

Uso sustentable de los recursos hídricos y edáficos para riego complementario de maíz y soja en la Cuenca del Río Arrecifes, Provincia de Buenos Aires

Etcheverry, Marta & Leopoldo Génova

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Avda. 60 y 119. (1900) La Plata, hidroagri@agro.unlp.edu.ar

Etcheverry, Marta & Leopoldo Génova (2015) Uso sustentable de los recursos hídricos y edáficos para riego complementario de maíz y soja en la Cuenca del Río Arrecifes, Provincia de Buenos Aires. Rev. Fac. Agron. Vol 114 (2): 125-141

La Cuenca del Río Arrecifes abarca 10.000 km², presentando el 90% de sus suelos aptitud agrícola. El riego complementario aumentó y estabilizó los rendimientos de los cultivos, pero disturbó los suelos. Los objetivos del trabajo fueron inventariar las áreas ocupadas con maíz y soja, cuantificar la oferta y demanda hídricas para riego y analizar la evolución edafosalina, con la hipótesis que puede incrementarse la superficie regada. La oferta se estimó con la tasa de recarga del Acuífero Pampeano y la precipitación efectiva. La demanda se contabilizó estimando las necesidades de riego de maíz y soja. Los suelos se caracterizaron identificando unidades cartográficas, analizando los perfiles de los dominios edáficos. Se evaluó la calidad de las aguas y suelos de secano y regados mediante muestreos y análisis fisicoquímicos. La sostenibilidad de los agroecosistemas se midió utilizando como indicadores la resistencia y resiliencia edáficas a cambios salinos. Los principales resultados fueron: a) es factible incrementar en 76.800 has. la superficie regada; b) las aguas disponibles son bicarbonatadas-sódicas, clases C3S2 y C3S3 según el US Salinity Lab. y de ligera a moderada restricción de uso para el IPG-INTA; c) se manifestó una tendencia incremental de los indicadores salinos causada por el riego, pero ninguno alcanzó magnitudes identificatorias de degradaciones drásticas y menos irreversibles; d) las series de suelos resultaron resilientes, evidenciando el funcionamiento de dos mecanismos de recuperación: el lavado de sales por las lluvias y el intercambio catiónico; e) al mantenerse en el tiempo la capacidad funcional del suelo, se garantiza la sustentabilidad de los agroecosistemas regados complementariamente.

Palabras clave: oferta y demanda de agua, degradación edafosalina, agroecosistemas sustentables, incremento área regada.

Etcheverry, Marta & Leopoldo Génova (2015) Sustainable use of water and soil resources for complementary irrigation of corn and soybean in the Arrecifes Basin, Buenos Aires Province. Rev. Fac. Agron. Vol 114 (2): 125-141

The Arrifes River Basin covers 10,000 km², presenting 90% of the soils the most agricultural aptitude. Complementary irrigation increased and stabilized crop yields, but disturbed soils. The objectives were to inventory the areas occupied with corn and soybean, quantify supply and demand for irrigation water and analyze soil saline evolution, with the hypothesis that may increase the irrigated area. The water supply was estimated by the recharge rate of the Pampeano Aquifer and the effective precipitation. The water demand was accounted estimating irrigation needs of corn and soybeans. The soil map units were characterized by identifying and analyzing the profiles of soil domains. The water and soil qualities were evaluated by sampling and physicochemical analysis. The sustainability of agroecosystems was measured using soil resistance and soil resilience to saline changes as indicators. The main findings were: a) it is feasible to increase the irrigated area about 76,800 has.; b) the waters available are sodium bicarbonate, C3S2 and C3S3 classes according to the U.S. Salinity Lab and light to moderate use restriction for the IPG -INTA; c) an incremental trend indicators caused by saline irrigation appeared, but none reached identificatory drastic magnitudes and less irreversible damage; d) soil series were resilient, showing the operation of two recovery mechanisms: salt leaching by rain and cation exchange; e) as has been maintained over time the functional capacity of soils, the sustainability of irrigated complementary agroecosystems is guaranteed.

Keywords: water supply and demand, soil degradation, increase irrigated area, sustainable agroecosystems.

Recibido: 23/05/2014

Aceptado: 09/02/2015

Disponibile on line: 30/1/2016

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

INTRODUCCION

El riego complementario de cultivos extensivos en la Pampa Húmeda es una práctica agronómica cuya incorporación y difusión fue discutida y resistida durante muchos años por la comunidad agraria; debido principalmente a tres factores: a) escaso conocimiento de los alcances y ventajas del riego de cultivos extensivos, que constituyó una innovación tecnológica para la región húmeda, b) inconsistencia del método de clasificación de calidad del agua para riego del US Salinity Lab. (Richards, 1954), de uso universal en zonas áridas, que impropriadamente aplicado al riego complementario clasifica a la mayoría de las aguas disponibles en la región húmeda pampeana, como poco e incluso no aptas para uso agrícola y c) inexactitud de los pronósticos efectuados sobre la sodificación de los suelos regados complementariamente, principalmente con aguas bicarbonatadas sódicas, las cuales constituyen la fuente más importante de agua para riego en la zona (Genova, 2011).

Sin embargo, los resultados económicos obtenidos por la agricultura regada, potenciada por los avances en el fitomejoramiento, en la tecnología y manejo agronómico de los cultivos, la disponibilidad de maquinaria y agroquímicos cada vez más eficientes y el precio de las cosechas, condujeron al importante crecimiento de área regada en la región. Según el Proyecto IPG-INTA (1998), podrían regarse en la Pampa Húmeda, un total de dos millones de has. utilizadas de la siguiente forma: 50% con maíz, 25% con soja de primera siembra y 25% con la rotación trigo-soja, produciendo un incremento de los rendimientos respecto de los mejores en secano, de 4 ton.ha⁻¹ en maíz, 1,5 ton.ha⁻¹ en soja de primera y 1,0 ton.ha⁻¹ en soja de segunda y trigo.

La demostración de la factibilidad técnico-económica del riego complementario de cultivos extensivos en la Pampa Húmeda, realizada por el Proyecto SAGyP-INTA-IICA (1988), indujo su incorporación, transformando el sistema de manejo agronómico de secano, en un nuevo sistema de manejo, modificando sustancialmente el balance hídrico y salino de los horizontes edáficos (Génova, 1995). Su difusión se inició en la década de 1960, con el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*), se extendió al maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*) y soja (*Glicine soja*), intensificándose a partir de 1980 y logrando una gran expansión a principios de 1990. Actualmente la Provincia de Buenos Aires riega 166.000 ha, representando el 14 % del total de la superficie regada del país, concentrado en las cuencas de la Pampa Húmeda (PROSAP, 2006).

El horizonte de expansión del área agrícola bajo riego, no solo depende de la disponibilidad de agua, sino de la transferencia e incorporación de la tecnología de riego, de la sustentabilidad y rentabilidad de los agrosistemas regados, definidos como un sistema ecológico que integra niveles geofísicos (suelo y clima), bióticos (plantas y animales) y culturales o antrópicos; este último aprovecha y dirige el flujo trófico en el seno de un paisaje determinado (Montserrat & Villar Pérez, 1993). El mismo incorpora la variable riego como entrada al sistema en los cultivos extensivos, para generar productos agrícolas en forma sustentable.

La conservación de los recursos naturales adaptada a cambios tecnológicos, como la implementación del riego, permite asegurar el logro y la continuidad de la satisfacción de las necesidades humanas (alimentos, agua, ambiente) para las generaciones actuales y futuras. Este desarrollo sustentable, incluye la aplicación de tecnología en cultivos extensivos, tendiendo a un uso ecológicamente no degradativo, tecnológicamente apropiado, económicamente viable y socialmente aceptado. La sustentabilidad se refiere al mantenimiento de una serie de objetivos o propiedades deseadas a lo largo del tiempo. Es un concepto dinámico, que deriva de un sistema de valores y debe ser analizado en determinadas condiciones sociales y ambientales, para cada ecosistema natural modificado por el hombre mediante procesos agroproductivos.

El riego complementario disturba el suelo, causando impactos cuya naturaleza, ubicación, intensidad, duración y consecuencias son variables (Génova, 2003). Génova y Palacios Vélez (1985) mencionan que su principal característica es que las aplicaciones de agua al suelo, mediante distintos métodos, se realizan cuando la humedad del suelo se aleja del rango óptimo. Durante las etapas fenológicas en que los cultivos presentan elevada sensibilidad al déficit hídrico, se generan respuestas productivas máximas, cercanas al potencial genético de las plantas. Esto ocurre aunque la cantidad total de agua regada no supera generalmente los 300 mm por campaña agrícola. Por lo tanto, el riego complementario difiere del riego integral, practicado en las zonas áridas, en el número de riegos y fundamentalmente en el volumen total de agua aplicada.

En la región pampeana, las unidades hidrogeológicas más aprovechadas para riego son los acuíferos Pampeano y Puelche. El primero se extiende en las provincias hidrogeológicas Llanura Chaco-Pampeana Árida (650.000 km²) y Llanura Chaco-Pampeana Húmeda (350.000 km²), que en conjunto ocupan el 37% del área continental argentina. En ambas llanuras predominan en el subsuelo sedimentos limoarenosos de color castaño y origen eólico, denominado Loess pampeano (Frenguelli, 1950; Auge, 2004). Su gran extensión geográfica es interrumpida por otros tipos litológicos, como los depósitos arenosos formadores de médanos, los lacustres y los aluviales en las cercanías a los cauces. Presentan distintos grados de mineralización, con preponderancia hidrogeoquímica de aguas bicarbonatadas sódicas (Ceci, 1969; Santa Cruz, 1986; Auge, 2004; Castiglione & Cejas, 1996; González, 2004). Auge (2004) propuso la subdivisión del territorio argentino en 18 provincias hidrogeológicas, considerando características y comportamientos distintivos de las aguas subterráneas, que resultan de la interacción de factores geológicos, geomorfológicos, climáticos y biológicos, en estos últimos se incluyen las consecuencias de la acción antrópica. La cuenca en estudio se ubica en la región Llanura chaco – pampeana húmeda, unidad Noreste. Los niveles de salinidad y sodicidad del agua oscilan dentro de los siguientes rangos: conductividad eléctrica CEa = 0,8-1,4 dS.m⁻¹ y relación de adsorción de sodio RAS = 4 y 20 (Génova, 2011), cuya incorporación con el riego genera en los suelos procesos degradativos con

características y localización diversa (Génova, 1988; 1989).

