

EL PROBLEMA DE SALINIDAD EN LOS RECURSOS SUELO Y AGUA QUE AFECTAN EL RIEGO Y CULTIVOS EN LOS VALLES DE LLUTA Y AZAPA EN EL NORTE DE CHILE¹

THE SALINITY PROBLEM OF THE WATER AND SOIL RESOURCES IN LLUTA AND AZAPA VALLEYS IN NORTHERN CHILE

Amador Torres H²; Edmundo Acevedo H.³

RESUMEN

La salinidad del agua de riego está íntimamente relacionada con la salinidad de los suelos de los valles de Lluta y Azapa, afectando los cultivos que en ellos se realizan. Para el caso del valle de Lluta la salinidad de los suelos se hace manifiesta, agravándose en el sector bajo del valle que tiene problemas de drenaje. En Azapa, la salinidad del agua de riego es inferior a la de Lluta, pudiéndose cultivar una mayor variedad de cultivos con rendimientos muy superiores a los del valle de Lluta.

La agricultura del Norte requiere que el problema de salinidad sea conocido y resuelto. En este trabajo se presentan antecedentes de la agricultura, los suelos y el agua de riego de los valles de Lluta y Azapa.

Palabras clave: Valle de Lluta, salinidad, boro.

ABSTRACT

The salinity of irrigation water is closely related with the salinity of soils. Consequently it has an influence on the cultivable land and stability of crops and yields in the coastal valleys in northern Chile.

The salinity conditions are increasing, causing a marked salt accumulation effect in the lower part of the valley conversely, the lower salinity contents in irrigation water in Azapa valley, allows a large range of crops with high yields in contrast to Lluta valley.

This problematical situation, without any doubt, will have far-reaching effects in the development of agriculture in north of Chile. The objective of the research will focus in the characterization of these elements.

Key words: Lluta valley, salinity, boron.

INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola en la Región de Arica y Parinacota se desarrolla en pequeñas quebradas y valles costeros; entre los últimos se destaca la actividad agrícola en los valles de Lluta y Azapa. Estos valles tienen condiciones climáticas similares, pero niveles de producción y diversidad de cultivos muy diferentes. En ambos valles se dispone de agua superficial durante todo el año. El agua del río Lluta tiene alta salinidad, con conductividad eléctrica sobre 2 dS/m y concentración de boro superior a 11 ppm, situación motivada por los afluentes que

tiene en su curso superior, que aportan alta salinidad y concentraciones de elementos químicos en niveles tóxicos para las plantas. El valle de Azapa tiene agua de mejor calidad, pero también con conductividad eléctrica alta: > 1 dS/m. El boro, sin embargo, se encuentra en concentración inferior a 1 ppm. La salinidad del agua de riego determina la salinidad de los suelos de estos valles, afectando a los cultivos que en ellos se realizan. La salinidad de los suelos del valle de Lluta es manifiesta (IREN-CORFO, 1976; Espina, L., 1971; Osorio, A., 1982), agravándose en el sector bajo del valle, afectado por problemas de drenaje. En

¹ Proyecto Centro de Investigaciones del Hombre en el Desierto CIHDE.

² Depto. Recursos Ambientales, Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Tarapacá. E-mail: atorres@uta.cl

³ Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile.

Azapa, los suelos tienen algún grado de salinidad, existiendo sectores con presencia de costras salinas en superficie (Coserren, 1980; Osorio *et al.*, 1987; Torres, A., 1999). En ambos valles se desconoce en qué magnitud el tenor salino está afectando el rendimiento de los cultivos. Por otra parte, dada la disponibilidad de agua y la metodología de riego utilizada en la zona, es predecible un incremento de la salinidad de los suelos, aumentando la limitación al rendimiento en algunos cultivos. Particularmente grave es la situación del valle del río Lluta, donde la existencia de un nivel freático a poca profundidad genera niveles salinos muy altos cercanos a la superficie del suelo, limitando seriamente la agricultura a aquellos cultivos que pueden soportar tales condiciones, pero con disminución de su potencial productivo.

El trabajo reúne antecedentes de los recursos suelo y agua de los valles de Azapa y Lluta, sobre los cuales se proponen soluciones técnicas a las dificultades agronómicas relacionadas a salinidad que limitan la producción agrícola en el valle de Lluta.

