

Productividad del cultivo de soja bajo diferentes ambientes semiáridos pampeanos.

Trabajo final presentado para optar al título de Especialista en fertilidad de suelos y fertilización.

Matias Ignacio White

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires - 2008

Lugar de trabajo: Intendente Alvear



FAUBA

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de A **COMITÉ CONSEJERO**



Director de trabajo final

Cristian Alvarez

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de La Pampa)

Magister en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional del Sur)

Co-director

Mónica Rodríguez

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)

Doctora en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TESIS

Director de trabajo final

Cristian Alvarez

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de La Pampa)

Magister en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional del Sur)

JURADO

Flavio Gutiérrez Boem

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor of Philosophy, 1998, Soil Science Program (Universidad de Kentucky, USA)

JURADO

Martin Torres Duggan

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Magister Ciencia del suelo (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa del trabajo final: 21 de Noviembre de 2014

Dedico este trabajo a Cecilia, mi fiel compañera y a mis hijos, Tomas y Delfina.

AGRADECIMIENTOS:

A mi director Ing. Agr, MSci. Cristian O. Alvarez y co directora de tesis Ing. Agr, Dra. Mónica Rodríguez.

Al INTA General Pico, al Ing. Agr. Ramiro Bagnato, al Sr. Hugo Reynoso, Eduardo Hevia Diego Torres, por su gran ayuda en la toma de datos.

Al Ing. Agr. Carlos Pedro Lienhard por habernos permitido llevar a cabo nuestro ensayo en su establecimiento.

A El Renuevo, por haberme permitido poder realizar dicha especialización.

A Monsanto por permitirme terminar el trabajo final.

INDICE

Resumen.....	1
Introducción.....	2
Objetivos e hipótesis.....	9
Materiales y métodos.....	10
Resultados y discusión.....	15
Conclusiones.....	24
Bibliografía.....	25

1. RESUMEN

La región subhúmeda pampeana presenta una gran heterogeneidad en sus ambientes productivos, que se caracterizan por sus limitaciones en cuanto a la disponibilidad de agua para los cultivos y a su vez, por grandes diferencias en la capacidad de retención de este recurso de los suelos. Los objetivos del presente trabajo fueron estudiar el efecto del ambiente sobre la productividad de la soja (*Glycine max* (L.) Merrill) en el este de La Pampa y evaluar la eficiencia en el uso del agua (EUA) y el uso consuntivo para cada ambiente. Las evaluaciones fueron llevadas a cabo en suelos Ustisamientos Típicos (Loma) y Haplustoles Énticos (Bajo) ubicados en el establecimiento “Loma Arisca”, aledaño a la localidad de Intendente Alvear (La Pampa). Los rendimientos variaron de forma significativa ($p < 0.05$) entre ambientes siendo 3.948 kg/ha para el bajo y 1.275 kg/ha para la loma. La EUA también difirió significativamente entre ambientes ($p < 0.05$) observándose valores de 6.8 Kg/ha/mm para el bajo y 2.3 kg/ha/mm para la loma. En esta región subhúmeda, el rendimiento de la soja fue afectado positivamente por el ambiente bajo y las diferencias en productividad entre ambientes estuvieron asociadas a la disponibilidad inicial de agua.

Palabras clave: soja, ambiente, disponibilidad de agua.

2. INTRODUCCIÓN

En los últimos 40 años, las producciones agrícola y ganadera argentina han tenido una profunda transformación tanto en el uso de la tierra, como en la matriz productiva. Además se espera que en las próximas décadas haya una significativa expansión de la demanda de alimentos y los fundamentos de estos cálculos se sustentan en tres ejes: aumento de la población, cambios de hábitos de consumo y nuevos usos a los productos de origen agropecuario (Vilella, 2013). Esto requiere del aumento de las tasas de incremento en la producción de cereales y oleaginosas de las que actualmente se observan, como así también, mejoramiento en la eficiencia en el uso de los recursos (fundamentalmente agua y el resto de los nutrientes) por dichos cultivos.

Según Cassman (1999), los rendimientos alcanzables de los cultivos varían como resultado de la interacción de factores naturales y de manejo que ocurren durante su desarrollo afectando la oferta y aprovechamiento de recursos productivos. La brecha entre el rendimiento potencial y real es reducida en cultivos bajo riego, en los cuales se obtiene alrededor del 85 a 95% del rendimiento potencial, mientras que en cultivos sin riego raras veces se supera el 50%. Esto resalta la necesidad de desarrollar tecnologías para mejorar la productividad de cultivos en secano, ya que la posibilidad de incorporar nuevas tierras a producciones bajo riego es limitada.

Por otra parte, según el mismo autor (Cassman 1999), el avance genético ha llegado a su límite en cuanto a su impacto sobre el rendimiento de los cultivos. Por este motivo se plantea la necesidad de intensificar la agricultura pero bajo el concepto de “intensificación ecológica”, que consiste en sistemas de producción de altos rendimientos que protegen la calidad de los suelos y del ambiente, conservando los recursos naturales. Si bien sería en la práctica imposible lograr todos estos objetivos en

la misma manera, el concepto de intensificación productiva utilizando conceptos ecológicos provee un abordaje novedoso para vencer las barreras que causan las brechas de rendimiento. Así, Lobell *et al.*, (2009) sugieren que una de las cuestiones a resolver sería identificar el efecto que tiene la variación climática y la variabilidad de suelos sobre la productividad potencial de un sitio. En cuanto a las condiciones de suelo que afectan el rendimiento de los cultivos se puede distinguir entre factores físicos (capacidad de retención de agua-CRA, densidad aparente-DA.) y nutricionales (disponibilidad de nitrógeno-N, fósforo-P, etc.), A su vez, estos factores pueden ser genéticamente determinados o pueden ser el resultado de procesos degradantes causados por el uso del suelo.

El manejo diferencial por ambientes cobra especial interés en regiones donde la calidad de las tierras sea altamente variable en escalas espaciales a nivel intralote, y en las cuales las condiciones agro-ecológicas imponen diferentes grados de limitaciones para la producción de cultivos (Noellemeyer *et al.*, 2012).

El manejo sitio-especifico resultará en mayores beneficios tanto económicos como ambientales, en regiones marginales, tales como la región subhúmeda y semiárida pampeana la cual se caracteriza por presentar limitaciones en cuanto a la disponibilidad de agua para los cultivos y por grandes diferencias en la capacidad de retención de este recurso de los suelos. Estos factores se conjugan para determinar que el potencial productivo de las tierras sea muy heterogéneo en el paisaje (loma y bajo) y a nivel intralote (Noellemeyer *et al.*, 2012).

El manejo uniforme de cultivos no solo produce disparidad de rendimientos y disminución de la rentabilidad de los cultivos, sino también desencadena procesos de degradación de los suelos sometidos a usos y manejos no adecuados. Según Quiroga

(2012), desde el punto de vista de la sustentabilidad, y en orden a elaborar estrategias de manejo conservacionistas, resulta clave diferenciar ambientes con distinto potencial productivo.

