

RENDIMIENTOS POTENCIALES DE SOJA Y REDUCCIÓN DE BRECHAS ASOCIADAS AL USO DE INSUMOS NO CONVENCIONALES

Ing. Agr. Guido Di Mauro¹, Ing. Agr. Alicia Condori², Ing. Agr. Santiago Gallo³, Ing. Agr. Miguel Boxler³, Ing. Agr. Ricardo Pozzi³, Dr. José Luis Rotundo¹ & Dr. Fernando Salvaggiotti²

¹ IICAR-CONICET, Facultad de Ciencias Agrarias UNR – ² EEA INTA Oliveros – ³ CREA Región Sur de Santa Fe

dimauro@iicar-conicet.gob.ar

Palabras claves: soja, potencial, brecha, insumos, ambiente.

INTRODUCCIÓN

Según el Plan Estratégico Agroalimentario, existe en Argentina el objetivo de alcanzar una producción de 70 millones de toneladas de oleaginosas y 84 millones de toneladas en cereales para el año 2020. La mayor parte de los suelos con aptitud agrícola han sido ya ocupados, y la expansión a nuevas áreas enfrenta un riesgo ambiental severo debido a la fragilidad de los ecosistemas (Foley et al., 2011). Entonces, el aumento de la producción, estará ligado fuertemente a lograr una mayor producción por unidad de superficie y el desafío es poder diseñar una intensificación sustentable de la agricultura (Cassman, 1999).

La intensificación agrícola sustentable involucra estrategias de manejo de los sistemas de producción y de los cultivos que permitan incrementar la producción de granos haciendo un uso eficiente de los recursos del ambiente. Para diseñar estas estrategias, además de conocer la oferta de recursos ambientales para establecer las secuencias de cultivos a incorporar en un sistema, es importante cuantificar el rendimiento potencial de los cultivos (R_{pot}) y conocer la brecha de rendimiento existente con el rendimiento promedio del productor (R_{prod}) (Lobell et al., 2009). Se entiende como R_{pot} al rendimiento de un genotipo adaptado, el cual es cultivado en condiciones favorables sin limitaciones de agua, nutrientes, plagas, ni enfermedades (Evans, 1993). Para planteos de producción en secano, como los que se dan en la zona pampeana, el rendimiento potencial limitado por agua (R_{pot_W}) es el objetivo a alcanzar (Lobell et al., 2009). El rendimiento obtenido por el productor (R_{prod}) será la resultante de la combinación del manejo de los factores limitantes de la producción (agua y nutrientes) y los factores reductores del rendimiento (malezas, plagas, enfermedades) (Van Ittersum and Rabbinge, 1997).

El impacto de una práctica de manejo será mayor en la medida que la brecha de rendimiento sea más grande. En general se consideran brechas “explotables” a aquellas que superan al 20% ($R_{pot} - R_{pot_W} / R_{pot}$ o $R_{pot_W} - R_{prod} / R_{pot_W}$ según el factor limitante) (Lobell et al.,

2009; Van Ittersum et al., 2013). Mientras que la brecha potencial ($R_{pot} - R_{pot_W}$) es importante reducirla en planteos en donde el agua no es limitante, en condiciones de producción de secano (i.e. agua como principal factor limitante) donde la disponibilidad de nutrientes ha sido corregida y los factores reductores controlados, es importante cuantificar la brecha explotable ($R_{pot_W} - R_{prod}$). Para soja esta brecha dependerá de la fecha de siembra, el grupo de madurez, como así también de la disponibilidad hídrica en el ciclo del cultivo y la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos. Para cuantificar tanto el R_{pot} , el R_{pot_W} , y las brechas de producción pueden utilizarse diversas metodologías (Lobell et al., 2009; Sadras et al., 2015); entre las que se incluyen la experimentación a campo (Hall et al., 2013), como así también modelos de simulación (Grassini et al., 2011, 2015b; Aramburu Merlos et al., 2015).

En la zona núcleo de producción sojera argentina, existe la inquietud entre los productores de encontrar manejos que maximicen el rendimiento del cultivo, debido a la visión de que los aumentos de rinde año a año no muestran incrementos (Ray et al., 2012), sugiriendo que R_{prod} estaría cercano a R_{pot_W} . Una alternativa posible consistiría en aumentar R_{prod} a través del uso de un paquete tecnológico con mayor nivel de insumos diseñado para lograr altos rendimientos (Ruffo et al., 2015; Orłowski et al., 2016). En el mercado existen tecnologías de uso no generalizado, que podrían contribuir a reducir esta brecha de rendimiento y cuyos efectos en conjunto sobre el R_{pot} y la brecha de rendimiento no se conocen. Entre ellas se incluyen: el tratamiento químico de semillas, la fertilización con micronutrientes, la aplicación de reguladores de crecimiento vegetal y el uso de fungicidas preventivos, entre otros. Por otra parte, distintos estudios han mostrado que la respuesta de la soja al agregado de estos insumos muchas veces no sigue un patrón (Marburger et al., 2016; Orłowski et al., 2016), por lo cual es necesario entender qué variables de manejo y del ambiente condicionan la probabilidad de respuesta al agregado de estos insumos.