El término resiliencia (RL) del suelo fue incorporado recientemente a la ciencia edáfica para remitir los temas de ecología de suelos al uso sustentable de tierras, creando una teoría común que describa la reacción del suelo a rangos de impactos o disturbios. Williams y Chartres (1991) diferenciaron resistencia RT de RL al expresar: "la magnitud de la disminución de la capacidad de un suelo de funcionar (resistencia) y la tasa de recuperación o la elasticidad (resiliencia) son dos llaves para medir la sustentabilidad". Blum (1994) sostuvo que a causa de la complejidad del suelo y de las diferentes maneras de reaccionar a disturbios externos, la RL todavía no había sido definida operacionalmente. Rozanov (1994) y Lang (1994) definieron la RL del suelo como la capacidad de resistir cambios causados por un disturbio. Szabolczs (1995) agregó que sería necesario disponer de métodos para medirla y describir los procesos resilientes. Warkentin (1996) resumió que la calidad del suelo es la llave de la sustentabilidad y Doran et al. (1996) manifestaron que la dirección de la calidad del suelo con el tiempo es un indicador primario del manejo sustentable. Seybold et al. (1999) clarificaron el concepto de RL y su pertenencia al suelo, definieron sus relaciones con la calidad de suelo y revisaron la literatura sobre su medición y cuantificación, adoptando la definición de Herrick y Wander (1998): "resiliencia del suelo es la capacidad de recuperar su integridad funcional y estructural después de un disturbio". Desde una perspectiva social y antropológica, es necesario mantener la sustentabilidad de los agroecosistemas. En este sentido, Masera et al. (1999) propusieron el uso de criterios de diagnóstico para evaluar la sustentabilidad de sistemas de manejo agrícolas, que sirvan de vínculo entre sus atributos genéricos, los puntos críticos y los indicadores. Un criterio de diagnóstico integral es la calidad del suelo, con el enfoque de Parr et al. (1992), cuando manifiestan que "un suelo de calidad se define como el que tiene la capacidad de producir cultivos sanos y nutritivos de una forma sostenida en el largo plazo y de promover la salud humana y animal, sin detrimento de los recursos naturales.

Lal (1997), definiendo la calidad edáfica como la capacidad del suelo para producir bienes y servicios económicos y para cumplir funciones de regulación ambiental, enfatizó las relaciones entre la degradación de suelos y la RL, importantes en la producción de alimentos y en el desarrollo sostenible. Aconsejó realizar experimentación de campo de mediano y largo plazo para coleccionar datos que permitan vincular calidad, degradación y RL del suelo, identificar indicadores y determinar los límites críticos de las propiedades más importantes de la degradación y la RL, reconociendo la necesidad de desarrollar y estandarizar técnicas para medir la RL. Refiriéndose a la productividad agronómica de los suelos y su RL, explicó que los suelos no resilientes pueden caer rápidamente por debajo del nivel económico al disminuir su calidad al inicio de los procesos degradativos, mientras que los suelos resilientes son altamente productivos, no se someten a los pronto cambios degradativos y su calidad es fácil y rápidamente restaurada.

Cork et al. (2012) sintetizaron los avances de los estudios ecológicos que incluyen los procesos de transformación de insumos en productos que realizan los ecosistemas y los servicios que generan, definidos como los flujos derivados de esos procesos y que son benéficos para los seres humanos, indicando que los ecosistemas son resilientes cuando pueden hacer frente, adaptarse o reorganizarse, sin renunciar a la prestación de dichos servicios. Para evaluar la RL edáfica se enfatiza la importancia de considerar las degradaciones identificando los umbrales de cambio y que pueden existir ecosistemas en múltiples estados de estabilidad, por lo que la RL es la propiedad del sistema que lo mantiene dentro de los límites de un determinado estado. En Argentina, Vázquez et al. (2013) caracterizaron la RL de 4 componentes de la materia orgánica de suelos ubicados en zona árida, comparando tres sitios con distintos manejos ganaderos con un suelo indisturbado. Aplicando la escala de Lal (1997) concluyeron que el método utilizado es una excelente herramienta para evaluar la sustentabilidad de prácticas de manejo.

Génova (1993) formuló un modelo conceptual sobre la existencia de un mecanismo natural de control de la salinización y sodificación edáfica en la Pampa Húmeda, operado por la interrelación de varios factores y procesos, como el régimen de lluvias, del orden de 950 mm anuales frente al aporte de no más de 300 mm de aguas por temporada de riego, el lavado de sales, la abundancia de calcio intercambiable, el intercambio catiónico favorecido por la mayor actividad del ión calcio en soluciones diluidas, la drenabilidad de los suelos y la escasa influencia del acuífero freático, sin vincular estos conceptos con la sustentabilidad, RL y RT. Posteriormente intervino en el desarrollo del riego complementario, trabajando en la generación, difusión y transferencia tecnológica (Génova 1994 a, b, c; 1995) y realizó una exhaustiva revisión bibliográfica sobre el impacto del riego pampeano (Génova 2003), citando resultados contradictorios, pues mientras un grupo de autores manifestaban la inconveniencia usar aguas subterráneas, otros interpretaban que los disturbios generados por el riego no alcanzan magnitudes que comprometan la sustentabilidad de los agroecosistemas. El mismo autor, investigando durante 20 años las causas y efectos de la degradación salina de los suelos regados y la relación con la calidad del agua, concluyó que el sistema de manejo agronómico bajo riego complementario en la Pampa Húmeda es sustentable debido a que la RL edáfica no es superada por el riego con aguas bicarbonatadas sódicas, a causa de procesos recuperativos que mantienen la calidad de los suelos (Wyckers & Génova, 1987), Génova (1987; 2003; 2006; 2007; 2010a; 2010b; 2011; 2013).

La Cuenca del Río Arrecifes CRA abarca casi un millón de has. de las tierras más fértiles del país. El 90% de la superficie corresponde a suelos con aptitud agrícola (Cabriní & Calcaterra, 2009), en los que se producen entre el 6% y 10% de la producción nacional de trigo, maíz, soja y girasol.

Los objetivos del presente trabajo fueron zonificar los dominios edáficos e inventariar las áreas ocupadas con maíz y soja, cuantificar la oferta y demanda hídricas para riego complementario y analizar la evolución de la salinización y/o sodificación del suelo después de la

aplicación del riego complementario. Se formuló la siguiente hipótesis: es posible incrementar el área bajo riego complementario de cultivos extensivos en la Cuenca del Río Arrecifes.

MATERIALES Y METODOS

El análisis de antecedentes bibliográficos y cartográficos permitió realizar la caracterización hidrológica y edáfica de la CRA, identificando las principales fuentes de agua disponibles. Se utilizó la diferenciación de ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires en base a la geología y geomorfología realizada por Auge (2004).

Los recursos hídricos superficiales de la CRA, no fueron tenidos en cuenta, debido a la escasa y/o faltante información de registros históricos de caudales, comparados con los aportados por el recurso subterráneo, cuya cuantificación se estableció por medio de la determinación de la tasa de extracción equivalente a la recarga del Acuífero Pampeano.

La oferta de agua de lluvia se caracterizó mediante la estimación de la precipitación efectiva (Pe) con el método de Blaney-Criddle (1950), considerando los datos climatológicos de las estaciones meteorológicas Pergamino INTA, Junín Aero y San Pedro INTA, para la serie de tiempo 1970-2000 (SMN, 2000).

Las necesidades de riego (Nr), equivalentes a la demanda hídrica total de los cultivos, se calcularon aplicando el método adaptado por Génova et al. (1998), estableciendo las evapotranspiraciones de los cultivos (Etc) con la estimación de la evapotranspiración de referencia (Eto) con el método de Penman-Monteith utilizando el Programa Cropwat (2010) y los coeficientes de cultivo (kc) obtenidos por el método de Doorembos y Pruitt (1976) y los antecedentes regionales aportados por el Proyecto IPG INTA (1998) y por Génova et al. (2000). Las Nr se estimaron aplicando la ec. 1.

$$Nr = Etc - Pe \quad (\text{ec. 1})$$

Para definir la superficie potencialmente ocupada por cada cultivo, se identificaron las unidades cartográficas que integran la CRA a partir de la Carta de Suelos de la Provincia de Buenos Aires, de escala 1: 500.000 (1990). Una vez identificados las unidades cartográficas en la CRA, se analizaron los perfiles edáficos representativos para los dominios edáficos y sus series representativas, identificando las limitantes y la capacidad de uso del suelo. Se reconoció que la clasificación de las tierras por su capacidad de uso expresó los tipos de uso del suelo para la CRA. La capacidad de uso del suelo se clasificó en clases y subclases según el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Klingebiel & Montgomery, 1961), que permitió ordenar y aclarar la capacidad de uso que tiene cada terreno y zonificar según las características de cada suelo.

El volumen neto mensual total de agua requerido para atender el consumo de cada cultivo se obtuvo operando la ec. 2.

$$VMN = Nr \cdot A \quad (\text{ec. 2}) \text{ donde:}$$

VMN= Volumen mensual neto ($\text{m}^3 \cdot \text{mes}^{-1}$)

Nr = Necesidad de riego ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{mes}^{-1}$)

A= superficie (ha) ocupada por cada cultivo

Asumiendo que la eficiencia de aplicación del riego por aspersión (Efa) con equipos autopropulsados (pivote central) es del orden del 75%, se calculó el Volumen mensual bruto VMB demandado con la ec. 3.

$$VMB = VMN \cdot Efa^{-1} \quad (\text{ec. 3})$$

La suma de los VMB de cada cultivo permitió calcular la demanda hídrica mensual bruta (DHMB) en $\text{hm}^3 \cdot \text{mes}^{-1}$, expresándola en términos de caudal continuo Q_c ($\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$) y de dotación de riego Dot ($\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$). Con dichos datos se construyeron las curvas de demanda hídrica.

Por último, para analizar la evolución de la salinización y sodificación de los suelos regados, durante el período 2005-2013 se tomaron 103 muestras de agua subterránea desde pozos ubicados en 122 lotes agrícolas de 10 establecimientos agrícolas pertenecientes a los Partidos de Chacabuco, Pergamino, Rojas y Salto, obteniéndose los siguientes indicadores: potencial hidrógeno (pHa), conductividad eléctrica (Cea), cationes sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg) y RAS. De cada lote se extrajeron muestras compuestas de suelos a 2 profundidades (0-20 y 20-40 cm), con 4 repeticiones, antes de comenzar y al finalizar cada temporada de riego, determinándose materia orgánica (MO), Na, Ca, Mg y (potasio) K intercambiables, capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH, CE_{ex} y PSI, siguiendo el Programa de métodos analíticos de referencia (1995). Los datos fueron analizados estadísticamente y correlacionaron mediante regresión lineal simple. Las aguas fueron clasificadas por los métodos del US Salinity Lab. (Richards, 1954) y del IPG INTA (1998). Con los datos de CE_{ex} y PSI correspondientes a los suelos de secano y regados, se aplicaron los modelos de Herrik y Wander (1998) para evaluar la RL y RT (ec. 4 y 5 respectivamente)

$$RL = (B-C) (A-C)^{-1} \quad (\text{ec.4})$$

$$RT = C \cdot A^{-1} \quad (\text{ec.5}) \text{ donde:}$$

A=capacidad de funcionamiento del suelo antes de sufrir el disturbio (datos de secano), B=nivel de recuperación a un nivel de equilibrio estabilizado de funcionamiento edáfico (datos de pretemporada de riego)

C=nivel de la función del suelo inmediatamente después de ocurrido el disturbio (datos de posttemporada).

