

## Variaciones del rendimiento de soja en el sur de Santa Fe. Factores limitantes de clima y suelo.

S. Bacigaluppo<sup>(1)</sup>, J. Dardanelli<sup>(2)</sup>, G. Gerster<sup>(1)</sup>, A. Quijano<sup>(4)</sup>, M. Balzarini<sup>(3)</sup>, M. Bodrero<sup>(1)</sup>, J. Andriani<sup>(1)</sup>, J. Enrico<sup>(1)</sup> y R. Martignone<sup>(4)</sup>.

<sup>(1)</sup>EEA INTA Oliveros. Ruta 11 km353, 2206 Oliveros, Santa Fe, Argentina.

<sup>(2)</sup>EEA INTA Manfredi. <sup>(3)</sup>Fac. Cs. Agropecuarias (UNC)-CONICET. <sup>(4)</sup>Fac. Cs. Agrarias (UNR). sbacigaluppo@correo.inta.gov.ar

Presentado en Mercosoja 2006. Rosario, 27-30 Junio 2006.

### Introducción

Las variaciones del rendimiento de los cultivos pueden explicarse a partir de efectos de genotipo (G), ambiente (A) y de su interacción (G x A). La importancia relativa de estas fuentes de variación cambia según el origen de los ambientes y genotipos. Comúnmente, el efecto ambiental explica la mayor parte de las variaciones (Yan et al, 2000; Gerster, 2001; Gerster et al, 2002, Dardanelli et al, 2006). En la región del Sur de Santa Fe, las variaciones ambientales se relacionan fundamentalmente con factores que afectan tanto el desarrollo como el crecimiento. El desarrollo está controlado principalmente por el fotoperíodo y la temperatura, mientras que el crecimiento depende tanto de factores climáticos como de suelo. Actualmente, el sistema más difundido en la región es la siembra directa (90 % de la superficie cultivada, RIAP 2006). La adopción de la agricultura continua y las prácticas culturales asociadas, han producido cambios físico-químicos en los suelos que parecen explicar parte de las variaciones observadas en el rendimiento entre lotes y años. El objetivo de este trabajo es identificar aquellos factores de suelo y/o clima, posibles de ser usados en modelos de predicción, que mejor explican las variaciones en el rendimiento de cultivos de soja, bajo siembra directa en el Sur de Santa Fe.

### Materiales y Métodos

Durante las campañas 2001/02, 2002/03 y 2003/04 se condujo una red de ensayos (RED) en 6, 7 y 7 localidades del sur de Santa Fe, respectivamente. En las mismas se evaluaron 17 genotipos de soja sembrados entre el 1/11 y el 5/12 en lotes de productores. Todos los ensayos se implantaron sobre un suelo perteneciente al gran grupo Argjudol y bajo un sistema de siembra directa con un diseño en bloques completamente aleatorizados. Utilizando la información de la RED (Bodrero et. al, 2002, 2003, 2004), se obtuvo, mediante análisis de varianza, la contribución porcentual de los efectos del ambiente, genotipo y su interacción sobre el rendimiento en la región de interés.

Para 3 genotipos: DM 4800 RR (GM IV), A 5520 RG (GM V) y A 6040 RG (GM VI), se determinaron los estadios fenológicos E, R2, R5 y R7 según la escala

fenológica de Fehr & Caviness (1977). En R8, se efectuó un muestreo de los sitios en 10 m<sup>2</sup> y se determinó el rendimiento en semilla, expresado al 13,5 % de humedad. En cada localidad se determinaron además variables de suelo, parámetros químicos: contenidos de materia orgánica y fósforo en el horizonte A y físicos: profundidad hasta el horizonte B textural, conductividad hidráulica saturada, presencia de estados masivos delta (bloques sin porosidad estructural) y presencia de pisos subsuperficiales compactados. Además, al inicio del cultivo se determinó el contenido de humedad del suelo hasta los dos metros de profundidad, con sonda de neutrones, calculándose el agua útil inicial (AUI), (Bodrero et al, 2004). A partir de registros climáticos, se obtuvieron para cada localidad, el fotoperíodo, las precipitaciones, la radiación incidente y la temperatura media diaria por subperíodos: 1: emergencia-floración (E-R2); 2: floración-inicio de llenado de granos (R2-R5); y 3: llenado de granos (R5-R7).