VALLE DE AZAPA

ANTECEDENTES GENERALES

La cuenca del río San José se ubica a 18° 35' de Latitud Sur, entre los meridianos 69° 30' y 60° 20' de Longitud Oeste, y pertenece a la Provincia de Arica, I Región de Tarapacá. Tiene clima desértico, con temperaturas mensuales máximas de 25 °C y mínimas de 14 °C. La humedad relativa es homogénea, de 60 a 80%.

El sistema hidrográfico natural de la cuenca se compone de los ríos Seco, Laco y Tignamar, que corresponden a los principales tributarios en cabecera. El río San José nace a partir de la confluencia de los ríos Seco y Tignamar en la sección media de la cuenca; presentaba antes de la entrada en operación del canal Azapa escorrentía en forma ocasional. El primer afluente (río Seco) nace bajo la cota de 3.500 msnm. donde las precipitaciones son aún escasas. En cambio, el río Tignamar nace sobre los 4.500 msnm. y recibe los aportes de varias quebradas con flujo superficial continuo y corrientes subterráneas que afloran en vertientes a lo largo de sus cauces. La precipitación se concentra entre diciembre y marzo, se caracteriza por ser de gran intensidad y corta duración, originando un

aumento de los caudales que provocan un régimen de escurrimiento con características de avenida (Klohn, W., 1972).

Los sedimentos aluviales nacientes que conforman el lecho del valle de Azapa tienen mayor potencialidad como fuente de agua subterránea, se ubican entre los 0 a 70 m de profundidad, dando lugar a napas libres y algunas semiconfinadas (Karsulovic, J., 1968; Jorquera, L., 1971; Edwards *et al.*, 1981).

SUELOS

Antecedentes

Los suelos del valle tienen una estratificación marcada producto de los procesos depositacionales (IREN-CORFO, 1976). En la parte baja del valle hay estratos gruesos con poca fluctuación de textura que representan el 24,0% de la superficie agrícola. En la parte media a baja del valle se presentan suelos aluviales profundos que ocupan un 27,7% de la superficie del valle. El sector medio superior del valle (desde el kilómetro 20 al 32) tiene un subsuelo estratificado con suelos generalmente profundos, de texturas medias, colores pardos a pardo oscuros, estructura de bloques subangulares, friables, ligeramente plásticos, ligeramente adhesivos, buena permeabilidad, bien a excesivamente drenados y ocupan el 14% de la superficie del valle. Los suelos de los abanicos aluviales laterales representan el 4,1% de la superficie del valle, son fuertemente estratificados a menudo con materiales gruesos y finos alternados en bandas bien definidas (Meléndez, E. y Wright, CH., 1961). El 19,1% de la superficie del valle son suelos que ocupan la caja del río San José, muy delgados, de color pardo, textura gruesa, con abundancia de piedras, sin estructura y permeabilidad muy rápida (IREN-CORFO, 1976).

En la Tabla 1 se presentan las Clases de Capacidad de Uso de los suelos del valle, donde se puede observar que el 62% de la superficie puede ser clasificada entre Clases II y IV; no existen suelos de Clases I y VIII.

La Dirección General de Aguas, 1998 (AC-DGA, 1998) indica que la salinidad es más alta en el sector bajo del valle siendo un valor promedio del orden a 4 dS/m.

Torres, A., 1999, indica que los suelos entre el km 4 al 16 del valle de Azapa los valores de pH son

bastante homogéneos con valores máximos de 7,9 y mínimos de 7,5, es decir, son suelos ligeramente alcalinos a moderadamente alcalinos. La conductividad eléctrica presenta en algunos suelos valores altos en superficie, los que tienden a disminuir en profundidad, utilizando la clasificación propuesta por (Pizarro, 1987) los suelos son ligeramente salinos a moderadamente salinos.

Tabla 1

Capacidad de uso de los suelos del valle de Azapa

Clase de capacidad de uso	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
I	-	-
II	747,6	21,6
III	825,2	23,8
IV	574,0	16,6
V	-	-
VI	210,7	6,1
VII	1.063,6	30,7
VIII	-	-

Fuente: IREN-CORFO, 1976.

La salinidad en los suelos y estratos se reduce prácticamente al Na y Ca, entre los cationes, y al Cl y SO₄, entre los aniones. Esta situación concuerda con el origen marítimo de la mayor parte de los sedimentos y rocas que conforman la cuenca del río San José. La dominancia relativa de Na se encuentra asociada a alta presencia de Cl y lo mismo sucede con el Ca respecto del SO₄ (Torres, A.; Jiménez, M., 1998).