Los objetivos de este trabajo fueron: i) estimar el rendimiento potencial del cultivo sin limitaciones hídricas (R_{pot}) y la brecha asociada a disponibilidad hídrica ($R_{pot} - R_{pot_W}$), utilizando modelos de simulación en distintos ambientes de producción sojera de la región sur de Santa Fe y este de Córdoba; ii) estimar la brecha de rinde explotable por el productor ($R_{pot_W} - R_{prod}$); iii) determinar en qué medida puede reducirse la brecha explotable mediante un planteo mejorado por uso de insumos y iv) identificar las condiciones ambientales que maximicen la probabilidad de respuesta a un planteo mejorado por el uso de insumos. Para poner estos objetivos a prueba, se evaluaron dos paquetes de tecnologías con distinta participación de insumos, en 27 ambientes de la región sur de Santa Fe y este de Córdoba.

METODOLOGÍA

Red de ensayos y sistemas productivos bajo estudio

Se realizó una red de ensayos a campo durante dos campañas (2014/2015 y 2015/2016, a partir de ahora, 2014 y 2015, respectivamente) en 14 localidades del sur de Santa Fe y este de Córdoba (Tabla 1). A su vez en cada localidad, los ensayos se implantaron

en dos lotes con diferente productividad de los cultivos según la experiencia del asesor de cada establecimiento (Tabla 1): i) lotes que expresaron consistentemente rendimientos mayores a 4500 kg ha⁻¹ en las últimas campañas (Alta productividad) y ii) lotes con rendimiento entre 3000 y 4500 kg ha⁻¹ (Mediana productividad). Estos lotes estaban separados entre sí no más de 10 km dentro de cada localidad. Sólo una localidad en 2014 tuvo un lote bajo análisis (Te_14M). Los lotes de producción evaluados pertenecieron a empresas nucleadas en la “Región Sur de Santa Fe de AACREA”. La combinación de año, localidad y lote particular, permitió explorar 27 ambientes (Tabla 1).

En cada uno de estos ambientes, se evaluaron dos tratamientos contrastantes en el uso de insumos: i) manejo productor o convencional y ii) manejo mejorado por insumos o de alta tecnología (Tabla 2). Las dosis de cada insumo se basaron en las recomendaciones de cada compañía proveedora del mismo. El cultivar evaluado en todos los sitios fue DM 4612. Cada ambiente tuvo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones (excepto Bo_14A y Bo_14M que tuvo dos repeticiones, y VT_14A y VT_14M dos repeticiones del manejo convencional). Las dimensiones de cada macroparcela fueron 15 m de ancho y 200 m de longitud.

Caracterización ambiental

Se exploraron un total de 39 variables de caracterización ambiental, las cuales fueron clasificadas en tres grupos: variables de manejo agronómico, variables meteorológicas y variables edáficas. Las variables de manejo agronómico fueron densidad de plantas y distancia entre surcos. Cada una fue seleccionada por cada productor en base al manejo que realizaría para alcanzar la máxima producción en cada ambiente. Todos los ensayos se manejaron bajo siembra directa y en seco, siendo representativos del manejo de los sistemas de producción de la zona.

Las variables climáticas se estimaron utilizando los datos fenológicos y meteorológicos. Se registró la radiación solar diaria, la temperatura media del aire, y las precipitaciones. Las precipitaciones diarias fueron registradas en cada lote. Los valores de radiación global se estimaron a partir de datos satelitales (<http://power.larc.nasa.gov/>), mientras que los datos de temperatura fueron obtenidos de estaciones meteorológicas cercanas (EEA INTA Oliveros, EEA INTA Pergamino, EEA INTA Rafaela, EEA INTA Marcos Juárez, AER INTA Las Rosas, AER INTA Venado Tuerto). Los estadíos plena floración (R2), inicio del llenado de las semillas (R5), y madurez fisiológica (R7) (Fehr and Caviness, 1977) fueron simulados utilizando el software SIFESOJA V modelo 2010 (Peltzer y Peltzer 2010). Este modelo simula las etapas fenológicas de soja utilizando como datos: latitud, variedad y fecha de siembra. Las variables meteorológicas se calcularon para tres subperíodos dentro del ciclo de cultivo: i) vegetativa: desde la siembra hasta R2; ii) diferenciación de semillas: de R2 a R5, y iii) llenado de semillas: de R5 a R7.

