



**Universidad Nacional De Rosario**  
**Facultad de Ciencias Agrarias**

**VARIABILIDAD DEL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE SOJA**  
***Glycine max* (L.) Merr., EN SISTEMAS DE SIEMBRA DIRECTA**  
**EN EL SUR DE SANTA FE.**

**SILVINA BACIGALUPPO**

Tesis presentada para optar al grado de Magister en  
Manejo y Conservación de Recursos Naturales.

Director: Ing. Agr. MSc. MARCELO L. BODRERO  
Co-Director: Ing. Agr. MSc. JULIO L. DARDANELLI  
Asesora en Estadística: Ing. Agr. PhD. MONICA BALZARINI

Zavalla, abril de 2009.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos los que de alguna manera me ayudaron a realizar este trabajo...

Principalmente a Marcelo Bodrero por confiar en mí cuando además de sugerirme el tema de trabajo aceptó ser mi director. También les estoy infinitamente agradecida a Mónica Balzarini y a Julio Dardanelli, porque aunque formalmente figuren con otros “nombres” (asesora en estadística y co-director), todos fueron fundamentales para que este trabajo llegue a su fin, con los tres aprendí tanto!!... Siempre estuvieron dispuestos a dedicarme su valioso tiempo...

A Guillermo Gerster, por su gran colaboración ya que además de realizar los perfiles culturales, me enseñó la técnica. A Juan Martín Enrico y a José Andriani quienes me facilitaron información sobre algunas mediciones. A los técnicos de las AERs de INTA Oliveros que me permitieron trabajar en ensayos que ellos condujeron. A Alfredo Vernizzi por sus análisis de laboratorio. A Álvaro Quijano, por acompañarme en la primera etapa del análisis de la información y a Ricardo Martignone, por contestar siempre mis consultas. A Mabel Fior, Fernando Salvagiotti y Andrea Bacigaluppo por sus pequeñas pero valiosas ayudas. A Mario Fernández Alsina por darme la posibilidad de realizar esta maestría en mi ámbito de trabajo. A la Facultad de Ciencias Agrarias de la U.N.R., porque además de haberme permitido obtener el título de grado, también me ofrece optar por el de Magister.

Y muy especialmente a mis padres, quienes me enseñaron que el conocimiento es una de las herramientas más valiosas de una persona y me incentivaron a estudiar siempre un poco más...

A Martín, por su amor y paciencia incondicionales y a Clara y Josefina por el tiempo que no les dediqué en este intento de transmitirles a ellas el mensaje que recibí de mis padres “nunca nadie podrá quitarles lo que lean, estudien y aprendan”.

Muchas gracias a todos los que hicieron posible la concreción de mi trabajo de Tesis!!.

a Clara

a Josefina

## ÍNDICE GENERAL

SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS	1
RESUMEN	3
ABSTRACT	5
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL</b>	<b>7</b>
HIPÓTESIS	18
OBJETIVOS	18
<b>CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>19</b>
1- Diseño del estudio	19
2- Variables registradas	25
2a- Variables de cultivo	25
2b- Variables de suelo	25
2c- Variables de clima	29
3- Análisis de la información	31
<b>CAPÍTULO III: RESULTADOS</b>	<b>33</b>
<b>CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN</b>	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES</b>	<b>62</b>
BIBLIOGRAFÍA	64
<b>ANEXO I.</b> Descripción de las series de suelo encontradas en los distintos ambientes evaluados en el sur de Santa Fe.	<b>77</b>
<b>ANEXO II.</b> Variables de cultivo, suelo y clima registradas en cultivos de soja en 70 ambientes del Sur de Santa Fe, Argentina.	<b>83</b>

---

<b>ANEXO III.</b> Base de datos II. Red de ensayos comparativos de soja GM III al VI, de INTA Oliveros, campañas 2001/02, 2002/03, 2003/04 y 2004/05 en diferentes sitios experimentales del sur de Santa Fe, Argentina.	84
--	----

---

**ÍNDICE DE CUADROS**

<b>Cuadro I.</b> Características de los lotes en siembra directa en el sur de Santa Fe, seleccionados para el estudio.	21
<b>Cuadro II.</b> Variedades y lotes definiendo 70 ambientes de cultivo y 175 casos de estudio.	22
<b>Cuadro III.</b> Efectos (en porcentaje) del ambiente, genotipo e interacción sobre la variación en rendimientos de soja bajo siembra directa en el Sur de Santa Fe, Argentina.	33
<b>Cuadro IV.</b> Valores promedios y rangos de variación de variables edáficas en ambientes del Sur de Santa Fe, Argentina.	34
<b>Cuadro V.</b> Valores promedios y rangos de variación de variables climáticas en distintos subperíodos del cultivo de soja en ambientes del Sur de Santa Fe, Argentina.	35
<b>Cuadro VI.</b> Valores promedios y rangos de variación de variables de cultivo de soja en ambientes del Sur de Santa Fe, Argentina.	36
<b>Cuadro VII.</b> Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación uno para predecir rendimiento de soja en función de variables de clima y suelo en el Sur de Santa Fe, Argentina.	42
<b>Cuadro VIII.</b> Rendimiento y variables con capacidad predictiva en ambientes con precipitaciones en el período reproductivo ( $pp_{2+3}$ ) de la soja $\leq 180$ mm ( $n=17$ ).	42
<b>Cuadro IX.</b> Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación dos para predecir rendimiento de soja en función de variables de clima y suelo en el Sur de Santa Fe, Argentina.	44

<b>Cuadro X.</b> Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación tres para predecir rendimiento de soja en función de variables de clima y suelo en el Sur de Santa Fe, Argentina.	45
<b>Cuadro XI.</b> Rendimiento y variables con capacidad predictiva en ambientes con precipitaciones en el período reproductivo de la soja > 180 mm (n=158).	45
<b>Cuadro XII.</b> Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación cuatro para predecir rendimiento de soja en función de variables de clima y suelo en el Sur de Santa Fe, Argentina.	47
<b>Cuadro XIII.</b> Rendimiento y variables con capacidad predictiva en ambientes con AUI < 200 mm (n= 12).	47
<b>Cuadro XIV.</b> Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación cinco para predecir rendimiento de soja en función de variables de clima y suelo en el Sur de Santa Fe, Argentina.	49
<b>Cuadro XV.</b> Rendimiento y variables con capacidad predictiva en ambientes con AUI > 200 mm (n= 163).	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Mosaico de imágenes Landsat 5 febrero de 2006, falso color compuesto (combinación de bandas 4-5-3). Área comprendida entre las coordenadas geográficas 32° 12' 26" - 34° 12' 00" S y 60° 06' 28" y 62° 49' 47" O. Grupo Manejo de Suelos y Recursos Naturales. INTA-EEA Rafaela. 20
- Figura 2.** Permeámetro de disco. 26
- Figura 3.** Método del perfil cultural. Determinación de las variables masivos delta y pisos compactados. 29
- Figura 4.** Biplot del análisis de componentes principales de variables de suelo y rendimiento (círculos vacíos) en ambientes de cultivo de soja (círculos llenos) en el Sur de Santa Fe, Argentina. 37
- Figura 5.** Biplot del análisis de componentes principales de variables de clima y rendimiento (círculos vacíos) en ambientes de cultivo de soja (círculos llenos) en el Sur de Santa Fe, Argentina. 38
- Figura 6.** Relación entre los residuos parciales del rendimiento y las precipitaciones acumuladas en el período reproductivo y las precipitaciones acumuladas en el periodo reproductivo del cultivo de soja en el sur de Santa Fe. 40
- Figura 7.** Relación entre los residuos parciales del rendimiento y agua útil inicial hasta los 2 m de profundidad y el agua útil inicial en el cultivo de soja en el sur de Santa Fe. 40
- Figura 8.** Rendimiento estimado por la ecuación uno vs. observado en ambientes de  $pp_{2+3} \leq 180$  mm ( $R^2 = 0,89$ ). 43

- Figura 9. (a)** Rendimiento estimado por la ecuación dos vs. observado (R<sup>2</sup>=0,48); **(b)** rendimiento estimado por la ecuación tres vs. observado (R<sup>2</sup>=0,39), en ambientes con pp<sub>2+3</sub> > 180 mm. 46
- Figura 10.** Rendimiento estimado por la ecuación cuatro vs. observado en ambientes de AUI ≤ 200 mm (R<sup>2</sup>= 0,72). 48
- Figura 11.** Rendimiento estimado por la ecuación cinco vs. observado en ambientes de AUI > 200 mm (R<sup>2</sup>= 0,51). 50
- Figura 12.** Correlación entre el % de cobertura del cultivo de soja en R2 (IR2) e impedancias físicas en el suelo (Md), en ambientes del Sur de Santa Fe, Argentina (r= -0,81). 51
- Figura 13.** Biplot del análisis de componentes principales de variables de clima y cultivo (círculos vacíos) en el período de fijación de granos (R2-R5) en ambientes de cultivo de soja (círculos llenos) en el Sur de Santa Fe, Argentina. 52
- Figura 14.** Biplot del análisis de componentes principales de variables de clima y cultivo (círculos vacíos) en el período de llenado de granos (R5-R7) en ambientes de cultivo de soja (círculos llenos) en el Sur de Santa Fe, Santa Fe, Argentina. 53

“Declaro que el material incluido en esta Tesis es original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifiquen explícitamente las contribuciones de otros). No he presentado esta Tesis en otros posgrados académicos de la U.N.R. ni en ninguna otra Institución.”

Ing. Agr. Silvina Bacigaluppo

## SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS

<u>Sigla/abreviatura</u>	<u>Significado</u>	<u>Unidad</u>
A	Sitio o ambiente	---
ACP	Análisis de componentes principales	---
AUI	Agua útil inicial	mm
E	Estadío fenológico de emergencia	---
eq	Ecuación	---
Fot	Fotoperíodo	hs
G	Variedad o genotipo	---
GM	Grupo de madurez	---
HC	Hábito de crecimiento	---
IR2	Cobertura de cultivo en R2	%
IR5	Cobertura de cultivo en R5	%
Ksat	Conductividad hidráulica saturada	cm seg <sup>-1</sup>
Md	Estados masivos delta	%
MO	Materia orgánica	%
NG	Número de granos	granos m <sup>-2</sup>
P	Fósforo disponible	ppm
PG	Peso unitario de granos	g
Pi	Pisos compactados	%
pp	Precipitaciones	mm
PrB2t	Profundidad hasta el horizonte B2 textural	cm
R2	Estadío fenológico de plena floración	---

<u>Sigla/abreviatura</u>	<u>Significado</u>	<u>Unidad</u>
R5	Estadío fenológico de inicio de llenado de granos	---
R7	Estadío fenológico de madurez fisiológica	---
R8	Estadío fenológico de madurez comercial	---
Rend	Rendimiento	kg ha <sup>-1</sup>
Rs	Radiación solar global	MJ m <sup>-2</sup>
SD	Siembra directa	---
TCC	Tasa de crecimiento de cultivo	g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
Tm	Temperatura media diaria del aire	°C

**VARIABILIDAD DEL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE SOJA *Glycine max* (L.) Merr., EN SISTEMAS DE SIEMBRA DIRECTA EN EL SUR DE SANTA FE.**

**RESUMEN**

La soja, *Glycine max* (L.) Merr., es el cultivo de mayor importancia económica en Argentina. El sur de la provincia de Santa Fe (32° 25' - 33° 48' S; 60° 20' - 62° 00' O) pertenece al área sojera núcleo, donde el 80% de la superficie agrícola se destina a este cultivo y más del 90% se realiza en siembra directa (SD). Es un área con predominio de suelos Argiudoles, muchos de los cuales presentan un marcado deterioro físico evidenciado por la formación de estructuras masivas en el horizonte superior, con pérdida de porosidad estructural. Es común encontrar en esta zona, aún dentro de distancias reducidas, brechas de rendimiento de más de 2000 kg ha<sup>-1</sup>. La variación del rendimiento en grano del cultivo depende del genotipo, el ambiente, el manejo y su interacción, pero en general, la mayor parte de dicha variación es explicada por el efecto ambiental. La finalidad de este trabajo fue generar conocimiento sobre las múltiples correlaciones entre la oferta de recursos ambientales tales como la disponibilidad hídrica, la radiación solar y la temperatura, en interacción con la conductividad hidráulica saturada, los estados masivos delta del suelo, la materia orgánica y el rendimiento de soja en lotes de producción en sistemas de siembra directa en el sur de Santa Fe. La base de datos recopilada en lotes de producción de soja de primera época fue utilizada para identificar las variables climáticas y edáficas de mayor contribución en la explicación de la variación de rendimiento en soja y cuantificar el impacto de cada variable bajo distintos modelos de interacción entre ellas y el rendimiento. Se realizó un estudio observacional de 175 casos sembrados entre las campañas agrícolas 2001/02 y

2004/05, cubriendo un amplio rango de condiciones ambientales e historias de manejo: 3 a 60 años de agricultura continua y 1 a 15 de SD. Precipitaciones (pp) durante el ciclo del cultivo de 264 a 831 mm, agua útil inicial (AUI) hasta los 2 m de profundidad del suelo de 127 a 382 mm, materia orgánica (MO) de 2,23 a 3,55%, estados masivos delta (Md) en el perfil (bloques de suelo compactado) de 0 a 57% y conductividad hidráulica saturada (Ksat) de  $26 \times 10^{-4}$  a  $15 \times 10^{-3}$  cm  $\text{seg}^{-1}$ . Se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple para explicar la variabilidad observada en los rendimientos, seleccionando previamente a partir de análisis de componentes principales, grupos de variables climáticas y edáficas de baja correlación entre ellas. Se observó que los valores de 180 mm de pp acumuladas en R2-R7 y 200 mm de AUI, separaron dos situaciones: a) los casos en que se superaron estos valores, donde la variación del rendimiento fue explicada de un 48% a un 51% por factores climáticos tales como Tm en R2-R5, Rs acumulada en R5-R7 y por factores de suelo como MO y % de Md o alternativamente Ksat, con un error de predicción entre 443 y 453  $\text{kg ha}^{-1}$ . b) Los casos que no superaron los niveles hídricos antes mencionados, donde la variación del rendimiento fue explicada de un 72 a un 88 % por la cantidad de pp acumuladas en R2-R7 junto al % de Md del suelo, o por Ksat, con un error de predicción entre 285 y 378  $\text{kg ha}^{-1}$ . El rendimiento obtenido a través de los ambientes evaluados osciló entre 2.060 y 4.580  $\text{kg ha}^{-1}$ . Se puede concluir que i) los mayores rendimientos del cultivo de soja del área en estudio se lograron siempre en los ambientes que presentaron mejores condiciones físicas de suelo, i.e. bajo % de Md o alto valor de Ksat; ii) las variables climáticas como Tm y Rs comenzaron a tener peso en la explicación de la variación del rendimiento sólo después que se superaron determinados niveles hídricos (pp en R2-R7= 180 mm o AUI= 200mm).

**GRAIN YIELD VARIABILITY IN SOYBEAN, *Glycine max* (L.) Merr., UNDER NO  
TILLAGE SYSTEMS IN SOUTH SANTA FE.**

**ABSTRACT**

Soybean, *Glycine max* (L.) Merr., is the most important crop in Argentina. Southern Santa Fe cultivates the 80% of the agricultural area with soybean and more than 90% is grown under continuous no tillage. Argiudolls are the main soils in this area that usually show soil physical problems due to the presence of highly compacted layers in the upper horizons where macro-pores are lost. Grain yield gaps are often observed among fields, even located at short distances. The main objective of this work was to study the relationships among environmental factors such as solar radiation ( $R_s$ ), temperature ( $T_m$ ), soil water availability, and soil mechanical impedance with soybean yield in no-tilled fields in Southern Santa Fe. Data collected from farmer fields were used to identify meteorological variables and soil properties that explain grain yield variation in soybean and quantify the relative impact of each variable on soybean yield. Data included 175 soybean cases cultivated between 2001/02 and 2004/05 growing seasons, covering a wide range of soil management history and environmental conditions. Across sites soybean yield ranged from 2.060 to 4.580 kg ha<sup>-1</sup>. Principal-component analysis was used to identify climatic and soil variables with low interaction. Then, multiple linear regression was used to model soybean yield variability. Threshold values of 180 mm for cumulative rainfall in the reproductive stage (ppR2-R7) and 200 mm for soil water available at emergence up to 2 m depth (SWA) separated different situations: a) environments above these values where 48 to 51% of total variation in soybean yield was explained by  $T_m$  between R2-R5 and cumulative  $R_s$  during the R5-R7 period, combined with soil

variables like: organic matter and the proportion of compacted layers in the subsoil, or saturated hydraulic conductivity (Ksat); and b) environments below the threshold where ppR2-R7 and the proportion of subsoil compacted layers, or Ksat, accounted for 72-88% of soybean yield variability. The results of this study indicated that: i) The highest soybean yields were always achieved in fields that showed a better soil physical condition, ii) only after water availability was larger than 180 mm (ppR2-R7) or 200 mm (SWA), then the effect of meteorological variables like Tm and Rs were important to explain grain yield variation in soybean.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION GENERAL

La soja, *Glycine max* (L.) Merr., es el cultivo de mayor importancia económica en Argentina por los ingresos que se obtienen de su comercialización ya que forma parte de la principal cadena agroexportadora del país. La Argentina es el primer exportador mundial de aceite y harina de soja y el tercer exportador mundial de grano (Ciani, 2005). La superficie sembrada con esta oleaginosa ascendió en la campaña 2006/07 a las 16.100.000 ha (SAGPyA, 2007), el 84 % de la misma se concentra en la región de la Pampa Húmeda. Dentro de ésta, el sur de la provincia de Santa Fe pertenece al área sojera núcleo que comprende además el norte de Buenos Aires y sudeste de Córdoba. Más del 80 % de la superficie agrícola en el sur de Santa Fe se destina a este cultivo (IPEC, 2007).

Existe cuantiosa información respecto a la ecofisiología de la soja. Es bien conocido el período crítico (fijación del número de granos) para la determinación del rendimiento del cultivo (Jiang y Egli, 1993; Jiang y Egli, 1995; Board y Tan, 1995; Board *et al.*, 1995), el impacto de la elección de la fecha de siembra (Sinclair *et al.*, 1991; Martignone *et al.*, 1996; Baigorri *et al.*, 2000; Martignone *et al.*, 2006) y las características de las mejores variedades para diferentes zonas del cultivo en el país (Baigorri *et al.*, 2000; Fuentes *et al.*, 2007). Si bien se reconoce el alto impacto del estrés hídrico en las variaciones del rendimiento, aún no se han documentado relaciones funcionales que involucren múltiples variables como para comprender mejor la relación entre el rendimiento de la soja y el balance hídrico agroclimático. Por otra parte, factores limitantes edáficos causados por el tipo de suelo y su manejo, pueden ser fuentes importantes de variación de rendimiento por sí solos y en

interacción con las limitantes agroclimáticas. Estos factores intervienen en la expresión de la variabilidad del rendimiento en diferentes localidades, lotes y aún dentro de un mismo predio.

Uno de los desafíos de la producción actual es entender y capitalizar la variabilidad del rendimiento entre y dentro de los lotes. Los monitores de rendimiento muestran que existen diferencias entre y dentro de lotes, y que el patrón de variabilidad de un mismo lote puede diferir de un año a otro (Batchelor *et al.*, 2002; Bragachini *et al.*, 2007).

El rendimiento en grano es el producto de varios procesos parciales, cuyos resultados son denominados componentes del rendimiento. El rendimiento final del cultivo a la madurez dependerá de: el número de nudos por unidad de superficie, el número de frutos por nudo, el número de semillas por fruto, y el peso promedio de las semillas (Kantolic *et al.*, 2003). Los valores de estos componentes del rendimiento dependen del genotipo, el ambiente, el manejo y su interacción, determinando el rendimiento final. El conocimiento de la importancia relativa de estas fuentes de variación permite elaborar estrategias de manejo del cultivo adaptadas a distintos ambientes.