Al comparar un suelo cultivado con uno sin cultivo en el sector Alto Ramírez, situado en la parte inferior de la quebrada Llosyas, el suelo no cultivado presenta niveles de salinidad (STD), sodicidad (RAS) y cloruros (%) mucho mayores que el suelo bajo cultivo.

La diferencia observada permite suponer que la puesta en riego de estos suelos ha implicado, al menos para este sector, un importante lavado de sales, principalmente NaCl, por lo que es probable que la fuerte expansión de la superficie agrícola irrigada en el valle, luego de la puesta en marcha del canal Azapa (1.100 a 3.500 ha; año 1962 a 1982), haya generado salinización del acuífero del valle.

Los suelos cultivados, ubicados en terrazas aluviales del río San José, entre los sectores de Las Maitas y 18 de Septiembre, tienen niveles de salinidad inferiores a los observados en el sector Alto

Ramírez, con aumentos transitorios vinculados al riego, no tienen grandes variaciones en su pH y su RAS no indica problemas de sodicidad. Son perfiles sin mayor problema químico para los cultivos. Se puede suponer que, dada su mayor antigüedad bajo riego y siendo los métodos antiguamente menos eficientes, son perfiles comparativamente más "lavados".

Uso del suelo

En el valle de Azapa se desarrolla una agricultura de riego intensiva, orientada hacia la producción frutícola, fundamentalmente olivo (*Olea europaea* L.), en menor grado mango (*Mangifera indica* L.) y palto (*Persea americana* Mill), y hortícola, tomate (*Lycopersicon esculentum*), morrón (*Capsicum annuum* L.), maíz híbrido (*Zea mays* L.), poroto (*Phaseolus vulgaris* L.). Este sector ha tenido un importante aumento en la superficie explotada y en el rendimiento. Sin embargo, en el valle de Azapa se observa un creciente déficit de recursos hídricos para abastecer la demanda agrícola y de la población.

La Tabla 2 muestra la superficie agrícola regada del valle, la que aumentó alrededor de cinco veces entre los años 1942 y 1983.

Tabla 2

Evolución de la superficie regada en el valle de Azapa

Año	1942	1955	1965	1976	1983	1993	1996
Hectáreas	684	1.110	1.823	2.560	3.500	3.282	3.213

Fuente: Torres, A.; Jiménez, M., 1998; Keller, R., 1946.

Fuentes de agua, calidad química y uso

Fuentes de agua

Fundamentalmente, las fuentes de agua del valle son dos, agua superficial y subterránea, que provienen del río San José, y agua trasvasada desde la cuenca del río Lauca, a través del canal Lauca. Este aporte alcanza a un promedio anual de 0,87 m³ s⁻¹ (AC-DGA, 1998), de los cuales según antecedentes de la comunidad de aguas canal Azapa ingresa al canal Azapa en bocatoma un caudal promedio de 0,650 m³ s⁻¹, siendo actualmente la principal fuente de agua para la agricultura del valle de Azapa.

Tabla 3

Variación en la concentración de sólidos totales disueltos en agua de riego (mg l^{-1})

	Verano 97	Otoño 97	Invierno 97	Primavera 97	Verano 98	Promedio
Agua de pozo	1.344	1.358	1.496	1.327	1.251	1.355
Agua del Canal Azapa	262	508	659	598	525	510

Fuente: Torres, A.; Jiménez, M., 1998.

La superficie agrícola, oferta y demanda de agua para riego ha evolucionado según (Torres, A. y Jiménez, M., 1998) de la siguiente manera:

- Período previo a la entrada en operación del canal Azapa (1962), la superficie agrícola variaba entre 500 y 1.000 ha regadas con métodos superficiales de baja eficiencia. La extracción de agua subterránea para el riego alcanzó niveles de 300-400 L s^{-1} .
- Habilitación de suelos, expansión de la superficie cultivada y demanda agrícola de 800 a 3.500 ha; 1.000 a 1.300 L s^{-1} .
- A partir de 1989 la mecanización de los métodos de riego se masificó; la superficie regada se expandió nuevamente hasta alcanzar 3.000 ha. La demanda de riego se ajustó a valores cercanos a los 800 l/s. La mayor eficiencia en la aplicación del agua durante el riego generó una disminución en la percolación de agua por debajo de la zona de arraigamiento, de 200 a unos 140 l/s. El caudal de bombeo para el riego creció hasta superar 300 l/s.

Calidad química del agua

El agua superficial de la cuenca del río San José y la trasvasada desde la cuenca del río Lauca tenían en el año 1990 conductividad eléctrica entre 0,6 y 0,8 dS m^{-1} , valor inferior al del agua subterránea. Sin embargo, durante los últimos 30 años se ha observado un significativo deterioro de la calidad.