Existen todavía muchos interrogantes a pesar de que la tecnología de aplicaciones espacialmente variables de fertilizantes y agroquímicos está en el mercado desde hace varios años. El término “manejo sitio-específico de cultivos (MSE)” fue desarrollado en el contexto de agricultura de precisión y fue definido por Whelan y Mc Bratney (2000) como la *“Adecuación de la aplicación de recursos y de prácticas agronómicas a los requerimientos de suelo y cultivos teniendo en cuenta tanto las variaciones intralote en el espacio como en el tiempo dentro”*. Los mismos autores a su vez advirtieron que el éxito de ésta práctica depende más de la base de experimentación científica que de la disponibilidad de tecnologías. Las técnicas de Agricultura de Precisión no han sido adoptadas por los productores en la medida que se esperaba (Jochinke *et al.*, 2007; Mc Bratney *et al.*, 2005) sobre todo en lo que respecta a la dosificación espacialmente variable de nutrientes, herbicidas y otros agroquímicos (Bongiovanni y Lowenberg-Deboer, 2004). Entre las posibles razones para este fenómeno los autores mencionan la falta de desarrollo de los sistemas de soporte de decisiones y pocas experiencias de evaluación de la variabilidad temporal y espacial en experimentación a campo. Por otra parte, en algunas evaluaciones de aplicación variable de nitrógeno, ésta fue solamente levemente superior a una aplicación uniforme en todo el potrero (Bongiovanni, 2002), o no mostró ninguna ventaja sobre el sistema tradicional (Bachmaier y Gandorfer, 2008). Sin embargo, en un estudio sobre zonas de manejo sitio específicas en el medio oeste de EEUU, Khosla *et al.*, (2008) informaron respuestas positivas tanto en términos físicos como económicos para el manejo diferenciado de la fertilización nitrogenada.

Según Bongiovanni *et al.*, (2013), en Argentina, se instaló el primer monitor de rendimiento con DGPS en el año 1996. Actualmente hay unas 8.100 cosechadoras con dicho equipamiento las cuales cosechan aproximadamente el 60% de la superficie agrícola. Esto posiciona a dicho país en el segundo lugar de adopción con estos equipamientos luego de Estados Unidos. Pero cuando lo medimos por densidad, pasamos a ocupar el cuarto lugar detrás de Estados Unidos, Alemania y Dinamarca (172 monitores cada un millón de hectáreas) (Griffin *et al.*, 2010, citado por Bongiovanni *et al.*, 2013). Para el autor, las principales limitantes en la adopción de la agricultura por ambiente (o agricultura de precisión) son: insuficiente apoyo a la investigación, alto costo en capital humano, limitada educación y entrenamiento en agricultura de precisión, reducido apoyo público y privado, y alto costo de gestión de la información generada.

En relación con la productividad, Quiroga (2012) plantea que el paso inicial del manejo por ambientes o sitio específico, es reconocer y jerarquizar los factores que generan variación de rendimiento, de acuerdo a la "Ley del mínimo". Es necesario reconocer si un factor es causa principal de variación, o al igual que el rendimiento, es consecuencia de la influencia de otro factor. En una segunda etapa, plantea que es necesario categorizar el factor a través de su rango de variación. Es decir, establecer categorías para la toma de decisiones. En este contexto resulta obvio que en regiones con severas limitaciones hídricas para el desarrollo de los cultivos, la disponibilidad de agua debería considerarse como el factor principal para delimitar zonas de manejo diferencial. En la región semiárida y subhúmeda pampeana, aparte del régimen climático, tres factores principales determinan la disponibilidad de agua para los cultivos: la textura del suelo, la profundidad de la tosca, y la profundidad de la capa

freática. Los dos primeros determinan la capacidad de retención de agua del suelo, que en esta región puede variar entre 50 a más de 200 mm en todo el perfil.

Al igual que cualquier cultivo, la producción de granos en soja está ligada a la capacidad del cultivo de capturar los recursos que estén disponibles (agua, nutrientes, radiación, CO₂). La temperatura regula la intensidad de captura de estos recursos. El momento durante el ciclo del cultivo en que esos recursos estén disponibles determinará las variaciones en el rendimiento de dicha oleaginosa, dado que afectará de diferente manera la definición de los dos principales componentes del rendimiento del cultivo: el número de semillas y el peso de las mismas (Salvagiotti *et al.*, 2009).

Entre los recursos disponibles para la producción en condiciones extensivas de secano en regiones semiáridas y subhúmedas, se destacan estrechas relaciones entre la productividad de los cultivos y la disponibilidad de agua durante el ciclo de producción (Singels, 1992). Musick *et al.*, (1994) describieron que los máximos rendimientos de trigo (*Triticum aestivum* L.), superiores a 7000 kg/ha en las planicies de EEUU se obtienen con ofertas de agua superiores a los 650 mm. En la región de Nebraska & Kansas (EEUU) Kucharik & Ramankutty, (2005) concluyeron que la irrigación en maíz (*Zea mays* L.) redujo la variabilidad interanual de los rendimientos en un 60 % con respecto a los cultivos manejados en condiciones de secano. A si mismo, Sun *et al.*, (2007) en la región semiárida de Ceará (Brasil) informaron que un índice climático definido principalmente por las precipitaciones ocurridas durante el ciclo de los cultivos explicó aproximadamente el 57 % de las variaciones interanuales de los rendimientos de maíz. En cuanto las experiencias locales, Podestá *et al.*, (1999) en estudios realizados en la región pampeana de Argentina encontraron una correlación positiva entre los rendimientos de maíz y las precipitaciones del trimestre noviembre a enero ($r = 0,82$) y entre los rendimientos de sorgo y las precipitaciones del trimestre diciembre a febrero

($r = 0,49$) coincidente en ambos casos con el período crítico de los cultivos. En este mismo estudio y para el caso de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] se observó una correlación positiva entre los rendimientos y las precipitaciones comprendidas entre el período noviembre a enero ($r = 0,66$) sólo en campañas con precipitaciones inferiores a los valores promedios (340 mm). No se observó relación entre ambas variables en campañas con precipitaciones abundantes (superiores a los valores normales). Para esta misma región Andriani *et al.*, (1991) y Dardanelli *et al.*, (1991) mostraron que las precipitaciones ocurridas durante el llenado de los granos de soja (estadios de R4 a R6) es el principal factor climático que afecta los rendimientos, con incrementos del orden de 10 kg/ha de grano por cada mm de agua consumida, en un rango de consumo de 120 a 240 mm.