Las variables edáficas fueron agrupadas en base a parámetros físicos y químicos. Se tomaron muestras compuestas de suelo (20 sub-muestras) a 20 cm de profundidad antes de la

siembra. El muestreo se realizó de forma aleatoria, recorriendo y cruzando cada lote con el fin de tener una muestra representativa en la zona donde se implantaron las parcelas. Se determinaron: contenido de carbono (Walkley y Negro 1934), fósforo Bray I (Bray y Kurtz 1945), pH (Reed y Cummings 1945), capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, potasio mediante Acetato de amonio, cinc, manganeso, cobre, hierro y boro (Ext. c/DTPA-Espectrofotometría A.A.) El contenido de carbono fue convertido a la materia orgánica, utilizando un factor de recuperación de 0,58. La caracterización física de los suelos se realizó

Tabla 1. Ubicación de los lotes bajo estudio en las campañas 2014/15 y 2015/16. Todos los lotes evaluados corresponden a socios AACREA nucleados en la Región Sur de Santa Fe. Productividad del lote se basa en un criterio del productor.

| Año | Localidad | Productividad del lote | Ambiente (Código) | Latitud (decimal) | Longitud (decimal) |
|------------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 2014 | Bouquet | Alta productividad | Bo_14A | -32,4 | -61,9 |
| | Bouquet | Mediana productividad | Bo_14M | -32,5 | -61,9 |
| | Carlos Pellegrini | Alta productividad | CP_14A | -32,0 | -61,5 |
| | Carlos Pellegrini | Mediana productividad | CP_14M | -32,0 | -61,4 |
| | Corral de Bustos | Alta productividad | CB_14A | -33,2 | -62,1 |
| | Corral de Bustos | Mediana productividad | CB_14M | -33,2 | -62,1 |
| | Estación Iturraspe | Alta productividad | ET_14A | -32,4 | -61,8 |
| | Estación Iturraspe | Mediana productividad | ET_14M | -32,4 | -61,8 |
| | General Baldissera | Alta productividad | GB_14A | -33,1 | -62,4 |
| | General Baldissera | Mediana productividad | GB_14M | -33,1 | -62,4 |
| | Rafaela | Alta productividad | Ra_14A | -31,2 | -61,7 |
| | Rafaela | Mediana productividad | Ra_14M | -31,2 | -61,7 |
| | Teodelina | Mediana productividad | Te_14M | -34,2 | -61,6 |
| | Venado Tuerto | Alta productividad | VT_14A | -33,8 | -62,0 |
| | Venado Tuerto | Mediana productividad | VT_14M | -33,8 | -62,0 |
| 2015 | Bouquet | Alta productividad | Bo_15A | -32,4 | -61,9 |
| | Bouquet | Mediana productividad | Bo_15M | -32,4 | -61,9 |
| | Casalegno | Alta productividad | Ca_15A | -32,3 | -61,1 |
| | Casalegno | Mediana productividad | Ca_15M | -32,3 | -61,1 |
| | Colonia Italiana | Alta productividad | CI_15A | -33,3 | -62,2 |
| | Colonia Italiana | Mediana productividad | CI_15M | -33,3 | -62,2 |
| | Estación Iturraspe | Alta productividad | EI_15A | -32,4 | -61,8 |
| | Estación Iturraspe | Mediana productividad | EI_15M | -32,4 | -61,8 |
| | Rafaela | Alta productividad | Ra_15A | -31,2 | -61,7 |
| | Rafaela | Mediana productividad | Ra_15M | -31,2 | -61,7 |
| | Teodelina | Alta productividad | Te_15A | -34,2 | -61,5 |
| | Teodelina | Mediana productividad | Te_15M | -34,2 | -61,5 |

durante el invierno posterior a la cosecha de los experimentos. Se midió: resistencia a la penetración, conductibilidad hidráulica, estabilidad estructural y densidad aparente. La resistencia a la penetración fue medida con penetrómetro digital (Fieldscout SC 300) a intervalos de 2.5 cm hasta 45 cm de profundidad, en 20 estaciones de muestreo ubicadas aleatoriamente en cada lote. Se registró la máxima resistencia observada y a que profundidad ocurrió. La conductividad hidráulica se midió in situ, en condiciones de capacidad de campo utilizando 10 permeámetros de disco por lote (Perroux y White, 1988). Se determinó la densidad aparente en dos sitios de muestreo por ambiente, mediante el método del cilindro

hasta los 30 cm de profundidad. A su vez, previo a la siembra de los ensayos, se realizaron muestreos de humedad edáfica por gravimetría a la profundidad de cada horizonte según la serie de suelo de cada lote. Se realizaron las estimaciones de agua útil a la siembra (SAW). SAW fue calculada a partir de datos de contenido de agua volumétrica del suelo en cada horizonte como la diferencia entre el contenido volumétrico de agua observada y el punto de marchitez permanente (Ritchie, 1981), multiplicada por la profundidad del horizonte. Los valores de punto de marchitez permanente y capacidad de campo fueron estimados a partir de datos texturales de cada serie de suelo, utilizando el software DSSAT 4.6 (Jones et al., 2003). A su vez, durante la medición de humedad edáfica, se registró la presencia (y su profundidad) o ausencia de napa en cada ambiente.

