de productividad llamados “blanqueales”.

Deambrosi y Méndez (1996) encontraron respuestas significativas a la aplicación de sulfato de zinc en suelos halomórficos con pH de 6,91 en el horizonte “A”.

Lavecchia et al. (2000) mencionan que 20 ppm de zinc en hojas de plantas de arroz es un nivel suficiente para el crecimiento normal.

En un ensayo realizado en el Paraje Yaguarí en el Departamento de Tacuarembó, Lavecchia et al. (2000) fertilizaron con diferentes dosis de sulfato de zinc. Los resultados evidenciaron una mayor absorción del nutriente en las parcelas con mayores dosis de fertilización con este nutriente, pero no encontraron diferencias significativas en rendimiento, inclusive habiendo encontrado concentraciones en hojas por debajo de las 20 ppm.

Deambrosi et al. (2010), luego de varios años de evaluar la fertilización con zinc en arrozales de Uruguay, mencionan que las situaciones de respuesta se dan en suelos con pH mayor a 6 unidades y concentración de sodio de 3,5 y 5,9 mEq/100 g de suelo.

2.6.2. pH

Para Havlin et al., citados por Pagani (2013), el rango de pH óptimo para producir arroz se encuentra entre 5 y 7 unidades.

Chebataroff (2013) menciona que los valores más favorables rondan las 6,6 unidades. En estas condiciones se ven favorecidas las actividades microbiológicas y existe buena disponibilidad de P. Además, los compuestos tóxicos con Al, Fe, CO₂ y ácidos grasos se encuentran en baja concentración.

Normalmente, el pH de los suelos predominantes de la zona Este de Uruguay previa inundación, se encuentra en un rango comprendido entre 5,0 (los más ácidos) y 6,6 unidades (los más alcalinos, Castillo et al. 2009, 2012).

El pH de los suelos inundados tiende a la neutralidad a medida que el nivel de O₂ disminuye debido al incremento en la concentración de compuestos reducidos y iones oxidrilos (Chebataroff, 2013).

2.6.3. Textura

La textura del suelo es una propiedad fundamental para considerar una zona de producción de arroz bajo riego. Particularmente, el contenido de arcilla tiene un rol fundamental en el uso del agua y en la productividad (Tsubo et al., citados por Tsubo et al., 2007).

La textura del suelo afecta el movimiento y la disponibilidad de agua y aire a través de este, influencia el crecimiento de las raíces, la absorción de nutrientes y agua y el crecimiento en general de las plantas. Los suelos arroceros suelen ser arcillosos. La arcilla es el componente más importante de la fracción mineral del suelo por su alta superficie específica y consecuentemente por su capacidad de retener nutrientes y agua. Cuando el contenido de arcilla es de al menos un 35 %, ese suelo ya posee las características de un suelo arcilloso (Xiangping et al., 2018).

Ye et al. (2007) realizaron ensayos de fertilización nitrogenada en cuatro variedades de arroz en dos tipos de suelos contrastantes: uno arcilloso y otro arenoso. Para las cuatro variedades y las distintas dosis de nitrógeno se alcanzaron rendimientos superiores en el suelo arcilloso. Por el contrario, la respuesta a la aplicación de nitrógeno fue mayor en el suelo arenoso.

Resultados similares fueron reportados por Dou et al. (2016) al realizar un ensayo de invernáculo con dos variedades de arroz y tres regímenes de riego. Dou et al. (2016) también obtuvieron un rendimiento superior en el suelo arcilloso (46 % superior). Entre otros efectos positivos, destacaron una mayor cantidad de macollos, 25 % más de espigas, mayor cantidad de granos, mayor peso de 1000 granos y mejores llenados de granos frente a los de suelos arenosos.

En referencia al uso del agua, lograron una eficiencia 25 % superior en el suelo arcilloso en términos de gasto de agua por tonelada de arroz producida.

Por su parte, Xiangping et al. (2018) reportaron los beneficios de suelos con mayor contenido de arcilla (40 % frente a 60% de arcilla). Entre otros beneficios, señalaron el incremento en el largo de espiga de un 18,02 % y promedios de altura de plantas 22,43 % mayores. En el mismo sentido, Dou et al. (2016) hallaron una eficiencia del uso del agua 70,5 % superior en suelo arcilloso frente al arenoso, explicado por un rendimiento 63,9 % superior y un 4,9 % inferior en el gasto de agua para riego.

2.6.4. Control de malezas

En Uruguay, las principales malezas que afectan el rendimiento en las chacras de arroz son: los capines (*Equinochloa spp.*); el pasto blanco (*Digitaria spp.*); el arroz rojo; las gramas (*Paspalum spp.*); gramas finas (*Leersia y Luziola*); las ciperáceas y el complejo de especies de hoja ancha (ACA, 2009).

Deambrosi y Saldain (2001a) estudiaron la incidencia de malezas presentes en una chacra comercial de arroz (*Paspalum hydrophilum*, *Paspalum distichum* y *Echinochloa spp.*) en la localidad de Rincón de Ramírez, Treinta y Tres. Si bien la presencia de las especies de *Paspalum* fue mayor que las de capín, únicamente observaron el efecto negativo del capín cuando se lo correlacionó con el rendimiento del cultivo de arroz.

El control químico de especies de capín es necesario para las condiciones de producción de arroz en Uruguay. Numerosas evaluaciones de herbicidas que se han realizado anualmente por el INIA para ajustar el control químico y su manejo muestran datos contundentes. Deambrosi y Saldain (2001a, 2002, 2004) encontraron resultados estadísticamente significativos en el control de capines y en la mejora de rendimiento mediante el control químico.

La presencia del arroz rojo en las chacras de arroz presenta una doble problemática: la competencia por nutrientes y la penalización económica a nivel industrial. La siembra directa, el uso de materiales genéticos Clearfield y el control manual son herramientas que han demostrado ser de gran utilidad para disminuir el número de chacras con esta problemática (Saldain 2002, 2003, 2005, 2007).

2.6.5. Control de enfermedades

Las enfermedades presentes en los cultivares de arroz utilizados en Uruguay son responsables de importantes pérdidas de rendimiento cuando no se logra un adecuado control. Los patógenos más importantes son: podredumbre de tallo, manchado de vainas (*Sclerotium oryzae* y *Rhizoctonia spp*) y Brusone (*Pyricularia oryzae*).

Debido a la pérdida de rendimiento que pueden causar estas enfermedades, ya se han desarrollado estrategias de control químico. Ávila et al. (2000), en un ensayo con la variedad INIA Tacuarí con una alta presencia de *Rhizoctonia spp.*, obtuvieron una disminución de 1326 kg/ha de un testigo sin tratamiento frente al mejor tratamiento químico. Trabajando con el cultivar El Paso 144, Ávila et al. (2008a, 2008b), en presencia de *Sclerotium oryzae* y *Rhizoctonia spp.*, encontraron una disminución del rendimiento de 1310 kg/ha.

Datos más recientes de Martínez et al. (2013, 2014) en el Paso 144 mostraron una disminución de 991 kg/ha y de 856 kg/ha causada por podredumbre de tallo y podredumbre de tallo y vainas respectivamente.

En los últimos años el patógeno que se ha posicionado como principal amenaza es *Pyricularia oryzae*. Según Martínez et al. (2014) esto se debió a que casi la totalidad del área se encuentra sembrada con tres cultivares susceptibles (El Paso 144, INIA Olimar, INIA Tacuarí). Los resultados del tratamiento químico fueron publicados por Martínez y Escalante (2012). Se obtuvieron 1366 kg/ha más en el mejor tratamiento químico frente al testigo sin tratar, aunque sin diferencias estadísticamente significativas.

2.6.6. Sistema de laboreo

La siembra directa en el cultivo de arroz en Uruguay ha logrado una adopción del 25 %, debido a que presenta limitantes para desarrollar el potencial del cultivo. Entre las limitantes se encuentra una menor tasa de crecimiento, mayor infestación de malezas y menor homogeneidad del cultivo (Pereira y Stirling, 2012). Los autores estudiaron el impacto en la intensidad del laboreo (laboreo convencional versus siembra directa) en chacras arroceras del INIA Paso de la Laguna en Treinta y Tres. El laboreo convencional fue un 7,5 % superior a la siembra directa, lo cual confirmó los ensayos previos conducidos en la zafra 2006-2007 y 2007-2008 donde el laboreo convencional fue 11,5 % y 5 % superior a la siembra directa respectivamente (Molina et al. 2007, Cantou et al. 2008).

2.7. ANTECEDENTES DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL CULTIVO DE ARROZ

La agricultura de precisión es capaz de compensar la variabilidad espacial existente en los suelos arroceros (Inamura et al., 2004).

Roel y Plant, citados por Roel y Firpo (2006a), consideran que es muy importante llevar a cabo un estudio de las características espaciotemporales del rendimiento previo a realizar cualquier tipo de manejo sitio específico de un predio. En referencia a esto, Inamura et al. (2004) indican que el manejo sitio específico debería estar basado en el diagnóstico y la predicción de la variabilidad espacial de parámetros del cultivo como la biomasa, la cantidad de nitrógeno en el cultivo, el estatus hídrico y las propiedades del suelo.

Sudduth et al., citados por Inamura et al. (2004), añaden que se deberían incluir modelos de predicción del rendimiento para poder determinar los requerimientos y los factores limitantes en cada chacra.

Durigon (2007) coincide en que para poder realizar un manejo localizado es necesario identificar las causas principales de la variación del rendimiento.

Kamoshita et al. (2009), en un estudio conducido durante cuatro zafras, exploraron los factores causantes de la variación en el rendimiento del cultivo de arroz de secano en el Noreste de Tailandia. Buscaron establecer la relación entre la variabilidad del rendimiento de arroz y los factores asociados al manejo, enfocándose en la incidencia del agua y la infestación de malezas.

Kamoshita et al. (2009) destacaron como rasgo principal el hecho de que chacras con mayor variabilidad del rendimiento lograron menor productividad. En estas encontraron que ciertos factores de manejo resultaron muy influyentes.

Fueron factores determinantes en provocar variabilidad en el rendimiento: los altos niveles de enmalezamiento, la desuniformidad del terreno, el tipo de siembra (“al voleo” versus “en línea”) y la menor nivelación de chacra. Entre zafras, la pluviometría fue la determinante de la variabilidad temporal observada (Kamoshita et al., 2009).

Los rendimientos de chacra se correlacionaron negativamente con el desarrollo de las malezas y de forma positiva con el contenido de agua del suelo. Las siembras en línea, la nivelación de chacra y la homogeneidad del terreno mostraron ser los factores que determinaron la concreción de cultivos más parejos, y por ende de mayor rendimiento (Kamoshita et al., 2009).

Por otro lado, Inamura et al. (2004), persiguiendo objetivos similares a los de Kamoshita, trabajaron en el distrito de Sakurai, Nara, Japón. Allí se

estudiaron 18 parcelas de 13 productores de pequeña escala, con el objetivo de cuantificar la variación del rendimiento de las propiedades fisicoquímicas del suelo y de los principales factores de manejo. Además, se analizó la proporción de la variación estructural del rendimiento explicada por cada uno de estos factores para ver la factibilidad del uso del manejo sitio específico en chacras de arroz de mayor escala. Para ello se realizaron numerosas mediciones que fueron agrupadas en cinco grandes categorías: propiedades del suelo, propiedades de los plantines, prácticas de manejo del cultivo, contenido de nitrógeno en plantas y rendimiento y sus componentes.

Encontraron una fuerte dependencia espacial tanto del rendimiento (medido mediante monitor de rendimiento) como de propiedades medidas durante el ciclo del cultivo, entre ellas la profundidad de arado y la producción de biomasa aérea en primordio (Inamura et al., 2004).

Inamura et al. (2004) constataron mediante un análisis de regresión lineal, que los factores agronómicos agrupados en factores de fertilidad del suelo, de crecimiento inicial y de fertilización y absorción de nitrógeno, explicaron el 77,1 % de la variación total del rendimiento, lo cual les llevó a pensar que es posible implementar prácticas de manejo sitio específico para incrementar los rendimientos en el cultivo.

Dobermann (1994) condujo un ensayo exploratorio de la variabilidad de las propiedades en el suelo y las plantas de un cultivo de arroz en la región de Krasnodar, Rusia. Algunas variables lograron CV% entre 10 y 16 % —relativamente bajos— y distribución normal (pH, textura y materia orgánica). En contraste, las variables sensibles al manejo agronómico mostraron C.V.% entre 29 y 122 %. El rango del rendimiento del cultivo fue de 0,73 y 7,91 ton/ha. Mediante un análisis factorial y la regresión lineal múltiple se estudiaron las relaciones entre variables y sus consecuencias en la variabilidad del rendimiento del cultivo y se confeccionó un mapa de fertilidad del suelo.

La fertilidad y la preparación del suelo, la fertilización nitrogenada, la densidad de siembra y la disponibilidad de fósforo explicaron el 75 % de la densidad de plantas y el 56 % de la variación del rendimiento. El pH del suelo, el microrelieve, el crecimiento de malezas y la densidad de siembra fueron los principales responsables de la variación del rendimiento. Dobermann (1994) propuso el pH del suelo como un posible criterio para el mapeo de la fertilidad del mismo.

En un estudio llevado a cabo en Ebro Delta, España, Casanova et al. (2001) lograron un 94 % de precisión en la predicción del rendimiento. Para esto, fue necesaria la medición a campo de: el número de panojas y espigas, el porcentaje de granos chuzos, el enmalezamiento y la heterogeneidad espacial.

Se estudiaron los factores limitantes más importantes. En este sentido, encontraron que los cuatro factores principales, limitantes en un 76 %, fueron la deficiencia de Zn y K, la implantación y el largo del ciclo.

A nivel regional, se han realizado diferentes estudios de doctorado en esta temática en Río Grande del Sur, estado brasilero limítrofe con Uruguay (Wrege 2007, Durigon 2007).

En la localidad de Santa Vitória do Palmar, durante tres zafas consecutivas, Wrege (2007) observó los beneficios de la aplicación estructural de la agricultura de precisión. Durante las sucesivas cosechas detectó la reducción en la variabilidad del fósforo y un progresivo aumento en la concentración de este. Por el contrario, registró un aumento en la variabilidad de la concentración de K y una disminución de su concentración promedio en el suelo.

Durigon (2007) realizó un estudio comparativo entre el manejo sitio específico y el tradicional en el cultivo de arroz bajo riego. El mismo fue llevado a cabo en el municipio de San Francisco de Asís durante dos zafas. En la primera, se realizaron muestreos exhaustivos en suelo y cultivo y se analizaron las correlaciones con los rendimientos de chacra (registrados mediante un monitor de rendimiento). A partir de estos resultados se delimitaron distintas zonas de manejo, donde posteriormente se llevaron a cabo los dos criterios de fertilización: el tradicional (homogéneo) y el de manejo localizado.

Durigon (2007) encontró correlaciones positivas con el contenido de Ca y Mg y negativas con el contenido de Al intercambiable y la saturación de este. A su vez, el manejo localizado logró un mejor resultado económico que el tradicional. Esto se explicó en parte por la mayor respuesta al fertilizante y a través de la reducción de su uso en zonas de suficiencia con tasa variable frente a la homogénea.

Los estudios nacionales llevados a cabo por Roel y Plant (2004a), Roel (2005) en suelos arroceros del departamento de Treinta y Tres fueron los primeros trabajos exploratorios en el cultivo en Uruguay para dar comienzo al uso del manejo sitio específico en arroz. En ellos se llevaron a cabo mediciones exhaustivas de un gran número de variables edáficas. Al igual que en los trabajos mencionados previamente, se registraron y analizaron la textura, el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de fósforo, el potasio, el carbono orgánico, así como también numerosas medidas en plantas de arroz durante todo su ciclo. El objetivo fue el de observar ciertas tendencias y lograr un mejor entendimiento de los resultados.

La información registrada durante la zafra 2003-2004 no logró ser demasiado concluyente debido a los severos daños causados por un evento climático ocurrido en el mes de febrero.

Durante la zafra 2004-2005, Roel (2005) encontró que ciertas prácticas de manejo del cultivo, como el control de malezas, presentó una alta incidencia en el rendimiento. Obtuvo una correlación de $r=0,78$ con un nivel de significancia de $p=0,001$. El pH del suelo en cada sitio fue el factor edáfico más influyente en dos chacras evaluadas de la Unidad de Producción Arroz-Ganadería (UPAG). Se obtuvieron correlaciones de $r=-0,24$ y $-0,6$ con una significancia de $p=0,001$.

Bonilla et al. (2015) trabajaron en un establecimiento arrocero de 100 ha de la zona de Rincón, Treinta y Tres, durante las zafras 2011-2012 y 2012-2013. Analizaron los parámetros del suelo y exploraron el uso de monitores de rendimiento.

Bonilla et al. (2015) encontraron que los patrones de rendimiento se vieron afectados positivamente por altos contenidos de arena y de fósforo cítrico. Las unidades de suelos marcaron zonas de mayor y menor producción. Factores exógenos como la presencia de malezas, la altura de la lámina de agua y el movimiento del agua en la chacra también afectaron el rendimiento.

El monitor de rendimiento les permitió delimitar dos zonas con rendimientos contrastantes que se correspondieron con zonas de alto contenido de arcilla y bajo contenido en fósforo. Estas características afectaron la implantación del cultivo, y esto derivó en una mayor presencia de malezas (Bonilla et al., 2015).

El mapeo de rendimiento les permitió construir un mapa de ingreso neto de la chacra. Se observaron zonas de valores positivos y negativos (Bonilla et al., 2015).

A nivel mundial, el IRRI, junto con otras instituciones asiáticas han desarrollado y fomentado una serie de lineamientos para incrementar la eficiencia y la productividad del cultivo de arroz en el mundo. El objetivo principal ha sido proveer nutrientes básicos (N, P, K) en la cantidad y en el momento adecuado según las circunstancias dadas en términos de productividad potencial de cada chacra. Este lineamiento es el mismo utilizado en la agricultura de precisión y lo denominan "Manejo de Nutrientes Sitio Específico" (MNSE) o SSNM (del inglés, Site Specific Nutrient Management).

En este programa se han utilizado insumos (específicamente fertilizantes) en cantidades definidas por el potencial de producción de cada chacra o parcela. Estas prácticas han sido difundidas en mayor medida en países

asiáticos donde el sustento económico proviene de la producción de arroz en pequeña escala. El predominio de pequeños productores en los países asiáticos hace que el manejo individual de cada parcela contemple gran parte de la variación espacial de los suelos, explotando así los beneficios del manejo sitio específico.

En referencia al MNSE, Saleque et al. (2007) trabajaron en la difusión de la tecnología en tres distritos de Bangladesh, donde compararon el manejo tradicional de productores locales con el MNSE y a su vez evaluaron la capacidad de los productores para delimitar visualmente tres categorías de suelos según su productividad aparente.

Para cumplir con el primer objetivo del estudio, se les encargó a los productores delimitar en sus chacras tres zonas (zona1 = mayor; zona2 = media y zona3 = menor) diferenciadas por su productividad aparente según lo que le indicara su experiencia a nivel de campo. Posteriormente se tomaron muestras de suelo de cada zona delimitada por los productores y se mandaron a analizar a un laboratorio para determinar el contenido de ciertos nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio). Para cumplir con el tercer objetivo se comparó el manejo tradicional de nutrientes con el MNSE en base a las zonas delineadas por los productores y su correspondiente análisis de laboratorio (Saleque et al., 2007).

Los resultados de análisis de laboratorio, en casi la totalidad de los casos en las tres zonas de manejo delimitadas por los productores, coincidieron con las concentraciones de los nutrientes analizados. En lo que refiere al uso de fertilizantes se incrementó entre 11 y 71 % más de N, 6 y 100 % más de P y 39 a 100 % más de K frente al manejo tradicional de los productores. Además del uso de estos nutrientes, también se vio incrementado el rendimiento de las parcelas donde se realizó el manejo mejorado con nutrientes. Este resultado se repitió en las tres localidades que participaron en el proyecto. Se logró un incremento de la producción de arroz del entorno del 28 % (Saleque et al., 2007).

Los estudios mencionados expusieron los complejos motivos por los cuales se observa variabilidad en el rendimiento de chacras de arroz. En estos trabajos exploratorios no siempre se encontraron elementos que por sí solos permitieran trazar zonas de manejo para llevar a cabo tareas de manejo localizado.

Tal como lo expusieron Kamoshita et al. (2009), en cultivos de arroz de secano la propia distribución del agua de lluvia en el terreno afectó el rendimiento de chacra.

La homogeneidad del terreno, las siembras en línea versus al voleo y la nivelación del terreno que mencionan Kamoshita et al. (2009) mostraron el efecto

favorable de una mejor distribución de los recursos disponibles para cada planta de arroz. Además, estas circunstancias permitieron una mejor supresión de malezas al lograr una más amplia distribución de la lámina de agua en la chacra.

El efecto negativo de las malezas y la importancia de un buen manejo agronómico mostró cuán determinantes fueron en el rendimiento y la variabilidad, hecho que también fue destacado por Dobermann (1994), Casanova et al. (2001), Roel (2005) como factores importantes a considerar en la variabilidad de una chacra.

Las características fisicoquímicas del suelo son el objeto principal de estudio en la agricultura de precisión, ya que permiten delimitar zonas de manejo o agregar un nutriente en cantidades variables, cerrando el ciclo de la agricultura de precisión. La fertilización variable es una de las primeras y más comunes tareas que se incorporaron para llevar a cabo con esta tecnología.

En los estudios mencionados el pH del suelo fue destacado por Dobermann (1994), Roel (2005) como un posible parámetro para la delimitación de zonas de manejo. Entre los nutrientes más comunes, Casanova et al. (2001) recalcaron el potasio y el zinc; Saleque et al. (2007) mencionan tanto el potasio como el nitrógeno y el fósforo; Inamura et al. (2004), Wrege (2007) a los nutrientes en general, y Durigon (2007) encontró al calcio, el magnesio y el aluminio como determinantes en la variación del rendimiento del arroz.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MARCO LOCATIVO Y EXPERIMENTAL

El presente trabajo de tesis se llevó a cabo durante la zafra 2008-2009 en el predio de la Unidad Experimental INIA Paso de la Laguna, perteneciente al INIA Treinta y Tres. Dicho predio se encuentra en la primera sección judicial del departamento de Treinta y Tres, Uruguay.

Las coordenadas geográficas del sitio experimental son las siguientes:

- ❖ Latitud: 33°14' S
- ❖ Longitud: 54°22' W

La investigación estuvo enmarcada en el último año del programa de investigación de la Unidad de Producción Arroz-Ganadería del INIA, iniciado en la zafra 1999-2000. En la misma se planteó un esquema productivo basado en una rotación agrícola-ganadera de cultivos de arroz y pasturas para pastoreo de ganado ovino y vacuno.

La UPAG estuvo conformada por seis chacras en distintas secuencias de la rotación propuesta, siendo los potreros utilizados para trabajo los numerados como 3 y 4.

3.2. DESCRIPCIÓN Y TIPO DE SUELOS

Según MAP. DSF (1976), el INIA Paso de la Laguna se encuentra dentro de la unidad de suelos La Charqueada. El material formador fueron sedimentos limo-arcillosos de la formación Dolores. La cartografía de suelos CONEAT de escala 1:20 000, consultada en CONEAT digital, mostró que los grupos de suelos pertenecientes a la unidad experimental fueron: 3.51, 3.52, 3.14 y 4.1. Entre los grupos mencionados, la superposición del mapa de suelos CONEAT con el mapa del campo experimental reveló que los potreros UPAG 3 y 4 se encontraron comprendidos dentro del grupo de suelos 3.52 (anexo 1). No obstante, los límites de los mapas de gran escala pueden ser imperfectos, por lo que podría haber otros grupos de suelos diferentes al mencionado.

En el cuadro 1 se resumieron las características principales de las chacras UPAG 3 y 4 donde se llevó a cabo el ensayo.

Cuadro 1. Chacra, superficie, antecesor y grupo de suelos CONEAT del ensayo en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Potrero	Superficie	Antecesor	Grupos de suelo CONEAT
UPAG 3	15 ha	Raigrás	<ul style="list-style-type: none"> • D - Brunosol Subéutrico Lúvico fase hidromórfica L • D - Solod Melánico • A - Solonetz • A - Solonez Solodizados Ócrico L
UPAG 4	12 ha	Pradera 3 ^{er.} año	<ul style="list-style-type: none"> • D - Solonetz • D - Solonetz Solodizados Ócrico L • A - Brunosol Subéutrico Lúvico fase hidromórfica L • A - Solod Melánico

D = suelos dominantes. A = suelos asociados

Ambos potreros presentaron escasa pendiente (entre 0 y 1 %) y poseían una historia de rotación agrícola ganadera de arroz y pasturas por más de 10 años. Por esta razón el nivel de fósforo presente en el suelo estuvo por encima de los niveles naturales encontrados en campos aledaños sin historia agrícola. La acidez fue moderada para ambas chacras. Se presentaron algunos blanqueales en zonas reducidas, principalmente en la UPAG 4. En el cuadro 2 se presenta un resumen de algunas de las propiedades químicas más importantes de las UPAG 3 y 4.