La variación estacional de STD es mayor en el agua de riego superficial, con menor valor durante los meses de verano. Esto se atribuye a una dilución por precipitación del agua extraída de la Laguna Cotacotani a través del canal Lauca (Tabla 3).

De acuerdo con la clasificación de agua por salinidad y sodicidad propuesta por Wilcox, L. y Durum, W., 1967 el agua subterránea es de tipo C4 (salinidad muy alta) y C3 (alta salinidad). El agua de canal es generalmente C3, aunque en

algunos casos durante el verano baja a la categoría C2 (salinidad media). La categoría de sodicidad es S1 (baja).

La composición química del agua subterránea es relativamente constante a lo largo del año y su valor medio se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4

Calidad del agua de riego en el valle de Azapa

Análisis	Valle de Azapa
PH	7,96
CE (dS m^{-1})	1,83
Calcio (meq L^{-1})	9,45
Magnesio (meq L^{-1})	1,88
Sodio (meq L^{-1})	4,09
Potasio (meq L^{-1})	0,14
Bicarbonato (meq L^{-1})	1,67
Cloruro (meq L^{-1})	9,35
Sulfato (meq L^{-1})	5,73
Boro (ppm)	1,03

Fuente: Torres, A.; Jiménez, M., 1998.

Consumo de agua por la agricultura

La tasa de riego media para el valle de Azapa se estima en 8.200 $\text{m}^3/\text{ha/año}$, considerando la superficie de los cultivos principales, evaporación de bandeja clase A y métodos de riego utilizados. Un agricultor que posee 1 acción de agua del canal Azapa y un predio de 1 ha, en un año medio enfrenta un déficit de 20%, lo cual explica la alta demanda por agua subterránea, disminución de los niveles de los pozos en períodos de bajas precipitaciones en la zona precordillerana, lo que se traduce en una mínima recarga del acuífero de Azapa (Tabla 5).

Tabla 5

Tasa de riego estimada para tres cultivos del valle de Azapa ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot mes^{-1}$)

Mes	Sistema de riego			
	Tradicional	Presurizado		
		Olivo	Tomate	Poroto
Enero	816,0	515,8		
Febrero	653,3	412,6		655,8
Marzo	710,0	448,4	596,8	1.427,4
Abril	710,0	448,4	841,1	1.897,9
Mayo	721,7	455,8	854,7	613,7
Junio	651,7	411,6	1182,1	1.107,4
Julio	490,0	309,0	1155,8	1.735,8
Agosto	558,3	352,6	911,6	
Septiembre	575,0	363,2		
Octubre	930,0	587,4		
Noviembre	985,0	622,1		
Diciembre	975,0	616,0		
Total*	8.776,0	5.234	5.542	7.438*

Fuente: Torres, A.; Jiménez, M., 1998.

* : $m^3/ha^{-1}/año$.

** : Considera dos cultivos al año.

VALLE DE LLUTA

ANTECEDENTES GENERALES

El río Lluta abarca una cuenca de drenaje de 3.378 km² (JICA, 1995). La precipitación de la cuenca se concentra en la sección superior de la Cordillera de los Andes a una altitud de 4.000-5.000 msnm. El agua es recolectada por los tributarios y transferida por el río principal para ser descargada al mar al norte de la ciudad de Arica.

En la Tabla 6 se indica el caudal que aportan los tributarios al río Lluta.

SUELOS

INDERCO, Ltda. (1980) agrupa a los suelos del valle en tres grupos, en Tabla 7 se presentan las características químicas de los mismos.

a) Suelos que ocupan posición baja, estratificados

Corresponden a las Series Huaylacán, La Palma y Rosario. Se caracterizan por ser suelos de origen

Tabla 6

Tributarios del río Lluta

Tributario	Aporte (en %) al caudal del río Lluta
Caracarani	13
Azufre	7
Cascavillane, Teleschuño, Guancarane y Chuquiananta	28
Colpitas	28
Putre, Aroma y Socoroma	24

Fuente: INGENDESA, 1993.

aluvial, profundos, altamente estratificados, con texturas medias a gruesas, con nódulos salinos en sus primeras estratas, presumiblemente de cloruros y sulfatos, de estructura de bloques subangulares y angulares gruesos. Con napa de agua libre fluctuante entre 60 y 175 cm de profundidad.

b) Suelos que ocupan terrazas aluviales recientes, menos estratificados

Corresponden a las Series El Carmen y Santa Lucía. Se caracterizan por ser suelos aluviales recientes, poco estratificados, moderadamente profundos a medio, descansando sobre un sustrato aluvial de arenas gruesas, gravas y piedras de litología heterogénea.