Cada combinación de campaña, localidad y genotipo (para los 3 genotipos mencionados), fue identificada como un ambiente, para ajustar modelos de regresión lineal múltiple del rendimiento en función de variables de clima y suelo. La finalidad de la modelación, fue clasificar a los distintos factores en función de la magnitud de sus correlaciones directas con el rendimiento (por ejemplo, correlaciones después de descontar el efecto de otros factores concomitantes). Los residuos parciales de un único modelo para todos los datos, indicaron la conveniencia de utilizar al menos dos modelos para explicar la variación ambiental del rendimiento en la región. Para la selección de variables se utilizó el procedimiento "backward". El error cuadrático medio de predicción fue utilizado como medida de la capacidad predictiva de los modelos ajustados (InfoStat, 2004).

### Resultados y discusión

El análisis de la varianza para el rendimiento (datos de la RED), mostró que el efecto del ambiente explicó un 63, 65 y 83% de la variación del rendimiento en las campañas 2001/02, 2002/03 y 2003/04, respectivamente. El ambiente fue netamente el factor principal de variación de los rendimientos, no obstante la interacción

GxA resultó también significativa. Las variaciones entre los genotipos fueron significativas en dos de las tres campañas; en la campaña 2003/2004, la variación total fue explicada exclusivamente por efecto del ambiente y de la interacción (Tabla 1). La caracterización de las variables de clima y suelo que se utilizaron para evaluar diferentes modelos para la relación rendimiento-clima-suelo, se presentan en la Tabla 2.

El análisis de los residuos parciales de un único modelo entre rendimiento y las variables de suelo y clima, indicó que la relación rendimiento-precipitación es dependiente del nivel de precipitaciones acumuladas en el periodo reproductivo ( $Pr_{2+3}$ ). Se observaron dos comportamientos diferenciados según esta precipitación fuese menor o mayor a 180 mm (Fig 1).

Para  $Pr_{2+3}$  menores a 180 mm se visualizó una relación lineal positiva entre rendimiento y precipitación acumulada, que se pierde cuando los valores de  $Pr_{2+3}$  superan los 180 mm. Por tal razón, se ajustaron dos modelos de regresión independientes, uno utilizando los ambientes con  $Pr_{2+3}$  de hasta 180 mm y otro con aquellos donde  $Pr_{2+3}$  había superado este valor.

Para ambientes de precipitaciones  $\leq 180$  mm en el periodo reproductivo, el mejor modelo de regresión múltiple obtenido ( $R^2 = 0.82$ ) incluyó sólo dos variables:  $Pr_{2+3}$  y %masivos delta, sugiriendo que la variación

en la aptitud de estos ambientes, se puede predecir (con un error de predicción de **30 gr/m<sup>2</sup> o 300 kg/ha**) a partir de los niveles de estas dos variables (Modelo 1):

• **Modelo 1:**

$$Rendimiento = 196,59 - 1,23*\%Mdel + 1,20*Pr_{2+3}$$

Ambientes con mayores precipitaciones en el periodo reproductivo y con menor presencia de bloques masivos delta, fueron los que produjeron los mayores rendimientos dentro de este grupo.