Los indicadores de calidad edáfica se agruparon en función de las series de suelos encontradas, definidas en la Carta de Suelos de la Rep. Argentina (1989), comparándose la variación de los mismos a consecuencia del riego. Las RL y RT fueron correlacionadas entre sí y con los indicadores de calidad de aguas y suelos.

RESULTADOS Y DISCUSION

La CRA se encuentra ubicada en el norte de la Provincia de Buenos Aires e incluye parte de los Partidos de Arrecifes, Baradero, Capitán Sarmiento, Chacabuco, Colón, General Arenales, Junín, Pergamino, Rojas, Salto y San Pedro (Figura 1). El clima es templado, con temperaturas que varían entre los 5,4 °C y los 31,9 °C y la precipitación media anual es de 972,9 mm, según datos medidos en la EEA INTA Pergamino, con el invierno como estación seca, el mayor déficit hídrico se produce en verano.

Las aguas subterráneas existentes en la CRA se ubican en la Unidad Noreste (UNE), comprendida por los siguientes límites: al noroeste la Provincia de Santa Fe; al noreste y sudeste los ríos Paraná y de la Plata, respectivamente y al sudoeste la divisoria entre las cuencas hidrográficas del Plata y del Salado (Figura 2). En la Figura 3 se representan las curvas isofreáticas de la región (compilación DYNAS, 1974), donde se puede observar el carácter efluente de los ríos y arroyos principales (en especial en los tramos medios y bajos de sus cuencas), por lo cual se constituyen en sitios de descarga del agua subterránea. Se observa que la CRA, se ubica en un rango de curvas de valores de profundidad freática entre 10 y 40 m.

La Figura 4 presenta el mapa isopáquico, que expresa el comportamiento subterráneo del agua, resultando

trascendente respecto a la trayectoria de un eventual contaminante, el cual, bajo las condiciones de flujo señaladas, discurre hacia los cauces (Auge, 2004). La CRA está identificada por las curvas que abarcan espesores del orden de los 10m en Zarate, 20m en Pergamino, 30m en Salto y 40m en San Pedro, indicando el comportamiento subterráneo del agua. Como menciona Auge (2004), de producirse una pronunciada acción antrópica (sobreexplotación agrícola ganadera), el agua subterránea está protegida de la contaminación proveniente de la superficie.

El Acuífero Pampeano abastece los consumos doméstico periurbano y rural y del ganado. Se recarga por la infiltración de la lluvia y constituye la vía para la transferencia hidráulica hacia el Acuífero Puelche subyacente. Los valores de recarga, al depender de la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía, son muy variables en los años hidrológicos, habiéndose encontrado en la CRA valores entre 4,03 y 74 cm.año⁻¹, que obligarían a prácticas de manejo de cultivo muy diferentes. Puede estimarse en función de los registros climáticos de la región un valor de 50 cm.año⁻¹, como valor de recarga con mayor ocurrencia (Reynoso et al., 2005). En lo referente al riego, suele captarse el Pampeano mediante pozos de hasta 50 cm de diámetro, sin entubar (debido a la estabilidad del loess) y entubados, con caudales de hasta 120 m³ hora⁻¹.

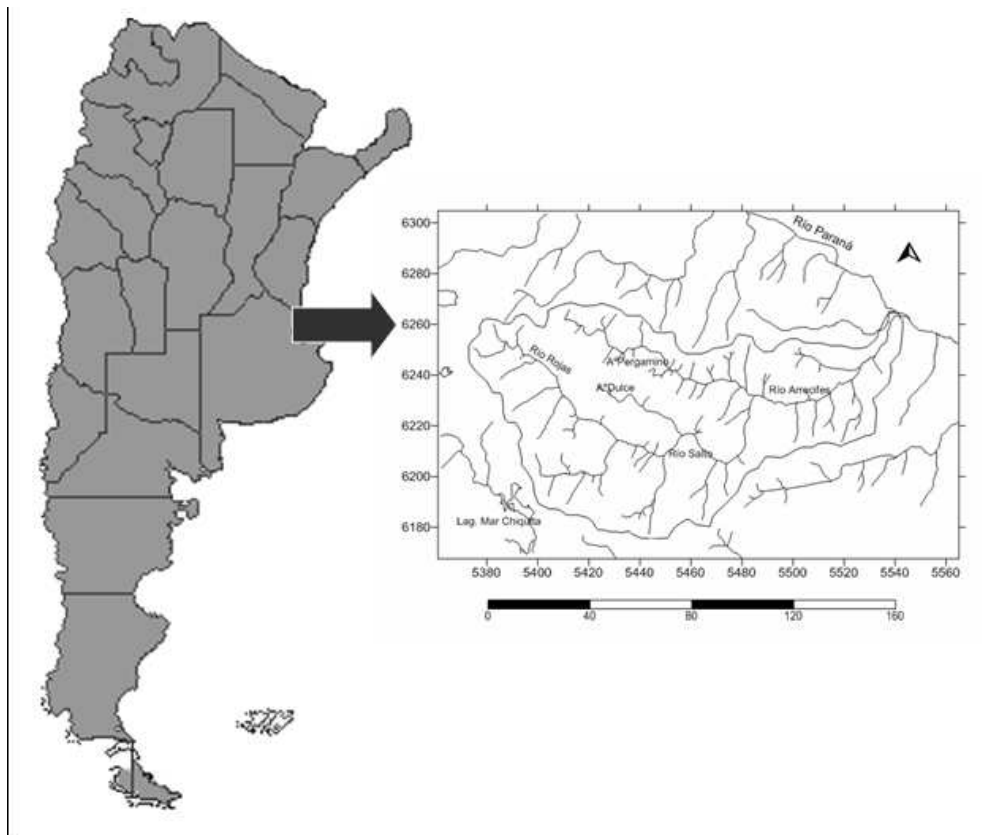


Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Río Arrecifes. Fuente: Gaspari et al (2006).

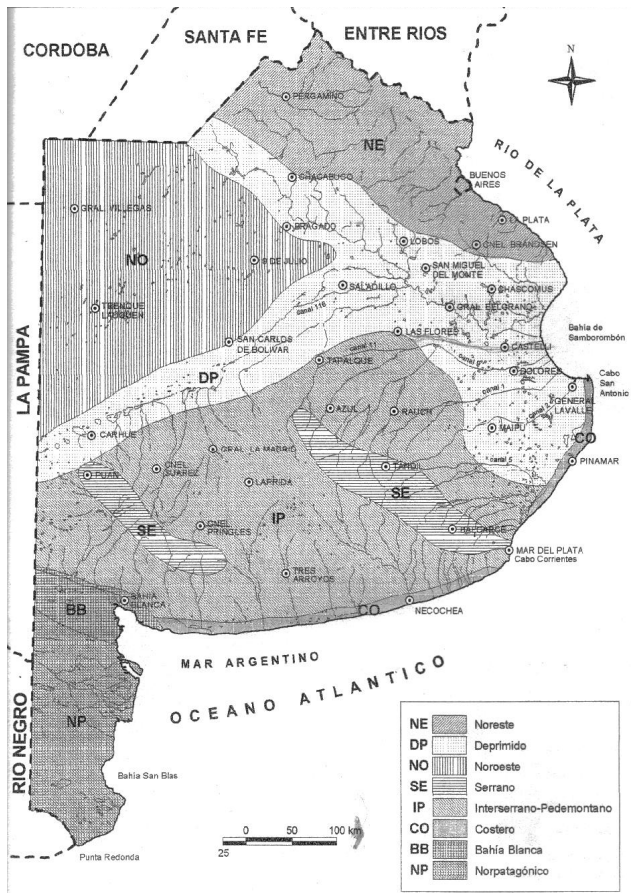


Figura 2. Ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. Fuente: Auge (2004).

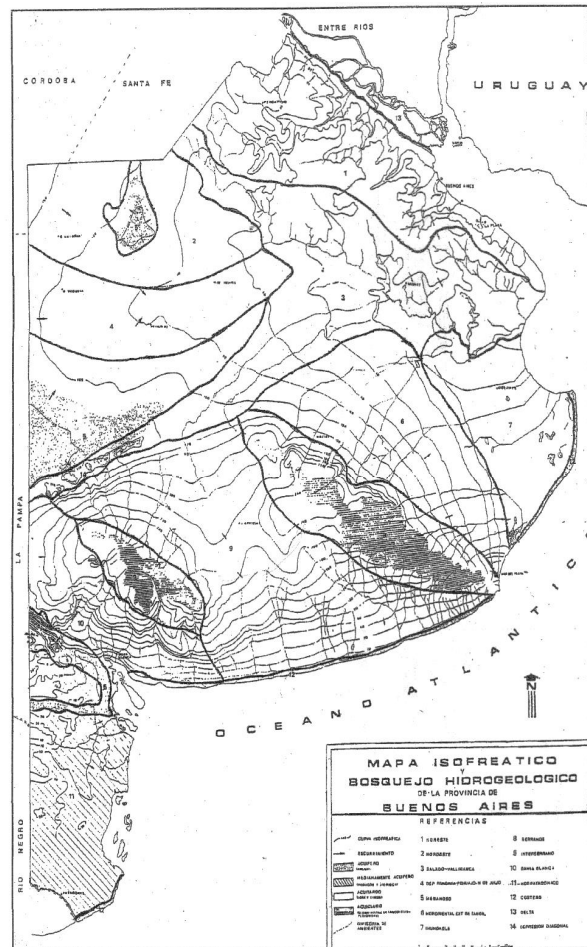


Figura 3. Mapa isofreático de la Provincia de Buenos Aires. Fuente: Auge, 2004.

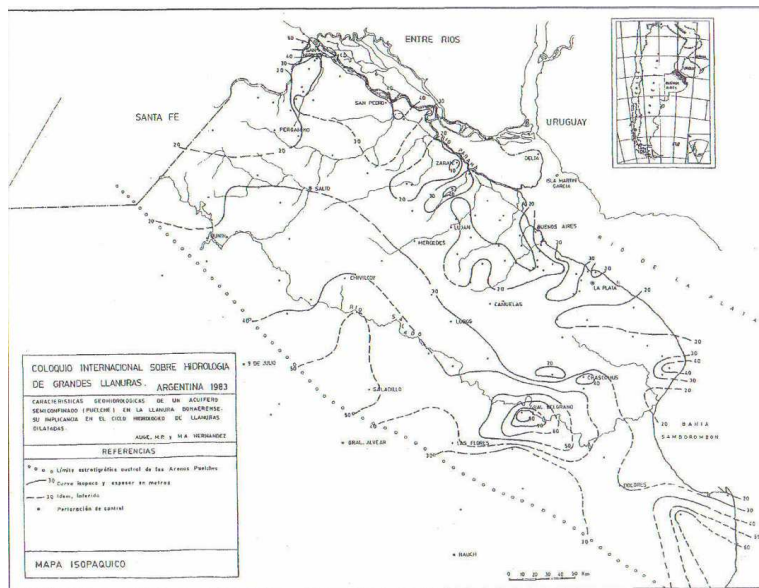


Figura 4. Mapa isopáquico del Acuífero Puelche. Fuente: Auge, 2004.