El grado de sensibilidad de cada componente del rendimiento a los factores ambientales varía con el estado de desarrollo del cultivo (Hoogenboom *et al.*, 1987; Board *et al.*, 1999, Egli, 1998). La soja tiene además la capacidad de compensar (dentro de ciertos límites) reducciones en el número de granos debidas a factores de estrés, mediante el aumento del peso. Una vez culminado un período de estrés, si el número de granos fue reducido, habría una compensación parcial en el peso de los mismos por aumentar la disponibilidad de asimilados por semilla (Kantolic *et al.*,

2003). En condiciones de campo, es común la ocurrencia de diferentes grados de estrés (especialmente hídrico) y las diferencias de rendimiento entre cultivares puede responder no sólo a diferencias genotípicas en alguno de sus componentes, sino también a diferencias en su capacidad para compensar (Morandi *et al.*, 1991; Andriani y Bodrero, 1995; Quijano *et al.*, 2006).

El componente más asociado con variaciones en rendimiento del cultivo de soja es el número de semillas por unidad de superficie (Quijano *et al.*, 1996; Egli, 1998; Quijano *et al.*, 1998; Kantolic *et al.*, 2003). El número de semillas por m<sup>2</sup> es función de la tasa de crecimiento de cultivo (TCC) entre plena floración y comienzo de llenado de los granos. La TCC depende de la intercepción y de la eficiencia de conversión de la radiación solar. Puede ser considerada como una estimación de la disponibilidad de asimilados durante el período considerado (Egli y Zhen-Wen, 1991; Jiang y Egli, 1995; Egli y Bruening, 1999; Quijano *et al.*, 1999). Consecuentemente para lograr altos rendimientos de soja, se necesita máxima intercepción de luz durante el período de crecimiento reproductivo (Board y Harville, 1992).

En general, el efecto ambiental explica la mayor parte de las variaciones del rendimiento en grano (Yan *et al.*, 2000; Gerster *et al.*, 2002; Salado Navarro *et al.*, 2006) así como las variaciones del rendimiento en aceite y proteínas del grano (Herrero *et al.*, 2006; Dardanelli *et al.*, 2006). Bajo sistemas de agricultura continua se ha determinado que características del suelo, asociadas con el manejo (rotaciones, labranzas, cobertura), tienen un peso importante en la definición de los rendimientos. Este efecto puede ser muchas veces mayor que el debido a diferencias genéticas entre cultivares. Los factores ambientales que afectan el crecimiento de la

soja, tienen alta variabilidad tanto espacial como temporal (Kravchenko y Bullock, 2002; Gerster *et al.*, 2002).

Consecuentemente, los rendimientos de soja aún en un espacio geográfico reducido, como el de la zona núcleo de la provincia de Santa Fe, presentan una alta variación con valores que pueden ir desde 1500 a más de 4500 kg ha<sup>-1</sup>.

En síntesis, el rendimiento del cultivo es el resultado de varios factores como la genética, el manejo, el clima, su interacción y el resultado de distintos tipos de estrés biótico y abiótico que el cultivo puede experimentar durante el ciclo de crecimiento. Óptimas condiciones de manejo, cultivar adecuado y ausencia de limitación de agua y nutrientes, determinan el rendimiento potencial del cultivo en un año particular, mientras que la presencia de estrés, principalmente en el período crítico, reduce ese rendimiento potencial. El efecto de uno, y en algunos casos, de más de un factor de estrés sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo son comúnmente estudiados a partir de ensayos experimentales con alto control por parte del investigador. Sin embargo, el rendimiento es el resultado de interacciones temporales complejas que ocurren durante el ciclo del cultivo. La respuesta del mismo a distintos tipos de estrés, que pueden ocurrir simultáneamente, depende de la duración, el estadio fenológico del cultivo y de muchos otros factores que son difíciles de controlar conjuntamente en estudios experimentales (Batchelor *et al.*, 2002). Por ello, para explicar la variabilidad del crecimiento y desarrollo y en consecuencia del rendimiento del cultivo, es necesario implementar otro tipo de estudios. Particularmente, los estudios observacionales de lotes en producción ofrecen la posibilidad de realizar análisis multidimensionales y explorar interacciones tal cual éstas se presentan en la realidad.

En los últimos años, en Argentina, hubo un importante cambio en la oferta y adopción de alternativas tecnológicas para el cultivo de soja, entre las que se pueden mencionar: i) utilización de variedades genéticamente modificadas (resistentes al glifosato) que favorecieron el incremento de la superficie en siembra directa, actualmente 91% en el sur de Santa Fe (Aapresid, 2008), ii) la mayor utilización de fertilizantes a base de fósforo y azufre, iii) la tendencia a utilizar variedades más precoces, iv) el adelanto en la fecha de siembra (desde fines de septiembre) y v) la reducción en el espaciamiento entre surcos para todas las fechas de siembra. La existencia de un buen modelo de asociación entre variables relacionadas a las tecnologías agronómicas adoptadas y la oferta ambiental, podrían contribuir a reducir en un marco sustentable, no solo la brecha entre los rendimientos potenciales y los reales, sino también a controlar la alta variabilidad interanual en rendimiento que se presenta aún en ambientes de “alta calidad”.

En la región núcleo, es frecuente observar lotes en siembra directa que a pesar de tener el mismo tipo de suelo, igual régimen de precipitaciones y similar manejo, tienen un nivel o capacidad productiva diferente (Bodrero *et al.*, 2004a). En consecuencia, la producción de cultivos en la región puede estar explorando suelos de génesis similar pero de diferente calidad determinada por el grado de deterioro (Michelena *et al.*, 1988).

En un sentido amplio, la calidad de un suelo está representada por su capacidad para funcionar dentro de los límites naturales o no naturales de un ecosistema, sostener la producción de cultivos o animales, mantener o mejorar la calidad del agua y del aire y permitir la vida del hombre preservando su salud (Karlen *et al.*, 1997). La agricultura continua ha afectado la calidad de los suelos en

la zona sojera de la Pampa Húmeda Argentina (Ferraro, 2005). Según Michelena *et al.* (1988), los indicadores que mostraron los mayores cambios debido a un intenso uso del suelo fueron el carbono orgánico, el nitrógeno total, el fósforo extractable, el pH, la estabilidad de agregados y la tasa de infiltración de agua. Sin embargo, debido a características propias de los suelos, los indicadores de la declinación de su calidad pueden no ser los mismos para todas las localidades de una misma región.

La degradación del recurso suelo es producto de la combinación de efectos naturales y antrópicos de gran intensidad (Pecorari, 1988a, 1988b). Muchos suelos de la región presentan un marcado deterioro estructural causado por descensos significativos de la materia orgánica, evidenciados por la formación de costras superficiales, el incremento en las tasas de escurrimiento, la pérdida de suelo por erosión y una menor disponibilidad de agua para los cultivos (Michelena *et al.*, 1988; Senigagliesi y Ferrari, 1993). Otra evidencia de esta degradación es el incremento de la susceptibilidad del horizonte superior a formar una estructura masiva con pérdida de porosidad estructural (Pecorari, 1988a, 1988b, Gerster, *et al.*, 1996). Estos procesos tienen como consecuencia negativa, un incremento en la resistencia mecánica del suelo a la penetración, con efectos adversos sobre el crecimiento radical y una disminución de la velocidad de infiltración del agua (Cosentino y Pecorari, 2002). Según Barbosa *et al.* (1997), la baja estabilidad de los suelos y la escasa regeneración de la estructura, en la región sojera núcleo argentina, están asociadas a su alto contenido de limo.

Las características físicas particulares de los limos de origen biológico, con alto contenido de biolitos y vidrios volcánicos, que poseen muchos Argiudoles

pampeanos confieren al horizonte superficial de estos suelos rasgos de fragilidad estructural, tales como alta porosidad textural y débil resistencia mecánica y consecuentemente una alta susceptibilidad a la degradación. El elevado contenido de minerales de baja densidad en la fracción limo del horizonte superficial de muchos suelos pampeanos aumenta la porosidad a nivel textural y es el principal causante de la inestabilidad estructural del esqueleto mineralógico (Cosentino y Pecorari, 2002).

Cualquier factor adverso que altere el crecimiento y actividad de las raíces, como capas compactadas, inadecuada aireación, alta o baja temperatura o baja conductividad hidráulica, puede afectar parcial o totalmente la funcionalidad radical y por lo tanto la capacidad de producción del cultivo (Gil, 2001). La conductividad hidráulica es una propiedad que se relaciona principalmente con el movimiento del agua hacia las raíces de las plantas, la entrada de agua al suelo y el flujo de agua de drenaje (Dirksen, 1999). Las características del suelo que afectan a la conductividad hidráulica son la porosidad total, la distribución de poros, su tamaño y geometría, que hacen a la agregación y estructura del mismo (Hillel, 1998).

De lo expuesto se desprende la importancia de contar con un ambiente edáfico cuyas características funcionales le permitan a la planta expresar su potencial de producción. Una manera de entender la complejidad del funcionamiento del suelo es centrando la atención en su sistema poroso, en donde se cumplen la mayoría de los procesos físicos, químicos y biológicos. En principio se pueden definir dos grandes grupos de factores de variación de la porosidad del suelo, uno es su constitución que emerge del conjunto de sus partículas elementales calificado como porosidad textural, mientras que el otro es la historia del lote que refleja la

acción de los factores externos (climáticos, biológicos, mecánicos) sobre el material original del suelo y que da origen a la porosidad estructural (Venialgo *et al.*, 2002). Es importante destacar que de las propiedades del suelo, la porosidad estructural es tal vez la más alterada por las operaciones de labranza o manejo sin laboreo. El conocimiento del funcionamiento estructural del suelo, con sus variaciones propias y aquellas modificadas por el hombre, permite mejorar el uso, manejo y conservación del suelo (Gil, 2001).

El método del perfil cultural, basado en la descripción morfológica del estado estructural, es una herramienta útil para caracterizar el estado físico del suelo y estudiar su efecto sobre el funcionamiento del cultivo. Describe la disposición y estado interno de los terrones, constituyentes de la estructura del suelo, en un volumen dado del perfil (De Battista. *et al.*, 1993).

La productividad de un suelo agrícola está dada por su capacidad de generar biomasa vegetal y/o granos. El índice de productividad, desarrollado por Kiniry *et al.* (1983), es una valoración cuantitativa de esta cualidad que se basa en la aptitud del suelo para el crecimiento de raíces. El concepto asume que la productividad del cultivo es proporcional al crecimiento de raíces y que el crecimiento radical puede ser predicho a través de propiedades del suelo. Una de las propiedades edáficas que afecta el crecimiento radical es la disponibilidad de agua (Yang *et al.*, 2003). La variación climática interanual de las precipitaciones puede reducir o incrementar el aporte de agua durante el ciclo del cultivo afectando la dependencia del mismo respecto de la capacidad de almacenaje de agua útil en el perfil del suelo. Cuando los aportes de agua durante el ciclo del cultivo son adecuados, las plantas no sufren estrés hídrico y se independizan del agua almacenada en el suelo. En un año seco,

las plantas tienen mayor dependencia del contenido de agua almacenada en el perfil del suelo y éste pasa a ser el factor de mayor importancia en el crecimiento del cultivo (Yang *et al.*, 2003).

En los suelos de la región sojera núcleo de Santa Fe predominan los Argiudoles, teniendo como características más importantes un horizonte superficial mólico, bien estructurado y bien dotado de materia orgánica, debajo del cual se halla un horizonte argílico (B2t), con alto contenido de arcilla y estructura de prismas (Mosconi *et al.*, 1981). El espesor y la ubicación del mismo, que restringe la permeabilidad del suelo y dificulta la exploración radical, puede interactuar con estas variaciones de disponibilidad hídrica (Dardanelli *et al.*, 2003). El déficit hídrico afecta el rendimiento de la soja, dependiendo del momento en que actúa, de su intensidad y su duración. Algunos trabajos coinciden en señalar que dentro del período reproductivo la etapa de fijación de granos, es la más sensible a la falta de agua (Kadhem *et al.*, 1985; Andriani *et al.*, 1991).

Maddonni (1998) evaluó posibles indicadores biológicos como herramientas para definir la calidad de un suelo en relación a su funcionamiento como medio para la producción de cultivos agrícolas. Determinó que las variaciones en el crecimiento del cultivo estuvieron asociadas a indicadores edáficos de la calidad del suelo. Ese trabajo se basó en la observación de lotes de maíz con calidades de suelo contrastantes (menor y mayor deterioro) y sugirió que las diferencias tanto en crecimiento vegetativo como en rendimiento y sus componentes permiten detectar cambios más pequeños en la calidad de los suelos que otros indicadores edáficos comúnmente utilizados, como por ejemplo la estabilidad estructural.

Por otro lado, se ha identificado a la compactación como una de las principales causas de la degradación de los suelos que afecta la productividad y acelera la pérdida de calidad de las tierras agrícolas por limitación del desarrollo radical de los cultivos (Plá Sentis y Nacci, 1990; Gerster y Bacigaluppo, 2004; Silva Rossi, 2005).

Es probable que las raíces que detectan una impedancia mecánica envíen una señal hormonal a la parte aérea de la planta, que afectaría la tasa de crecimiento de todos los órganos de la misma. Este mensaje podría explicar gran parte de la reducción de la TCC durante la primera parte del ciclo del cultivo. Tendría menos importancia cuando las raíces logran atravesar la capa compactada, creciendo luego en capas de suelo con menor impedancia. Mensajes inducidos por déficit hídrico o por hipoxia, causados por la compactación, pueden sumarse al efecto de la impedancia (Tardieu y Manichon, 1987; Tardieu, 1988).

El tránsito de la maquinaria en suelos agrícolas es una de las principales causas de la formación de capas compactas, con pérdida de la macroporosidad del suelo, pudiendo causar una disminución en los rendimientos de los cultivos, aumentar el riesgo de erosión, dificultar la absorción de agua y nutrientes por las plantas e incrementar los requerimientos de energía para las labranzas. En el sur de Santa Fe, donde las labores de siembra y cosecha se concentran en períodos lluviosos, el tránsito de maquinaria se produce con contenidos de humedad de suelo elevados y cercanos al punto de máxima susceptibilidad a la compactación. Una forma de cuantificar esta susceptibilidad es a través del análisis del test proctor que relaciona densidad aparente y contenido hídrico del suelo (Taboada y Micucci, 2002; Silva Rossi, 2005).

Existen marcadas diferencias en la susceptibilidad a la compactación entre suelos aunque sean morfológicamente similares. Ésta depende de la calidad de los mismos y va a estar determinada en gran medida por los tenores de materia orgánica. Por ello es importante promover aquellas prácticas de uso y manejo de la tierra tendientes a incrementar los tenores de materia orgánica del suelo (Taboada y Micucci, 2002; Silva Rossi, 2005).

Un aspecto importante a considerar para entender los factores que más contribuyen a la variabilidad del rendimiento, es el tipo de modelo matemático-estadístico usado en el análisis de la información. Los modelos de regresión lineal múltiple son comúnmente usados pero pueden conducir a soluciones inestables o poco seguras cuando son aplicados sobre archivos de datos con ciertas características, tales como un gran número de variables predictoras con pequeñas significancias cada una o con fuertes correlaciones entre ellas (Hastie *et al.*, 2001). El modelado a partir de base de datos de variables de clima y de suelo como factores contribuyentes de la variabilidad del rendimiento exhibe estas características ya que tanto el clima como el suelo son cuantificadas a través de múltiples variables, muchas de ellas correlacionadas entre si. Se han desarrollado varias alternativas al uso de modelos lineales tradicionales bajo tales condiciones (Lobell *et al.*, 2005). La aplicación de técnicas comunes en el análisis multivariado para la reducción de dimensión como el análisis de componentes principales o ACP (Johnson y Wichern, 1998) puede evitar el problema si se usa para la construcción de nuevas variables no correlacionadas o para la selección de grupos de variables con baja correlación, que ingresarán como predictoras en los modelos de regresión lineal (Kaspar *et al.*, 2004).

La finalidad de este trabajo es generar conocimiento sobre las múltiples correlaciones entre la oferta de recursos ambientales tales como las precipitaciones, la radiación solar y la temperatura en interacción con la conductividad hidráulica saturada, los estados masivos delta del suelo, la materia orgánica y el rendimiento de la soja, en lotes de producción en sistemas de siembra directa en el sur de Santa Fe.

Estos nuevos conocimientos permitirán diseñar mejores prácticas de manejo tendientes a reducir las brechas entre rendimiento potencial y real, así como su variabilidad espacial e interanual. Se espera que el conocimiento generado con este trabajo impacte no sólo en la zona tradicionalmente sojera, sino también en aquellas nuevas áreas en las que se está introduciendo rápidamente este cultivo.

## **HIPÓTESIS DE TRABAJO**

El estado estructural de los horizontes superficiales de los Argiudoles interactúa con las variables climáticas que determinan el crecimiento del cultivo de soja condicionando los rendimientos y provocando su variabilidad espacial y temporal.

## **OBJETIVOS**

1- Identificar las variables climáticas y edáficas de mayor contribución en la explicación de las variaciones de rendimiento de soja bajo sistemas de siembra directa en Argiudoles del Sur de Santa Fe, mediante la aplicación (combinación) de diversas técnicas de análisis de datos multidimensionales.

2- Cuantificar el impacto de cada variable bajo distintos modelos de interacción entre ellas y el rendimiento.

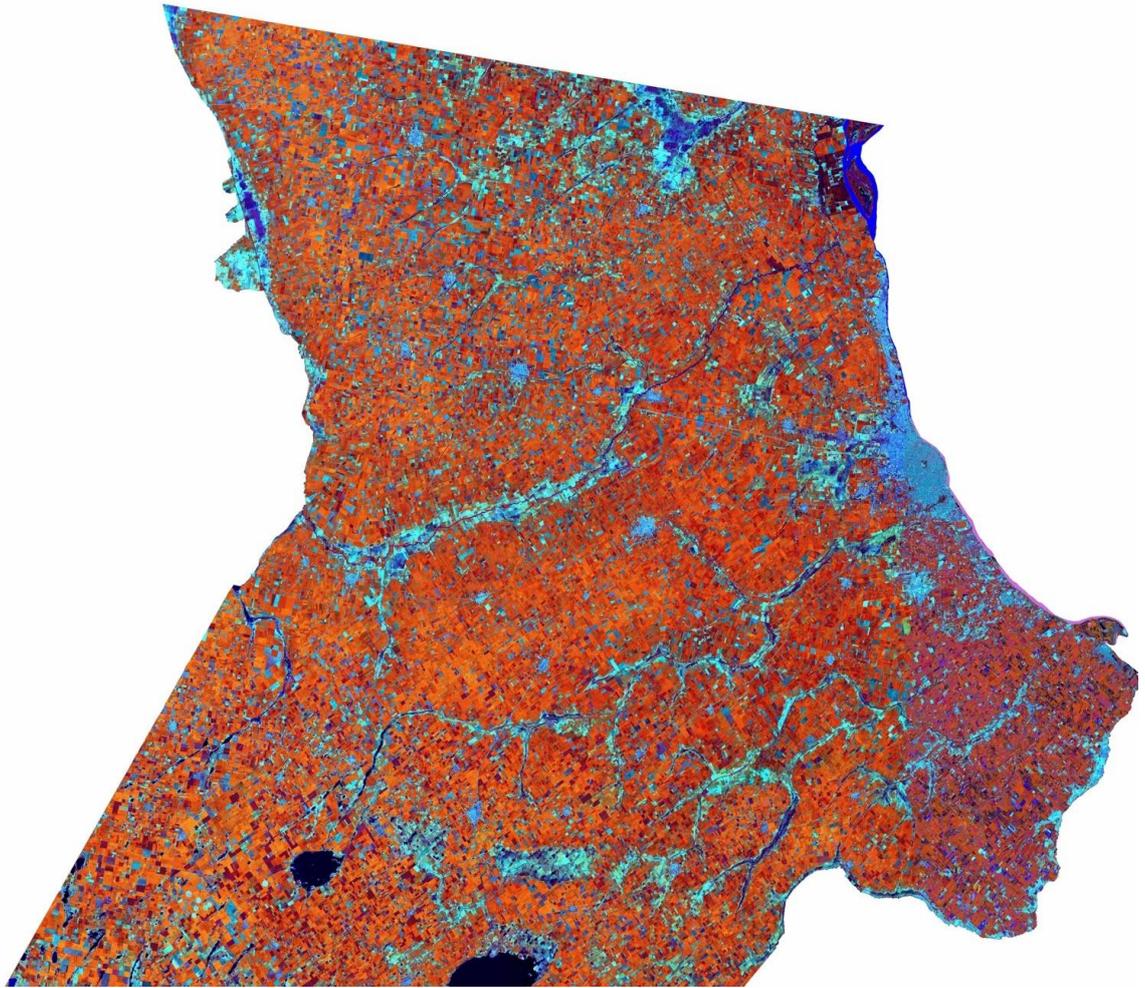
## CAPITULO II

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 1- Diseño del estudio.