Tabla 2. Tecnologías de insumos evaluados en cada ambiente. Las dosis fueron recomendadas por las compañías productoras de cada insumo.

| Insumo | Momento | Manejo Convencional | Manejo de alta tecnología |
|-------------------------|---------|--|---|
| Fertilización | Siembra | Fertilización de base con P y S más frecuente. | Fertilización de base más frecuente + 200 kg ha ⁻¹ Micro Essentials (Mosaic, 24 kg ha ⁻¹ N; 80 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅ ; 20 kg ha ⁻¹ S; 2 kg ha ⁻¹ Zn). |
| Tratamiento de semillas | Siembra | Tratamiento más frecuente | Insecticida + Fungicida; Inoculación con <i>PGPRs</i> + <i>Bradyrhizobium japonicum</i> |
| Fungicida | R3 | Estrobilurina + Triazol | Estrobilurina + Triazol |
| Insecticida | R3 | Coragen + Dinno (Du Pont) | Coragen + Dinno (Du Pont) |
| Bioregulador | R3 | - | Stimulate (Stoller) |
| Fertilización | R3 | - | CaB (Stoller) |

Estimación de rendimientos potenciales, brechas de rendimiento y respuesta al uso de insumos

Se realizó la cosecha total de cada macroparcela con cosechadora mecánica. Los valores de rendimiento fueron ajustados a 13.5% de humedad. Se realizó un análisis de la varianza para determinar el efecto del ambiente, el tratamiento (manejo de insumos) y sus interacciones sobre el rendimiento. Con los rendimientos de cada tratamiento se calculó la respuesta relativa a la aplicación de insumos como: $(R_{alta} - R_{prod})/R_{prod}$; donde R_{prod} es el rendimiento del manejo convencional de insumos, y R_{alta} es el rendimiento del manejo de alta tecnología. También se calculó el rendimiento promedio de cada uno de los ambientes evaluados.

Se exploraron gráfica y analíticamente posibles colinealidades entre variables de caracterización ambiental (edáficas y meteorológicas), mediante el uso del paquete *PerformanceAnalytics* del software R (<http://www.R-project.org/>). En aquellos caso en dos variables resultaron significativamente correlacionadas se procedió a seleccionar una de ellas para el subsiguiente análisis. Posteriormente, se utilizaron técnicas de minería de datos (técnicas de regresión y clasificación) usando el paquete *randomForest* (Breiman and Cutler, 2015) del software estadístico R; para identificar variables ambientales y de manejo

responsables de la magnitud de las respuestas al uso de insumos. El porcentaje de incremento en el cuadrado medio del error (% IncMSE) se utilizó para clasificar las variables candidatas según su importancia para explicar la variación en la respuesta al uso de insumos. Las variables seleccionadas fueron aquellas que al no contemplarlas en el análisis, incrementaban significativamente el IncMSE. Con las diez variables más explicativas, se exploraron distintos modelos de regresión múltiple, que variaron según el número de variables tenidas en cuenta. El criterio para seleccionar el modelo fue el criterio de información de Akaike (AIC) (Burnham et al., 2011).

Las estimaciones de R_{pot} y R_{pot_W} para cada ambiente se realizaron utilizando el modelo de simulación CROPGRO, incluido dentro del paquete DSSAT (Jones et al., 2003). Para ello se utilizó la información de la caracterización del cultivar (coeficiente genético), del suelo, de manejo y los datos meteorológicos diarios de cada uno de los ambientes según Grassini et al., 2015a. La brecha de rendimiento fue estimada de dos formas (%): i) brecha asociada a disponibilidad hídrica $(R_{pot} - R_{pot_W}) / R_{pot}$ y ii) brecha explotable por el productor $(R_{pot_W} - R_{prod}) / R_{pot_W}$

RESULTADOS

Objetivo (i) Estimar el rinde potencial del cultivo sin limitaciones hídricas y la brecha asociada a disponibilidad hídrica, utilizando modelos de simulación en distintos ambientes de producción sojera de la región sur de Santa Fe y este de Córdoba.

El R_{pot} del cultivo de soja, estimado por el modelo de simulación, mostró valores entre 5810 y 7306 kg ha⁻¹, mientras que el R_{pot_W} osciló entre 3818 y 6203 kg ha⁻¹ (Fig.1), Promediando todos los ambientes la brecha debido a la disponibilidad hídrica fue de 19%, oscilando entre 2 y 43 % (Fig.2a). A su vez, se observaron marcadas diferencias entre los ambientes pertenecientes a diferentes campañas. La brecha debido a disponibilidad hídrica fue, en promedio, del 9% en 2014, mientras que en 2015, dicho valor ascendió al 31%. El 56% de los ambientes observados presentaron valores de brecha asociada a disponibilidad hídrica menores al 19%. Por otro lado, los lotes identificados como de altos rendimientos vs. lotes de medianos rendimientos no fueron contrastantes en lo referente a brecha debido a disponibilidad hídrica ($p = 0.65$). La brecha debido a disponibilidad hídrica fue de 20.1 y 17.5 %, para los lotes de altos y medianos rendimientos respectivamente.