Las Arenas o Formación Puelche, subyace al Pampeano y contiene al acuífero más explotado del país. Es ampliamente empleado para riego, consumo humano, ganadero e industrial. Se recarga a partir del Pampeano mediante filtración vertical descendente a través de capas de baja permeabilidad, en los sitios donde este último tiene mayor potencial hidráulico (Auge, 1986) y localiza en la zona norte de la provincia de Buenos Aires, sur de la provincia de Santa Fe y zona oeste de la provincia de Córdoba. La productividad más frecuente del Puelche varía entre 30 y 50 m³.hora⁻¹ y la profundidad de su techo es entre 15 y 120 m en San Pedro y Colón respectivamente, mientras que el espesor oscila entre 10 m (Zárate) y 50 m (San Nicolás). Con respecto a la tasa de recarga del acuífero Puelche, no se han encontrado valores al respecto, por lo tanto no se consideró su aprovechamiento.

La caracterización de la CRA finalizó con la determinación de la superficie potencialmente ocupada por cada cultivo. Para ello, se identificaron las unidades cartográficas que integran la CRA (Figura 5), para lo cual se incorporó un mapa con el límite de la cuenca en estudio. Esta zonificación permitió definir las unidades cartográficas de suelos que se distribuyen en la cuenca y establecer los dominios edáficos intervinientes. Posteriormente se realizó un análisis de la descripción de la carta de suelos para definir sus características edáficas particulares, que se presenta a continuación. Los dominios edáficos identificados en la CRA fueron los denominados con los números 8, 10 y 19. Cada uno

de ellos se correspondió con diversas unidades cartográficas, que presentan características principales según su paisaje. Este dato fue influyente en la decisión de la definición de los usos del suelo. A continuación, se exponen las descripciones particulares de los dominios, indicando además los suelos y sus limitaciones, en los casos pertinentes.

Dominio edáfico 8a. Paisaje: Planicies amplias y onduladas. Suelos: Consociación de Argiudol típico, fino, desarrollado en lomas y hondonadas. Suelos menores: Argiacuol típico, en cubetas ubicadas dentro de las lomas; Hapludol típico, en lomas que limitan con el sector arenoso.

Dominio edáfico 8b. Paisaje: Pendientes marcadas, con inclinaciones de hasta 3%, transicionales entre los sectores altos y los cursos fluviales más importantes. Suelos: Consociación de Argiudol típico, fino, inclinado. Suelos menores: Argiudol ácuico, desarrollado al pie de las pendientes; Argiudol vértico, ubicado principalmente en las pendientes adyacentes a las vertientes del río Paraná. Limitaciones: erosión hídrica que produce un horizonte superficial delgado y zanjas o cárcavas, según la inclinación de los terrenos.

Dominio edáfico 8c. Paisaje: Vías de escurrimiento y sus áreas de influencia. Suelos: Complejo de Natracuol típico, fino, Natracualf típico y Argiudol ácuico. Suelos menores: Argiudol típico, en el límite entre el cauce y las pendientes adyacentes. Limitaciones: Anegamientos causados por aguas provenientes de áreas aledañas más altas; alcalinidad sódica desde superficie.

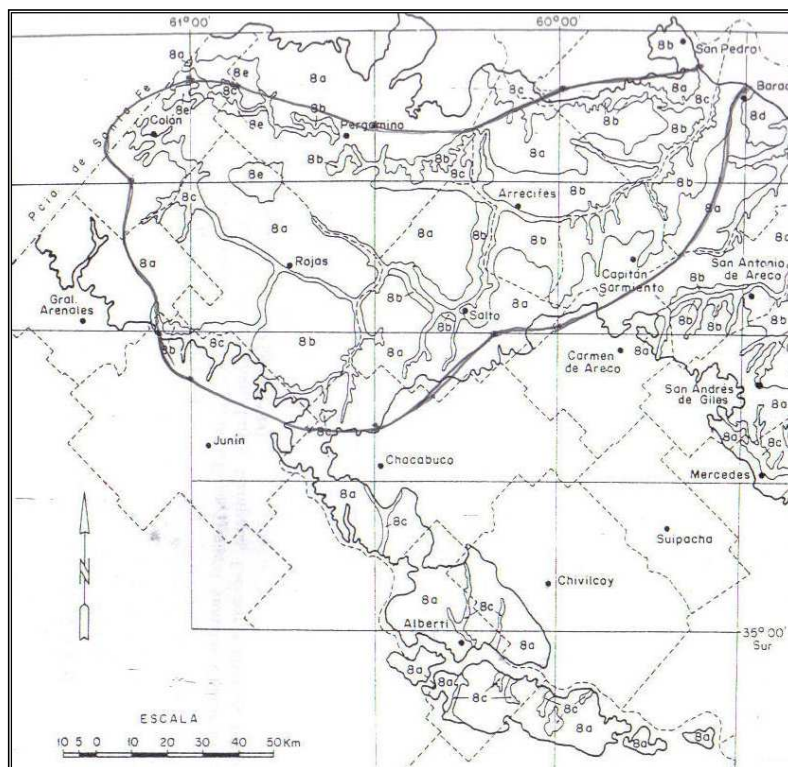


Figura 5. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1: 500.000. CIRN-INTA (1990). CRA.

Dominio edáfico 8e. Paisaje: Lomas planas que incluyen áreas imperceptiblemente más bajas. Suelos: Asociación de Argiudol típico, fino, con Argiudol ácuico y Natralbol típico. El primero se desarrolla en posiciones altas y bien drenadas, el segundo en áreas planas, mal drenadas, y el último en bajo y aureolas de cubetas. Suelos menores: Argiudoles vérticos, en lomas; Argiacuoles, en depresiones marcadas. Limitaciones: Drenaje deficiente por ligera impermeabilidad y escurrimiento lento.

Dominio edáfico 10b. Paisaje: Planicies altas, muy extendidas, que constituyen generalmente divisorias de aguas; en las márgenes de las mismas se hacen muy suavemente onduladas. Suelos: Complejo de Argialbol argiácuico, limoso fino y Argialbol típico, franco fino, que comparten en proporciones semejantes la superficie de la unidad. Suelos menores: Argialbol vértico, en las lomas marginales de las planicies vinculadas con el río Paraná. Limitaciones: Drenaje deficiente por impermeabilidad.

Dominio edáfico 10d. Paisaje: Vías de escurrimiento encausadas y áreas de confluencia (llanuras aluviales). Suelos: Complejo de Natracualf típico, limoso fino y Natracuol típico, distribuidos en áreas planas y cóncavas. Limitaciones: Alcalinidad sódica desde la superficie y anegamiento.

Dominio edáfico 19b. Paisaje: Lomas suavemente

onduladas, con áreas algo deprimidas. Suelos: Asociación de Hapludol éntico, franco grueso, ubicado en sectores altos y Hapludol típico, en áreas planas. Suelos menores: Hapludol tapto-nátrico en sectores planos. Limitaciones: Susceptibilidades a la erosión eólica.

Las características de los suelos dominantes presentes en los dominios edáficos a considerar y sus respectivas series representativas, se presentan en la Tabla 1.

A partir de la delimitación de los diferentes dominios edáficos en la CRA, por medio de la utilización del programa ARC View versión 3.3 (2000), se definieron los polígonos que correspondían a cada uno (Figura 7). Posteriormente, se calculó el área correspondiente y se determinó la superficie total disponible, por sumatoria de la base de datos georreferenciada, aportada por la Figura 6. Esta base de datos fue generada para la leyenda particular de esta figura, donde se identificaron los polígonos por colores y se correspondieron con cada dominio edáfico, con su área de ocupación en la CRA.

Posteriormente, se procesó la información y se calculó el área total correspondiente a cada dominio edáfico presente en la CRA, sumando la superficie ocupada por los diferentes polígonos de un mismo dominio edáfico (Figura 7). En esta figura se presenta también la superficie de ocupación de cada dominio.

Tabla 1. Identificación de series representativas de suelos en la Cuenca del Río Arrecifes. CIRN-INTA (1990).

| Dominio edáfico | Serie representativa | Suelos dominantes | Suelos menores |
|-----------------|----------------------|--|-------------------------------------|
| 8 a | Pergamino | Consociación de Argiudol típico | Argiacuol típico Hapludol típico |
| 8 b | Pergamino | Consociación de Argiudol típico | Argiudol ácuico Argiudol vértico |
| 8 c | Santa Lucía | Complejo de Natracuol típico Natracualf típico Argiudol ácuico | Argiudol típico |
| 8 e | Pergamino | Asociación de Argiudol típico Argiudol ácuico Natralbol típico | Argiudol vértico Argiacuol |
| 10 b | Melincué | Complejo de Argialbol argiácuico y Argialbol típico | Argialbol vértico |
| 10 d | Arroyo Juárez | Complejo Natracualf típico y Natracuol típico | |
| 19 b | Santa Ana | Asociación Hapludol éntico | Hapludol tapto-nátrico |