Cuadro 2. Propiedades químicas de los potreros UPAG 3 y UPAG 4 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Potrero	pH H ₂ O*	C. Org. %**	P cítrico ppm***	K mEq/100 g****
UPAG 3 Antecesor raigrás	5,5	1,4	12,9	0,2
UPAG 4 Antecesor pradera	5,9	1,3	10,8	0,19

* pH en agua. ** Carbono orgánico. *** Fósforo determinado por método de ácido cítrico. **** Potasio.

3.3. ROTACIÓN

La rotación planteada en el programa de la UPAG presentó una duración de cinco años. Se alternaron cultivos de arroz con pasturas bajo pastoreo ovino

y bovino. La fase arroz representó el 40 % del área cultivable cada año, mientras el 60 % restante estuvo compartida entre barbechos y pasturas (Bonilla y Zorrilla, 2009).

La UPAG 3 se ubicó en su segundo año de fase arroz y cuarto año dentro de la rotación. Le antecedió un verdeo invernal de raigrás anual (*Lolium multiflorum* cv. LE 284) destinado al pastoreo de animales de bajos quilajes para evitar un pisoteo excesivo.

La UPAG 4 se ubicó en fase de cultivo de arroz cabeza de rotación, posterior a dos años y medio de pradera convencional de raigrás (*Lolium multiflorum* cv. LE 284), trébol blanco (*Trifolium repens* cv. Estanzuela Zapicán) y *Lotus corniculatus* cv. San Gabriel. El campo también fue pastoreado por animales livianos. En la rotación de cinco años, se ubicó entre octubre del primer año y marzo del segundo.

Cuadro 3. Secuencia de cultivos y pasturas en la rotación de la UPAG en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Trimestre	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
ene. feb. mar.	laboreo	arroz	laboreo	arroz	pradera 2a.
abr. may. jun.	pradera reg.	verdeo	verdeo reg.	pradera 1a.	pradera 2a.
jul. ago. set.	pradera reg.	verdeo	verdeo reg.	pradera 1a.	pradera 2a.
oct. nov. dic.	arroz	verdeo	arroz	pradera 1a.	pradera 2a.

Pradera 1a. y 2a. = pradera de primer y segundo año. Verdeo reg. = verdeo regenerado. Pradera reg. = pradera regenerada.

3.4. MANEJO DEL CULTIVO

Previo a la instalación de los cultivos, las dos chacras se encontraban en fase de pasturas. Durante la primera quincena de febrero del año 2008 se realizaron los laboreos de verano, que consistieron en dos pasadas de excéntrica, dos de rastra niveladora, un “landplane”, una pasada con el rolo en la UPAG 3 y finalmente se construyeron las taipas. Según Deambrosi (2009), debido a problemas de enmalezamiento con capines ocurrido en el primer ciclo de la UPAG, se decidió ingresar con ovinos a pastorear más tempranamente. Veinte días antes de la siembra se comenzaron a preparar los barbechos y se realizó una aplicación terrestre de glifosato (RoundUp Full) a razón de 2,5 l/ha en ambos potreros.

3.4.1. Manejo productivo - UPAG 3

La UPAG 3 se sembró el 15 de octubre con la variedad El Paso 144 a una densidad de 160 kg/ha y una fertilización a la base de 180 kg/ha de 5-30-15 (nitrógeno 9; fósforo 54; potasio 27).

El 21 de octubre en preemergencia del cultivo se realizó una aplicación terrestre de herbicidas para el control de malezas utilizando una mezcla de glifosato (Power Rango) y clomazone (Command) a razón de 2,5 l/ha y 0,85 l/ha respectivamente.

Dada la ausencia de precipitaciones en los 18 días posteriores a la siembra, se realizó un baño para promover la germinación de las semillas.

El 14 de noviembre se efectuó un control de malezas en postemergencia del cultivo, utilizando una triple mezcla de propanil (Propagri), quinclorac (Facet) y pirazosulfurón-etil (Cyperof) a razón de 3,0 l/ha, 1,2 l/ha y 0,23 kg/ha respectivamente.

Se realizaron dos refertilizaciones aéreas con urea como fuente de nitrógeno (46-0-0). La primera fue realizada el 16 de noviembre en estado de macollaje a razón de 60 kg/ha (nitrógeno 27.6 kg) y la segunda se realizó en estado de primordio floral, aplicando urea a razón de 50 kg/ha (nitrógeno 23 kg).

El 20 de noviembre, con el cultivo en estado de macollaje, se realizó la inundación permanente de la chacra.

3.4.2. Manejo productivo - UPAG 4

En la UPAG 4 se realizó la siembra el 17 de octubre. Se utilizó la variedad El Paso 144 a una densidad de 171 kg/ha con una fertilización basal de 217 kg/ha del fertilizante 10-30-15-2.5 (nitrógeno 21.7; fósforo 65; potasio 33; zinc 5.4).

En preemergencia recibió una aplicación para el control de malezas de una mezcla de glifosato (Power Rango) y clomazone (Command) a razón de 1,8 y 0,85 l/ha. Al igual que en la UPAG 3, debido a la insuficiencia de precipitaciones, el 3 de noviembre se realizó un baño para lograr una buena implantación del cultivo.

El 14 de noviembre se realizó un control de malezas en postemergencia del cultivo, con una mezcla de propanil (Propagri), quinclorac (Facet), pirazosulfurón (Cyperof) a razón de 3,0 l/ha, 1,2 l/ha, y 0,23 kg/ha respectivamente.

El 16 de noviembre se efectuó la primera aplicación de urea en estado de macollaje, a razón de 60 kg/ha. Cuatro días más tarde se realizó la inundación

permanente de la chacra. Llegado al estado de primordio, se aplicaron 50 kg/ha de urea (nitrógeno 23 kg) de forma aérea.

Durante el inicio del período de floración fue necesaria la aplicación de un fungicida para el control de enfermedades de tallo, tanto en UPAG 3 como en la UPAG 4. Para ello se utilizó una mezcla del fungicida azoxystrobin (Amistar) con aceite mineral (Nimbus) a una dosis de 0,67 l/ha y 0,63 l/ha respectivamente en ambas chacras.

En los primeros días de marzo se comenzó a evacuar el agua de riego. La cosecha de la UPAG 3 se realizó entre el 21 y el 26 de marzo, mientras que la de la UPAG 4 del 26 de marzo al 3 de abril.

3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

El ensayo se llevó a cabo a nivel de chacras comerciales, específicamente en los potreros de la UPAG ya mencionados número 3 y 4. En ellos se fijaron una serie de sitios de muestreo georreferenciados durante la zafra 2003-2004 por Roel et al. (2004b) en un ensayo de similares características al presente trabajo. La distribución de los puntos pretendió contemplar los distintos tipos de suelos presentes para medir y analizar la variabilidad fisicoquímica de las propiedades del suelo y sus posibles consecuencias en el rendimiento del cultivo de arroz (anexo 2).

En la UPAG 3 de 15 hectáreas de superficie se muestrearon un total de 40 puntos, lo que representa una intensidad de muestreo de 2,7 puntos/ha. Mientras que en la UPAG 4 de 12 hectáreas de superficie, se muestrearon 22 puntos, resultando en una intensidad de muestreo de 1,8 puntos/ha.

Es pertinente considerar que Pereira y Stirling (2012) llevaron a cabo un estudio en paralelo utilizando las mismas chacras que el presente trabajo de tesis. El mismo consistió en tratamientos con distintas intensidades de laboreo (laboreo convencional vs. siembra directa), dispuestas en fajas alternadas de 250 m de largo x 20 m de ancho. De los 62 puntos de muestreo, algunos se encontraron en las fajas de siembra directa del ensayo paralelo, y pudieron afectar las mediciones y, consecuentemente, interferir con los rendimientos. Para contrarrestar la incidencia de dicho estudio, se estandarizaron los rendimientos de los puntos en función de la intensidad de laboreo recibida.

3.6. DETERMINACIONES

Durante el ensayo se recabó información mediante la toma de muestras a campo para los 62 puntos muestreados. Estos parámetros describieron el clima, las propiedades del suelo, el desempeño productivo, el manejo general del cultivo y la calidad molinera de lo cosechado.

A continuación, se listan las mediciones efectuadas en los diferentes momentos del ensayo:

- Registros del clima:
 - registros pluviométricos;
 - temperatura;
 - heliofanía.

- Muestreo del suelo previo a la siembra de 0 a 15 cm de profundidad:
 - pH H_2O ;
 - % de arena, limo y arcilla;
 - % carbono orgánico (CO %);
 - % nitrógeno total elemento (N);
 - fósforo ácido cítrico ppm (P);
 - potasio en miliequivalentes cada 100 g de suelo (K);
 - conductividad eléctrica 0-30 cm mS/m (Ce_{30}).

- Durante el crecimiento del cultivo:
 - implantación;
 - contenido de clorofila (SPAD);
 - altura de agua;
 - altura de planta;
 - producción de materia seca por hectárea;
 - número de tallos por m^2 ;
 - rendimiento del cultivo kg/ha;
 - propiedades inferidas de riego, desarrollo, enmalezamiento, floración y estado general del cultivo.

- Posterior a la cosecha:
 - componentes del rendimiento (panojas/ m^2 , granos/ m^2 , peso de 1000 granos);
 - calidad molinera (índice de verde, porcentaje de granos quebrados, porcentaje de granos manchados, porcentaje de yesado);
 - contenido de N, P y K en grano y en planta.

3.6.1. Clima

Los datos referentes a la pluviometría, temperatura y heliofanía fueron registrados durante la zafra 2008-2009 en la estación climatológica de la unidad experimental del INIA Paso de la Laguna. Los instrumentos de medición se encuentran a escasos metros de los potreros del ensayo, por lo que sus registros son representativos de lo ocurrido en ambos potreros.

3.6.2. Determinaciones en suelo

Previo a la siembra, en cada uno de los puntos se tomaron muestras de suelo de 0 a 15 cm de profundidad. Fueron analizadas en el laboratorio de la estación experimental INIA La Estanzuela, donde se determinó pH, textura (porcentaje de arena, limo y arcilla), contenido de carbono orgánico, porcentaje de nitrógeno, fósforo (por el método del ácido cítrico) y contenido de potasio (medido en miliequivalentes cada 100 gramos de suelo).

A su vez, se midió la conductividad eléctrica de las dos chacras mediante el Veris® Tech 3100, un artefacto diseñado para llevar a cabo esta función que posee electrodos que emiten y reciben cargas eléctricas. Mediante un vehículo equipado con GPS, se tomaron medidas georreferenciadas de conductividad eléctrica en las dos chacras a 30 y a 90 cm de profundidad. Debido a la falta de coherencia de los valores registrados a 90 cm, estos no fueron tenidos en cuenta en los análisis posteriores. De esta manera se obtuvieron registros de conductividad eléctrica en intervalos de 15 cm de distancia y se cubrió el terreno de estudio.

Puesto que no todos los sitios de muestreo se ubicaron en el recorrido del Veris® Tech 3100, se realizó la interpolación de los datos geo-referenciados obtenidos a campo, y de esta manera se consiguieron los datos en cada punto.

3.6.3. Determinaciones en el cultivo

3.6.3.1. Implantación

Durante la implantación del cultivo (un mes posterior a la siembra 13-11-08) se realizó el conteo de plantas emergidas tomando una medida fija de 30 cm de largo. Se efectuaron cinco lecturas en un radio de cinco metros del punto a muestrear. El promedio de los cinco conteos de plantas constituyó la lectura en cada punto de muestreo. A partir de este valor, teniendo en cuenta el distanciamiento entre hileras y el largo de las medidas, se estimó el número de plantas por metro cuadrado ($\text{No. de plantas en } 30 \text{ cm} / (0,17 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}) = \text{No. de plantas/m}^2$). El valor 0,17 corresponde al distanciamiento entre hileras en metros y 0,3 a la longitud en metros de los cortes efectuados.

3.6.3.2. SPAD, altura de lámina de agua y de plantas

En los estadios de macollaje, primordio floral, floración y madurez fisiológica se tomaron medidas de altura de planta y del nivel de agua de riego. Durante la cosecha no se registraron valores de altura de agua, dado que ya se había comenzado a drenar la chacra para realizar la cosecha en seco. El procedimiento consistió en tomar cuatro medidas para altura de planta y tres para altura de agua, cuyo promedio fue asignado al punto muestreado.

También se realizaron mediciones de la actividad clorofiliana de plantas en los estadios de macollaje, primordio y floración. Las mediciones se efectuaron mediante el dispositivo Minolta SPAD 502, con el cual se tomaron diez registros por punto. El promedio de los diez registros constituyó el valor correspondiente a cada punto.

3.6.3.3. Producción de materia seca y número de tallos

La determinación de la producción de materia seca por hectárea (MS/ha) en macollaje, primordio floral, floración y cosecha se estimó mediante cortes de plantas que luego fueron secadas en un horno a 100 °C durante 24 horas. La toma de muestras se llevó a cabo efectuando cuatro cortes de 30 cm al ras del suelo en cada punto. Luego de ser secadas, las muestras se pesaron en una balanza electrónica de precisión y se obtuvo el valor del parámetro “kg MS de la muestra”. De los valores de materia seca resultantes, se estimó la producción de MS/ha mediante el siguiente cálculo matemático: $\text{kg MS muestra} / (0,17 \times 0,3 \times 4) \times 10\,000 \text{ m}^2 = \text{kg MS/ha}$. El factor 4 representa el número de cortes por punto; 0,17 m, la distancia entre surcos; 0,3 m, el largo de cada corte, y 10 000 la equivalencia para convertir metros cuadrados en hectáreas.

Además, se realizaron (en primordio floral, floración y madurez fisiológica) otros dos cortes de 30 cm en cada punto de manera aleatoria. A partir de estas muestras se contabilizó el número de tallos para estimar el parámetro número de tallos / m² mediante la fórmula matemática $\text{no. tallos de la muestra} / (0,17 * 0,3 * 2) = \text{no. tallos} / \text{m}^2$. En este caso el número de cortes por punto fue de dos.

Posteriormente las muestras fueron enviadas al laboratorio de INIA La Estanzuela donde se efectuaron análisis del contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en planta y en grano.

3.6.3.4. Rendimiento

En el ensayo se realizaron dos determinaciones de rendimiento. La primera mediante un monitor de rendimiento ubicado en la cosechadora. La segunda mediante la cosecha manual de cuatro cuadrados de 0,85 m² de superficie en todos los puntos de muestreo. Por problemas de confiabilidad de los valores obtenidos mediante el monitor de rendimiento, los datos fueron descartados.

Los cortes realizados a través de cosecha directa fueron pasados por una trilladora estática donde se separaron los granos de la paja. Luego se removieron los fragmentos más pequeños remanentes, quedando únicamente los granos de arroz para ser pesados en balanza electrónica. Además, se

registraron los contenidos de humedad de cada muestra y se estandarizaron los pesos en 14 % de humedad. Con los pesos de muestra corregidos, se estimaron los rendimientos mediante la siguiente fórmula matemática: $(\text{kg muestra corregido} / 0,85 * 4) * 10\ 000 = \text{rendimiento kg/ha}$.

3.6.3.5. Análisis de correlación espacial

Utilizando el software GS+ Geostatistics for Environmental Sciences versión 10 edition de Plainwel Michigan, EE. UU., se llevó a cabo un análisis de correlación espacial. El mismo se realizó mediante la construcción de semivariogramas de las propiedades de suelo y rendimiento.

Los parámetros tenidos en cuenta para este análisis fueron:

- contenido de fósforo;
- contenido de potasio;
- porcentaje de arcilla;
- porcentaje de carbono orgánico;
- pH;
- conductividad eléctrica;
- y rendimiento.

En primera instancia se ingresó el valor de la propiedad de cada punto con su georreferenciación correspondiente. En la interfase del software GS+ en la ventana para elaborar los semivariogramas, se tuvieron en cuenta dos parámetros importantes: “Active Lag Distance” (en adelante ALD) y “Lag Class Distance Interval” (en adelante LCI).

El ALD es la distancia para la cual se calcula la semivarianza. Puede ser tan grande como la mayor separación entre puntos o tan chico como la mínima distancia de separación entre puntos del set de datos (Robertson, 2008).

El LCI es el intervalo de distancia para el cual se incluirán los puntos muestreados para calcular una semivarianza del semivariograma. En un semivariograma, cada punto corresponde a una clase “lag”. El valor más chico que se puede ingresar es la mínima separación entre puntos del set de datos y la máxima también corresponde a la máxima distancia entre puntos (Robertson, 2008).

Respecto a estos dos parámetros, se contó con dos maneras de definir sus valores: de forma manual o definidos por defecto por el software. La segunda fue la opción que se tomó en cuenta en todos los análisis.

Los parámetros ALD y LCI fueron asignados por defecto por el GS+ como se detallan en el cuadro 4.

Cuadro 4. Parámetros “Active Lag Distance” y “Lag Class Interval” designados por defecto por el software GS+ en chacras con diferente pastura antecesora e intensidad de muestreo en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Chacra	Antecesor	Parámetro	No.	ALD (m)	LCI (m)
UPAG 3	Raigrás	Arcilla	36	268	33
		C. orgánico			
		Conductividad eléctrica			
		Fósforo	40	268	17
		pH			
		Potasio			
UPAG 4	Pradera	Rendimiento			
		Arcilla			
		C. orgánico			
		Conductividad eléctrica			
		Fósforo	22	187	46
		pH			
Potasio					
		Rendimiento			

No. = número de puntos de muestreo. ALD = Active Lag Distance. LCI = Lag Class Interval.

En la construcción de los semivariogramas se seleccionó el modelo teórico que mejor se ajustó a la curva de semivarianza del set de datos analizado. El criterio para esta elección fue el menor valor de la suma de cuadrados residuales de cada uno de los cuatro modelos disponibles en el GS+ (Gauss, Exponencial, Esférico, Lineal) y el mayor coeficiente de determinación (r^2).

Posteriormente, se estimaron los parámetros de relevancia para clasificar el grado de autocorrelación de cada variable (C_0 , C_1 , C_0+C_1 y A).

Tal como fuera utilizado por Cambardella et al. (1994), el cociente entre el valor C_0 y el C_1 fue utilizado para medir la fortaleza de correlación espacial para cada una de las variables de la siguiente manera:

- $0,00 > C_0/C_1 < 0,25$ correlación espacial fuerte;
- $0,75 > C_0/C_1 > 0,25$ correlación espacial moderada;
- $1,00 = C_0/C_1 > 0,75$ correlación espacial débil.

3.6.3.6. Componentes del rendimiento y calidad molinera

La semana previa al inicio de la cosecha del cultivo, se extrajeron las muestras necesarias para determinar los componentes de rendimiento y los parámetros de calidad molinera.

Para medir el número de granos por panoja se extrajeron 15 panojas al azar. Fueron desgranadas a mano y luego pasadas por una máquina clasificadora de granos, separando los granos llenos de los vacíos. Luego de contabilizados, se calculó la cantidad de granos totales, llenos y vacíos por panoja.

Para determinar el número de panojas por m² se promedió el conteo realizado en dos cortes de 30 cm. El número total se calculó mediante la fórmula $\text{No. de panojas de la muestra} / (0,17 * 0,3 * 2) = \text{No. de panojas} / \text{m}^2$.

Para establecer el parámetro peso de 1000 granos se tomó una submuestra del arroz cosechado previamente para determinar el rendimiento con 14 % de humedad. En una máquina contadora de granos, se contabilizaron 3000 granos que luego fueron pesados en una balanza electrónica de precisión, obteniendo así el parámetro buscado.

En cuanto a parámetros de calidad, se tomó otra submuestra al azar de los granos cosechados manualmente en cada punto. Estos fueron pelados y se separaron los granos vacíos de los enteros. Todos los granos enteros fueron pasados por una máquina pulidora durante un tiempo fijo de dos minutos.

Manualmente se separaron los granos enteros de los partidos y en ambos grupos se identificaron aquellos yesados y manchados. Finalmente, luego de pesar por separado los granos enteros y partidos, se determinó el porcentaje de granos partidos, yesados y manchados. También se halló el índice de verde, indicador del porcentaje de granos verdes a la hora de la cosecha del cultivo.

Se realizaron pequeños cortes manuales de panojas que fueron desgranadas y peladas, y fueron separados los granos llenos de los vacíos. De la muestra resultante de granos, se tomó una submuestra de 50 gramos y se apartaron manualmente los granos verdes de los blancos. Luego se pesaron los granos verdes por un lado y los blancos por el otro. Mediante el siguiente cálculo matemático se determinó el índice de verde para cada muestra: $\text{gramos de granos verdes} / \text{gramos de granos totales} = \text{índice de verde}$.

3.6.3.7. Propiedades inferidas del cultivo

Para complementar los relevamientos efectuados de forma objetiva, se registraron mediante una escala visual características inferidas del cultivo en diferentes etapas fenológicas. Se evaluaron visualmente los niveles de enmalezamiento, riego, densidad de plantas, desarrollo y aceptación general durante el período de embuche, inicio de floración, floración tardía y previo al comienzo de la cosecha. En todos ellos las evaluaciones se realizaron en un radio de cinco metros con respecto a la estaca de cada punto de muestreo. Los

valores asignados se establecieron mediante una escala visual de cinco o tres niveles dependiendo del parámetro, siendo 1 el nivel más bajo y 3 o 5 el más alto. En el cuadro 5 se muestran las escalas de los diferentes parámetros.

Cuadro 5. Escala de puntuación de las propiedades inferidas registradas en el cultivo

Malezas*	Riego	Desarrollo	Densidad	Aceptación
1 0 %	1 Seco	1 Malo	1	1
2 >0 a 15 %	2 Encharcado	2 Regular	2	2
3 >15 a 35 %	3 Algo bajo	3 Bueno	3	3
4 >35 a 75 %	4 Aceptable		4	4
5 >75 %	5 Bueno		5	5

* Porcentaje de suelo cubierto por malezas.

3.7. ANÁLISIS DE DATOS

En el período comprendido entre la siembra y la cosecha se registraron 67 parámetros en suelo y cultivo en 62 sitios de muestreo georreferenciados. De esta manera se generó una base de datos que se analizó secuencialmente con diferentes abordajes con la ayuda de herramientas estadísticas para procesar e interpretar los resultados obtenidos.

A continuación, se listan los análisis realizados:

- estadístico descriptivo;
- de correlación espacial;
- de correlación de Pearson;
- de clúster;
- de varianza y prueba de Fisher (LSD);
- árbol de regresión y clasificación (CART);
- y balance de nutrientes simple.

3.7.1. Análisis estadístico descriptivo

Partiendo de una base de datos de 4154 registros se efectuó un análisis estadístico descriptivo utilizando el software SAS System for Windows V8 (SAS, 1999). Se escogieron las variables descriptivas: media, desvío estándar, máximo, mínimo y coeficiente de variación. De esta manera se obtuvo un primer acercamiento para conocer la variabilidad a campo de los 67 parámetros medidos.

3.7.2. Análisis de correlación de Pearson

El coeficiente Pearson se utiliza para detectar relaciones lineales entre dos variables. Su magnitud puede variar entre -1 y $+1$. Cuanto más fuerte la relación, más próxima a $+1$ o -1 . Es indistinto el signo de la variable numérica. En una representación gráfica entre dos variables (x en función de y), la magnitud de la correlación se ve reflejada en el grado de dispersión de los puntos graficados, estando menos dispersos cuanto más fuerte la correlación entre ellos y viceversa (Camacho, s.f.).

Se efectuó un análisis de correlaciones de Pearson para detectar relaciones lineales entre el rendimiento y todas las variables que se fueron registrando a lo largo del estudio.

Además del coeficiente de Pearson, fue necesario considerar el valor de significancia (p), que indicó si realmente existía una correlación entre las variables o si fue producto del azar. En otras palabras, un coeficiente de correlación es significativo cuando se puede afirmar una cierta probabilidad de que sea diferente de cero (Camacho, s.f.).

La correlación de Pearson entre variables se calcula de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

siendo ρ la correlación de Pearson; σ_{xy} la covarianza entre las variables x e y ; σ_x el desvío estándar de la variable x y σ_y el desvío estándar de la variable y .

Para esto se plantearon las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula: $\rho = 0$

Hipótesis alternativa: $\rho \neq 0$

Las dos hipótesis alternativas cuando se encontró $\rho \neq 0$ fueron las siguientes:

Hipótesis nula: $\rho = 0$

Hipótesis alternativa: $\rho < 0$

Hipótesis nula: $\rho = 0$

Hipótesis alternativa: $\rho > 0$

El criterio de decisión para determinar la existencia de una correlación entre las variables con el rigor estadístico correspondiente fue: si ρ es diferente de cero con un $p\text{-valor} \leq a 0,05$ se rechazan las hipótesis nulas y se acepta la hipótesis alternativa. Esto significaría que existe correlación entre las variables. A partir de los resultados, se elaboraron cuadros de clasificación de las diferentes variables correlacionadas en cada uno de los potreros por separado.