El segundo modelo, (Modelo 2) ( $R^2 = 0.60$ ), obtenido a partir de ambientes con  $Pr_{2+3}$  mayores a 180 mm, sugiere que la aptitud del ambiente puede ser predicha (con un error de predicción de **45 gr/m<sup>2</sup> o 450 kg/ha**) por la radiación incidente acumulada en el subperiodo R5-R7, el contenido de materia orgánica del suelo y la presencia de estados masivos delta en el perfil del suelo:

• **Modelo 2:**

$$Rendimiento = - 678,23 + 45,87*MO - 1,39*\%Mdel + 3,07*Ra3 - 0,0025*Ra3^2$$

Ambientes con mayor Ra3, mayor % MO y menor presencia de estados masivos delta en el perfil del suelo, fueron los que produjeron los mayores rendimientos cuando las precipitaciones en el periodo reproductivo fueron de moderadas a abundantes. Es importante destacar que un modelo alternativo (Modelo 3) ( $R^2 = 0.60$ ), que incorpora la variable conductividad hidráulica saturada en lugar de %Mdel mostró un ajuste sólo ligeramente menor (**48 gr/m<sup>2</sup> o 480 kg/ha** de error de predicción) al Modelo 2.

Tabla 1. Efectos (en porcentaje) del ambiente, genotipo e interacción sobre la variación en rendimientos de soja, bajo siembra directa en el Sur de Santa Fe.

| Campaña | Ambiente | Genotipo | Genotipo x Ambiente |
|---------|----------|----------|---------------------|
| 2001/02 | 63       | 19       | 18                  |
| 2002/03 | 65       | 16       | 18                  |
| 2003/04 | 83       | 0        | 17                  |

Tabla 2. Variables climáticas y de suelo en la región de cultivo de soja en el Sur de Santa Fe.

| Variable Climáticas                                 | Abreviatura | Unidad                | Media | Mínimo | Máximo |
|---|-------------|-----------------------|-------|--------|--------|
| Radiación incidente acumulada en el subperiodo 1    | Ra1         | Mjoule/m <sup>2</sup> | 929   | 560    | 1390   |
| Radiación incidente acumulada en el subperiodo 2    | Ra2         | Mjoule/m <sup>2</sup> | 658   | 431    | 1033   |
| Radiación incidente acumulada en el subperiodo 3    | Ra3         | Mjoule/m <sup>2</sup> | 528   | 332    | 706    |
| Temperatura media diaria, promedio del subperiodo 1 | Tm1         | °C                    | 23.3  | 21.7   | 25.2   |
| Temperatura media diaria, promedio del subperiodo 2 | Tm2         | °C                    | 24.5  | 22.9   | 26.3   |
| Temperatura media diaria, promedio del subperiodo 3 | Tm3         | °C                    | 23.4  | 20.2   | 25.9   |
| Fotoperíodo diario, promedio del subperiodo 1       | Fot1        | Hs de luz             | 15.08 | 14.54  | 15.20  |
| Fotoperíodo diario, promedio del subperiodo 2       | Fot2        | Hs de luz             | 14.63 | 13.98  | 15.17  |
| Fotoperíodo diario, promedio del subperiodo 3       | Fot3        | Hs de luz             | 13.47 | 12.76  | 14.42  |
| Precipitaciones acumuladas en el subperiodo 1       | Pr1         | mm                    | 207   | 57     | 421    |
| Precipitaciones acumuladas en los subperiodos 2 y 3 | $Pr_{2+3}$  | mm                    | 286   | 66     | 532    |

| Variables de Suelo                                 | Abreviatura | Unidad | Media   | Mínimo  | Máximo  |
|--|-------------|--------|---------|---------|---------|
| Humedad inicial del suelo hasta 2 m de profundidad | AUI         | mm     | 263     | 200     | 380     |
| Contenido de materia orgánica en el horizonte A    | MO          | %      | 3.02    | 2.23    | 3.65    |
| Profundidad hasta el horizonte B textural          | PrB2t       | cm     | 25.9    | 14.7    | 33.3    |
| % de estados masivos delta en el perfil del suelo  | %Mdel       | %      | 20.2    | 0.0     | 54.0    |
| Presencia de pisos subsuperficiales compactos.     | %pisos      | %      | 48.6    | 19.0    | 93.0    |
| Conductividad hidráulica saturada                  | Chid        | cm/seg | 0.00070 | 0.00030 | 0.00150 |