Según Álvarez *et al.*, (2011), las variaciones en los rendimientos pueden explicarse a partir de efectos del genotipo, del ambiente, del manejo y de su interacción. Generalmente el efecto ambiental, explica la mayor parte de las variaciones del rendimiento. Las propiedades del suelo (físicas y químicas) en interacción con las variables climáticas (disponibilidad de radiación y agua, así como también de los diferentes regímenes térmicos) determinan diferentes ambientes para el cultivo de soja. A su vez, las diferencias en longitud de ciclo de las variedades de soja pertenecientes a distintos grupos de madurez, permiten explorar distintas ventanas agroclimáticas, cuando son sembradas en la misma fecha y en un mismo lote. Por lo tanto un ambiente de cultivo puede ser definido por la combinación de los factores lote y variedad, es decir que, para una misma campaña y localidad, un mismo lote sembrado con distintos cultivares pueden ser tratados como ambientes distintos (Salvagiotti *et al.*, 2009).

El proceso de agriculturización creciente sumado al manejo inadecuado de los cultivos lleva a un deterioro o disminución en la fertilidad física y química de los suelos

(Salinas García *et al.*, 1997; Ferreras *et al.*, 2007). Por este motivo es fundamental investigar cuales serían las tecnologías apropiadas de producción en cada ambiente, determinado por su potencial productivo. En la región semiárida pampeana, los avances en la incidencia de prácticas de manejo de cultivos como soja para mejorar la productividad por ambiente aún no son concluyentes. Sin embargo, ha sido verificada la existencia de heterogeneidad ambiental con datos reales georeferenciados cuando aparecieron las primeras cosechadoras equipadas con monitores de rendimiento hace ya una década según Martínez (2012). Al analizar los primeros monitores de rendimiento, provenientes de lotes manejados de forma uniforme, se observaron áreas que presentaban rendimientos por debajo del rinde de indiferencia y que por lo tanto eran subsidiadas por los sectores que rendían muy por encima del nivel de indiferencia (Martínez, 2012).

Por este motivo, es fundamental investigar en esta zona la productividad de la soja en diferentes ambientes. Esto ayudara a generar más conocimiento para definir las mejores estrategias de manejo de los factores controlables hasta aquí analizados.

El manejo diferencial de ambientes posibilitará el uso racional y conservacionista de los recursos del ambiente y un manejo más eficiente de los insumos necesarios para la producción agrícola. Se plantea que el factor más relevante en definir la productividad de un sitio en la zona semiárida y subhúmeda es la disponibilidad de agua, por lo cual el tratamiento principal debe responder a este factor. Los ambientes pueden diferenciarse por distinta CRA de los suelos y/o por presencia de una capa freática cercana a la superficie. Dentro de este tratamiento principal se anidarán los demás factores que influyen sobre el rendimiento y la EUA.

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general:

- Estudiar el efecto del ambiente (posición del suelo en el relieve) sobre la productividad de la soja en el este de La Pampa.

Objetivo específico:

- Evaluar la eficiencia en el uso del agua, el uso consuntivo del agua y su relación con la productividad de la soja en diferentes ambientes.

Hipótesis:

- El rendimiento de la soja es afectado positivamente por el ambiente bajo.
- Las diferencias en productividad entre ambientes se ven asociadas al aprovechamiento del agua.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

- **Descripción de zona en estudio.**

El estudio se desarrolló en un establecimiento privado “Loma Arisca” ubicado en el sector oriental de la región semiárida pampeana, en el departamento de Chapaleufú, provincia de La Pampa, entre las localidades de General Pico e Intendente Alvear. Dicha región se caracteriza por presentar un paisaje modelado por acciones hídricas y eólicas sobre una peniplanicie que originó mesetas, valles, colinas y planicies. La misma está ubicada en el sector NE de la provincia ($63^{\circ}45'$ y $64^{\circ}30'$ O y 35° y $36^{\circ}30'$ S) que ocupa una superficie aproximada de 8.500 km^2 y comprende los departamentos de Realicó, Chapaleufú, Conhelo, Trenel, Maracó, Quemú Quemú, Capital y Catriló (inventario de recursos naturales de La Pampa).

El área de planicie abarca una considerable extensión en sentido N-S lo que pone de manifiesto ciertas diferencias climáticas entre ellas. El clima es templado con un régimen de lluvia estival que oscila entre los $500\text{--}750 \text{ mm/año}$ y una temperatura media anual de 16° C . El período libre de heladas para la zona de estudio es de 174 días (Casagrande *et. al.* 2001). Los vientos tienen un predominio en las direcciones N-NE y S-SW con una velocidad media anual de $10\text{--}12 \text{ km/h}$.

Geomorfológicamente la planicie presenta un estrato superior de material eólico, de textura franco arenosa y espesor variable, depositados en discordancia sobre la tosca que se encuentra a profundidades variables entre 150 o más centímetros. En este paisaje se desarrollan suelos que conforman un complejo indiferenciado con cierta organización edafogenética donde predominan Haplustoles énticos (Atlas de Suelos de la República Argentina, 1992).

- **Descripción del sitio experimental.**

El estudio se desarrolló en el establecimiento “Loma Arisca”, aledaño a la localidad de Alvear (La Pampa), sobre un lote de producción con dos ambientes contrastantes. Ustisamientos Típicos (Loma) y Haplustoles Énticos (Bajo). El ambiente de Loma se caracterizó por un perfil de textura arenosa, con bajos contenidos de materia orgánica (MO) y valores altos de fósforo (P). El ambiente de bajo se caracterizó por un perfil de textura franca-arenosa, con contenidos medios a altos de MO y valores elevados de P, (Tabla 1).

Tabla 1: Ambiente de Loma y Bajo: contenido de fracciones de arcilla (Ar), limo (L) y arena (a) (%), contenidos de materia orgánica (MO) (%) y fósforo (P) (ppm), Capacidad de intercambio catiónico (CIC) (meq/100 g de suelo) y pH.

Ambiente	Profundidad (cm)	Ar (%)	L (%)	a (%)	MO (%)	pH	CIC (meq/100 gr suelo)	P (ppm)
Loma	20	4	10	86	1.08	6.07	7.12	46
	40	4	10	86		6.42		
	60	4	10	86		6.55		
Bajo	20	12	26	62	2.26	6.17	10.6	46
	40	10	22	68		6.42		
	60	10	20	70		6.55		

Fuente: determinado en laboratorio de INTA Anguil.

En la tabla 2 se presentan los registros de lluvia mensuales desde el 1 de noviembre de 2012 hasta el 30 de abril de 2013 y en la figura 1 se presentan, para el mismo período, las lluvias acumuladas de las últimas cuatro campañas.

Tabla 2: Precipitaciones mensuales e históricas en mm durante el ciclo de producción de cultivos de soja.