Para esta tarea también se utilizó el software SAS System for Windows V8 (SAS, 1999).

Las 66 corridas se presentan agrupadas de la siguiente manera:

- a. correlaciones de Pearson entre rendimiento y parámetros de crecimiento, calidad molinera y concentración de nutrientes en planta y grano;
- b. correlaciones de Pearson entre rendimiento y parámetros fisicoquímicos del suelo;
- c. correlaciones de Pearson entre rendimiento y variables de manejo del cultivo y SPAD.

3.7.3. Análisis de clúster

En el presente trabajo el análisis de conglomerados o de clústeres se hizo mediante el software Management Zone Analyst (en adelante MZA) versión 1.0.1 de la Universidad de Missouri, Columbia, desarrollado por Fridgen et al. (2004). El mismo utiliza un algoritmo de agrupación no supervisado de medias c-difusas (del inglés Fuzzy c-means, Kitchen et al., 2005) y utiliza un exponente de ponderación para controlar el grado de similitud entre miembros de cada grupo (Bezdek, citado por Kitchen et al., 2005).

El MZA tiene la ventaja sobre otros softwares de presentar salidas simultáneas para un rango de número de clústeres. Presenta dos índices de performance: el Índice de Despeño de Tolerancia (en adelante FPI, del inglés Fuzziness Performance Index) y el Índice de Clasificación de la Entropía Normalizada (en adelante NCE, del inglés Normalized Classification Entropy, Fridgen et al., 2004).

Para todas las corridas realizadas en la interfase del MZA se utilizaron los siguientes parámetros: la medida de similaridad de Mahalanobis; un Fuzziness Exponent de 1,3; y para las medias c-difusas un número de iteraciones de 300, un criterio de convergencia de 0,0001 y un número de clústeres acotado entre 3 y 5.

Para lograr una interpretación más simple de resultados, el análisis de clústeres se realizó considerando los parámetros edáficos P, K, arcilla, pH, C orgánico, N, y Ce_{30} en ambas chacras por separado.

El resultado de cada corrida fue expresado en un gráfico con los índices FPI y NCE y a cada punto geo-referenciado se le asignó el número de grupo que le correspondió según los valores de las propiedades edáficas.

El criterio para determinar el número óptimo de clústeres para los parámetros seleccionados fueron los índices FPI y NCE. Los valores menores de estos dos índices se asociaron con una menor varianza dentro de cada grupo.

3.7.4. Análisis de varianza (ANAVA)

El objetivo de este análisis fue observar si existieron diferencias estadísticamente significativas entre los rendimientos de los distintos grupos generados en el análisis de clúster.

Se efectuó un gráfico de cajas para observar algún tipo de indicio respecto de los rendimientos de cada clúster. Posteriormente se realizó una evaluación con rigor estadístico mediante un análisis de varianza y una prueba de Fisher de diferencia mínima significativa (en adelante DMS) para comparar cada clúster.

El análisis de varianza y la prueba de Fisher se llevaron a cabo con el paquete estadístico Infostat versión 2018, de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Córdoba, Argentina.

3.7.5. Árbol de regresión de CART

En esta etapa del procesamiento de datos, se tomaron en cuenta casi la totalidad de los parámetros edáficos y algunos de manejo agronómico que mostraron relevancia en los análisis previos (cuadro 6).

Nuevamente se utilizó el paquete estadístico Infostat versión 2018, de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Córdoba, Argentina.

El análisis se efectuó considerando el rendimiento de chacra como variable dependiente y 12 propiedades como variables regresoras. No se tomaron las chacras por separado, sino que se incluyeron los 62 puntos de muestreo en la misma corrida. La medida de heterogeneidad seleccionada fue la suma de cuadrados corregida, por tratarse de variables continuas. En tanto, el mínimo tamaño por nodo para continuar la partición fue de 9 datos por nodo, siendo el criterio de selección la “prueba y error” en función de la especificidad de los árboles obtenidos al probar con diferentes valores.

Cuadro 6. Parámetros considerados en el análisis de CART

Parámetros edáficos	Parámetro de manejo
<ul style="list-style-type: none"> • % de arcilla • pH • % de carbono orgánico • P cítrico ppm • K mEq / 100 g suelo • Ce 0-30 cm mS/m 	<ul style="list-style-type: none"> • Altura de lámina de agua en primordio • Nivel de malezas en primordio • Nivel de riego en primordio • Nivel de riego en floración temprana • Nivel de riego en floración tardía • Antecesor

3.7.6. Balance simple de nutrientes

El objetivo de este análisis fue visualizar de forma gráfica las diferencias de aporte/extracción de los nutrientes nitrógeno, fósforo y potasio en los 62 sitios geo-referenciados de este estudio.

El balance de nutrientes se realizó en base a dos componentes: a) con valor positivo, las unidades de N, P y K, elementos agregados al sistema en las actividades de fertilización; y b) con valor negativo la extracción de N, P y K que se retiraron del sistema mediante la remoción del grano de arroz.

Para calcular la extracción de cada nutriente se corrigió el rendimiento de 14 a 0 % de humedad. Luego, a partir de las concentraciones de cada nutriente obtenidas en el análisis de laboratorio y el rendimiento corregido en cada punto, se dedujeron los kg extraídos de los tres nutrientes.

En la fertilización se agregaron los tres nutrientes en distintas formulaciones de fertilizantes. En función de los kg de fertilizante agregados, se calculó la cantidad de N, P y K —elemento que se aplicó en todos los puntos que, debido a la fertilización homogénea, recibieron la misma cantidad del nutriente dentro de cada chacra—.

Una vez obtenidos estos valores se construyó el gráfico de balance de nutrientes para ambas chacras y se observaron los niveles de aporte/extracción de los tres nutrientes.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CLIMA

En la zafra arrocerá 2008-2009 se lograron rendimientos récord tanto en la región Este como a nivel país, superando las ocho toneladas de grano por hectárea (Blanco, 2009). Dicho resultado es atribuible, entre otros factores, a la benevolencia del clima. En este año las precipitaciones, la radiación y la temperatura fueron muy favorables y no tuvieron desviaciones importantes con respecto al promedio histórico. Las condiciones climáticas no solo fueron buenas durante las diferentes etapas fenológicas del cultivo, sino que además permitieron llevar a cabo las tareas de siembra y cosecha en fecha y de forma adecuadas.

Desde 1973, INIA Treinta y Tres registra la información agroclimática de relevancia en el rubro arrocerá y agrícola en su zona de influencia. A continuación, se detallan los registros de precipitaciones, temperatura y heliofanía publicados por Méndez et al. (2009a) para el período estudiado y la serie histórica desde 1973 hasta el 2009.

4.1.1. Precipitaciones

Los registros de precipitaciones de la zafra y el promedio de la serie histórica entre setiembre y marzo se muestran en el cuadro 7. Las precipitaciones acumuladas en el período son muy similares a la serie histórica. Existió una diferencia mínima de 20,8 mm a favor de la zafra 2008-2009, con 15 días más de lluvia con respecto a la serie histórica. Por lo tanto, en el 2008-2009 se produjo una mejor distribución de las precipitaciones. Un aspecto relevante fue que no existieron episodios problemáticos de exceso de precipitaciones en cortos períodos de tiempo ni se registraron granizadas en ningún momento.

Cuadro 7. Precipitaciones registradas durante la zafra 2008-2009 y serie histórica 1973-2009 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Período	Parámetro	set.	oct.	nov.	dic.	ene.	feb.	mar.
<u>2008 -2009</u>	Precipitaciones (mm)	91	157	75	132	95	191	62
	Días de lluvia	13	13	8	9	9	17	10
<u>1973 -2009</u>	Precipitaciones (mm)	112	99	99	98	116	149	109
	Días de lluvia	10	10	8	8	9	10	9

Fuente: adaptado de Méndez et al. (2009a).

4.1.2. Temperatura

Los promedios mensuales de temperatura media, mínima y máxima se presentan en el cuadro 8.

Cuadro 8. Temperatura media, máxima media, mínima media durante la zafra 2008/09 y serie histórica 1973-2009 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Período	Temperatura °C	set.	oct.	nov.	dic.	ene.	feb.	mar.
<u>2008 -2009</u>	Media	16	18,2	17,3	20,9	22,5	22,9	21
	Máxima media	20,8	23,1	24,4	27,9	28,4	28,1	26,8
	Mínima media	11,1	13,2	10,2	14	16,5	17,8	15,2
<u>1973 -2009</u>	Media	13,4	16,4	18,7	21,4	22,8	22,2	20,8
	Máxima media	19,2	22,4	25	27,8	29,4	28,4	27
	Mínima media	7,8	10,4	12,3	14,4	16,7	16,6	15,1

Fuente: adaptado de Méndez et al. (2009a).

Durante la zafra 2008-2009, en el mes de octubre, se registraron 1,8 °C de temperatura media y 2,8 °C de temperatura mínima media por encima del promedio de los 36 años mensurados. En el resto del ciclo, los registros de temperatura media fueron similares con relación al promedio histórico. Los registros tendieron a medidas levemente inferiores en los meses de noviembre, diciembre y enero, y algo superiores durante febrero y marzo. Esta diferencia seguramente haya repercutido de forma positiva en las primeras etapas del crecimiento del cultivo. Según Borghi y Ernst (2003), los estadios en los que la temperatura puede afectar el desempeño del cultivo son la implantación y el período entorno a la floración.

Ferreira y Montauban, citados por Borghi y Ernst (2003), mencionan que la temperatura mínima para lograr una correcta implantación se sitúa entre 12 y 13 °C y la óptima entre 25 y 30 °C. Durante el estudio se registraron 18,2 y 13,2 °C de media y mínima mensual respectivamente. Por ende, las temperaturas registradas posteriormente al período de siembra fueron favorables para lograr una correcta implantación. Respecto a los meses de diciembre, enero y febrero, la temperatura media fue relativamente cercana a los valores óptimos para las etapas de diferenciación de primordio, panojamiento y antesis (25-30 °C; 25-28 °C y 30-33 °C respectivamente) propuestos por Ferreira y Montauban, citados por Borghi y Ernst (2003).

Cabe destacar que no se registraron heladas en el período comprendido entre setiembre y marzo, al igual que en la serie histórica, y que las temperaturas mínimas no difirieron mayormente del promedio histórico entre diciembre y marzo.

4.1.3. Heliofanía

Los registros de heliofanía se realizan mediante un heliofanógrafo, el cual arroja información sobre las horas acumuladas de luz solar directa. El registro se produce a partir de la intercepción de la radiación solar directamente en la superficie del suelo o el cultivo. Se diferencia de la radiación solar difusa, que se genera cuando la radiación directa atraviesa una nube y luego es interceptada por el suelo o el cultivo. Esta última no es registrada por el heliofanógrafo.

En el cuadro 9 se muestran los valores de heliofanía promedio de todos los registros de cada mes. En este se observa que, en el período comprendido entre noviembre y abril, únicamente en febrero el registro fue superior para la serie histórica que para la zafra 2008-2009. Durante el mes de febrero el cultivo se encontraba en plena floración, lo cual pudo afectar su productividad. Igualmente, como mencionara Blanco (2009), los rendimientos promedio de la zafra fueron muy elevados y los obtenidos en las chacras utilizadas en este estudio confirman esta apreciación.

Cuadro 9. Heliofanía registrada durante la zafra 2008-2009 y serie histórica 1973-2009 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Año	set.	oct.	nov.	dic.	ene.	feb.	mar.
<u>2008-2009</u>	4,3	5,7	9,7	9,0	9,0	7,1	7,4
<u>1973-2009</u>	6,0	6,8	8,1	8,5	8,5	7,6	7,1

Fuente: adaptado de Méndez et al. (2009a).

4.2. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

4.2.1. Determinaciones en suelo: propiedades fisicoquímicas

Los resultados del análisis de laboratorio y de la conductividad eléctrica se resumen en el cuadro 10. En el mismo se detalla la textura, la concentración de carbono orgánico, el nitrógeno, el fósforo, el potasio, el pH a 15 cm de profundidad de suelo y la conductividad eléctrica a 30 cm de profundidad presentes en las chacras UPAG 3, con antecesor raigrás, y UPAG 4, con antecesor pradera.

Cuadro 10. Estadística descriptiva de las propiedades fisicoquímicas del suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Variable	No.	Media	DE	Mínimo	Máximo	CV %
UPAG 3 - 15 hectáreas - Antecesor raigrás						
% de arena	36*	25,8	7,2	18,0	48,8	28,0
% de limo	36*	44,7	3,8	32,2	50,9	8,6
% de arcilla	36*	29,5	4,2	19,0	35,9	14,1
P cítrico (ppm) 0-15 cm	40	12,9	3,6	7,3	24,1	28,0
K (mEq/100 g) 0-15 cm	40	0,21	0,04	0,13	0,30	18,0
C. org. % 0-15 cm	40	1,41	0,22	1,00	2,00	15,9
N de 0-15 cm	40	0,17	0,03	0,12	0,25	14,7
pH _{H₂O}	40	5,5	0,2	5,3	6,1	3,5
Ce 0-30 cm (mS/m)	40	30,6	8,6	15,2	59,6	28,0
UPAG 4 - 12 hectáreas - Antecesor pradera						
% de arena	22	27,0	2,0	24,1	31,1	7,5
% de limo	22	46,0	3,1	39,8	49,9	6,7
% de arcilla	22	27,0	3,6	20,6	32,8	13,3
P cítrico (ppm) 0-15 cm	22	10,8	2,5	7,8	18,9	22,7
K (meq/100g) 0-15 cm	22	0,19	0,04	0,14	0,34	23,3
C. org. % 0-15 cm	22	1,32	0,32	0,88	2,04	24,2
N % de 0-15 cm	22	0,17	0,03	0,12	0,25	19
pH _{H₂O}	22	6,0	0,43	5,5	7,2	7,1
Ce 0-30 cm (mS/m)	22	37,7	7,8	24,4	51,8	20,7

*En UPAG 3, solo fueron muestreados 36 puntos para analizar la textura. No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación.

4.2.1.1. Variabilidad textural de 0 a 15 cm de profundidad de suelo

En la chacra con antecesor raigrás, el porcentaje de arena, limo y arcilla promedio fue 26 %, 45 % y 30 % respectivamente. En función de los valores encontrados, su textura se clasificó de franca a franca arcillosa. En tanto la textura promedio de la chacra con antecesor pradera fue 27 %, 46 % y 27 % de arena, limo y arcilla respectivamente. Los valores encontrados fueron esperables en función del material formador descripto para la estación experimental y los suelos CONEAT asociados a este.

Hubo variabilidad de texturas en los distintos sitios muestreados, desde texturas franco-limosas a franco-arcillosas. Los coeficientes de variación revelaron una mayor homogeneidad en los tres parámetros en cuestión en la

chacra con antecesor pradera. La magnitud de los coeficientes registrados se encontró dentro de los rangos reportados por McBratney y Pringle, Mulla y McBratney, citados por Roel y Terra (2006c).

Cuadro 11. Estadística descriptiva: variabilidad textural en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	% de arena	36	25,8	7,2	18,0	48,8	28
		% de limo	36	44,7	3,8	32,2	50,9	8,6
		% de arcilla	36	29,5	4,1	19,0	35,9	14,1
Pradera	UPAG 4	% de arena	22	27	2,0	24,1	31,1	7,5
		% de limo	22	46	3,1	39,8	49,9	6,7
		% de arcilla	22	27	3,6	20,6	32,8	13,3

No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación.

La figura 2 muestra un gráfico de cajas donde se aprecia el mayor porcentaje y variabilidad del contenido de arcilla de la chacra con antecesor raigrás frente a la de pradera.

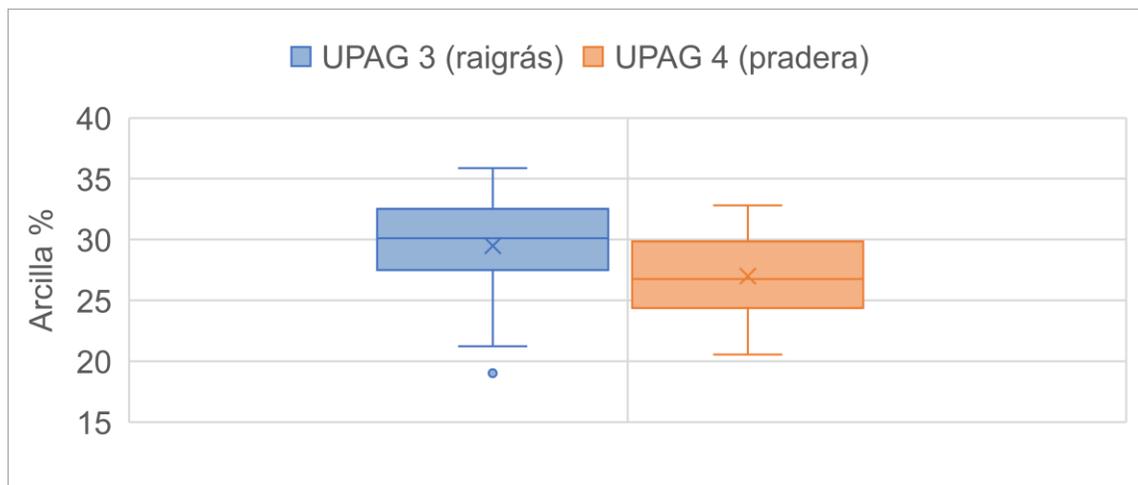


Figura 2. Gráfico de cajas de contenido de arcilla en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

4.2.1.2. Variabilidad en la concentración de fósforo de 0 a 15 cm de profundidad de suelo

El nivel promedio de P fue 12,9 y 10,8 ppm en la chacra con antecesor raigrás y pradera respectivamente. Esta diferencia significó 19% más concentración de fósforo en la chacra con antecesor raigrás. Ambos registros fueron elevados en comparación con los niveles presentes en chacras sin actividad agrícola en Uruguay. Estas concentraciones resultaron razonables considerando la rotación agrícola-pastoril en la que se encontraron los potreros de la UPAG y sus requerimientos de P en suelo. Las sucesivas fertilizaciones fosfatadas en cultivos y pasturas en los años previos elevaron progresivamente el contenido de P a los niveles que se registraron (cuadro 12).

La variabilidad observada a través del coeficiente de variación fue superior en la chacra con antecesor raigrás (28% frente a 22,7%). En ambos casos este coeficiente fue moderado según la clasificación realizada por Wilding, citado por Mulla y Mc Bratney (2002).

Por su parte, Del Campo (2007), trabajando en maíz de secano, encontró un coeficiente de variación para concentración de fósforo en suelo de 15,9%.

Datos publicados por Roel (2005), trabajando en cultivo de arroz en la estación experimental del INIA Paso de la Laguna y en chacras de la zona, presentaron coeficientes de variación para contenido de fósforo similares y mayores en comparación con los presentados en este trabajo.

En ambas chacras se constataron sitios puntuales con concentraciones muy superiores a las del resto de la chacra. En la chacra con antecesor raigrás, 38 de 40 datos relevados se encuentran en un rango de 7,3 a 17,0 ppm, mientras que en la chacra con antecesor pradera 21 de 22 totales se situaron entre 7,8 y 13,3 ppm (figura 3). Posiblemente, los puntos con altas concentraciones estén relacionadas a las heces dejadas por los animales que pastorearon durante la fase de pasturas. A nivel estadístico estos datos son considerados valores atípicos.

Los sitios con menor concentración de fósforo fueron 7,3 y 7,8 ppm para las chacras con antecesor raigrás y pradera respectivamente (cuadro 12). El nivel crítico de respuesta al agregado de fósforo en el cultivo de arroz reportado por Hernández y Berger (2003) se sitúa entre 6 y 7 ppm considerando el método de extracción con ácido cítrico (figura 3). Por esta razón, no fue esperable encontrar variaciones en el rendimiento causadas por la variabilidad existente del fósforo en el suelo.

Además, durante la siembra fueron agregadas 54 y 65 unidades de P_2O_5 en la chacra con antecesor raigrás y pradera respectivamente, lo cual hizo aún menos probable que ocurriesen situaciones donde el fósforo fuese limitante.

Cuadro 12. Estadística descriptiva: concentración de $P_{\text{cítrico}}$ (ppm) de 0 a 15 cm de profundidad en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	$P_{\text{cítrico}}$ (ppm)	40	12,9	3,6	7,3	24,1	28,0
Pradera	UPAG 4		22	10,8	2,5	7,8	18,9	22,7

No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación. P = Fósforo.

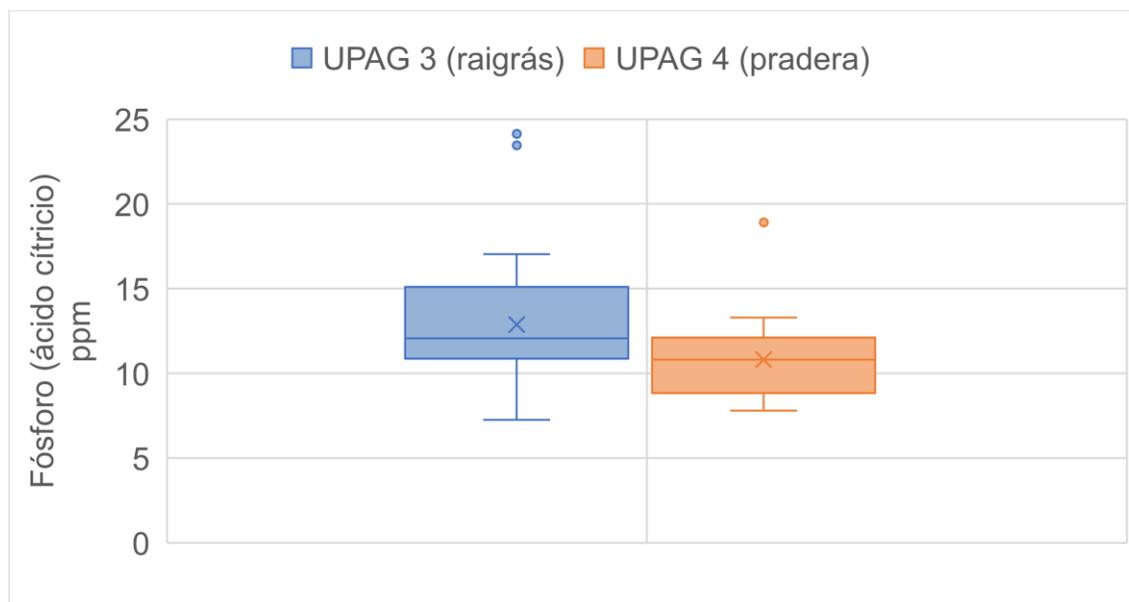


Figura 3. Gráfico de cajas de concentración de $P_{\text{cítrico}}$ en ppm de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Durante la zafra 2003-2004, Roel et al. (2004b) realizaron estudios en los mismos potreros de la UPAG utilizados para este trabajo. En los cuatro años transcurridos entre ensayos, se observó el aumento en la concentración de fósforo en el suelo. Además, existió una marcada disminución de la variabilidad en la UPAG 4. En la UPAG 3 no se observa la disminución de la variabilidad (cuadro 13).

Cuadro 13. Concentración $P_{\text{crítico}}$ (ppm) en las chacras UPAG 3 y UPAG 4 con diferente pastura antecesora, durante la zafra 2003-2004, en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Zafra	Chacra	Antecesor	Variable	Media	CV %
2003-2004	Raigrás	UPAG 3	P cítrico (ppm) 0-10 cm	8,55	23,3
			P cítrico (ppm) 10-20 cm	5,02	35,7
	Pradera	UPAG 4	P cítrico (ppm) 0-10 cm	5,57	56,1
			P cítrico (ppm) 10-20 cm	2,73	84,5

Fuente: Roel et al. (2004b).

4.2.1.3. Variabilidad en la concentración de potasio de 0 a 15 cm de profundidad de suelo

Las concentraciones promedio de potasio en la chacra con antecesor raigrás y pradera fueron de 0,20 y 0,19 mEq/100 g de suelo respectivamente. El hecho de ser un valor promedio implica que algunos de estos valores se encontraron por debajo de 0,2 mEq/100 g de suelo. El valor 0,20 mEq/100 g de suelo es el valor crítico de respuesta del cultivo de arroz, asumiendo que existe una relación de los nutrientes Mg y K menor a 15 unidades (Deambrosi et al., 2015).

En la figura 4 se muestra la dispersión de los valores de concentración de potasio obtenidos en los diferentes muestreos. En esta se muestra que una porción de puntos se ubicó por debajo del valor mínimo de respuesta, aunque no significativamente.

Al igual que ocurrió con el fósforo, previo a la siembra ambas chacras fueron fertilizadas con potasio. Teniendo en consideración el aporte de K en la fertilización y los niveles medios presentes en ambas chacras, tampoco fue esperable que el nivel de K intercambiable fuese limitante del rendimiento y, por ende, no fue probable encontrar variabilidad en el rendimiento del cultivo debido a la variación en la concentración de K.