Se realizó un estudio observacional a partir de datos recopilados en lotes de producción de soja en siembra directa, en seco, sin la influencia de napa freática, cultivados entre las campañas agrícolas 2001/02 y 2004/05. El área en estudio comprende los departamentos de Belgrano, Iriondo, San Lorenzo, Caseros, Rosario y Constitución, ubicada en el sur de la provincia de Santa Fe, entre los paralelos 32° 25' - 33° 48' S y los meridianos 60° 20' - 62° 00' O, cubriendo aproximadamente 1.570.000 ha. En la Figura 1 se observa un mosaico de imágenes Landsat 5 del área en estudio, del mes de febrero de 2006, falso color compuesto (combinación de bandas 4-5-3). Los colores rojo y anaranjado muestran la vegetación vigorosa. Por la fecha y la región de la que se trata se deduce que la mayor parte de esa vegetación es soja (Manejo de Suelos y Recursos Naturales INTA-EEA Rafaela).

Este área pertenece a la Pampa Ondulada, subregión de la Pampa Húmeda Argentina. Está caracterizada por tener un relieve suavemente ondulado, recortado por cañadas, arroyos y ríos. Posee pendientes medias con gradientes menores de 2%, aunque en algunos sectores pueden alcanzar el 3%. En los interfluvios y en las nacientes de los cursos de agua, el terreno suele ser más plano. Los materiales sobre los cuales se formaron los suelos son sedimentos loésicos de textura predominante franco-limosa (Mosconi *et al.*, 1981). Todos los suelos del área en estudio son genéticamente similares y pertenecen al Gran grupo Argiudol. Varían sólo a nivel de series por diferencias en sus contenidos de limo, arcilla y arena y/o en el espesor de los horizontes que las componen.



**Figura 1.** Mosaico de imágenes Landsat 5 febrero de 2006, falso color compuesto (combinación de bandas 4-5-3). Área comprendida entre las coordenadas geográficas 32° 12' 26" - 34° 12' 00" S y 60° 06' 28" - 62° 49' 47" O. Grupo Manejo de Suelos y Recursos Naturales INTA-EEA Rafaela.

La descripción más detallada de cada uno de los perfiles de suelo intervinientes en el estudio se puede consultar en el ANEXO I. En estos suelos, la capacidad de almacenaje de agua disponible para el cultivo es aproximadamente 300 mm hasta los dos metros de profundidad, a la cual llegan las raíces del cultivo de soja (Andriani, 2000a; Dardanelli *et al.*, 2003). Entre las series de suelo de los casos evaluados, la diferencia de almacenaje de agua útil es menor a 10 mm (Andriani, 2000b).

El clima del área en estudio es templado, con un periodo libre de heladas de 250 días (mediados de setiembre a mediados de mayo), pudiendo variar en 20 ó 25 días, según el año. Las precipitaciones medias anuales son de 1013 mm (serie 1975 a 2007), con una alta variación interanual de 692 a 1447 mm (INTA, 2008). Aumentan de oeste a este y el régimen pluviométrico tiende a ser monzónico, o sea con concentración de lluvias en primavera-verano. El período octubre-marzo concentra el 70% de las lluvias (Mosconi *et al.*, 1981; INTA, 1985).

Con el propósito de disponer de un amplio rango de valores para las variables edáficas analizadas en este trabajo, se seleccionaron lotes de soja en siembra directa pertenecientes a la Red de ensayos comparativos de soja de INTA Oliveros, que es conducida en campos de productores con diferentes historias de manejo. Los lotes seleccionados comprenden casos de 3 hasta 60 años de agricultura continua, de 1 a 15 años de siembra directa y con distintos cultivos antecesores: soja, maíz, trigo/soja. En el Cuadro I se detallan las características de cada lote en estudio.

Todos los lotes fueron sembrados con soja después de un cultivo antecesor estival con posterior barbecho invernal, en un rango de fechas comprendido entre el 14/10 y el 30/11, que son consideradas como fechas apropiadas para el cultivo de soja de primera en la región. En todos los casos seleccionados el contenido de fósforo del suelo hasta los 20 cm de profundidad fue superior a 13 ppm, ya que por encima de este valor se considera que la disponibilidad del nutriente para el cultivo de soja no es limitante (Ferraris *et al.*, 2002). En cada uno de estos lotes se registraron datos sobre parcelas (franjas de 1000 m<sup>2</sup> de superficie en promedio) de distintas variedades de soja, que difirieron en el grupo de madurez (GM) y hábito de crecimiento (HC): DM 4800 RR (GM IV; HC indeterminado), A 5520 RG (GM V; HC

determinado) y A 6040 RG (GM VI; HC determinado). Las diferencias en ciclos de las variedades seleccionadas permitieron explorar distintas ventanas temporales para el estudio de efectos climáticos, proveyendo una amplia gama de variaciones ambientales.

**Cuadro I.** Características de los lotes en siembra directa en el sur de Santa Fe, seleccionados para el estudio.

Lote	Campaña	Localidad	Suelo		Historia		
			Tipo	Serie	Agricultura continua (años)	SD (años)	Cultivo antecesor
1	2001/02	C.Gómez	A. típico	Correa	14	5	Maíz
2	2001/02	Oliveros	A. típico	Maciel	25	4	Maíz
3	2001/02	Totoras	A. típico	Clason	6	1	Maíz
4	2001/02	Bouquet	A. típico	Los Cardos	25	8	Soja 1 <sup>a</sup>
5	2001/02	Maizales	A. típico	Peyrano	35	4	Soja 1 <sup>a</sup>
6	2002/03	Totoras	A. típico	Clason	25	4	Soja 1 <sup>a</sup>
7	2002/03	C.Gómez	A. típico	Correa	15	8	Maíz
8	2002/03	Las Rosas	A. típico	Los Cardos	25	15	Soja 1 <sup>a</sup>
9	2002/03	Oliveros	A. típico	Maciel	10	6	Maíz
10	2002/03	Oliveros E.	A. típico	Maciel	35	5	Soja 1 <sup>a</sup>
11	2002/03	A. Seco	A.vértico	Roldán	15	3	Soja 1 <sup>a</sup>
12	2002/03	Carcarañá	A. típico	Peyrano	35	3	Maíz
13	2002/03	Casilda	A. típico	Casilda	9	5	Soja 1 <sup>a</sup>
14	2003/04	Totoras	A. típico	Clason	12	5	Soja 1 <sup>a</sup>
15	2003/04	Oliveros	A. típico	Maciel	35	6	Maíz
16	2003/04	J.B.Molina	A. típico	Peyrano	60	6	Soja 1 <sup>a</sup>
17	2003/04	Carcaraña	A. típico	Peyrano	35	5	Maíz
18	2003/04	Bouquet	A. típico	Los Cardos	5	4	Soja 1 <sup>a</sup>
19	2003/04	Totoras B	A. típico	Clason	30	1	Trigo/soja
20	2003/04	Totoras A	A. típico	Clason	30	7	Maíz
21	2003/04	Armstrong	A. típico	Villa Eloísa	35	5	Soja 1 <sup>a</sup>
22	2004/05	Totoras	A. típico	Clason	25	7	Soja 1 <sup>a</sup>
23	2004/05	V.Eloísa	A. típico	Correa	35	10	Soja 1 <sup>a</sup>
24	2004/05	Bouquet	A. típico	Los Cardos	20	10	Maíz
25	2004/05	S.Jenaro	A. típico	Clason	3	1	Soja 1 <sup>a</sup>
26	2004/05	Oliveros	A. típico	Maciel	35	7	Maíz
27	2004/05	J.B.Molina	A. típico	Peyrano	50	10	Maíz
28	2004/05	Carcarañá	A. típico	Peyrano	25	4	Maíz
29	2004/05	Casilda	A. típico	Casilda	11	7	Maíz
30	2004/05	Totoras I B	A. típico	Clason	45	3	Soja 1 <sup>a</sup>
31	2004/05	Totoras I A	A. típico	Clason	20	8	Soja 1 <sup>a</sup>
32	2004/05	Totoras IIA	A. típico	Clason	8	7	Maíz
33	2004/05	Totoras IIB	A. típico	Clason	40	7	Soja 1 <sup>a</sup>

A: Arjudol

SD: Siembra directa

En el Cuadro II se presentan las características de los 70 ambientes definidos por la combinación de los factores lote y variedad. Es decir que, para una misma campaña y localidad, lotes con distintos cultivares se trataron como nuevos ambientes. Es importante resaltar que el cultivar y la fecha de siembra en soja determinan el período de tiempo en el que ocurren las distintas etapas de su ontogenia y por tanto el “ambiente” correspondiente al período de llenado de granos no será el mismo para los lotes de una misma campaña y productor sembrados con cultivares de distinto GM. Para cada ambiente se registraron datos en 2 o más franjas, el número total de unidades observacionales fue 175 y se distribuyó a través de los ambientes como se presenta en el Cuadro II.

Las malezas, plagas y enfermedades fueron controladas químicamente bajo las pautas o recomendaciones zonales.

**Cuadro II.** Variedades y lotes definiendo 70 ambientes de cultivo y 175 casos de estudio.

Lote	Variedad			Nº Ambientes	Nº Casos
	DM 4800	A 5520	A 6040		
1	3	3	3	3	9
2	3	3	3	3	9
3	3	3	3	3	9
4	2	2	2	3	6
5	2	2	2	3	6
6	3	3	3	3	9
7	3	3	3	3	9
8	3	3	3	3	9
9	3	3	3	3	9
10	3	3	3	3	9
11	3	3		2	6
12	2	2	2	3	6
13	2	2		2	4
14		3		1	3
15	3	3		2	6
16	3	3		2	6
17	2	2		2	4
18	2	2		2	4
19	3			1	3
20	3			1	3
21	3	3		2	6
22	2	2		2	4
23	2	2		2	4
24	2	2		2	4
25	2	2		2	4
26	2	2		2	4
27	2	2		2	4
28	2	2		2	4
29	2	2		2	4
30	2			1	2
31	2			1	2
32	2			1	2
33	2			1	2
<b>TOTAL</b>				<b>70</b>	<b>175</b>

Los números en las columnas de las variedades representan el número de unidades de observación en cada uno de los 70 ambientes (celdas no vacías).

## 2- Variables registradas.

Para cada caso se colectaron variables de cultivo, suelo y clima. En cada uno de ellos se delimitó un área de  $50 \text{ m}^2$  para realizar las determinaciones de cultivo y suelo.

### 2a- Variables de cultivo:

Se determinaron las fechas de ocurrencia de los siguientes estadios fenológicos: emergencia (E), plena floración (R2), inicio de llenado de granos (R5), madurez fisiológica (R7) y madurez comercial (R8), según la escala de Fehr & Caviness (1977). En los estadios R2 y R5 se midió la cobertura del canopeo (método indirecto para estimar la intercepción de radiación del cultivo) con el método descrito por Adams y Arkin (1977). Con este procedimiento la intercepción de radiación del cultivo se estima mediante el sombreado sobre una regla blanca de 1 m de longitud, colocada en forma diagonal entre las hileras del cultivo a nivel del suelo. Por ejemplo, si aparece luz en el 20 % de la regla, la cobertura del cultivo se estima en 80%. Todas las mediciones fueron hechas alrededor del medio día. En R8 se realizó la cosecha manual, efectuando dos muestreos de  $5 \text{ m}^2$ . Se determinó el rendimiento en grano expresado al 13,5 % de humedad y sus componentes: peso unitario de grano, obtenido a partir del peso de 5 muestras de 200 semillas cada una y número de granos  $\text{m}^{-2}$ , calculado a través del cociente entre rendimiento ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y el peso unitario de granos (g).

### 2b- Variables de suelo:

**Materia orgánica (MO):** al inicio del cultivo, en cada uno de los 70 ambientes analizados, se extrajo una muestra del horizonte A con barreno (15 mm de diámetro)

compuesta por 15 submuestras. Las muestras fueron puestas en bolsas de polietileno para evitar su desecación y preservadas en heladera (temperatura menor a 8°C) hasta su posterior envío al laboratorio. Se determinó el contenido de carbono orgánico utilizando el Método de oxidación de Walkley Black y cuantificación por titulación (SAMPLA, 2004; Jackson, 1964). El resultado se expresó en porcentaje de materia orgánica.

**Conductividad hidráulica saturada (Ksat):** Se realizaron 3 mediciones en cada uno de los 70 ambientes analizados, con permeámetro de disco, instrumento diseñado para medir la conductividad hidráulica del suelo en condiciones de campo. El instrumento presenta la ventaja de efectuar mediciones directamente sobre una superficie reducida de suelo con mínimo o nulo disturbio (Figura 2). Consta de un reservorio recargable de agua con escala milimetrada y un disco con membrana porosa de 123 cm<sup>2</sup> de superficie.



**Figura 2.** Permeámetro de disco.

Para el cálculo de la infiltración parcial ( $I_n$ ), expresada en mm, se utilizó la fórmula:

$$I_n = (L_n - L_{n-1}) * F_1$$

donde:

$L_n$  y  $L_{n-1}$  son una lectura y su inmediata anterior en mm de la escala graduada del reservorio de agua, en los tiempos  $t_n$  y  $t_{n-1}$ , respectivamente.

$$F_1 = S_r / S_d = 0,186$$

donde:

$S_r$  es la superficie interna del reservorio de agua ( $22,9 \text{ cm}^2$ ) y  $S_d$  es la superficie del disco ( $123 \text{ cm}^2$ ).

La infiltración acumulada ( $I_a$ ), expresada en mm, para un período de tiempo  $t$  es la suma de los valores de  $I_n$  en ese periodo de tiempo. La conductividad hidráulica saturada,  $\text{cm seg}^{-1}$ , se estimó a partir de las mediciones de la Infiltración acumulada en la etapa en que la velocidad de infiltración alcanzó una tasa constante o se estabilizó.

**Profundidad hasta el horizonte B2 textural (PrB2t):** se construyó una trinchera transversal a las líneas de siembra, de 210 cm de largo por 70 cm de ancho y 70 cm de profundidad, en cada uno de los 70 ambientes analizados. En una de sus paredes se identificaron los horizontes y se midió la distancia vertical desde la superficie hasta el comienzo del horizonte B2t en cm.

**Estados masivos delta y pisos compactados (Md y Pi):** Se identificaron utilizando la metodología del perfil cultural (Gautronneau y Manichon, 1987). Se utilizó la trinchera descrita anteriormente donde en una de las paredes se

delimitaron y clasificaron diferentes sectores de suelo según i) la forma en que se dispusieron los terrones y ii) su estado interno. Según la disposición de los terrones la clasificación fue:

**M:** masivo, no se observaron terrones, sino un solo elemento estructural.

**SD:** terrones soldados entre sí que pudieron visualizarse.

**SF:** terrones adherentes pero no soldados.

**F:** estado fragmentario (terrones individualizados).

Según el estado interno de los terrones, de acuerdo a su cohesión y aspecto de las caras de ruptura luego de una fragmentación manual en terrones de más de 1 cm de diámetro, se distinguieron dos estados típicos:

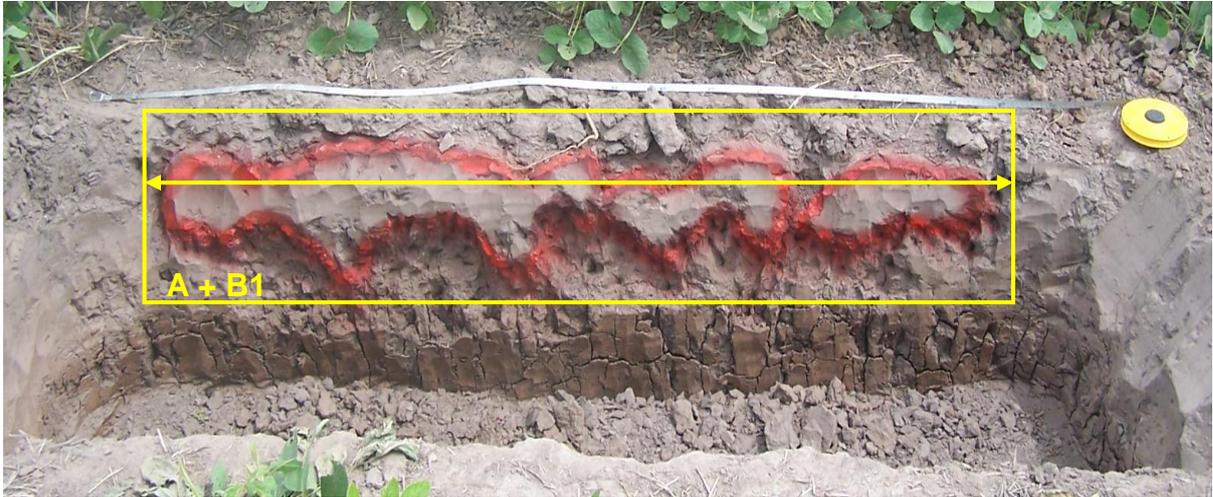
**I:** correspondió a caras de ruptura rugosa y porosidad visible importante, debido a la falta de contacto de los agregados constitutivos.

**Δ:** correspondió a caras de ruptura lisa, de aspecto continuo sin porosidad visible, con presencia de una cohesión más elevada.

La variable “masivos delta” (expresada en %) se construyó mediante la combinación de la disposición de los terrones y su estado interno. Se calculó como la proporción de la superficie de bloques que presentaron masivos delta en relación a la superficie total de horizonte A + B1 evaluada en cada trinchera (De Battista *et al.*, 1993; De Battista *et al.*, 1994).

La variable “pisos compactados” (expresada en %), se calculó como la proporción de la longitud de los bloques que presentaron un estado masivo delta, respecto al largo total de la trinchera (Gerster *et al.*, 2002). La Figura 3 muestra un

ejemplo de perfil cultural en donde se calculan las variables masivos delta (bloques de suelo delimitados con rojo) y pisos compactados.



**Figura 3.** Método del perfil cultural. Determinación de las variables masivos delta y pisos compactados.

**Agua útil inicial (AUI):** Se calculó al inicio del ciclo como la lámina de agua útil hasta los 2 m de profundidad, en mm. Esta lámina se determinó en cada horizonte como la diferencia entre el contenido de humedad volumétrica al inicio del cultivo y el valor de humedad volumétrica correspondiente al punto de marchitez permanente, multiplicada por la profundidad del horizonte. El punto de marchitez permanente fue previamente establecido para cada serie de suelo de los lotes en estudio (Andriani, 2000b). Las mediciones de humedad se realizaron con sonda de neutrones. La sumatoria de láminas de agua útil de los horizontes incluidos hasta 2 m de profundidad constituyó el valor de AUI.

### 2c- Variables de clima:

Se recopilieron datos diarios de temperatura, radiación solar global y fotoperíodo de la Estación Agrometeorológica de la EEA INTA Oliveros (32°33'54" S,

60°51'31" O, 26 m sobre el nivel del mar). Esta Estación presenta una distancia no mayor a 60 km respecto a cada uno de los lotes en estudio. Debido a estas distancias y a la topografía del área, los valores registrados de las variables consideradas pueden ser extrapolados a los lotes en estudio sin mayor error. Las precipitaciones diarias durante el período del cultivo se registraron en cada lote.