• **Modelo 3:**

$$\text{Rendimiento} = -669,82 + 34,77 * \text{MO} + 101625,87 * \text{Chid} + 2,82 * \text{Ra3} - 0,0023 * \text{Ra3}^2$$

El Modelo 3, sugiere que ambientes con mayor Ra3, mayor % MO y alta velocidad de infiltración de agua (conductividad hidráulica saturada) producirán mayores rindes cuando las precipitaciones en el período reproductivo sean de moderadas a abundantes. Ambos modelos indican que cuando los ambientes son más favorables en relación a la disponibilidad hídrica, algunas propiedades físicas del suelo (que implicarían mayor disponibilidad de agua a través de mejor infiltración), junto con la oferta de radiación (que puede traducirse en mayor producción de materia seca), son suficientes para explicar la variabilidad en los rendimientos.

En las Tablas 3 y 4, se muestran valores promedio de rendimientos para grupos de ambientes clasificados según la “aptitud” sugerida por las variables identificadas como de mayor peso. Los ambientes fueron agrupados según los siguientes valores umbrales para cada variable: 23% para %Mdel, 3.09% para MO, 540 MJoule/m<sup>2</sup> para Ra3 y 150 mm para Pr<sub>2+3</sub> (valores obtenidos a partir de gráficos de residuos parciales). Las variables fueron clasificadas como “Mayor” o “Menor” según el caso estudiado mostrase valores superiores o inferiores al umbral determinado para cada una.

**Conclusiones**

Las variaciones en el rendimiento de los diferentes ambientes para el cultivo de soja bajo siembra directa en el Sur de Santa Fe, pueden ser caracterizadas mediante pocas variables de clima y suelo. El valor de 180 mm de precipitaciones acumuladas durante el período reproductivo, separó situaciones de diferente comportamiento. Para precipitaciones menores a 180 mm, la cantidad acumulada de éstas conjuntamente con la presencia de estados masivos delta en el suelo, determinan las variaciones del rendimiento. Los ambientes de menor aptitud (Menor Pr<sub>2+3</sub> y Mayor %

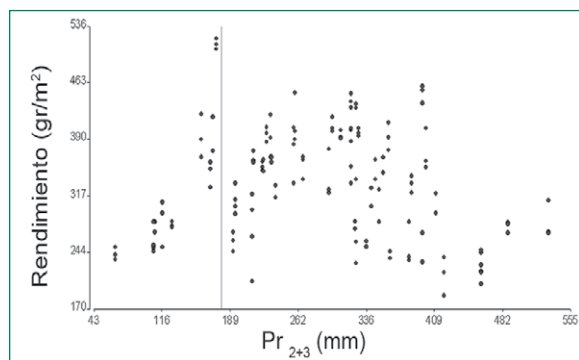


Figura 1. Relación entre rendimiento y precipitaciones en el período reproductivo.

Mdel) sufrieron una merma de rendimiento del 33% respecto a los de mejor aptitud productiva. Para precipitaciones mayores a 180 mm, las variaciones en rendimiento, se explican por diferencias en la radiación acumulada en el llenado de granos, y por factores de suelo, como el contenido de materia orgánica combinado con la presencia de estados masivos delta o la conductividad hidráulica saturada. Los ambientes de menor aptitud (Menor Ra3, Menor MO y Mayor %Mdel) sufrieron mermas del rendimiento de hasta el 35% respecto a los de mejor aptitud productiva.

Si bien el contenido de agua útil inicial (AUI) del perfil de suelo, es una importante variable agronómica a tener en cuenta, no quedó incluida en ninguno de los modelos obtenidos. Esto probablemente se deba a que, para todos los casos observados en estos ensayos, los valores de AUI fueron moderadamente altos y de baja variación entre ellos.