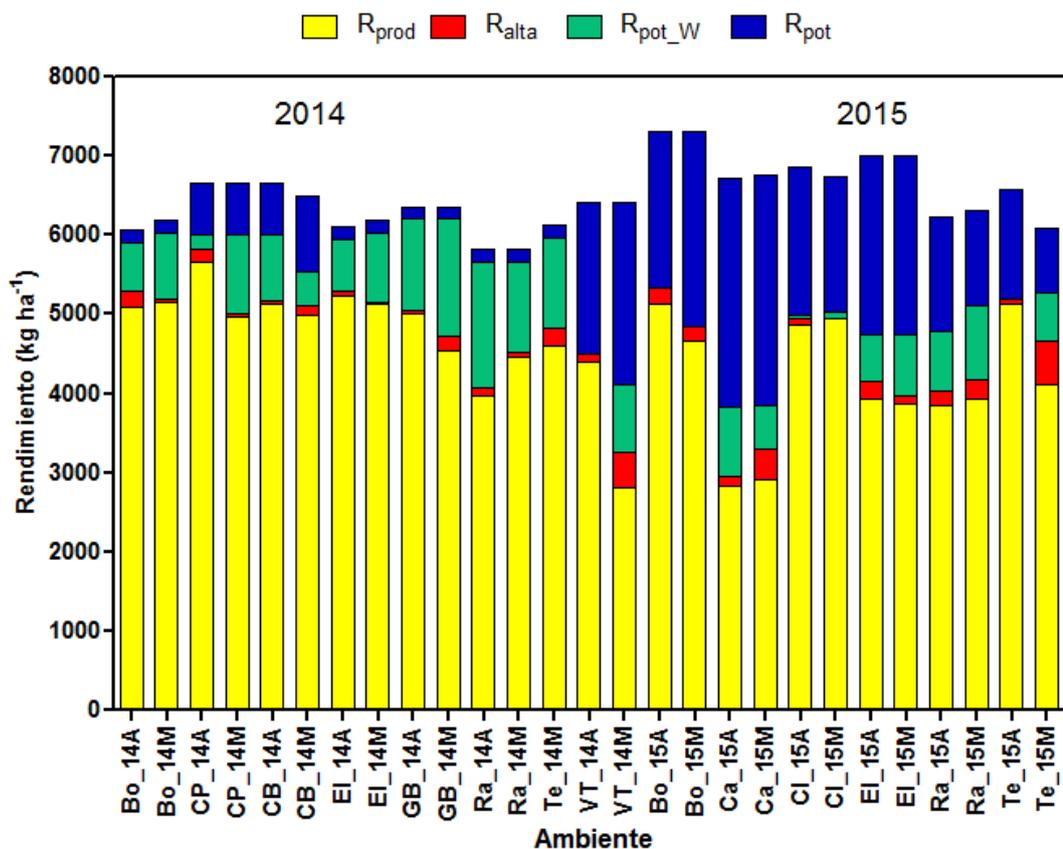


Fig.1. Rendimiento potencial (R_{pot}), potencial limitado por agua (R_{pot_W}), rendimiento promedio manejo de alta tecnología (R_{alta}) y rendimiento promedio manejo convencional (R_{prod}) de la red de ensayos. 2014 y 2015 corresponden las campañas 2014/15 y 2015/16 respectivamente. El detalle de los ambientes puede observarse en la Tabla 1.

Objetivo (ii) Estimar la brecha de rinde explotable por el productor.

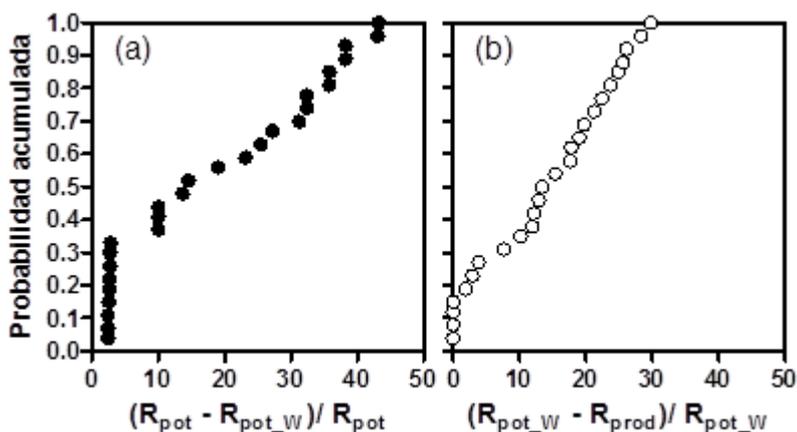


Fig.2. Probabilidad acumulada de brechas relativas (%) debido a disponibilidad hídrica (panel a) y brechas explotable por el productor (panel b), en 27 ambientes de la región Sur de Santa Fe, evaluados durante dos campañas agrícolas.

Promediando todos los ambientes la brecha explotable por el productor fue de 14%, oscilando entre 0 y 29 % (Fig.2b). El 69% de los ambientes observados presentaron valores de

brecha explotable menores al 20%. A su vez, se observaron diferencias en la brecha explotable por el productor según la productividad del lote, siendo 9.8 y 17.5 % en los lotes de altos y medianos rendimientos respectivamente.

Objetivo (iii) Determinar en qué medida puede reducirse la brecha explotable mediante un planteo mejorado por uso de insumos.

En promedio el rendimiento del cultivo en toda la red fue de 4568 kg ha⁻¹. Se exploraron ambientes con rendimientos promedios que variaron desde 2897 en Ca_15A a 5731 kg ha⁻¹ en CP_14A (Fig.1).