Para generar variables ambientales, combinando características del clima con las del cultivo, se determinaron tres subperíodos del cultivo:

- 1- subperíodo vegetativo: desde emergencia a plena floración (E-R2).
- 2- subperíodo de fijación de granos: desde plena floración a inicio de llenado de granos (R2-R5).
- 3- subperíodo de llenado de granos: desde inicio de llenado de granos a madurez fisiológica (R5-R7).

Para cada uno de estos tres subperíodos se calcularon: la temperatura media diaria del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) (**Tm**), como la semisuma de las temperaturas máxima y mínima diarias. La radiación solar global acumulada ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) (**Rs**) y las precipitaciones acumuladas (mm) (**pp**) resultaron de la suma de los valores diarios observados en el subperíodo. El fotoperíodo promedio diario (hs) (**Fot**) fue obtenido como la media aritmética de los valores registrados en cada subperíodo.

En el ANEXO II se presenta un Cuadro con las denominaciones, codificaciones y unidades de medición de cada una de las variables relevadas.

Además de la base de datos de variables de cultivo, suelo y clima construida a partir de los lotes del Cuadro I (base de datos I), se utilizó la base de datos de rendimiento completa de la Red de ensayos comparativos de soja de INTA Oliveros

(base de datos II). Esta base de datos II incluyó los resultados de rendimiento de variedades de los GM III al VI, en las campañas agrícolas 2001/02, 2002/03, 2003/04 y 2004/05 en 5, 8, 5 y 8 ambientes del sur de Santa Fe, respectivamente (Bodrero *et al.*, 2002; 2003, 2004b y 2005) (ANEXO III). Esta base se usó como apoyo para verificar el alto impacto del efecto ambiental en relación al efecto de la variedad, que justifica la organización de la información de la base de datos I en función de “ambientes”, definidos como la combinación de una campaña, localidad y cultivar.

### **3- Análisis de la información.**

Con la base de datos II se estimó la contribución relativa de los efectos variedad o genotipo (G), sitio o ambiente (A) y su interacción (GxA) para cada campaña agrícola independientemente, mediante un análisis de componentes de varianzas.

Por otro lado, con el fin de identificar las variables climáticas y las propiedades edáficas de mayor contribución en la explicación de las variaciones de rendimiento en soja así como para cuantificar su impacto se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple (Draper y Smith, 1998). Previo a ello, con los datos obtenidos a partir del estudio observacional (base de datos I) se analizaron correlaciones entre variables mediante ACP de la matriz de datos estandarizados. Se usaron gráficos del tipo biplots (Gabriel, 1971) para la representación gráfica de correlaciones entre variables de rendimiento tanto con variables climáticas como con variables edáficas. En estos gráficos bidimensionales se muestran tantos puntos o marcadores como ambientes en estudio hay y tantos vectores como variables. El

ángulo entre los vectores que representan variables es proporcional a la correlación entre ellas, ya sea esta correlación positiva (ángulos agudos) o negativa (ángulos obtusos). Dos variables con vectores aproximadamente perpendiculares (i.e. ángulo recto) deben interpretarse como no correlacionadas (Balzarini *et al.*, 2005).

Los ACP se basan en combinaciones lineales de las variables que pueden interpretarse como índices o nuevas variables con máxima varianza. Estos índices (CP) constituyen nuevos ejes de representación de la variabilidad entre observaciones. Así los gráficos biplot, no solo son útiles para interpretar correlaciones entre variables sino que también constituyen un plano óptimo para el estudio de la variabilidad total entre ambientes y su correspondencia con las variables medidas. A partir de los resultados obtenidos en los ACP se seleccionaron grupos reducidos de variables poco correlacionadas tanto de clima como de suelo, que fueron luego usados en la construcción de modelos de regresión lineal múltiple para explicar la variabilidad observada en los rendimientos. La selección de los modelos de regresión de mejor ajuste fue realizada mediante análisis de residuos parciales y vía el procedimiento backward de selección de variables (Draper y Smith, 1998). La capacidad predictiva de cada modelo ajustado fue evaluada en base al error cuadrático medio de predicción (expresado como porcentaje del rendimiento promedio observado). Los análisis fueron realizados con el software estadístico InfoStat/P (InfoStat, 2008).

## CAPITULO III

### RESULTADOS

El análisis de la varianza realizado a partir de la base de datos II, mostró que el efecto del ambiente explicó un 74, 61, 82 y 62% de la variación del rendimiento en las campañas 2001/02, 2002/03, 2003/04 y 2004/05, respectivamente. El ambiente fue el factor principal de variación de los rendimientos (Cuadro III), no obstante las variaciones entre los genotipos y la interacción G x A resultaron también significativas en cada una de las cuatro campañas analizadas.

**Cuadro III.** Efectos (en porcentaje) del ambiente, genotipo e interacción sobre la variación en rendimientos de soja bajo siembra directa en el Sur de Santa Fe, Argentina.

Campaña	Ambiente	Genotipo	G x A
2001/02	74	15	11
2002/03	61	13	26
2003/04	82	9	9
2004/05	62	18	20

Dado que el porcentaje de variabilidad total explicado por el genotipo fue menor que el explicado por variaciones ambientales, la organización de la información de las variables registradas en la base de datos I en función de “ambientes”, definidos como la combinación de una campaña, localidad y cultivar, se consideró adecuada.

En los Cuadros IV, V y VI se presentan los valores promedios, máximos y mínimos de las variables registradas de suelo, clima y cultivo, respectivamente;

estas medidas de resumen fueron obtenidas según los valores asumidos por estas variables a través de todos los casos de estudio. Para todas las variables de suelo se observan rangos amplios de variación, sugiriendo que los lotes que intervinieron en este estudio presentan diferentes condiciones físico-químicas. Los valores mínimos iguales a cero para Md y Pi muestran que no todos los lotes presentaron problemas de impedancias físicas.

**Cuadro IV.** Valores promedios y rangos de variación de variables edáficas en ambientes del Sur de Santa Fe, Argentina.

VARIABLES	Abreviatura	Unidad	Promedio	Mínimo	Máximo
Agua útil inicial *	AUI	mm	256	127	382
Materia orgánica	MO	%	3,03	2,23	3,55
Profundidad al horizonte B2t	PrB2t	cm	25	14	34
Estados masivos delta	Md	%	21	0	57
Pisos compactados	Pi	%	54	0	93
Cond. hidráulica saturada.	Ksat	cm seg <sup>-1</sup>	67 x 10 <sup>-4</sup>	26 x 10 <sup>-4</sup>	15 x 10 <sup>-3</sup>

\*perfil 0-200 cm

Ambiente: combinación de campaña agrícola, lote y cultivar. Campañas 2001/02 a 2004/05; cultivares DM 4800 (GM IV), A 5520 (GM V) y A 6040 (GM VI).

En la mayoría de las variables climáticas también se observa un rango amplio de valores, especialmente respecto a precipitaciones y a radiación global acumulada. Las lluvias acumuladas durante el ciclo del cultivo presentaron valores desde 264 mm hasta 831 mm, lo que sugiere que hubo ambientes con deficiencia hídrica, mientras que en otros el aporte de agua fue adecuado. Estos rangos de

variación expresan la importante variabilidad propia del clima de la región pampeana Argentina (Hall *et al.*, 1992).

**Cuadro V.** Valores promedios y rangos de variación de variables climáticas en distintos subperíodos del cultivo de soja en ambientes del Sur de Santa Fe, Argentina.

Variable	Abreviatura	Unidad	Promedio	Mínimo	Máximo
Radiación global acumulada E-R2	Rs <sub>1</sub>	MJ m <sup>-2</sup>	1.065	655	1.493
Radiación global acumulada R2-R5	Rs <sub>2</sub>	MJ m <sup>-2</sup>	831	549	1.183
Radiación global acumulada R5-R7	Rs <sub>3</sub>	MJ m <sup>-2</sup>	779	570	1.362
Temperatura media diaria E-R2	Tm <sub>1</sub>	°C	23,3	20,3	25,6
Temperatura media diaria R2-R5	Tm <sub>2</sub>	°C	24,6	22,9	26,3
Temperatura media diaria R5-R7	Tm <sub>3</sub>	°C	23,4	20,2	25,9
Fotoperíodo medio E-R2	Fot <sub>1</sub>	hs	15,1	14,4	15,2
Fotoperíodo medio R2-R5	Fot <sub>2</sub>	hs	14,7	14,2	15,2
Fotoperíodo medio R5-R7	Fot <sub>3</sub>	hs	13,6	12,9	14,6
Precipitaciones acumuladas E-R2	pp <sub>1</sub>	mm	220	60	421
Precipitaciones acumuladas R2-R5	pp <sub>2</sub>	mm	130	8	253
Precipitaciones acumuladas R5-R7	pp <sub>3</sub>	mm	177	9	412
Precipitaciones acumuladas R2-R7	pp <sub>2+3</sub>	mm	307	107	532
Precipitaciones acumuladas E-R7	pp <sub>ciclo</sub>	mm	527	264	831

E: emergencia; R2: plena floración; R5: inicio del llenado de granos; R7: madurez fisiológica. Ambiente: combinación de campaña agrícola, lote y cultivar. Campañas 2001/02 a 2004/05; cultivares DM 4800 (GM IV), A 5520 (GM V) y A 6040 (GM VI).

Respecto a las variables de cultivo (Cuadro VI), el rendimiento logrado en los diferentes ambientes osciló entre 2.060 y 4.580 kg ha<sup>-1</sup>, siendo el número de granos por m<sup>2</sup> el componente del rendimiento que más variación mostró. Otros trabajos ya han citado que éste es el componente más variable (Andrade, 1995; Quijano *et al.*, 1996; Egli, 1998; Quijano *et al.*, 1998). La variabilidad observada en rendimiento y

en otras variables de cultivo se interpreta como una consecuencia de las variabilidades antes mencionadas tanto para clima como para suelo.

**Cuadro VI.** Valores promedios y rangos de variación de variables de cultivo de soja en ambientes del Sur de Santa Fe, Argentina.

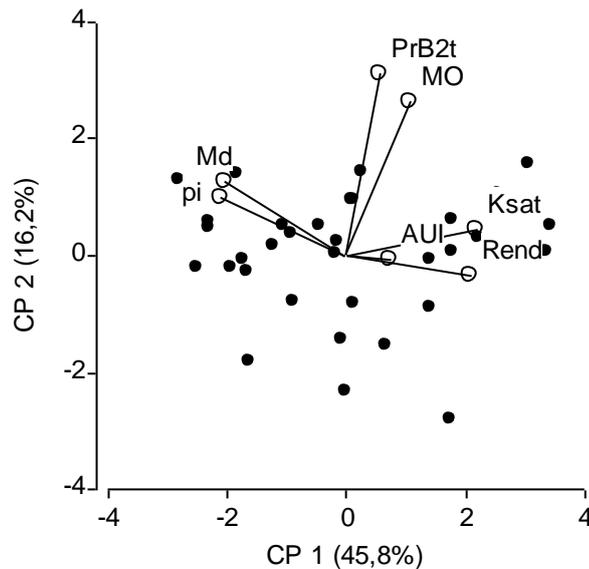
Variables	Abreviatura	Unidad	Media	Mínimo	Máximo
Cobertura de cultivo en R2	IR2	%	85	36	99
Cobertura de cultivo en R5	IR5	%	96	60	99
Rendimiento	Rend	kg ha <sup>-1</sup>	3.372	2.060	4.580
Peso unitario de granos	PG	mg	153	114	183
Número de granos	NG	granos m <sup>-2</sup>	2.210	1.345	3.011

R2: plena floración; R5: inicio del llenado de granos.

Ambiente: combinación de campaña agrícola, lote y cultivar. Campañas 2001/02 a 2004/05; cultivares DM 4800 (GM IV), A 5520 (GM V) y A 6040 (GM VI).

El análisis del plano de las dos primeras componentes principales del ACP que involucró variables de suelo y rendimiento explicó el 62% de la variación total (Figura 4), sugiriendo una asociación negativa del rendimiento con el porcentaje de estados masivos delta (Md) y con el porcentaje de pisos compactados (Pi), mientras que emerge una correlación positiva del rendimiento respecto a la conductividad hidráulica (Ksat) y al contenido de agua útil inicial (AUI) (i.e. mayores valores de Ksat y AUI se asociaron con mayores rindes). La Figura 4 también pone en evidencia la alta correlación negativa de Ksat con Md y Pi, sugiriendo que la inclusión de todas estas variables en un mismo modelo explicativo sería redundante y por tanto existe la posibilidad de evaluar modelos explicativos alternativos construidos a partir de

unas u otras, pero no todas estas variables simultáneamente. Los contenidos de MO y la profundidad al B2t generan variabilidad entre las observaciones, aunque esta variabilidad es de menor importancia (se manifiestan sobre la segunda componente principal) que la ocasionada por diferencias en Ksat o en compactación del suelo (manifestadas sobre la primera componente principal).

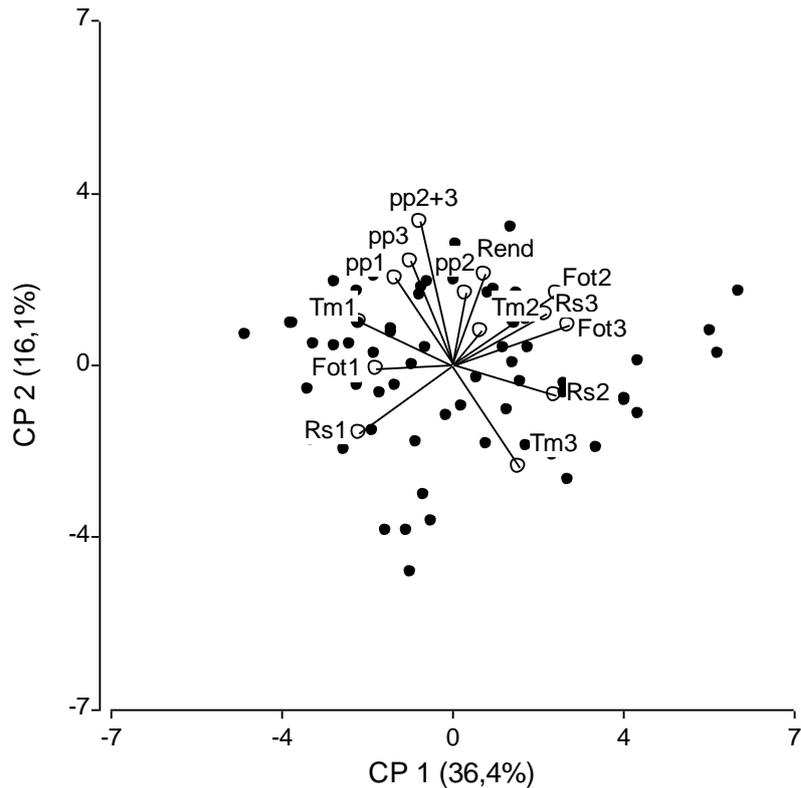


**Figura 4.** Biplot del análisis de componentes principales de variables de suelo y rendimiento (círculos vacíos) en ambientes de cultivo de soja (círculos llenos) en el Sur de Santa Fe, Argentina.

En el ACP involucrando rendimiento y variables de clima (Figura 5) el porcentaje de variabilidad explicado por las dos primeras componentes principales fue 52,2 %, sin embargo la calidad de la representación fue buena (coeficiente de correlación cofenética = 0,90).

El biplot correspondiente muestra una importante variación de las observaciones respecto a Temperatura media y Radiación Solar. Las precipitaciones acumuladas en todo el periodo reproductivo ( $pp_{2+3}$ ) también marcan diferencias pero

a nivel de la segunda componente. El rendimiento se mostró asociado con temperaturas, radiaciones y fotoperíodos de los periodos ontogénicos 2 y 3, más que 1 y con mayores precipitaciones en el periodo que comprende los estados 2 a 3. Como es de esperar las temperaturas, radiaciones y fotoperíodos estuvieron correlacionadas dentro de cada periodo.



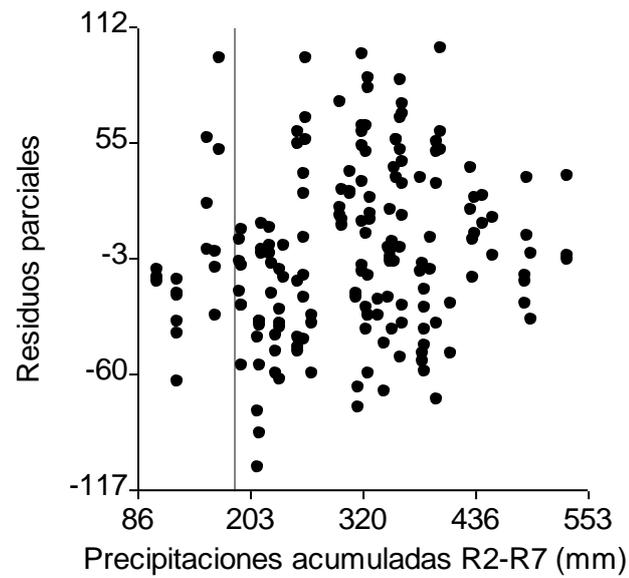
**Figura 5.** Biplot del análisis de componentes principales de variables de clima y rendimiento (círculos vacíos) en ambientes de cultivo de soja (círculos llenos) en el Sur de Santa Fe, Argentina.

A partir de los resultados observados en los ACP, donde emergen claras correlaciones entre las variables, se decidió ajustar modelos de regresión independientes, cada uno basado en grupos de variables predictoras poco correlacionadas. El primer modelo se ajustó incluyendo las variables Md, MO, AUI,

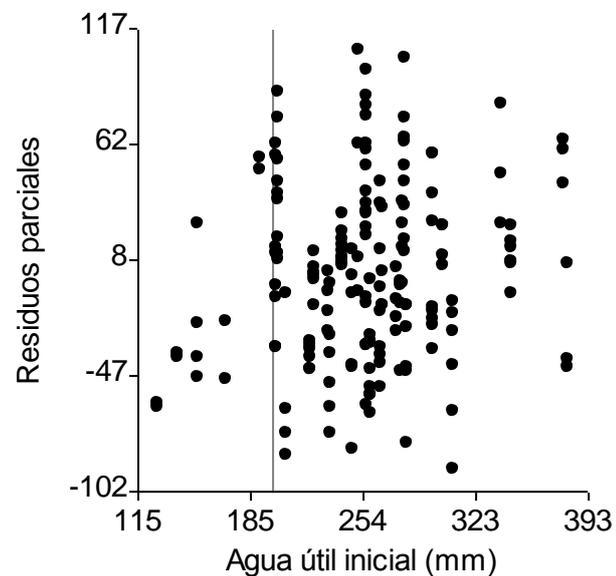
$Tm_2$ ,  $Rs_3$  y  $pp_{2+3}$ . Alternativamente se probaron modelos con  $Pi$  ó  $Ksat$  en lugar de  $Md$  y se fueron alternando a la vez  $Rs_2$ ,  $Tm_3$ ,  $Fot_2$  y  $Fot_3$  por  $Tm_2$  y  $Rs_3$ .

Para cada regresión lineal múltiple, se obtuvieron los residuos parciales de rendimiento y se graficaron respecto a cada una de las variables predictoras intervinientes. La existencia de una relación lineal entre los residuos parciales respecto a una predictora fue interpretada como un indicio de que tal predictora podría ser una componente útil en el modelo, mientras que la presencia de patrones de dispersión aleatorios en gráficas de residuos parciales se entendió como un indicador de la imposibilidad de una variable de explicar más allá de lo que ya explicaron las otras variables incluidas en el modelo (Draper y Smith, 1998).

Al ajustar el primer modelo, la relación entre los residuos parciales del rendimiento y las precipitaciones acumuladas en el período reproductivo indicó comportamientos diferenciados si el valor de  $pp_{2+3}$  es menor o mayor a 180 mm. Hasta este umbral de 180 mm pareciera existir una respuesta, mientras que luego la dispersión de los puntos es más bien aleatoria, es decir el rendimiento no responde a la predictora (Figura 6). Por otro lado la relación entre los residuos parciales del rendimiento y el AUI también señaló comportamientos diferenciados si el AUI es menor o mayor a 200 mm (Figura 7). El resto de las variables predictoras intervinientes no mostraron un comportamiento diferencial (un cambio en la relación lineal) en el dominio de los valores registrados. Iguales resultados fueron observados con los modelos alternativos.