Tabla 3. Rendimiento promedio para ambientes con Pr<sub>2+3</sub> menores a 180 mm.

| Pr <sub>2+3</sub> | %Mdel | Rendimiento (kg/ha) | % de rinde máximo |
|-------------------|-------|---------------------|-------------------|
| Mayor             | Menor | 3925                | 100               |
| Mayor             | Mayor | 3662                | 93                |
| Menor             | Mayor | 2646                | 67                |

Tabla 4. Rendimiento promedio para ambientes con Pr<sub>2+3</sub> mayores a 180 mm.

| Ra3   | MO    | %Mdel | Rendimiento (kg/ha) | % de rinde máximo |
|-------|-------|-------|---------------------|-------------------|
| Mayor | Mayor | Menor | 3961                | 100               |
|       |       | Mayor | 3879                | 98                |
| Menor | Mayor | Menor | 3651                | 92                |
|       |       | Mayor | 2538                | 64                |
| Mayor | Menor | Menor | 3238                | 82                |
|       |       | Mayor | 3235                | 82                |
| Menor | Menor | Menor | 2725                | 69                |
|       |       | Mayor | 2573                | 65                |

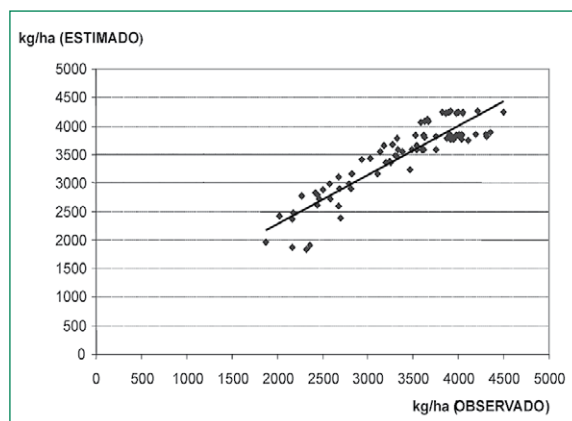


Figura 2. Rendimiento real vs. rendimiento predicho por el Modelo 2.

## Bibliografía consultada

**Bodrero M., J. Andriani, S. Bacigaluppo, G. Gerster, A. Quijano, J. Enrico, R. Martignone, 2004.** 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, pág. 8-16. EEA INTA Oliveros.

**Bodrero M., S. Bacigaluppo, J. Andriani, J. Capurro, D. Damen, J. Enrico, J. Felizia, O. Gentili, C. González, A. Manlla, A. Malmantile, J. Méndez, G. Prieto, J. Rossi, N. Trentino, 2004.** Evaluación de cultivares de soja de los GM III al VI en siembras de primera en disitintos ambientes del sur de Santa Fe. Campaña 2003/04. Para Mejorar la Producción N° 27, INTA EEA Oliveros, 2004.

**Bodrero M., S. Bacigaluppo, J. Andriani, J. Capurro, D. Damen, J. Enrico, J. Felizia, O. Gentili, C. González, S. Leguizamón, R. Massaro, J. Méndez, R. Pagani, G. Prieto, N. Trentino, 2003.** Evaluación de cultivares de soja de los GM III al VI en siembras de primera en distintos ambientes del sur de Santa Fe. Campaña 2002/03. Para Mejorar la Producción N° 24, INTA EEA Oliveros, 2003.

**Bodrero, M., S. Bacigaluppo; J. Andriani; J. Capurro; D. Damen; J. Felizia; A. Gelín; O. Gentili; C. González; A. Manlla; A. Malmantile; J. Méndez; G. Prieto; J. Rossi; N. Trentino. 2002.** Evaluación de cultivares de soja

de los GM III al VI en siembras de primera en distintos ambientes del sur de Santa Fe. Campaña 2001/02. Para Mejorar la Producción N° 21, INTA EEA Oliveros, 2002.