Mes	Nov	Dic	En	Feb	Mar
Campaña 12/13 (mm)	115	154	0	10	113
Promedio Histórico 1921-2012 (mm)	82	96	88	85	108

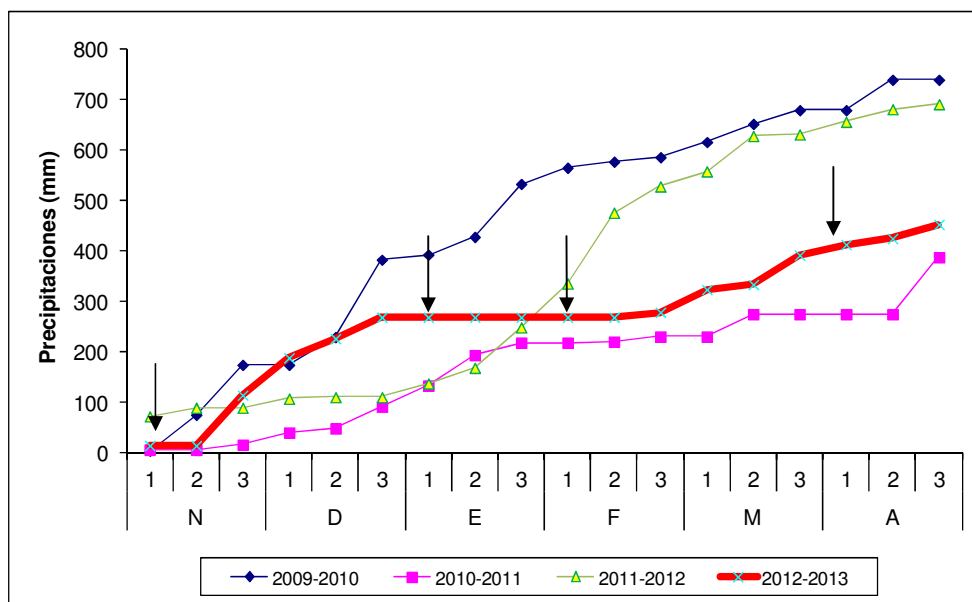


Figura 1: Precipitaciones acumuladas (mm) en el campo Loma Arisca de las últimas campañas para el período comprendido entre los meses de noviembre a abril. Las flechas negras indican los momentos donde se determino humedad en el perfil del

suelo.

- **Diseño experimental y análisis estadísticos.**

El diseño del ensayo, es un diseño completamente aleatorizados (DCA) con 3 repeticiones por tratamiento.

Factor ambiente: el ensayo fue llevado a cabo en dos ambientes contrastantes: loma y bajo.

Se sembró el día 4 de noviembre un cultivar de soja cuyo grupo de madurez pertenecía al 3.9 a un distanciamiento de 42 cm entre hileras y con un stand de plantas de 350 mil.

En cada ambiente los cultivos se sembraron en franjas de 4 m de ancho y 150 m de longitud cruzando ambos ambientes.

- **Determinaciones.**

- i. **En planta.**

En madurez fisiológica se determinó la densidad de plantas sobre una superficie de 5 m², la altura media de 20 plantas consecutivas y la producción de grano y componentes de rendimiento (número de granos por unidad de superficie (NG) y peso individual de los granos, (PG)) por cosecha manual de una superficie de 5 m². Además se determinaron altura (cm), número de nudos y vainas totales, vuelco y tallo verde. Los

resultados de rendimiento en grano se expresaron con contenidos de 145 g kg^{-1} de humedad de los granos.

ii. **En suelo.**

En el momento de la siembra, de los cultivos en R2-3, R5 y en estadíos de madurez fisiológica se determinó el contenido de agua total del suelo (AT) en capas de 20 cm de espesor hasta los 200 cm de profundidad (método gravimétrico). A partir de los valores de textura se estimó a través del software SPAW (Saxton *et al.*, 2006) capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PMP), y DA. Se calcularon los contenidos de agua útil (AU) según la ecuación:

$$AU (mm) = [CC (g kg^{-1}) - PMP (g kg^{-1})] \times DA (kg m^3) \times espesor (mm)$$

El uso consuntivo (UC) se determinó como la diferencia de agua del suelo a la siembra más las precipitaciones durante el ciclo del cultivo menos el agua del suelo final:

$$UC (mm) = (AS_{inicial} + PP_{ciclo} - AS_{final}) mm$$

La eficiencia de uso de agua (EUA) de soja se calculó realizando el cociente entre el rendimiento en grano producido y el uso de agua consumida por misma. (EUA mm de agua consumida por kg grano producido).

- **Análisis estadístico.**

Para el análisis estadístico se utilizó el programa informático INFOSTAT, y mediante el mismo se realizó un ANOVA con los datos obtenidos de las parcelas.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- **Perfil de distribución de agua en el suelo.**

En la figura 2 se muestra como fueron evolucionando los perfiles de humedad en el suelo para cada uno de los ambientes en diferentes fechas durante el ciclo de la soja. En primer lugar, se observa cómo, el ambiente bajo partió con mayor agua disponible a la siembra, respecto a la loma. A su vez, en el ambiente bajo, el perfil del suelo, a medida que iba evolucionando en su ciclo la oleaginosa, los valores hídricos de los diferentes estratos del perfil, no se acercaban al punto de marchitez permanente y siempre, en profundidad la humedad aumentaba salvo en la determinación de madurez fisiológica correspondiente a la fecha del 4 de abril. El cultivo en este ambiente tuvo la posibilidad de que en plena floración como así también en el llenado, acceder a la napa ya que la misma subió como consecuencia de la abundante lluvia recibida durante la primavera. En cambio, en el ambiente de loma, todas las determinaciones fueron decreciendo en humedad a medida que aumentábamos en profundidad y a su vez, en la determinación de floración y llenado de granos, el perfil estaba cercano al punto de marchitez permanente en casi todos los estratos del mismo.

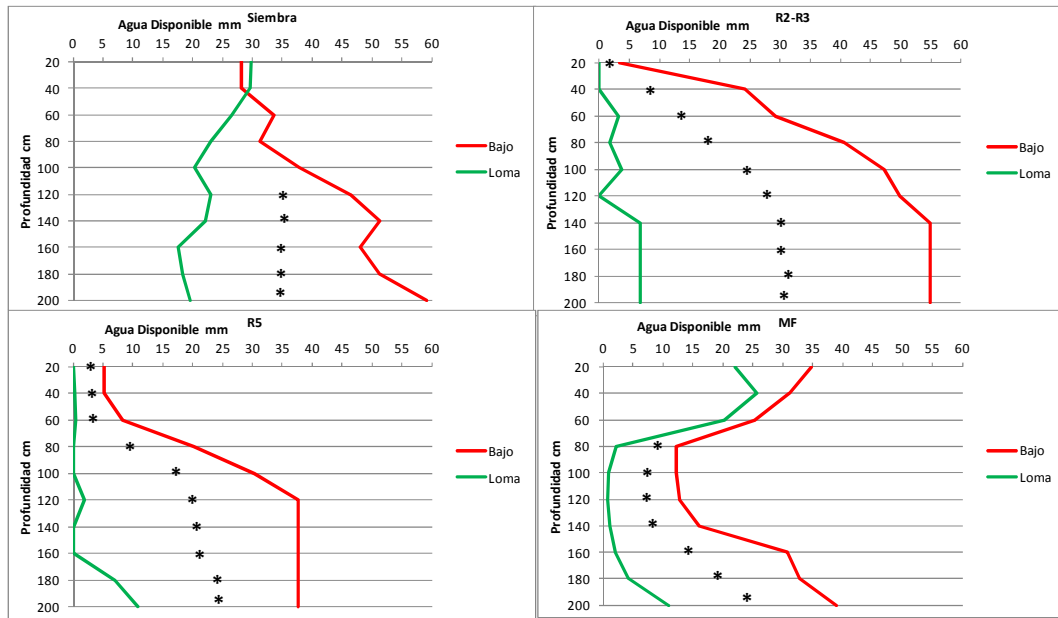


Figura 2: Agua disponible (mm) según estrato de profundidad para diferentes fechas dentro del ciclo del cultivo de soja y para cada ambiente analizado. * implica diferencia estadísticamente significativa entre valores.