**Figura 6.** Relación entre los residuos parciales del rendimiento y las precipitaciones acumuladas en el período reproductivo y las precipitaciones acumuladas en el periodo reproductivo del cultivo de soja en el sur de Santa Fe.



**Figura 7.** Relación entre los residuos parciales del rendimiento y agua útil inicial hasta los 2 m de profundidad y el agua útil inicial en el cultivo de soja en el sur de Santa Fe.

Dado que para  $pp_{2+3} \leq 180$  mm se visualizó una relación lineal positiva entre el rendimiento y las precipitaciones acumuladas, que no se observó cuando los valores de  $pp_{2+3}$  superaron los 180 mm (Figura 6), se ajustaron modelos de regresión independientes para ambientes con  $pp_{2+3} \leq 180$  mm (i) y para ambientes con  $pp_{2+3} > 180$  mm (ii).

También se ajustaron modelos de regresión diferentes para casos con  $AUI \leq 200$  mm (iii) donde se observó una relación lineal positiva del rendimiento con el agua disponible que para ambientes con  $AUI > 200$  mm (iv).

#### **i) Ambientes con $pp_{2+3} \leq 180$ mm**

Para estos ambientes el mejor modelo de regresión obtenido ( $R^2 = 0,88$ ) incluyó sólo dos variables explicativas:  $pp_{2+3}$  y  $Md$ , siendo la primera la de mayor peso en el modelo de acuerdo al estadístico  $C_p$  de Mallows (Cuadro VII) (mayores valores de  $C_p$  indican mayor contribución a la explicación del fenómeno en estudio, Draper y Smith, 1998). El modelo de rendimiento ajustado se presenta en la ecuación (eq) 1. La variabilidad de los rendimientos en estos ambientes se puede predecir con un error de  $285 \text{ kg ha}^{-1}$  que representa una predicción errada en  $\pm 9\%$  del rendimiento medio.

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = 892 - 14 \times Md + 19 \times pp_{2+3} \quad (\text{eq. 1})$$

**Cuadro VII.** Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación 1 para predecir rendimiento de soja en función de variables de clima y suelo en el Sur de Santa Fe, Argentina.

	Coeficiente Estimado	valor-p	Cp de Mallows
Constante	892,37	0,0627	
Md	-14,28	0,0036	13,46
pp <sub>2+3</sub>	19,11	<0,0001	54,06

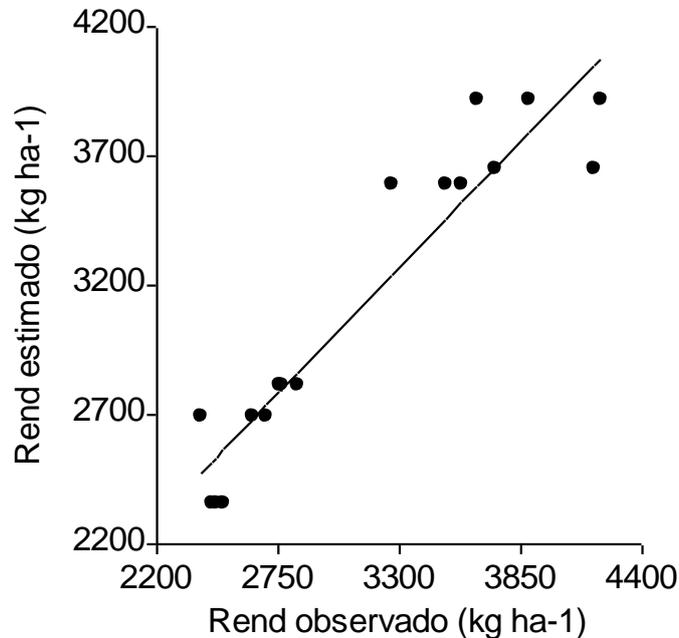
El modelo ajustado indica que ambientes con mayores precipitaciones en el periodo reproductivo y con menor presencia de bloques masivos delta fueron los que produjeron los mayores rendimientos. En este grupo de ambientes, el rendimiento y las variables incluidas en la ecuación 1 presentaron los valores que se observan en el Cuadro VIII.

**Cuadro VIII.** Rendimiento y variables con capacidad predictiva en ambientes con precipitaciones en el período reproductivo (pp<sub>2+3</sub>) de la soja  $\leq 180$  mm (n=17).

Variable	Promedio	Mínimo	Máximo
Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	3.153	2.400	4.220
pp <sub>2+3</sub> (mm)	141	107	171
Md (%)	31	0	44

El modelo dado en la eq.1 se generó con un número de casos relativamente bajo (n=17). Sin embargo, el amplio rango encontrado en los valores de las variables predictoras (Md y pp<sub>2+3</sub>) se reflejó en una elevada variabilidad en el rendimiento del

cultivo, que derivó en un buen ajuste. En la Figura 8 se observa la estrecha relación entre los rendimientos estimados por la ecuación 1 versus los rendimientos observados en ambientes con  $pp_{2+3} \leq 180\text{mm}$ .



**Figura 8.** Rendimiento estimado por la ecuación 1 vs. observado en ambientes de  $pp_{2+3} \leq 180\text{ mm}$  ( $R^2 = 0,89$ ).

### ii) Ambientes con $pp_{2+3} > 180\text{ mm}$

Para estos ambientes el mejor modelo de regresión obtenido ( $R^2 = 0,48$ ) incluyó como variables predictoras a  $Tm_2$ ,  $Rs_3$ ,  $MO$  y  $Md$ , siendo esta última la de mayor peso en el modelo (Cuadro IX). El modelo de rendimiento ajustado se presenta en la eq. 2. La variabilidad de los rendimientos en estos ambientes se puede predecir con un error de  $453\text{ kg ha}^{-1}$  que representa una predicción errada en  $\pm 13\%$  del rendimiento medio.

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = -4320 + 435 \times MO - 21 \times Md + 244 \times Tm_2 + 1,03 \times Rs_3$$

(eq. 2)

**Cuadro IX.** Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación 2 para predecir rendimiento de soja en función de variables de clima y suelo en el Sur de Santa Fe, Argentina.

	Coeficiente Estimado	Valor-p	Cp de Mallows
Constante	-4320,14	0,0003	
MO	434,91	<0,0001	25,93
Md	-20,99	<0,0001	75,29
Tm <sub>2</sub>	244,04	<0,0001	33,74
Rs <sub>3</sub>	1,03	0,0001	19,94

Ambientes con mayor Tm<sub>2</sub>, Rs<sub>3</sub> y MO y menor Md fueron los que produjeron los mayores rendimientos cuando las precipitaciones en el periodo reproductivo fueron mayores a 180 mm.

Un análisis donde se sustituyó la variable Md por Ksat dio lugar a un modelo alternativo (eq. 3) con un ajuste ligeramente menor. Las restantes variables predictoras resultantes fueron las mismas que aquellas que integran el modelo 2, siendo Ksat la de mayor peso en el modelo (Cuadro X). La variabilidad de los rendimientos en estos ambientes se puede predecir con un error de 493 kg ha<sup>-1</sup> que representa una predicción errada en ± 14% del rendimiento medio.

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = -5491 + 332 \times \text{MO} + 985276 \times \text{Ksat} + 266 \times \text{Tm}_2 + 0,86 \times \text{Rs}_3$$

(eq. 3)

**Cuadro X.** Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación 3 para predecir rendimiento de soja en función de variables de clima y suelo en el Sur de Santa Fe, Argentina.

	Coeficiente Estimado	Valor-p	Cp de Mallows
Constante	-5491,45	<0,0001	
MO	331,61	0,0020	13,85
Ksat	985.276,22	<0,0001	41,66
Tm <sub>2</sub>	266,27	<0,0001	33,56
Rs <sub>3</sub>	0,86	0,0023	13,56

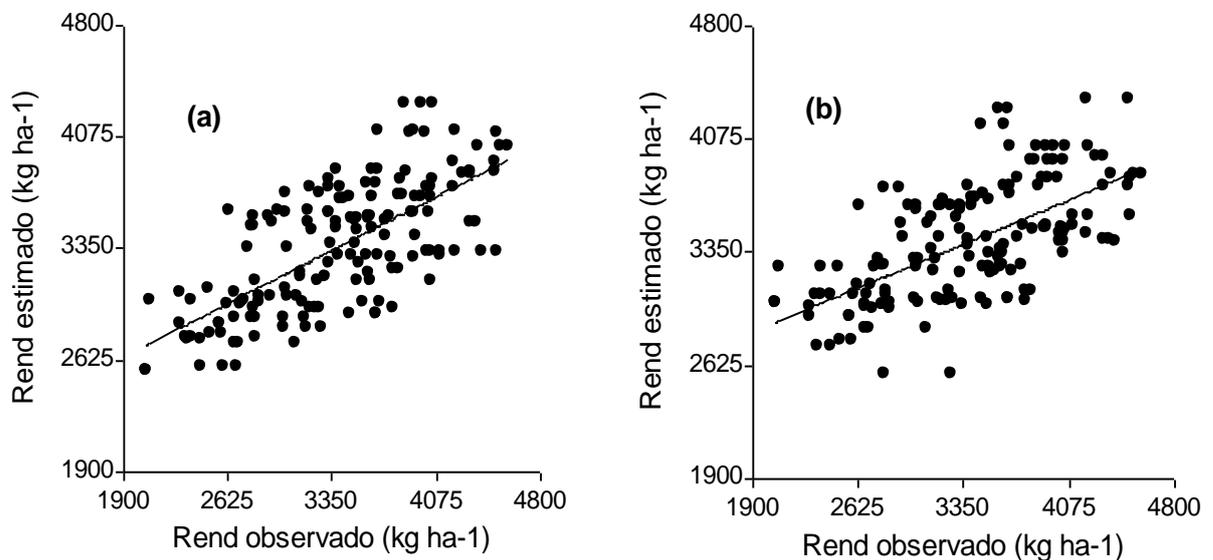
El Modelo 3 sugiere que ambientes con mayor Tm<sub>2</sub>, Rs<sub>3</sub>, MO y Ksat producirán mayores rindes cuando las precipitaciones en el período reproductivo superan los 180 mm.

En este grupo de ambientes, el rendimiento y las variables incluidas en las ecuaciones 2 y 3 presentaron los valores que se observan en el Cuadro XI.

**Cuadro XI.** Rendimiento y variables con capacidad predictiva en ambientes con precipitaciones en el período reproductivo de la soja > 180 mm (n=158).

Variable	Promedio	Mínimo	Máximo
Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	3.396	2.060	4.580
MO (%)	3,03	2,23	3,55
Md (%)	20	0	54
Ksat (cm seg <sup>-1</sup> )	67 × 10 <sup>-4</sup>	26 × 10 <sup>-4</sup>	15 × 10 <sup>-3</sup>
Tm <sub>2</sub> (°C)	24,6	22,9	26,3
Rs <sub>3</sub> (MJ m <sup>-2</sup> )	784	570	1.362

El amplio rango encontrado en los valores de las variables predictoras ( $M_0$ ,  $M_d$ ,  $K_{sat}$ ,  $T_{m_2}$  y  $R_{s_3}$ ) se reflejó, de manera similar con lo ocurrido en la ecuación 1, en una elevada variabilidad de los rendimientos del cultivo, que fueron predichos con un bajo error por ambos modelos alternativos. Esto se puede visualizar en las Figuras 9a y 9b donde se observa la relación entre los rendimientos estimados por las ecuaciones 2 y 3 (Figuras 9a y 9b, respectivamente) versus los rendimientos observados en los ambientes de  $pp_{2+3} > 180$  mm.



**Figura 9.** (a) Rendimiento estimado por la ecuación 2 vs. observado ( $R^2 = 0,48$ ). (b) Rendimiento estimado por la ecuación 3 vs. observado ( $R^2 = 0,39$ ), en ambientes con  $pp_{2+3} > 180$  mm.

### iii) Ambientes con $AUI \leq 200$ mm

Para estos ambientes el mejor modelo de regresión obtenido ( $R^2 = 0,72$ ) incluyó sólo  $K_{sat}$  (Cuadro XII). El modelo de rendimiento ajustado se presenta en la eq. 4. La variabilidad de los rendimientos en estos ambientes se puede predecir con

un error de 378 kg ha<sup>-1</sup>, que representa una predicción errada en  $\pm 12\%$  del rendimiento medio.

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = 2003 + 2331982 \times \text{Ksat} \quad (\text{eq. 4})$$

**Cuadro XII.** Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación 4 para predecir rendimiento de soja en función de variables de clima y suelo en el Sur de Santa Fe, Argentina.

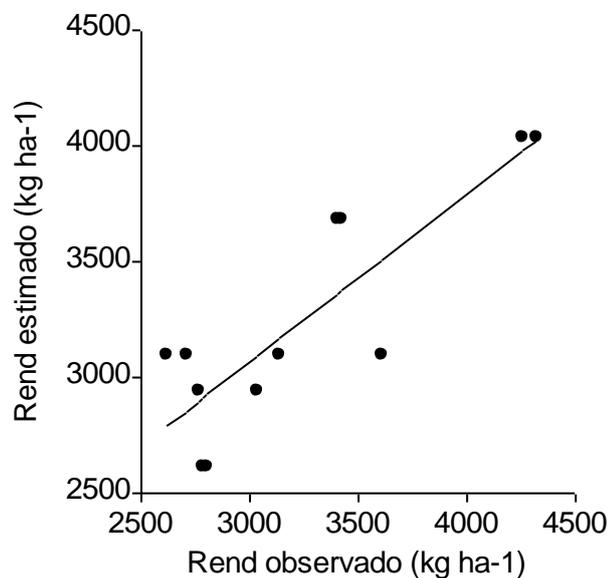
	Coeficiente Estimado	Valor-p	Cp de Mallows
Constante	2002,66	<0,0001	
Ksat	2.331.981,77	0,0004	25,02

Los ambientes con mayor Ksat fueron los que produjeron los mayores rendimientos cuando iniciaron el ciclo del cultivo con baja reserva de agua útil en su perfil de suelo. En este grupo de ambientes, el rendimiento y Ksat variaron entre los valores que se observan en el Cuadro XIII.

**Cuadro XIII.** Rendimiento y variables con capacidad predictiva en ambientes con AUI < 200 mm (n= 12).

Variable	Promedio	Mínimo	Máximo
Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	3.242	2.620	4.320
Ksat (cm seg <sup>-1</sup> )	53 × 10 <sup>-4</sup>	26 × 10 <sup>-4</sup>	87 × 10 <sup>-4</sup>

El modelo dado en la ecuación 4, al igual que el de la eq. 1, se generó con un número de casos relativamente bajo ( $n=12$ ). Sin embargo, el amplio rango encontrado en los valores de la variable predictora ( $K_{sat}$ ) se reflejó en una elevada variabilidad en el rendimiento del cultivo, que derivó en un bajo error de predicción del modelo. Esto se puede visualizar en la Figura 10 donde se observa una estrecha relación entre los rendimientos estimados por la ecuación 4 versus los rendimientos observados en ambientes con  $AUI \leq 200$  mm.



**Figura 10.** Rendimiento estimado por la ecuación 4 vs. observado en ambientes de  $AUI \leq 200$  mm ( $R^2 = 0,72$ ).

#### iv) Ambientes con $AUI > 200$ mm

Para estos ambientes el mejor modelo de regresión obtenido ( $R^2 = 0,51$ ) incluyó las variables  $Tm_2$ ,  $Rs_3$ ,  $MO$  y  $Md$ , siendo esta última la de mayor peso en el modelo (Cuadro XIV). El modelo de rendimiento ajustado se presenta en la eq. 5. La variabilidad de los rendimientos en estos ambientes se puede predecir con un error

de 443 kg ha<sup>-1</sup>, que representa una predicción errada en ± 13% del rendimiento medio.

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = -4581 + 423 \times \text{MO} - 22 \times \text{Md} + 252 \times \text{Tm}_2 + 1,21 \times \text{Rs}_3 \quad (\text{eq. 5})$$

**Cuadro XIV.** Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la ecuación 5 para predecir rendimiento de soja en función de variables de clima y suelo en el Sur de Santa Fe, Argentina.

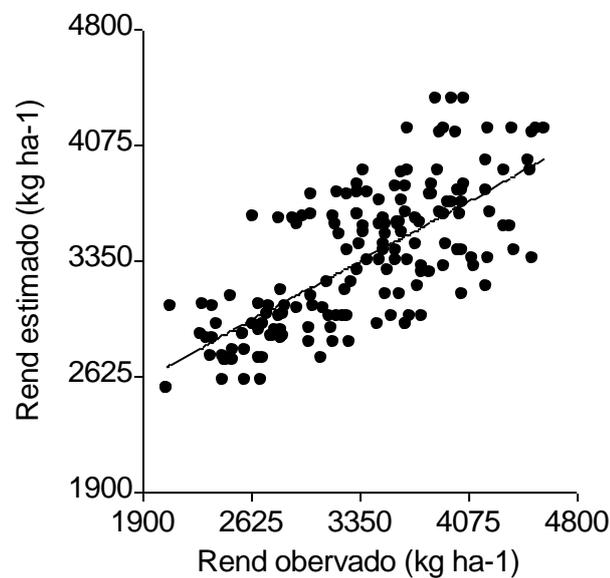
	Coeficiente Estimado	Valor-p	Cp de Mallows
Constante	-4580,58	0,0001	
MO	423,36	<0,0001	27,22
Md	-21,80	<0,0001	97,42
Tm <sub>2</sub>	251,67	<0,0001	38,24
Rs <sub>3</sub>	1,21	0,0001	25,47

Ambientes con mayor Tm<sub>2</sub>, Rs<sub>3</sub>, MO y menor Md fueron los que produjeron los mayores rendimientos cuando el cultivo inició su ciclo con AUI > 200 mm. En este grupo de ambientes, los valores de rendimiento y las variables incluidas en la ecuación 5 presentaron una amplitud que se observa en el Cuadro XV.

El amplio rango encontrado en los valores de las variables predictoras (MO, Md, Tm<sub>2</sub> y Rs<sub>3</sub>) se reflejó, de manera similar a lo ocurrido en las ecuaciones 2 y 3, en una elevada variabilidad del rendimiento del cultivo que derivó en un bajo error de predicción de los modelos. Esto se reflejó en la Figura 11 donde se observa la buena relación entre los rendimientos estimados por la ecuación 5 versus los rendimientos observados en los ambientes con AUI > 200 mm.

**Cuadro XV.** Rendimiento y variables con capacidad predictiva en ambientes con AUI > 200 mm (n= 163).

Variable	Promedio	Mínimo	Máximo
Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	3.382	2.060	4.580
MO (%)	3,04	2,23	3,55
Md (%)	21	0	54
Tm <sub>2</sub> (°C)	24,6	22,9	26,3
Rs <sub>3</sub> (MJ m <sup>-2</sup> )	769	570	1.362

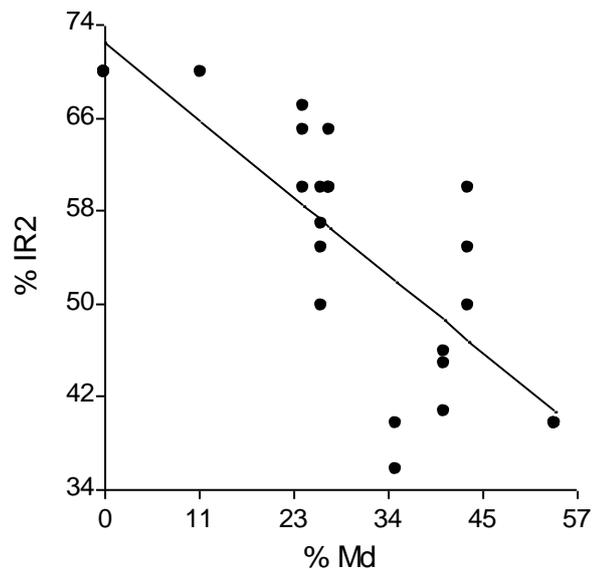


**Figura 11.** Rendimiento estimado por la ecuación 5 vs. observado en ambientes de AUI > 200 mm ( $R^2 = 0,51$ ).

### **Correlación entre variables de cultivo con variables edáficas y meteorológicas.**

En la mayoría de los modelos ajustados la variable Md tuvo un peso importante en la explicación de la variación del rendimiento. Según Tardieu y Manichon (1987) y Tardieu (1988) las impedancias físicas pueden reducir la tasa de crecimiento aéreo de la planta en etapas tempranas del cultivo. Esto indujo a

analizar en los casos en que el cultivo no había superado el 75% de cobertura del canopeo en plena floración (R2), la relación entre ésta (IR2) y las impedancias físicas del suelo (Md). Se observó una correlación negativa entre ambas variables,  $r = -0,81$  (Figura 12).