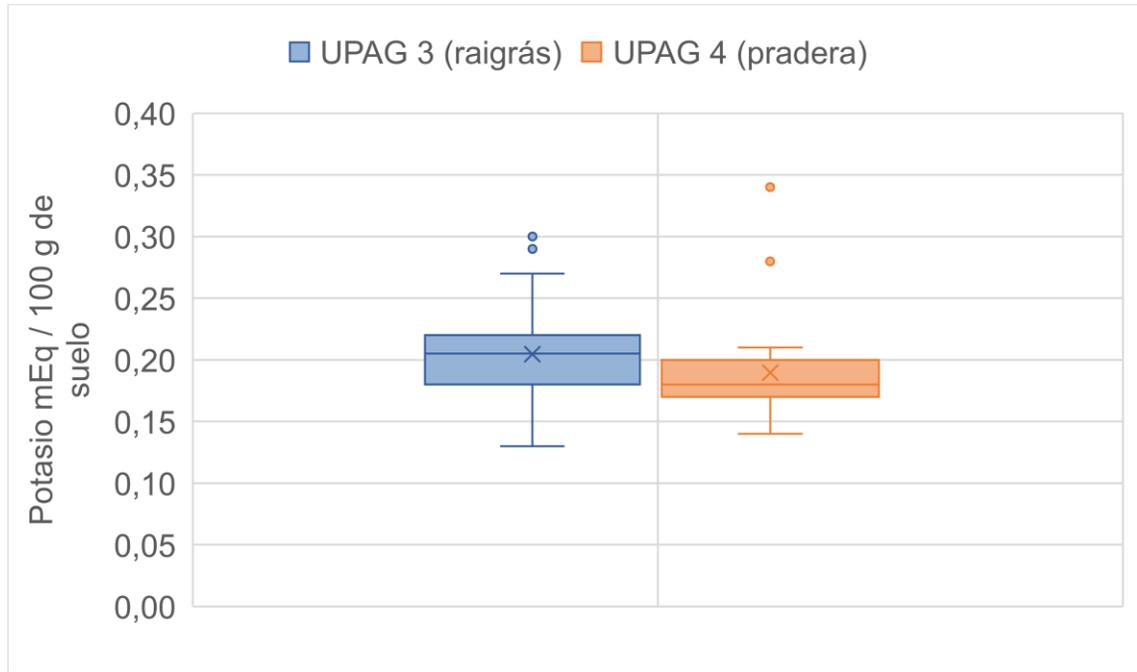


Figura 4. Gráfico de cajas de concentración de K (mEq/100 g de suelo) de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacra con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Los mínimos de cada chacra difirieron en apenas 0,01 unidades, mientras que los máximos estiraron sus diferencias hasta 0,04 unidades. El desvío estándar fue el mismo en ambos casos, mientras que el coeficiente de variación fue 5 % superior en la chacra con pradera como antecesor (cuadro 14).

En ambos casos los coeficientes de variación mostraron una variabilidad moderada para concentraciones de potasio en suelo, tal como menciona Wilding, citado por Mulla y McBratney (2002).

Cuadro 14. Estadística descriptiva: concentración de K (mEq/100 g de suelo) de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	K (mEq/100 g)	40	0,20	0,04	0,13	0,30	18,0
Pradera	UPAG 4		22	0,19	0,04	0,14	0,34	23,3

No. = número de muestreos. DE. = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación. K = Potasio.

Las concentraciones de K obtenidas por Roel et al. (2004b) trabajando en las mismas chacras cuatro años atrás, tomadas a diferente profundidad, muestran valores que evidencian una escasa modificación de la concentración del nutriente en un período de cuatro años. Respecto a la variabilidad, no se observan grandes cambios cuando se comparan los coeficientes de variación de ambos estudios (cuadro 15).

Cuadro 15. Concentración media y coeficiente de variación de K en UPAG 3 y UPAG 4 en zafra 2003-2004 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Zafra	Antecesor	Chacra	Variable	Media	CV %
03/04	raigrás	UPAG 3	K (mEq/100 g) 0-10 cm	0,24	19,7
			K (mEq/100g) 10-20 cm	0,17	18,9
03/04	pradera	UPAG 4	K (mEq/100 g) 0-10 cm	0,22	26,7
			K (mEq/100 g) 10-20 cm	0,16	23,5

Fuente: adaptado de Roel et al. (2004b).

4.2.1.4. Variabilidad de la concentración de carbono orgánico de 0 a 15 cm de profundidad de suelo

Conocer el contenido de carbono orgánico de un suelo es relevante debido a su relación con la materia orgánica y, consecuentemente, con la fertilidad natural. Estas propiedades son de gran relevancia para la producción de cualquier cultivo o pastura.

La chacra con antecesor raigrás presentó una concentración promedio de carbono orgánico de 1,41 %, oscilando entre un máximo de 2,00 % y un mínimo de 0,99 %. Mientras tanto, en la chacra con antecesor pradera el valor promedio fue levemente inferior, con una media de 1,32 %, un máximo de 2,04 % y un mínimo de 0,88 %.

La diferencia en el porcentaje de carbono orgánico promedio fue pequeña y posiblemente esté vinculada al tipo de suelo dominante en cada chacra. En la chacra con antecesor raigrás predominaron los Brunosoles Subéutricos y Solods Melánicos, los cuales presentan mayor contenido de materia orgánica que los Solonetz y Solonetz Solodizados presentes de forma dominante en la chacra con antecesor pradera.

El coeficiente de variación en la chacra con antecesor pradera fue superior al de antecesor raigrás. Este aspecto también se vio reflejado en la figura

5 donde se observó el mayor tamaño de caja, que representa una mayor dispersión de sus puntos para la chacra con antecesor pradera.

En ambos casos los coeficientes de variación fueron similares a los encontrados en suelos arroceros del INIA Paso de la Laguna cuando se los comparó con trabajos publicados por Saldain y Deambrosi (2009), Méndez et al. (2012).

Cuadro 16. Estadística descriptiva: contenido de carbono orgánico de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
raigrás	UPAG 3	Carbono orgánico (%)	40	1,41	0,2	0,99	2,00	15,9
pradera	UPAG 4		22	1,32	0,3	0,88	2,04	24,2

No. = número de muestreos. DE. = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV. = coeficiente de variación.

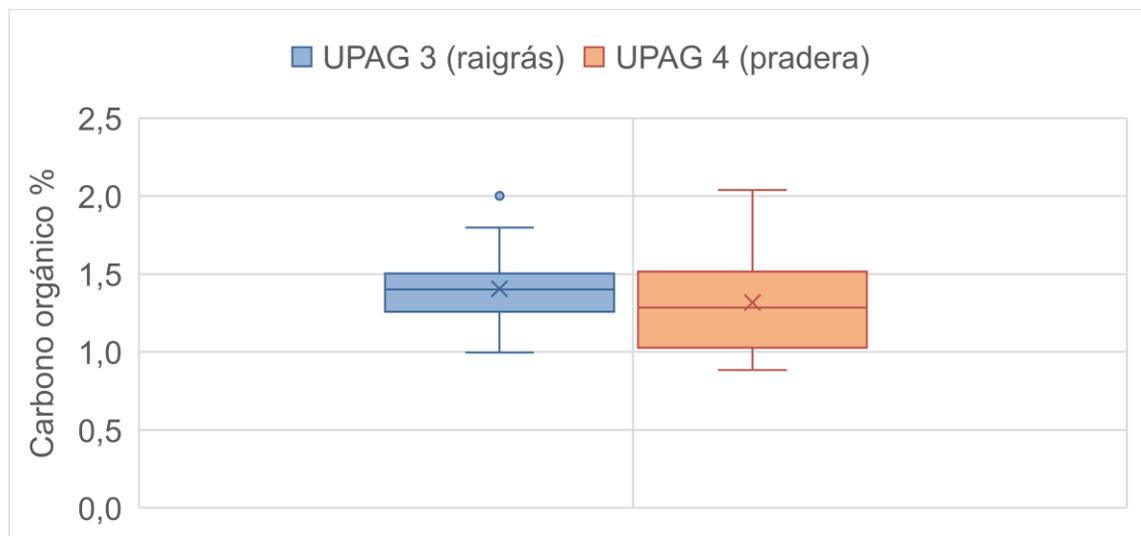


Figura 5. Gráfico de cajas de contenido de carbono orgánico de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

4.2.1.5. Variabilidad en la concentración del porcentaje de nitrógeno total de 0 a 15 cm de profundidad de suelo

El porcentaje promedio de nitrógeno en la chacra con antecesor raigrás fue 0,172 %. Este valor fue 5 % superior al registrado en la chacra con antecesor pradera, el cual promedió 0,166 %.

El aporte de nitrógeno proveniente de las pasturas antecesoras, particularmente de las praderas con leguminosas de dos años o más de duración, no se vio reflejado en la medición del nitrógeno total. Esto podría deberse, entre otros factores, al método implementado para medir este nutriente.

Tal como fuera mencionado anteriormente, el tipo de suelo dominante en la chacra con antecesor raigrás presentó mayor fertilidad natural. Esto indicó un probable mayor contenido de materia orgánica. Si bien la diferencia en el contenido de N total es pequeña, podría inferirse que se debió a esta característica.

El rango de los valores obtenidos es muy similar en ambas chacras. Sin embargo, la chacra con pradera como antecesor presentó un coeficiente de variación moderado, mientras que el de raigrás fue bajo (18,9 frente a 14,7 %), según los criterios de clasificación de CV de Wilding, citado por Mulla y McBratney (2002).

Cuadro 17. Estadística descriptiva: contenido de N total de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	N	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
raigrás	UPAG 3	N total (%)	40	0,172	0,025	0,12	0,25	14,7
pradera	UPAG 4		22	0,166	0,031	0,12	0,25	18,9

No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación. N = Nitrógeno.

En el gráfico de cajas de la figura 6, se mostró la baja dispersión de los puntos con independencia de la chacra, y la menor variabilidad de la chacra con antecesor pradera frente a la de raigrás.

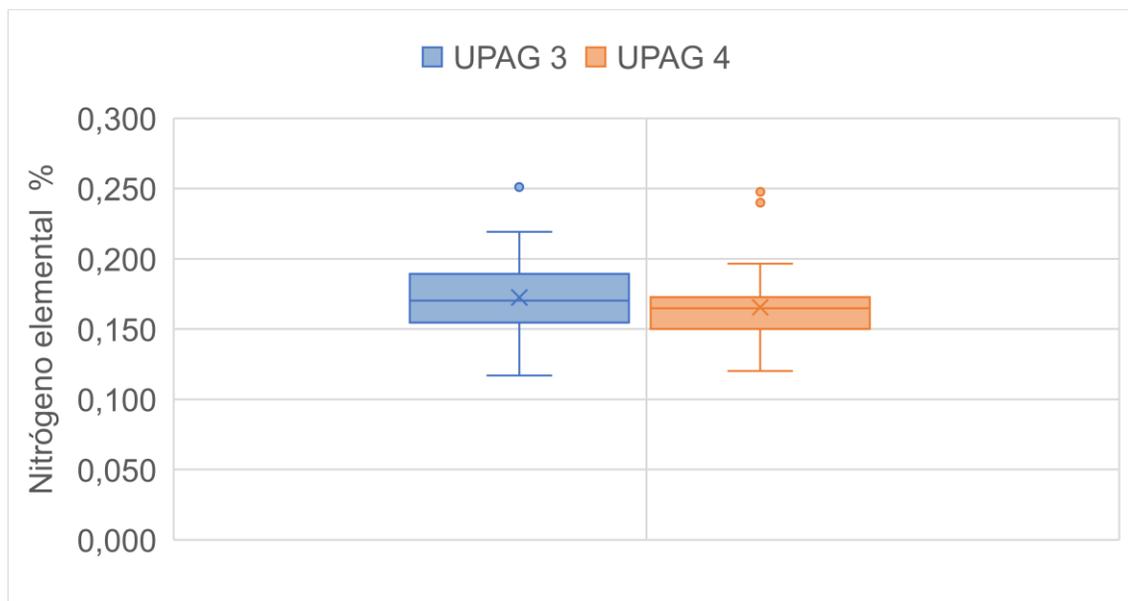


Figura 6. Gráfico de cajas de contenido de nitrógeno total de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

4.2.1.6. Variabilidad del pH_{H₂O} de 0 a 15 cm de profundidad del suelo

El pH_{H₂O}, medido previo a la siembra del cultivo, mostró valores promedio de 5,5 y 6,0 para la chacra con antecesor raigrás y pradera respectivamente. En promedio esto significó un pH 9 % mayor en la chacra con antecesor pradera (cuadro 18). El rango de los valores obtenidos en la chacra con antecesor pradera fue de 1,7 unidades; comprendidos en un mínimo de 5,5 y un máximo de 7,2 unidades.

En tanto, en la chacra con antecesor raigrás el rango fue de 0,8 unidades con valores de entre 5,3 y 6,1 unidades. A su vez, el coeficiente de variación de la chacra con antecesor pradera fue el doble de la de raigrás (7,1 % frente a 3,5 %).

La mayor presencia de Solonetz y Solonetz Solodizados con alta concentración de cationes en la chacra con antecesor pradera explicó en parte las diferencias de pH entre chacras.

Datos aportados por Havlin et al., citados por Pagani (2013), indicaron que el rango de pH necesario para el crecimiento de plantas de arroz se ubica entre 5 y 7 unidades. Considerando los valores de pH más bajos encontrados en las dos chacras, los niveles de acidez presente no debieron de interferir

significativamente en el desempeño productivo en ningún punto muestreado previa o posteriormente a la inundación del cultivo.

En el gráfico de cajas comparativo entre chacras, también se apreció la mayor amplitud y heterogeneidad de los valores de pH en los puntos de muestreo obtenidos en la chacra con antecesor pradera (figura 7).

Valores promedio de pH muy similares fueron reportados por Roel et al. (2004b) tras el trabajo en la misma rotación en las cuatro zafas previas. La diferencia entre chacras se mantuvo tanto en la zafra 2008-2009 como en la 2003-2004 (cuadro 19). Esto último resultó lógico considerando que se trata de una medición relacionada a factores endógenos del suelo que normalmente se mantienen en el tiempo.

Trabajos llevados a cabo por otros autores muestran valores para el CV % de pH comprendidos entre 2,1 % y 7,9 % (Roel y Plant 2004a, Melchiori y Kemmerer 2004, Morales y Paz Ferreiro 2009, Otaño y Saruki 2010). Estos autores mencionaron que los valores del CV % del pH suelen ser bajos en relación con otros parámetros del suelo. Particularmente en este trabajo la variabilidad fue baja independientemente del cultivo antecesor.

Cuadro 18. Estadística descriptiva: pH de 0 a 15 cm de profundidad en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	pH _{H₂O}	40	5,5	0,20	5,3	6,1	3,5
Pradera	UPAG 4		22	6,0	0,43	5,5	7,2	7,1

No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación.

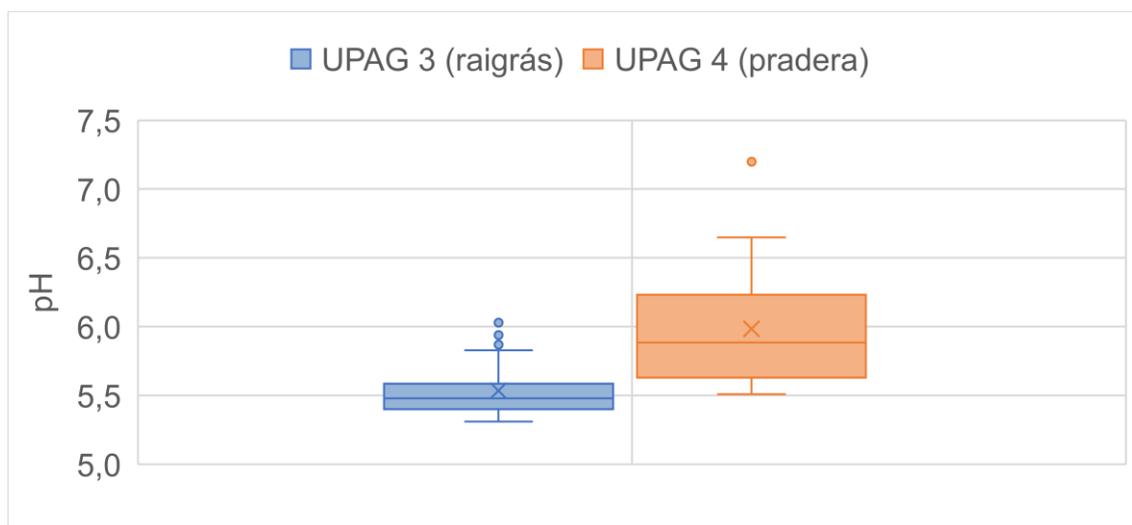


Figura 7. Gráfico de cajas de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Cuadro 19. Comparación de media y coeficiente de variación del pH del suelo en chacras UPAG 3 y UPAG 4 con diferente pastura antecesora, durante la zafra 2003-2004 en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Zafra	Antecesor	Chacra	Variable	Media	CV %
03/04	Raigrás	UPAG 3	pH % 0-10 cm	5,3	2,6
			pH % 10-20 cm	5,6	4,7
03/04	Pradera	UPAG 4	pH % 0-10 cm	5,6	4,4
			pH % 10-20 cm	6	6,9

Fuente: adaptado de Roel et al. (2004b).

4.2.1.7. Variabilidad de la conductividad eléctrica de 0 a 30 cm de profundidad de suelo

La Ce_{30} promedio de la chacra con antecesor raigrás registró un promedio de 31 mS/m, mientras que la precedida por pradera fue 22,5 % superior. En esta se registró un valor de 38 mS/m.

Según fuentes bibliográficas, los factores más aludidos que influyen sobre este parámetro suelen ser la textura, la materia orgánica, la salinidad y la humedad (Sarec et al. 2002, Sudduth et al. 2005, Barbazán et al. 2015).

Al comparar la textura de las chacras, se pudo notar que la chacra con antecesor pradera presentó mayores valores de arcilla y limo y menor arena frente a la chacra con antecesor raigrás. Si bien las diferencias no fueron muy marcadas, estos factores pudieron estar influyendo en las lecturas de Ce_{30} .

La medición de la conductividad eléctrica surgió de estudios de suelos con problemas de salinidad. En estos, las altas conductividades se asociaron a zonas de alta salinidad (Corwin y Lesch, 2005a). La presencia de suelos salinos dominantes en la chacra con antecesor pradera también pudo ser responsable de estas diferencias entre chacras.

La humedad del suelo y el contenido de MO no fueron registrados al momento de determinar la Ce_{30} .

El rango de 45 mS/m y el CV de 28 % en la chacra con antecesor raigrás frente a 28 mS/m y 21 % de CV en la chacra con pradera reflejó la mayor heterogeneidad de suelos en la chacra con antecesor raigrás.

Fueron también registrados valores de conductividad eléctrica a 90 cm de profundidad, pero se descartaron debido a la falta de coherencia en las lecturas obtenidas.

Cuadro 20. Estadística descriptiva: conductividad eléctrica de 0 a 30 cm de profundidad del suelo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	Ce_{30} (mS/m)	40	30,6	8,60	15,2	59,6	28
Pradera	UPAG 4		22	37,8	7,80	24,4	51,8	20,7

No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación.

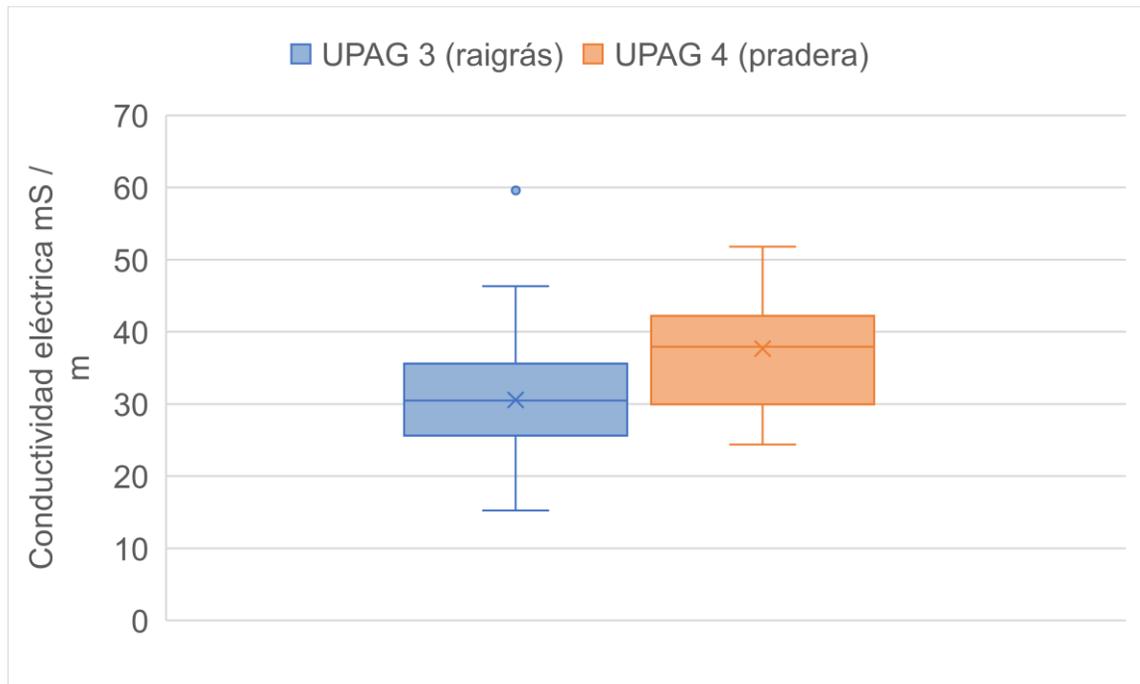


Figura 8. Gráfico de cajas de conductividad eléctrica del suelo de 0 a 30 cm de profundidad en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

4.2.1.8. Evolución del crecimiento del cultivo y rendimiento

En el comienzo de la etapa vegetativa se evaluó la implantación. Si bien fue necesario realizar un baño para promover la emergencia, se constató un mayor número de plantas respecto al esperado en condiciones normales. Posiblemente esto se debió a las buenas condiciones climáticas, sobre todo a temperaturas, posteriores a la siembra, superiores al promedio histórico.

En los conteos de plántulas, se registró en promedio 277 y 287 plantas/m² con un CV de 9,3 % y 7,3 % para la chacra con antecesor raigrás y con pradera respectivamente (cuadro 21).

Las poblaciones obtenidas en las dos chacras fueron mayores a las 180-200 pl/m² recomendadas para alcanzar el máximo rendimiento para el cultivar (Cantou et al., 2009).

Cuadro 21. Estadística descriptiva: implantación del cultivo en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	No. de plantas/m ²	40	277,0	26,00	231,0	349	9,4
Pradera	UPAG 4		22	287,0	21,00	247,0	326	7,3

No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación.

La variabilidad de la implantación fue sustancialmente más baja en comparación a los resultados publicados por Roel et al. (2004b, CV 28,4 %) y Roel (2005, CV 23,9 %) en chacras de la zona, trabajando con la misma variedad.

En términos de producción de MS/ha durante macollaje, primordio, floración y cosecha, la chacra con antecesor raigrás fue superior durante todo el ciclo del cultivo (figura 9). Esta diferencia, que comenzó siendo de un 38 % en macollaje, se fue atenuando con cierta fluctuación hasta llegar al período de cosecha, donde se redujo a tan solo 4 %. Los datos presentados fueron el promedio absoluto de todos los sitios de muestreo en cada chacra medidos en MS/ha.

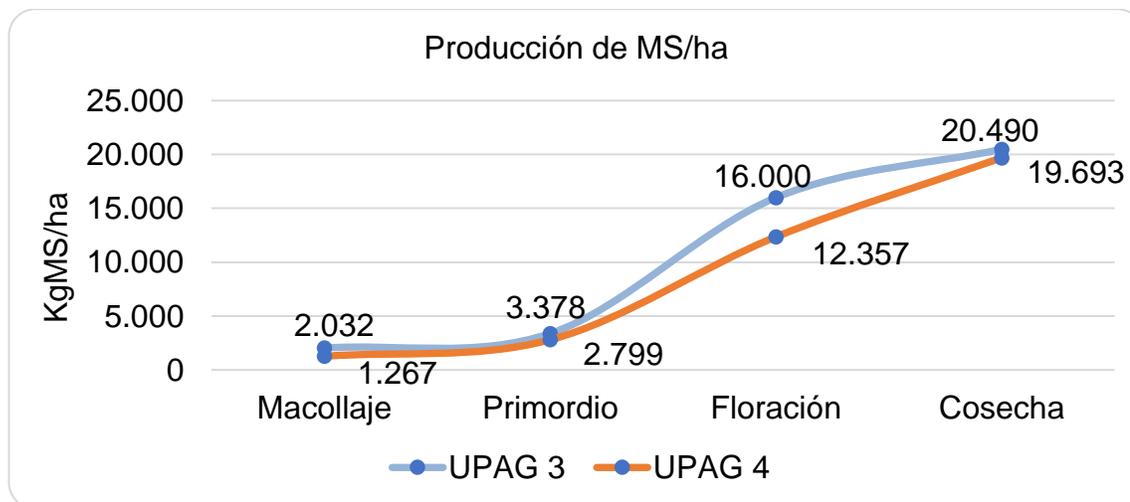


Figura 9. Evolución de la producción de MS/ha promedio en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

El número de tallos/m² promedio no mostró contrastes considerables entre chacras durante los sucesivos muestreos. Las mayores diferencias fueron de 51 y 74 tallos/m² en los estadios de macollaje y primordio respectivamente. En el resto de los muestreos esta diferencia no superó los 10 tallos/m² (figura 10).