A su vez, en función a lo observado en la figura 2 se desprende que la profundidad a la cual llegaron las raíces de la soja en el ambiente de loma fueron mayores a los 160 cm. En el bajo el nivel final al cual alcanzaron las raíces no supero los 140 cm y esto fue debido a la presencia de la napa freática.

Rendimiento de la soja.

Ante condiciones semejantes de disponibilidad de recursos tales como radiación, temperaturas y precipitaciones (ej. durante una misma campaña y región productiva) se han encontrado diferencias de rendimientos entre lotes o sectores dentro de los lotes (Kaspar *et al.*, 2004; Bruce *et al.*, 1988). Estas diferencias de productividad generalmente se atribuyen a variaciones en propiedades edáficas y de terreno

(pendiente, elevación, etc.) que en interacción con prácticas de manejo de suelos y de cultivos alteran la oferta de recursos productivos.

En general, altos rendimientos de cultivos de secano se asocian con posiciones bajas del terreno y posiciones con pendientes suaves, mientras que menores rendimientos se describen en posiciones elevadas del terreno o con pendientes pronunciadas (Yang *et al.*, 1998). Numerosos estudios describen relaciones negativas entre pendiente y rendimientos de cultivos (Yang *et al.*, 1998; Changere y Lal, 1997), atribuidas fundamentalmente a procesos erosivos y su consecuencia sobre la distribución de partículas y retención de agua en el perfil. Sin embargo, la relación entre los factores topográficos y los rendimientos de los cultivos varía entre sitios y años y puede ser de mayor relevancia en años con condiciones extremas, tales como balances hídricos negativos para el normal desarrollo de los cultivos o períodos de precipitaciones por encima de los valores normales que producen anegamiento en los sectores deprimidos del terreno (Simmons *et al.*, 1989; Kravchenko y Bullock, 2000). Por ejemplo, la productividad de los cultivos se incrementa a medida que se incrementa el contenido de arcilla de los suelos hacia posiciones bajas del terreno, como consecuencia de una mayor disponibilidad de agua en períodos con balances hídricos negativos (Cox *et al.*, 2003).

En el presente estudio, los rendimientos variaron de forma significativa ($p=0.0009$) entre ambientes siendo 3.948 kg/ha para el bajo y 1.275 kg/ha para la loma (Figura 3) . Estos resultados son coincidentes por los encontrados por Alvarez *et al.*, (2011) y Bagnato *et al.*, (2011). En tanto que dentro de los componentes del rendimiento, solo el número de granos explicó significativamente ($p=0.0016$) la variación en el mismo (2.231 granos/m² para el bajo y 890 granos/m² para la loma) como se observa en la figura 4. Con respecto al peso de mil granos, no mostraron

diferencias significativas entre el bajo (178 gramos/kg) y la loma (y 144 gramos/kg) ($p=0.1614$) (figura 5). Lo mismo fue encontrado por Kantolik *et al.*, (2003) en donde muestran como el numero de granos tiene una correlación positiva con el rendimiento del 82% mientras que el peso solo es del 39%. Numerosos estudios describen relaciones negativas entre lomas/pendiente y rendimientos de cultivos (Yang *et al.*, 1998; Changere & Lal, 1997), atribuidas fundamentalmente a procesos erosivos y su consecuencia sobre la distribución de partículas y retención de agua en el perfil. Sin embargo, la relación entre los factores topográficos y los rendimientos de los cultivos varía entre sitios y años y puede ser de mayor relevancia en años con condiciones extremas, tales como balances hídricos negativos para el normal desarrollo de los cultivos o períodos de precipitaciones por encima de los valores normales que producen anegamiento en los sectores deprimidos del terreno (Simmons *et al.*, 1989; Kravchenko & Bullock, 2000). Por ejemplo, la productividad de los cultivos se incrementa a medida que se incrementa el contenido de arcilla de los suelos hacia posiciones bajas del terreno, como consecuencia de una mayor disponibilidad de agua en períodos con balances hídricos negativos (Cox *et al.*, 2003).

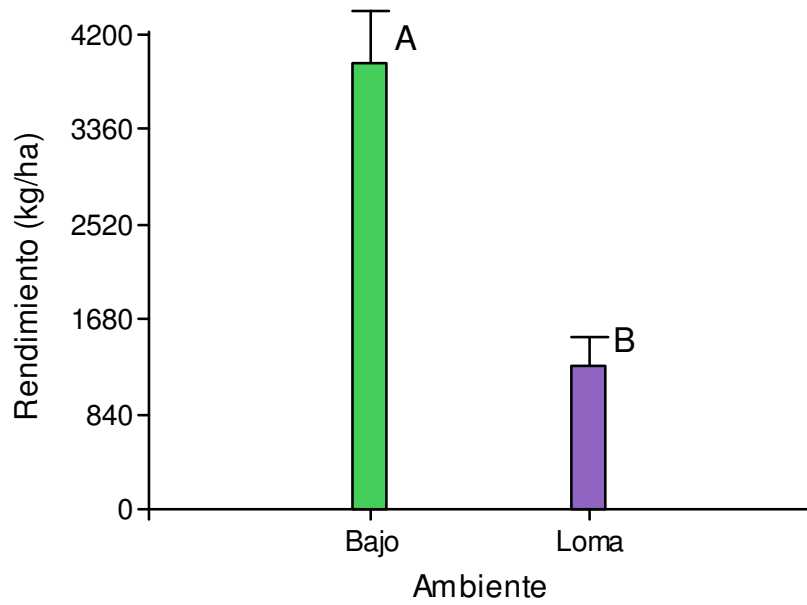


Figura 3: Rendimiento de soja (kg/ha en el bajo y la loma. Letras diferentes entre ambientes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