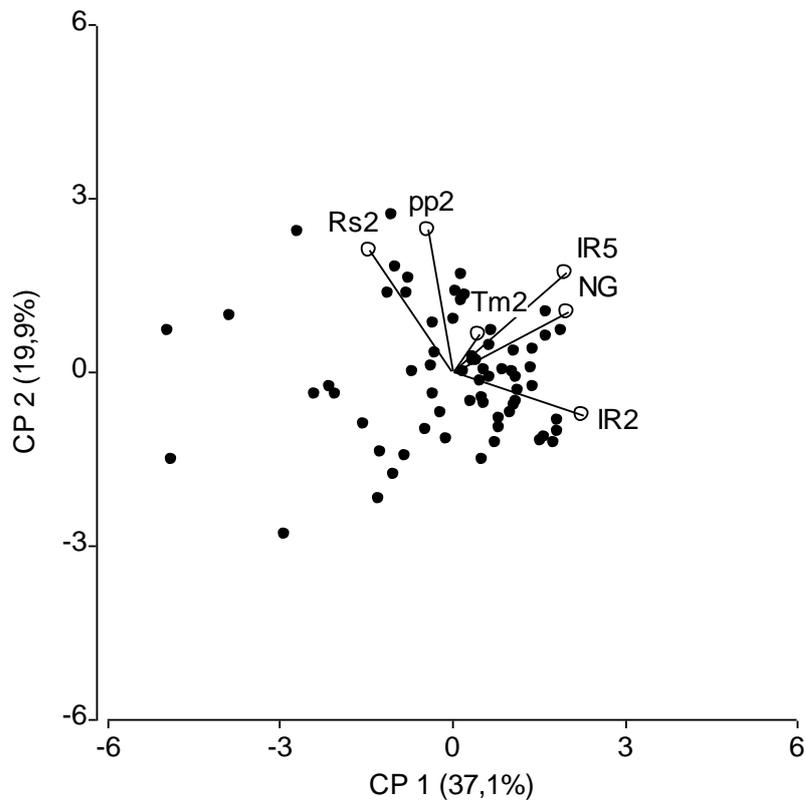


**Figura 12.** Correlación entre el % de cobertura del cultivo de soja en R2 (IR2) e impedancias físicas en el suelo (Md), en ambientes del Sur de Santa Fe, Argentina ( $r = -0,81$ ).

Por otro lado, en los casos incluidos en las ecuaciones 2, 3 y 5, donde la disponibilidad de agua fue menos limitante ( $pp_{2+3}$  o AUI por encima de un determinado nivel), factores climáticos tales como temperatura y radiación solar acumulada explicaron parte de la variabilidad del rendimiento. Esto indujo a analizar las relaciones entre variables climáticas y los componentes de rendimiento de la soja. En consecuencia se realizaron dos ACP. El primero de ellos incluyó el número de granos y variables que pudieran influir en este componente del rendimiento, que corresponden al subperíodo de fijación de granos (Figura 13). El segundo incluyó el

peso de granos y variables relacionadas, que pertenecen al subperíodo de llenado de granos (Figura 14).

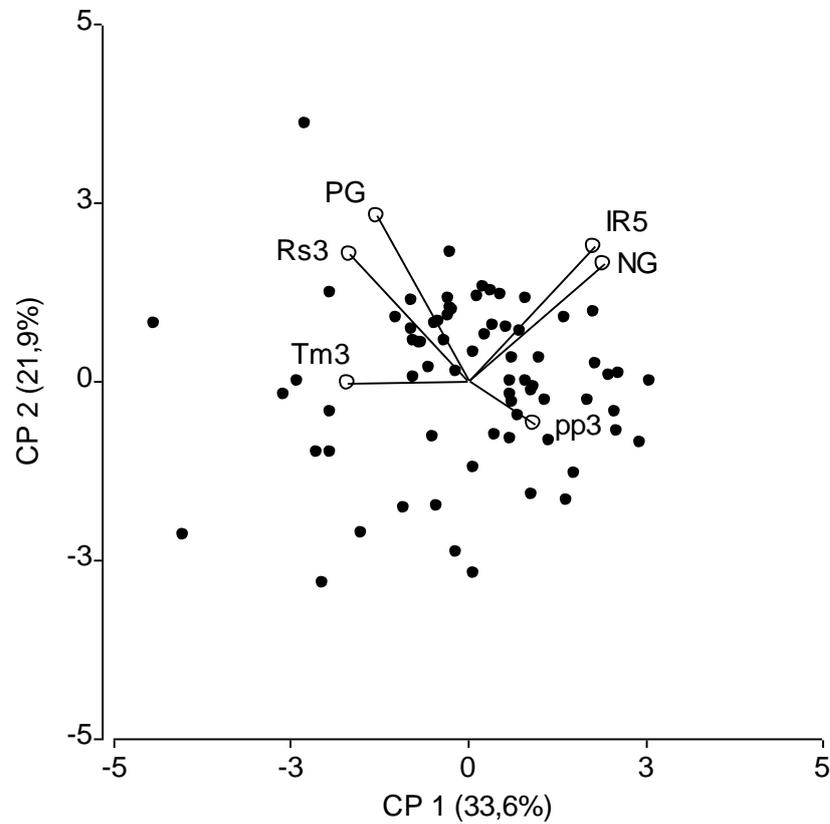
En el biplot de la Figura 13 se observa que el número de granos  $m^{-2}$  estuvo más asociado a la cobertura lograda por el cultivo en R5 (IR5), que en R2 (IR2) y a la temperatura media en el subperíodo 2 que a la radiación solar o a las precipitaciones.



**Figura 13.** Biplot del análisis de componentes principales de variables de clima y cultivo (círculos vacíos) en el período de fijación de granos (R2-R5) en ambientes de cultivo de soja (círculos llenos) en el Sur de Santa Fe, Argentina.

Cuando se correlacionaron las variables climáticas y de cultivo registradas durante el subperíodo 3 (R5-R7), se mantuvo la relación entre NG e IR5. También se visualizó una asociación positiva entre el peso de los granos y la radiación solar

acumulada en dicho subperíodo, pero negativa con las  $pp_3$ , lo que podría atribuirse a la disminución de radiación solar en períodos con mayores precipitaciones (Figura 14).



**Figura 14.** Biplot del análisis de componentes principales de variables de clima y cultivo (círculos vacíos) en el período de llenado de granos (R5-R7) en ambientes de cultivo de soja (círculos llenos) en el Sur de Santa Fe, Argentina.

## CAPÍTULO IV

### DISCUSIÓN

En este trabajo se ponen en evidencia que las variaciones en el rendimiento de la soja en siembra directa, en los diferentes ambientes del Sur de Santa Fe, pueden ser explicadas por variables de suelo como Md, ksat y contenido de MO y por variables de clima tales como precipitaciones, temperatura y radiación acumulada. Las primeras son factibles de registrar previo a la siembra de un cultivo y si bien las climáticas no se pueden disponer previamente, sí es factible usar registros históricos de las mismas para simular escenarios o realizar pronósticos para una determinada campaña agrícola. Variables tales como la  $pp_{2+3}$  y el AUI son buenas predictoras del rendimiento cuando la disponibilidad de agua para el cultivo es relativamente baja ( $pp_{2+3} < 180$ ,  $AUI < 200\text{mm}$ ). Por su parte, la temperatura media en el subperíodo R2-R5 y la radiación acumulada en R5-R7 comienzan a tener peso en la explicación de la variación del rendimiento sólo después que se han superado determinados niveles hídricos.

Los resultados obtenidos sugieren mayor capacidad predictiva del rendimiento de soja en ambientes de menor disponibilidad hídrica que en aquellos que presentan mayor humedad. Estos resultados coinciden con los obtenidos en un trabajo similar realizado por Yang *et al.* (2003), quienes observaron que el índice de productividad que utilizaron para la estimación del rendimiento fue más preciso en ciclos relativamente secos. Ellos sostienen que la variabilidad que provoca la mayor humedad en algunas propiedades edáficas puede disminuir la capacidad de predicción de los modelos. Otros factores edáficos y climáticos comienzan a

interactuar en ciclos más húmedos, tales como la aireación, la temperatura y la radiación solar.

Los mayores rendimientos, tanto para los casos de menor como de mayor disponibilidad hídrica, se produjeron en los ambientes que presentaron mejores condiciones físicas de suelo, reflejadas en un mayor contenido de materia orgánica en el horizonte superior, mayor conductividad hidráulica saturada y menor presencia de estados masivos delta en el perfil. Esto indicaría que las impedancias edáficas afectan no sólo la incorporación de agua al perfil, sino también el crecimiento y funcionamiento de las raíces del cultivo, la disponibilidad de nutrientes, la aireación y difusión de gases y la formación y crecimiento de nódulos, como es citado por otros autores (Lipiec *et al.*, 2003).

La presencia de zonas sueltas, grietas o canales, construidos por la mesofauna en una capa compactada, puede tener un efecto muy importante en la penetración de las raíces, pero un efecto limitado en los valores promedio de variables físicas de suelo indicadoras de esa compactación. Por lo que variables simples como densidad aparente o resistencia a la penetración, tomadas aisladamente, podrían ser insuficientes para una buena caracterización de la estructura del suelo (Tardieu, 1994). La variable edáfica Md, registrada en este trabajo, tiene en cuenta la discontinuidad de las impedancias que es un factor importante en la distribución de las raíces en el perfil (Lipiec *et al.*, 2003).

Según Tardieu (1994), un aspecto importante a tener en cuenta en las observaciones a campo es el de evaluar el efecto de zonas compactas sobre el crecimiento y características de todo el sistema radical, más que predecir sólo el comportamiento de las raíces directamente afectadas por las impedancias. Esto se

denomina “efecto sombra” y ha sido demostrado en Argiudoles del sur de Santa Fe, que disminuye la tasa de absorción de agua por las raíces no sólo en el horizonte con impedancia, sino también en los que están a mayor profundidad (Dardanelli *et al.*, 2003).

Taboada y Micucci (2002) observaron que las alteraciones que sufren las plantas en el crecimiento de la raíz y su proliferación dentro del perfil del suelo debido a impedancias mecánicas afectan la absorción de agua y nutrientes. En relación con la absorción de agua, la respuesta a la impedancia mecánica no es uniforme. En un año seco las raíces no pueden atravesar las capas compactas debido a la elevada resistencia que ofrecen, lo que restringe la exploración de capas más profundas de donde podrían extraer agua (Andriani, 2000a). En años muy húmedos, las capas compactadas ofrecen menor resistencia a la penetración y las raíces logran atravesarlas. Paradójicamente puede haber reducción en la absorción de agua por insuficiente aireación. Ésta es causada por la ausencia de macroporos en las zonas densificadas, estando los microporos ocupados con agua (Boone *et al.*, 1986; Taboada y Micucci, 2002).

En lo que respecta a la absorción de nutrientes, Taboada y Micucci (2002) encontraron que la misma es usualmente reducida por la compactación, especialmente en el caso de los nutrientes poco móviles como el fósforo. Hanson *et al.* (1999) observaron que la capacidad predictiva de un modelo para simular el movimiento del agua y nutrientes en el suelo mejora incorporando parámetros físicos e hidráulicos, ya que la presencia de capas subsuperficiales compactadas afecta el movimiento de agua y solutos.

La compactación afecta también el crecimiento aéreo del cultivo. Masle y Passioura (1987) demostraron que aumentando la impedancia mecánica, vía compactación, se reduce la tasa de expansión foliar. Boone (1986), Brereton *et al.* (1986) y Wolfe *et al.* (1995) también observaron disminución en el crecimiento de la parte aérea. Estos efectos se explican por la incapacidad de las raíces de abastecer con agua y nutrientes a la planta (Tardieu y Manichon, 1987; Tardieu, 1988; Passioura, 2002). En el presente trabajo se observó una correlación negativa, (Figura 12) entre el canopeo del cultivo en R2 y el porcentaje de bloques masivo delta en el perfil del suelo, sugiriendo que las impedancias físicas edáficas limitaron el crecimiento aéreo en etapas tempranas del cultivo.

Resultados similares encontraron Gerster *et al.* (2002), al observar que menores rendimientos de soja se asociaron con las siguientes características de suelo: presencia de pisos compactados iguales o superiores al 60%, estados masivos delta iguales o mayores a 25% y contenidos de materia orgánica iguales o menores a 2,19%.

Botta *et al.* (2004), Gerster y Bacigaluppo (2004) también encontraron reducciones en el rendimiento de soja de hasta un 39% por efecto negativo de la compactación del suelo provocada por el tránsito de maquinarias. En el mismo trabajo Gerster y Bacigaluppo determinaron que plantas de soja, creciendo en surcos compactados, mostraban en sus raíces 35 % menos de nódulos de *Rhizobium sp.* y eran un 32 % más livianos respecto a los de las plantas que crecieron en surcos no compactados. Taboada y Micucci (2002) observaron resultados similares, con nódulos un 20-30% más pequeños y alrededor de un 36%

más livianos en las zonas densificadas respecto a aquellas sin compactar. Esto puede tener implicancias negativas en la fijación del nitrógeno.

Currie (1984) midió la tasa de difusión de gases tanto en zonas compactadas como sin compactar de un suelo franco arcilloso, encontrando en condiciones de suelo seco reducciones en dicha tasa del orden del 38% en las zonas densificadas respecto a las zonas sin compactar. Pero con suelo húmedo, cercano a capacidad de campo, la reducción de la tasa fue del 82%.

Respecto a la contribución de la conductividad hidráulica saturada como variable explicativa de la variación del rendimiento de la soja, los resultados de este estudio coinciden con los de Nissen *et al.* (2006), quienes observaron que el uso de esta variable mejora y facilita el diagnóstico del estado funcional de un suelo, siendo una forma indirecta de medir su estado estructural. Según Lipiec *et al.* (2003) la conductividad hidráulica es un parámetro muy importante que debería tenerse en cuenta en aquellos modelos donde se simulan las condiciones físicas del suelo para predecir los efectos de la compactación en términos del crecimiento y rendimiento de los cultivos. Con esta variable se registra la estabilidad y continuidad del sistema poroso, importante en la distribución de las raíces en el perfil del suelo. Según Dirksen (1999) la determinación de la conductividad hidráulica "in situ" es un indicador adecuado para condiciones de campo.

Por otra parte, en los ambientes con mayor disponibilidad hídrica ( $pp_{2+3} > 180$  mm ó  $AUI > 200$  mm) se lograron mayores rendimientos del cultivo cuando, además de presentar buenas condiciones físicas de suelo, se registraron mayores  $Tm_2$  y  $Rs_3$ . Calviño *et al.* (2003), evaluando soja de segunda época de siembra, obtuvieron modelos que explicaron el 82% de la variación del rendimiento de soja, siendo la

temperatura media en el período R1-R5 una de las variables explicativas. En un segundo modelo, que explicó el 79% de la variación del rendimiento, la radiación acumulada durante R5-R7 fue una de las variables seleccionadas.

La radiación solar y la temperatura, junto con el agua, son las principales variables agrometeorológicas que regulan los procesos metabólicos de las plantas (Cárcova *et al.*, 2003). Según Canfalone *et al.* (2002) la producción de materia seca en soja puede ser estimada a partir de modelos que relacionan esta variable con la temperatura media del aire y con la sumatoria de radiación incidente.

La producción de materia seca depende de la habilidad de la planta para interceptar la radiación solar y a través del proceso fotosintético transformarla en energía metabólica. La temperatura media diaria en el subperíodo R2-R5 pudo estar asociada a la expansión foliar, como se puede inferir de la observación de la Figura 13. De ésta se desprende que la  $Tm_2$  estuvo asociada positivamente a la cobertura del cultivo en R5, siendo una mayor cobertura un indicador de mayor área foliar, que permite interceptar un porcentaje más elevado de radiación solar.

La mayor cobertura del cultivo en dicho estadio fenológico también estuvo relacionada positivamente con el número de granos. Quijano *et al.* (1999), determinaron que el período crítico para la definición del número de semillas comprende los 20 días anteriores al inicio de R5. Por lo cual, para aumentar el número de semillas, es imprescindible alcanzar máxima interceptación de radiación antes de llegar a dicho período crítico.

El rendimiento de un cultivo es el producto de la materia seca total acumulada y la traslocación de estos asimilados al grano (Cárcova *et al.*, 2003). Numerosos trabajos mostraron una asociación positiva entre la materia seca acumulada

después del inicio del llenado de granos y el rendimiento (Hardman y Brun, 1971; Hayati *et al.*, 1995; Board *et al.*, 1996).

La Figura 14 muestra una estrecha asociación entre la oferta de radiación durante el llenado de los granos y el peso de los mismos. Resultados obtenidos por Andrade (1995) y Egli (1997) demuestran que la disminución de radiación solar (por sombreado) durante el periodo R5-R7 reduce el rendimiento de soja, afectando no sólo el peso unitario de los granos sino también el número de semillas por m<sup>2</sup>. Por su parte Quijano *et al.* (2006) encontraron que los asimilados provenientes de la fotosíntesis durante el subperíodo R5-R7 tiene una alta participación en el llenado de los granos. Esto evidencia la importancia de la radiación solar acumulada en esta etapa del cultivo.

Como corolario a lo discutido se puede afirmar que el presente estudio generó información sobre la **asociación entre la oferta de recursos ambientales tales como las precipitaciones, la radiación solar, la temperatura, en interacción con la conductividad hidráulica, el estado estructural de los horizontes superiores del suelo, el contenido de materia orgánica y el rendimiento de soja en lotes de producción en sistemas de siembra directa en el sur de Santa Fe.**

A partir de estos resultados se cuenta con nuevos conocimientos para i) predecir el comportamiento del cultivo y ii) establecer prácticas de manejo tendientes a reducir las brechas tanto entre rendimiento potencial y real, como su variabilidad espacial e interanual. Esto podría lograrse a partir de la información disponible actualmente respecto al comportamiento y duración de los estadios fenológicos de variedades de soja de distintos grupos de madurez en distintas fechas de siembra, combinada tanto con los registros climáticos de series históricas como con

diagnósticos del estado estructural del suelo. Sería interesante validar los modelos ajustados no sólo con casos de similares características a los evaluados en este trabajo, sino también con datos provenientes de otras zonas con distinto tipo de suelo.

También podrían aplicarse estos resultados en modelos de simulación agronómica donde no es habitual el uso de variables que caractericen el estado estructural del suelo, por ejemplo  $M_d$  ó  $K_{sat}$  y en la formulación de escenarios futuros, simulando situaciones que mejoren o empeoren las condiciones físicas del suelo combinadas con situaciones climáticas diversas.

En futuros trabajos sería recomendable profundizar en el estudio de la MO como variable explicatoria de la variabilidad del rendimiento, determinar qué fracciones de la misma pueden explicar de forma más sensible la variabilidad de éste (mejor ajuste de los modelos), la cantidad de C aportado con distintas alternativas de manejo y el tiempo necesario para observar cambios. Además sería conveniente ajustar las metodologías de determinación de la MO particulada (fraccionamiento químico, físico).