En todos los muestreos las diferencias fueron a favor de la chacra con antecesor raigrás, a excepción de la realizada en primordio.

Datos presentados por Pereira y Stirling (2012), los cuales trabajaron en las mismas chacras y en la misma zafra que la de este estudio, reafirmaron la diferencia en el número de tallos/m² ocurrida en primordio a favor de la chacra con antecesor pradera.

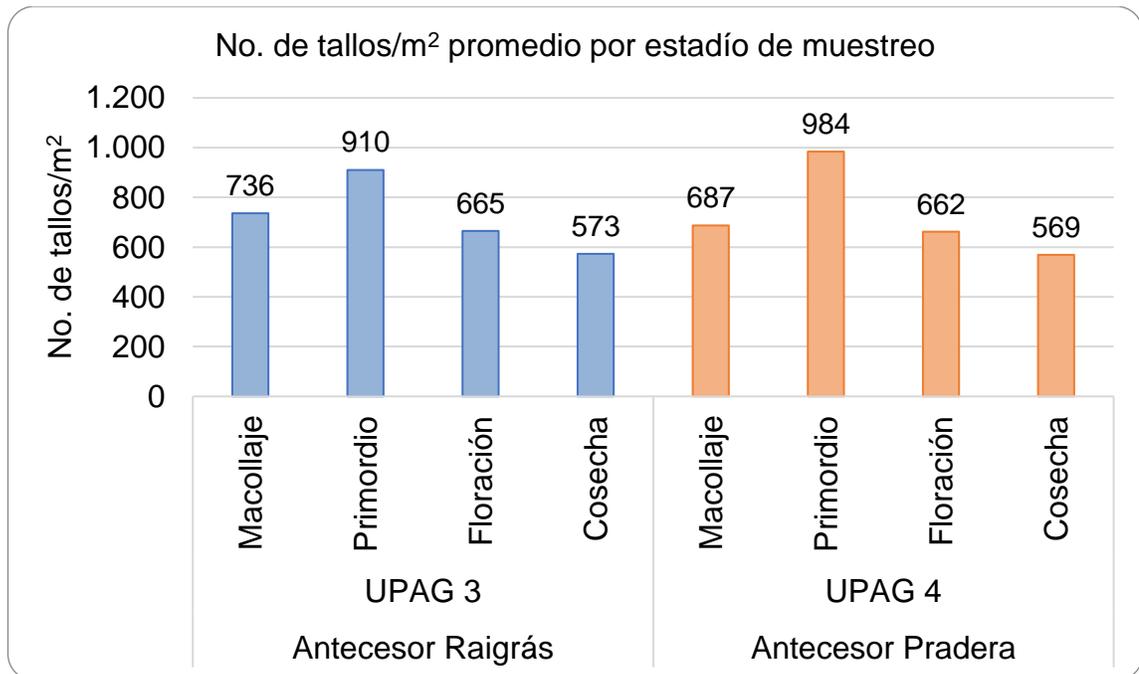


Figura 10. Evolución del No. de tallos/m² promedio en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

El coeficiente de variación disminuyó en las sucesivas etapas fenológicas. Fue menor en la chacra con antecesor raigrás en tres de las cuatro instancias de medición (cuadro 22).

Cuadro 22. Estadística descriptiva: No. de tallos/m² en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	EF	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	No. de tallos/m ²	Macollaje	40	736	186	444	1.213	25,3
			Primordio		910	231	513	1.494	25,3
			Floración		665	161	294	971	24,1
			Cosecha		573	81	382	725	14,1
Pradera	UPAG 4	No. de tallos/m ²	Macollaje	22	687	223	349	1.216	32,3
			Primordio		984	266	665	1.588	27
			Floración		662	135	431	1.020	20,4
			Cosecha		569	101	412	775	17,7

No. = número de muestreos. EF. = Estadio fenológico. DE = Desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. C.V. = coeficiente de variación.

El rendimiento promedio para la chacra con antecesor raigrás fue de 9 395 kg/ha, con un mínimo de 6 623 kg/ha y un máximo de 12 478 kg/ha. En tanto que la producción promedio en la chacra con antecesor pradera fue superior, alcanzando los 10 955 kg/ha, con un mínimo de 8 065 kg/ha y un máximo de 12 645 kg/ha. La diferencia entre los promedios de cada chacra fue de 1 560 kg/ha a favor de la chacra con antecesor pradera.

La brecha entre máximo y mínimo para la chacra con raigrás como antecesor fue 5 856 kg/ha, mientras que para la chacra con pradera fue 4 579 kg/ha, lo que representó un 21,8 % menos.

Los CV fueron de 13,3 % y 9,4 % para la chacra con antecesor raigrás y pradera respectivamente. Ambos coeficientes fueron bajos considerando el criterio de clasificación de Wilding, citado por Mulla y McBratney (2002), y se encontraron dentro de los valores reportados por Mulla y McBratney (2002) de 8 % y 29 % para el rendimiento de cultivos.

Trabajando en el cultivo de arroz, Roel et al. (2004b), Roel (2005) reportaron valores de CV para rendimiento de grano en un rango de 14 y 20 %. Por su parte, Del Campo (2007) obtuvo un CV en el rendimiento de grano de 14,6 % trabajando en el cultivo de maíz de secano en Uruguay.

Cuadro 23. Estadística descriptiva: rendimiento en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	No.	Media	D.E.	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	Rendimiento (kg/ha)	40	9,395	1,248	6,623	12,478	13,3
Pradera	UPAG 4		22	10,955	1,028	8,065	12,645	9,4

No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación.

La dispersión de los rendimientos encontrados en la chacra con antecesor pradera fue menor a los de la chacra con antecesor raigrás. Este aspecto se vio reflejado en el gráfico de cajas de la figura 11.

Teniendo en cuenta que el valor mínimo en la chacra con antecesor pradera quedó por fuera del rango de dos desvíos estándar, el resto de los valores estuvo por encima de los 9 000 kg/ha, lo que significó un nivel de producción muy alto y estable en toda la chacra.

La diferencia de rendimiento entre chacras pudo estar relacionada a los efectos positivos de las estrategias de rotación que se desarrollaron en cada chacra. En las condiciones del ensayo, se dieron ciertos efectos positivos a favor de la chacra con antecesor pradera (UPAG 4), si bien no se midieron (a excepción del enmalezamiento): a) el cultivo antecesor fue una pradera de festuca con leguminosas de tres años y medio de duración, lo que significó un aporte de nitrógeno durante la fase de arroz en el primer año; b) la menor presión de malezas con respecto a la chacra con antecesor raigrás, que fue segundo cultivo de arroz luego de una pastura de corta duración, y c) una posible menor presencia de los microorganismos que causan las enfermedades de tallo en el cultivo de arroz.

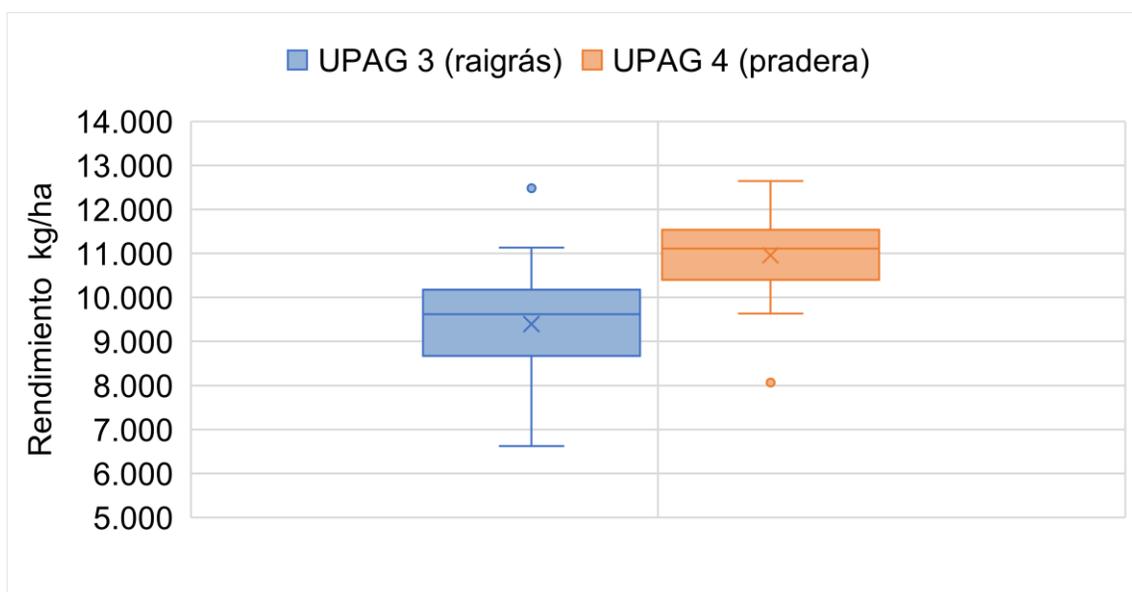


Figura 11. Gráfico de cajas de rendimiento en kg/ha en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Kamoshita et al. (2009) observaron que en chacras de similares potenciales se alcanzaron mayores rendimientos en aquellas donde existió menor variabilidad entre las distintas partes de la chacra. Algo similar se vio en este trabajo donde la variabilidad del rendimiento fue menor en la chacra con antecesor pradera y su rendimiento superior.

Entre los parámetros de suelo estudiados, en la chacra con antecesor pradera, la textura, Ce y P presentaron menor variabilidad. Los parámetros K, C orgánico, N total y pH fueron menos variables en la chacra con antecesor raigrás.

En el caso de los parámetros que describieron crecimiento, los más estables para la chacra con antecesor pradera fueron la implantación, MS en primordio, MS en floración y rendimiento. En tanto para la chacra con antecesor raigrás fueron el número de tallos/m² en macollaje, número de tallos/m² en primordio, número de tallos/m² en cosecha, MS en macollaje y MS en cosecha.

4.2.2. Niveles de enmalezamiento, riego y SPAD

4.2.2.1. Nivel de enmalezamiento

La presencia de malezas en los puntos georreferenciados fue observada en cuatro etapas del ciclo del cultivo: primordio, floración temprana, floración tardía y cosecha.

Considerando el promedio de todos los muestreos realizados en cada etapa, se encontró que el nivel de enmalezamiento fue superior en la chacra con antecesor raigrás durante todos los muestreos. Esta diferencia se observó en todas las etapas fenológicas del cultivo en las que se realizaron muestreos.

Esta observación estuvo dentro de lo esperado, ya que en la secuencia de cultivos-pasturas de la UPAG la chacra con antecesor raigrás se presentó como el segundo cultivo de arroz. Normalmente, el segundo año consecutivo de arroz presenta mayor infestación inicial de malezas que en cultivos de arroz de primer año. Estas malezas provienen de los escapes en los controles de arroz de primer año.

Con respecto a las pasturas antecesoras, Cantou et al. (2009) realizaron el seguimiento de la evolución desde la implantación. En esta observaron que la regeneración del raigrás luego del laboreo de verano en la UPAG 3 no fue buena y constataron una mayor proliferación de malezas. En cambio, en la chacra con antecesor pradera, la regeneración de la pastura fue superior. Se alcanzó una mayor acumulación de materia seca al inicio del barbecho, antes de la siembra de los cultivos de arroz de este ensayo.

Las malezas que predominaron en el primordio floral y la floración temprana fueron *Alternanthera philoxeroides*, *Luziola peruviana*, *Paspalum distichum* y otras especies del grupo de las gramas. En las etapas más tardías, junto a las ya nombradas, también se observaron *Echinochloa crusgalli* y otras especies del grupo de los capines.

Los coeficientes de variación para este parámetro fueron altos para ambas chacras. En los primeros dos muestreos fueron superiores los de la chacra con antecesor pradera, mientras que en los últimos dos fueron superiores los de la chacra con antecesor raigrás (cuadro 24).

El muestreo realizado en primordio presentó cierta relevancia porque mostró la situación de enmalezamiento en un momento del ciclo del cultivo a partir del cual ya no se disponía de herramientas de control químico a nivel comercial para mitigar este problema.

En este muestreo se encontró que la chacra con antecesor pradera presentó menor nivel de enmalezamiento promedio que la de antecesor raigrás. En el gráfico de cajas de la figura 12 se reflejó el menor enmalezamiento en la chacra con antecesor pradera y también la mayor variabilidad del nivel de malezas.

Cuadro 24. Estadística descriptiva: nivel de enmalezamiento en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	Estadio F	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	Malezas	Prim.	40	2,2	1,0	1	4	43,8
			Flor A.		2,6	0,8	1	4	32,8
			Flor B.		2,3	1,0	1	4	42,0
			Cos.		2,4	0,8	0	4	34,0
Pradera	UPAG 4	Malezas	Prim.	22	1,1	1,0	0	4	91,3
			Flor. A		1,1	0,9	0	2	79,6
			Flor. B		1,5	0,6	1	3	39,8
			Cos.		2,1	0,5	1	3	25,2

No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación. Prim. = primordio. Flor A. = Floración temprana. Flor B. = Floración tardía. Cos. = Cosecha.

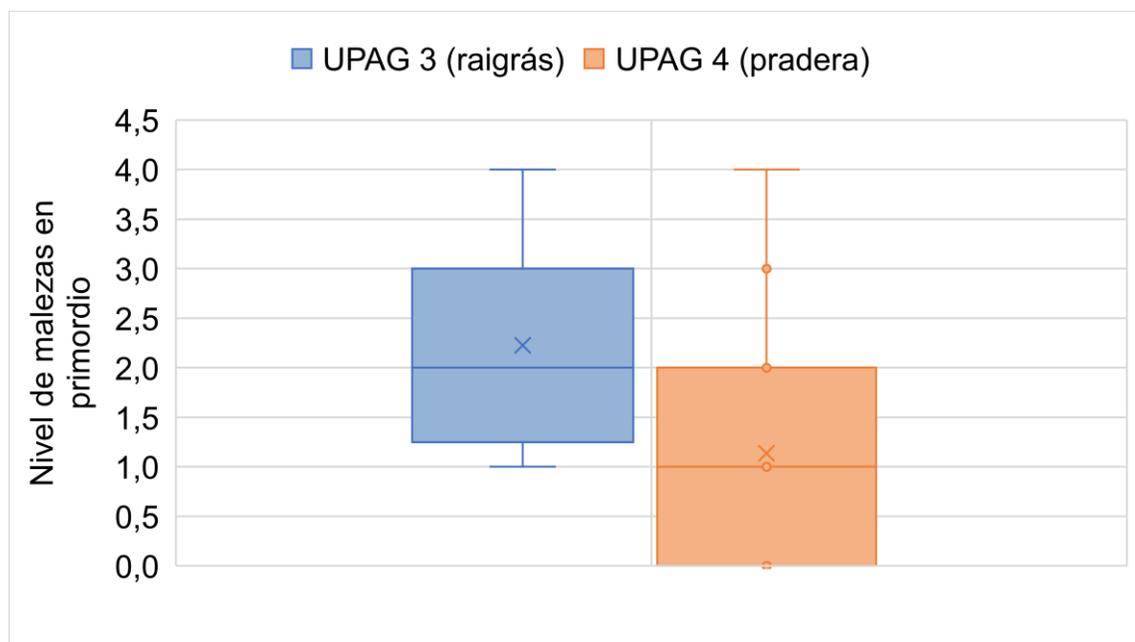


Figura 12. Variabilidad de nivel de enmalezamiento en primordio en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

4.2.2.2. Riego

Como ya fuera mencionado, la calidad del riego fue registrada de dos maneras: a) medición con regla de altura de la lámina de agua en cm y b) con una escala visual de cinco niveles.

La altura de lámina de agua promedio fue superior en la chacra con antecesor raigrás en los tres estadios del cultivo. Además, al comparar la variabilidad intra-chacra en los diferentes estadios, la de antecesor raigrás fue más estable.

En ambas chacras se vieron un gran número de puntos con láminas de agua menores a los 10 cm. Se registraron muy pocos por encima de esta referencia.

Algunos sitios en diferentes momentos del ciclo del cultivo registraron valores de 0 cm aproximadamente de altura de lámina. A pesar de esto, los rendimientos resultaron similares a la media e inclusive superiores.

Cuadro 25. Estadística descriptiva: altura de lámina de agua en chacras con distinta pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	No.	Estadio F	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	Altura de agua	40	Macollaje	6,3	3,5	0	16,7	55,3
				Primordio	7,9	3,6	0,7	15,3	44,9
				Floración	8,2	3,8	0,7	17	47
Pradera	UPAG 4	Altura de agua	22	Macollaje	3,9	3	0,3	12	76,1
				Primordio	7,7	4,2	1,2	17	53,8
				Floración	6,4	3,6	0	14	56,3

No. = número de muestreos. D.E. = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. C.V. = coeficiente de variación.

Las mediciones de altura de agua y la propiedad inferida “riego” mostraron un patrón similar para cada uno de los puntos. Por lo tanto, existió cierta coherencia entre ambas mediciones.

Tal como lo muestra el gráfico de cajas de la figura 13, durante el primordio floral la media del nivel de riego fue superior en la chacra con antecesor pradera, aunque se registraron medidas similares.

Por otra parte, algunos puntos de la chacra con antecesor raigrás presentaron niveles de riego entre encharcado y algo bajo, los cuales podrían tener alguna repercusión en el rendimiento.

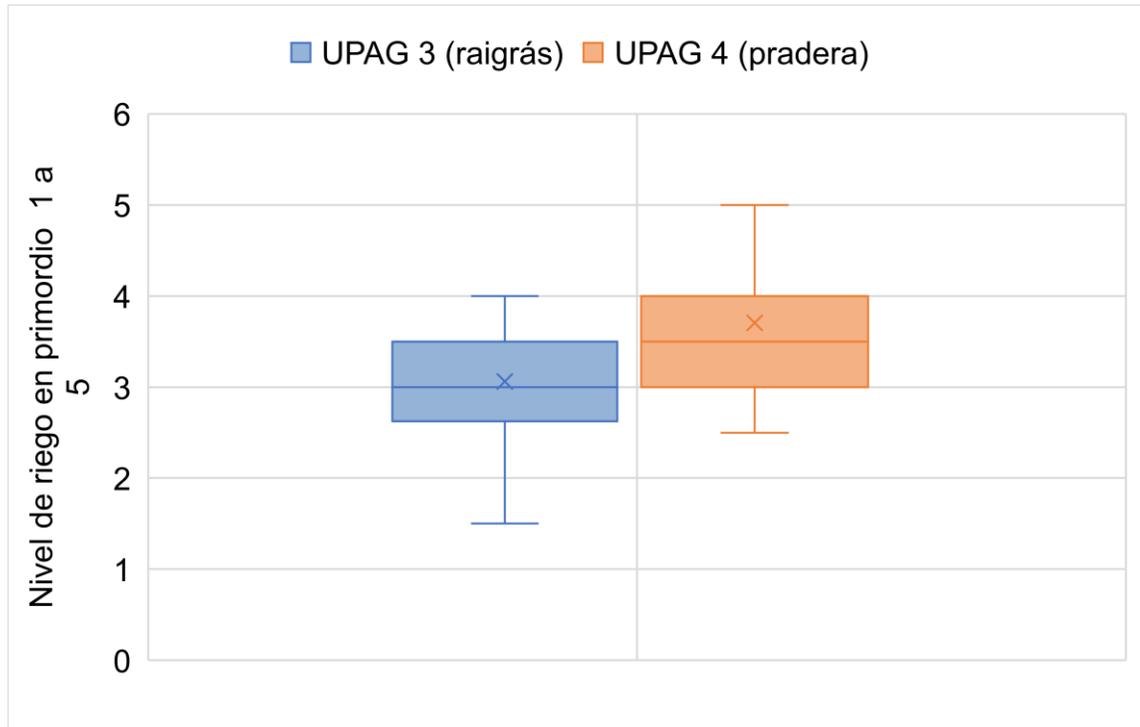


Figura 13. Gráfico de cajas de nivel de riego durante primordio floral en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

4.2.2.3. Actividad clorofiliana (SPAD)

Las lecturas de SPAD tomadas en macollaje, primordio y floración de las dos chacras mostraron valores promedio comprendidos entre 31,3 y 34,4 unidades (cuadro 26).

Las medias fueron similares entre estadios y entre chacras. Los coeficientes de variación resultaron bajos y también muy parecidos entre sí, aunque levemente inferiores en la chacra con antecesor pradera en dos de las tres mediciones. El coeficiente máximo de variación fue de 7,4 % y el mínimo de 4 %.

Los valores mínimos de SPAD registrados en chacra con antecesor pradera no bajaron de 31, y en la chacra con antecesor raigrás llegaron hasta 27

unidades. En tanto los máximos se ubicaron en el entorno de las 38 unidades en ambas chacras.

Lecturas similares fueron obtenidas por Silveira y Tarán (2009) en un ensayo realizado en la 7^a. Sección de Treinta y Tres utilizando la variedad INIA Olimar.

Cuadro 26. Estadística descriptiva: actividad clorofiliana (SPAD) en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	No.	Estadio F.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	SPAD	40	Macollaje	31,3	2,3	26,9	38,3	7,4
				Primordio	34,0	1,4	31,6	37,2	4,0
				Floración	33,0	2,0	27,0	38,0	6,1
Pradera	UPAG 4	SPAD	22	Macollaje	34,4	1,9	31,4	38,8	5,8
				Primordio	33,6	1,4	31,1	37,8	4,2
				Floración	34,0	1,0	31,0	37,0	4,0

No. = número de muestreos. F = fenológico. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación.

4.2.3. Componentes del rendimiento, la calidad molinera y el contenido de nutrientes

Los componentes de rendimiento registrados en ambas chacras mostraron valores dentro del rango esperado para la variedad. No se observaron diferencias considerables entre chacras.

El porcentaje de esterilidad promedio fue 12,5 y 14,8 % para la chacra con antecesor raigrás y pradera respectivamente. Estos valores son similares a los obtenidos con la variedad El Paso 144 cuando se los compara con los de ensayos en condiciones similares (Terra et al. 2007, 2009, 2010).

El número de panojas por metro cuadrado fue superior en la chacra con antecesor raigrás. Contrariamente, el número de granos por panoja fue inferior respecto a la chacra con antecesor pradera. Se obtuvo el número de granos por metro cuadrado como resultado de la multiplicación de los últimos dos componentes de rendimiento. Esta cifra resultó 9,4 % superior en la chacra con antecesor pradera. Se obtuvieron aquí 64 871 granos totales por m² en promedio de todos los puntos.

El peso de 1000 semillas resultó elevado en ambas chacras con respecto al rango que suele registrarse en otras publicaciones para esta variedad (Terra et al. 2007, 2009, 2010).

Cuadro 27. Estadística descriptiva: componentes del rendimiento en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Chacra / Antecesor	Variable	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
UPAG 3 raigrás	% de esterilidad	40	12,5	2,9	7,3	20,7	23,9
	No. de pan/m ²	40	554	71	412	745	12,8
	No. de gran. /pan	40	107	17	75	147	16,1
	No. gran. tot. /m ²	40	59,282	10,990	31,328	83,026	18,5
	Peso de 1000 g	40	26,74	0,56	25,66	28,15	2,09
UPAG 4 pradera	% de esterilidad	21	14,8	3,4	9,6	21,9	22,9
	No. pan/m ²	21	531	76	422	716	14,3
	No. gran. /pan	21	122	11	102	146	9,2
	No. gran. tot. /m ²	21	64,871	10,866	44,489	91,304	16,7
	Peso de 1000 g	22	26,28	0,49	25,56	27,34	1,9

No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín = Mínimo. Máx = Máximo. CV = coeficiente de variación. Pan/m² = Panojas/m². Gran. /pan = granos/panoja. Gran. tot. /m² = granos totales / m². Peso de 1000 = peso de 1000 semillas.

Entre los parámetros de calidad molinera (cuadro 28), el porcentaje de granos enteros, blancos y manchados se ubicó por encima del nivel base de comercialización establecido por el Decreto 321/988. No existieron diferencias importantes entre chacras desde el punto de vista comercial.

El porcentaje de granos yesados en la chacra con antecesor raigrás se ubicó por debajo del 6% establecido como base para su comercialización (base = 6%, se recibe hasta 18%), pero no sucedió lo mismo con la chacra con antecesor pradera, donde este valor ascendió al 8,7%.

