

Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina

Ramón M. Sánchez, Luciana Dunel Guerra y Maira Scherger



Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina

Ramón M. Sánchez, Luciana Dunel Guerra y Maira Scherger



**Ministerio de Agroindustria
Presidencia de la Nación**

Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi

Ruta Nac. N° 3 Km 794 - (8142) Hilario Ascasubi

Provincia de Buenos Aires. Argentina

2016

Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina

Ramón Mauricio Sánchez UNS - INTA Programa Nacional Agua, Luciana Dunel Guerra INTA y Maira Scherger asesora privada.

La presente obra fue realizada en convenio entre INTA y FAO

Edición 1ª.

Ediciones INTA

Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi

Ruta Nac. N° 3 Km 794 - (8142) Hilario Ascasubi

Provincia de Buenos Aires. Argentina

2016

ISBN 978-987-521-717-1

Sánchez, Ramón Mauricio

Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina / Ramón Mauricio Sánchez; Luciana Dunel Guerra; Maira Scherger. - 1a ed. - Hilario Ascasubi, Buenos Aires: Ediciones INTA, 2016.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-521-717-1

1. Riego. 2. Salinidad. I. Dunel Guerra, Luciana II. Scherger, Maira III. Título CDD 631.42

© 2016, Ediciones INTA

Libro de edición argentina

Todos los derechos reservados. No se permite la reproducción total o parcial, la distribución o la transformación de este libro, en ninguna forma o medio. Ni el ejercicio de otras facultades reservadas sin el permiso previo y escrito del editor. Su infracción está penada por las leyes vigentes.

PRÓLOGO

La salinización y la sodificación de los suelos conjuntamente con la contaminación de suelos y aguas son los principales problemas ambientales asociados al riego, en particular en las regiones áridas y semiáridas.

A nivel mundial, la FAO (Aquastat, 2016) estima que el 17% (37 millones de ha) de un total de 275 millones de hectáreas efectivamente irrigadas se encuentran afectadas por salinidad y niveles freáticos altos, fenómeno que causa problemas productivos por sí mismo y es el gran responsable de la salinidad y sodificación de los suelos.

A nivel nacional, no ha existido un proceso sistemático de monitoreo de la afectación por salinidad y sodicidad de los suelos irrigados de las regiones áridas y semiáridas y poco se ha hecho por el momento para el desarrollo y validación de tecnologías para la ejecución del mismo basado en sensores remotos, lo que posiblemente viabilizarían un programa de monitoreo si resultara más económico además de posibilitar una densidad de muestreo mayor que el de la metodología clásica de muestreo puntual y determinaciones de laboratorio.

La información más completa a nivel nacional, que se disponía hasta el momento fue realizada por INTA en el año 1986 en base a informantes calificados en las diferentes regiones. El presente trabajo, realizado en convenio entre el INTA y FAO en el marco del estudio FAO-PROSAP para estimar el potencial de incremento del riego en la Argentina, fue realizado con igual metodología que aquel y representa su actualización luego de transcurridos 30 años.

Se realiza una nueva estimación del nivel de deterioro de los suelos por salinización y/o sodicidad por provincia y a nivel país como fenómeno colateral de la superficie irrigada que muestra un sostenido crecimiento del riego por aspersión, particularmente en la Región Pampeana y del riego por goteo en la región árida de Cuyo y los cinturones verdes de los grandes centros urbanos.

El trabajo del INTA y FAO significa un aporte para la toma de decisiones en los sectores estatal y privado, y una fuente documental para las universidades e institutos de investigación. Al mismo tiempo se constituye en un punto de inflexión para el Programa Nacional Agua del INTA, de reciente creación, que asume el compromiso de desarrollar y validar en los próximos años las innovaciones tecnológicas necesarias para estimular no solo un mejor manejo del riego y el drenaje que minimice los externalidades negativas sobre el suelo, sino también aquellas que permitan el monitoreo sistemático y frecuente del estado del problema.

Dr. Daniel Prieto Garra
Coordinador Nacional
Programa Nacional Agua INTA

AGRADECIMIENTOS

Loa autores agradecen:

- A FAO y al INTA por la confianza y apoyo para la realización de este trabajo.
- A los consultores por su trabajo y aportes, a los técnicos del INTA, Universidades, Organismos Administradores de áreas bajo riego y técnicos de la actividad privada por los valiosos datos suministrados.
- A Santiago Crocioni responsable informático de la EEA Hilario Ascasubi del INTA.
- A los responsables del Laboratorio de Teledetección y SIG de la EEA Hilario Ascasubi del INTA.
- Al Ing. Agr. Mariano Plá, por las discusiones técnicas y aportes desde el Consorcio hidráulico VBRC.

ÍNDICE

PRÓLOGO.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	6
I. INTRODUCCIÓN	8
1. La ampliación potencial del riego en Argentina	12
2. Las causas de la salinización	17
3. Las sales del suelo y sus componentes más comunes.....	19
4. Descripción de las características y efectos de las sales más comunes en el suelo y agua de riego	20
4.1. Carbonatos	20
4.2. Sulfatos.....	21
4.3. Cloruros	22
4.4. Nitratos.....	23
4.5. Boratos	24
5. Efectos del sodio en los suelos regados	24
6. Riego con agua carbonatada sódica	25
7. Consecuencia del riego complementario sobre propiedades edáficas en la llanura pampeana	26
8. Metodología para la evaluación de las áreas bajo riego afectadas por sales y/o sodio	27
II. REGIÓN CUYO.....	29
III. REGIÓN PATAGÓNICA	34
IV. REGIÓN PAMPEANA Y NEA.....	37
V. REGIÓN NOA	45
VI. CONCLUSIONES.....	51
MAPAS E IMÁGENES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	69

I. INTRODUCCIÓN

La República Argentina riega sus suelos desde la época precolombina. En momentos del arribo de la conquista española a la actual Mendoza, ya existían cultivos regados de maíz y papa, los cuales eran un desprendimiento de los realizados en Salta, Jujuy y Santiago del Estero, influenciados a su vez por el desarrollo que había adquirido el imperio incaico. El período colonial realizó un aporte tecnológico importante ya que los españoles trasladaron las enseñanzas que recibieron de los 800 años de dominación árabe. A partir del siglo XIX, ocurre un periodo de consolidación de las áreas bajo riego del NOA y Cuyo.

En 1898 llega al país el Ing. César Cipolletti, factor de la tecnificación del riego gravitacional en el país e impulsor en 1909 de la promulgación de la ley nacional de irrigación N° 6546. Para 1970 la superficie regada y cultivada alcanzaba 1.066.143 ha en 59 zonas o regiones en las que Cuyo representaba el 41.5% y el NOA 35.5% (Cambouleyron, 1983; INTA 1986).

La aplicación del agua de riego históricamente se realizó por gravedad, liderando la región de Cuyo el desarrollo tecnológico, sin embargo la introducción del sifón y la nivelación de suelos con rayo láser ocurridos en 1979 tuvo lugar en el valle bonaerense del río Colorado (Sánchez y Kugler, 1979). La provincia de Río Negro, se desarrolló mediante obras de infraestructura a partir de la construcción del dique Ingeniero Ballester en el alto valle y del proyecto IDEVI respectivamente (INTA, 1986).

A mediados del siglo XX, la aparición del riego presurizado incorporó 18.000 perforaciones en Mendoza y permitió el riego integral de 90.000 ha y 50.000 ha en forma suplementaria. En el territorio húmedo se registraron 110.000 ha con riego suplementario de las cuales 300 ha eran con el incipiente riego por goteo (INTA, 1986).

Las isohietas de 500 y 800 mm dividen al país en tres grandes regiones climáticas: údica por encima de los 800 mm, ústica entre 500 y 800 mm y arídica por debajo de los 500 mm anuales de precipitación. Los recursos hídricos superficiales para la región árida y semiárida que ocupa el 76% de superficie nacional representan aproximadamente $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ los cuales significando un 18% del total país, se ubican principalmente entre las isohietas de 500 y 100 mm (Chambouleyron, 1983) (Tabla N° 1).

Tabla N° 1. Precipitación, denominación climática y porcentaje de territorio (Soil Taxonomy, 2010).

Isohieta (mm)	Territorio (mill. ha)	%	Denominación climática
> 800	66.3	24	Údico
500-800	40	15	Ústico
< 500	171	61	Árido

La superficie regada en Argentina fue variando en función del tiempo según registros. Mientras en 1970 la misma ocupaba 1.066.143 ha (Chambouleyron, 1983), en 1989 se incrementó según FAO a 1.760.000 ha lo cual representaba el 4.9% del total de la superficie cultivada, para luego descender en 2005 a 1.650.000 ha (Aquastat, 2014). En 2014 la superficie estimada es de 2.079.447 ha (Programa Nacional Agua INTA, 2014) representando la misma 5% de la superficie cultivada nacional. La superficie bajo condiciones de irrigación creció proporcionalmente al ritmo del crecimiento de la superficie cultivada nacional (Figura N° 1).

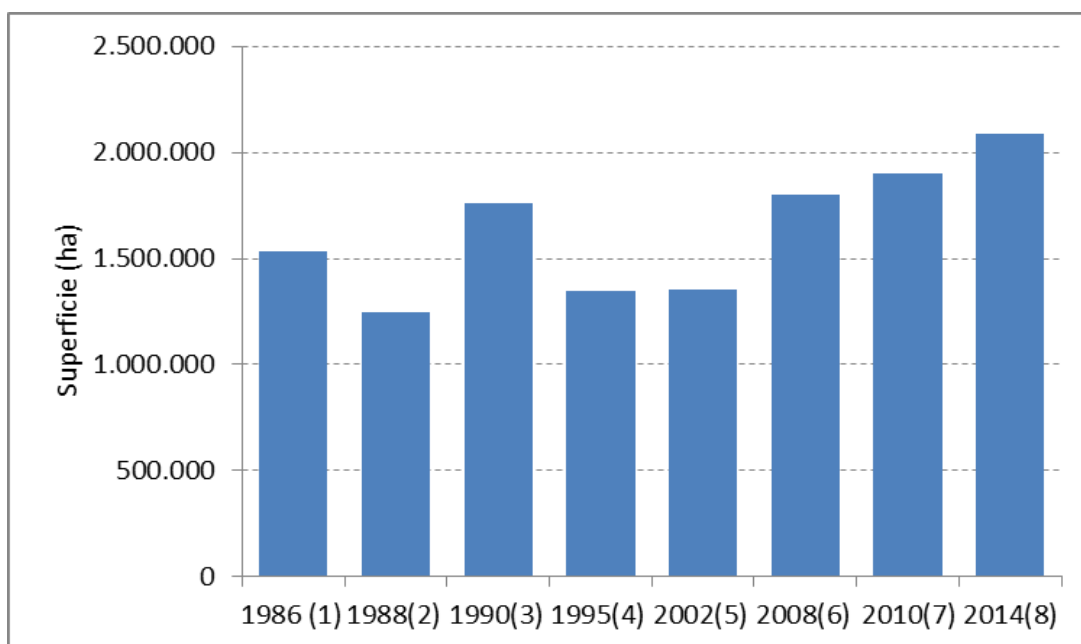


Figura Nº 1. Desarrollo de la superficie de riego en Argentina. Fuentes: Programa Nacional Agua INTA - (1) INTA; (2) CNA ´88; (3) FAO; (4) PROSAP; (5) CNA ´02; (6) PROSAP; (7) INTA-PROSAP (8) FAO- PROSAP.

En el año 2002 según el CNA existía en la Argentina riego por gravedad en 22 de las 23 provincias, aspersión en 20 sobre 23 y localizado en 23 sobre 23. El 69% de la superficie censada se aplicó por gravedad, un 21% por aspersión y localizado 10% de la superficie regada nacional. El riego localizado se aplicó en sólo 4 de las 23 provincias. (Abraham, 2007) (Tabla Nº 2).

Tabla Nº 2. Distribución y aplicación del agua de riego. Fuente: Abraham (2007).

Sistema de riego	Ha	%
Gravitacional	946.575	69.1
Aspersión	281.361	20.8
Localizado	127.499	9.4

La distribución provincial de la superficie con infraestructura de riego drenada en el año 2005 alcanzaba 1.650.000 ha (Aquastat, 2014). Algunas provincias difieren la superficie informada según se considere hectáreas efectivamente regadas, empadronadas y potencialmente regables (Tablas N° 3 y 4).

Tabla N° 3. Área efectivamente regada por provincia. Fuente CNA '02 - Programa Nacional Agua

Provincia	Área regada (ha)	Provincia	Área regada (ha)
Mendoza	267.889	Corrientes	59.014
Buenos Aires	166.483	La Rioja	41.817
Salta	118.898	San Luis	18.575
Sgo. del Estero	107.188	Chubut	18.155
Córdoba	93.835	Neuquén	15.798
Jujuy	91.575	Chaco	7.550
San Juan	79.516	La Pampa	4.715
Río Negro	72.784	Formosa	4.002
Entre Ríos	71.736	Santa Cruz	3.841
Tucumán	66.025	Misiones	170
Santa Fe	62.145	Tierra del Fuego	0
Catamarca	61.848		

Tabla N° 4. Superficies cultivadas y regadas en Argentina, América y el mundo. Fuente: UTF/FAO - Aquastat

	Argentina	América	Mundo
Superficie Cultivada (millones ha)	39.0	175.8	1545
Porcentaje sobre total de superficie (%)	13.9	8.6	10.8
Población (millones)	41.0	581.4	7046
Población Rural (%)	7	21	47
Superficie regada (millones has)	2.1	18	287
Porcentaje sobre superficie total cultivada (%)	5	10	19

El resultado del relevamiento concluye que en la actualidad, la superficie en producción bajo riego alcanza un total de 2.08 millones de ha, lo que corresponde a un 5% de la superficie total cultivada. El 65% de ésta superficie se riega a partir de fuentes superficiales y el resto con agua subterránea, siendo el número total de alrededor de 145.000 regantes.

1. La ampliación potencial del riego en Argentina

De acuerdo a los estudios realizados por PROSAP-FAO, Argentina podría ampliar sustancialmente sus áreas regadas. Dividiendo el país en cuatro ecoregiones: Pampeana y NEA (noreste argentino), NOA (noroeste argentino), Patagónica y Cuyo las superficies empadronadas y potencialmente regables se muestran en las siguientes figuras (Figuras 2, 3, 4, 5 y 6).

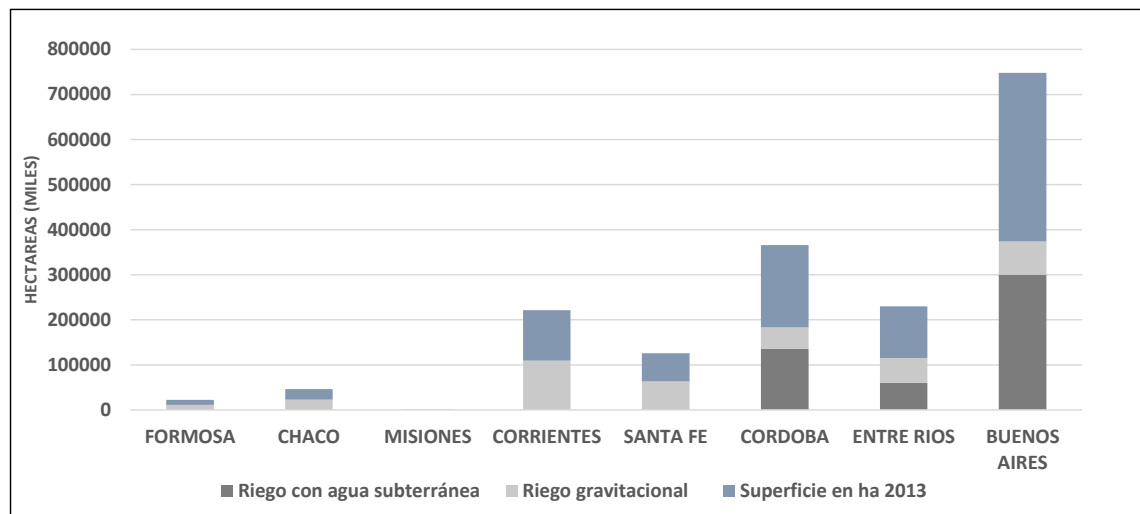


Figura Nº 2. Región Pampeana y Noreste, comparación entre el total de hectáreas irrigadas con riego gravitacional y con agua subterránea. Fuente: VII Taller "Estudio del potencial de ampliación de riego en Argentina". Proyecto "Desarrollo Institucional para la Inversión" (UTF/ARG/017/ARG).

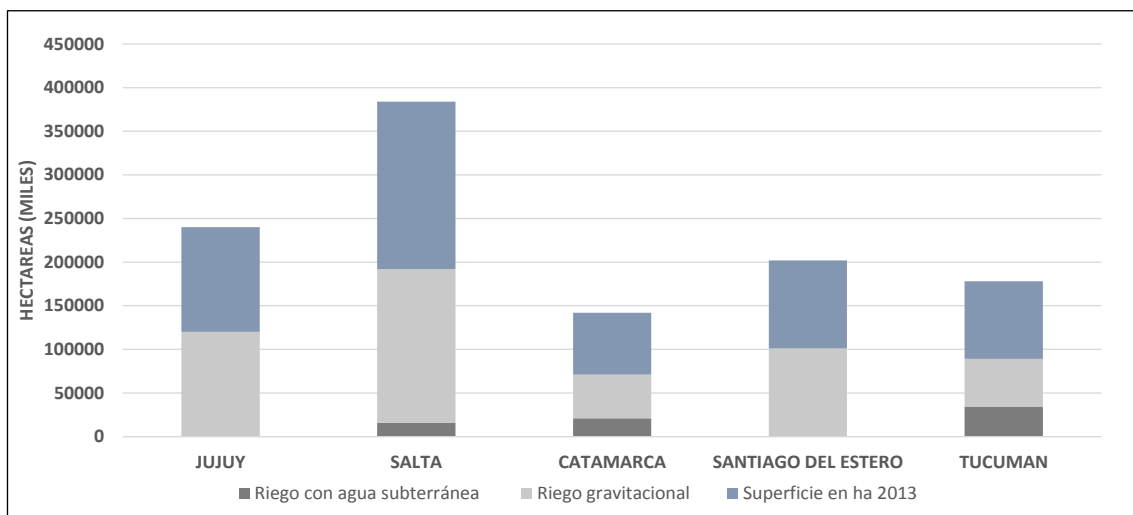


Figura Nº 3. Región Noroeste, comparación entre el total de hectareas irrigadas con riego gravitacional y con agua subterranea. Fuente: VII Taller "Estudio del potencial de ampliación de riego en Argentina. Proyecto "Desarrollo Institucional para la Inversión" (UTF/ARG/017/ARG).

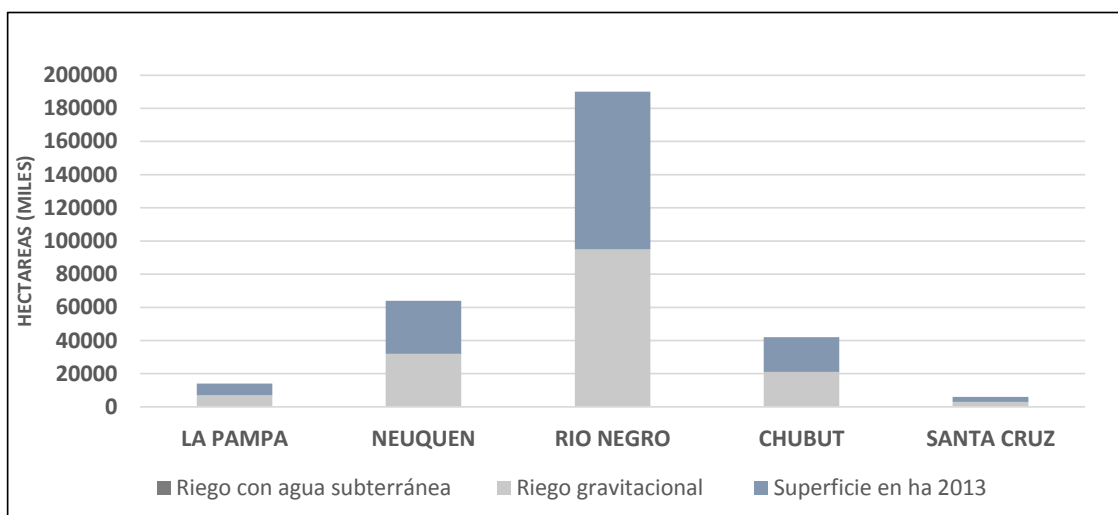


Figura Nº 4. Región Patagónica, comparación entre total de hectáreas irrigadas con riego gravitacional y con agua subterránea. Fuente: VII Taller "Estudio del potencial de ampliación de riego en Argentina". Proyecto de "Desarrollo Institucional para la Inversión" (UTF/ARG/017/ARG).