Se observaron interacciones significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos aplicados (manejo convencional vs manejo de alta tecnología) con los ambientes seleccionados (Tabla 3). El manejo convencional expresó un rendimiento similar al manejo de alta tecnología (LSD = 254 kg ha⁻¹) en todos los ambientes exceptuando sólo tres: VT_14M; Ca_15M y Te_15M, con una respuesta promedio al aplicar el manejo de insumos mejorado de 15.7%, 13.3% y 13.4% respectivamente (Tabla 3).

Tabla 3. Rendimiento ajustado (13.5% de humedad) de dos paquetes tecnológicos con distinta participación de insumos. Cada paquete fue evaluado en 27 ambientes del sur de Santa y este de Córdoba, en experimentos a campo.

| Ambiente (Código) | Manejo Convencional (kg ha ⁻¹) | Manejo de alta tecnología (kg ha ⁻¹) | Respuesta (kg ha ⁻¹) (%) | |
|----------------------|--|--|---|------|
| Bo_14A | 5080 | 5287 | 207 | 4,1 |
| Bo_14B | 5156 | 5194 | 37 | 0,7 |
| CP_14A | 5649 | 5812 | 163 | 2,9 |
| CP_14B | 4963 | 5007 | 43 | 0,9 |
| CB_14A | 5121 | 5159 | 39 | 0,8 |
| CB_14B | 4977 | 5113 | 137 | 2,7 |
| EI_14A | 5226 | 5287 | 60 | 1,2 |
| EI_14B | 5123 | 5142 | 19 | 0,4 |
| GB_14A | 5006 | 5054 | 48 | 1,0 |
| GB_14B | 4547 | 4723 | 176 | 3,9 |
| Ra_14A | 3968 | 4063 | 96 | 2,4 |
| Ra_14B | 4453 | 4513 | 60 | 1,3 |
| Te_14B | 4600 | 4821 | 220 | 4,8 |
| VT_14A | 4390 | 4507 | 117 | 2,7 |
| VT_14B | 2820 | 3261 | 441 | 15,7 |
| Bo_15A | 5121 | 5340 | 219 | 4,3 |
| Bo_15B | 4661 | 4848 | 186 | 4,0 |
| Ca_15A | 2838 | 2956 | 117 | 4,1 |
| Ca_15B | 2904 | 3289 | 385 | 13,3 |
| Cl_15A | 4870 | 4946 | 76 | 1,6 |
| Cl_15B | 4953 | 4934 | -19 | -0,4 |
| EI_15A | 3925 | 4158 | 233 | 5,9 |

| | | | | |
|--------|------|------|-----|------|
| El_15B | 3861 | 3971 | 111 | 2,9 |
| Ra_15A | 3845 | 4027 | 182 | 4,7 |
| Ra_15B | 3926 | 4171 | 244 | 6,2 |
| Te_15A | 5127 | 5185 | 58 | 1,1 |
| Te_15B | 4103 | 4653 | 549 | 13,4 |

Promediando todos los ambientes, la aplicación de insumos no convencionales en la zona bajo estudio trajo aparejado un aumento de rinde de aproximadamente 156 kg ha⁻¹ (p>0.001), o lo que es lo mismo, el manejo de insumos mejorado rindió un ~4 % más que el convencional. Sin embargo, la magnitud y el sentido de las respuestas variaron considerablemente entre los ambientes (Tabla 3).

Objetivo (iv) Identificar condiciones ambientales y de manejo que maximicen la probabilidad de respuesta a un planteo mejorado por el uso de insumos.

Las variables de caracterización edáfica: CIC y materia orgánica (coef. pearson=0.52; p>0.001), P y materia orgánica (coef. pearson=0.42; p>0.001), Mn y P (coef. pearson=0.62; p>0.001), Cu y P (coef. pearson=0.76; p>0.001), Cu y Mn (coef. pearson=0.71; p>0.001), Fe y P (coef. pearson=0.57; p>0.001), y Saturación de bases y Mg (coef. pearson=0.77; p>0.001) mostraron signos de colinealidad entre sí.

Tabla 4. Importancias de variables climáticas, edáficas y de manejo identificadas como responsables de la magnitud de las respuestas a la aplicación de insumos, a través de Random Forest. Se muestran las 20 primeras variables según orden de importancia. El análisis incluyó 39 variables de manejo y ambientales.

%IncMSE: porcentaje de incremento en el cuadrado medio del error.

| Ranking | Variable | %IncMSE |
|---------|-----------------------------------|---------|
| 1 | Precipitaciones R5-R7 | 5,09 |
| 2 | T° media R5-R7 | 2,14 |
| 3 | K | 1,73 |
| 4 | pH | 1,68 |
| 5 | P | 1,65 |
| 6 | Zn | 1,19 |
| 7 | CIC | 0,88 |
| 8 | SAW | 0,48 |
| 9 | Materia orgánica | 0,29 |
| 10 | Conductividad hidráulica saturada | 0,28 |
| 11 | Rendimiento medio del ambiente | 0,03 |
| 12 | Precipitaciones R2-R5 | -0,11 |
| 13 | Densidad de plantas | -0,54 |
| 14 | Precipitaciones S-R2 | -0,77 |
| 15 | Radiación R2-r5 | -0,83 |
| 16 | Radiación R7-R7 | -0,87 |
| 17 | Cultivo Antecesor | -0,91 |

| | | |
|----|----------------------------|-------|
| 18 | Espaciamiento entre surcos | -1,19 |
| 19 | Densidad aparente | -1,33 |
| 20 | Presencia de napa | -1,62 |