El índice de verde en ambos casos mostró valores muy por encima de la base del 3%. Estos valores, además, se encontraron por fuera del rango de comercialización (es aceptable hasta 8%). Los valores medios de chacra fueron 9 y 12% para las chacras con antecesor raigrás y pradera respectivamente.

Cuadro 28. Estadística descriptiva: parámetros de calidad molinera en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Antecesor	Chacra	Variable	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
Raigrás	UPAG 3	Índice verde	40	9	3	4	18	29
		% de granos blancos	40	70	5	66	99	6,8
		% de granos enteros	40	62,5	2	56,2	66,1	3,3
		% de granos quebrados	40	7	2	4	12	26,5
		% de granos yesados	40	5	2	2	9	31,2
		% de granos manchados	40	0	0	0	1	160,5
Pradera	UPAG 4	Índice verde	22	12	3	8	17	22
		% de granos blancos	22	69,8	0,6	68,1	70,6	0,8
		% de granos enteros	22	61	3	55	66	4,1
		% de granos quebrados	22	8	2	4	13	27,9
		% de granos yesados	22	9	2	5	13	24,5
		% de granos manchados	22	0	0	0	0	217,6

No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación.

Además de los parámetros ya mencionados, se exploraron los contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio en planta y en grano.

El contenido de P en planta resultó 9,9 % superior con antecesor raigrás que con pradera. Mientras tanto, en el grano la concentración fue 1,7 % superior en la chacra con antecesor raigrás. Asimismo, el promedio de la concentración de P encontrado a nivel de chacra fue 16,3 % superior con antecesor raigrás que con pradera.

A nivel de N, el contenido en planta fue apenas 3 % superior en la chacra con antecesor raigrás. En cambio, en grano el resultado fue 9 % superior en la chacra con antecesor pradera. En el suelo la concentración de N fue levemente superior en la chacra con antecesor raigrás (3,6 %).

En lo que respecta al K en planta y en grano, los valores fueron 3,4 y 4 %, respectivamente. El registro mayor corresponde a la chacra con antecesor pradera. Contrariamente, la concentración en suelo fue 5,3 % superior en la chacra con antecesor raigrás.

Cuadro 29. Estadística descriptiva: contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en planta y en grano en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Chacra / Antecesor	Variable	No.	Media	DE	Mín.	Máx.	CV %
UPAG 3 raigrás	P en planta (mg/g)	40	1,00	0,22	0,40	1,71	22,4
	N en planta (%)	40	0,67	0,09	0,53	0,92	13,9
	K en planta (%)	40	0,88	0,23	0,41	1,34	26,3
	P en grano (mg/g)	40	3,44	0,33	2,78	4,19	9,7
	N en grano (%)	40	0,89	0,07	0,80	1,14	7,8
	K en grano (%)	40	0,48	0,07	0,38	0,69	14,1
UPAG 4 pradera	P en planta (mg/g)	22	0,91	0,14	0,56	1,20	15,4
	N en planta (%)	22	0,65	0,11	0,44	0,92	17,7
	K en planta (%)	22	0,91	0,25	0,54	1,43	27
	P en grano (mg/g)	22	3,4	0,33	2,93	4,19	9,8
	N en grano (%)	22	0,97	0,07	0,83	1,10	6,7
	K en grano (%)	22	0,50	0,05	0,41	0,59	10,3

No. = número de muestreos. DE = desvío estándar. Mín. = Mínimo. Máx. = Máximo. CV = coeficiente de variación.

4.3. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ESPACIAL

Los variogramas isotrópicos del fósforo no mostraron asíntotas. El modelo lineal fue el que mejor se ajustó en ambas chacras. Se observó un efecto pepita muy fuerte ($n/s > 0,75$) independientemente del antecesor. Es decir, la varianza debida a los errores experimentales o analíticos fue muy elevada, siendo igual a la varianza total. Por lo tanto, no se constató la existencia de correlación espacial para el fósforo en las condiciones de este estudio.

La ausencia de autocorrelación en el fósforo resulta lógica considerando dos elementos: a) la estratificación del nutriente en los primeros centímetros del suelo en chacras con sucesivos años de fertilización y b) los movimientos de tierra durante la preparación del suelo para la siembra de cultivos o pasturas en sucesivos años de rotación agrícola pastoril.

La curva de semivarianza del potasio tampoco mostró autocorrelación, independientemente del antecesor. Los semivariogramas teóricos no lograron coeficientes de determinación superiores a $r^2 = 0,43$. Se observó un efecto pepita moderado en la chacra con antecesor raigrás y muy fuerte en la de antecesor pradera ($n/s = 0,41$ y $0,99$ respectivamente).

En cambio, el porcentaje de arcilla y el pH mostraron un grado de estructura espacial fuerte en la chacra con antecesor raigrás. El modelo de Gauss mostró el mayor ajuste a los datos empíricos en ambas variables.

El porcentaje de arcilla tuvo una fuerte autocorrelación espacial. Obtuvo un valor de n/s de 0,21 y el rango fue de 524 m.

En el pH la autocorrelación fue aún más fuerte. Mostró una relación n/s de 0,03 y un rango de 116 m. Resultados similares de rangos fueron reportados por otros autores (Cambardella et al. 1994, Mulla y McBratney 2002, Inamura et al. 2004).

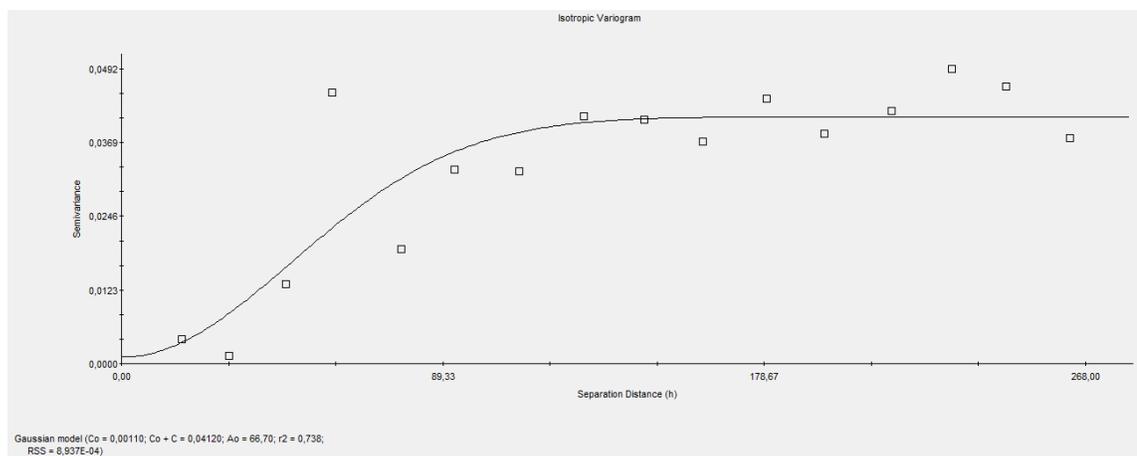


Figura 14. Variograma isotrópico de pH de 0 a 15 cm de profundidad de suelo en chacra con antecesor raigrás en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

La conductividad eléctrica fue la única variable continua considerada en el ensayo y la única que mostró correlación espacial fuerte en ambas chacras. El modelo de ajuste en ambos casos fue el de tipo esférico. La relación n/s fue mayor en la chacra con antecesor pradera (0,11 frente a 0,01), lo cual indicó un mayor grado de autocorrelación en la chacra con antecesor raigrás. Los rangos fueron 188 y 109 m para la chacra con antecesor raigrás y pradera respectivamente.

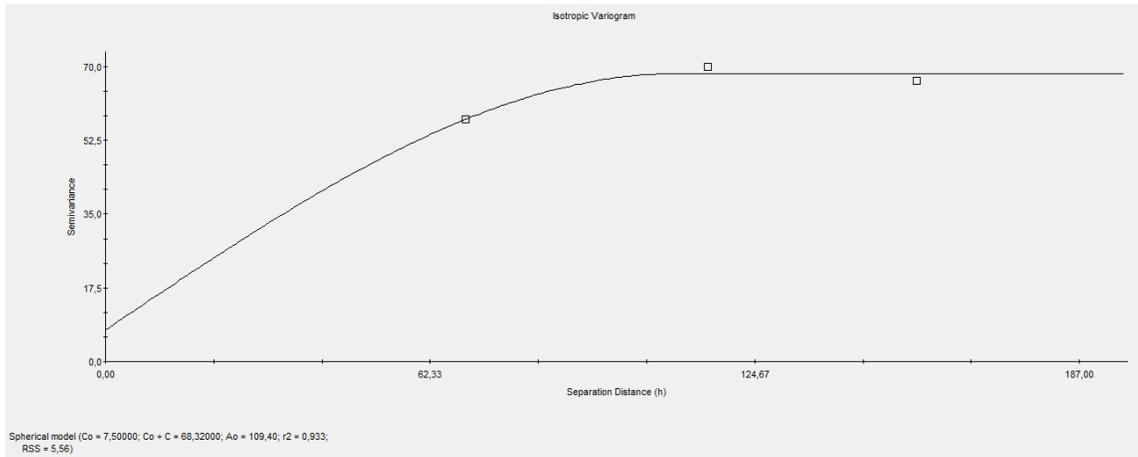


Figura 15. Variograma isotrópico de Ce en chacra con antecesor pradera en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Los semivariogramas de rendimiento mostraron un alto coeficiente de determinación para los modelos teóricos de ajuste. En el caso de la chacra con antecesor pradera el r^2 tendió al máximo, pero presentó un efecto pepita puro, por lo que su estructura espacial se clasificó como débil.

En la chacra con antecesor raigrás se obtuvo un r^2 de 0,8 para el ajuste a un modelo gaussiano, y se observó la asíntota en el semivariograma. La varianza total observada presentó de escasa a nula incidencia de la varianza, debido a errores experimentales o analíticos ($n/s = 0,01$). El rango de correlación espacial fue de 81 m. Este dato fue similar a los reportados por Otaño y Saruki (2010) de 101 y 109 m en un ensayo de evaluación de rotaciones en cultivos de secano.

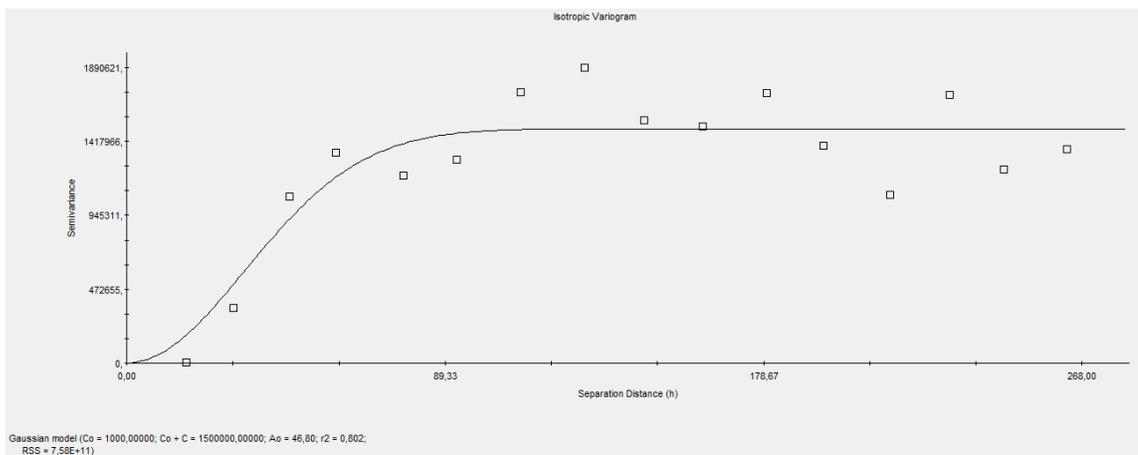


Figura 16. Variograma isotrópico de rendimiento en chacra con antecesor raigrás en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

La ausencia de correlación espacial en el fósforo y el potasio en ambas chacras implicó, entre otras cosas, que no sería posible estimar los valores en sitios no muestreados con la información que se contó. Tampoco se podría llevar a cabo un muestreo dirigido de suelo basándose en los datos muestreados.

Cuadro 30. Resumen de parámetros de los semivariogramas en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Chacra	Parámetro	Modelo	r^2	n / s	Rango (m)	SCR
<u>UPAG 3</u> Antecesor raigrás	P ppm	Lineal	0,07	100 %	264	2,97E+03
	K mEq/100 g	Gaussiano	0,43	41 %	84	7,91E-07
	Arcilla %**	Gaussiano	0,89	21 %	524	1,67E+01
	C. org. %	Esférico	0,61	4 %	128	1,36E-03
	Ce ms/m**	Esférico	0,72	1 %	188	4,23E+03
	pH**	Gaussiano	0,74	3 %	116	8,94E-04
	Rend. kg/ha**	Gaussiano	0,80	0 %	81	7,58E+11
<u>UPAG 4</u> Antecesor pradera	P ppm	Lineal	0,88	100 %	156	1,59E+00
	K mEq/100 g	Lineal	0,22	100 %	156	2,65E-07
	Arcilla %	Exponencial	0,24	5 %	85	1,46E+00
	C. org. %	Esférico	0,44	0 %	119	7,70E-04
	Ce ms/m**	Esférico	0,93	11 %	109	5,56E+00
	pH	Lineal	0,15	100 %	156	6,35E-04
	Rend. kg/ha	Lineal	0,99	100 %	156	1,13E+10

P = fósforo. K = Potasio. C. org = Carbono orgánico. Ce = Conductividad eléctrica. Rend. = Rendimiento. n / s = nugget / sill (pepita / asíntota). SCR = suma de cuadrados residuales.

4.4. ANÁLISIS DE CORRELACIONES DE PEARSON

El análisis de correlaciones de Pearson se efectuó entre el rendimiento y los restantes 66 parámetros registrados. El cuadro 31 sintetiza los únicos parámetros correlacionados significativamente al 5 %.

4.4.1. Propiedades edáficas

No se encontraron correlaciones significativas al 5 % en los parámetros manejables de suelo como P y K independientemente del cultivo antecesor. Esto resulta lógico teniendo en cuenta que: a) la concentración de estos nutrientes en cada uno de los sitios muestreados fue elevada; b) los respectivos niveles críticos de respuesta agronómica al agregado en el cultivo de arroz se encontraron por

debajo de los valores encontrados a campo, y c) a la siembra se agregaron cantidades considerables de P y K.

El porcentaje de arcilla fue el único parámetro entre las propiedades edáficas que se correlacionó con el rendimiento en la chacra con antecesor raigrás. La correlación de esta variable con el rendimiento fue de $r = -0,404$ con un nivel de significancia del 5 %.

En la chacra con antecesor pradera, no se encontraron correlaciones significativas al 5 % relacionadas a los factores edáficos.

La correlación negativa del rendimiento y el contenido de arcilla en la chacra con antecesor raigrás indicó que el rendimiento fue menor en los sitios con mayor contenido de arcilla. Contrariamente, ensayos llevados a cabo por Ye et al. (2007), Dou et al. (2016), Xiangping et al. (2018) muestran correlaciones positivas entre el rendimiento y el porcentaje de arcilla.

4.4.2. Parámetros de crecimiento, calidad molinera, contenido de nutrientes y SPAD

El número de tallos/m² mostró correlación positiva moderada ($r = 0,324$) con el rendimiento en la chacra con antecesor raigrás, en el muestreo realizado durante la cosecha con un 5 % de significancia. En el resto de los muestreos no se observaron correlaciones significativas del número tallos/m² independientemente del antecesor.

Los muestreos de MS/ha tampoco mostraron correlaciones significativas al 5 % con el rendimiento para ninguna de las chacras testeadas.

Respecto a los componentes del rendimiento panojas/m², porcentaje de esterilidad, granos/panoja, granos totales/m² y peso de 1000 granos, no se detectó ningún tipo de correlación significativa en las dos chacras bajo estudio.

Para las variables calidad molinera y concentración de nutrientes en planta y grano, únicamente se encontraron resultados significativos entre la concentración de nitrógeno en planta a cosecha, en la chacra con antecesor raigrás. Esta correlación fue negativa con un $r = -0,389$ con una significancia del 5 %. Este resultado mostró que cuanto mayor fue el contenido de nitrógeno en planta encontrado en cosecha, menor fue el rendimiento del cultivo de arroz.

En la chacra con antecesor raigrás no se encontraron correlaciones significativas para N, P y K en grano, P y K en planta, blanco total, índice de verde y granos enteros, quebrados, yesados o manchados.

En la chacra con antecesor pradera no se correlacionaron ninguno de los parámetros mencionados.

Tampoco se observaron correlaciones significativas entre SPAD y rendimiento en ambas chacras.

4.4.3. Parámetros de manejo del cultivo

El análisis de correlaciones de Pearson con las variables de manejo fue relevante en este ensayo. En un total de ocho variables correlacionadas significativamente, cinco estuvieron relacionadas al riego y el control de malezas.

En la chacra con antecesor raigrás se observa de forma contundente, mediante las variables nivel de riego y altura de lámina de agua, que el riego se correlacionó con en el rendimiento. El parámetro “altura de lámina de agua” se correlacionó de forma negativa con el riego en primordio y floración con un $r = -0,328$ y $-0,335$ respectivamente (cuadro 31). Por otro lado, el nivel de riego registrado durante la floración en dos instancias (02-02-2009 y 17-02-2009) también se correlacionó de forma negativa con $r = -0,333$ y $-0,369$ respectivamente.

Roel (2005) también obtuvo resultados con niveles de correlación significativa al 5 % entre rendimiento y altura de lámina de agua (registro del 17-01-2005). En este ensayo de similares características, donde se trabajó con la variedad Olimar, en el INIA Paso de la Laguna, y a diferencia de lo encontrado en este trabajo de tesis, se obtuvo una correlación positiva.

Respecto al parámetro nivel de enmalezamiento, fue la única de las propiedades inferidas que tuvo correlación con el rendimiento en la chacra con antecesor pradera. Esta correlación fue negativa con un $r = -0,503$ durante la etapa de macollaje, con una significancia del 5 % (cuadro 31).

Este resultado fue similar al hallado por Roel (2005) cuando comparó el rendimiento y el nivel de control de malezas en diferentes estadios de crecimiento en el trabajo con la variedad INA Olimar. Las correlaciones fueron positivas con valores entre 0,40 y 0,55 en diferentes muestreos realizados en primordio, floración y cosecha.

Por su parte, Bonilla et al. (2015), en un estudio llevado a cabo en chacras arroceras en Uruguay en una chacra durante tres zafras, encontraron diferencias de rendimiento entre puntos de muestreo en zonas de similares potenciales a raíz de factores de manejo como el riego y el control de malezas.

Un aspecto que llamó la atención fue, que en la chacra con antecesor pradera se encontró apenas una variable correlacionada, frente a siete variables

en la chacra con antecesor raigrás. Esto podría deberse a la diferencia en la intensidad de muestreo entre chacras a favor de la de antecesor raigrás (2,7 frente a 1,8 muestras/ha). Es posible que la mayor intensidad de muestreo haya permitido captar mejor la variabilidad en la chacra con antecesor raigrás, o que en su defecto existió menor variabilidad en la chacra con antecesor pradera como fuera observado en el coeficiente de variación del rendimiento de esta chacra.

Cuadro 31. Resumen de parámetros correlacionados significativamente (p-valor $\leq 0,05$) con rendimiento en chacra con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la laguna, Treinta y Tres

Etapa fenológica	Parámetro	r	p	n
UPAG 3 – Antecesor raigrás – 2,7 muestras/ha				
Pre-siembra	Arcilla %	-0,393	0,018	36
Primordio	Altura de agua cm	-0,328	0,039	40
Floración	Altura de agua cm	-0,345	0,029	40
Floración 02/02/09	Riego visual	-0,333	0,036	40
Floración 16/02/09	Riego visual	-0,369	0,019	40
Cosecha	No. de tallos/m ²	0,324	0,042	40
Postcosecha	N en planta %	-0,389	0,019	40
UPAG 4 – Antecesor pradera – 1,8 muestras/ha				
Macollaje	Malezas visual	-0,507	0,016	22

r = coeficiente de correlación de Pearson. p = nivel de significancia. n = número de datos de cada variable.

4.5. ANÁLISIS DE CLÚSTER

Los resultados obtenidos para el análisis de clúster indicaron que el número óptimo de grupos en la chacra con antecesor raigrás fue tres (figura 17), mientras que en la de antecesor raigrás fue cinco (figura 18).

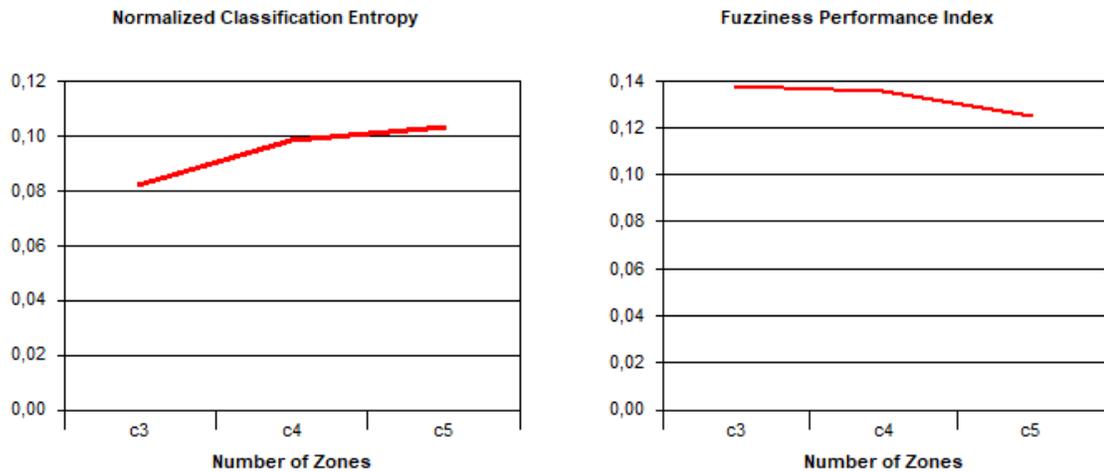


Figura 17. Índices de performance NCE y FPI de análisis de clúster en chacra con antecesor raigrás en INIA Paso de Laguna, Treinta y Tres

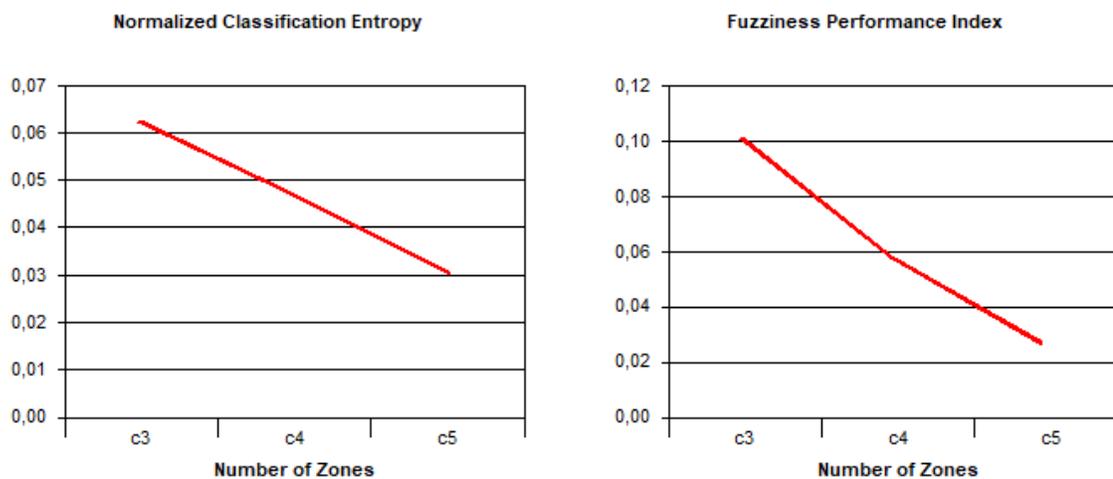


Figura 18. Índices de performance NCE y FPI de análisis de clúster en chacra con antecesor pradera en INIA Paso de Laguna, Treinta y Tres

Concluido el análisis de clústeres, a cada uno de los puntos de muestreo le correspondió un número de clúster, del uno al tres en la chacra con antecesor raigrás, y del uno al cinco en la chacra con antecesor pradera.

El primer acercamiento para analizar los rendimientos de cada clúster se realizó mediante la construcción de gráficos de cajas. En estos se apreciaron los altos niveles de rendimiento logrados en todos los clústeres independientemente del antecesor y de la escasa diferenciación entre ellos (figuras 19 y 20).