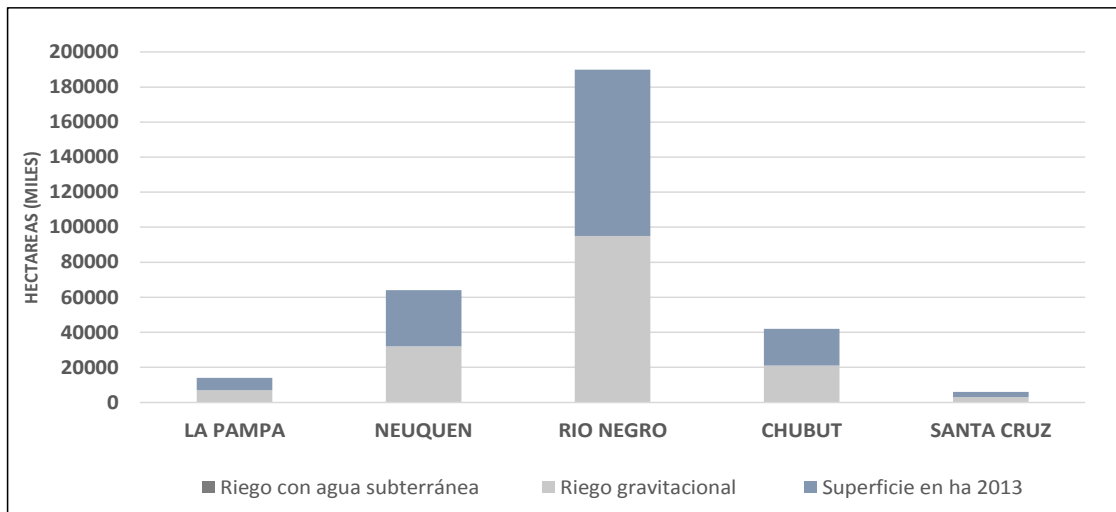


Figura N° 5. Región de Cuyo, comparación entre total de hectáreas irrigadas con riego gravitacional y con agua subterránea Fuente: VII Taller “Estudio del potencial de ampliación de riego en Argentina”. Proyecto “Desarrollo Institucional para la Inversión” (UTF/ARG/017/ARG).

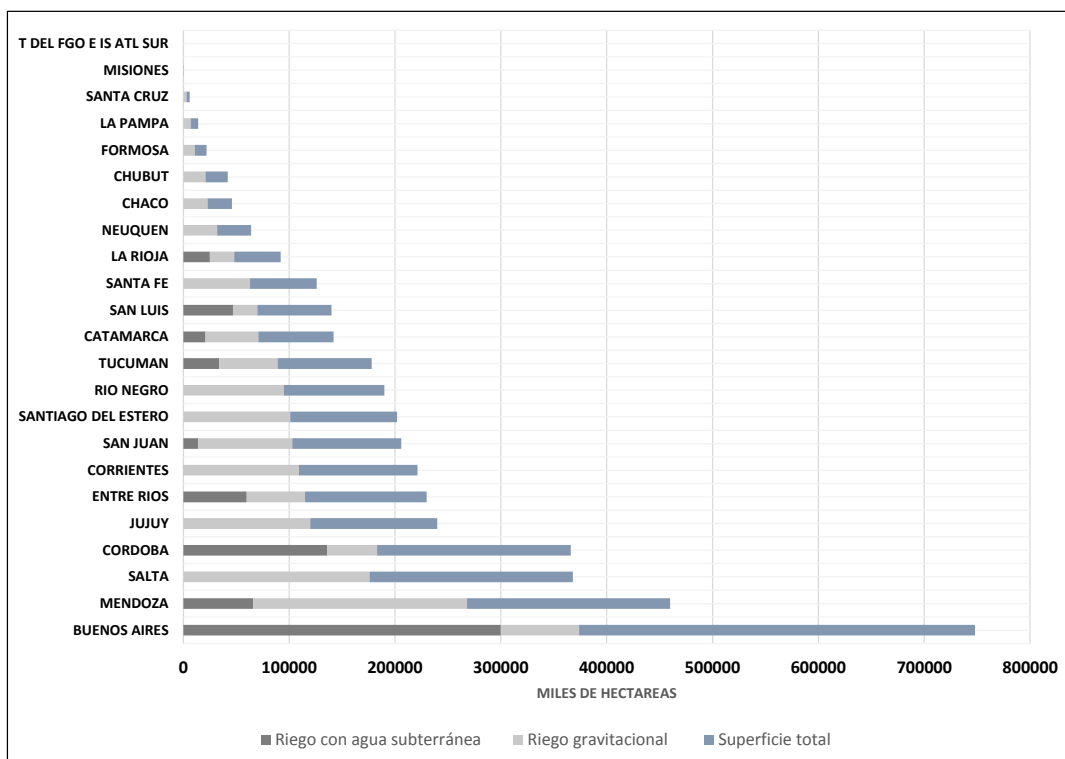


Figura N° 6. Comparación entre total de hectáreas irrigadas con riego gravitacional y agua subterránea en Argentina. Fuente: VII Taller “Estudio del potencial de ampliación de riego en Argentina”. Proyecto “Desarrollo Institucional para la Inversión” (UTF/ARG/017/ARG).

El INTA en el año 1986 realizó un estudio de relevamiento de las áreas regadas, la superficie afectada por sales y el área proporcional con dificultades de drenaje. El cálculo de la afectación en ese entonces estuvo referido al área porcentual total del territorio provincial, tanto para considerar la salinización como la superficie afectada con deficiencias de drenaje (Tabla N° 5).

Tabla Nº 5. Áreas salinizadas de Argentina (INTA, 1986).

Provincia	Sup. regada		Sup. afectada por salinidad		Sup. afectada por deficiencia de drenaje	
	(ha)	%	(ha)	%	(ha)	%
Jujuy	90514	5.9	11.500	2.0	10.000 (CI)	1.8
Salta	129000	8.4	57.791	10.0	17.584 (ID)	3.2
Tucumán	140734	9.1	60.393	10.3	51.941 (CI)	9.4
S. del Estero	54273	3.5	33370	5.7	33370 (ID) (x)	6.0
Catamarca	26884	1.7	1517	0.3	(CI) o (ID)	
Córdoba	55.863	3.6	3747	0.6	(SI)	
San Luis	8797	0.6	2436	0.4	2250 (ID)	0.4
La Rioja	13456	0.9	1200	0.2	700 (CI)	0.1
Mendoza	443523	28.8	255940	43.8	255310 (xx) (ID)	46.0
San Juan	96133	6.2	76566	13.1	55000 (xx)	9.9
Chubut	26404	1.7	12646	2.2	20969 (ID)	3.8
Santa Cruz	2000	0.1	(SI)		(SI)	
La Pampa	3964	0.3	1982	0.3	2500 (ID)	0.5
Neuquén	14527	0.9	3938	0.7	4367 (ID)	0.8
Río Negro	117106	7.6	46423	7.9	52975 (ID)	9.5
Bs. As.	176500	11.6	12500	2.1	43750	7.9
Entre Ríos	56800	3.7				
Corrientes	52310	3.4	Alcalinidad en llanura inundable		(SI)	
Santa Fe	20500	1.3	1600	0.3	4000	0.7
Chaco	4700	0.3	500	0.1	(SI)	
Formosa	5200	0.4				
TOTALES	1539188	100	584049	100	554716	100

(x) Grado de salinidad variable (xx) Profundidad freática menor de 2 m. (SI) Sin información (CI) Carece de infraestructura (ID) Infraestructura deficiente. Fuente: INTA. 1986. Documento básico para programa de riego y drenaje.

La causa principal de deterioro de los suelos en las regiones áridas y semiáridas bajo regadío es la salinización, ya sea por elevación del plano freático, disolución de las sales presentes en el perfil del suelo regado o agregado de las mismas en el proceso de aplicación del agua de riego provenientes de la disolución previa en la misma. En las regiones údicas de Argentina la situación de deterioro es causada por la presencia de sodio y el consecuente deterioro de la matriz del suelo.

2. Las causas de la salinización

Según Siebert *et.al.* (2006) en Argentina la superficie afectada por sales en ese año era de 600.000 ha. Las sales se encuentran en el agua de riego a partir de la meteorización de las rocas, además de la disolución lenta del carbonato de calcio, sulfato de calcio y de otros minerales transportadas por el agua de riego y depositadas en el suelo en donde se acumulan en la medida que el agua se evapora o es consumida por los cultivos. La salinidad denominada cíclica es el continuo retorno de las sales del mar que retornan a la tierra. Las partículas de polvo funcionan como núcleo para las sales que el viento transporta hasta encontrar las cortinas forestales que obliga a las mismas a sedimentar.

La salinización afecta a unos 20-30 millones de hectáreas en todo el mundo sobre un total de tierra de regadío. Argentina es el tercer país en el mundo con áreas extensas salinizadas luego de Rusia y Australia (Puchulú, 2008). La tasa de crecimiento de la salinización se encuentra en el orden de 0.25 a 0.50 millones de ha.año⁻¹. La salinización se produce mayormente en regiones áridas y semiáridas (FAO, 2002). Los problemas que generan son entre otros una disminución de la disponibilidad del agua al punto tal de reducir los rendimientos. Contenidos altos en sodio o bajos en calcio tanto en el suelo como en el agua, reducen la velocidad de infiltración disminuyendo la disponibilidad de agua para los cultivos. Por otra parte los iones sodio, cloro y boro se acumulan en concentraciones suficientemente altas para causar toxicidad. Estos efectos pueden actuar en forma independiente y frecuentemente en forma sinérgica lo cual complica los diagnósticos.

La resultante es la pérdida o disminución de la producción. El rendimiento de los cultivos se resiente cuando el contenido de sales en la solución del suelo se incrementa de modo tal que inhibe a los mismos de la extracción de agua de la zona radicular, provocando sequía fisiológica, engrosando las hojas y/o generando un color verdeazulado pronunciado. La profundidad del perfil del suelo crea una distribución creciente de la concentración de las sales cuando el riego es recientemente aplicado, dado que el Ap es el horizonte más lixiviado. Cuando la evapotranspiración se incrementa, la distribución de sales en el perfil se puede invertir en el proceso de secado del perfil (Ayers *et. al.*, 1987).

La infiltración del agua en el suelo se reduce apreciablemente como consecuencia del contenido total de sales y principalmente del contenido de sodio en relación a los contenidos de calcio y magnesio. Una alta salinidad incrementa la infiltración mientras que una baja salinidad y alta concentración de sodio la disminuye, siendo estos efectos de acción simultánea en muchos casos. Las dificultades de la infiltración son de ocurrencia en los primeros centímetros del perfil disminuyendo en profundidad, y están vinculados al desequilibrio del sodio con relación a la presencia del calcio y magnesio. Regando con agua de alto contenido en sodio y bajo contenido de calcio y magnesio existe una dispersión de los agregados provocada por el sodio que obtura en parte los macro y mesoporos disminuyendo la infiltración.

La ecuación que mide la relación de las concentraciones relativas de sodio al calcio y magnesio (RAS) es la de Gapón (1)

$$(1) \quad \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{++}] + [Mg^{++}]}{2}}}$$

La tercera manera de afectación a los cultivos es la toxicidad derivada de la absorción directa de ciertos iones como cloro, sodio y boro por las plantas. En este caso los daños se manifiestan como quemaduras en la zona apical de las hojas, borde y parénquima entre nervaduras comenzando desde el ápice. Las afecciones que estos iones provocan, a menudo se enmascaran y sinergizan con las de salinidad e infiltración y su concentración depende del caudal de agua que atraviesa la planta en su trayectoria desde la raíz hasta la hoja. Afecciones

similares también pueden manifestarse cuando estos iones son absorbidos por las hojas al ser aplicados por el riego por aspersión.

El mecanismo de ingreso del agua en la planta, muestra una serie de etapas que comienza con la diferencia de succiones o presiones negativas entre suelo y epitelio radicular. A medida que el agua en el suelo va disminuyendo, las fuerzas de retención continúan aumentando. Si a su vez el agua remanente contiene mayor concentración salina, la energía requerida debido al efecto osmótico se incrementa.

La drenabilidad es una de las propiedades que el usuario de un suelo regado debiera considerar ya que determina el ascenso o descenso del plano freático que siendo por lo general sustancialmente más salino que el agua de riego, al evaporarse el agua del perfil traccionada por la evapotranspiración, deposita las sales en superficie previamente a la vaporización atmosférica. El plano freático que por lo general reviste cierto grado de peligrosidad es aquel que se encuentra dentro de los dos metros de profundidad. En regiones áridas y semiáridas de Argentina bajo condiciones de irrigación, la profundidad dependerá del manejo del agua, condición textural del suelo y de la demanda climática. El sistema de drenaje actúa además como puerta de salida de las sales lixiviadas en el perfil del suelo, resultando el balance hidrosalino en cualquier área bajo riego favorable la tasa de salida de sales al ingreso de estas.

3. Las sales del suelo y sus componentes más comunes

Los elementos que pueden estar presentes en los suelos como participantes de las sales solubles son: Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , NH_4^+ , Al^{+++} , Fe^{++} , F^{+++} y HCO_3^- , CO_3^- , Cl^- , SO_4^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_3^- , OH^- , F^- , SiO_3^- . La realidad es que en el suelo solo existen unas pocas sales solubles en mayores cantidades a partir de los cationes: Na^+ , Mg^{++} y Ca^{++} y de cuatro aniones Cl^- , SO_4^- , CO_3^- y HCO_3^- .

No todas las sales presentan peligro de afectación a los cultivos, tal es el caso del yeso (SO_4Ca), calcáreo (CO_3Ca) o magnésita (CO_3Mg). Por otra parte los suelos se podrían agrupar de acuerdo a su peligrosidad en función de la combinación de

aniones y cationes. Es posible encontrar entonces la siguiente tabla dividida en dos, con sales relativamente inocuas arriba y a la derecha y otras de cierto nivel de agresividad para los cultivos debajo y a la izquierda (Peinemann, 1998) (Tabla N° 6).

Tabla N° 6. Sales más comunes encontradas en función de la combinación de cationes y aniones.

	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺
CO ₃ ⁼	Na ₂ CO ₃ NaH CO ₃	Mg CO ₃ Mg (H CO ₃) ₂	Ca CO ₃ Ca (H CO ₃) ₂
SO ₄ ⁼	Na ₂ SO ₄	Mg SO ₄	Ca SO ₄
Cl ⁻	Na Cl	Mg Cl ₂	Ca Cl ₂

4. Descripción de las características y efectos de las sales más comunes en el suelo y agua de riego

4.1. Carbonatos

Carbonato de calcio:

Sal de extrema baja solubilidad (0.0131 g.l⁻¹), que en presencia de ácido carbónico forma Ca (HCO₃)₂ aumentando la solubilidad fuertemente. A pesar de esta reducida solubilidad, esta sal no es deficiente para los cultivos agrícolas. En presencia de pH ácido los cultivos no desarrollan bien en medio de alta concentración de carbonatos. Los suelos de estepa o desierto en regiones áridas a semiáridas desarrollan gran contenido de carbonatos del orden de 20-80%.

En suelos bajo riego y debido a la baja solubilidad, los horizontes sub superficiales se encuentran cementados. Esta cementación en ocasiones es más importante como afección a los cultivos que la presencia de carbonato en forma pulverulenta. Su presencia es fácilmente detectable a la reacción del HCl por el desprendimiento de CO₂.

Carbonato de magnesio:

Es más soluble que el de calcio, produciendo en ocasiones cierto stress en los cultivos por su reacción alcalina. Dado que el magnesio se encuentra en menores cantidades que el calcio en los suelos, del mismo modo la formación de carbonato de magnesio es más escaso y solo impacta su forma libre con una disminución de la fertilidad por adsorción de magnesio en el coloide.

Carbonato de sodio:

La sal derivada del ácido carbónico e hidróxido de sodio es una de las sales más solubles de los suelos regados. El carbonato de sodio es muy soluble 178 g.l^{-1} a 20 C provocando una fuerte alcalinización del medio, elevando el pH por encima de 8. Es muy tóxico para los cultivos, causando además impacto en las condiciones físicas del suelo como desagregación y baja infiltración, reduciendo la fertilidad natural y la pérdida de estructura.

El bicarbonato es menos alcalino y en consecuencia menos tóxico. Es rara la acumulación en suelo. La solubilidad del carbonato de sodio se reduce conforme disminuye la temperatura en los suelos, lo cual condiciona y obliga a estacionar el proceso de lavado y recuperación para hacerlo más eficiente.

Carbonato de potasio:

Es el menos abundante de los carbonatos en el suelo. Sus efectos son similares a los del carbonato de sodio sobre los suelos y cultivos. El beneficio de ser escaso se traduce en menor afección a la agricultura.

4.2. Sulfatos

Los sulfatos son típicos de suelos de ambientes áridos y semiáridos, donde la precipitación es escasa o nula. Se encuentran en cantidades abundantes en las aguas y suelos.

Sulfato de calcio:

Es una sal de baja solubilidad, presente en forma abundante en varios suelos argentinos de ambientes áridos y semiáridos, por evaporación del agua

subterránea y posterior cristalización en superficie o en horizontes sub superficiales nodulando o en placas. Es conocido su efecto positivo en la recuperación de suelos afectados por sodio en el proceso de reemplazo de este por el calcio del sulfato en el complejo de cambio.

Sulfato de magnesio:

Componente de muy alta solubilidad, es muy tóxico para los cultivos. No se encuentra en forma libre sino combinado y a pesar de su toxicidad es de fácil lixiviación y en virtud de su escasez no presenta dificultades.

Sulfato de sodio:

Es común encontrarlo en los suelos salinos y aguas subterráneas salinas. Es temperatura dependiente en cuanto a solubilidad incrementando está en función de la primera. Es por esa razón que en los meses fríos disminuye su posibilidad de lavado. En combinación con el sulfato de calcio, forma costras pulverulentas conteniendo hasta un 30% de sulfato de sodio. Su lixiviación es posible con grandes cantidades de agua y en la estación cálida para así incrementar su producto de solubilidad.

Sulfato de potasio:

Las características son similares pero su toxicidad es menor. No existe en grandes cantidades en los suelos.

4.3. Cloruros

Todos los cloruros se caracterizan por una alta solubilidad y consecuentemente son altamente tóxicos. Sinérgicamente con los sulfatos, los cloruros son los responsables de la salinización de los suelos.

Cloruro de calcio:

Es raro encontrarlo en los suelos. Debido a su rareza en los suelos solo es posible encontrarlo en los horizontes superiores cuando la salinidad general es muy

elevada. Es posible encontrarlos en condiciones de aguas subterráneas, estratificadas, profundas o conectadas con depósitos de petróleo. Es tóxico para los cultivos, pero en menor medida que el cloruro de sodio o magnesio.

Cloruro de magnesio:

Es más común en suelos salinos que el cloruro de calcio. Considerando su altísima solubilidad es la más tóxica de las sales. Tiene efecto similar al cloruro de calcio, encontrándose en depósitos profundos subterráneos. Es además extremadamente higroscópico, se cristaliza y sedimenta. Los suelos que contienen cloruro de calcio y cloruro de magnesio son difíciles de recuperar y necesitan lavados intenso y buen drenaje.

Cloruro de sodio:

Junto al sulfato de sodio y de magnesio son los más comunes y difundidos en la naturaleza. Es altamente tóxico y soluble, susceptible al lavado y se facilita su recuperación si existe sulfato de calcio. Cuando el calcio no está presente su recuperación es más lenta porque el sodio adquiere forma intercambiable.

Cloruro de potasio:

Tiene propiedades similares al cloruro de sodio. No es tan común su presencia porque es adsorbido por el complejo de cambio en forma irreversible. Si está presente su toxicidad es muy alta. Debido a su consumo por los cultivos como fertilizante, sus depósitos masivos son de gran valor.

4.4. Nitratos

Son las sales del ácido nítrico las que se acumulan en el suelo, pero siempre en bajas cantidades. Los nitratos representan la principal fuente de nutrición mineral de los cultivos. En regiones hiperáridas los nitratos de sodio y potasio se acumulan del mismo modo que los cloruros de sodio y potasio. Los nitratos en suelos en concentraciones superiores a 0.1% poseen más toxicidad que los cloruros (Peinemann, 1998).

4.5. Boratos

Concentraciones de boro menores a 0.7% no afectan a los cultivos. Una concentración entre 0.7 a 1.5 ppm es marginalmente considerado peligroso y por supuesto concentraciones que superan 1.5 ppm mucho más aún. Generalmente se encuentra presente en suelos que poseen textura franco arcillosa y franco limosa mayoritariamente. La disponibilidad del boro en el suelo siempre, que no alcance los niveles tóxicos mencionados depende del pH, concentración de calcio y magnesio, el ritmo de lixiviación y la tasa de fijación en los complejos de cambio (Álvarez, 1964).