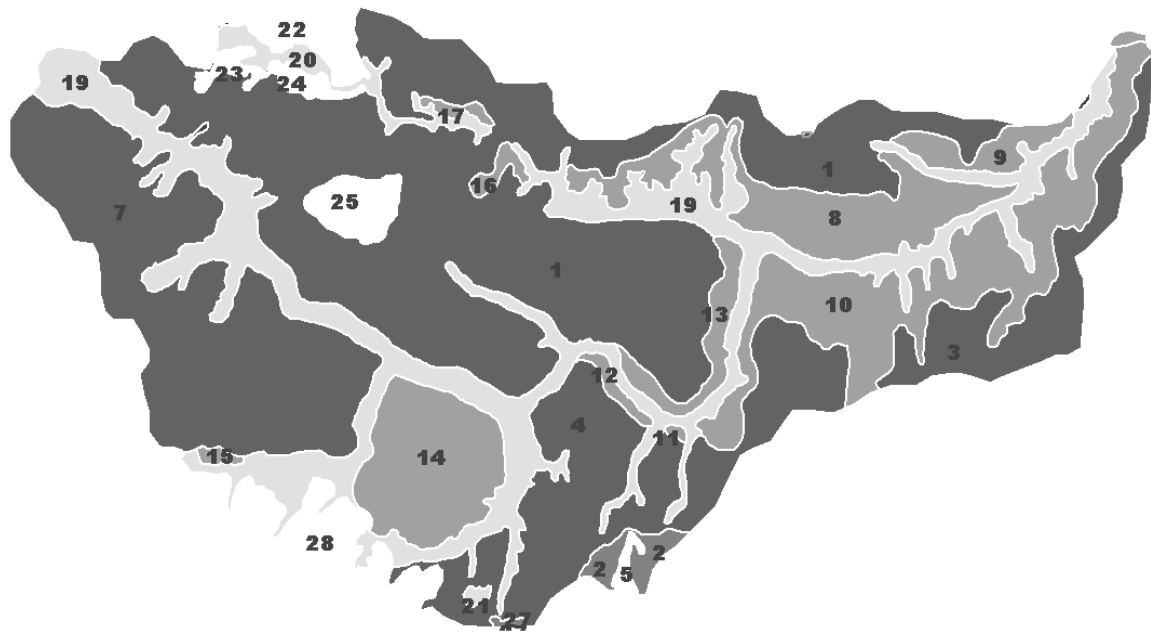


Figura 6. Identificación de los dominios edáficos. Escala 1:500.000 CIRN-INTA (1990). Referencias:

| Polígono | Dominio edáfico | Área (km ²) |
|----------|-----------------|-------------------------|
| 1 | 8a | 2.780,31 |
| 2 | 10b | 71,17 |
| 3 | 8a | 401,34 |
| 4 | 8a | 926,86 |
| 5 | 10d | 18,02 |
| 7 | 8a | 1.291,88 |
| 8 | 8b | 462,75 |
| 9 | 8b | 104,81 |
| 10 | 8b | 749,98 |
| 11 | 8b | 4,62 |
| 12 | 8b | 25,64 |
| 13 | 8b | 107,51 |
| 14 | 8b | 419,04 |
| 15 | 8b | 13,26 |
| 16 | 8b | 27,23 |
| 17 | 8b | 18,19 |
| 19 | 8c | 1.510,24 |
| 20 | 8c | 109,86 |
| 21 | 8c | 8,88 |
| 22 | 8e | 121,19 |
| 23 | 8e | 31,37 |
| 24 | 8e | 35,12 |
| 25 | 8e | 104,89 |
| 27 | 10b | 6,06 |
| 28 | 19b | 374,47 |
| Total | | 9.724,69 |

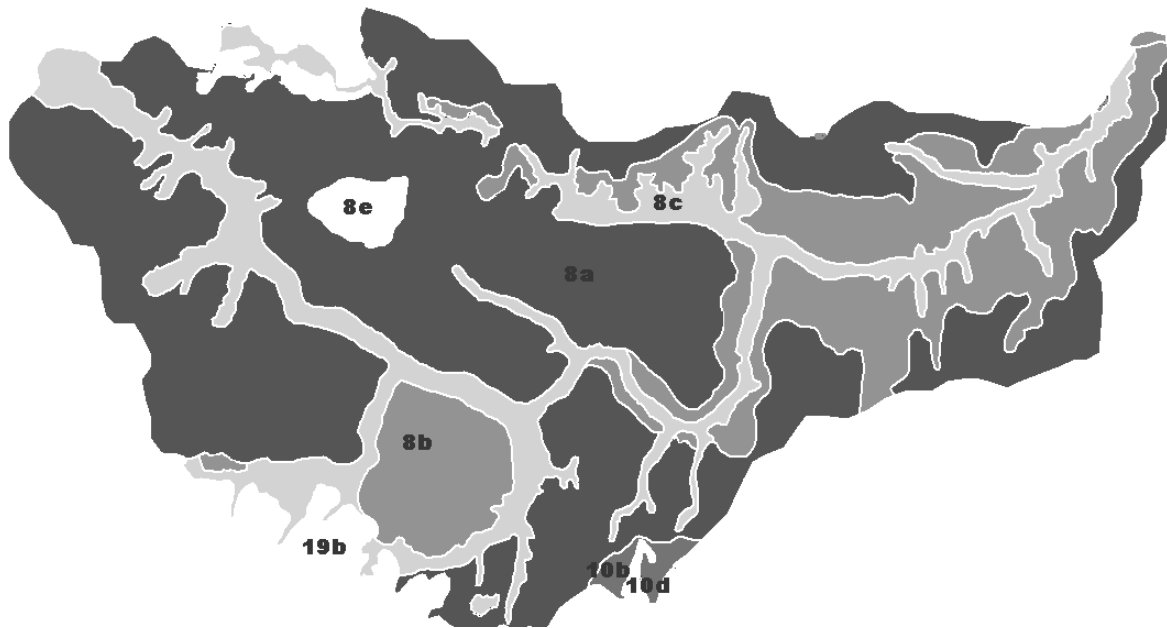


Figura 7. Zonificación correspondiente a los diferentes dominios edáficos. Escala 1:500.000 Atlas de Suelos, INTA. Referencias:

| Dominio edáfico | Área (km ²) |
|-----------------|-------------------------|
| 8a | 5.400,39 |
| 8b | 1.933,03 |
| 8c | 1.628,98 |
| 8e | 292,57 |
| 10b | 77,23 |
| 10d | 18,02 |
| 19b | 374,47 |
| Total | 9.724,69 |

En la Tabla 2 se presenta la relación entre los dominios edáficos y la clasificación de las tierras por su capacidad de uso, definidas como representativas de cada dominio, teniendo en cuenta la denominación de cada serie y las limitantes presentes. Se desprende que los resultados obtenidos con la integración a la superficie de ocupación de cada dominio edáfico, expresan un fuerte predominio de suelos con aptitud agrícola, indicado por el 55 % de la superficie de la CRA correspondiente a la clase I. Además, el 82% se corresponde a suelos agrícolas de las clases I, II y III. Estos resultados concuerdan con los indicados por Cabrini y Calcaterra (2009), en trabajos realizados en la cuenca (60% y 84% respectivamente). Considerando las limitantes antes expuestas, no se evaluaron los dominios edáficos 8c, 10b y 10d, siendo entonces la superficie a estudiar de 8.000,46 km².

Con respecto al uso actual de la tierra, se estimó por medio del reconocimiento a campo y de entrevistas, encontrando que los cultivos agrícolas ocupan un 91% de la superficie, siendo la soja de primera el cultivo predominante con un 57% de la superficie sembrada. Otros cultivos importantes son el trigo, maíz y soja de 2da, con 13%, 15% y 16% de la superficie,

respectivamente. Los recursos forrajeros ocupan un 9% de la superficie, siendo las pasturas el recurso forrajero predominante con un 5%. Esta asignación de tierra entre los diferentes cultivos es similar a la reportada en el Censo 2002 (INDEC, 2004), donde indica que el uso del suelo para cultivar soja de 1ra, trigo, maíz y soja de 2da eran de 53%, 17%, 11%, y 18%, respectivamente (Cabrini y Calcaterra, 2008). Por lo antes expuesto, se asignó una superficie de 120.007 has. dedicadas a la siembra de maíz y 456.026 has. a la siembra de soja de 1ra.

La Pe y la Eto medias para las estaciones meteorológicas consideradas se presentan en las Tablas 3 y 4, respectivamente. Ambas variables muestran una marcada homogeneidad en los valores medios mensuales de las tres localidades.

Los coeficientes de cultivo (kc) para maíz y soja figuran en la Tabla 5, los valores de la Etc media mensual de cada cultivo se muestran en la Tabla 6 y las Nr constan en la Tabla 7.

Incrementando las Nr con la eficiencia de aplicación del riego por aspersión, se obtuvo la demanda hídrica bruta mensual para las superficies de cada cultivo, expresada en términos volumétricos, de caudal continuo y de

Tabla 2. Clases de suelo, según la clasificación de las tierras por su capacidad de uso.

| Dominio edáfico | Serie representativa | Clase de capacidad de uso |
|-----------------|----------------------|---------------------------|
| 8 a | Pergamino | I |
| 8 b | Pergamino | II |
| 8 c | Santa Lucía | VI |
| 8 e | Pergamino | III |
| 10 b | Melincué | IV |
| 10 d | Arroyo Juárez | VII |
| 19 b | Santa Ana | III |

Tabla 3. Precipitación efectiva media Pe (mm). Serie 1961-2000.

| Localidad | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| Junín | 93,5 | 81,4 | 107,1 | 82,4 | 46,9 | 31,1 | 29,8 | 32,4 | 44,8 | 94,5 | 89,5 | 85,9 |
| Pergamino | 93,1 | 97,0 | 112,2 | 64,1 | 42,9 | 31,4 | 37,5 | 37,1 | 52,8 | 96,2 | 79,7 | 79,1 |
| San Pedro | 100,5 | 104 | 105,8 | 64,6 | 46,2 | 42,3 | 41,3 | 39,4 | 58,8 | 106,8 | 82,8 | 72,3 |
| Promedio | 95,7 | 94,1 | 108,4 | 70,4 | 45,3 | 34,9 | 36,2 | 36,3 | 52,1 | 99,2 | 84,0 | 79,1 |

Tabla 4. Evapotranspiración de referencia media Eto (mm.día⁻¹). Serie 1961-2000.

| Localidades | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Junín | 6,2 | 5,3 | 4 | 2,8 | 1,9 | 1,5 | 1,6 | 2,4 | 3,4 | 4,1 | 5,3 | 6,2 |
| Pergamino | 6,3 | 5,3 | 4,1 | 2,9 | 2,0 | 1,5 | 1,6 | 2,4 | 3,4 | 4,1 | 5,3 | 6,2 |
| San Pedro | 6,2 | 5,2 | 4,1 | 2,8 | 2,1 | 1,6 | 1,5 | 2,3 | 3,5 | 4,2 | 5,2 | 6,1 |
| Promedio | 6,23 | 5,27 | 4,07 | 2,83 | 2,00 | 1,53 | 1,57 | 2,37 | 3,43 | 4,13 | 5,27 | 6,17 |

Tabla 5. Valores de coeficiente de cultivo (kc), para maíz y soja de primera.

| Cultivo | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|----------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Maíz | 1,20 | 0,80 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0,40 | 0,60 | 0,85 | 1,10 |
| Soja 1ra | 1,15 | 1,10 | 0,86 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0,65 | 1,00 |

Tabla 6. Evapotranspiración de cultivo media mensual Etc (mm.mes⁻¹) Series 1961-2000. Estaciones meteorológicas Junín Aero, Pergamino INTA y San Pedro INTA.

| Cultivo | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|----------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|-------|
| Maíz | 230,6 | 118,7 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 40,8 | 76,3 | 135,2 | 211,4 |
| Soja 1ra | 221,0 | 163,2 | 109,3 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 103,4 | 192,2 |

Tabla 7. Necesidades de riego del maíz y la soja (m³.ha⁻¹.mes⁻¹)

| Cultivo | Ene | Feb | Mar | Nov | Dic | Total |
|---------|-------|-----|-----|-----|-------|-------|
| Maíz | 1.349 | 246 | 0 | 512 | 1.323 | 3.430 |
| Soja | 1.253 | 691 | 9 | 194 | 1.131 | 3.278 |

dotación de riego, cuyos valores se presentan en la Tabla 8.