Sería necesario también establecer cuáles son las prácticas de manejo que mejoran la estructura física de los suelos, de tal manera que las mejoras logradas perduren en el tiempo. Si bien se conoce la importancia de la incorporación de gramíneas en la secuencia de cultivos, por el aporte de C de sus rastrojos y por el efecto beneficioso de sus raíces en cabellera, deberían evaluarse diferentes técnicas alternativas: químicas, físicas, biológicas y/o sus combinaciones, para la recuperación sostenible de suelos degradados físicamente.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES

- ✓ El estado estructural de los horizontes superficiales de los suelos, en los ambientes evaluados, fue importante en la explicación de la variabilidad del rendimiento del cultivo.
  
- ✓ Se obtuvieron mayores rendimientos de soja en los ambientes que presentaron mejores condiciones físicas de suelo, reflejadas en una alta conductividad hidráulica saturada o en una baja presencia de estados masivos delta en el perfil.
  
- ✓ Las precipitaciones acumuladas en el período reproductivo de la soja o el contenido de agua útil inicial en el perfil del suelo, fueron buenas predictoras del rendimiento cuando la disponibilidad de agua para el cultivo fue relativamente baja ( $pp_{2+3} < 180$ ,  $AUI < 200\text{mm}$ ).
  
- ✓ La temperatura y la radiación solar comenzaron a tener peso en la explicación de la variación del rendimiento sólo después que se superaron determinados niveles hídricos ( $pp_{2+3} = 180\text{ mm}$  o  $AUI = 200\text{mm}$ ).
  
- ✓ El análisis de componentes principales combinado con regresión lineal múltiple permitió identificar las variables climáticas y edáficas de mayor contribución en la explicación de las variaciones de rendimiento de lotes de soja, aún cuando el conjunto de variables registradas mostraba alta correlación (interdependencia entre variables climáticas y entre variables edáficas).

- ✓ Se obtuvieron modelos explicativos de la variabilidad del rendimiento en soja bajo sistemas de siembra directa en Argiudoles del Sur de Santa Fe. Los mismos pueden ser usados para predecir el rendimiento de un lote en función de pocas variables de suelo como Md, Ksat, MO y de algunas variables meteorológicas como  $pp_{2+3}$ ,  $Tm_2$ ,  $Rs_3$ .

## BIBLIOGRAFIA

- Aapresid (Asociación argentina de productores de siembra directa); 2008. [www.aapresid.org.ar](http://www.aapresid.org.ar)
- Adams, J.; Arkin, G.; 1977. A light interception method for measuring row crop ground cover. *Soil Science Soc. Am. J.* 41:789–792.
- Andrade, F.; 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops R.* 41: 1-12.
- Andriani, J.; Andrade, F.; Suero, E.; Dardanelli, J.; 1991. Water deficit during reproductive growth of soybeans. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie* 11: 737-746.
- Andriani, J.; Bodrero, M.; 1995. Respuesta de cultivares de soja a la disponibilidad hídrica. Primer Congreso Nacional de soja, Pergamino, Buenos Aires, Argentina, Tomo I 81 pp.
- Andriani, J.; 2000a. Crecimiento de las raíces de los principales cultivos extensivos en suelos Argiudoles de la provincia de Santa Fe. Para Mejorar la Producción N° 13, EEA INTA Oliveros: 40-44.
- Andriani, J.; 2000b. Parámetros hídricos de los principales suelos Argiudoles y Hapludoles del sur de Santa Fe. Para mejorar la producción N° 13, EEA INTA Oliveros: 23-26.
- Baigorri, H.; Croatto, D.; Robinet, H.; Galván, M.; Cettour, I.; Sasovsky, C.; Dorado, M.; Parra, R.; Ocampo, E.; Piatti, F.; Bodrero, M.; Macor, L.; Vicentini, R.; Fossati, J.; Catalani, H.; Weilenmann, M.; Iriarte, L.; Tommaso, J.; 2000. Manejo del

cultivo de la soja en Argentina. INTA Centro Regional Córdoba. EEA Marcos Juárez 96 pp.

- Balzarini, M.; Bruno, C.; Arroyo, A.; 2005. Análisis de ensayos agrícolas multiambientales. Ejemplos en Info-Gen. Estadística y Biometría. U.N.C: 41-46.
- Barbosa, O.; Taboada, M; Rodríguez, M; Cosentino, D.; 1997. Regeneración de la estructura en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada. Ciencia del Suelo 15: 81-86.
- Batchelor, W.; Basso, B.; Paz, J.; 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. European J. of Agronomy 18: 141-158.
- Board, J.; Harville, B.; 1992. Explanations for greater light interception in narrow vs. wide-row soybean. Crop Science 32: 198-202.
- Board, J.; Tan, Q.; 1995. Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. Crop Science 35: 846-851.
- Board, J.; Wier, A.; Boethel, D.; 1995. Source strength influence on soybean yield formation during early and late reproductive development. Crop Science 35: 1104-1110.
- Board, J.; Zhang, W.; Harville, B; 1996. Yield rankings for soybean cultivars grown in narrow and wide rows with late planting dates. Agronomy J. 88: 240-245.
- Board, J.; Kang, M.; Harville, B.; 1999. Path analysis of the yield formation process for late-planted soybean. Agronomy J. 91: 128-135.
- Bodrero, M.; Bacigaluppo, S.; Andriani, J.; Capurro, J.; Damen, D.; Felizia, J.; Gelín, A.; Gentili, O.; González, C.; Massaro, R.; Méndez, J.; Pagani, R.; Prieto, G.; Leguizamón, S.; Trentino, N.; 2002. Evaluación de cultivares de soja de los grupos

de madurez III, IV, V y VI en siembra de primera época en diferentes ambientes del sur de Santa Fe. Campaña 2001/02. Para Mejorar la Producción N° 21, EEA INTA Oliveros: 40-46.

➤ Bodrero, M.; Bacigaluppo, S.; Andriani, J.; Capurro, J.; Damen, D.; Enrico, J.; Felizia, J.; Gentili, O.; González, C.; Massaro, R.; Méndez, J.; Prieto, G.; Leguizamón, S.; Trentino, N.; 2003. Evaluación de cultivares de soja de los grupos de madurez III, IV, V y VI en siembra de primera época en diferentes ambientes del sur de Santa Fe. Campaña 2002/03. Para Mejorar la Producción N° 24, EEA INTA Oliveros: 32-39.

➤ Bodrero, M.; Andriani, J.; Bacigaluppo, S.; Gerster, G.; Quijano, A.; Enrico, J.; Martignone, R.; 2004a. Caracterización de ambientes para la producción de soja en sistemas de siembra directa en el sur de Santa Fe. Para Mejorar la Producción N° 27, EEA INTA Oliveros: 8-16.

➤ Bodrero, M.; Bacigaluppo, S.; Andriani, J.; Capurro, J.; Damen, D.; Enrico, J.; Felizia, J.; Gentili, O.; González, C.; Manlla, A.; Malmantile, A.; Méndez, J.; Prieto, G.; Rossi, J.; Trentino, N.; 2004b. Evaluación de cultivares de soja de los grupos de madurez III, IV, V y VI en siembra de primera época en diferentes ambientes del sur de Santa Fe. Campaña 2003/04. Para Mejorar la Producción N° 27, EEA INTA Oliveros: 48-56.

➤ Bodrero, M.; Bacigaluppo, S.; Andriani, J.; Capurro, J.; Damen, D.; Enrico, J.; Gentili, O.; Gerster, G.; González, C.; Malmantile, A.; Méndez, J.; Prieto, G.; Rossi, J.; Trentino, N.; 2005. Evaluación de cultivares de soja de los grupos de madurez III, IV, V y VI en siembra de primera época en diferentes ambientes del sur de Santa Fe. Campaña 2004/05. Para Mejorar la Producción N° 30, EEA INTA Oliveros: 8-17.

- Boone, F.; 1986. Towards soil compaction limits for crop growth. Netherlands J. of Agricultural Science 34: 349-360.
- Boone, F.; van der Werf, H.; Kroesbergen, B.; ten Hag, B.; Boers, A.; 1986. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. 1. Critical matric water potentials in relation to soil aeration and mechanical impedance. Netherlands J. of Agricultural Science 34: 155-171.
- Botta, G.; Jorajuria, D.; Balbuena, R.; Rosatto, H.; 2004. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max L.*) yields. Soil & Tillage R. 78: 53–58.
- Bragachini, M.; von Martini, A.; Méndez, A.; 2007. Potencialidad de la información de los mapas de rendimiento en la interpretación del manejo de factores de rendimiento y su respuesta sitio específica en el cultivo de soja. Proyecto Agricultura de Precisión INTA Manfredi. [www.agriculturadeprecision.org](http://www.agriculturadeprecision.org)
- Brereton, J.; Mc Gowan, M.; Dawkins, T.; 1986. The relative sensitivity of spring barley, spring field beans and sugar beet crops to soil compaction. Field Crops R. 13: 223-237.
- Calviño, P.; Sadras, V.; Andrade, F.; 2003. Quantification of environmental and management effects on the yield of late-sown soybean. Field Crops R. 83: 67-77.
- Canfalone, A.; Villacampa, Y.; Cortés, M.; Navarro, M.; 2002. Crecimiento de soja en función de la temperatura del aire y de la radiación fotosintéticamente activa. Revista brasileña de Agrociência, V 8, Nº 3: 185-189.
- Cárcova, J.; Abeledo, G.; López Pereira, M; 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. Producción de granos, bases funcionales para su manejo. Ed. Facultad de Agronomía UBA, Capítulo 6: 75-98.

- Ciani, R.; 2005. Perspectivas regionales del Mercado de soja. I Foro Regional de la Agroindustria. SAGPyA Julio 2005.
- Cosentino, D.; Pecorari, C.; 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16.
- Currie, J.; 1984. Gas diffusion through soil crumbs: the effects of compaction and wetting. *European J. of Soil Science* 35 (1): 1–10.
- Dardanelli, J.; Calmon, M.; Jones, J.; Andriani, J.; Díaz, M; Collino, D.; 2003. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three argentine soils. *American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 46 (4): 1265-1275.
- Dardanelli J.; Balzarini, M.; Martínez M.; Cuniberti, M.; Resnik, S.; Ramunda, S.; Herrero, R.; Baigorri, H.; 2006. Soybean Maturity Groups, Environments and their Interaction define Mega-environments for Seed Composition in Argentina. *Crop Science* 46: 1939-1947.
- De Battista, J.; Andriulo, A.; Pecorari, C.; 1993. El Perfil Cultural: un método para la evaluación de sistemas de cultivo. *Ciencia del Suelo* Vol. 10-11: 89-93.
- De Battista, J.; Andriulo, A.; Ferrari, M.; Pecorari, C.; 1994. Evaluation of the soil structural conditions under various tillage systems in the Pampa Húmeda (Argentina). 13<sup>th</sup> International ISTRO Conference, Aalborg, Dinamarca, 24-29 July, Vol I: 99-103.
- Dirksen, C.; 1999. Soil physics measurements. Catena Verlag. Reiskirchen. Germany 154 pp.

- Draper, N.; Smith, H.; 1998. Applied Regression Analysis (3<sup>rd</sup> edition). New York: Wiley 736 pp.
- Egli, D.; Zhen-Wen, Y.; 1991. Crop growth rate and seeds per unit area in soybeans. Crop Science 31: 439-442.
- Egli, D.; 1997. Cultivar maturity and response of soybean to shade stress during seed feeling. Field Crops R. 52: 1-8.
- Egli, D.; 1998. Seed biology and the yield of grain crops. CAB International. Wallingford, UK 178 pp.
- Egli, D.; Bruening, W.; 1999. Relationship between photosynthesis and seed number set at isolated-nodes in soybean. Crop Science 39: 1769-1775.
- Fehr, W.; Caviness, C.; 1977. Stages of soybean developmet. Iowa State University. Special Report, 80: 11pp.
- Ferraris, G.; Gutiérrez Boem, F.; Echeverría, H.; 2002. Respuesta a la Fertilización en el Cultivo de Soja de Primera. Proyecto Fertilizar-INTA. IDIA XXI: 52-58.
- Ferraro, D.; 2005. La sustentabilidad agrícola en la Pampa Interior (Argentina): desarrollo y evaluación de indicadores de impacto ambiental del uso de pesticidas y labranzas usando lógica difusa. Tesis de doctorado de la Escuela para Graduados Alberto Soriano Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires 135 pp.
- Fuentes, F.; Robinet, H.; Iriarte, L.; 2007. Red Nacional de Evaluación de Cultivares de Soja. Informe técnico de resultados de la campaña 2006/07, EEA INTA Marcos Juárez 560 pp.
- Gabriel, K.; 1971. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. Biometrika 58: 453-467.

- Gautronneau, Y.; Manichon, H.; 1987. Guide Methodique du Profil Cultural. CEREF Gueara 71 pp.
- Gerster, G.; Vidal, D.; Gudelj, O.; De Battista, J.; 1996. Análisis del efecto de las labranzas sobre el estado físico de un Argiudol típico. Informe Técnico N° 119. EEA INTA Marcos Juárez 15 pp.
- Gerster, G; Gargicevich, A; Cordone, G; González, C.; 2002. Factores edáficos y prácticas culturales asociadas al rendimiento de soja. XVIII Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo: 297.
- Gerster, G.; Bacigaluppo, S.; 2004. Consecuencia de la densificación por tránsito en Argiudoles del sur de Santa Fe. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 303.
- Gil, R.; 2001. El comportamiento físico-funcional de los suelos. Primer seminario de AAPRESID para estudiantes: 19-29.
- Hall, A.; Rebella, C.; Ghera, C.; Cullot, J.; 1992. Field Crop Systems of the Pampas. Ecosystems of the world. Field Crops Ecosystems. Ed. C.J. Pearson 413-450. Elsevier Scientific: Amsterdam-London-New York-Tokyo.
- Hanson, J.; Rojas, K.; Shaffer, M.; 1999. Calibrating the root zone water quality model. Agronomy J. 91: 171-177.
- Hardman, L.; Brun, W.; 1971. Effect of atmospheric carbon dioxide enrichment at different developmental stages on growth and yield components of soybeans. Crop Science 11: 886-888.
- Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman. J.; 2001. The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction. Springer, New York 536 pp.

- Hayati, R.; Egli, D.; Crafts-Brandner, S.; 1995. Carbon and nitrogen supply during seed filling and leaf senescence in soybean. *Crop Science* 35: 1063-1069.
- Herrero, R.; Cuniberti, M.; Masiero, B.; Kovalevski, L.; 2006. Variabilidad en la calidad industrial de la soja argentina según regiones, épocas de siembra y grupos de madurez. *Mercosoja* 2006: 214-217.
- Hillel, D.; 1998. *Environmental soils physics*. Academic Press, New York 771 pp.
- Hoogenboom, G.; Peterson, C.; Huck, M.; 1987. Shoot growth rate of soybean as affected by drought stress. *Agronomy J.* 79: 598-607.
- InfoStat/P; 2008. Manual del usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera Edición. Editorial Brujas. Argentina 334 pp.
- INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; 1979. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3360- 19 – Casilda.
- INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; 1983. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3360- 20 y 21 – Arroyo Seco – San Nicolás de los Arroyos.
- INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; 1985. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3360- 7 y 8 –Totoras y Serodino.
- INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; 1988. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3360- 13 y 14 – Cañada de Gómez y Rosario.
- INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; 2008. Estación agrometeorológica EEA INTA Oliveros. [www.inta.gov.ar/oliveros](http://www.inta.gov.ar/oliveros)
- IPEC; 2007. Instituto Provincial de Estadísticas y Censos de la Provincia de Santa Fe. [www.portal.santafe.gov.ar](http://www.portal.santafe.gov.ar)

- Jackson, M.; 1964. Análisis químico de suelos. Ed. Omega, Barcelona 662 pp.
- Jiang, H.; Egli, D.; 1993. Shade induced changes in flower and pod number and flower and fruit abscission in soybean. *Agronomy J.* 85:221-225.
- Jiang, H.; Egli, D.; 1995. Soybean seed number and crop growth rate during flowering. *Agronomy J.* 87: 264-267.
- Johnson, R.; Wichern, D.; 1998. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 4a ed. New Jersey, Prentice Hall. EEUU 816 pp.
- Kadhem, F.; Specht, J.; Williams, J.; 1985. Soybean irrigation serially timed during stages R1 to R6: Yield component responses. *Agronomy J.* 77: 299-304.
- Kantolic, A.; Giménez, P.; de la Fuente, E.; 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. *Producción de granos, bases funcionales para su manejo*. Ed. Facultad de Agronomía UBA, capítulo 9: 167-201.
- Karlen, D.; Mausbach, M.; Doran, J.; Cline, R.; Harris, R.; Schuman, G.; 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Soc. Am. J.* 61: 4-10.
- Kaspar, T.; Pulido, D.; Fenton, T.; Colvin, T, Karlen, D.; Jaynes, D.; Meek, D.; 2004. Site-Specific Análisis. *Agronomy J.* 96: 700-709.
- Kiniry L.; Scrivener, C.; Keener, M.; 1983. A soil productivity index based upon predicting water depletion and root growth. *Missouri Agriculture Exp. Stn. Res. Bull.* 1051.
- Kravchenko, A.; Bullock, D.; 2002. Spatial variability of soybean quality data as a function of field topography. *Crop Science* 42: 804-815.

- Lipiec, J.; Arvidsson, J.; Murer, E.; 2003. Review of modeling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. *Soil & Tillage R.* 73: 15-29.
- Lobell, D.; Ortiz Monasterio, I.; Asner, G.; Naylor, R.; Falcon, W.; 2005. Combining Field Surveys, Remote Sensing, and Regression Trees to Understand Yield Variations in an Irrigated Wheat Landscape. *Agronomy J.* 97: 241-249.
- Maddonni, G.; 1998. Interacciones entre la estabilidad del rendimiento en híbridos de maíz y el deterioro del suelo en la Pampa Ondulada. Tesis de Magíster Scientiae. Escuela para Graduados Facultad de Agronomía UBA 126 pp.
- Martignone, R.; Morandi, E.; Bodrero, M.; Quijano, A.; 1996. Caracterización de la respuesta fototérmica de cultivares de soja. *Actas XXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal.* Mendoza: 84-85.
- Martignone, R.; Romagnoli, M.; Rosbaco, I.; Tuttolomondo, G.; 2006. Efecto de la fecha de siembra sobre el comportamiento fenológico y agronómico en cultivares de soja de diferentes grupos de maduración. *Mercosoja* 2006: 47-50.
- Masle, J.; Passioura, J.; 1987. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Australian J. of Plant Physiology* 14: 643-656.
- Michelena, R.; Irurtia, C.; Pittaluga, A.; Vavruska, F.; de Sardi M.; 1988. Degradación de los suelos en el sector Norte de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 6: 60-66.
- Morandi, E.; Bodrero, M.; Martignone, R.; Quijano, A., 1991. Respuesta de distintos genotipos de soja a la época de siembra y a la disponibilidad hídrica. I *Reunión Nacional de Oleaginosas:* 89-95.

- Mosconi, F.; Priano, L.; Hein, N.; Moscatelli, G.; Salazar, J.; Gutiérrez, T.; Cáceres, L.; 1981. Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe. INTA-MAG 216 pp.
- Nissen, J.; Quiroz, C.; Seguel, O.; Mac Donald R.; Achim Ellies Sch.; 2006. Non saturated water movement in Andisols. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal, Vol. VI N° 1: 9-19.
- Passioura, J.; 2002. Soil conditions and plant growth. Plant, Cell and Environment 25: 311-318.
- Pecorari, C.; 1988a. Características físicas de las fracciones granulométricas de los horizontes superficiales de un Argiudol típico (serie Pergamino). Informe Técnico N° 220. INTA Centro Regional Buenos Aires Norte, EEA Pergamino 18 pp.
- Pecorari, C.; 1988b. Inestabilidad estructural de los suelos en la región de la EEA Pergamino. Informe Técnico N° 216. INTA Centro Regional Buenos Aires Norte, EEA Pergamino 16 pp.
- Plá Sentis, I; Nacci S.; 1990. Técnicas y equipos simplificados para evaluar propiedades físicas importantes para el manejo de suelos en los trópicos. XI Congreso Latinoamericano y II Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo: 199-217.
- Quijano, A.; Morandi, E.; Martignone, R.; Bodrero, M., 1996. Número de semillas y rendimiento en soja en relación a la época de siembra y la disponibilidad hídrica. XXI Reunión Argentina de Fisiología Vegeta. Mendoza: 222-223.
- Quijano, A.; Martignone, R.; Morandi, E.; Bodrero, M.; 1998. Factores asociados con el rendimiento del cultivo de la soja. III Reunión Nacional de Oleaginosos. Bahía Blanca: 157-158.