5. Efectos del sodio en los suelos regados

La floculación es el paso posterior de la materia coloidal en suspensión precedido por la coagulación. La coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales a causa de la neutralización de sus cargas electrostáticas por un coagulante, promocionando la unión entre ellas. La floculación muestra que las partículas de arcilla poseen una fuerza electrostática considerable y se reúnen o floculan a partir de la presencia de una sal neutra. La superficie de la partícula posee una doble capa iónica: una interior estrecha y compacta, otra exterior que es una mezcla de cationes y aniones desplazados y rodeados de cationes hidratados. La floculación aumenta con la valencia respectiva del catión y el potencial zeta se incrementa con la carga eléctrica de la superficie de la micela y según aumenta la distancia de la capa interior de la misma. La adsorción de sodio sobre la superficie de las arcillas incrementa el espesor de la doble capa (Ayers *et.al.*, 1987; Aparicio *et.al.*, 2014).

Los denominados suelos salinos sódicos, son formados como la resultante de procesos combinados de alcalinización y salinización. La apariencia y propiedades son similares a los suelos salinos mientras exista un exceso de sales presente. Los valores de pH son iguales o aproximados a 8.5 y las partículas permanecen floculadas mientras el medio se encuentre saturado de sales. Cuando las sales solubles se eliminan por lixiviación parte del sodio intercambiable se hidroliza y

forma hidróxido de sodio. Si este alcanza a combinar con el aire forma carbonato de sodio.

Cuando los suelos sódicos se lixivian con agua su reacción se torna alcalina (superior a 8.5 de pH), las partículas se dispersan y el suelo disminuye su infiltración. Cuando se forma carbonato de sodio y potasio que disuelve y dispersa la materia orgánica el color que toma es negro intenso. Los suelos sódicos poseen un alto contenido de sodio intercambiable y bajo nivel de sales solubles. La presencia de sodio adquiere dimensiones importantes ya que actúa sobre la dispersión de las partículas y en consecuencia sobre la disminución de la infiltración del suelo. Cuanto más pequeño es el radio hidratado y cuanto mayor es la valencia de un catión, mayor es su poder de flocular el suelo. El calcio tiene un efecto floculante mientras que a la inversa el sodio dispersante. El calcio posee un menor radio hidratado y mayor valencia que el sodio.

La dispersión de un suelo redunda en un bloqueo del sistema poroso, disminución de la infiltración, conductividad hidráulica y en consecuencia anegamiento e inundación superficial. El suelo sódico desarrolla encostramiento superficial, cuarteo y agrietamiento en seco, disminuyendo entre otros efectos la circulación de oxígeno. La medida de la actividad del sodio en el suelo es el PSI (porcentaje de sodio intercambiable) el cual se define como la cantidad de sodio adsorbido por las partículas del suelo, expresado en porcentaje del CIC (capacidad de intercambio catiónico):

$$PSI = \text{Sodio intercambiable (meq. 100g de suelo}^{-1}) / \text{CIC (meq. 100 g de suelo}^{-1})$$

En la práctica suelos con valores superiores a 15 se consideran sódicos. El efecto de la sodicidad sobre los cultivos es de menor importancia que la salinidad y se manifiesta generalmente en una deficiencia de calcio inducida debido a las altas concentraciones de sodio.

6. Riego con agua carbonatada sódica

En la región pampeana húmeda, los suelos regados con aguas bicarbonatadas sódicas modifican su composición química pero se estima que esta no es

irreversible debido al grado de resiliencia edáfica de los suelos pampeanos (Génova, 2006).

El mismo autor indica que existe una invalidez del método de clasificación en aguas de riego de uso universal para zonas áridas (Richards et. al., 1954), cuando el mismo clasifica a la mayoría de los recursos hídricos en la región húmeda pampeana. Al mismo tiempo también se indica que existió un pronóstico erróneo acerca de los efectos negativos sobre el suelo de aguas bicarbonatadas sódicas, concluyendo que el riego complementario no compromete la sustentabilidad del agroecosistema de la pampa húmeda y que los mismos tienen suficiente capacidad de resiliencia como para revertir cualquier consecuencia de deterioro físico.

Las determinaciones que se realizaron en diversos puntos de la región de la pampa húmeda incluyen además de la conductividad eléctrica (CE $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$), la relación de adsorción de sodio (RAS), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en el agua de riego y en el suelo, la capacidad de almacenaje, capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{meq}\cdot 100\text{g}^{-1}$) y rendimiento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). También se incluyeron las determinaciones de carbonato de sodio residual (CSR) como indicador de peligro de sodicidad, no realizando pruebas de infiltración la cual se considera una condición determinante para evaluar los efectos secundarios de la sodicidad en los suelos como es la disminución de la misma.

Como resultado final concluyente de estos estudios en la región pampeana húmeda, las alteraciones de pH, CE y PSI de los suelos regados durante ciclos sucesivos, si bien registran incrementos importantes, luego decrecen recuperando los indicadores de los parámetros originales (Génova, 2006).

7. Consecuencia del riego complementario sobre propiedades edáficas en la llanura pampeana

Peinemann *et.al.* (1998) trabajaron sobre Hapludoles de permeabilidad media y Argiudoles de baja permeabilidad en diferentes sectores de la región pampeana regados con agua de 20 a 70 cm de profundidad y evaluaron el pH, CE, cationes

(Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++}) y aniones ($\text{CO}_3^{=}$ y HCO_3^-). Mediante las técnicas de Richards (1954) la conductividad eléctrica varió entre 0.7 y 1.7 y el RAS entre 1.9 a 11.8. Las aguas se ubicaron en las clases C_2S_1 y C_3S_3 con una elevada proporción de sodio en relación con los cationes divalentes, lo cual presupone un deterioro en las propiedades físicas. El contenido de bicarbonatos en las aguas evaluadas a partir del contenido de carbonato de sodio residual (CSR) se ubicó entre 1.5 y 12.5 meq.l⁻¹.

Luego de la aplicación del riego, los suelos sufrieron un incremento del orden promedio del 8.7% en el PSI y una disminución del 60% en promedio de la conductividad hidráulica, provocando ineficiencia en el almacenamiento de agua que se va reduciendo paulatinamente en consecuencia.

Estableciendo relaciones entre K (conductividad hidráulica) y los contenidos de las fracciones más finas (arcilla + limo), se verificó en este trabajo que a mayor proporción de fracciones finas en los suelos menor es la conductividad hidráulica, probablemente debido a saturación con iones sodio del complejo coloidal y la posterior dispersión de los agregados.

8. Metodología para la evaluación de las áreas bajo riego afectadas por sales y/o sodio

El estudio fue de tipo observacional descriptiva, transversal y correlacional. La población estuvo constituida por 2.100.000 hectáreas (Aquastat, 2014) bajo riego en el país y la población de estudio estuvo constituida por 630.000 hectáreas, cifra que se desprende de asumir que un tercio de la superficie bajo riego posee un deterioro por salinización/sodicidad inicial. La muestra obtenida fue probabilística de acuerdo a la fórmula de tamaño muestral y la selección de la muestra se realizó mediante el muestreo probabilístico aleatorio simple. Se consideraron todas provincias a excepción de Misiones y Tierra del Fuego por no presentar áreas representativas de riego y con condiciones pluviométricas y evapotranspirativas excepcionales para la no acumulación de sales y/o sodio en los perfiles.

Para el cálculo del tamaño de la muestra, se tuvo en cuenta la ecuación (1):

$$n = \frac{z^2 \cdot P \cdot f}{e^2} \quad (1)$$

Dónde:

n = tamaño de muestra.

z = factor probabilístico para fijar el nivel de confianza.

P.f = Varianza de la proporción.

e = error máximo permitido.

Dado que el tamaño de muestra estimado superó la capacidad de respuesta en número de los individuos disponibles para responder con conocimiento adecuado de los sistemas de riego de cada región, se seleccionó una metodología indirecta de consulta a referentes, docentes de universidades, administradores de organismos de distribución del agua de riego y otras personas con conocimiento del tema, sobre las mismas encuestas preparadas así como también la inclusión de información proveniente de investigaciones previas que pudieran aportar datos ciertos.

La situación del deterioro de los suelos por salinidad y/o sodicidad varía sustancialmente en el territorio estudiado por debajo de la isohieta de 700 mm donde tiene predominancia los procesos de deterioro por salinización y en ocasiones sinergizados por procesos de dispersión de la matriz por sodio, que en el territorio donde la precipitación es superior a 700 mm predominando los procesos exclusivamente de sodicidad en ausencia casi exclusiva de las salinidad.

En función de esto el tipo de encuesta realizada aunque con varios elementos de consulta comunes, fue orientada a la búsqueda de otras respuestas vinculadas a la acción del sodio en los suelos bajo clima údico.

II. REGIÓN CUYO

La región Cuyo para este estudio se integró con las provincias de Mendoza, San Juan, San Luis y La Rioja. La provincia de Mendoza con dos principales oasis norte y sur, el primero constituido por los ríos Mendoza y Tunuyán. Son dos sistemas hidrológicos diferentes, el Tunuyán a su vez se divide en dos: Tunuyán superior e inferior. Llueven en estas cuencas unos 200 mm al año. Los principales cultivos son vid, frutales de carozo, de pepita y hortalizas, fundamentalmente cebolla, ajo y papa.

Morabito (2007), Mirabile (1985) y Chambouleyron (1975) dibujaron mapas de isosalinidad indicando que hay lavado de suelos en función de la gran cantidad de agua aplicada y la consiguiente elevación del plano freático. La principal causa es sin duda la elevación del plano freático y la salinidad del agua freática (3 dS.m^{-1}). En los resultados se observa que existe mayor superficie salinizada en la zona regada por el río Mendoza, donde los valores de salinidad son más altos que para el río Tunuyán. También en el suelo cultivado la conductividad eléctrica fue inferior al suelo sin cultivo, también objeto de estudio. Como resultado areal de estudio, la superficie cultivada (372.610 ha) se encontró en un 63% con una salinidad menor a 8 dS.m^{-1}

El área de riego del río Tunuyán superior comprende 54.000 ha cultivadas de las cuales 41.605 son efectivamente regadas, siendo 37% irrigada con agua superficial, 36% con agua subterránea y 27% de uso compartido. De esto el 84% corresponde a riego superficial, 12 a goteo y el resto a microsistemas.

La salinidad media del suelo en el área irrigada de la cuenca del Tunuyán superior es de 1.12 dS.m^{-1} . En las fincas el agua de riego es de 0.70 dS.m^{-1} , con un contenido de sales superior en el centro norte y centro sur que en el norte y sur. Los principales problemas son la excesiva aplicación de agua de riego, bajos caudales y deficiente nivelación. La eficiencia de aplicación en la parcela fue encontrada bajo del orden del 39% (Schilardi *et.al.*, 2009).

Pereira (2010) evaluó en el oasis sur 75.774 ha ubicadas en el área regada de la cuenca del Atuel, Gral. Alvear, Mendoza. Los resultados indican que la mínima media es de 1.31m, sentido de flujo estable y variación del nivel freático estacional. En época primaveral aumenta hasta 1m de profundidad. El agua del río Atuel tiene una salinidad media de 1.7 dS.m⁻¹ y el canal matriz nuevo Alvear 2.3 dS.m⁻¹ por lo que no se utiliza en invierno. Está demostrado que si bien un plano freático alto afecta la producción de los cultivos, son las variaciones del nivel las que producen las mayores afectaciones y esta es por la falta de adaptación de los cultivos a la anaerobiosis o aerobiosis y/o la selectividad de las sales que provocan desequilibrios fisiológicos.

La provincia de San Juan presenta como valles principales Tulúm y Ullúm-Zonda, siendo el de Tulúm el más importante con unas 67.000 ha, los suelos de origen coluvial-aluvial en algunos casos de textura más fina con una profundidad de plano freático estacionalmente variable estudiada hasta 2m de profundidad (Liotta, 2015). Al principio de la década del 80 se estudió el movimiento del plano freático determinándose que el 37.3% de la afectación se produjo por elevación a niveles menores a dos metros (INTA, 1986). En Jachal, con 7.500 ha regadas, los suelos se han desarrollado por deposiciones aluviales del río y otros cauces extendidos. Son suelos profundos con dominio de texturas medias y excelente drenaje, no existen problemas de salinidad graves. En Calingasta e Iglesia igualmente con otras 7.500 ha regadas, la problemática es similar. En San Juan, la causa de la afectación por salinidad es, en todos los casos, la elevación de la freática a niveles muy cercanos a la superficie, sobre todo en ciertas épocas del año y el aporte por sobreriego a pesar de que el agua del río San Juan tiene un valor medio anual no elevado de CE de 0.6 dS.m⁻¹. La problemática de San Juan pasa por las dificultades que genera la sobreaplicación en la elevación del nivel freático y no por la calidad del agua de riego (Liotta, 2001).

En la provincia de La Rioja, para las 1.200 ha incluidas en este estudio y asimiladas dentro de las 51.738 ha informadas para la provincia (Mercau, 2013), no existen dificultades de salinidad ni sodicidad relevantes, dado que en su gran mayoría (35.000 ha), son irrigadas por la metodología de riego presurizado, fundamentalmente por goteo. El riego por goteo disminuye el efecto osmótico

perjudicial de las sales sobre los cultivos, es por ello que la manifestación de afecciones por salinidad en La Rioja es mínima (Miguel, 2014).

En San Luis se distinguen dos áreas importantes bajo riego: la del valle del río Conlara y la Llanura Norte. En el primer caso el agua de riego alcanza en promedio una salinidad debajo de 0.64 y de 1.31 dS.m⁻¹ en el segundo. El crecimiento relativo de la superficie regada con metodología presurizada principalmente pivots en relación a la superficie total muestra que la importancia del impacto del riego no es de la magnitud tal como si la aplicación fuese de riego por gravedad. Un estudio anterior sobre áreas de regadío realizado por el INTA, arrojó una superficie total bajo riego de 8.797 ha (INTA, 1986).

El análisis de los resultados de cada una de las provincias constituyentes de la región Cuyo muestra que Mendoza posee un 26.4% de suelos bajo riego y efectivamente regados con algún grado de afectación, particularmente en el Oasis norte intensificándose en ciertos lugares como la zona central, centro norte y norte de la cuenca del río Mendoza y con valores inferiores en el río Tunuyán. También en el área central, límite este de la superficie regada, coincidente con el uso de agua subsuperficial (Morabito *et.al.*, 2004). En el estudio anteriormente mencionado (INTA, 1986) la superficie afectada por sales aparecía con un nivel del 43.8% resultando afectadas unas 255.940 ha sobre 443.523 ha empadronadas. El proceso mantiene cierta estabilidad en las cuencas de los ríos Tunuyán y Mendoza en los recientes ciclos hidrológicos con una profundidad del plano freático entre 1 y 2m, una CE del agua de riego de 0.9 a 1.35 dS.m⁻¹ y una CE del agua de drenaje de 3.0 a 3.5 dS.m⁻¹ con un RAS de 2.0-4.0. La situación de los ríos Atuel y Diamante en el Oasis sur presenta valores más elevados en la concentración salina del agua de riego del orden de 1.3 a 1.5 dS.m⁻¹ con un ligero incremento del RAS a 2.6 en promedio y una ligera tendencia creciente a la salinización.

La provincia de La Rioja posee una baja afectación por salinidad en su área regada del orden del 10.2 %, probablemente debido al método de aplicación de agua de riego en su mayor medida por goteo, en virtud que sus aguas no presentan problemas de salinización incipiente. La provincia mantiene su

proporcionalidad respecto al área afectada por sales estimada con respecto al estudio anterior del orden del 10% (INTA, 1986).

San Juan expresa en los resultados una alta proporcionalidad de afectación, del orden del 56.24%. Es el distrito de la región Cuyo más problemático debido a la sobreaplicación y elevación consecuente del plano freático.

En San Luis el porcentaje de suelos afectados ronda el 12.5%, no resultando un problema también gracias al crecimiento del riego presurizado proporcionalmente sobre las estimadas hectáreas regadas por gravedad. Solo en estas últimas el sodio se manifiesta en el agua de drenaje por encima de 10 unidades de RAS y entonces el proceso se hace visible. La Región Cuyo posee, de acuerdo al relevamiento realizado, en el conjunto de sus 4 (cuatro) provincias un porcentaje de suelos afectados por procesos de contaminación salina-sódica del orden del 28.3% en forma global, valor sensiblemente más bajo que el 59.8% detectado en 1986 (INTA, 1986) si bien este consideró superficie empadronada en algunos casos y no superficie efectivamente regada como el presente estudio (Tabla N° 7).

Tabla Nº 7. Región Cuyo. Provincias de Mendoza, La Rioja, San Juan y San Luis.

Prov	Cuenca	Agua de riego		Agua de drenaje		Condiciones de drenabilidad			Tendencia ⁽⁴⁾	Área efect. regada ha	Área afectada ha	
		CEa dS.m ⁻¹	RAS	CEd dS.m ⁻¹	RAS	NPF ⁽¹⁾ m	Text. ⁽²⁾	Infiltr. ⁽³⁾ A/M/B				A/E/D
Men doza	río Mendoza	0.9-1.9	1.1	3.0	2.1-7.4	1.5	Fr-Ar	A	E	90000	26583	
	río Tunuyán Sup.	1.12	0.61	3.0	1.5	1.5	-	A	E	51484	7722	
	río Tunuyán Inf.	1.35	1.56		4.05	2.2	Fr-Ar	A	E	55000	8250	
	ríos Atuel y Diamante	1.50	2.60	1.25	-	1.65	Fr-Ar	A	A	41525	15946	
									A	38315	14712	
										276324	73213	
La Rioja	Este Llanos <3000ha	0.5-1.2	1.7	4.0	> 10	> 20	Fr-L	A	E	1200(a)	-	
	Campo Exp. Chilecito	1.16	1.0-7.0	1.16	1.80	99	Ar	A	E	10(b)	5	
										(**)	51738	5300
San Juan	Valles Centrales	0.6	3.0	7	18	1.0-3.0	Fr-Arc	M	A	80276	46000	
	Valles Periféricos	1.5	7.0	-	-	> 2.0	Ar-Fr	A	E	15428	7830	
										95704	53830	
San Luis	V de Conlara	0.64	1.5	2.8	13	1-2	Fr	M	A	76437	9580	
	Llanura norte	1.31	1.9	2.9	10	1.8	Ar-Fr	M	A			
										(***)	76437	9580
TOTAL REGIÓN										500203	141923	

Referencias: ⁽¹⁾ Nivel del plano freático (m); ⁽²⁾ Clase textural: Arc: arcilloso; Ar: arenoso; Fr: franco; L: limoso. ⁽³⁾ Infiltración del perfil: A: alta; M: Media; B: baja; ⁽⁴⁾ Tendencia del proceso de afectación: A: aumenta; E: estable; D: disminuye; (*) Incluyen 1 y 2; (**) La Rioja: 35000 ha de riego por goteo (a) y (b). (***) San Luis 56.437 ha por pivot y 20.000 ha gravedad.

III. REGIÓN PATAGÓNICA

En la provincia de Río Negro existen tres ríos que pertenecen a diferentes cuencas: el río Negro, el río Colorado y el río Neuquén, todos de régimen nival aunque las calidades de las aguas de riego difieren sustancialmente para el río Colorado con respecto al Negro y al Neuquén. Mientras las aguas de los ríos Negro y Neuquén oscilan entre 0.17 a 0.30 dS.m⁻¹ la del Colorado oscila entre 0.9 y 1.8 dS.m⁻¹. Esto también se traduce en el agua de drenaje, cuyos tenores salinos en las áreas regadas con aguas del Colorado superan en promedio a las demás. Las aguas de riego del Colorado con mayor nivel de CE total arrastran sin embargo un nivel alto de sulfato de calcio, con lo cual el pH rara vez supera las 7.8 unidades y el RAS muestra valores usualmente de 3.0-4.0, generando una categoría de agua clase C₃S₁ (Richards, 1954). Los suelos regados con esta agua son por lo general haplustoles énticos o típicos de textura arenosa- franca y el efecto degradante es la salinidad y no la sodicidad.

Diferente situación presentan los ríos de las cuencas Neuquén y Negro con baja salinidad total pero con niveles de sodio en solución relativamente altos, con pH en ocasiones superiores a 7.0, lo cual muestra valores de RAS y PSI en el suelo alto debido al desequilibrio iónico entre el sodio, calcio y magnesio. Debido a que estas cuencas en las provincias en estudio se riegan por gravedad, siempre la dificultad mayor está en las condiciones de drenaje de los suelos, la profundidad de la freática establecida como equilibrio del descenso gravitacional y las fuerzas de tensión superficial de las partículas de suelo. Los resultados que se muestran del Colorado en la Tabla N° 8, correspondiente a la Región Patagónica, se refieren a las áreas regadas en Cnia. Catriel y Río Colorado, lugares donde aún la carga salina del río no es importante. Diferente situación se produce en el Valle Bonaerense del Colorado, donde si la salinidad aparece con valores más altos por arrastre territorial hacia el tramo final.