En la Tabla 9 se puede observar que la diferencia entre la oferta y demanda de agua genera un exceso con el cual se podría aumentar el área regable en un total de 76.800 has., que manteniendo la proporción de superficies asignadas a cada cultivo, corresponderían incrementos de 65.600 has. regadas de soja y 11.200 has. de riego de maíz, reiterando que sólo se ha computado la oferta hídrica por parte de las lluvias y el aprovechamiento del Acuífero Pampeano.

También se consideró el mantenimiento de la sustentabilidad de los agroecosistemas regados, teniendo en cuenta la vulnerabilidad de los suelos que recibieron aportes de aguas subterráneas. La evaluación de las calidades de aguas usadas para riego indicó que todas son de naturaleza bicarbonatada sódica. En la Tabla 10 se presentan los valores medios de los indicadores y el resultado de su clasificación. Se excluyeron los datos de las aguas que regaron la Serie Gouin por considerarse escasos. La mayoría de las aguas de riego pertenecen a la clase C3S2 según el US Salinity Lab. y presentan ligeras a moderadas restricciones de uso respecto al impacto que podrían generar en los suelos, de acuerdo a la clasificación del IPG-INTA. Se asume que la clasificación del US Salinity Lab. tiene únicamente valor identificatorio, dada su amplia difusión, pero no es adecuada para pronosticar sus efectos en los suelos regados en zonas húmedas (Génova, 2011; 2013). La correlación entre la CE_a y la RAS resultó alta (r²= 0,88), acompañando las mayores RAS a los crecientes valores de la CE_a, lo cual mantiene la aptitud del agua para riego, balanceando la peligrosidad de salinización con la de sodificación de los suelos, tal como explicaron Ayers y Westcot (1989), en función de los efectos contrarios que generan las sales y el Na en la floculación coloidal.

Los suelos estudiados correspondieron a las series Chacabuco y Gouin (Argiudoles ácuicos), Rojas y Urquiza (Argiudoles típicos) y Ramallo (Argiudol vértico). En la Tabla 11 se muestran los indicadores salinos y no salinos de calidad de suelos, como así también los incrementos y decrementos porcentuales ocurridos durante los años de riego. En general la

reducción de los indicadores no salinos oscilaron entre el 10,2 y 24,4 % para la CIC, entre el 1,5 y 10,6 % para el % Ca y del 6,3 al 26,9 % para el % MO, con algunas excepciones, como los casos de la serie Rojas, que registró incrementos en la CIC y % Ca y de la serie Urquiza, donde aumentaron los % de Ca y Mo, aunque en muy pequeña magnitud. Todas las series de suelos incrementaron los valores de los indicadores salinos a causa del riego, resultando porcentualmente bajos los aumentos de pH y muy altos los incrementos de la CE_{ex} y del PSI. La serie Rojas manifestó los mayores aumentos, 433% en la CE_{ex} y 434% en el PSI, en cambio la serie Ramallo solo aumentó 88% la salinidad y 80% la sodicidad. Estas variaciones de magnitudes de los indicadores se estima que en el caso de CIC, Ca y MO son una consecuencia de la agricultura continua, sin rotaciones pastoriles y en el caso del pH, la CE_{ex} y PSI, sus aumentos son debidos al riego. (Tabla 11)

En la Tabla 12 se muestran los datos medios de los indicadores salinos de los suelos de secano y regados y los valores medios de RT y RL edáfica a cambios en sales y Na, apreciándose que en todas las series de suelos, los valores de PSI de secano son superados por los PSI de los suelos regados y que los registros de posttemporada de riego son mayores que los de pretemporada. Lo mismo ocurre con los datos de CE_{ex}. Este patrón de variación anual del PSI y de la CE_{ex}, coincide con lo reportado por Génova (2003; 2006; 2010a; 2010b), quien analizando series de tiempo de suelos regados, encontró una alternancia en los valores del PSI y de la CE_{ex} que crecen luego del período de riego (meses de noviembre a febrero) y decrecen durante los meses sin riego.

La Figura 8 permite observar que todas las series de suelos resultaron resilientes a la degradación salina y sódica, con valores de RL muy cercanos entre sí (coeficientes de variabilidad CV del 17 y 14 %, respectivamente), en cambio las RT al impacto salino presentaron mayores diferencias (CV=41 y 49%, respectivamente). Las series Ramallo y Urquiza obtuvieron las menores RT y las mayores RL a cambios del PSI, repitiéndose el comportamiento de la RL a cambios de la CE_{ex}, salvo la RTCE_{ex} de la serie Gouin, que resultó levemente menor que la de la serie Urquiza. Esta conducta resiliente de los suelos, puede explicar el

Tabla 8. Demanda hídrica total mensual volumétrica VMB, de caudal continuo Qc y dotación de riego Dot.

| Cultivo | Demanda hídrica | Dimensión | Ene | Feb | Mar | Nov | Dic | Total |
|---------|-----------------|-------------------------------------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|------------|
| Maíz | VMB | m ³ | 215852590 | 39362296 | 0,0 | 81924779 | 211692348 | 548832013 |
| | Qc | l.s ⁻¹ | 80590 | 16271 | 0,0 | 31607 | 79037 | 207505 |
| | Dot | l.s ⁻¹ .ha ⁻¹ | 0,67 | 0,14 | 0,0 | 0,26 | 0,66 | |
| Soja | VMB | m ³ | 761867437 | 420151955 | 5472312 | 117958725 | 687687208 | 1993137637 |
| | Qc | l.s ⁻¹ | 284449 | 173674 | 2043 | 45509 | 256753 | 762428 |
| | Dot | l.s ⁻¹ .ha ⁻¹ | 0,62 | 0,38 | 0,0045 | 0,10 | 0,56 | |

Tabla 9. Incremento del área regable en función de la diferencia entre la oferta y demanda hídrica

| Cultivo | Oferta de agua subterránea m ³ | Demanda Necesidades de riego m ³ | Exceso hídrico m ³ | Incremento del área a regar ha |
|---------|---|---|-------------------------------|--------------------------------|
| Maíz | 600.035.000 | 548.832.013 | 51.202.987 | 11.196 |
| Soja | 2.280.130.000 | 1.993.137.637 | 286.992.363 | 65.663 |

Tabla 10. Indicadores de la calidad del agua de riego de las series de suelos y su clasificación. L a M: ligera a moderada restricción de uso referida a peligrosidad salina y sódica de los suelos.

| Serie de suelo | CEa dS.m ⁻¹ | RAS | US Sal Lab. | IPG Sales | INTA Sodio |
|----------------|------------------------|-------|-------------|-----------|------------|
| Chacabuco | 1,08 | 10,35 | C3S2 | L a M | L a M |
| Rojas | 1,33 | 13,68 | C3S3 | L a M | L a M |
| Ramallo | 0,99 | 7,73 | C3S2 | L a M | L a M |
| Urquiza | 1,12 | 8,42 | C3S2 | L a M | L a M |

Tabla 11. Indicadores de calidad del suelo antes y después de ser regados y % de cambio.

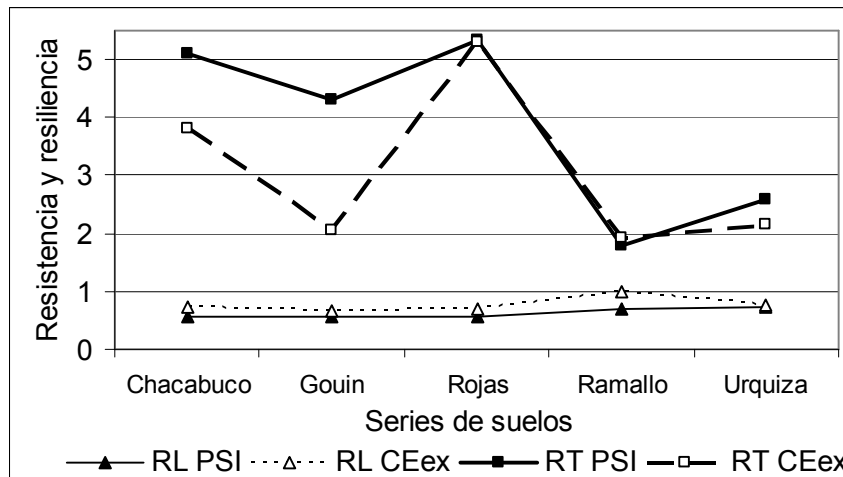
| Serie de suelo | Inicial (suelos de secano) | | | | | | Suelos regados | | | | | |
|----------------|----------------------------|------|------|-----|-------------------------|-------|----------------------------|------|------|-----|-------------------------|-------|
| | CIC cmolc.kg ⁻¹ | % Ca | % MO | pH | CEex dS.m ⁻¹ | PSI % | CIC cmolc.kg ⁻¹ | % Ca | % MO | pH | CEex dS.m ⁻¹ | PSI % |
| Chacabuco | 22,9 | 67,9 | 3,1 | 5,6 | 0,2 | 1,0 | 17,5 | 64,2 | 2,8 | 6,3 | 0,8 | 5,3 |
| Gouin | 22,7 | 70,8 | 3,2 | 5,6 | 0,2 | 1,3 | 17,6 | 68,2 | 3,0 | 6,3 | 0,4 | 5,7 |
| Rojas | 18,1 | 69,4 | 3,1 | 6,1 | 0,2 | 1,1 | 18,7 | 69,5 | 2,4 | 6,7 | 0,8 | 5,8 |
| Ramallo | 24,4 | 74,1 | 3,4 | 5,5 | 0,2 | 1,6 | 19,9 | 73,0 | 2,5 | 6,3 | 0,3 | 3,0 |
| Urquiza | 22,4 | 66,4 | 2,3 | 5,6 | 0,2 | 1,4 | 20,1 | 73,4 | 2,5 | 5,9 | 0,4 | 3,6 |

| Porcentajes de cambio con el riego | | | | | | |
|------------------------------------|-----|----|-----|----|-----|-----|
| Chacabuco | -24 | -5 | -10 | 14 | 290 | 411 |
| Gouin | -22 | -4 | -6 | 13 | 106 | 330 |
| Rojas | 3 | 0 | -22 | 9 | 433 | 434 |
| Ramallo | -19 | -1 | -27 | 14 | 88 | 80 |
| Urquiza | -10 | 11 | 8 | 5 | 117 | 159 |