- Quijano, A.; Martignone, R.; Morandi, E.; Bodrero, M.; 1999. Período crítico para la determinación del número de semillas en el cultivo de la soja. Mercosoja 99: 25-26.
- Quijano, A.; Baroli, G.; Morandi, E.; 2006. Relación fuente-destino y peso unitario de las semillas de soja. Mercosoja 2006: 99-102.
- SAGPyA; 2007. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la República Argentina. [www.sagpya.gov.ar](http://www.sagpya.gov.ar)
- Salado Navarro, L.; Sinclair, T.; Rodríguez, R.; Dilascio, M.; 2006. Simulaciones de soja en Argentina I. Variación interanual del rendimiento. Mercosoja 2006: 25-28.
- SAMLA, 2004. Sistema de Apoyo Metodológico de Laboratorios de Suelos y Aguas. SAGPyA – AACs – INTA – Facultad Agronomía UBA. [www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/agricultura/otros/samla/index](http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/agricultura/otros/samla/index)
- Senigagliesi C.; Ferrari, M.; 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. International crop science I. Crop Science Soc. of America, Madison USA: 27-35.
- Silva Rossi, M.; 2005. Impacto de la compactación sobre la calidad de los suelos en el sur de Santa Fe. Para Mejorar la Producción N° 30. EEA INTA Oliveros: 94-98.
- Sinclair, T.; Kitani, S.; Hinson, K.; Bruniard, J.; Horie, T.; 1991. Soybean flowering date: linear and logistic models based on temperature and photoperiod. Crop Science 31: 786-790.
- Taboada, M.; Micucci, F.; 2002. Fertilidad física de los suelos. Ed. Facultad de Agronomía UBA 79 pp.

- Tardieu F.; Manichon H.; 1987. État structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II Croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agronomie* 7: 201- 211.
- Tardieu, F.; 1988. Analysis of the spatial variability of maize root density. Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant Soil* 107: 259-266.
- Tardieu, F.; 1994. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. *Soil & Tillage R.* 30: 217-243.
- Venialgo, C.; Gutiérrez, N.; Gutiérrez, J.; Petkoff, J.; Drganc, D.; 2002. Porosidad en suelos con distintas secuencias de cultivos. XIII Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas. Facultad de Ciencias Agrarias – UNNE. [www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2002/05-Agrarias/A-024.pdf](http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2002/05-Agrarias/A-024.pdf)
- Wolfe, D.; Topoleski, D.; Gundersheim, N.; Ingall, B.; 1995. Growth and yield sensitivity of four vegetable crops to soil compaction. *Soc. Am. J. for Horticultural Science* 120: 956-963.
- Yan, W.; Hunt, L.; Sheng Q.; Szlavnic, Z.; 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE Biplot. *Crop Science* 40: 597-605.
- Yang, J.; Hammer, R.; Thompson, A.; Blanchar, R.; 2003. Predicting soybean yield in a dry and wet year using a soil productivity index. *Plant and Soil* 250: 175-182.

## ANEXO I

Descripción de las series de suelo encontradas en los distintos ambientes evaluados en el sur de Santa Fe.

**Serie Peyrano** (INTA, 1983): Argiudol Típico. Suelo oscuro, profundo y moderadamente bien drenado de las lomas planas, muy suavemente ondulado, se encuentra en el ángulo donde confluyen los departamentos de Rosario, Constitución y San Lorenzo. La capa arable, de textura franco-limosa, es de color muy oscuro a negro y se extiende hasta los 25-30 cm. Este horizonte pasa gradualmente hacia otro más arcilloso (horizonte B2t), que comienza a los 40 cm y se extiende hasta los 90 ó 110 cm. Es pesado, de textura arcillo-limosa. La transición entre el B2t y el sustrato loésico (horizonte C), es gradual. A los 160 cm se encuentra el horizonte C, compuesto por un material loésico, franco limoso, suelto. Estos suelos son moderadamente bien drenados, porque la permeabilidad de los horizontes más pesados es insuficiente.

El perfil típico es:

Ap (0-15 cm), A1 (15-26 cm), B1 (26-40 cm), B21t (40-75 cm), B22t (75-103 cm), B3 (103-160 cm), C (160-200 cm).

**Serie Correa** (INTA, 1988): Argiudol típico. Es un suelo profundo, oscuro, bien drenado, ubicado en un área fuertemente ondulada, con pendientes entre 1 y 3%, en la zona comprendida entre las localidades de Correa, Cañada de Gómez, Villa Eloisa y las terrazas del río Carcarañá, en el departamento Iriondo. La erosión hídrica constituye la limitación principal de esta serie.

Presenta un perfil con un horizonte superficial A1, de 17 cm de espesor y textura franco limosa, con 23 % de arcilla. Le sigue un horizonte transicional B1, de 8 cm de espesor y a los 23 cm aparece el horizonte B2t. Éste tiene 54 cm de espesor, es de textura franco arcillo limosa. El horizonte C, se encuentra a partir de los 115 cm de profundidad.

El perfil típico es:

Ap (0-16 cm), B1 (16-24 cm), B21t (24-52 cm), B22t (52-77 cm), B3 (77-115 cm), C1 (115-135 cm), C2ca (135-150+ cm)

Debido a las características del relieve donde se desarrollan estos suelos, los perfiles varían en la profundidad y el espesor de los horizontes.

**Serie Maciel** (INTA, 1985): Argiudol típico. Suelo profundo, desarrollado en áreas bien drenadas, sobre paisajes muy suavemente ondulados, en los departamentos Iriondo y San Jerónimo. El horizonte A1, tiene de 25 a 30 cm de espesor, muy oscuro, medianamente provisto de materia orgánica, de textura franco limosa. Continúa un horizonte de transición B1, de 12 a 16 cm de espesor, franco-arcillo-limoso. A los 37-38 cm, comienza el horizonte argílico B2t, de 75 a 80 cm de espesor, arcillo-limoso, siendo el horizonte más pesado el B22t, con un contenido de arcilla del 45%. El subhorizonte B23t, es el más liviano, de textura franco arcillo limosa. Continúa luego un horizonte transicional, B3, de 26 a 44 cm de espesor, franco arcillo limoso. Luego se presenta el horizonte C1 hasta los 240 cm, pardo a pardo claro, franco arcillo limoso y a continuación el horizonte C2ca franco limoso.

El perfil típico es:

A1 (0-25 cm), B1 (25-37 cm), B21t (37-51 cm), B22t (51-85 cm), B23t (85-112 cm), B3 (112-147 cm), C1 (147-240 cm), C2ca (+240 cm).

**Serie Los Cardos** (INTA, 1988): Argiudol típico. Suelo profundo, bien drenado, se encuentra desarrollado en los sectores más altos, con un paisaje suavemente ondulado, en un sector de los departamentos Belgrano e Iriondo. Tiene un horizonte A1 de 18 a 21 cm de espesor, muy oscuro, franco limoso y medianamente provisto de materia orgánica. En profundidad continúa con un horizonte de transición B1, de 8 a 10 cm de espesor, pardo oscuro, de textura franco arcillo limosa. Entre los 27 y 29 cm de profundidad, comienza en forma abrupta el horizonte B2t (argílico) de 65 a 75 cm de espesor, franco arcillo limoso pesado, o arcillo limoso. El subhorizonte más pesado es el B22t con 39 a 42% de arcilla. Continúa con un horizonte transicional B3, de 15 a 25 cm de espesor y luego comienza el horizonte C, de color pardo, franco limoso. Este tipo de suelo no presenta limitaciones para su uso con cultivos agrícolas y su productividad está condicionada a un manejo adecuado de labranzas y rotaciones.

El perfil típico es:

A1 (0-18 cm), B1 (18-26 cm), B21t (26-52 cm), B22t (52-80 cm), B23t (80-104 cm), B3 (104-120 cm), C1 (120-149 cm), C2ca (149-185 cm).

**Serie Clason** (INTA, 1985): Argiudol típico. Suelo profundo, bien drenado, desarrollado en pendientes de hasta 1%, como así también en áreas más planas, en los departamentos Iriondo y San Jerónimo. El horizonte A1 tiene de 21 a 25 cm de espesor, muy oscuro, medianamente provisto de materia orgánica y textura franco

limosa. Continúa un horizonte de transición B1, de 12 a 15 centímetros de espesor, franco arcillo limoso, con signos de incipiente lixiviación, especialmente en áreas más planas. Entre los 32 a 37 cm de profundidad, comienza con un límite claro el horizonte B2t (argílico), de 70 a 75 cm de espesor, arcillo limoso a franco arcillo limoso. Continúa un horizonte transicional, B3 de 30 a 40 cm de espesor y luego comienza el horizonte C1 de color pardo, franco limoso. A los 180 cm le sigue un horizonte C2ca de color pardo con abundantes concreciones de carbonatos, de textura franco limosa. Se encuentran en las partes más altas, mejor drenadas en áreas con paisaje suavemente ondulado.

El perfil típico es:

A1 (0-21cm), B1 (21-34 cm), B21t (34-56 cm), B22t (56-79 cm), B23t (79-103 cm), B3 (103-134 cm), C1 (134-180 cm), C2ca (180-200 cm).

**Serie Roldán** (INTA, 1983): Argiudol vértico. Suelo muy profundo, desarrollado a partir de sedimentos loéssicos, franco limosos, con buena capacidad de almacenamiento de agua, moderadamente bien drenado, lenta permeabilidad, que ha evolucionado en un paisaje de lomas extendidas planas (pendiente 0.5%), situado en los departamentos Rosario y San Lorenzo. Presenta un horizonte superficial A1, de 28 cm de espesor, pardo oscuro, moderadamente provisto de materia orgánica, de textura franco limosa. A continuación aparece un horizonte de transición, B1, de 12 cm de espesor, franco arcillo limoso, menos rico en materia orgánica, que evidencia incipientes rasgos de lixiviación. Bruscamente se pasa a un horizonte notoriamente más arcilloso, B2t (alrededor de 50% de arcilla), de considerable espesor, entre 70 y 100 cm. El perfil continúa con una capa

transicional, B3, hasta los 185 cm, profundidad a la que aparece el material menos afectado por los procesos de pedogénesis, horizonte C, de textura franco limosa.

El perfil típico es:

A1 (0-28 cm), B1 (28-40 cm), B21t (40-90 cm), B22t (90-140 cm), B3 (140-185 cm), C (+185 cm).

**Serie Casilda** (INTA, 1979): Argiudol típico. Suelo profundo, oscuro, bien drenado, que ocupa los planos altos muy suavemente ondulados, del noreste del departamento Caseros, provincia de Santa Fe. Presenta un horizonte superficial, A1, de 18 cm de espesor y textura franco limosa, con 20 % de arcilla. Le sigue un horizonte transicional, B1, algo más arcilloso y bien estructurado. A los 27 cm de profundidad, se encuentra el horizonte B2t, de 77 cm de espesor, textura franco arcillo limosa a arcillo limosa y estructura en prismas. El mayor contenido de arcilla del perfil se encuentra en este horizonte (46%). El horizonte C (material originario), aparece entre los 125 y 135 cm de profundidad con 20% de arcilla y 68 % de limo. A mayor profundidad suele presentar calcáreo y ligera cementación.

El perfil típico es:

Ap (0-18 cm), B1 (18-27 cm), B21t (27-48 cm), B22t (48-76 cm), B23t (76-104 cm), B3 (104-128 cm), C1 (128-180 cm), C2ca (180-210 cm).

**Serie Villa Eloisa** (INTA, 1988): Argiudol típico, suelo oscuro, profundo y bien drenado. La capa arable tiene menos de 20 cm de espesor, de textura franco limosa. Esta capa generalmente apoya directamente sobre el horizonte B2t, aunque en algunos casos puede describirse un horizonte transicional B1. El horizonte B2t se

extiende desde los 20 ó 25 cm de profundidad hasta los 55 ó 60 cm, es de color más rojizo, de textura franco arcillo limosa. El horizonte C suele aparecer a los 100 cm de profundidad, es un material loésico, friable y de textura franco limosa. Esta serie está definida para una pendiente entre 1 y 3%, área moderadamente ondulada y con erosión hídrica ligera.

El perfil típico es:

Ap (0-10 cm), B1 (10-23 cm), B21t (23-40 cm), B22t (40-57 cm), B3 (57-96 cm), C (96-130 cm).

## ANEXO II

Variables de cultivo, suelo y clima registradas en cultivos de soja en 70 ambientes del Sur de Santa Fe, Argentina.

Variable	Abreviatura	Unidad	Relevamiento en
Cobertura de cultivo en R2	IR2	%	R2
Cobertura de cultivo en R5	IR5	%	R5
Rendimiento	Rend	kg ha <sup>-1</sup>	R8
Peso unitario de granos	PG	g	Post cosecha
Número de granos	NG	granos m <sup>-2</sup>	Post cosecha
Materia orgánica	MO	%	Siembra
Fósforo disponible	P	ppm	Siembra
Conductividad hidráulica saturada	Ksat	cm seg <sup>-1</sup>	Siembra
Profundidad al B2 textural	PrB2t	cm	Siembra
Estados masivos delta	Md	%	Siembra
Pisos compactados	Pi	%	Siembra
Agua útil inicial del suelo hasta 2 m	AUI	mm	Siembra
Temperatura media diaria	Tm	°C	E-R2 R2-R5 R5-R7
Radiación solar acumulada	Rs	MJ m <sup>-2</sup>	E-R2 R2-R5 R5-R7
Fotoperíodo medio	Fot	hs	E-R2 R2-R5 R5-R7
Precipitaciones acumuladas	pp	mm	E-R2 R2-R5 R5-R7 E-R7

### ANEXO III

Base de datos II. Red de ensayos comparativos de soja GM III al VI, de INTA Oliveros, campañas 2001/02, 2002/03, 2003/04 y 2004/05 en diferentes ambientes del sur de Santa Fe, Argentina.

<b>2001/02</b>		Rendimiento por ambiente (kg/ha)			
Variedad	Totoras	Bouquet	C.Gómez	Oliveros	Maizales
A 3901	3558	3794	3246	3341	1997
DM 3950	3595	3916	3653	3354	2358
DM 4400	3941	4180	3814	3588	2006
A 4404	4166	3983	3539	3465	2228
DM 4800	4385	3865	3901	3658	2369
AW 4902	4054	3486	3502	3053	2362
A 4910	4728	3473	3410	3254	2557
HM 5-41	3768	3561	3516	2991	2254
DM 50048	4519	3878	3755	3913	2607
A 5520	3850	3241	3240	3394	2744
AW 5581	3854	3039	3097	3054	2211
A 5901	4075	3230	3201	3201	2244
A 6040	3459	2871	3088	2828	2297
<b>Promedio</b>	<b>3996</b>	<b>3578</b>	<b>3459</b>	<b>3315</b>	<b>2326</b>

<b>2002/03</b>		Rendimiento por ambiente (kg/ha)						
Variedad	Oliveros	Las Rosas	C.Gómez	Carcarañá	Totoras	OliverosE	A.Seco	Casilda
NK Brava 3.9	4459	4008	3925	3783	3532	3813	3457	3167
A 3901	4552	4204	4565	3991	3695	3740	3701	3233
DM 3950	4658	4112	3494	4179	3660	3298	3650	3325
NK Mireya 4.2	4207	3746	3778	3964	3894	3672	3330	3311
DM 4400	4508	4231	3769	4034	3761	3684	4081	3539
NK Nativa 4.6	4641	3992	4307	3918	3754	3777	3707	3470
DM 4800	4549	4172	3915	4000	4023	4033	3501	3456
AW 4902	4614	3682	4428	3855	4047	3629	3680	3247
A 4910	4685	3778	3986	3897	3784	3948	3617	3444
DM 50048	4746	4204	4070	3946	4264	4001	3487	3775
RA 500	4276	3912	3632	3769	4079	3228	3557	3523
A 5417	4037	3726	3480	4010	4074	2873	2979	3444
A 5520	4332	3812	4215	3691	4082	3405	2951	3452
<b>Promedio</b>	<b>4482</b>	<b>3968</b>	<b>3967</b>	<b>3926</b>	<b>3896</b>	<b>3623</b>	<b>3515</b>	<b>3414</b>

2003/04	Rendimiento por ambiente (kg/ha)				
	Variedad	Totoras	Bouquet	Carcaraña	J.B.Molina
NK 35-00	4155	3342	2601	2704	2446
A 3550	4462	3258	2467	2530	2320
DM 3700	4580	3826	2886	2838	3047
AW 3702	4066	3388	2729	2379	2359
TJ 2037	3931	3161	2937	2579	2534
Dalia 390	4268	3519	2876	2902	2570
AW 3982	4348	3936	2979	2509	2603
NK Picasa 4.0	4317	3123	2550	2900	2402
FN 4.10	4502	3362	2677	2994	2911
AW 4200	4596	3894	3119	2925	2843
A 4201	4705	3451	2830	2985	2499
NK Mireya 4.2	4698	3875	2737	2784	2688
TJ 2044	3930	3134	2919	2596	2227
Dalia 450	4238	2908	2758	2650	2641
AW 4500	4629	3313	2849	2994	2806
DM 4600	4288	3310	2977	2944	3226
DM 4800	4409	3853	2964	2792	3021
A 4725	4245	3236	2948	2834	3132
A 4910	4166	3221	3004	3051	2998
TJ 2049	4303	3942	3250	3242	3041
DM 50048	4210	3757	3094	3010	3940
A 5520	4006	2661	2353	2130	3000
<b>Promedio</b>	<b>4321</b>	<b>3430</b>	<b>2841</b>	<b>2785</b>	<b>2784</b>

2004/05	Rendimiento por ambiente (kg/ha)							
	Variedad	Casilda	Carcaraña	Bouquet	Oliveros	J.B.Molina	V.Eloisa	S.Jenaro
ALM 3530	4978	3967	3940	3402	3570	3802	2496	3115
DM 3700	4846	3843	4168	3568	3671	3883	3699	2758
TJ 2037	4520	4006	3952	3263	3353	3717	3100	2441
FN 4.10	4378	3951	3950	3689	3693	3687	3709	2550
NK Mireya 4.2	4262	4048	3602	3427	3471	3695	3561	2524
DM 4200	5104	4432	4192	3701	3701	3941	3555	3038
ALM 4200	4450	4082	4313	3590	3554	3756	3609	3218
A 4303	4749	3795	3952	3626	3868	3717	3177	2848
DM 4600	4860	3824	3964	3823	3711	3474	3702	3192
A 4613	4847	4264	3948	3935	3543	3585	3523	3138
ALM 4650	4393	4019	3602	3322	3706	3730	3644	2999
A 4725	4423	4025	3709	3505	3558	3716	3578	3388
P 94B73	4711	4105	4048	3734	3997	3617	3655	3138
DM 4800	4337	3840	3494	3865	3892	3444	3278	2857
FN 4.85	4440	4174	3843	3334	4109	3468	3729	3083
DM 4870	4473	4330	3843	3774	3736	3592	3484	3055
TJ 2049	4304	4095	3735	3444	3929	3601	3674	3084
DM 50048	4258	3933	4084	3617	3583	3408	3329	2962
TJ 2055	3332	3653	3183	3535	3042	3026	3021	2757
A 5520	3827	3369	2937	3794	3089	2946	2665	2761
A 6126	3596	2858	3282	4033	3087	3146	2501	2825
<b>Promedio</b>	<b>4433</b>	<b>3934</b>	<b>3797</b>	<b>3618</b>	<b>3612</b>	<b>3569</b>	<b>3366</b>	<b>2940</b>