Por lo cual, Mn, Cu, Fe y Mg, no fueron tenidas en cuenta en los siguientes análisis. Las variables de manejo no mostraron signos de colinealidad entre ellas, razón por la cual no se descartó ninguna de ellas. Un total de 30 variables fueron utilizadas en la aproximación mediante Random Forest. Las variables más explicativas de las respuestas observadas fueron: precipitaciones R5-R7, T° media R5-R7, K, pH, P, Zn y CIC (Tabla 4). Las variables menos explicativas, por lo cual, no tendrían grandes efectos sobre la magnitud de las respuestas serían: N, resistencia a la penetración, Radiación R2-R5, T° media S-R2 (datos no mostrados). La aproximación Random Forest permitió explicar un 33.6% de la variabilidad observada en las respuestas a la aplicación de insumos.

Tabla 5. Modelos explorados a partir de las variables identificadas en el análisis Random Forest. Se exploró un total de 10 modelos. Las cruces indican que la variable fue tenida en cuenta en la construcción del modelo. El modelo se seleccionó en base a los valores de AIC.

| Variabes / Modelo | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 |
|------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Precipitaciones R5-R7 | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| T° media R5-R7 | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| K | x | x | x | x | x | x | x | x | |
| pH | x | x | x | x | x | x | x | | |
| P | x | x | x | x | x | x | | | |
| Zn | x | x | x | x | x | | | | |
| CIC | x | x | x | x | | | | | |
| SAW | x | x | x | | | | | | |
| Materia orgánica | x | x | | | | | | | |
| Conduct. hidráulica saturada | x | | | | | | | | |
| AIC | 986,8 | 984,9 | 983,5 | 981,5 | 979,6 | 982,9 | 981,2 | 982,2 | 981,4 |
| BIC | 1014,5 | 1010,2 | 1006,5 | 1002,2 | 998,0 | 999,1 | 995,1 | 993,7 | 990,6 |

Se exploraron un total de 9 modelos de regresión lineal múltiple que incluyeron las diez variables más explicativas de las respuestas observadas. Básicamente, los modelos fueron difiriendo entre sí según el número de variables incluidas (se fueron eliminando las variables de menor importancia) (Tabla 5). El modelo de regresión lineal múltiple elegido incluyó 6 variables (modelo 6). Este modelo presentó valores bajos de AIC (979.6), por lo cual fue seleccionado.

Según el modelo elegido, la disponibilidad de Zn ($p < 0.05$) sería las más explicativas de las respuestas al uso de insumos. En líneas generales, las respuestas estuvieron positivamente asociadas a pp R5-R7, pH, P y Zn, y negativamente a T° media R5-R7 y K (Tabla 6).

Tabla 6. Regresión lineal múltiple (modelo 6) de las variables ambientales identificadas mediante Random Forest (Tabla 3).

| Fuente de variación | Coefficiente | p valor |
|---------------------------|--------------|---------|
| Modelo | | 0,002 |
| Intercepto | -1052,1 | 0,29 |
| pp. R5-R7 | 0,16 | 0,73 |
| T ^o med. R5-R7 | -2,73 | 0,88 |
| K | -71,02 | 0,23 |
| pH | 225,03 | 0,14 |
| P | 0,30 | 0,90 |
| Zn | 89,06 | 0,02 |

CONCLUSIONES

La red de ensayos planteada exploró ambientes con rendimientos promedios que variaron desde 2897 a 5731 kg ha⁻¹. El R_{pot} del cultivo de soja mostró valores entre 5810 y 7306 kg ha⁻¹, mientras que el R_{pot_w} osciló entre 3818 y 6203 kg ha⁻¹. La brecha debido a la disponibilidad hídrica fue de 19%, oscilando entre 2 y 43 %. Sin embargo, hubo diferencias entre campañas, asociadas a las precipitaciones de cada año. Evaluando las dos campañas en conjunto, la disponibilidad hídrica no fue drásticamente limitante para alcanzar R_{pot} en esta zona.

El 69% de los ambientes observados presentaron valores de brecha explotable por el productor menores al 20%. Esto estaría indicando que las variables de manejo de cultivo estarían optimizadas, por lo cual, las posibilidades de cerrar aún más las brechas serían acotadas. A pesar de estas restricciones, el manejo de insumos mostró ser una alternativa para aumentar los rendimientos promedios del productor. La aplicación de insumos no convencionales en la zona bajo estudio trajo aparejado un aumento de rinde de aproximadamente 156 kg ha⁻¹ (~4 %) respecto al manejo convencional.