Tabla 12. Valores medios de PSI y CE_{ex} de las series de suelos, obtenidos en secano (PSI A y CE_{ex} A), antes de iniciar la temporada de riego (PSI B y CE_{ex} B) y una vez concluida la misma (PSI C y CE_{ex} C). Valores medios de RT y RL de las series de suelos a cambios de sodio (RT PSI y RL PSI) y de sales (RT CE_{ex} y RL CE_{ex}), respectivamente.

| Variable | Series de suelos | | | | | Media |
|---------------------|------------------|-------|-------|---------|---------|-------|
| | Chacabuco | Gouin | Rojas | Ramallo | Urquiza | |
| PSI A | 1,03 | 1,32 | 1,08 | 1,64 | 1,40 | 1,29 |
| PSI B | 2,89 | 3,10 | 2,99 | 2,03 | 2,01 | 2,60 |
| PSI C | 5,26 | 5,67 | 5,77 | 2,96 | 3,63 | 4,65 |
| RL PSI | 0,55 | 0,57 | 0,55 | 0,70 | 0,73 | 0,62 |
| RT PSI | 5,10 | 4,29 | 5,34 | 1,80 | 2,59 | 3,83 |
| CE _{ex} A | 0,20 | 0,18 | 0,15 | 0,17 | 0,18 | 0,18 |
| CE _{ex} B | 0,35 | 0,25 | 0,31 | 0,19 | 0,23 | 0,27 |
| CE _{ex} C | 0,78 | 0,37 | 0,80 | 0,32 | 0,39 | 0,53 |
| RL CE _{ex} | 0,72 | 0,66 | 0,70 | 0,99 | 0,76 | 0,77 |
| RT CE _{ex} | 3,82 | 2,04 | 5,30 | 1,91 | 2,14 | 3,04 |

Figura 8. Valores de resistencia y resiliencia a cambios en el PSI y la CE_{ex} de las series de suelos.



sostenimiento y expansión del riego complementario incorporado en la región, que además de minimizar los riesgos de disminución de cosechas por déficit hídrico, estabilizó los rendimientos de los cultivos, muy superiores a las condiciones de secano, donde la mayor respuesta productiva es lograda por el maíz. Esta relación entre la RL y la productividad agronómica coincide con lo reportado por Lal (1997).

Se halló una alta correlación ($r^2=0,89$) entre la RT y RL a cambios del PSI, no así entre las RT y RL a cambios de CE_{ex} cuya correlación fue muy baja ($r^2=0,17$). Esta respuesta resistente y resiliente se asocia a dos mecanismos de recuperación: el intercambio catiónico y el lavado de sales. La sodicidad edáfica depende fuertemente de la CIC y esta, a su vez, de los contenidos de MO y Ca intercambiable. La correlación entre la CIC y el % Ca de intercambio resultó elevada ($r^2= 0,89$), pero entre la CIC y el % MO, fue menor

($r^2=0,56$). La salinidad no solo depende de la cantidad y calidad del aporte hídrico sino también del régimen de precipitaciones y otros factores que intervienen en los procesos de infiltración y percolación, que generan el lavado de sales a expensas de las lluvias en exceso que habitualmente se registran en la CRA.

Para explicar los resultados de la cuantificación de la RT y RL, se tomaron en cuenta sus relaciones con los indicadores de calidad del suelo CIC, Ca, MO, CE_{ex} y PSI y con los indicadores de calidad de aguas CE_a y RAS. Respecto de la vinculación de los valores de RT y RL con los % de variación de los indicadores no salinos entre los suelos de secano y regados, ambas presentaron una muy baja correlación. Contrariamente, las RT y RL a cambios sódicos se correlacionaron fuertemente con los % de aumento del PSI; las mayores RTPSI se correspondieron con los más altos incrementos de PSI ($r^2=1$) y las mayores RLPSI

ocurrieron con los menores incrementos de PSI ($r^2=0,89$). La $RTCE_{ex}$ aumentó con los mayores % de incremento de la CE_{ex} ($r^2=0,99$), pero la $RLCE_{ex}$ tuvo escasa relación con la variación de la CE_{ex} ($r^2=0,17$). Evidentemente, el riego produjo incrementos de salinidad y sodicidad en los suelos, en magnitudes condicionadas por la calidad de las aguas usadas.

El análisis de las relaciones de RT y RL a cambios de las propiedades químicas de las series de suelos con los indicadores de calidad de aguas con que fueron regadas, determinó que están altamente correlacionadas: la RLPSI disminuyó con el aumento de la RAS ($r^2=0,80$) y la RTPSI aumentó con valores crecientes de la RAS ($r^2=0,87$), ambas a expensas del indudable impacto ocasionado por el aporte de mayor cantidad relativa de sodio con el agua de riego. También se evidenció una elevada correlación de la $RTCE_{ex}$ que se incrementó con los aumentos de la CE_a ($r^2=0,84$), explicada por el impacto de las aguas más salinas al finalizar la temporada de riego, mientras que la correlación entre la $RLCE_{ex}$ y la CE_a es baja ($r^2=0,43$), aunque muestra una tendencia creciente con la disminución de las concentraciones de sales incorporadas con el riego.

CONCLUSIONES

La evaluación de la disponibilidad (cantidad y calidad de sus recursos hídricos y edáficos) permite concluir que es factible incrementar el área bajo riego complementario en la Cuenca del Río Arrecifes en 76.800 has. Manteniendo la proporción de superficies asignadas a cada cultivo, corresponderían aumentos de 65.600 has. de riego de soja y 11.200 has. de riego de maíz, computándose solamente la oferta hídrica por parte de las lluvias y del Acuífero Pampeano.

Todas las aguas de riego resultaron bicarbonatadas-sódicas, con rangos de CE_a entre 0,99 y 1,33 $dS \cdot m^{-1}$ y RAS 7,7 a 13,7, pertenecientes a las clases C3S2 y C3S3 según el US Salinity Lab. y de ligera a moderada restricción de uso para el método del IPG-INTA. La alta correlación CE_a - RAS ($r^2=0,88$), explica el equilibrio entre los efectos de las sales y el sodio en la floculación de los coloides del suelo, que mantiene aceptables las aptitudes agrícolas de las aguas.

Los suelos correspondieron a las series Chacabuco y Gouin (Argiudoles ácuicos), Rojas y Urquiza (Argiudoles típicos) y Ramallo (Argiudol vértico). En todas se manifestó una tendencia incremental de los indicadores salinos causados por el riego, porcentualmente bajos los aumentos de pH y muy altos los aumentos de CE_{ex} y PSI, incluso cuadruplicando los datos de secano. Sin embargo, ninguno alcanzó magnitudes indicadoras de degradaciones drásticas y menos irreversibles, ya que la dinámica salino-sódica mostró un patrón de alternancia: los registros de posttemporada de riego superaron a los de pretemporada, sin marcar una tendencia acumulativa en el tiempo. Evidentemente funcionan dos mecanismos de recuperación que explican la RL: el lavado de sales por las lluvias y el intercambio catiónico donde el Ca sustituye al Na aportado con el riego. Caracterizadas la RT y RL de los suelos, todas las series resultaron ser resilientes a las degradaciones,

con valores de RL similares y de RT más variables. Se halló una alta correlación entre RT y RL a cambios del PSI ($r^2=0,89$) y muy baja correlación entre RT y RL a cambios en la salinidad ($r^2=0,17$). Las series Ramallo y Urquiza obtuvieron las menores RT y las mayores RL a cambios del PSI, repitiéndose el comportamiento de la RL a cambios de la CE_{ex} , salvo la $RTCE_{ex}$ de la serie Gouin, que resultó levemente menor que la de la serie Urquiza.

Las correlaciones de RT y RL a cambios en la sodicidad con los indicadores no salinos de calidad edáfica fueron muy estrechas con la CIC y el % Ca y casi nulas con la MO. Los suelos con mayor CIC y Ca evidenciaron las más altas RTPSI y RLPSI. Este comportamiento resiliente de los suelos, explica la gran difusión del riego complementario en la región, que además de atenuar el riesgo de ocurrencia de déficit hídrico, estabilizó las cosechas en altos rendimientos de los cultivos. Respecto de la salinidad, tanto la $RTCE_{ex}$ como la $RLCE_{ex}$ mostraron muy baja correlación con la CIC, el %Ca y la MO. En cambio, las correlaciones entre las RT y RL con los indicadores salinos de la calidad de los suelos fueron altísimas, salvo el caso de la $RLCE_{ex}$ y el % de incremento de la CE_{ex} . Las mayores RT ocurrieron en los suelos donde se registraron los mayores incrementos de PSI y CE_{ex} y lo mismo sucedió con la RLPSI.

Se encontró gran dependencia entre RT y RL con la calidad del agua, excepto la $RLCE_{ex}$ y la CE_a , que fue menor. Los suelos que recibieron aguas más sódicas y salinas, alcanzaron los más altos valores de RTPSI y $RTCE_{ex}$, respondiendo al impacto de las sales y el Na en el suelo una vez transcurrida la temporada de riego. Los suelos más resilientes a cambios del PSI fueron los que recibieron las aguas con mayor RAS, manifestando su capacidad recuperativa.

La evaluación de la calidad de los suelos regados, utilizando como indicadores principales la resistencia y la resiliencia a cambios en sus propiedades químicas, permite concluir que se mantiene la capacidad de funcionamiento del suelo a expensas de los mecanismos de recuperación de los disturbios producidos, por lo tanto el riego complementario de cultivos en la Cuenca del Río Arrecifes es un sistema de manejo agronómico sustentable.

La información generada sobre los recursos hídricos y edáficos disponibles, puede utilizarse en la planificación integral del desarrollo agrícola regional, basado en la incorporación del riego complementario.

BIBLIOGRAFIA

- Auge, M.** 1986. Hydrodynamic behavior of the Puelche Aquifer in Matanza River Basin. *Ground Water* ·24 (5) 636 – 642 Dublin, Ohio.
- Auge, M.** 2004. Regiones hidrogeológicas de la República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea. En www.alhsud.com/castellano/ebook. Ed. propia. La Plata.
- Ayers, R. & D. Westcot.** 1989. La calidad del agua en la agricultura. Serie FAO Riego y Drenaje N° 29 rev.1. Roma, Italia.