La provincia de Chubut posee dos oasis: Valle Inferior del Río Chubut (VIRCH) y Cnia. Sarmiento. El área del VIRCH es la más afectada, no por la salinidad del agua de riego sino por la naturaleza de sus suelos argílicos, vertisoles y/o argiudoles vérticos, constituidos por material fino y muy fino texturalmente, los cuales desarrollan baja infiltración, plano freáticos cercanos a la superficie y escasa drenabilidad y como consecuencia inmediata salinidad y sodicidad. En Cnia. Sarmiento, el agua de riego es de mejor calidad en promedio, prevaleciendo algunos de los problemas similares al VIRCH respecto a la drenabilidad y salinidad (Laya, 1982; Fiorentino, 1999).

El área regada de Los Antiguos Santa Cruz, es de naturaleza nival libre de sales y con concentraciones de bicarbonatos y sodio algo superior a lo normal, aunque sin ocasionar dificultades hasta el presente.

La provincia de La Pampa, riega el área de Cnia. 25 de Mayo con las aguas del Colorado, donde la CE aún es reducida comparada con lo registrado en el valle bonaerense del río Colorado, Bs. As. Esto se debe a la escasa disolución de sales en la cuenca superior. Las áreas regadas de Cnias. El Sauzal y 25 de Mayo registran una salinidad estable de un 10% en su superficie regada. Los resultados condensados de la Región Patagónica se muestran en la tabla N° 8.

Tabla N ° 8. Región Patagónica. Provincias de Río Negro, Neuquén, Chubut, Santa Cruz y La Pampa.

Prov.	Cuenca	Agua de riego		Agua de drenaje		Condiciones de drenabilidad			Tendencia ⁽⁴⁾	Área efect. regada	Área afectada
		CEa	RAS	CEd	RAS	NPF (1)	Text. (2)	Infilt. (3)			
		dS.m ⁻¹		dS.m ⁻¹		m		A/M/B	A/ E/D	ha	ha
Río Negro	río Negro	0.17-0.30	0.2-0.9	0.7-6.5	3-18	0.7-2.0	Fr-L	M	D	32170	8088
	río Colorado	0.90-1.80	3.5-3.9	2.0-10.0	10-17	0.9-1.8	Ar-Fr	M	E	10650	3489
	río Neuquén	0.23-0.30	1.0-1.6	0.7-12.0	3.0-18	1.0-1.6	Fr-L	M	D	36500	10931
										79320	22500
Neuquén	Añelo, S. Patricio del Chañar, Centenario y Picún Leufú	0.30	3.0	-	-	2.0	Fr-Arc	M	E / A	14600	4380
										14600	4380
Chubut	Río Chubut	0.40	5.0	5-10	6	0.5-1.5	Arc	M / B	A	19350	14399
	Cnia. Sarmiento	0.25	5.2	4-8	4	1-2	Ar-Fr*	M	A	6700	3350
										26050	17749
Santa Cruz	Los Antiguos		Agua clase C ₁ S ₁			> 10	Fr-Ar	A	E	500	-
										500	-
La Pampa	25 de Mayo y El Sauzal	0.7-1.8	3.0	6.4	-	1.2	Ar	M	A	4600	460
										4600	460
TOTAL REGIÓN										125070	45089

Referencias: (1) Nivel del plano freático (m); (2) Clase textural: Arc: arcilloso; Ar: arenoso; Fr: franco; L: limoso. (3) Infiltración del perfil: A: alta; M: Media; B: baja; (4) Tendencia del Proceso de afectación: A: aumenta; E: estable; D: disminuye. (*) Suelos clase II y III. Bureau of Reclamation.

IV. REGIÓN PAMPEANA Y NEA

Esta macroregión está compuesta para este estudio por las provincias de Misiones, Chaco, Formosa, Corrientes, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba y parte de Buenos Aires. La Región Pampeana y el NEA (noreste argentino) riegan sus suelos mayoritariamente por metodología presurizada a excepción de algunas áreas en el sur de Bs. As., como el valle bonaerense del río Colorado, pequeñas porciones de territorio en Córdoba y Santa Fe y el litoral Corrientes y Entre Ríos con el cultivo del arroz. El riego es aplicado por metodología presurizada goteo, microaspersión, aspersión, avance frontal y pivots. Fundamentalmente este último que ha crecido en ocupación de área en forma exponencial en los últimos años.

A diferencia de las regiones regadas por métodos gravitacionales la región pampeana no presenta afecciones en los suelos causadas por salinidad, muy por el contrario la línea divisoria que representa la isohieta de los 700 mm hacia el territorio noreste divide a la Argentina en dos regiones: la primera región afectada por sales y/o sodio por debajo de ese valor de precipitación y una segunda región por encima de 700 mm donde los procesos degradatorios de los suelos están vinculados al sodio y al riego con agua subterránea bicarbonatada sódica. El efecto más común es la dispersión de la matriz del suelo, la disminución de la infiltración y la toxicidad que algunos cationes como el sodio y el boro causan en los cultivos. En Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires el riego por pivot ha crecido sustancialmente. En el área norte y noreste de la provincia de Buenos Aires, sudeste y sudoeste en el límite con el subhúmedo, se registran focos de crecimiento así como en Córdoba y Santa Fe al centro y sur del paralelo 32° LS. (Salinas, 2014; Andriani, 2014; Costa, 2014; Lopresti, 2014; Paoloni, 2014; Andriulo, 2014).

En la provincia de Corrientes, el 93.5% de las aguas superficiales y el 55% del agua subterránea es de excelente calidad. Solo el 6.46 % de las aguas de la provincia no

son recomendables para riego, por lo tanto no se registran procesos importantes de deterioro de suelos por salinidad (Sosa *et.al.* 2009).

En Entre Ríos el agua superficial es de buena calidad, no siendo así con el agua proveniente de las perforaciones, la cual provoca un sellado superficial de los suelos vérticos debido a la gran cantidad de bicarbonatos que transporta, en especial en las arroceras. Es habitual encontrar valores como 618.4 mg.l^{-1} de este anión, lo cual produce altos valores de RAS ajustado a niveles de 12.0-13.0 unidades, con el efecto antes descripto (Valenti *et.al.*, 2007; Walker *et.al.*, 2005).

Según Aparicio *et.al.* (2014) en el área del sudeste de Buenos Aires la fuente de agua más común es de origen subterráneo para el riego complementario, la cual contiene carbonatos y bicarbonatos por lo general en abundancia, lo que produce un incremento de la RAS en el suelo.

Las láminas de agua aplicadas varían entre 100 y 250 mm produciendo en consecuencia un lavado de sales en el perfil y como resultado de la compensación en el balance hídrico, habilitando en parte el uso de aguas de salinidad dudosa para el riego.

La salinidad del agua de riego incrementa la conductividad eléctrica del extracto de saturación. De acuerdo a varios trabajos realizados en la región pampeana los riegos con aguas bicarbonatadas sódicas sin embargo, registraron un incremento significativo del pH y PSI, aunque la conductividad eléctrica haya registrado escasa variación. El peligro de sodificación es considerablemente mayor que el de salinización.

Los efectos físicos sobre el suelo se traducen en una reducción de la emergencia de plántulas debido al encostramiento, reducción de la infiltración básica y velocidad de infiltración, dificultades en la preparación de la cama de siembra por aterronamiento y formación de grandes agregados. Las conclusiones a la que han arribado estos autores es que a pesar que el agua de lluvia lixivia, la salinidad del perfil y el contenido de carbonatos que posee el agua de riego complementario, incrementa el contenido de sodio en el perfil con las consecuencias físicas señaladas. La calidad del agua de riego utilizada en el sudeste bonaerense es C_3S_2 y C_4S_3 de acuerdo a la clasificación de Richards (1954).

Es esperable que el agua de lluvia en la Región Pampeana, la cual incrementa a partir de 800 mm y donde luego se complementa con agua de riego (Suárez *et.al.*, 2006), acrecienta el riesgo de sodicidad debido a la escasa conductividad eléctrica de la primera y considerando además que los parámetros para evaluar aguas de riego se han desarrollado para regiones de riego casi integral, semiáridos o áridos.

El criterio de Richards (1954) no es aplicable aunque igualmente es utilizado para regiones de riego complementario, donde existe una combinación de agua de lluvia y agua de riego bicarbonatadas.

Los efectos de la salinidad a un PSI elevados son beneficiosos a partir de la presencia de Ca^{++} , disminuyendo el efecto dispersante del Na^+ . Al menos una parte de las sales solubles son cálcicas, de este modo la provisión de Ca^{++} a un PSI dado es mayor en presencia de salinidad que en ausencia de ella (Pearson *et.al.*, 1960).

Los efectos de la salinidad y el sodio presentes en los suelos de la región pampeana

La salinidad inhibe el crecimiento de las plantas durante todo el ciclo de vida, pero sin duda el estado más sensible es el de la germinación. El stress salino simula un estrés hídrico demostrando que el principal efecto es osmótico. A pesar que el cloruro de sodio es la sal menos tóxica, es la más común encontrada en los suelos y en consecuencia la más problemática para la agricultura. El mecanismo inhibitorio no es del todo conocido, pero se sabe que las membranas celulares son los lugares donde estos tienen su actividad más importante. El cloruro de sodio interfiere con el transporte de solutos orgánicos e inorgánicos y de una gama de funciones adicionales de la membrana como la secreción. (Bliss *et. al.*, 1984). El estrés salino induce cambios en la composición de lípidos de la membrana celular y la liberación de proteínas en las células de la raíz.

En los casos donde aparece salinidad como las regiones antes mencionadas u otros sitios puntuales de la región, los cultivos se comportan igualmente que en

las zonas semiáridas y áridas, con los mecanismos de tolerancia a la salinidad de algunas especies, basados en la estrategia de aislar las sales de estos procesos sensibles mediante la compartimentalización de la membrana. La interacción de las sales con la membrana celular durante la germinación se complica aún más debido a los procesos de hidratación, llamado también "imbibición" ya que esta pasa de un estado seco a hidratado alterando profundamente el funcionamiento de la membrana celular. Son procesos metabólicamente más rápidos y por lo tanto más agresivos. Algunas experiencias han demostrado que el Cl^- puede penetrar las membranas e ingresar en el citoplasma.

Cuando el agua de riego es aplicable a partículas de suelo con alto contenido montmorillonítico como los suelos vertisoles de Entre Ríos o Argiudoles de Bs. As., el espesor puede expandirse considerablemente, reduciendo el diámetro de los poros. Este proceso se agudiza en presencia de alto contenido de sodio o bajo contenido salino o ambos. La dispersión obedece a mecanismos similares ya que el alto contenido de sodio y baja concentración de sales causa movimiento y taponamiento de partículas finas dentro de los poros (Rolston *et.al.*, 1984).

Expansión y dispersión son ambos influenciados por la mineralogía de arcillas. Dispersión y floculación son los mecanismos de ruptura de agregados. Como resultante la superficie del suelo se sella y se genera una costra que impide la infiltración, difusión de gases a través del perfil y emergencia de las plantas. El impacto de la lluvia o gotas de agua de riego por aspersión traslada las partículas de suelo más finas dentro de los poros y aunque el encostramiento superficial se considera que ocurre en áreas donde la salinidad no es un problema, la cantidad de sodio y la concentración de sal en el agua de riego o lluvia influirán en el grado de dispersión de los suelos, en el sellado de la superficie y en el encostramiento. El sellado de la superficie o el encostramiento limita el intercambio de gases del perfil con la atmósfera.

A menos que la costra se rompa conforme el suelo se va secando, la baja tasa de movimiento de oxígeno puede resultar en pobre aireación temporaria y afectar la productividad del cultivo. Expansión y dispersión de los suelos arcillosos afectan las propiedades del suelo relacionados con la transmisión por alteración de la

geometría y continuidad del sistema poroso, la conductividad hidráulica se ve así alterada y depende del PSI y de la concentración de la solución percolante.

En los Molisoles de la región pampeana, la tasa de flujo de agua a través del suelo con un alto porcentaje de sodio intercambiable puede ser monitoreada, si la concentración de sal en la solución percolante del agua de riego está sobre el umbral donde la expansión y dispersión son limitadas. El impacto entonces en suelos pampeanos con bajo PSI y alto contenido de materia orgánica, es que la dispersión de arcilla y la consecuente disminución de la conductividad hidráulica ocurrirán a muy bajos contenidos salinos en la solución percolante, así como inversamente ocurrirá a altos PSI y bajo contenido de sales en el agua.

Cuando el agua es muy baja en sales, tal el caso del agua de lluvia, la susceptibilidad al decrecimiento del flujo de agua debido a la presencia de sodio absorbido dependerá del potencial del suelo para liberar sales. La liberación de sales o electrolitos es derivado de la meteorización de los minerales primarios y la disolución del carbonato de calcio.

Si el electrolito es liberado a una tasa suficiente para mantener la concentración de sal en la solución del suelo sobre el nivel donde la dispersión de la partícula ocurre, la tasa de flujo de agua podrá mantenerse a niveles aceptables.

La modalidad del proceso de infiltración influirá en el tipo y manejo del sistema de riego. Suelos con un moderado sodio de cambio, puede tener razonables tasas de transmisión de agua debido a la liberación electrolítica de los minerales del suelo. La presencia de bicarbonato de sodio en el agua de riego incrementa la tendencia a la formación de costras así como a reducir la permeabilidad.

En suma los mayores efectos de la salinidad sobre las propiedades del suelo pampeano son expansión en los suelos arcillosos, dispersión de partículas finas, formación de costras y decrecimiento de las propiedades de transmisión. La cantidad de sodio y sal en el agua de riego, influirá de manera importante afectando las propiedades físicas del suelo.

El riego complementario ha crecido en las últimas décadas en la Región Pampeana, utilizando láminas que cubren del 10 al 30% del agua total recibida,

provinando mayoritariamente del acuífero Puelche. Aunque no existen áreas definidas de riego como en las regiones áridas y semiáridas, el efecto del riego con aguas bicarbonatadas sódicas está presente en todo el extenso y fértil territorio (Torres Duggan, 2012; Lavado, 2009) (Tabla N° 9).

Tabla N° 9. Agua utilizada en la región pampeana húmeda, Pergamino Bs As. (Andriulo *et.al.*, 1998)

pH	CO ₃ H ⁻ (meq.l ⁻¹)	Na ⁺ (meq.l ⁻¹)	CE (dS.m ⁻¹)	RAS
8.2	12.0	14.6	1.47	22.0

Los resultados del relevamiento en la Región Pampeana y el NEA, se encuentran condensados en la Tabla N° 10.

Tabla Nº 10. Región Pampeana y NEA: Córdoba, Sta. Fe, Corrientes, Entre Ríos y Buenos Aires.

Prov.	Cuenca	Área efect. regada	Area afectada	Clase de afectación			Método de aplicación de agua					Agua riego		Tendencia (1) A / E / D
				Sa	So	Ss	Grav.	Aspers.	Pivot	Goteo	Av. Front.	CEa	RAS	
		ha	ha	Ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	ha	dS.m ⁻¹	
Córdoba	Dpto. 3ro	29000	4350	1450	1450	1450	1400	13600	13000	800	200	1.37	4.60	A
	Dpto. 1ro	20000	4000	2000	1000	1000	-	3000	17000	-	-	-	-	E
	Dpto. J.Calman	16000	6400	2400	800	3200	-	-	16000	-	-	1.12	12.95	E
	Dpto. Colón	13000	1560	260	650	650	6000	-	7000	-	-	3.70	14.00	A
	Dpto. río 2do	14000	1400	420	280	700	-	-	14000	-	-	0.68	5.80	E
	Dpto. Totoral	10000	1000	200	500	300	-	-	10000	-	-	1.70	3.50	E
			102000	17710	6530	4680	7300	7400		77000				
Sta. Fe	Sur paral 32º	12000	6000	-	-	-	180	-	10000	120	1700	1.7	7.3	E
	Manucho, Llambi Campbell, Marcelino esc, Reconquista	47000	-	-	-	-	47000	-	-	-	-	0.9	6.4	E
	Otras áreas	3503	-	-	-	-	3503	-	-	-	-	1.3	19.8	A
		62503	6000				50683		10000	120	1700			
Corrientes	Curuzú Cuatiá	21000	-	-	-	-	21000	-	-	-	-	0.6	s/d	E
	Mercedes	16000	-	-	-	-	16000	-	-	-	-	0.26	0.48	E
	Itarbate	11000	-	-	-	-	11000	-	-	-	-	0.25	0.45	E
	Lavalle	8000	-	-	-	-	8000	-	-	-	-	-	-	E
	Esquina	8000	-	-	-	-	8000	-	-	-	-	0.20	0.85	E
	San Martín	7500	-	-	-	-	7500	-	-	-	-	-	-	E
	Paso de los Libres	7000	-	-	-	-	7000	-	-	-	-	-	-	
	78500	7850				62800	15700							
Entre Ríos	Villaguay	18000	-	-	-	-	16000	1500	500	-	-	0.46	0.24	E
	San Salvador	12000	-	-	-	-	11000	500	500	-	-	0.47	0.25	E
	Federación	12000	-	-	-	-	8000	3000	-	1000	-	0.45	0.27	E
	Colón	8000	-	-	-	-	8000	-	-	-	-	1.13	0.51	E
	La Paz	8500	-	-	-	-	8500	-	-	-	-	1.10	0.50	E
	Concordia	8000	-	-	-	-	6000	1000	-	1000	-	1.10	0.49	E

Paraná, Victoria, Diamante y Gualeguay	2500	-	-	-	-	500	-	2000	-	-	1.00	10.0	E
	69000	10350	-	-	-	58000	6000	3000	2000				

Norte (Perg.)	38892	38892	-	38892	-	-	-	35471	3421	-	1.2	8-16	E
Noreste	6768	6768	-	6768	-	-	-	5648	1120	-			E
	45660	45660		45660				41119	4541				

Fuente: M. Lopresti: Comunicación personal

Balcarce	120000	60000		60000				20000	40000	10000			
----------	---------------	--------------	--	--------------	--	--	--	-------	--------------	--------------	--	--	--

Fuente: Costa S. L. & V. Aparicio (1999). Prof. nivel freático: 10-60 m; Drenabilidad: media; Textura: Fr- Arc.

Buenos Aires	SOB: Pringles	7300	-	-	-	-	-	7300	-	-	0.89	3.0	E
	SOB: Cne. SOB: Suarez	14000	-	-	-	-	-	14000	-	-	1.44	4.0	E
	SOB: Tronquista	300	-	-	-	-	-	300	-	-	1.32	3.5	E
	SOB: A. Alsina	3000	300	-	300	-	-	3000	-	-	2.40	12	E
	Dorrego	300	100	-	100	-	-	300	-	-	2.10	10	A
		24900	400		400			24900					

Fuente: Paoloni P. 2014. Universidad nacional del Sur – Consultor privado.

VBRC: Pedro Luro	45000	16650	13500	450	2700	44850	70	50	30	-	1.71	3.5	E
Villalonga	42160	850	800	-	50	42160	-	-	-	-	1.65	3.6	E
Buratovich	40000	5000	4400	100	500	39760	150	20	70	-	1.70	3.9	E
	127160	22500	18700	550	3250	126770	220	70	100				
Total Buenos Aires	317720	128560											

TOTAL REGIÓN 629723 170470

Referencias: ⁽¹⁾ Tendencia del proceso de afectación: A: aumenta; E: estable; D: disminuye. Corrientes: El 93.5% de las aguas superficiales y el 55% del agua subterránea son de excelente calidad. Solo el 6.46% de las aguas de la provincia no son recomendables para riego. Fuente: Sosa (2009).

V. REGIÓN NOA

Las provincias de Salta y Jujuy poseen una importante variabilidad climática, presentando precipitaciones con un gradiente que se inicia desde 150 mm hasta llegar a 2.000 mm. Las áreas de riego se encuentran desarrolladas en diferentes subáreas sustentadas sobre suelos en su mayoría aridisoles, que en algún caso han derivado en cambortides y haplargides, en los cuales los materiales son aún más finos. En las áreas regadas por el río Cachi, que suman alrededor de 4.415 ha, la aplicación del agua se realiza a una altura sobre el nivel del mar de 2.000 m hacia arriba, con lo cual la evapotranspiración dado el clima frío y húmedo es relativamente baja y la compensación hídrica en consecuencia es acorde a esa demanda. Similar situación se verifica en los ya denominados Valles Calchaquíes de Salta y Jujuy, con desarrollo de pequeñas áreas regadas con aguas del mismo nombre sobre suelos texturalmente de grano grueso dominantes de clases VI y VIII los cuales presentan severas limitaciones para la agricultura de regadío. El riego en el denominado consorcio de riego Cayafate, que controla unas 2.064 ha y el Consorcio de riego San Carlos con unas 6.000 ha se asientan sobre un régimen de precipitación de 300 mm, con evapotranspiraciones del cultivo de referencia superiores a la precipitación en todos los ciclos de cultivo. Los consorcios Capital y Cerrillos Salta de 7.040 ha y 24.860 ha respectivamente, así como el consorcio General Güemes de 14.000 ha, presentan tomas rudimentarias en algunos casos, que abastecen a sus correspondientes áreas regadas (Piccolo *et.al.*, 2008; D'angelo, 2015).