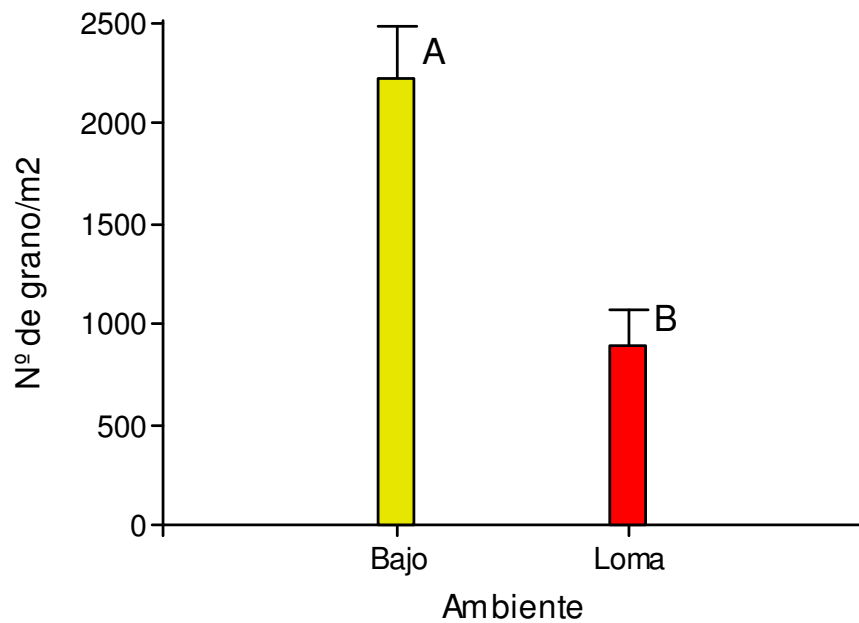


Figura 4: Número de granos por metro cuadrado para el bajo y la loma. Letras

diferentes entre ambientes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

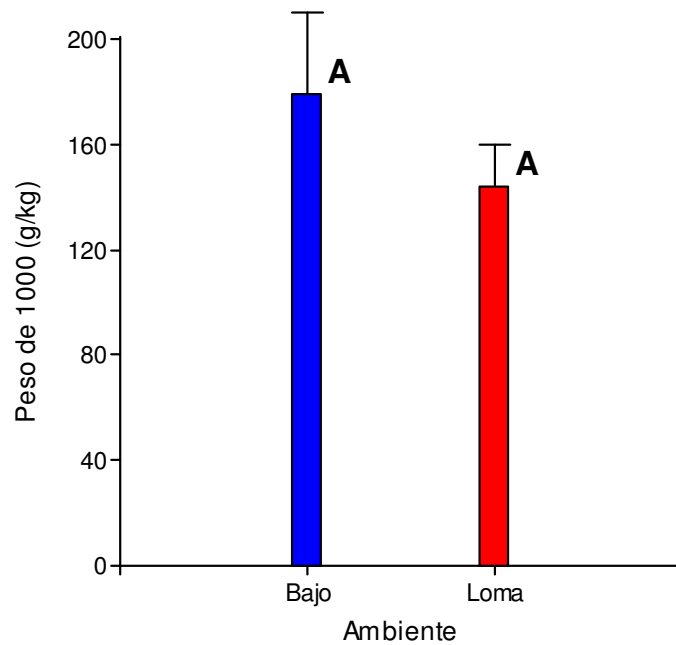


Figura 5: Peso de mil semillas para el bajo y la loma. Letras diferentes entre ambientes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

- **Aprovechamiento del agua por la soja**

La figura 6 muestra que no se registraron diferencias significativas en el uso consuntivo para cada ambiente ($P > 0.28$). Esto ha sido registrado por varios autores en la zona como Alvarez *et al.*, (2010) y Bagnato *et al.*, (2011).

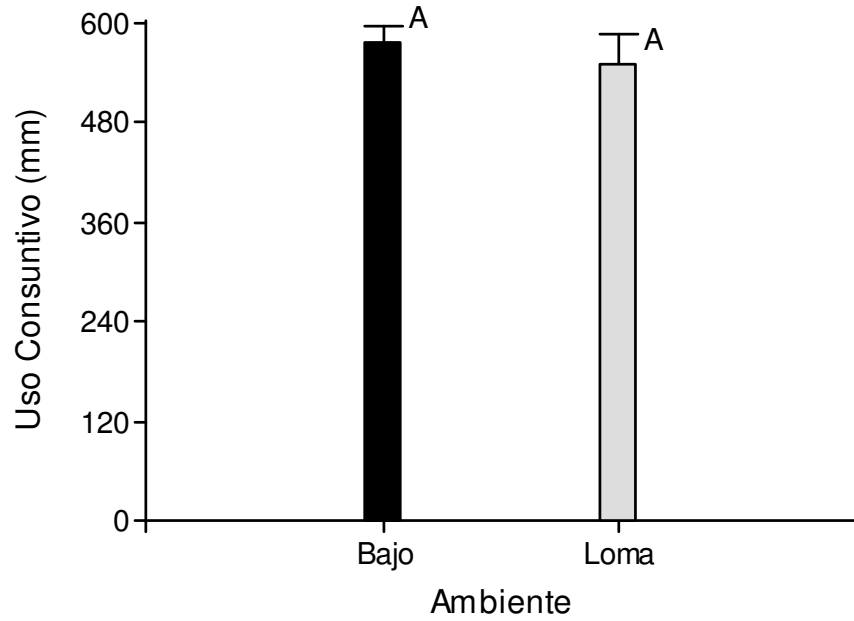


Figura 6: Uso consuntivo del agua en los dos ambientes evaluados. Letras diferentes entre ambientes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

En función a la eficiencia de uso del agua (EUA) se puede observar como el ambiente bajo fue mas eficiente en el uso de este recurso que la loma (diferencia significativa $p < 0.0022$) como muestra la figura 7.