- Blaney, H & W. Criddle.** 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data USDA Soil Conservation Service Technical Paper 96 Washington.
- Blum, W.** 1994. Soil resilience- General approaches and definition. In Proc. 15 th World Cong. of soil sci. Acapulco, México. pp 233-237.
- Cabrini, S. & C. Calcaterra.** 2009. Sistemas de producción en el Partido de Pergamino. Valoración Económica del Impacto sobre la Capacidad Productiva de los Suelos. Centro Regional Buenos Aires Norte Estación Experimental Agropecuaria Pergamino Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales Ed. INTA 2009 Nro 12.
- Carta de Suelos de la R. Argentina.** 1989. Escala 1:40.000. Varias hojas. Instituto de Suelos. CIRN. INTA. Castelar
- Carta de Suelos de la R. Argentina.** 1990. Escala 1:500.000. Instituto de Suelos. CIRN. INTA. Castelar.
- Castiglioni, M. & J. Sejas.** 1996. Análisis de factores naturales para riego complementario de la zona Centro de Santa Fe. Ministerio de Agricultura de Santa Fe.
- Ceci, J.** 1969. El agua subterránea del NE de la Pcia. de Buenos Aires. CIC. La Plata.
- Cork, S., L. Eadie, P. Mele, R. Price & D. Yule.** 2012. The relationships between land management practices and soil condition and the quality of ecosystem services delivered from agricultural land in Australia. Kiri-ganai Research Pty Ltd. Camberra, Australia. 127 pp. Cap 8.
- Costa, J.** 1998. Calidad de agua para riego. Cuadernos AgroMercado N° XXVIII, pp 8-11.
- Doorembos, J. & W. Pruitt.** 1976. Las necesidades de riego de los cultivos Estudios FAO Riego y drenaje N° 24. Roma.
- Doran, J., M. Sarrantonio & M. Liebig.** 1996. Soil health and sustainability. In Advances in Agronomy, Vol 56, D. Sparks (ed). Acad. Press, San Diego, pp 1-54.
- DYMAS.** 1974. Contribución al mapa geohidrológico de la Provincia de Buenos Aires. Inéd. CFI. La Plata.
- Frenguelli, J.** 1950. Rasgos generales de la morfología y la geología de la provincia de Buenos Aires. LEMIT. La Plata. Ser. II Nro 33 pag. 1 – 72.
- Gáspari, F., M. Vázquez & J. Lanfranco.** 2006. Relación entre la erosión hídrica superficial y la distribución de la pérdida de calcio, magnesio y potasio del suelo". Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata. 106 (1) pag. 47 – 56. ISSN 0041-8676.
- Génova, L. 1988a.** Impacto de las aguas bicarbonatadas sódicas en suelos regados complementariamente en la región típica maicera de la Pcia. de Buenos Aires. Documento de informe de avance. Carta acuerdo RLAC-FAO-UNLP. La Plata. 88 pp.
- Génova, L. 1988b.** Taller FAO sobre Análisis de métodos empleados en la recuperación de tierras y la prevención de la degradación de tierras bajo riego y drenaje de América Latina. Riego complementario en el norte de Buenos Aires: bases para prevenir la degradación de suelos. Organizado por la RLAC-FAO y el Programa Nacional de Drenaje de Tierras del Perú PRONADRET. 24 y 29 de octubre de 1989. Chiclayo, Perú.
- Génova, L. 1993.** Estudio de la degradación de suelos bajo riego complementario de cultivos extensivos con aguas del acuífero Pampeano en el norte de Buenos Aires. XIV Cong. Arg. de la Ciencia del Suelo. 347:352 pp. Mendoza.
- Génova, L. 1994a.** Riego complementario de maíz, soja y trigo en el norte de Buenos Aires: efectos de la salinidad de las aguas subterráneas en los suelos y su influencia en los rendimientos. Actas 1er Cong. Intern. de Ing. Agrícola, Univ. de Concepción, Chile
- Génova, L. 1994b.** Riego complementario del cultivo de maíz: análisis comparativo de costos totales de riego de cinco tipos de equipamiento. Actas 1er Cong. Intern. de Ing. Agrícola, Univ. de Concepción, Chile.
- Génova, L. 1994c.** Diseño, operación y evaluación de riego complementario por surcos, en terrenos no nivelados de la región norpampeana. Actas I Cong. Int. de Ing. Rural y III Cong. Arg. de Ing. Rural. Morón, Bs Aires, 11-15-07-1994.
- Génova, L. 1995.** Diseño y operación de riego complementario por surcos de maíz, soja, sorgo y girasol en la Región Pampeana Húmeda. 2do. Semin. de Actualiz. Técn. en Riego. Ed. CPIA, CADIA-INTA-SRA. pp 25-38. Buenos Aires.
- Génova, L. 2003.** Resistencia y resiliencia de suelos pampeanos a la degradación salina y sódica, disturbados por riego complementario. Rev. Fac. Agronomía. 23 (2-3)119:130. Buenos Aires.
- Génova, L. 2006.** Sustentabilidad de agroecosistemas bajo riego complementario en la Pampa Húmeda Argentina. Rev. Brasileira de Agroecología. Nov 2006. 1:1:71-74.
- Génova, L. 2007.** Resiliencia a la degradación salina y sódica de algunos suelos pampeanos regados complementariamente con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas. Tesis doctoral. FCAYF-UNLP La Plata. 245p
- Génova, L. 2010a.** Dinámica salina de suelos regados complementariamente. Libro de resúmenes del XXII Cong. Arg. de la Ciencia del Suelo, Pág. 229. Trabajo completo N° 4-444-1 en CD Rom. Mayo 31 a Junio 4 de 2010. Rosario
- Génova, L. 2010b.** Sustentabilidad de agroecosistemas pampeanos argentinos regados complementariamente. Tomo II. Cap. Agrohidrología. 605-612 pp. M. Varni, I. Entraigas y L. Vives (Eds) Azul, Argentina. ISBN 978-987-543-392-2.
- Génova, L. 2011.** Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda argentina. Revista de la Facultad de Agronomía Vol 110 (2): 63-81. La Plata.
- Génova, L. 2013.** Comparación de tres clasificaciones de calidad de aguas para riego complementario en el Norte de la Pcia. de Bs. Aires. Tomo II. Pp 131-138. González et al eds. Ed. Univ. de La Plata. ISBN 987-1985-04-5. La Plata.
- Génova, L. & E. Palacios Vélez.** 1985. Respuesta de la papa (*Solanum tuberosum L.*) a niveles de humedad del suelo en dos etapas fenológicas y a la fertilización nitrogenada. Agrociencia N° 59:55-70. México.
- Génova, L., J. E. Marassi, M. Etcheverry & W. Chale.** 2000. Optimización del uso de aguas y suelos en el riego complementario de maíz, soja y trigo en el Norte bonaerense. Abstracts de la 11th. International Soil Conservation Organization Conference. ISCO 2000. "Land conservation and food production in the third

- millennium". Trabajo 2-72, pág. 175. Octubre 22 al 27 de 2000. Buenos Aires.
- González, N.** 2004. Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. CISAUA-UNLP. La Plata. 20 pp.
- Herrick, J. & M. Wander.** 1998. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils. The importance of distribution, composition and soil biological activity. In Soil Processes and the Carbon Cycle. R. Lal et al (eds). Adv. in Soil Sci. CRC Press, B. Ratón, Florida, p. 405-426.
- INDEC.** Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. 2004. Datos Censo Agropecuario 2002 Buenos Aires, 196 pp.
- Klingebiel, A. & P. Montgomery.** 1961. Land capability Classification, USDA, SCS, Agr. Handbook N° 210. Washington D.C
- Lang, I.** 1994. Soil resilience in stressed agroecosystems. In Proc. 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, México. Vol 2 a:217-220.1994.
- Masera, O., M. Astier & S. López-Ridaura.** 1999. Sustentabilidad y evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales. El marco MESMIS. Mundi-Prensa-GIRA-UNAM. México.
- Monserat, P. & L. Villar Pérez.** 1993. Los agroecosistemas. Historia Natural'93: Actas de la XI Bienal de la Real Sociedad Española de Historia Natural: Jaca, 13-18 de Septiembre de 1993: pp 157-168.
- Parr, J., R. Papaendick, S. Hornick & R. Meyer.** 1992. Soil quality: attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. Am. J. of Altern. Agriculture 7: 5-11.
- Programa Arc-View** Versión 3.3. 2000.
- Programa Cropwat-FAO.** 2010. Programa para cálculo de la precipitación efectiva (Método del US Bureau of Reclamation, SCS, USA y de la evapotranspiración de referencia (Método de Penman-Monteith) y requerimientos de riego. By AGOL-FAO. Roma.
- PROSAP. Programa de servicios agropecuarios provinciales.** 2006. Servir al agro. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, Ministerio de Economía y Producción de la R. Argentina. Bs. Aires. 180 pp.
- Programa de métodos analíticos de referencia.** 1995. Comité de Química, Asoc. Arg. de la Ciencia del Suelo. Bs. Aires. Buenos Aires.
- Proyecto IPG-INTA.** 1998. Síntesis de discusión del taller sobre calidad de aguas para riego. Proy. Incremento producción de granos. Noviembre 9-10 de 1998. Pergamino. 3 pp.
- Proyecto SAGyP-INTA-IICA.** 1988. Proyecto de Cooperación para la Modernización del Sector Agropecuario. Estudio de factibilidad técnica, económica y financiera del riego complementario y Uso de Aguas Subterráneas en la región maicera típica. 33 pp. Ed. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Buenos Aires.
- Reynoso, L., C. Sasal, S. Portela & A. Andriulo.** 2005. Vulnerabilidad del acuífero Pampeano a la contaminación en el Norte de la provincia de Buenos Aires. Aplicación de la metodología DRASTIC, RIA, 34 (1): 85 – 99. INTA Argentina.
- Richards, L (ed).** 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura N° 60. Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los EE. UU. de América, Riverside, California. Washington. 172 pp.
- Rozañov, B.** 1994. Stressed soil system and soil resilience in drylands. In Proc. 15th World Cong. of Soil Sci. Acapulco, Méx. Pp. 238-245.
- Santa Cruz, J.** 1986. Estudio de factibilidad técnica, económica y financiera del riego complementario en la zona maicera típica de la Pcia. de Buenos Aires. Aguas subterráneas. Informe de avance. Convenio SAGyP-IICA. Buenos Aires.
- Servicio Meteorológico Nacional.** 2000. Estadísticas climáticas de las estaciones meteorológicas San Pedro, Junín y Pergamino, series 1970 - 1999.
- Seyblod, C., J. Herrick & J. Brejda.** 1999. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. Soil Sci. 164:4:224-234.
- Szabolczs, Y.** 1995. Introduction to the symposium on "Stressed ecosystems and soil resilience". In Proc. 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, Méx. Vol 2 a:218-220.
- Vázquez, C., C. Merlo., L. Romero., A. Abril & C. Carranza.** 2013. Sustentabilidad/resiliencia de los componentes de la materia orgánica del suelo en una región árida de Argentina. Spanish J. of Soil Sc. 3:1:73-77.
- Warkentin, B.** 1996. The changing concept of soil quality. Journal of Soil Water Conserv. 50:226-228.
- Williams, J. & C. Chartres.** 1991. Sustaining productive pastures in the tropics. I. Managing the soil resource. Trap. Gras.25:73-84.
- Wyckers, A. & L. Génova.** 1987. Evaluación del efecto del riego complementario en el cultivo de maíz con aguas bicarbonatadas sódicas en la región típica maicera. Trabajo de Intensificación. Fac. de Agronomía UBA. 45 pp.