**Dardanelli J.; M. Balzarini; M.J. Martínez; M. Cuniberri; S. Resnik; S.F. Ramunda; R. Herrero; H. Baigorri. 2006.** Soybean Maturity Groups, Environments and their Interaction define Mega-environments for Seed Composition in Argentina. Crop Science, in press.

**Fehr W.R y C.E. Caviness. 1977.** Stages of soybean development, Ames, IA. Iowa State University. Special Report 80. 11 p.

**Gerster, G.; A. Gargicevich; G. Cordone; C. González. 2002.** Factores edáficos y prácticas culturales asociadas al rendimiento de soja. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Puerto Madryn, 2002.

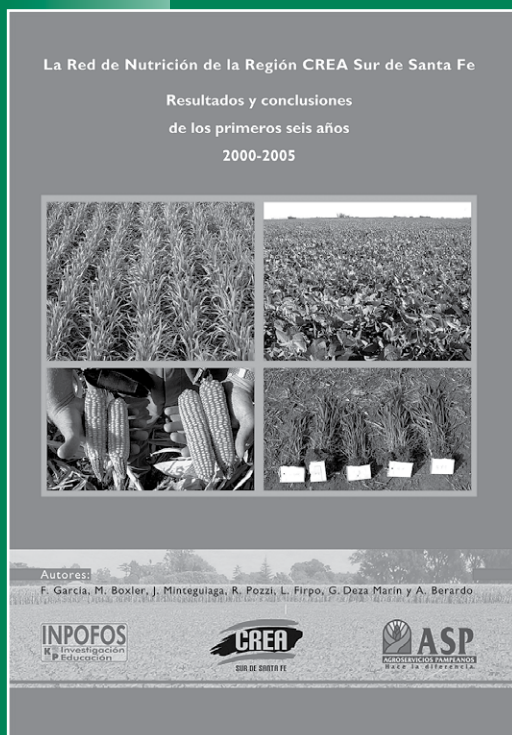
**Gerster Guillermo. 2001.** Incidencia del estado estructural del suelo sobre el rendimiento del cultivo de soja. Para Mejorar la Producción N° 18, pág 39-42. EEA INTA Oliveros.

**InfoStat 2004.** Universidad Nacional de Córdoba. Estadística y Diseño FCA [www.infostat.com.ar](http://www.infostat.com.ar).

**RIAP. Red de Información Agroeconómica para la Región Pampeana, INTA. 2006.** <http://riap.inta.gov.ar>

**Yan, W., L.A. Hunt, Q. Sheng y Z. Szlavncs. 2000.** Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. Crop Sci. 40: 597-605. ■

## Nueva publicación



## La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe Resultados y conclusiones de los primeros seis años 2000-2005

La Región Sur de Santa Fe del movimiento CREA, con la colaboración de INPOFOS Cono Sur y el auspicio de Agroservicios Pampeanos (ASP), implantó en la campaña 2000/01 una red de ensayos a largo plazo con un protocolo común. Los objetivos generales de la Red son:

- Determinar respuestas (directas y residuales) de los cultivos dentro de la rotación (maíz, trigo, soja de primera y soja de segunda) a la aplicación de N, P y S en diferentes ambientes de la región
- Evaluar metodologías de diagnóstico de la fertilización nitrogenada, fosfatada y azufrada
- Evaluar deficiencias y respuestas potenciales a otros nutrientes: potasio (K), magnesio (Mg), boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn)

- Costo de la publicación: \$10 (diez pesos argentinos)
- Costo de envío: \$4 (cuatro pesos argentinos)
- La publicación puede ser adquirida contactando a:  
IPNI-INPOFOS Cono Sur At. Sra. Laura Pisauri.  
Tel/Fax (54) 011 4798 9939 [lpisauri@ipni.net](mailto:lpisauri@ipni.net)