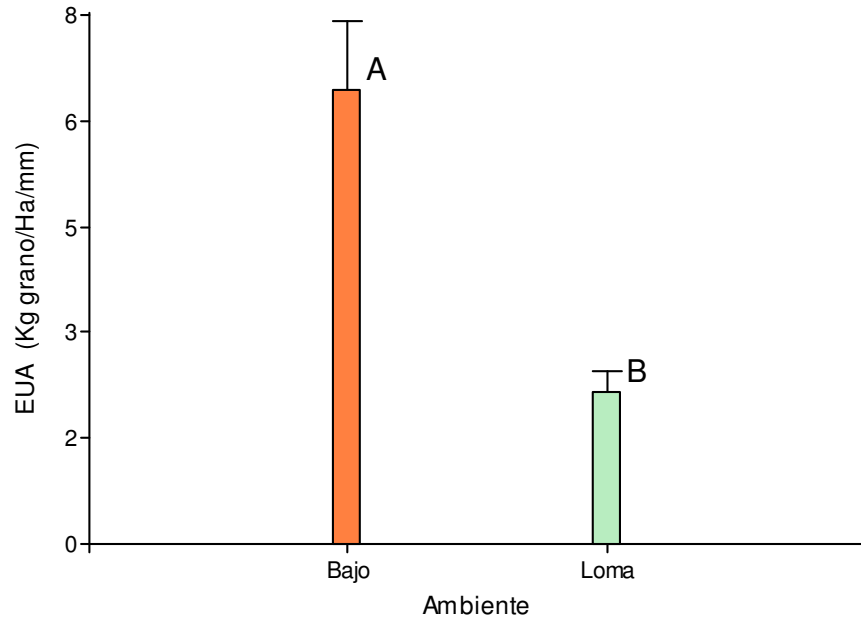


Figura 7: EUA en los dos ambientes estudiados. Letras diferentes entre ambientes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Estas diferencias en la eficiencia del uso del agua aparentes son similares a las obtenidas por Alvarez *et al.*, (2011), en ambientes similares de la misma región: 8.6 kg/ha/mm para el bajo y 5.5 kg/ha/mm para la loma y por lo tanto con una tendencia similar a la obtenida en este trabajo. Bagnato *et al.*, (2011) también registraron diferencias significativas entre los ambientes evaluados de diferentes posiciones en el relieve: 12.8 kg/ha/mm de EUA para el bajo y 5.5 kg/ha/mm de EUA para la loma.

Por otro lado, como se detalla en la figura 8, tal como se esperaba, el ambiente bajo partió con un nivel de agua disponible muy superior al de la loma y obtuvo un mayor rendimiento. Esto concuerda con los valores de M.O y los porcentajes de arena

en cada uno de los ambientes, variables de calidad citadas por Quiroga (2002) para diferencias de calidad de sitio.

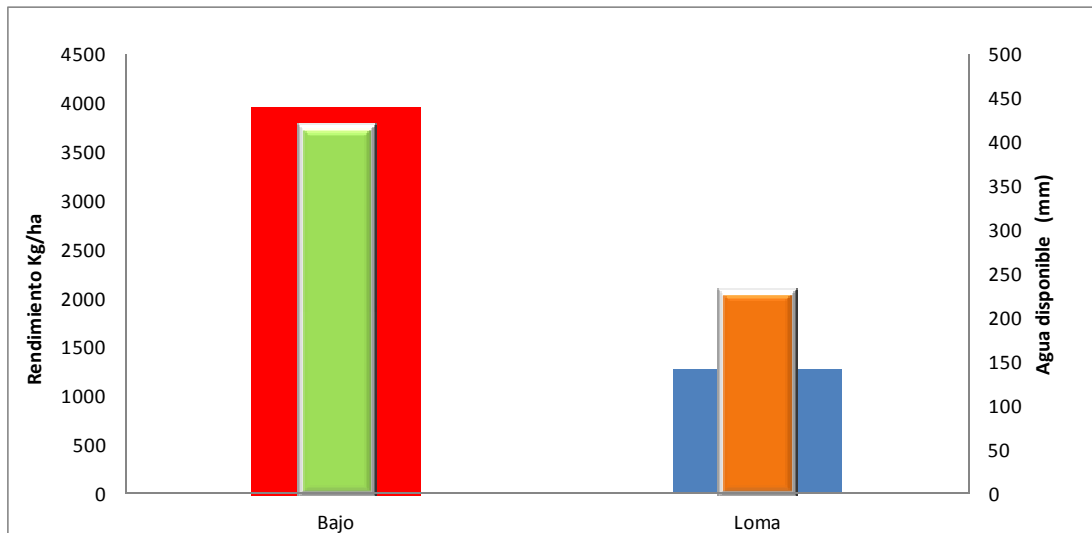


Figura 8: Rendimiento en kg/ha (barra roja y azul) y agua disponible inicial en mm (barra verde y naranja), en función del ambiente.

Bacigaluppo *et al.*, (2007) llegaron a resultados con similares tendencias, en donde, en aquellos ambientes en los cuales el agua disponible inicial fue superior a los 200 mm, la soja rindió mejor respecto a los que tenían valores inferiores de agua acumulada a la siembra del cultivo.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten aceptar las hipótesis propuestas. Se comprobó que los rendimientos del cultivo estuvieron condicionados por el ambiente, siendo más productivo el bajo que la loma. A su vez, se demostró que estas diferencias en productividad concuerdan con los niveles de fertilidad y las características texturales de cada ambiente y por lo tanto en la cantidad de agua disponible con la que parte cada uno y su correlato posterior en el rendimiento. En el ambiente bajo, se lograron mayores rendimientos como consecuencia de la diferencia en el agua acumulada a la siembra entre los ambientes y a la contribución que realizó la presencia de napa en el perfil enraizable durante parte de la etapa vegetativa y el período crítico. Esta diferencia de agua acumulada durante el barbecho para cada ambiente explicaría en su gran mayoría la diferencia en la EUA.

7. BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, C; Quiroga, A; Corro Molas, A y Lienhard, C. Mercosoja 2011. Manejo sitio específico para el cultivo de soja en la región semiárida pampeana.

Andriani, J.M; Andrade, F.H.; Suero, E.E. & Dardanelli, J.L. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans 1: their effects on dry matter accumulation, seed yield and yield components. *Agronomie* 11: 737-746.

Atlas de Suelos de la República Argentina, 1992.

Bachmaier, M., Gandorfer, M. 2008. A conceptual framework for judging the precision agriculture hypothesis with regard to site-specific nitrogen application. *Precision Agriculture*.

Bacigaluppo, S.; Andriani, J.; Gerster, G.; Dardanelli, J.; Balzarini, M.; Bodrero, M.; Quijano, A.; Enrico, J.; Martignone, R. 2007. Variación del rendimiento de soja en función del contenido de agua útil a la siembra del cultivo, en sistemas de siembra directa del sur de Santa Fe.

Bagnato, R; Álvarez, C; Scianca, C; Barraco, M y Justo C. Mercosoja 2011. Productividad de soja en suelos con presencia de capa freática y tosca en el noreste de la provincia de La Pampa. Mercosoja.

Bongiovanni, R & Rodríguez, M B. 2013. Country Report- Argentina. ISPA Report. International Society of Precision Agriculture. Pp 6-7.

Bongiovanni, R. 2002. Econometría espacial: una herramienta clave para el manejo sitio-específico de insumos. Tercer Taller Internacional de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América. Carlos Paz. Córdoba. Argentina.

Bongiovanni, R., Lowenberg-Deboer, J. 2004. Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture* 5, 359-387.

Bruce, R.A; White, A.; Thomas, A.; Snyder, W.; Langdale, G. & Perkins, H. 1988. Characterization of soil-crop yield relations over a range of erosion on a landscape. *Geoderma* 43: 99-116.

Casagrande, G.; Vergara, G.; Suárez, A.; Pérez, S.; Sierra, E.; Cony, P. 2001. Caracterización agroclimática de las heladas en el este de la provincia de La Pampa. *Revista Facultad de Agronomía. Universidad nacional de La Pampa. Vol. 12 N° 1.*

Cassman, K. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality and precision agriculture. *The National Academy of Sciences*, 96: 5952-5959.