Los consorcios de riego Orán y Colonia Santa Rosa contienen 48.331 y 6.486 ha empadronadas respectivamente. En este último consorcio se encuentran algunas dificultades de afectación por salinidad de los suelos a partir de la aplicación de agua de riego. Del mismo modo en el consorcio Apolinario Saravia con unas 2.750 ha empadronadas, aparecen la mayoría de las afectaciones por salinidad. Finalmente el consorcio Joaquín V. González administrado por la actividad

privada sobre el río Juramento, no registra referencias degradatorias por salinidad (De Paoli, 2014; D'angelo, 2015).

Las aguas de riego en los consorcios Cnia. Santa Rosa y Apolinario Sanabria varían alrededor de 1 dS.m^{-1} , con valores de RAS relativamente altos del orden de 15.0-16.0 unidades y con suelos de textura más fina, en algunos casos adicionado a niveles freáticos de 1.5 m de profundidad de CE $1.7\text{-}2.7 \text{ dS.m}^{-1}$ (De Paoli, 2014).

En Jujuy la aplicación del agua en pequeñas superficies se realiza mediante metodología gravitacional y en medianas a grandes superficies una buena porción se riega mediante aspersión y goteo. Salvo en el primer caso de la aplicación por gravedad, la aplicación presurizada disminuye el desarrollo de la problemática de salinidad y/o sodicidad coexistiendo ambos métodos de aplicación de agua tanto en los Valles como en el Ramal (Sánchez, 2015). En función de la topografía accidentada, las obras de captación de agua juegan un papel preponderante en la generación de espacios de riego, pero debido a la naturaleza de los suelos, calidad del agua y profundidad de la freática no se registran importantes afectaciones salinas. En Jujuy, durante 1986, se realizó un levantamiento sobre 35.000 ha, encontrándose que en 20.000 ha de estas el plano freático se mantenía a menos de 2 m de profundidad, representando esto un riesgo para la productividad de los cultivos principalmente caña de azúcar, indicándose que a partir de una CE de 1.8 dSm^{-1} en la solución del suelo, comienza la disminución productiva de la misma (Ledesma, 2004). La superficie efectivamente regada es de 124.970 ha difiriendo ligeramente con respecto al CNA 2002, de las cuales 17.069 son salinas, 2.037 sódicas y 2.500 son de riego presurizado, registrándose una afectación salino-sódica de aproximadamente 12% (Sánchez, 2015).

La provincia de Tucumán posee una importante área bajo riego administrada en 7 (siete) distritos. Dos de ellos muy importantes, denominados Sistema Lules y Tafí del Valle, el primero incluido en el Distrito IV y el segundo en el Distrito VII. La CE del agua de riego en el Sistema Lules alcanza 0.49 dS.m^{-1} en promedio con un RAS de 0.61 sin la existencia de freática sobre suelos Franco-limosos y con tendencia estable en el proceso degradatorio. En el distrito Tafí del Valle el agua de riego presenta valores más altos, del orden de 0.89 dS.m^{-1} con un valor de RAS relativamente bajo (1 dS.m^{-1}) (Guyot, 2014). Pero los procesos degradatorios

por salinidad en la provincia de Tucumán se encuentran localizados en la llamada Llanura aluvial deprimida, con procesos de salinización naturales por halomorfismo y razones antrópicas que conducen a la presencia de una freática cercana a la superficie, fluctuante y de composición bicarbonatada sódica. Es la presencia de este plano freático que produce distorsiones por halo-hidromorfismo en virtud que en nivel del plano freático se encuentra en ocasiones a menos de 1 m de profundidad (Puchulu, 2008). Según el estudio INTA (1986), el área regada alcanzaba 140.000 ha con más del 50% con algún grado de afectación por salinidad. Sin embargo según el CNA 2002, indica unas 66.024 ha regadas en un 70% por gravedad sin afectaciones importantes.

La provincia de Santiago del Estero presenta en su área de riego del Río Dulce una superficie máxima de 120.000 ha, con una efectiva de riego de 88.000ha (Prieto, 2014), mostrando un proceso de afectación por salinización en los campos regados por elevación del plano freático y por la misma razón en los no regados por exfiltración debido al ascenso capilar (Boscá, 2007). El agua de riego posee una CE promedio de $0.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y la de drenaje $9.4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Prieto, 2014; Boscá, 2007). La profundidad de la freática promedio se mantiene entre 1 y 2 metros (Boscá, 2007). El sobreriego y en algunos casos la escasa infiltración y drenabilidad de los suelos, son la causa principal de la salinización (Prieto, 2014).

En la provincia de Catamarca la cuenca del río Del Valle es la principal fuente de agua para riego y consumo. La calidad de la misma se presenta como de excelencia para ambos propósitos variando su CE de 0.12 a $0.4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y con niveles de RAS cercanos a 2 en promedio con pH no superiores a 7.5 clasificando las mismas en la categoría C1S1 para el standard de Riverside (Richards, 1954). La fuerte expansión del riego presurizado ha disminuido aún más el riesgo de deterioro salino- sódico en los suelos (Demin, 2012).

De las 61.847 ha informadas por el CNA en 2002, Catamarca riega alrededor de un 40% por gravedad y el 60% por métodos presurizados, con un equilibrio de 19.000 ha para sistema por goteo y aspersión respectivamente. El crecimiento que en 1986 era de 26.884 ha, tuvo lugar mediante esta metodología lo cual en virtud de la calidad del agua ha colaborado en el no desarrollo de procesos de deterioro por salinidad o sodicidad (INTA, 1986; CNA, 2002).

Las tablas N° 11 y 12 muestran los datos del NOA condensados a nivel región resultantes de las encuestas y la síntesis a nivel país de los resultados condensados por región y sus cifras finales de carácter global.

Tabla Nº 11. Región NOA. Pcias. de Salta, Jujuy, Tucumán, Catamarca y Stgo. del Estero.

Provincia	Cuenca	Agua de riego		Agua de drenaje		Condiciones de drenabilidad			Tendencia ⁽⁴⁾	Área efect. regada	Área afectada
		CEa	RAS	CEd	RAS	NPF ⁽¹⁾	Text. ⁽²⁾	Infilt. ⁽³⁾			
		dSm ¹		dSm ¹		m			A/E/D	(ha)	Ha
Salta	Cnia. S. Rosa	0.90	< 15	2.70	17	1.8	Arc		A	8000 ⁽¹⁾	2400
	Ap.Sanabria	1.00	< 16	1.70	17	1.5	Ar		E	5400 ⁽²⁾	1620
									Total provincial CNA 2002	118898 (incl. 1 y 2)	8937
Jujuy	Ledesma		1.2	1.8		<2.0	Ar-Fr		E	31103.8	
	San Salvador	0.6	1.8						E	1384	
	Palpalá								E	2921.5	
	El Carmen								E	28781.5	
	San Antonio					1-5	Ar-Fr		E	1800.00	
	Santa Bárbara								E	23533.96	
	San Pedro					1-2			E	24274.0	
	Puna y Quebrada	0.8	1.2			1-5	Ar-Fr		E	3500.0	
									117299.26(+)	12347(+)	
Catamarca	Reg. Valle Central	0.8-0.13	1.2-1.8	4-8	13	-	Fr-Ar		E	22259	-
										61847 (**)	13134
Tucumán	Sist. Lules * Dist IV	0.49	0.61	sin reática	sin freática	1.5	Fr-L		E	19700	
	Tafí del Valle* Dist VII	0.89	0.10	-	-	1.5	Fr-L		E	1460.1	
	Distrito I	0.6-1.0		-	-	sin freática	Fr-L		E	12500	
	Distrito II	2.1-4.8					Fr		E	9687	
	Distrito III	0.8-3.9					Fr		E	29900	
	Distrito V Distrito VI	-					Ar Ar			21570 13667	
									108484.1	10438	
Santiago del Estero	Sist. De Río Dulce –Cnia Dora-Figueroa	0.8	3.7	9.4	31.1	1-3	Fr-L	M	A	88000	10000
TOTAL REGIÓN										494528.36	54856

Referencias: (1) Nivel del plano freático (m); (2) Clase textural: Arc: arcilloso; Ar: arenoso; Fr: franco; L: limoso. (3) Infiltración del perfil: A: alta; M: Media; B: baja; (4) Tendencia del proceso de afectación: A: aumenta; E: estable; D: disminuye. (+) Los cifras de Jujuy actualizadas a 2015 son ligeramente superiores al CNA 2002 (Sánchez, 2015). (*) Fuente: Ecolatina Consultora en Economía y Empresas-Prosap-BM-NAC-CO-UEC-S-06/09. (**) CNA-2002.

Tabla Nº 12. Síntesis regional y nacional de las áreas regadas y afectadas.

<i>REGIÓN</i>	<i>Sup. efect. regada (ha)</i>	<i>Afectadas (ha)</i>	<i>Afectación (%)</i>
Jujuy	117.299,3	12.347	10.5
Salta	118.898	8.937	7.5
Catamarca	61.847	13.134	21.23
Tucumán	108.484,1	10.438	9.6
Sgo. del Estero	88.000	10.000	11.3
Total Región NOA	494.528,36	54.856	11.0
Mendoza	276.324	73.213	26.4
La Rioja	51.738	5.300	10.2
San Juan	95.704	53.830	56.2
San Luis	76.437	9.580	12.5
Total Región CUYO	500.203	141.923	28.3
Río Negro	79.320	22.500	28.3
Neuquén	14.600	4.380	30.0
Chubut	26.050	17.749	68.1
Santa Cruz	500	-	-
La Pampa	4.600	460	10.0
Total Región PATAGÓNICA	125.070	45.089	36.0
<i>Córdoba</i>	102.000	17.710	17.3
<i>Santa Fe</i>	62.508	6.000	9.5
<i>Corrientes</i>	78.500	7.850	10.0
<i>Entre Ríos</i>	69.000	10.350	15.0
<i>Buenos Aires</i>	317.720	128.560	40.4
Total Región Pampeana +NEA	629.723	170.470	27.0
TOTAL PAÍS	1.749.524,3	412.338	23.5

VI. CONCLUSIONES

Existen dos procesos de afectación por sales y/o sodio resultantes de la aplicación de agua de riego en la Argentina: el que se verifica en las regiones áridas y semiáridas del país coincidente con la isohieta de hasta 700 mm y estrechamente vinculado a láminas importantes de irrigación, elevación del plano freático, traslado de las sales disueltas hacia el perfil del suelo y deposición de las mismas en superficie y aquel proceso relacionado fuertemente con el riego complementario presurizado con agua bicarbonatada sódica en la Región Pampeana cuyo efecto inmediato es el deterioro de la matriz del suelo por dispersión, disminución de la infiltración, intercambio gaseoso en el perfil y generando consecuentemente toxicidad en los cultivos. Este proceso se localiza en usualmente por encima de los 700 mm de precipitación media anual.

Las regiones bajo condiciones de riego que presentaron mayor nivel de afectación, particularmente por sales, estuvieron relacionadas estrechamente con la presencia de un plano freático elevado y fluctuante en lo estacional más que a la calidad del agua aplicada, generando un coeficiente más elevado de vulnerabilidad. Tal es el caso de las provincias de Chubut, San Juan y en menor medida Santiago del Estero. Los elevados índices de afectación en Buenos Aires (40.4%) están vinculados no a la presencia cercana del plano freático sino a la aplicación del agua con alta concentración de bicarbonato y sodio, lo cual genera algún grado de deterioro en el suelo como aterronamiento excesivo, dificultad en las labores y pérdida de la capacidad de emergencia en los cultivos entre otros. Esto se hace más notorio en los suelos de constitución argílica de la Región Pampeana y en particular en los vertisoles de la provincia de Entre Ríos.

En el presente estudio que fue realizado sobre una superficie total efectivamente regada de 1.749.524,3 ha, lo cual representa un 83.3% del total nacional bajo riego, existen 412.338 ha afectadas como consecuencia de ambos procesos mencionados. Esto significa que un 23.5% de los suelos regados correspondientes a las áreas estudiadas poseen algún nivel de afectación en categorías de leve,

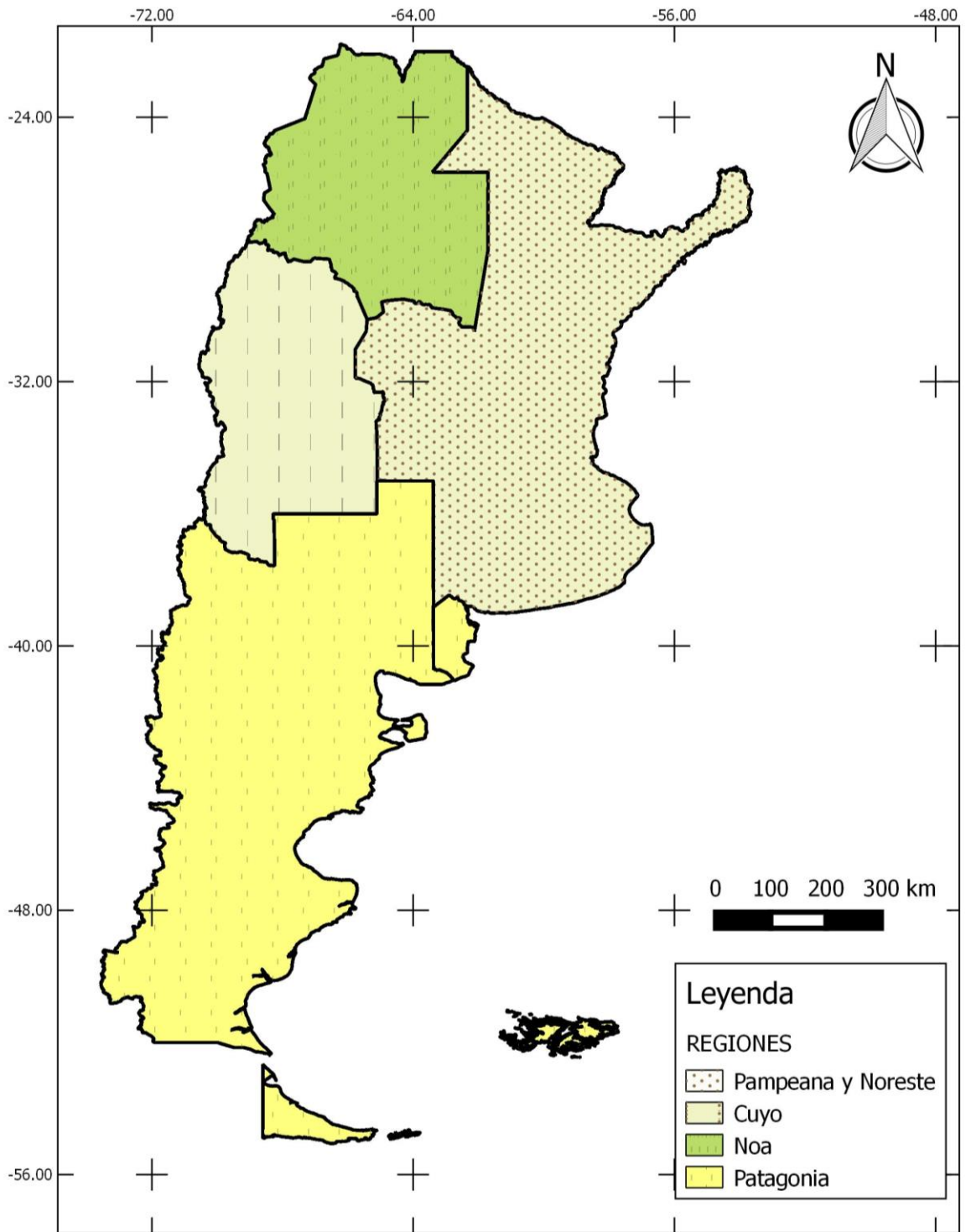
moderada o grave. Es de suponer que dicha proporcionalidad al menos se sostiene para las 2.08 millones de hectáreas.

Analizando las cuatro regiones estudiadas, la Patagónica resultó proporcionalmente más afectada (36%) en promedio, sin duda debido a los elevados índices que presenta Chubut, producto del deficiente manejo del riego, la elevación del plano freático y sobre todo por la presencia de suelos de naturaleza argílica que dificultan un drenaje adecuado.

De las 412.338 ha que muestran niveles efectivos de afectación, ya sea por sales, sodio o ambos, 170.470 ha corresponden a la Región Pampeana y NEA y el resto, 241.868 ha a las áreas bajo riego de regiones áridas o semiáridas. Es decir que el 41.3% de la superficie afectada está vinculada preferentemente a procesos de sodificación y el 58.7% a los procesos puros de salinización o sinérgicos de salinización y sodificación.

El drenaje, en sus versiones a cielo abierto y entubado, la adecuación del tiempo de avance del riego gravitacional, las enmiendas y el ajuste de láminas en el riego presurizado aparecen como las herramientas a utilizar para la recuperación de al menos un 20% de la superficie comprometida que se estima se encuentra en condiciones de reversibilidad inmediata.