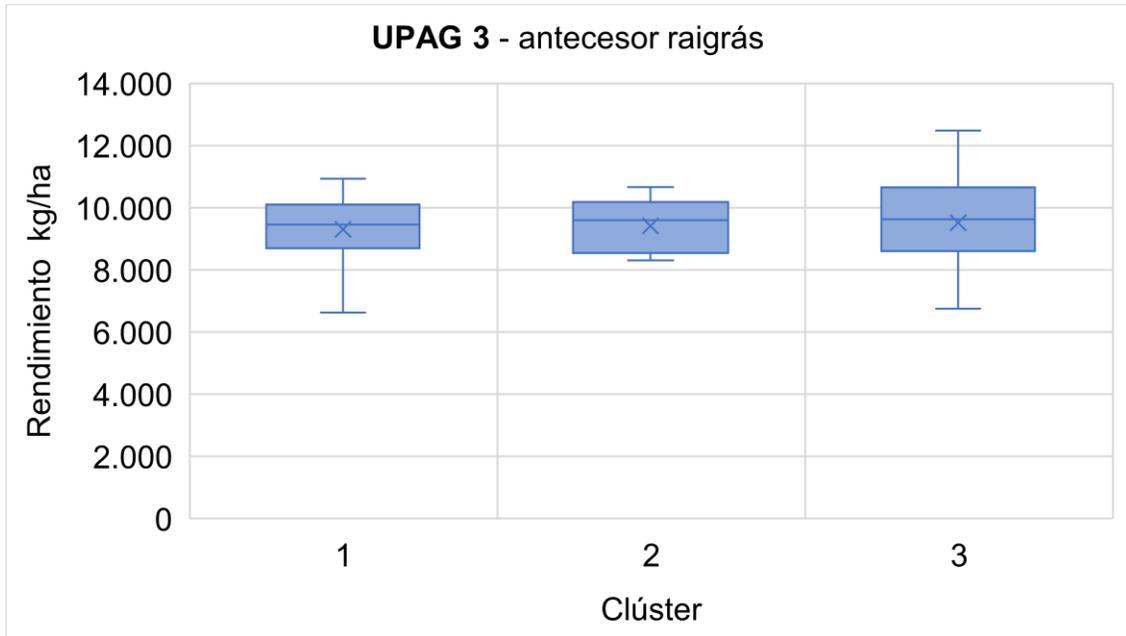


Figura 19. Boxplot de rendimiento por clúster de propiedades de suelo en chacra con antecesor raigrás en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

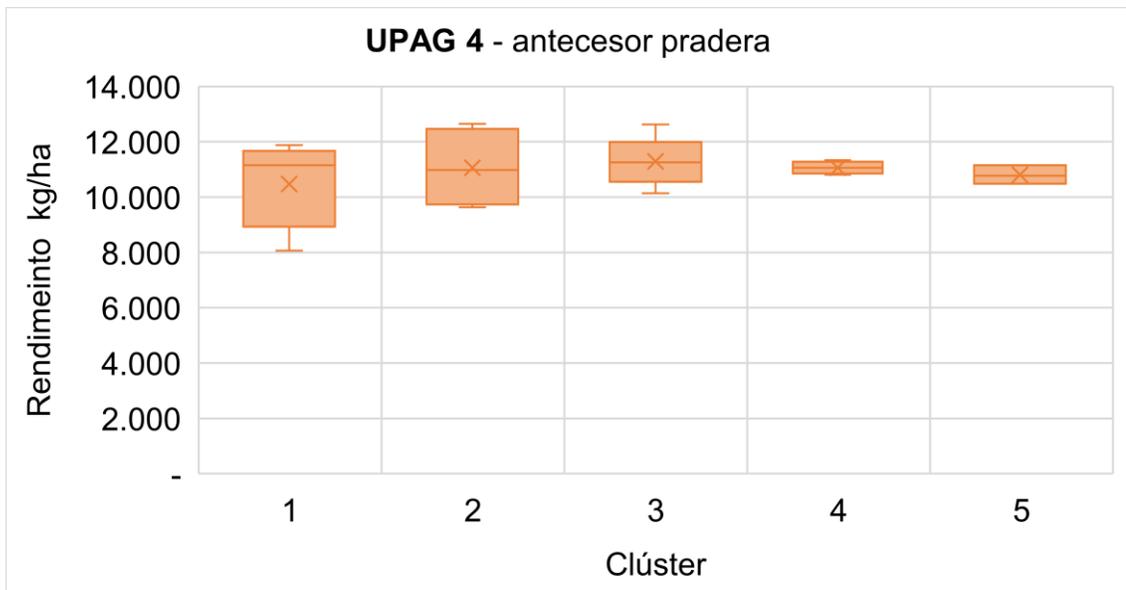


Figura 20. Boxplot de rendimiento por clúster de propiedades edáficas en chacra con antecesor pradera en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

4.6. ANÁLISIS DE VARIANZA

Los resultados del análisis de la varianza tampoco mostraron diferencias de rendimiento estadísticamente significativas al 5 % entre clústeres. Esto fue igual tanto para la chacra con antecesor raigrás como para la de pradera.

Este resultado confirmó que los clústeres que agruparon los puntos con propiedades edáficas similares no se correspondieron con niveles de rendimiento diferentes estadísticamente.

Si bien mediante el ANAVA se descartó la existencia de diferencias significativas al 5 %, se llevó a cabo la prueba de Fisher de DMS (su sigla refiere a diferencia mínima significativa) para conocer los valores a partir de los cuales las diferencias se hubieran considerado significativas.

En la chacra con antecesor raigrás el resultado de la DMS de rendimiento entre clústeres fue 1 189 kg/ha, mientras que en la de pradera fue 1 582 kg/ha.

Cuadro 32. Análisis de la varianza del rendimiento por clúster en chacra con antecesor raigrás en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	381521	2	190761	0,12	0,8900
Clúster	381521	2	190761	0,12	0,8900
Error	60354345	37	1631199		
Total	60735866	39			

Test LSD Fisher - $\alpha = 0.05$ - DMS 1.189					
Error 1631198,5107 - gl 37					
Clúster	Medias	n	EE	*	
3	9 513	15	330	A	
2	9 410	5	571	A	
1	9 302	20	286	A	

*Medias con un letra común no son estadísticamente diferentes ($p > 0,05$).

FV = Fuente de Variación. SC = Suma de cuadrados. gl = grados de libertad. CM = cuadrado medio. F = Estadístico "F". LSD (del inglés "Least Significant Difference"). n = número de datos. EE = error estándar.

Cuadro 33. Análisis de la varianza del rendimiento por clúster en chacra con antecesor pradera en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2032113	4	508028	0,43	0,7863
Clúster	2032113	4	508028	0,43	0,7863
Error	20173527	17	1186678		
Total	22205640	21			

Test LSD Fisher - $\alpha = 0.05$ - DMS 1.592

Error 1186678,0662 - gl 17

Clúster	Medias	N	EE	*
3	11,293	6	445	A
4	11,065	4	545	A
2	11,061	4	545	A
5	10,806	3	629	A
1	10,468	5	487	A

*Medias con un letra común no son estadísticamente diferentes ($p > 0,05$).

FV = Fuente de Variación. SC = Suma de cuadrados. gl = grados de libertad. CM = cuadrado medio. F = Estadístico "F". LSD (del inglés "Least Significant Difference") n = número de datos. EE = error estándar.

4.7. ANÁLISIS DE CART

El árbol de clasificación se realizó con 58 de 62 puntos de muestreo considerados inicialmente, debido a la ausencia de cuatro datos de porcentaje de arcilla. Éstos fueron descartados automáticamente por el software.

El árbol de clasificación resultante mostró como primer parámetro de clasificación el contenido de arcilla, donde cinco de 58 puntos del nodo raíz presentaron un valor mayor a 33,8 % y una media de rendimiento muy inferior al nodo de los 53 puntos restantes (7 206 kg/ha frente a 10 251 kg/ha).

La observación de los cinco puntos en el mapa geo-referenciado evidenció que se correspondieron a puntos de la chacra con antecesor raigrás, próximos entre sí. Están ubicados en el Norte de la chacra, opuestos al punto de entrada de agua para irrigación de la chacra. En los diferentes muestreos *in situ*, se constató que cuatro de estos cinco puntos se encontraban dentro de una "laguneta" en la que se evidenciaron problemas de crecimiento durante todo el ciclo del cultivo.

El segundo nodo de partición incluyó 53 puntos dividiendo 31 puntos por un lado y 22 por otro. El criterio de partición fue el cultivo antecesor. Se separaron los 22 puntos de la chacra con antecesor pradera de los restantes de la chacra con raigrás. La diferencia de rendimiento fue de 1 203 kg/ha a favor de la chacra con antecesor pradera. De esta partición se observa que la diferencia que se produjo entre chacras por encontrarse en una fase distinta de la rotación.

En la rama de la chacra con antecesor pradera, la variable de clasificación que le siguió fue el nivel de malezas en primordio. Los puntos incluidos en el nodo con nivel de malezas en primordio menores a 1,5, lograron un rendimiento promedio de 11 221 kg/ha. En cambio, en los cinco puntos donde el nivel de malezas en primordio fue superior a 1,5, el rendimiento promedio fue 1 169 kg/ha inferior. Este resultado podría estar relacionado con lo observado en el análisis de correlaciones lineales de Pearson, donde el nivel de enmalezamiento en primordio se correlacionó con el rendimiento.

Agronómicamente la primera variable de clasificación no permitiría realizar algún ajuste en el manejo comercial en el cultivo de arroz. Esta suposición cobra más relevancia considerando que el menor rendimiento de los cinco puntos no está asociado al parámetro particionado sino a otros atributos de esa zona de la chacra.

Por otra parte, la rama que se particiona a partir de la chacra con antecesor pradera no mostró parámetros edáficos manejables como fuentes de clasificación, sino que nuevamente se confirmó una mayor relevancia en el manejo de malezas y el riego.

Tomando el camino de la chacra con antecesor raigrás, los siguientes dos factores de clasificación correspondieron a la concentración del fósforo de 0 a 15 cm de suelo. Debido a las altas concentraciones del nutriente en todos los puntos del experimento, estas particiones no aportaron un dato útil desde el punto de vista agronómico.

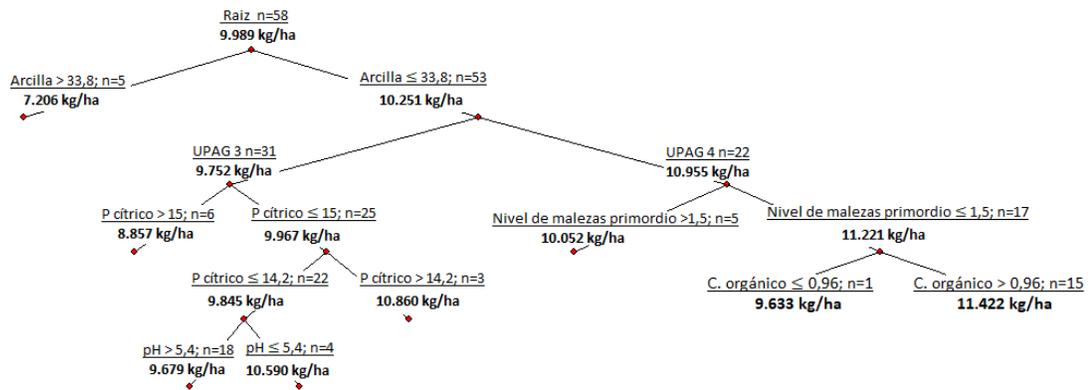


Figura 21. Árbol de clasificación y regresión de rendimiento (kg/ha) en chacras con antecesor pradera y raigrás en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

4.8. BALANCE SIMPLE DE NUTRIENTES

A grandes rasgos, el balance del nitrógeno, fósforo y potasio resultó netamente negativo en casi la totalidad de los puntos muestreados en las dos chacras.

Empezando con el K, este nutriente presentó balance negativo en el 100 % de los puntos. Con el nitrógeno ocurrió algo muy similar, donde a excepción de uno, todos generaron un balance negativo. A diferencia de los primeros dos, el fósforo mostró puntos de muestreo con balance positivo, aunque en una minoría de ellos.

Existió gran variabilidad entre puntos de una misma chacra y fue menor en la comparación entre chacras. Las cantidades de fertilizante agregadas fueron homogéneas dentro de las chacras, pero entre 20 y 22% superior en la UPAG 4. Por lo tanto, al considerar los dos componentes del balance se evidenció que la principal fuente de variación fue la extracción de nutrientes con el grano en cada punto.

Los niveles de extracción fueron superiores en la chacra con antecesor pradera, resultado esperable dada la superioridad de los rendimientos que se obtuvieron en la chacra en cuestión. En cambio, los balances fueron más negativos en la chacra con antecesor raigrás debido al menor aporte de nutrientes en la fertilización basal.

En un escenario de balances negativos como el que se observó, es posible que sea necesario evaluar la cantidad de nutrientes a agregar para evitar entrar en niveles limitantes en el cultivo.

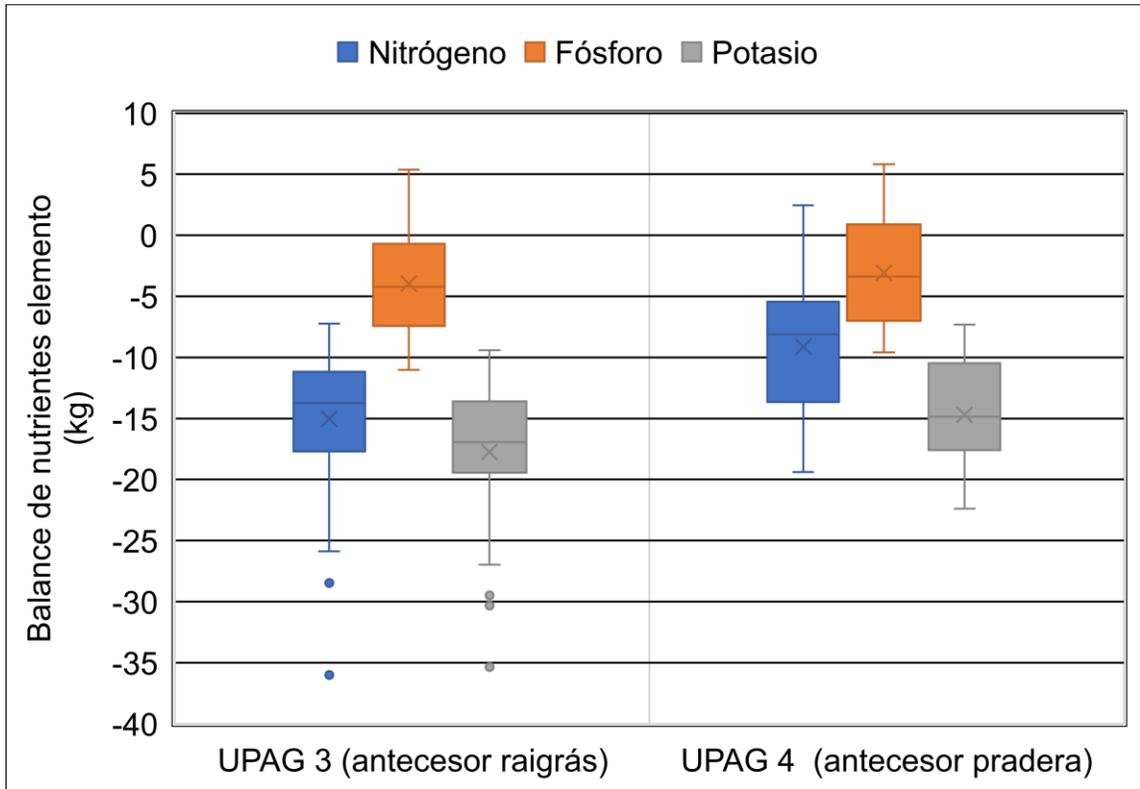


Figura 22. Gráfico de cajas de balance simple de nitrógeno, fósforo y potasio en chacras con diferente pastura antecesora en INIA Paso de la Laguna, Treinta y Tres

5. CONCLUSIONES

El rendimiento en las dos chacras fue muy bueno con respecto a la media nacional, que a su vez fue alta con respecto a los rendimientos obtenidos en el período 2000-2009.

A través del muestreo dirigido de suelos, se midió y cuantificó la variabilidad edáfica, de manejo y productiva en chacras comerciales de una zona de producción de arroz tradicional uruguayo. La variabilidad encontrada fue similar a la reportada por otros autores.

Los únicos factores edáficos manejables considerados en este estudio, dejando de lado el pH, fueron la concentración del fósforo y el potasio de 0 a 15 cm de profundidad. El estudio del relacionamiento de la variabilidad de estos dos nutrientes con la del rendimiento de grano de arroz presentó dificultades debido a la alta concentración de los nutrientes en el suelo y al agregado de fertilizantes que contenía estos nutrientes durante la siembra.

El contenido de arcilla fue la única variable edáfica que se correlacionó con el rendimiento. Contrario a resultados obtenidos por otros autores, se correlacionó de forma negativa.

La variabilidad en los factores de manejo vinculados al riego y al enmalezamiento fueron las únicas variables manejables que se correlacionaron con el rendimiento. Trabajos llevados a cabo a nivel nacional han reportado resultados donde variables de riego o vinculadas a las malezas tuvieron más relevancia que otras en la variabilidad del rendimiento.

Los parámetros de actividad clorofiliana y conductividad eléctrica como herramientas que adquirieron gran difusión con el crecimiento del manejo de nutrientes sitio específico, no se correlacionaron significativamente con el rendimiento del cultivo de arroz.

El contenido de arcilla, la conductividad eléctrica y el pH presentaron autocorrelación en la chacra con antecesor raigrás, mientras que en la de antecesor pradera únicamente la conductividad lo hizo.

El rendimiento de grano mostró autocorrelación espacial en la chacra con antecesor raigrás.

No se observó una estructura espacial de los parámetros fósforo y potasio, pero sí se observó en la conductividad eléctrica.

Visto los resultados y la dificultad para modelar el contenido de nutrientes en el suelo debido al movimiento de este por el laboreo, podría ser más conveniente utilizar imágenes aéreas o mapas de rendimiento para obtener una

aproximación a zonas donde pueden estar faltando nutrientes u otros problemas recurrentes. Esto aplica tanto para fósforo, potasio o nitrógeno.

6. RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue medir y relacionar la variabilidad edáfica existente y la del rendimiento del cultivo en chacras de arroz, contemplando variables de manejo agronómico, durante una zafra. El mismo se llevó a cabo en dos chacras de la Unidad de Producción Arroz-Ganadería en la estación experimental del INIA Paso de la Laguna, en el departamento de Treinta y Tres, Uruguay, durante la zafra 2008-2009. En el transcurso de la investigación se muestrearon 62 puntos georreferenciados ubicados de manera estratégica para contemplar diferencias edáficas hipotéticas establecidos por la institución de donde se realizó el trabajo. Las variables edáficas analizadas fueron: la concentración de nutrientes (fósforo, potasio, nitrógeno), la textura, el contenido de carbono orgánico, la conductividad eléctrica y el pH. En las diferentes etapas fenológicas del ciclo del cultivo se registraron datos sobre la implantación, el número de tallos, la producción de materia seca, la altura de planta, el SPAD, el rendimiento, los componentes del rendimiento, la concentración de nutrientes en planta y grano y los parámetros de calidad molinera de los granos. También se registraron variables que contemplan parámetros del manejo del cultivo, como el riego y la presencia de malezas. Se analizó el grado de estructura espacial de los parámetros edáficos y del rendimiento mediante la construcción de semivariogramas. Se efectuó un análisis de clústeres para observar si grupos de puntos georreferenciados con similares características edáficas lograban rendimientos estadísticamente diferentes entre clústeres. Se realizó un árbol de clasificación y regresión de CART y, por último, se confeccionó un balance simple de nutrientes. La variabilidad edáfica observada estuvo dentro de los rangos reportados por otros autores. Las concentraciones en suelo de N, P y K no se correlacionaron con el rendimiento. Únicamente la arcilla se correlacionó con este. Los diferentes análisis mostraron que las variables de manejo agronómico relacionadas con el riego y el control de malezas repercutieron en la variabilidad del rendimiento más que cualquier otro factor manejable.

Palabras clave: Arroz; Variabilidad edáfica; Variabilidad del rendimiento; Conductividad eléctrica; Agricultura de precisión; Análisis de clústeres; CART.

7. SUMMARY

The objective of this thesis was to measure and relate the variability of soil properties from rice fields, with rice yield variability considering agronomic variables during one season. This investigation took place in two fields of the agricultural livestock production unit of the experimental station INIA Paso de la Laguna in the Treinta y Tres department, during season 2008-2009. Throughout the entire trial, 62 georeferenced points strategically located to capture the hypothetical edaphic differences were measured. The edaphic variables that were measured were: nutrient concentrations (phosphorus, potassium, nitrogen), texture, organic carbon content, electric conductivity, and pH levels. Implantation, number of stems, dry matter production, plant height, SPAD, yield, yield components, grain and plant nutrient concentration, and grain milling quality parameters were measured through different phenological crop stages. Not only that, but also agronomic management crop-related parameters, such as irrigation quality and weed presence were measured. Autocorrelation analysis was performed to evaluate the degree of yield crops and the spatial structure of edaphic parameters. Cluster analysis was executed to assess if statistically significant yield differences were obtained from clustered georeferenced points of similar edaphic properties. CART regression analysis and nutrient input and output balance was performed. Soil edaphic variability was within the parameter's values reported by other authors. N, P and K soil concentration did not correlate with rice crop yield. Clay content was the only edaphic parameter correlated with rice yield. The different analysis showed that agronomic related management practices, such as irrigation quality and weed presence had an impact in rice yield variability more than any other manageable factor.

Keywords: Rice; Edaphic variability; Yield variability; Electric conductivity; Precision agriculture; Cluster analysis; CART.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ACA (Asociación de Cultivadores de Arroz, UY). 2009. Guía de buenas prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay. Montevideo. 32 p.
2. Alves, M.; Mantovani, E. 2006. Sensores remotos. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable. Montevideo, Uruguay, PROCISUR/IICA. pp. 81-98.
3. Ávila, S.; Belderrain, G.; Casales, L. 2000. Manejo de enfermedades. In: Jornada Anual de Arroz (2000, Treinta y Tres). Resultados experimentales 1999-2000. Montevideo, INIA. cap. 8, pp. 1-22 (Actividades de Difusión no. 224).
4. _____; Casales, L.; Escalante, F. 2008a. Manejo integrado de enfermedades y plagas. I Manejo de plagas. In: Jornada Anual de Arroz (2008, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2007-2008. Montevideo, INIA. cap. 4, pp. 4-10 (Actividades de Difusión no. 545).
5. _____; _____; _____. 2008b. Manejo integrado de enfermedades y plagas. II Manejo de enfermedades. In: Jornada Anual de Arroz (2008, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2007-2008. Montevideo, INIA. cap. 4, pp. 18-28 (Actividades de Difusión no. 545).
6. Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; Casanovez, F.; Dirienzo, J. A.; Robledo, C. W. 2008. Infostat software estadístico: manual de usuario. Córdoba, Argentina, Brujas. 336 p.
7. Barbazán, M.; Boutes, C.; Beux, L.; Bordoli, M.; Cano, J.; Ernst, O.; García, A.; García, F.; Quincke, A. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia (Uruguay)*.15(2):93-99.
8. _____; Coitiño-López, J.; Ernst, O. 2015. Conductividad eléctrica aparente para delimitar zonas de manejo en un suelo agrícola con reducida variabilidad en propiedades físico-químicas. *Agrociencia (Uruguay)*. 19(1):102-111.
9. Best, S.; León, L. 2006. Geoestadística. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión: integrando

conocimientos para una agricultura moderna sustentable. Montevideo, Uruguay, PROCISUR/IICA. pp. 147-161.

10. Blanco, P. 2009. Prólogo. In: Jornada Anual de Arroz (2009, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2008-2009. Montevideo, INIA. s.p. (Actividades de Difusión no. 571).
11. Bongiovanni, R. 2006a. Control de malezas, plagas y enfermedades con dosis variable. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable. Montevideo, Uruguay, PROCISUR/IICA. pp. 124-129.
12. _____; Lowenberg-DeBoer, J. 2006b. Viabilidad económica. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable. Montevideo, Uruguay, PROCISUR/IICA. pp. 171-200.
13. Bonilla, C. M.; Feuer, A. D. 2011. Comparación de dos criterios (niveles críticos y elevar y mantener el nivel de nutrientes) y dos sistemas de fertilización (variable y uniforme) en cultivos de soja y sorgo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 70 p.
14. _____; Terra, J. A.; Gutiérrez, L.; Roel, A. 2015. Cosechando los beneficios de la agricultura de precisión en un cultivo de arroz en Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. (19)1:112-121.
15. Bonilla, O.; Zorrilla, G. 2009. Descripción del proyecto de la Unidad de Producción Arroz-Ganadería. In: Jornada de Producción Arroz-Ganadería (2009, Treinta y Tres). Resultados experimentales 2008–2009. Montevideo, INIA. pp. 1-2 (Actividades de Difusión no. 570).
16. Borghi, E.; Ernst, O. 2003. III. Bases ecofisiológicas del cultivo de arroz en el Uruguay. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. cap. 3, pp. 1-9.
17. Bragachini, M.; Méndez, A.; Scaramuzza, F.; Gregoret, M.; Proietti, F. 2006. Tecnología de manejo de dosis variable. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de

precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable. Montevideo, Uruguay, PROCISUR/IICA. pp. 99-105.