Changere, A & Lal, R. 1997. Slope position and erosional effect on soil properties and corn production on a Miamian soil in central Ohio. *J. Sustainable Agric.* 11: 5-21.

Cox, M.S; Gerard, P.D.; Wardlaw, M.C. & Abshire, M.J 2003. Variability of selected soil properties and their relationships with soybean yield. *Soil. Sci. Soc. J.* 67:1296-1302.

Dardanelli, J.L; Suero, E.E; Andrade, F.H & Andriani, J.M 1991. Water deficits during reproductive growth of soybean. II. Water use and water deficiency indicators. *Agronomie* 11: 747-756.

Ferrera L., Magra, G; Besson, P; Rovalevski, E y García, F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo.* 25 (2) 159-172.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA, 1990, Atlas de suelos de la República Argentina, 2 tomos, Buenos Aires.

Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de la pampa. 1980. INTA, Provincia de La Pampa, UNLPam. Buenos Aires. 493 Pág.

Jochinke D.C, Noonon,B.J., Nicholas G., Wachsmann, N.G., Robert M., Norton, R.M. 2007. The adoption of precision agriculture in an Australian broadacre cropping system—Challenges and opportunities. *Field Crops Res.* 104, 68-76.

Kantolic, A.; GimenezGiménez, P.; De la Fuente, E.; E 2003. En Producción de Granos: Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. Pág. 165-201.

Kaspar, T.C; Pulido, D.J; Fenton, T.E; Colvin, T.S; Karlen, D.L; Jaynes, D.B & Meek, D.W 2004. Relationship of Corn and Soybean Yield to Soil and Terrain Properties. *Agron. J:*96: 700-709.

Khosla, R., Inman, D., Westfall, D.G., Reich, R.M., Frazier, M., Mzuku, M., Koch, B., Hornung, A. 2008. A synthesis of multi-disciplinary research in precision agriculture: site-specific management zones in the semi-arid western Great Plains of the EEUU. *Precision Agriculture* 9, 85-100.

Kravchenko, A.N & Bullock, D.G 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92: 75-83.

Kucharik, C.J & Ramankutty, N. 2005. Trends and variability in US corn yield over the twentieth century. *Earth Interactions.* Vol 9 (1): 29 pp.

Lobell, D.; Bala, G.; Mirin, A.; Phillips, T; Maxwell, R. & Rotman, D. 2009. Regional differences in the influence of irrigation on climate, *J. Clim.*, 22(8), 2248–2255.

Martinez, D. 2012. Avances de la agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana. *Agronomía por ambientes en la práctica*. Editorial INTA. Pág. 5-9.

Mc Bratney, A., Whelan, B., Ancev, T. Bouma, J. 2005. Future directions of precision agriculture. *Precision Agriculture* 6, 7-23.

Musick, J; Jones, O. R.; Stewart, B. & Dusek, D. 1994. Water-yield relationships for irrigated and dryland wheat in the U. S. Sourthen Plains. *Agron J* 86: 980-986.

Noellemeyer, E; Quiroga, A. 2012. Manejo sitio-específico para mejorar la eficiencia de uso de agua de los cultivos en la región semiárida pampeana. *PICT-2010-1872*

Palmer, W.C. 1965. *Meteorological Drought*. U.S. Dep. Commerce. Wshington D.C. Weather Bureau Res. Paper 45. 58 pág.

Parry, M.L. 1990. *Climate Change and world agriculture*. Earthscan. London. 157 pp.

Pérez S; Sierra, E.M.; Casagrande, G. & Vergara, G. 1999. Cambios en el régimen de precipitaciones del oeste de la Región Pampeana Argentina 1921-98. XI Congreso Brasileiro de Agrometeorología y II Encuentro Latinoamericano de Agrometeorología. Florianópolis. Brasil. *Anales* 499.

Pizarro, J.B. & Cascardo, A.R. 1991. El desarrollo agropecuario pampeano. 799 Pag. Cap IV La evolución de la agricultura pampeana. Grupo editor latinoamericano. Osvaldo Barsky editor.

Podestá, G; Messina, C.D.; Grondona, M. & Magrin, G. 1999. Associations between grain crop yields in Central- Eastern Argentina and El Niño- Sourthen oscillation. Journal of Applied Meteorology. Volume 38: 1488-1498.

Quiroga, A. 2002. Indicadores de calidad de suelos en Molisoles de la región semiárida pampeana. Tesis PhD. UNS Bahía Blanca. 130 pp.

Quiroga, A. 2012. Avances de la agricultura por ambientes en la región semiárida pampeana. Aspectos del manejo por ambientes. Necesidad de reconocer, jerarquizar y categorizar factores que afectan la producción y sustentabilidad. Editorial INTA. Pág. 5-9.

Roberto. Z.E; Casagrande, G. & Viglizzo, E.F. 1994. Lluvias en la Pampa Central: tendencia y variaciones del siglo. Cambio Climático y Agricultura Sustentable en la Región Pampeana. Bol. INTA Centro Regional La Pampa-San Luis. N°2. 25pp.

Salina-García J., Hons, F. y Motocha, E. 1997. Long-Term effects of tillage and fertilization and soil organic matter dynamics. Soil Sci. Am. J. 61, 152-159

Salvagiotti F.; Enrico, J.; Bodrero, M.; Bacigaluppo, S. 2009. Producción de soja y uso eficiente de los recursos. Revista técnica de la Asociación Argentina de Productores en Siembra directa Soja 2010. pp 61-64.

Saxton K. E. and Rawls, W. J. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 70:1569–1578.

Sierra, E.M; Conde-Prat, M. & Pérez, S. 1995. La migración de cultivos de granos como indicador del cambio climático 1941-93 en la Región Pampeana Argentina. *Rev.Fac.Agr.* 15(2-3):171-176.

Sierra, E.M; Hurtado, R.H. & Spescha, L. 1994. Corrimiento de las isoyetas anuales medias decenales en la Región Pampeana 1941-1990. *Rev.Fac.Agr.* 14(2):139-144.

Singels, A. 1992. Evaluating wheat planting strategies using a growth model. *Agric. Systems* 38: 174-184.

Sun, L; Li, H.; Ward, M.N. & Moncunill, D.F. 2007: Climate variability and corn yields in semiarid Ceará. *Brazil. J. Appl. Meteor. Climatol:* 46. 226–240.

Viglizzo, E. & Filippin, C. 1993. Cambio climático y su impacto en la Pampa Semiárida. *Rev. Agropecuaria.* 3 (13): 30-34.

Vilella, F. 2013. Demanda actual y proyectada de alimentos. CPIA. Volumen n° 128.

Whelan, B.M., McBratney, A.B. 2000. The “Null Hypothesis” of precision agriculture management. *Precision Agriculture* 2, 265-279.

Yang, C; Peterson, C.L.; Shropshire, G.L. & Otawa, T. 1998. Spatial variability of field topography and wheat yield in the Palouse region of the Pacific Northwest. *Tran. ASAE* 41: 17-27.