La magnitud de esta respuesta fue variable según el ambiente. Las variables de manejo agronómico que definen el R_{pot} (densidad, espaciamiento), no influirían en la respuesta de la aplicación de insumos. Por el contrario, variables ambientales que definen la magnitud de las respuestas, en ambientes de mediana y alta productividad como los explorados en este trabajo, serían (en orden de importancia): pp. R5-R7, T^o media R5-R7, K, pH, P y Zn. Por lo tanto, el efecto de la aplicación de este paquete de insumos estaría asociado a condiciones ambientales durante el llenado de los granos, así como también a la acidez del suelo, la provisión de ciertos nutrientes y su disponibilidad para el cultivo. Finalmente, pudimos encontrar un modelo que explique las variaciones en las respuestas a los usos de insumos, en un amplio rango de condiciones de manejo, edáficas y climáticas.

Referencias

- Aramburu Merlos, F., J.P. Monzon, J.L. Mercau, M. Taboada, F.H. Andrade, A.J. Hall, E. Jobbagy, K.G. Cassman, and P. Grassini. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. F. Crop. Res. 184: 145–154 Available at <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378429015300599>.

- Breiman, L., and A. Cutler. 2015. Package "randomForest." : 1–29 Available at http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4409066%5Cnhttp://www.airccse.org/journal/ijsc/papers/6115ijsc01.pdf%5Cnhttp://www.mdpi.com/2072-4292/7/1/153/.
- Burnham, K.P., D.R. Anderson, and K.P. Huyvaert. 2011. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: Some background, observations, and comparisons. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 65(1): 23–35.
- Cassman, K.G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 96(11): 5952–5959.
- Evans, L.T. 1993. *Crop evolution, adaptation and yield.* Cambridge university press.
- Fehr, W.R., and C.E. Caviness. 1977. *Stages of soybean development.* Iowa State University of Science and Technology Ames, Iowa.
- Foley, J. a., N. Ramankutty, K. a. Brauman, E.S. Cassidy, J.S. Gerber, M. Johnston, N.D. Mueller, C.O. Connell, D.K. Ray, P.C. West, C. Balzer, E.M. Bennett, J. Sheehan, S. Siebert, S.R. Carpenter, J. Hill, C. Monfreda, S. Polasky, J. Rockstro, D. Tilman, and D.P.M. Zaks. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478(7369): 337–342.
- Grassini, P., L.G.J. van Bussel, J. Van Wart, J. Wolf, L. Claessens, H. Yang, H. Boogaard, H. de Groot, M.K. van Ittersum, and K.G. Cassman. 2015a. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *F. Crop. Res.* 177: 49–63 Available at <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429015000866>.
- Grassini, P., J. Thorburn, C. Burr, and K.G. Cassman. 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. *F. Crop. Res.* 120(1): 142–150 Available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2010.09.012>.
- Grassini, P., J. a. Torrión, H.S. Yang, J. Rees, D. Andersen, K.G. Cassman, and J.E. Specht. 2015b. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. *F. Crop. Res.* 179: 150–163 Available at <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378429015001392>.
- Van Ittersum, M.K., K.G. Cassman, P. Grassini, J. Wolf, P. Tittonell, and Z. Hochman. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *F. Crop. Res.* 143: 4–17 Available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>.
- Van Ittersum, M.K., and R. Rabbinge. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *F. Crop. Res.* 52(3): 197–208.
- Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L. a. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, a. J. Gijsman, and J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model.
- Lobell, D.B., K.G. Cassman, and C.B. Field. 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34: 179–204.
- Marburger, D.A., B.J. Haverkamp, R.G. Laurenz, J.M. Orlowski, E.W. Wilson, S.N. Casteel, C.D. Lee, S.L. Naeve, E.D. Nafziger, K.L. Roozeboom, W.J. Ross, K.D. Thelen, and S.P. Conley. 2016. Characterizing genotype × Management interactions on soybean seed yield. *Crop Sci.* 56(2): 786–796.
- Orlowski, J.M., B.J. Haverkamp, R.G. Laurenz, D.A. Marburger, E.W. Wilson, S.N. Casteel, S.P. Conley, S.L. Naeve, E.D. Nafziger, K.L. Roozeboom, W.J. Ross, K.D. Thelen, and C.D. Lee. 2016. High-Input Management Systems Effect on Soybean Seed Yield, Yield Components, and Economic Break-Even Probabilities. *Crop Sci.* 0(0): 0 Available at <https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/0/0/cropsci2015.10.0620>.
- Ray, D.K., N. Ramankutty, N.D. Mueller, P.C. West, and J. a. Foley. 2012. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nat. Commun.* 3: 1293 Available at <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23250423>.
- Ruffo, M.L., L.F. Gentry, A.S. Henninger, J.R. Seebauer, and F.E. Below. 2015. Evaluating Management Factor Contributions to Reduce Corn Yield Gaps. *Agron. J.* 107(2): 495 Available at <https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/abstracts/107/2/495>.
- Sadras, V.O., K.G.G. Cassman, P. Grassini, A.J. Hall, W.G.M. Bastiaanssen, A.G. Laborte, A.E. Milne, G. Sileshi, and P. Steduto. 2015. Yield gap analysis of field crops Methods and case studies.
- Smidt, E.R., S.P. Conley, J. Zhu, and F.J. Arriaga. 2016. Identifying field attributes that predict soybean yield using random forest analysis. *Agron. J.* 108(2): 637–646.
- Walkley A, Black I A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci* 37:29–37