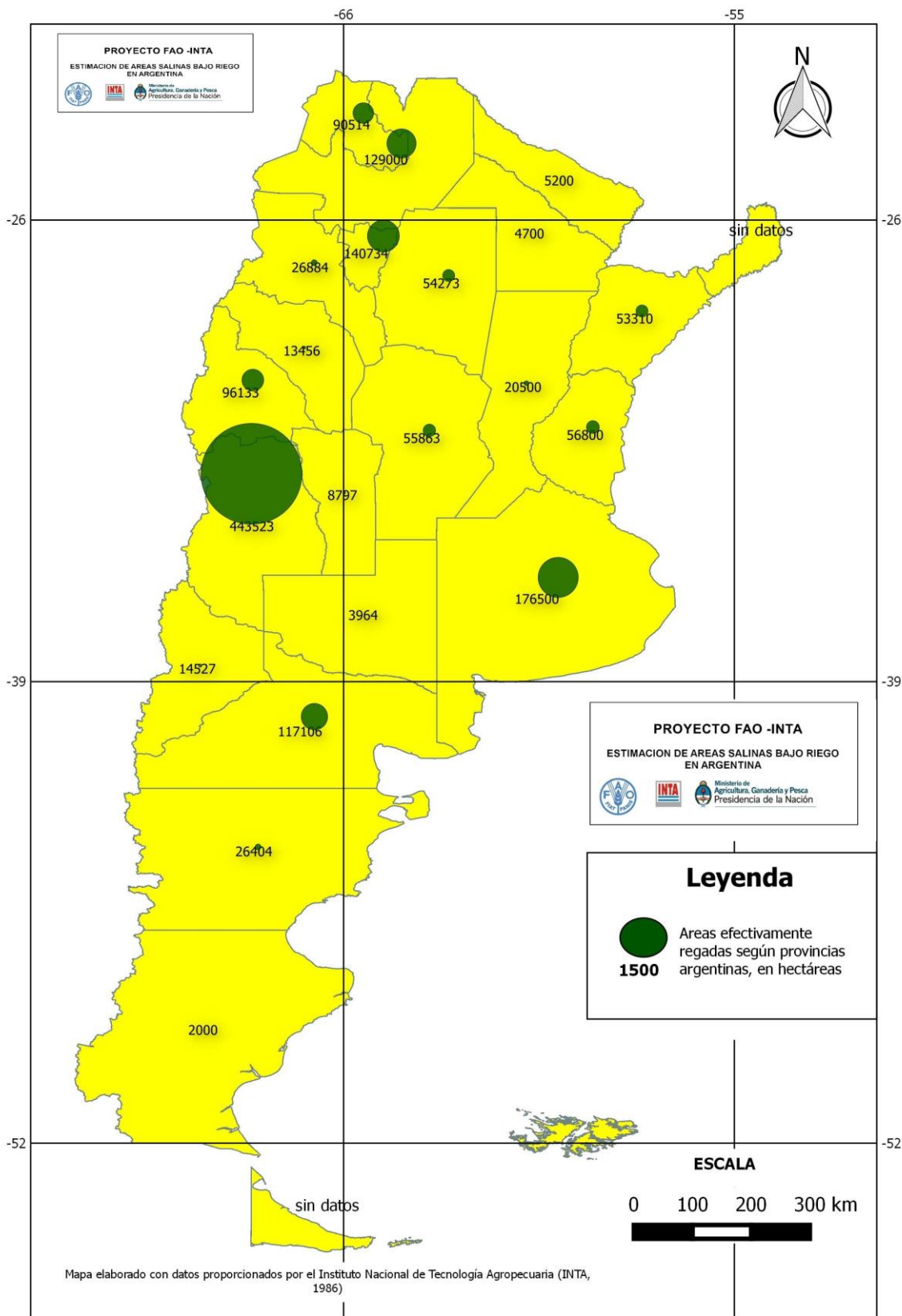
MAPAS E IMÁGENES



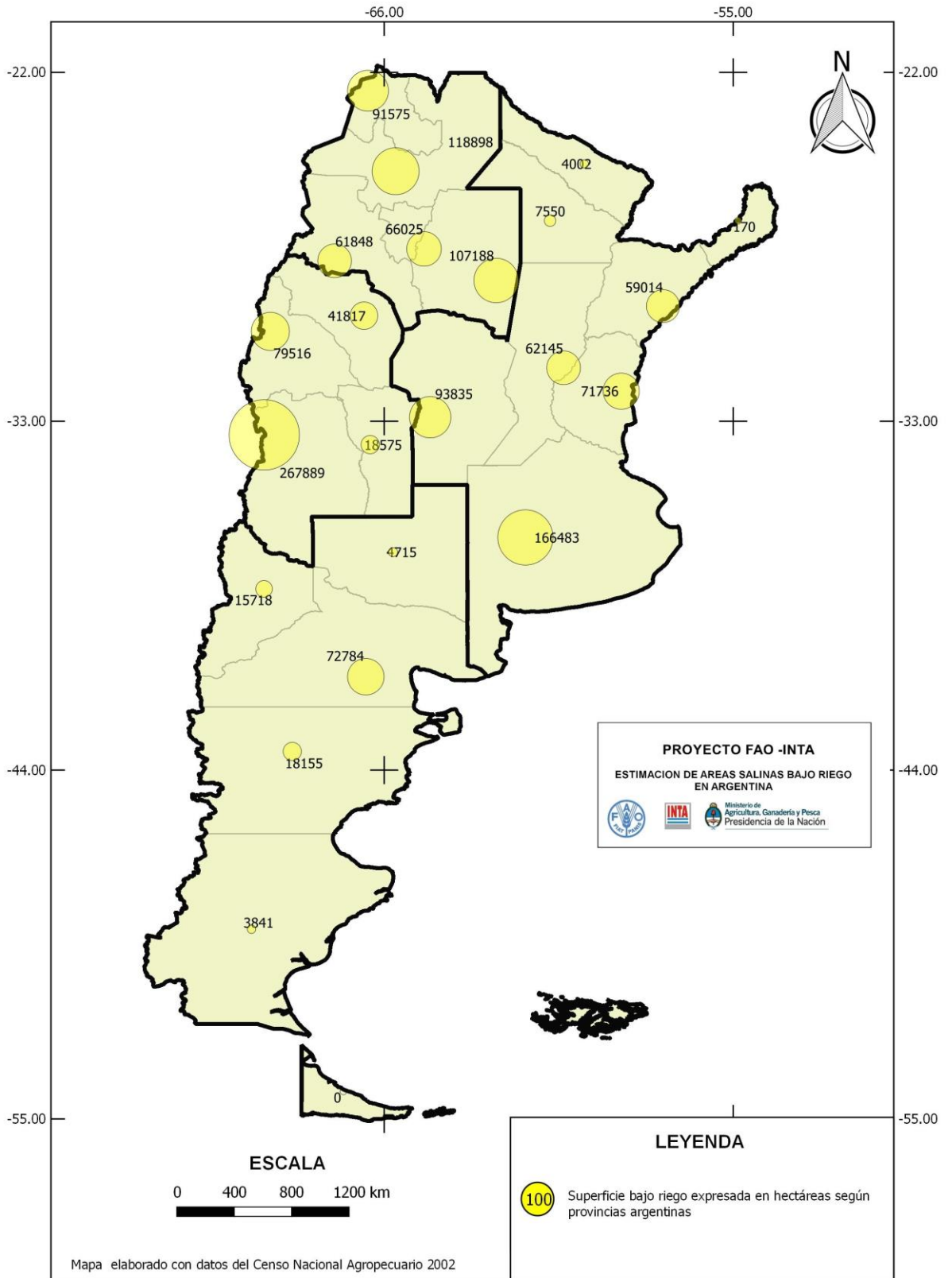


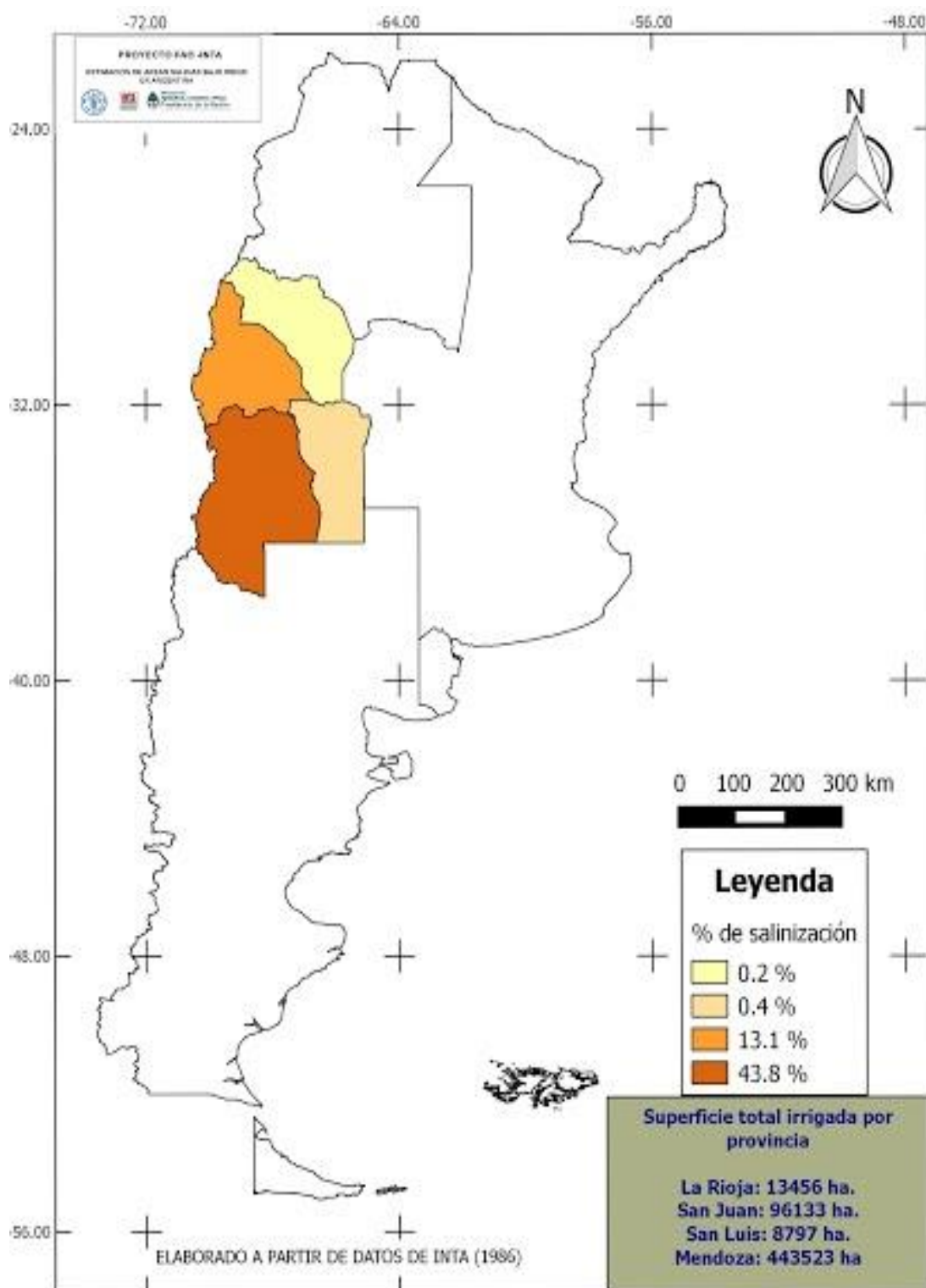


PROYECTO FAO-INTA
 "Estimación de áreas salinas bajo riego en Argentina"

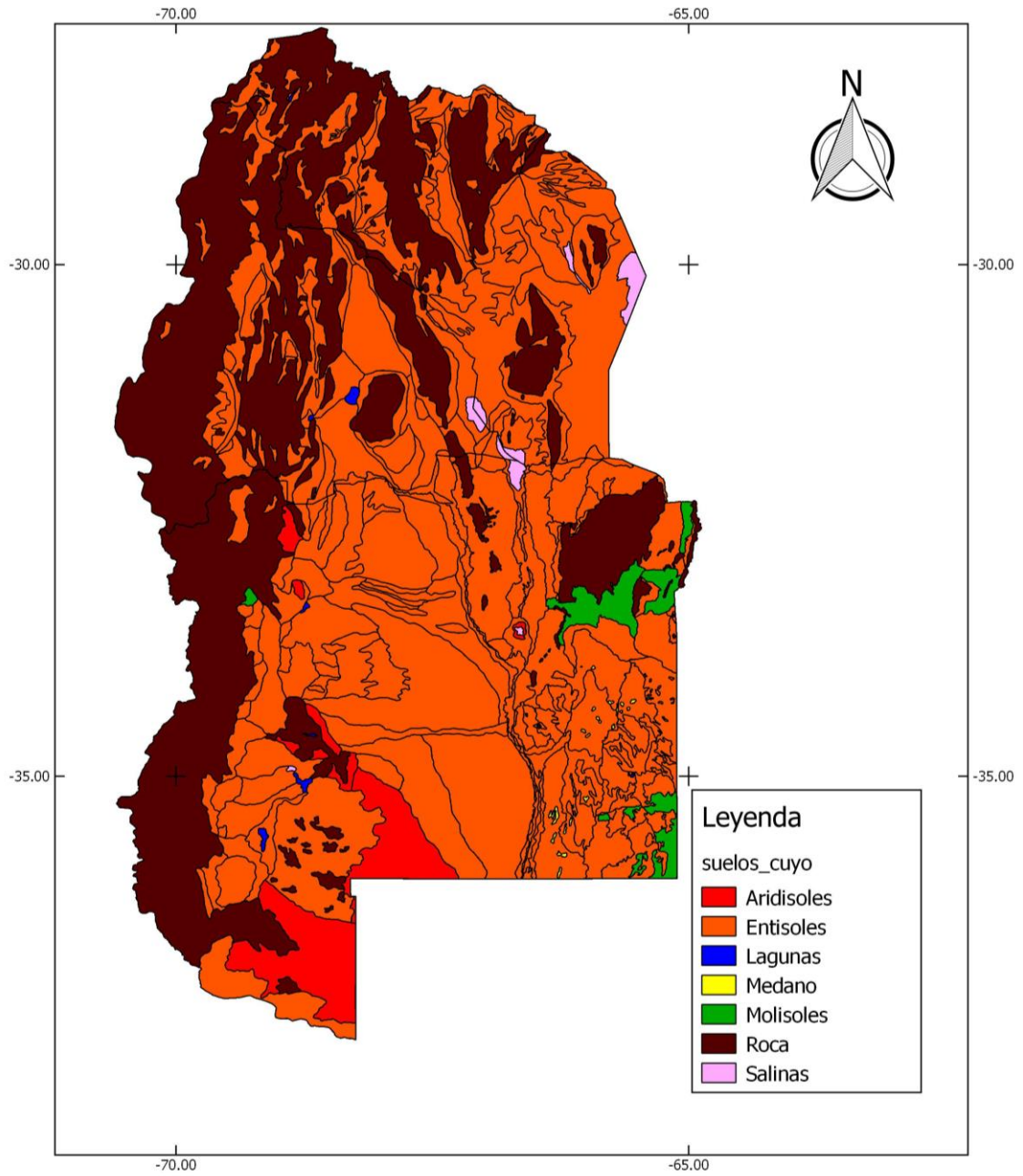


BORRADOR

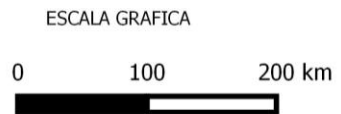




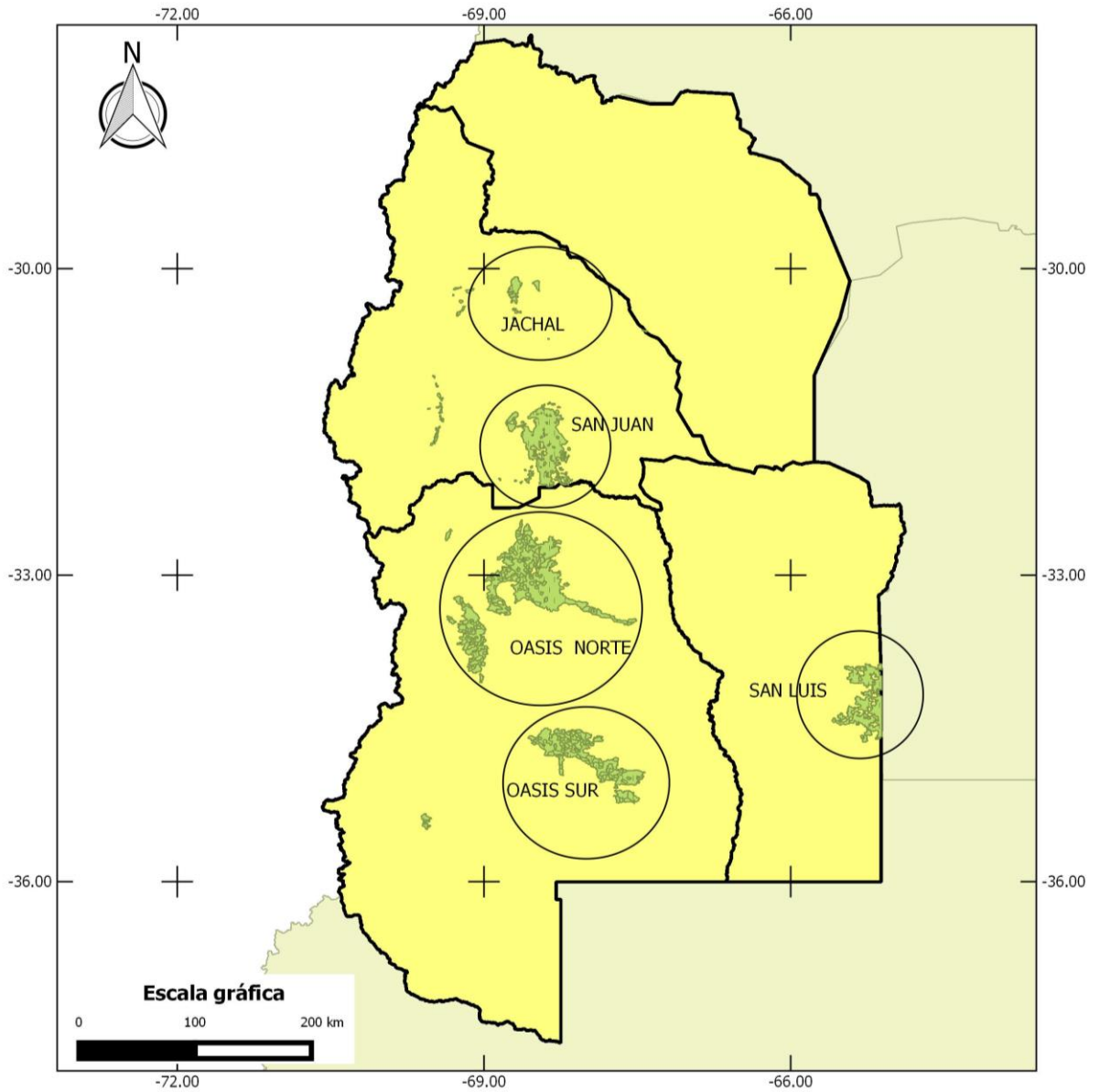
Distribución de suelos, región de Cuyo. Escala: 1:500.000



<p>Proyecto FAO- INTA "Estimación de las áreas salinas bajo riego en Argentina"</p>			<p>EEA INTA Hilario Ascasubi Lab. de Teledetección y SIG Octubre 2014</p>