18. Breiman, L.; Friedman, J. H.; Olshen, R. A.; Stone, C. J. 1994. Classification and regression trees. New York, NY, Chapman and Hall. 368 p.
19. Buresh, R.; Witt, C.; Pasuquin, J. M. 2007a. Fertilizer Best Management Practice in Southeast Asia. In: IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices (2007, Brussels, Belgium). Reports. Paris, France, International Fertilizer Industry Association. pp. 47-55.
20. _____.; _____.; _____ 2007b. Fertilizers Best Management Practice in Southeast Asia. In: IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices (2007, Brussels, Belgium). Reports. Paris, France, International Fertilizer Industry Association. pp. 221-229.
21. _____. 2008. Site-specific nutrient management for rice. Farming Outlook. Jun.:18-23.
22. _____. 2009. The SSNM concept and its implementation in rice. In: IFA Crossroads Asia-Pacific Conference (10th., 2009, Kota Kinbalu, Malaysia). Proceedings. Metro Manila, Philippines, International Rice Research Institute. p. irr.
23. Camacho, C. s.f. Coeficiente de correlación lineal de Pearson. (en línea). s.l., Universidad de Sevilla. s.p. Consultado 3 feb. 2017. Disponible en <http://personal.us.es/vararey/adatos2/correlacion.pdf>
24. Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novvak, J. M.; Parkin, T. B.; Kareln, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. 1994. Field-scale variability of soil properties in centra Iowa soils. Soil Science Society of American Journal. 58:1501-1511.
25. Cantou, G.; Molina, F.; Roel, A.; Terra, J. 2008. Impacto de la intensidad de laboreo en los rendimientos de arroz en la UPAG. In: Jornada Anual de Arroz (2008, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2007-2008. Montevideo, INIA. cap. 3, pp. 1-14 (Actividades de Difusión no. 545).

26. _____.; Terra, J.; Deambrosi, E.; Roel, A.; Pereira, M.; Sartori, J.; Stirling, N. 2009. Impacto de la intensidad de laboreo en los rendimientos de arroz en la UPAG, 2008-2009. *In*: Jornada Anual de Arroz (2009, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2008-2009. Montevideo, INIA. cap. 3, pp. 4-14 (Actividades de Difusión no. 571).
27. Casanova, D.; Gourdiaan, J.; Catala Forner, M. M.; Withagen, J. C. M. 2001. Rice yield prediction from yield components and limiting factors. (en línea). *European Journal of Agronomy*. 17(1):41-61. Consultado 09 ene. 2019. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(01\)00137-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(01)00137-X)
28. Castillo, J.; Deambrosi, E.; Méndez, R.; Moris, C.; Perdomo, C.; Terra, J. 2009. Uso de la abundancia natural de ^{15}N para evaluar la contribución relativa de las distintas fuentes en el cultivo de arroz. *In*: Jornada Anual de Arroz (2009, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2008-2009. Montevideo, INIA. cap. 3, pp. 46-58 (Actividades de Difusión no. 571).
29. _____.; Méndez, R.; Terra, J. 2012. Indicadores para la recomendación de fertilización N en el cultivo de arroz. *In*: Jornada Anual de Arroz (2012, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2011-2012. Montevideo, INIA. cap. 3, pp. 4-9 (Actividades de Difusión no. 686).
30. _____.; Terra, J.; Ferreira, A.; Méndez, R.; 2014. Fertilización N en arroz en base a indicadores objetivos. ¿Qué sabemos luego de 3 años de experimentación? *In*: Jornada Arroz-Soja (2014, Treinta y Tres). Arroz-soja: resultados experimentales 2013-2014. Montevideo, INIA. cap. 3, pp. 4-6 (Actividades de Difusión no. 735).
31. Chebataroff, N. 2013. El arroz uruguayo. Montevideo, Uruguay, Hemisferio Sur. 352 p.
32. Coitiño, J.; Mazzoni, P. 2011. Respuesta a la fertilización con fósforo, potasio y azufre en trigo en ambientes con diferente potencial de producción dentro de una misma chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 48 p.

33. Corwin, D. L.; Lesch, S. M. 2005a. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 46:11-43.
34. _____.; Plant, R. E. 2005b. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 46:1-10.
35. Deambrosi, E.; Méndez, R. 1996. Fertilización con fósforo, zinc y yeso: suelos halomórficos. *In: Arroz: resultados experimentales zafra 1995-1996*. Montevideo, INIA. cap. 6, p. 11-15 (Actividades de Difusión no. 107).
36. _____.; Saldain, N. 2001a. Control de malezas. Evaluación de herbicidas para control de capín. *In: Jornada Anual de Arroz (2001, Treinta y Tres)*. Arroz: resultados experimentales 2000-2001. Montevideo, INIA. cap. 7, pp. 2-19 (Actividades de Difusión no. 257).
37. _____.; Méndez, R.; Ávila, S. 2001b. Fertilización. Respuesta a la aplicación de fósforo y potasio. *In: Jornada Anual de Arroz (2001, Treinta y Tres)*. Arroz: resultados experimentales 2000-2001. Montevideo, INIA. cap. 5, pp. 1-11 (Actividades de Difusión no. 257).
38. _____.; Saldain, N. 2002. Control de malezas. Evaluación de Herbicidas para el control de capín. *In: Jornada Anual de Arroz (2002, Treinta y Tres)*. Arroz: resultados experimentales 2001-2002. Montevideo, INIA. cap. 5. pp. 1-20 (Actividades de Difusión no. 292).
39. _____.; _____. 2004. Control de malezas. Evaluación de herbicidas para el control de capín. *In: Jornada Anual de Arroz (2004, Treinta y Tres)*. Arroz: resultados experimentales 2003-2004. Montevideo, INIA. cap. 6. pp. 1-7 (Actividades de Difusión no. 373).
40. _____. 2009. Resultados de producción de arroz. *In: Jornada de Producción Arroz-Ganadería UPAG (2009, Treinta y Tres)*. Resultados experimentales 2008–2009. Montevideo, INIA. pp. 21-27 (Actividades de Difusión no. 570).

41. _____.; Méndez, R.; Ávila, S. 2010. Estimuladores de crecimiento. In: Jornada Anual de Arroz (2010, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2009-2010. Montevideo, INIA. cap. 3, pp. 39-52 (Actividades de Difusión no. 611).
42. _____.; _____.; Castillo, J. 2011. Manejo de suelos y nutrición vegetal. Contribución a la toma de decisiones en aplicaciones de fósforo para el cultivo de arroz. In: Jornada Anual de Arroz (2011, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2010-2011. Montevideo, INIA, cap. 3, pp.1-5 (Actividades de Difusión no. 651).
43. _____.; _____.; _____. 2015. Elementos a considerar en la inclusión de potasio en la fertilización del arroz. In: Seminario de Actualización Técnica en Fertilización de Arroz (2015, Treinta y Tres). Puesta a punto y avances de información sobre la nutrición del cultivo de arroz. Montevideo, INIA. pp. 1-11.
44. Del Campo, B. 2007. Factores que afectan la variabilidad intra-chacra del rendimiento en maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 105 p.
45. Dobermann, A. 1994. Factors causing field variation of direct-seeded flooded rice. (en línea). Geoderma. 62(1-3):125-150. Consultado 09 ene. 2019. Disponible en [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90032-9).
46. Dou, F.; Soriano, J.; Tabien, R.; Chen, K. 2016. Soil Texture and Cultivar Effects on Rice (*Oryza sativa*, L.) Grain Yield, Yield Components and Water Productivity in Three Water Regimes. PLoS ONE. 11(3):1-12.
47. Durigon, R. 2007. Aplicação de técnicas de manejo localizado na cultura do arroz irrigado (*Oryza sativa* L.). Tesis de doutorado. Santa María, RS, Brasil. Universidad Federal de Santa María. 149 p.
48. Fridgen, J.; Kitchen, N. R.; Sudduth, K. A.; Drummond, S. T.; Wiebold, W. J.; Fraisse, C. W. 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. Agronomy Journal. 96(1):100-108.
49. Hernández, J.; Berger, A. 2003. Dinámica del fósforo en sistemas de arroz-pasturas: caracterización de parámetros de suelos para estimar la disponibilidad de fósforo. Indicadores de disponibilidad

de fósforo y respuesta del cultivo de arroz a la fertilización fosfatada. In: Investigaciones agronómicas: reporte técnico anual 2003. Montevideo, INIA. pp. 34-40 (Reporte técnico anual no. 01).

50. Inamura, T.; Goto, K.; Lida, M.; Nonami, K.; Inoue, H.; Umeda, M. 2004. Geostatistical analysis of yield, soil properties and crop management practices in paddy rice fields. *Plant Production Science*. 7(2):230-239.
51. INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2006. El cultivo en Uruguay: Uruguay exportador de arroz. (en línea). INIA. Suplemento Tecnológico 2006:13. Consultado 13 oct. 2018. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5749/1/Suplemento-tecnologico-2006.pdf>
52. Kamoshita, A.; Hayashi, S.; Yamagishi, J.; Kotchasatit, A.; Jongdee, B. 2009. Spatial variability in the growth of direct-seeded rain fed lowland rice (*Oryza sativa* L.) in northeast Thailand. (en línea). *Field Crops Research*. 111(3):251-261. Consultado 5 abr. 2009. Disponible en <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/750022>
53. Kitchen, N. R.; Sudduth, K. A.; Myers, D. B.; Drummond, S. T.; Hong, S.Y. 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*. 46:285-308.
54. Koch, B.; Khosla, R.; Frasier, M.; Westfall, D. G. 2004. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones. *Agronomy Journal*. 96(6):1572-1580.
55. Lavecchia, A.; Méndez, J.; Marchesi, C. 2000. Suelos halomórficos: fertilización con zinc, fósforo y yeso. In: Arroz: resultados experimentales zafra 2000-2001. Montevideo, INIA. cap. 5, pp. 17-20 (Actividades de Difusión no. 233).
56. Li, Y.; Zhou, S.; Feng, L. 2007. Delineation of Site-Specific Management Zones Based on Temporal and Spatial Variability of Soil Electrical Conductivity. *Pedosphere*. 17(2):156-164.
57. López-Lozano, R.; Casterard, M^a A.; Herrero-Isern, J. 2007. Relación entre desarrollo del cultivo, rasgos edáficos y rendimiento en una

parcela de maíz mediante teledetección y SIG. (en línea). Revista de Teledetección. no. 28:24-31. Consultado 7 may. 2009. Disponible en http://www.aet.org.es/revistas/revista28/7-108-Lopez_revisado.pdf

58. Mantovani, E.; de Carvalho Pinto, F. de A.; Marçal de Queiroz, D. 2006. Introducción a la agricultura de precisión. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable. Montevideo, Uruguay, PROCISUR/IICA. pp. 15-22.
59. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo. Esc. 1: 1000000.
60. Martínez, S.; Escalante, F. 2012. Manejo integrado de enfermedades. Evaluación de fungicidas para el control de brusone (*Pyricularia oryzae*) en arroz. In: Jornada de Arroz (2012, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2011-2012. Montevideo, INIA. cap. 4, pp. 8-16 (Actividades de Difusión no. 686).
61. _____.; _____.; Casales, L. 2013. Manejo integrado de enfermedades. Respuesta a fungicidas y dosis en el rendimiento y control de enfermedades de tallo y vaina. In: Jornada Anual Arroz-Soja (2013, Treinta y Tres). Resultados experimentales 2012-2013. Treinta y Tres, INIA. cap. 3, pp. 7-9 (Actividades de Difusión no. 713).
62. _____.; _____.; _____. 2014. Manejo integrado de enfermedades. Utilización de fosfito de K para el control de enfermedades de tallo y vaina en arroz. In: Jornada Arroz-Soja (2014, Treinta y Tres). Arroz-soja: resultados experimentales 2013-2014. Montevideo, INIA. cap. 4, pp 4-6 (Actividades de Difusión no. 735).
63. Melchiori, R. J. M.; Echeverría, H.; García, F. O. 2000. Variabilidad espacial en algunas propiedades del suelo: I Asociación con las variaciones en el rendimiento del trigo. (en línea). Buenos Aires, INTA. s.p. Consultado 16 jul. 2020. Disponible en <https://inta.gob.ar/documentos/variabilidad-espacial-en-algunas->

[propiedades-del-suelo-asociacion-con-las-variaciones-en-el-rendimiento-del-trigo](#)

64. _____.; Kemerer, A. C. 2004. Variabilidad espacial en suelos agrícolas de la provincia de Entre Ríos. *In*: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (19°. , 2004, Paraná, Argentina). Actas. Paraná, s.e. s.p.
65. Méndez, R.; Roel, A.; Gorosito, J.; Furest, J. 2009a. Agroclimatología. Información climática. *In*: Jornada Anual de Arroz (2009, Treinta y Tres). Resultados experimentales 2008-2009. Montevideo, INIA. cap. 1, pp. 1-7 (Actividades de Difusión no. 571).
66. _____.; _____. 2009b. Incidencia del gorgojo acuático sobre el rendimiento en tres cultivares de arroz con fertilización nitrogenada, Paso Farías, Artigas. *In*: Presentación resultados experimentales de arroz zafra 2008/2009. Montevideo, INIA. cap. 7, pp. 1-24 (Actividades de Difusión no. 585).
67. _____.; Castillo, J.; Deambrosi, E. 2012. Anticipación, criterios y modalidades de aplicación de fósforo soluble en un cultivo de arroz sembrado con cero laboreo. *In*: Jornada Anual de Arroz (2012, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2011-2012. Montevideo, INIA. cap. 3, pp. 17-20 (Actividades de Difusión no. 686).
68. _____.; _____.; _____. 2015. Manejo alternativo de fósforo en arroz. (en línea). *In*: Seminario de Actualización Técnica en Fertilización de Arroz (2015, Treinta y Tres). Puesta a punto y avances de información sobre la nutrición del cultivo de arroz. Montevideo, INIA. pp. 1-8. Consultado 15 jul. 2018. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4766/1/Articulo-RMendez.pdf>
69. Molina, F.; Terra, J.; Pravia, V.; Deambrosi, E.; Roel, A. 2007. Impacto de la intensidad de laboreo en los rendimientos de arroz de laboreo en los rendimientos de arroz de la UPAG 2006-2007. *In*: Jornada de Producción Arroz-Ganadería (2007, Treinta y Tres). Arroz: resultados 2006-2007. Montevideo, INIA. pp. 60-69 (Actividades de Difusión no. 490).
70. Morales, L. A.; Paz Ferreiro, J. 2009. Geostatistical analysis of pH and redox potential (Eh) variability over a rice field in successive crop

stages. In: Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo (9^{as.}, 2009, Barcelona). Actas. Barcelona, CIMNE. pp.304-311.

71. Mulla, D. J.; McBratney, A. 2002. Soil spatial variability. In: Warrick, A. W. ed. Soil Physics Companion. Boca Raton, FL, CRC. pp. 343-347.
72. Otaño, C.; Saruki, I. 2010. Impacto de distintos niveles de fertilidad y atributos de terreno sobre la variabilidad de rendimiento del cultivo de soja a escala de chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 89 p.
73. Pagani, A. 2013. Desaturación de suelos. Los Resultados de la agricultura de hoy. In: Simposio Nacional de Agricultura (3^{o.}, 2013, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 71-89.
74. Pereira, G. M.; Stirling, N. E. 2012. Efecto de la intensidad de laboreo, la secuencia y la variabilidad espacial sobre parámetros productivos en una chacra de arroz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 78 p.
75. Pérez De Vida, F. 2011. Ecofisiología del cultivo de arroz. Potencial de rendimiento en arroz. Aspectos de la ecofisiología del cultivo de arroz en Uruguay: III. Potencial biológico en la región Este. In: Jornada Anual de Arroz (2011, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2010-2011. Montevideo, INIA. cap. 7, pp. 1-4 (Actividades de Difusión no. 651).
76. _____. 2014. Ecofisiología del cultivo de arroz. Aspectos de la ecofisiología del cultivo de arroz en Uruguay: V. Ajustes en el potencial biológico en la región Este. In: Jornada Arroz-Soja (2014, Treinta y Tres). Arroz-soja: resultados experimentales 2013-2014. Montevideo, INIA. cap. 7, pp. 1-3 (Actividades de Difusión no. 735).
77. Plant, R. 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. Computers and Electronics in Agriculture. 30:9-29.
78. Pravia, M^a. 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: A) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra. B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis de Magíster en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 113 p.

79. Robertson, G. P. 2008. GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences: User's Guide, Versión 10. (en línea). Plainwell, Michigan, USA, Gamma Design Software. 76 p. Consultado 06 feb. 2016. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/286383373_Geostatistics_for_the_environmental_sciences_GS_user's_guide
80. Roel, A.; Plant, R. 2004a. Site-specific analysis. Factors Underlying Yield Variability in Two California Rice Fields. *Agronomy Journal*. 96(5):1481-1494.
81. _____; Deambrosi, E.; Méndez, R.; Saldain, N.; Ávila, S.; Beldarrain, G.; Casales L. A. Bonilla, O. 2004b. Variabilidad del rendimiento. *In: Jornada Anual de Arroz (2004, Treinta y Tres)*. Arroz: resultados experimentales 2003-2004. cap. 3, pp. 3-8 (Actividades de Difusión no. 373).
82. _____. 2005. Agricultura de precisión. Variabilidad espacial del rendimiento. *In: Jornada Anual de Arroz (2005, Treinta y Tres)*. Arroz: resultados experimentales 2004-2005. Montevideo, INIA. cap. 5, pp. 1-8 (Actividades de Difusión no. 418).
83. _____.; Firpo, H. 2006a. Agricultura de precisión en Uruguay. *In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable*. Montevideo, Uruguay, PROCISUR/IICA. pp. 67-80.
84. _____. 2006b. Análisis de clúster y CART. *In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable*. Montevideo, Uruguay, PROCISUR/IICA. pp. 167-170.

85. _____.; Terra, J. 2006c. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna sustentable. Montevideo, Uruguay, PROCISUR/IICA. pp. 67-80.
86. Saldain, N. 2002. Estudios para el control del arroz rojo. I. Eficiencia de Ronstar mezclado en el tanque con RoundUp en el control del arroz rojo en siembra directa. In: Jornada Anual de Arroz (2002, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2001-2002. Montevideo, INIA. cap.5, pp. 26-31 (Actividades de Difusión no. 292).
87. _____. 2003. Eficiencia de Ronstar mezclado en el tanque con Roundup en el control de arroz rojo en siembra directa. Manejo de malezas. II. Estudios para el control de arroz rojo. In: Arroz: resultados experimentales 2002-2003. Montevideo, INIA. cap. 7, pp. 23-30 (INIA Reporte Técnico Anual no. 01).
88. _____. 2005. Estudios para el control de arroz rojo. Selectividad del Ronstar en INIA Tacuarí y el paso 144. In: Jornada Anual de Arroz (2005, Treinta y Tres). Investigaciones agronómicas: reporte técnico anual 2003. Montevideo, INIA. cap. 8, pp. 30-36 (Actividades de Difusión no. 418).
89. _____. 2007. Estudios para el control de arroz rojo. Efecto de las dosis de KI + FIX (BAS 714 H) bajo distintos manejos del riego en el control del arroz rojo. In: Jornada Anual de Arroz (2007, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2006-2007. Montevideo, INIA. cap. 5, pp. 25-32 (Actividades de Difusión no. 502).
90. _____.; Deambrosi, E. 2009. I. Evaluación de herbicidas para control de capín. In: Jornada Anual de Arroz (2009, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2008-2009. Montevideo, INIA. cap. 5, pp. 2-6 (Actividades de Difusión no. 571).
91. Saleque, M.; Uddin, M.; Ferdous, A.; Rashid, M. 2007. Use of Farmers Empirical Knowledge to Delineate Soil Fertility-Management Zones and Improved Nutrient-Management for Lowland Rice.

Communications in Soil Science and Plant Analysis. 39(1-2):25-45.

92. Salgado, L. 2009. Arroz: situación y perspectivas. Anuario OPYPA 2009:161-170.
93. Sarec, O.; Sarec, P.; Prosek, V. 2002. Measuring of soil electrical conductivity for mapping of spatial variability of soil properties within a field. Prague, Czech Republic, Czech University of Agriculture. pp. 131-136.
94. SAS Institute, US. 1999. SAS onlinedoc: version 8. Cary, NC. s.p.
95. Silveira, M.; Tarán, J. 2009. Respuesta de INIA Olimar, nuevo cultivar de arroz de tipo índica, a la aplicación de nitrógeno y a su fraccionamiento. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 115 p.
96. Singh, B.; Singh, Y.; Ladha, J. K.; Bronson, K. F.; Balasubramanian, V.; Singh, J.; Khind, C. S. 2002. Chlorophyll Meter – and Leaf Color Chart-Based Nitrogen Management for Rice and Wheat in Northwestern India. *Agronomy Journal*. 94(4):821-829.
97. Sudduth, K. A.; Kitchen, N. R.; Wiebold, W. J.; Batchelor, W. D.; Bollero, G. A.; Bullock, D. G.; Clay, D. E.; Palm, H. L.; Pierce, F. J.; Schuller, R. T.; Thelen, K. D. 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*. 46:263-283.
98. Terra, J.; 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 American Journal*. 70:98-107.
99. _____; Molina, F.; Deambrosi, E.; Pravia, V.; Roal, A.; Casales, L.; Ferreira, D.; Ferreira, R. R. 2007. Densidad de siembra y nitrógeno en EP144 a escala de chacra. In: *Jornada Anual de Arroz (2007, Treinta y Tres)*. Arroz: resultados experimentales 2006-2007. Montevideo, INIA. cap. 7, pp. 1-8 (Actividades de Difusión no. 502).

100. _____.; Sawchick, J.; Melo, D.; Ruiz, A. 2008. Variabilidad espacial y delineación de zonas de manejo. *In*: Jornada Técnica Agricultura de Precisión (2008, Dolores, Soriano). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 34-44 (Actividades de Difusión no. 553).
101. _____.; Deambrosi, E.; Méndez, R. 2009. Efecto de distintas alternativas de cultivos de cobertura invernal sobre la respuesta a N en el cultivo de arroz en siembra directa. *In*: Jornada Anual de Arroz (2009, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2009. Montevideo, INIA. cap. 3, pp. 59-68 (Actividades de Difusión no. 571).
102. _____.; _____.; _____.; Sánchez, A. 2010. Efecto de cultivos de cobertura invernal sobre la respuesta a N en el cultivo de arroz en siembra directa. *In*: Jornada Anual de Arroz (2010, Treinta y Tres). Arroz: resultados experimentales 2009-2010. Montevideo, INIA. cap. 3, pp. 9-20 (Actividades de Difusión no. 611).
103. Tsubo, M.; Fukai, S.; Basnayake, J.; Tuong, T. P.; Bouman, B.; Harnpichitvitaya, D. 2007. Effects of Soil Clay Content on Water Balance and Productivity in Rainfed Lowland Rice Ecosystem in Northeast Thailand. *Plant Production Science*. 10(2):232-241.
104. Turner, F. T.; Jund, M. F. 1994. Assessing the nitrogen requirements of rice crops with a chlorophyll meter. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 34:1001-1005.
105. Vanden Heuvel, R. 1996. The promise of precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*. 51:38-40.
106. Villardón, J. L. V. s.f. Introducción al análisis de clúster. (en línea). Salamanca, Universidad de Salamanca. Departamento de Estadística. 22 p. Consultado 13 dic. 2021. Disponible en <http://www.yumpu.com/es/document/read/14514099/analisis-cluster-estadistica-universidad-de-salamanca>
107. Wollenhaupt, N. C.; Mull, D. J.; Gotway Crawford, C. A. 1997. Soil Sampling and Interpolation Techniques for Mapping Spatial Variability of Soil Properties. *In*: Pierce, F. J.; Sadler, E. J. eds. *The State of Site-Specific Management for Agricultural*. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 19-53.

108. Wrege, C. 2007. Agricultura de precisão – Aplicada a fertilidade do solo para produção de sementes de arroz irrigado (*Oryza sativa L.*). Tesis Dr.en Ciência e Tecnologia de Sementes. Rio Grande do Sur, Brasil. Universidad Federal de Pelotas. 97 p.
109. Xiangping, G.; Yousef, A. H.; Zhenchang, W.; Sheng, C.; Ghulam, R. 2018. Effects of irrigation water regime, soil clay content and their combination on growth, yield, and water use efficiency of rice grown in South China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 11(4):144-155.
110. Ye, Q.; Zhang, H.; Wei, H.; Zhang, Y.; Wang, B.; Xia, K.; Huo, Z.; Dai, Q.; Xu, K. 2007. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions. *Frontiers of Agriculture in China*. 1(1):30-36.