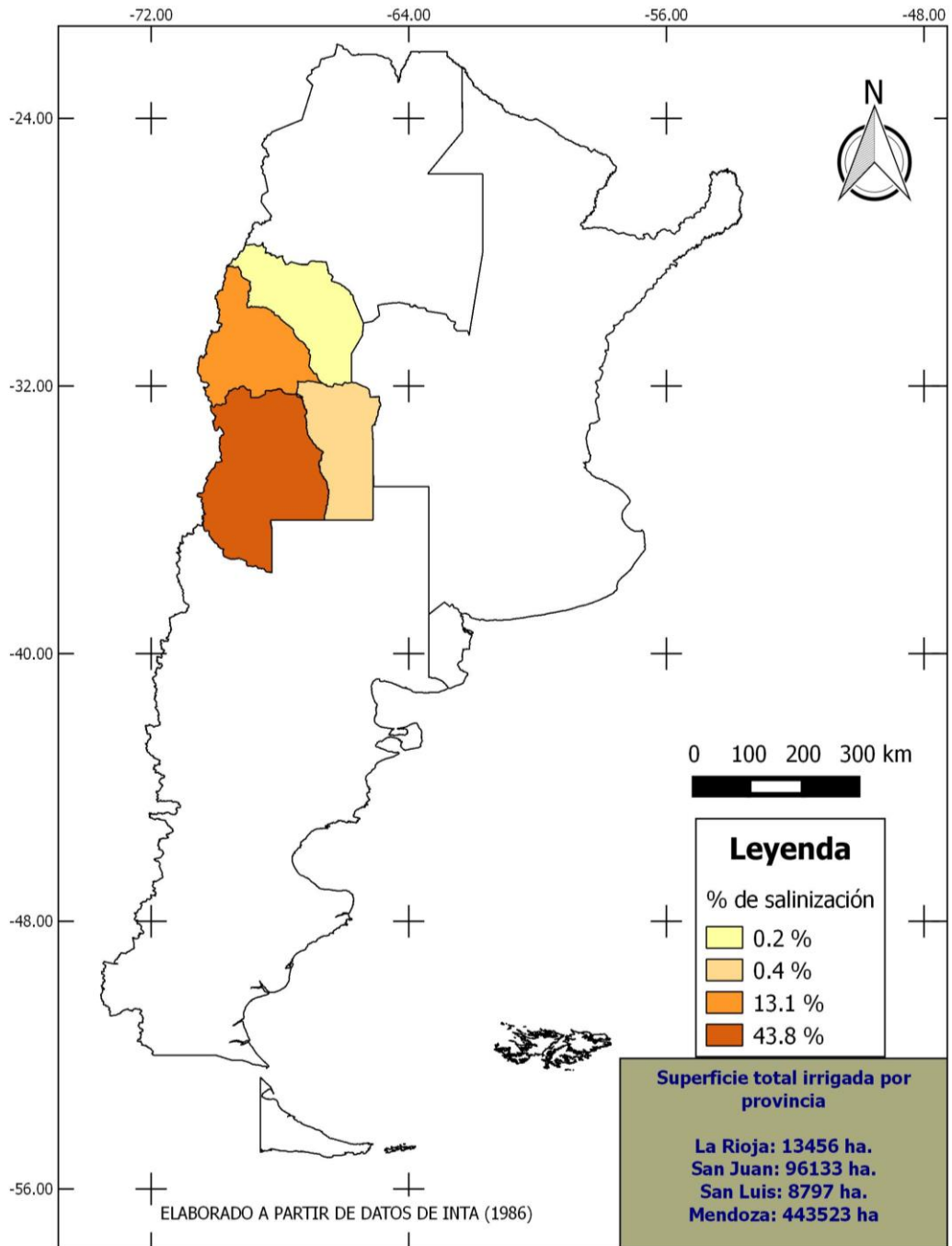


Oasis de riego en Cuyo



PROYECTO FAO -INTA
ESTIMACION DE AREAS SALINAS BAJO RIEGO EN ARGENTINA

LEYENDA
Oasis de riego

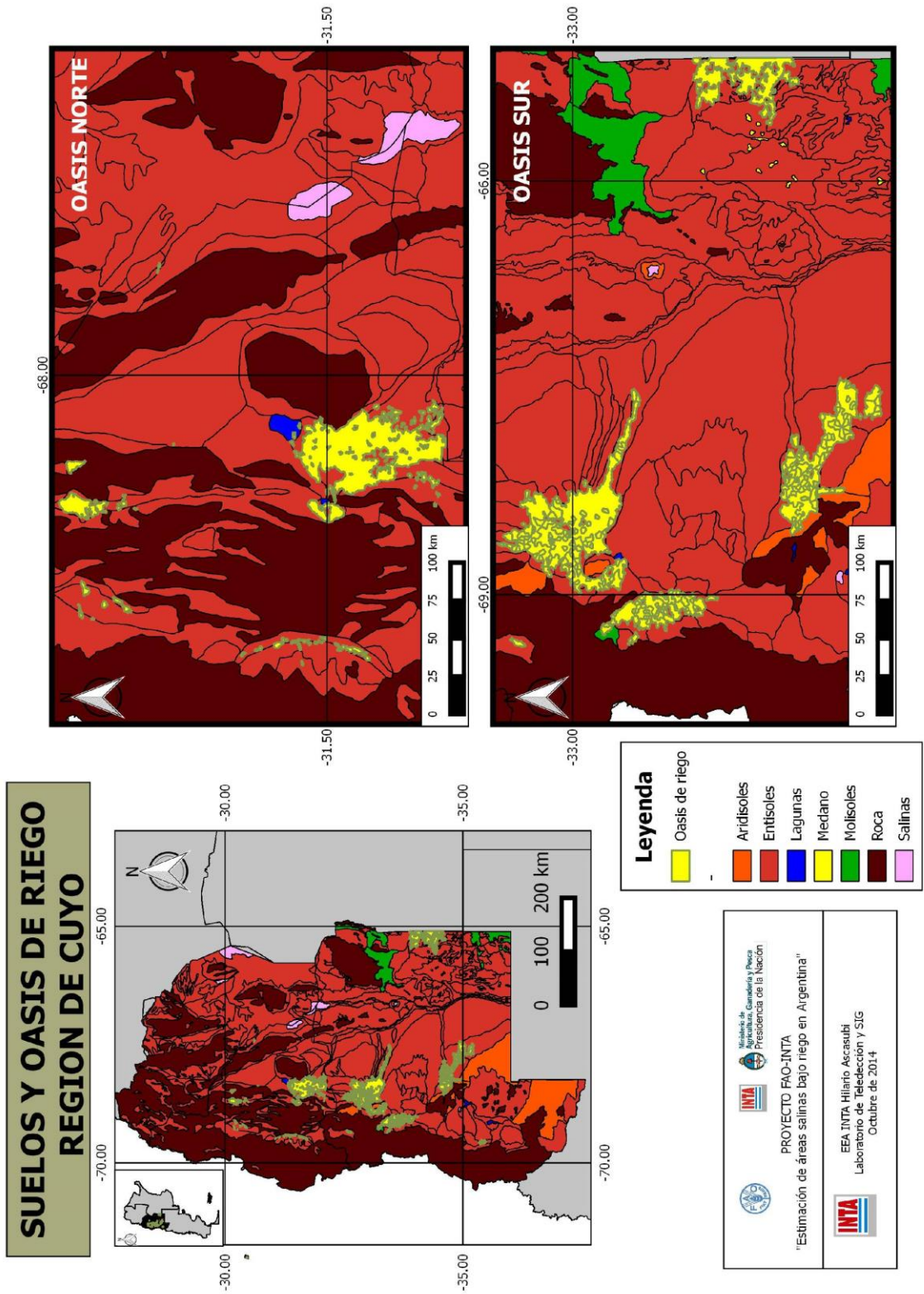




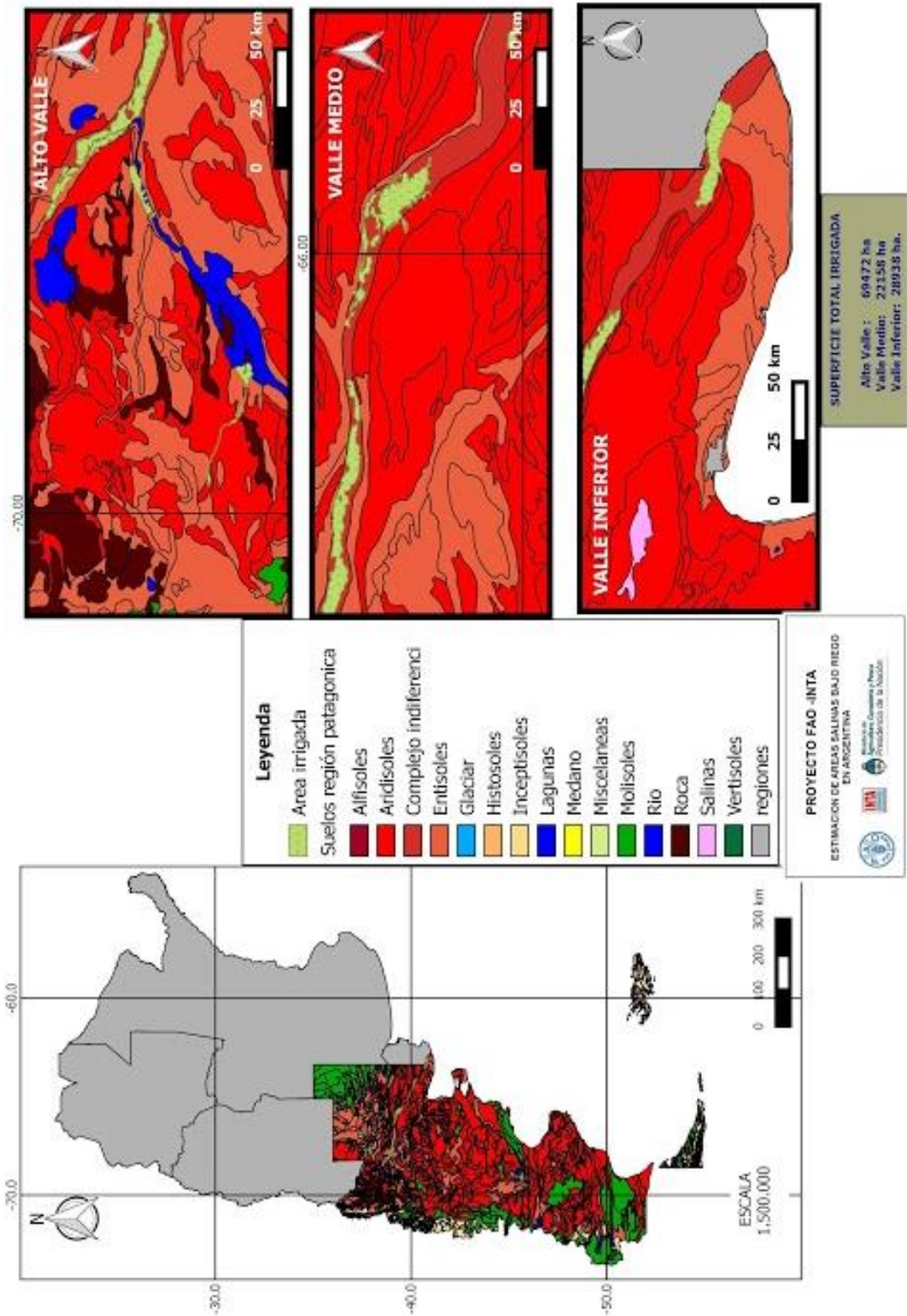


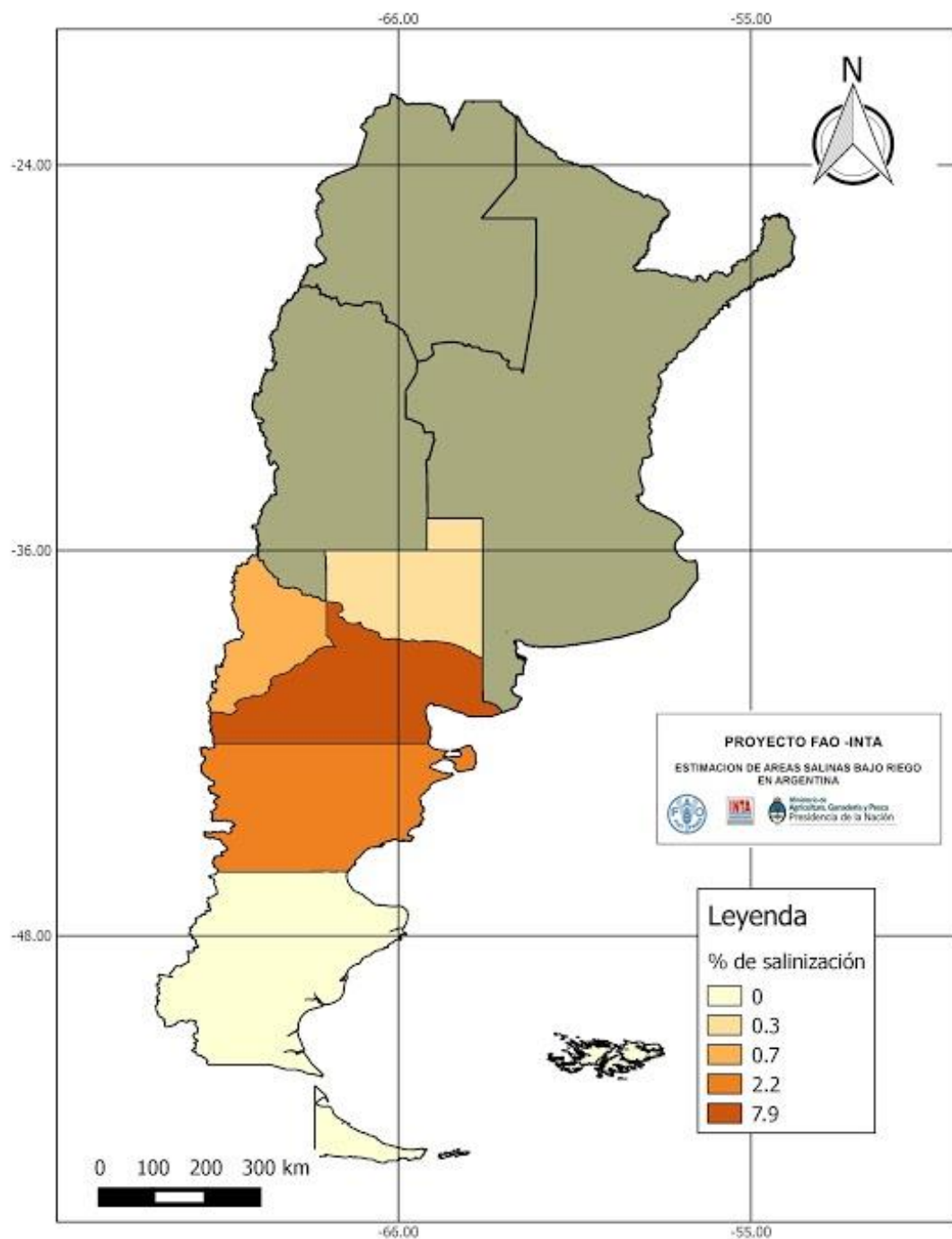
PROYECTO FAO-INTA
 "Estimación de áreas salinas bajo riego en Argentina"

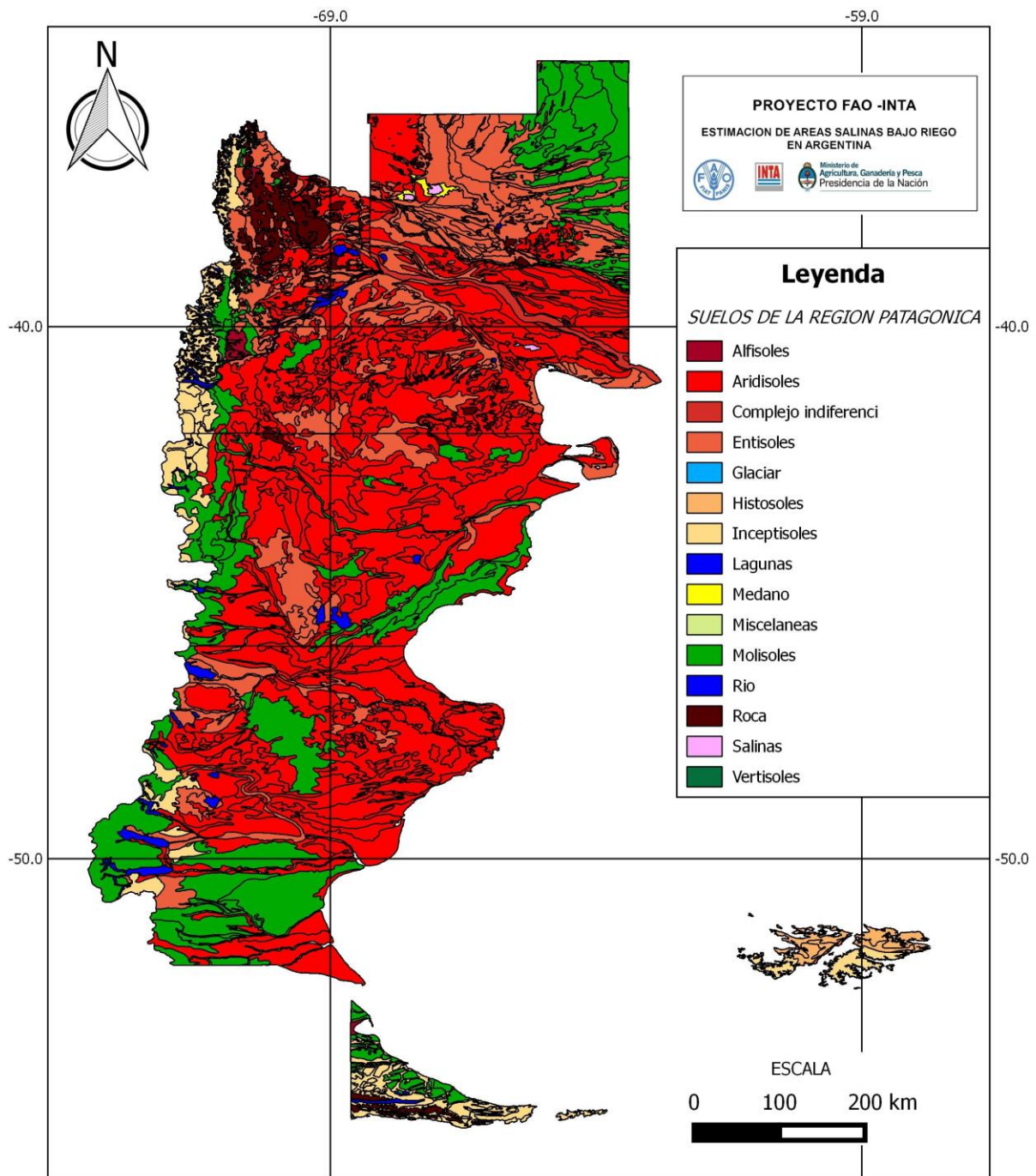
Distribución de suelos y oasis de riego en la región de Cuyo

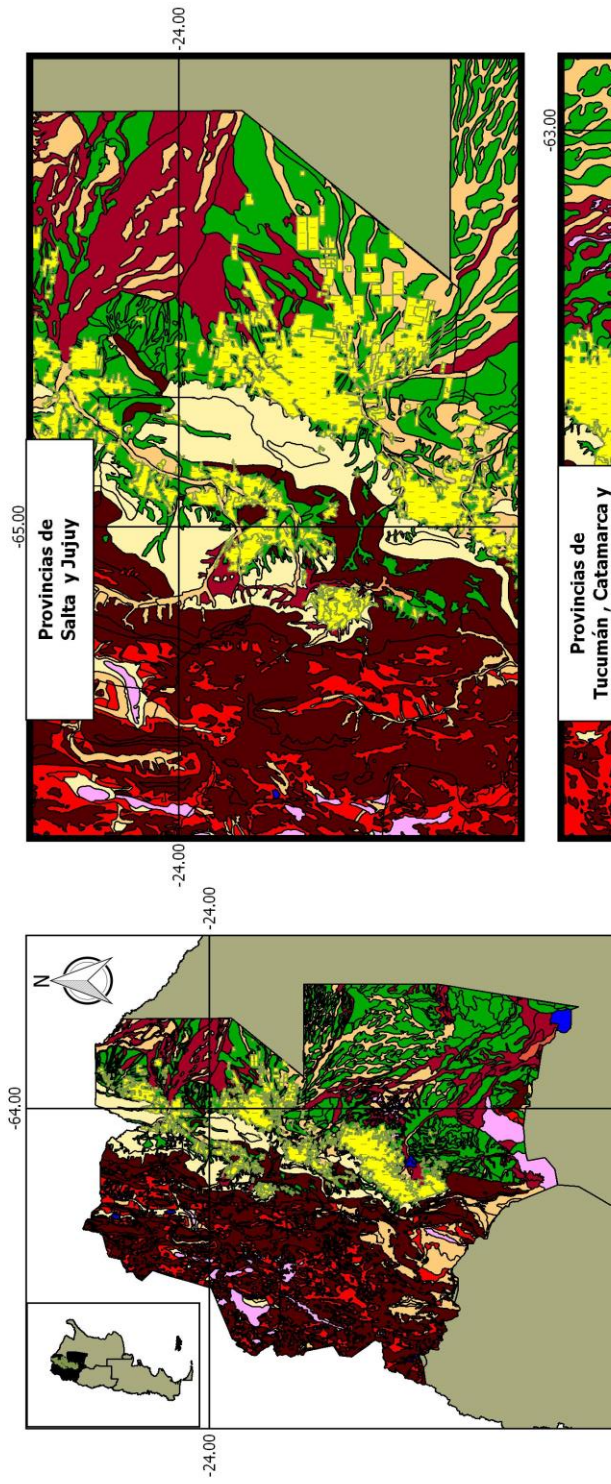


Tipos de suelos y áreas irrigadas en la región Patagónica









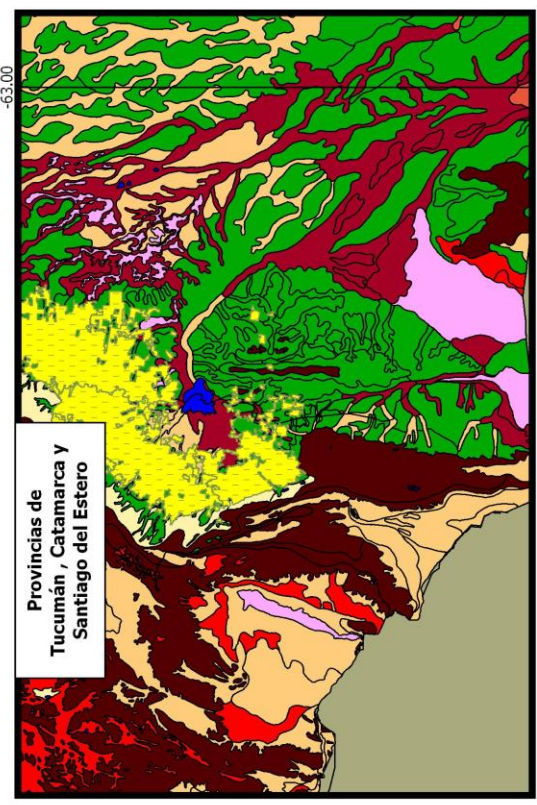
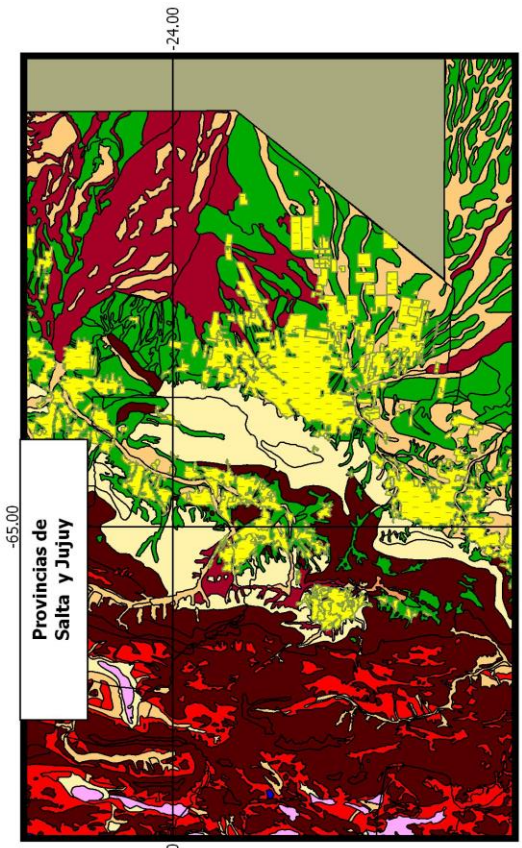
- Leyenda**
- Región Noroeste
 - Alfisoles
 - Aridisoles
 - Complejo indiferenci
 - Dique
 - Entisoles
 - Inceptisoles
 - Lagunas
 - Miscelaneas
 - Molisoles
 - Roca
 - Salinas
 - Areas irrigadas



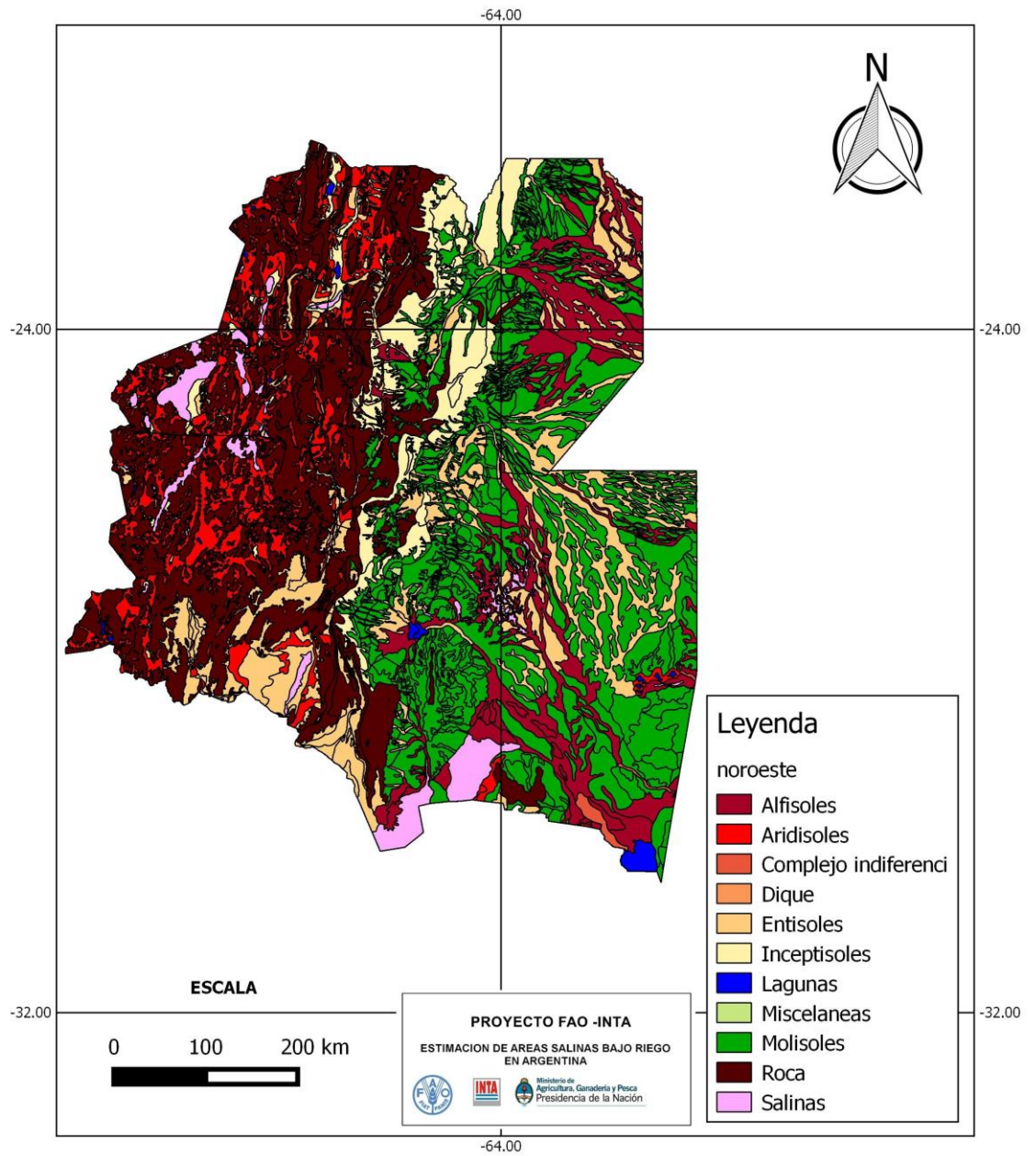
PROYECTO FAO -INTA

ESTIMACION DE AREAS SALINAS BAJO RIEGO EN ARGENTINA

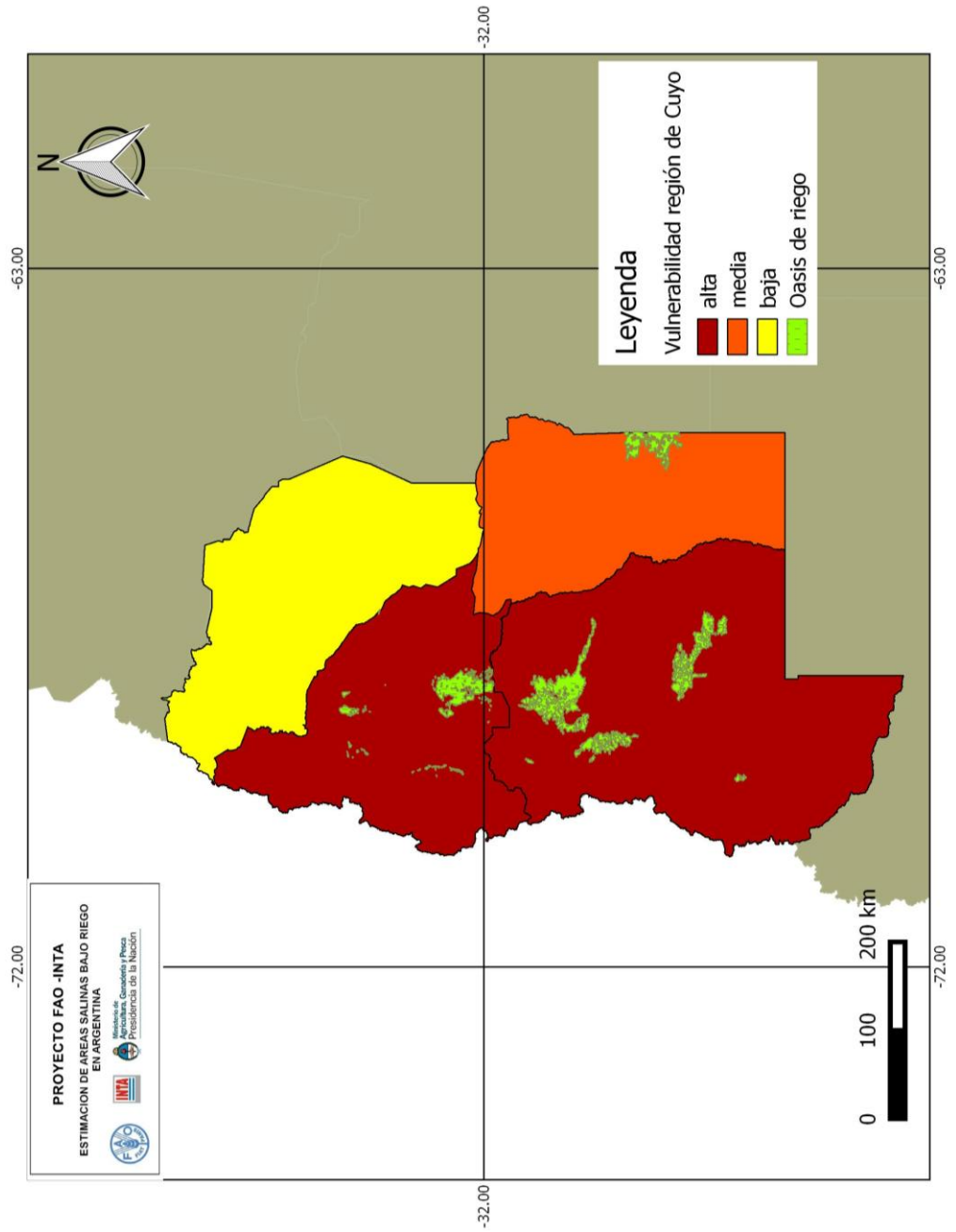
Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca
Presidencia de la Nación



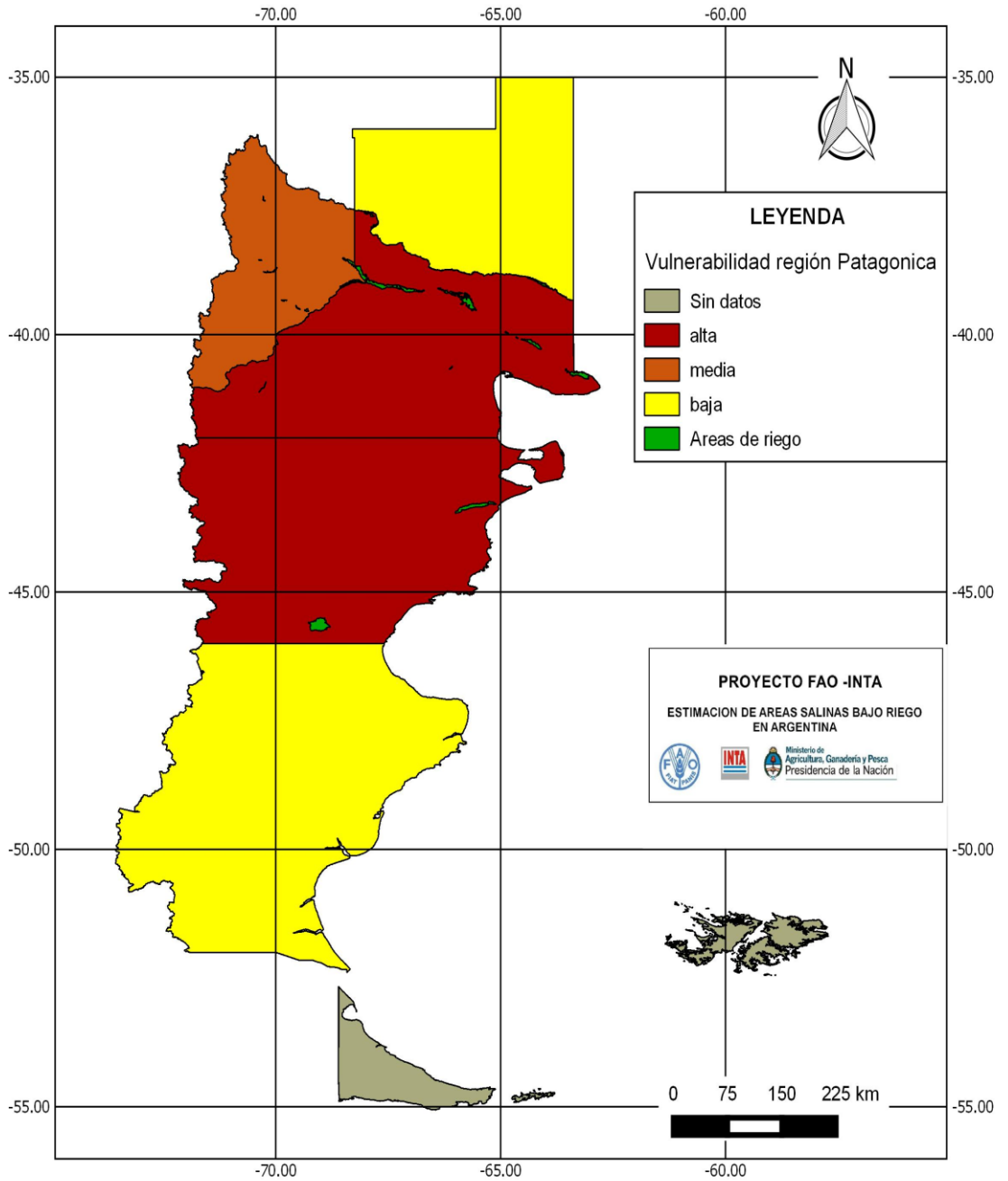
NOA-Suelos



Mapa de vulnerabilidad de Cuyo



Mapa de vulnerabilidad de la Patagonia



BIBLIOGRAFÍA

Abraham M. A. 2007. Riego en Argentina. 2ª aproximación. Distribución del área regada a escala provincial y regional. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. Dirección de Agricultura. 12 pp.

Aquastat. 2014. Global water information system. FAO. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>

Alvarez R; Rossel R. & B. Bestvater. 1964. Niveles de boro en los valles de los ríos Colorado y Negro. Instituto de Edafología e Hidrología N°6. UNS. 20pp.

Andriulo A.; Galetto M.L.; Ferreyra C.; Cordone G.; Sasal C.; Abrego F.; Galina J. & F. Rimatori. 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades del suelo, I. propiedades fisicoquímicas. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Villa Carlos Paz 247-258.

Aparicio V; Barbacone A & Costa J.L. 2014. Efecto de la calidad del agua de riego complementario sobre algunas propiedades químicas edáficas. Ciencia del Suelo Vol. 32 (1). ISSN 0326-3169 pág. 95-104

Ayers R.S. & D.W. Wescot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. FAO Estudio Riego y Drenaje. N°29 Rev.1, Roma, 174.

Bliss R.D.; Platt Aloia K. & W. Thomson. 1984. Effects of salt an cell membranes of germinating seeds. California Agriculture. October 1984. 47 pp.

Boscá M. 2007. Estrategias para luchar contra la salinización en el sistema de riego de Santiago del Estero, Argentina. Universidad Politécnica de Valencia.

Chambouleyron J.L. 1983. El riego en Argentina, actualidad y perspectivas. Área de Riego y drenaje – Instituto Nacional de Ciencia y técnica Hídricas. CRA, Mendoza. 24 pp.

Chambouleyron J.L. 1975. Clasificación utilitaria con fines de riego de los suelos agrícolas del área media del río Tunuyán INCyTH-INTA DGI-CRAS. Mendoza, Argentina.

CNA. 2002. Censo Nacional Agropecuario. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca de la Nación.

D'angelo F. 2014. Datos Prov. de Salta. Comunicación personal.

De Paoli H. 2014. EEA INTA Cerrillos. Comunicación personal.

Demin P. 2012. Caracterización de la calidad del agua en la cuenca superior del río Del Valle. Revista de UNC. EEA INTA Catamarca.

FAO. 2002. Agricultural drainage water management in arid and semiarid areas. FAO Irrigation and Drainage paper N° 61. Roma. 188 pp.

Fiorentino R. 1999. Diagnóstico general de las áreas de riego de las provincias. D. 4150 AR/BIRF. 38 pp.

Génova, L. 2006. Salinidad y sodicidad de suelos regados complementariamente en la región pampeana. UNLP III Jornada de Riego y Fertirriego, Mendoza 13pp.

Guyot, E. 2014. EEA INTA Faimallá. Comunicación personal.

INTA. 1986. Documento básico para programa de riego y drenaje. Disposición D.N. N° 314/85 94 pp.

Lavado R. 2009. Salinización y sodificación de suelos de producción agrícola extensiva por riego complementario. En: Alteraciones de la fertilidad de los suelos. Taboada M.A & Lavado R.S. (editores) Editorial FAUBA. 163pp.

Laya H. 1982. Formulación de un plan integral de manejo hídrico para el valle inferior del río Chubut. Evolución de la salinidad de los suelos 1961-1981. CFI. Provincia de Chubut convenio VIRCH.

Ledesma Saai. 2004. Recuperación y Conservación de suelos mediante el drenaje subterráneo. Casos de ecoeficiencia. 11pp.

Ledesma F. 2014. EEA INTA Salta. Comunicación personal.

Liotta M. 2001. Lineamientos para drenaje y manejo de salinidad para recuperación de tierras regadas en zonas áridas. Estación Experimental INTA San Juan.

Liotta M. 2015. Comunicación personal. INTA San Juan.

Mc Intyre D.S. 1979. Exchangeable sodium, subplasticity and hydraulic conductivity. Australian Journal Soil Res. 17: 115-120.

Mercau R. 2013. Cultivos bajo riego en Argentina. FAO (UTF 017), Mendoza.

Miguel R. 2014. Comunicación personal. EEA Chilecito, La Rioja.

Mirábile C. 1985. Estudio zonal del río Tunuyán medio. Incyth- CRA. XIII Congreso Nacional del Agua.

Morabito J. 1997. El riego en el mundo, Argentina y Mendoza. INA-CRA, Mendoza.

Morabito J.; Mirábile C; Manzanera M.; Cappe O. ; Tozzi D. & L. Mastarntonio. 2007. Evolución de la salinidad de suelos regadíos e incultos en el área del río Mendoza. INA (Instituto Nacional del Agua) y UNC (Universidad Nacional de Cuyo). 19pp.

Morabito, J; Mirábile, C; Pizzuolo, P; Tozzi, D; Manzanera, M. y L. Mastrantonio. 2004. Salinidad de suelos regadíos e incultos en el oasis norte de Mendoza, Argentina. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná E. Ríos y UNC 10pp.

VIII – Taller Estudio de potencial de ampliación de riego en Argentina. 2014. FAO-PROSAP, Bs. As. <http://www.fao.org/americas/eventos/ver/es/c/240454/>

Pearson G.A. 1960. Tolerance of Crops to exchangeable sodium. Agriculture Information Bulletin N° 216. Agricultural Research Service. USA. 4 PP.

Peinemann N. 1998. Suelos salinos y sódicos: Notas para el curso. Dpto. Agronomía. UNS. 258 pp.

Peinemann, N; Díaz Zorita, M.; Villamil, M.B.; Lusarreta, H. & D. Grunewald. 1998 .Consecuencia del riego complementario sobre propiedades edáficas en la llanura pampeana. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Villa Carlos Paz. Mayo: 7-8.

Pereira R. 2010. Comportamiento del nivel freático en el tercio inferior del área bajo riego del río Atuel. General Alvear. Mendoza. Tesis de Maestría. 56 pp. y 16 anexos. Cuenca del Atuel. Mendoza. Argentina. Dpto Gral. de Irrigación. General Alvear. Mendoza.

Piccolo A; Giorgetti M & D. Chavez. 2008. Zonas agroeconómicas homogéneas Salta-Jujuy. INTA ISSN_1851-6955 N°7.

Prieto D. 2014. Comunicación personal.

Programa Nacional Agua-INTA. 2014. XXIV-Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mesa Redonda Riego. Bahía Blanca 5-9 Mayo.

Puchulu. M.E. 2008. Salinización de los suelos. Su incidencia en la provincia de Tucumán y en la República Argentina. Acta geológica lilloana 21 (1) Suplemento 81-94 2008

Rhoades J.D. 1972. Quality of water for irrigation. Soil Sci. 113:277-284

Richards L. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. USDA. Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos. Agric. Handbook N°60, 172pp.

Rolston D.E; J.W Biggar and D.R. Nielsen. 1984. Effect of salt on Soils. California Agriculture Volume 38. Number 10. 47 pp.

Salinas A 2014; Andriani J. 2014; Costa J. 2014; Lopresti M. 2014; Paoloni P. 2014; Andriulo A. 2014. INTA Comunicación personal.

Sánchez A. 2015. Comunicación personal. Dirección de la producción. Provincia de Jujuy.

Sánchez R.M. & N.Kugler. 1979. Riego con sifones y acequias revestidas. Folleto informativo IPESA-POLISUR 4 pp.

Schilardi ,C.; Morabito, J & R.C. Vallone. 2009. Surface irrigation performed in the upper Tunuyán River Basin. Mendoza. Argentina. Prog. Sixth on Irrigation of Hort Crops. Acta Hort. 889. ISHS 2011. Pág. 513-520; 7 pp.

Seminario Nacional 1994. Situación actual y perspectivas de las áreas regadas en Argentina. INCYTH/CRA - Gob. Provincia de Tucumán – INTA .Tucumán. 262 pp.

Siebert S., Hoogeveen J. & K. Frenken 2006. Irrigation in Africa, Europe and Latin America. Frankfurt Hydrology paper N 5. Physical Geography, University of Frankfurt. Rome, Italy.

Soil Survey Staff. 2010. Soil taxonomy. 11 th edition. U.S.D.A.

Sosa O; Currie H.; Bartra Vázquez L. & L. Casares. 2009 Diagnóstico físico-químico de la calidad del agua de riego en el chaco húmedo. Agrotecnia 19 . UNNE 14-18pp.

Torres Duggan M.; Alvarez C.; Taboada M.; Celesti T.; Vignarolli F. y D. D'Ambrosio. 2012. Riego Complementario en un Argiudol típico de la pampa ondulada argentina, bajo siembra directa: Efectos sobre algunas propiedades químicas y físicas del suelo. C. del Suelo Vol. 30 (2): 201-207pp.

Valenti R.; Cerana J; & M. Wilson. 2007. Calidad de agua para riego en el área arrocera. INTA-UNER.

Walker F.; Duarte O; Valenti R. & M. Wilson. Aptitud del agua de los principales cursos interiores de Entre Ríos para su utilización en riego. UNER

Zalba P. 2014. Comunicación personal. Universidad Nacional del Sur, Departamento de Agronomía.

La presente obra realizada en convenio entre INTA y FAO muestra la superficie actual bajo riego en Argentina por diferentes metodologías de aplicación, así como el grado de afectación de los suelos regados por sales y sodio. Incluye no solo la información de las regiones áridas y semiáridas sino también la correspondiente a la Pampa Húmeda donde el riego ha manifestado su mayor expansión. Este trabajo representa a su vez una actualización de aquel realizado por el INTA aproximadamente 30 años atrás con similar metodología para permitir la validación comparativa, aunque con recursos tecnológicos actuales.



ISBN 978-987-521-717-1



Ministerio de Agroindustria
Presidencia de la Nación