De texturas moderadamente fina, media y moderadamente gruesa, color pardo a pardo grisáceo, estructura de bloques subangulares gruesos y débiles a sin estructura, raíces finas abundantes a comunes y buena porosidad, moteados ferruginosos en el subsuelo, prominentes, de color pardo rojizo.

c) Suelos que ocupan terrazas intermedias antiguas

Corresponden a las series Carrunchos y Gentilar. Se caracterizan por ser suelos aluviales antiguos, ocupando preferentemente terrazas de posición intermedia en la parte central del área, moderadamente profundos a delgados. Texturas moderadamente gruesas a muy gruesas, color pardo a pardo oscuro, estructura de bloques subangulares, angulares gruesos, débil a no estructurado.

El uso de los suelos en el valle de Lluta está regulado por las siguientes limitantes (INGENDESA, 1993a, Kosmas C., and N. Moustakas, 1990, INGENDESA, 1995b):

Tabla 7
Características químicas de los suelos en el valle de Lluta

	Suelos que ocupan posición baja		Suelos que ocupan terrazas aluviales recientes		Suelos que ocupan terrazas intermedias antiguas	
	Superficial	Profundidad	Superficial	Profundidad	Superficial	Profundidad
pH	F Ac*	Mod Alc**	Mod Ac***	Neutro	Mod Ac	
CE dS m-1	4,5 a 99,8	2,9 a 5,9	2,2	13,4	5,9	2,2
PSI	6 a 56%	12	8	13	10	
B ppm	10	19 a 938	4	20	19,4	
Cloruros meq L ⁻¹	20,4 a 1.086,4	12,4 a 26,9	9,9	105,9	14,7	7,2
Sulfatos meq L ⁻¹	40,5 a 270	16,2 a 47,5	12,5	57,5	53,5	9,3
M.O.%	2,0 a 4,9	0,1 a 4,6	0,2	3,4	1,4	0,5

Fuente: INDERCO, Ltda., 1980.

* : Fuertemente ácido.

** : Moderadamente alcalino.

*** : Moderadamente ácido.

- Salinidad, tanto del suelo como del agua del río caracterizada por una alta concentración de sulfatos, cloruros de sodio,
- Concentración de boro en agua del río Lluta y en las estratas superficiales de los suelos, entre 9 y 29 mg/L, que constituye una limitante general para la adaptación de cultivos al valle,
- Problemas de drenaje interno de los suelos, que amplifica el efecto de las limitantes anteriores.

USO DEL SUELO

En el valle de Lluta sólo se cultivan del orden de las 2.784 ha por razones de disponibilidad de agua de riego, siendo los cultivos principales el maíz (*Zea mays*) (amiláceo), la alfalfa (*Medicago sativa*), la cebolla (*Allium cepa* L.), el ajo (*Allium sativum* L.) y la betarraga (*Beta vulgaris* var. *Hortensis* L.) El maíz en los sectores aguas abajo de Poconchile tiene dos cosechas al año, la primera cosecha se cultiva en el período comprendido entre marzo y junio, y la segunda entre septiembre y diciembre; en el área aguas arriba de Poconchile normalmente hay sólo una cosecha. Las hortalizas y el forraje son cultivados durante todo el año. La Tabla 8 muestra la superficie cultivada y principales cultivos del valle.

La salinidad, la presencia importante de boro, cloruro y sodio, problemas de drenaje han afectado históricamente el espectro de cultivos en diferentes ecosistemas a nivel de valles costeros, pampa intermedia y precordillera, limitando la diversificación de los sistemas productivos agrícolas. Asimismo ha determinado que las actividades agrícolas que allí realizan los productores se efectúe con rentabilidades muy bajas, lo cual afecta el interés por incorporar nuevas tecnologías, al no existir seguridad de recuperar los mayores costos de producción o las inversiones que normalmente se asocian con la innovación (Doussolin y Quezada, 2008).

La diversificación productiva en asociación con una innovación tecnológica permitiría penetrar mercados que están demandando productos de mayor calidad, generados a través de procesos productivos agrícolas sustentables.

Tabla 8
Superficie cultivada con los principales cultivos del valle de Lluta

Cultivo	Área (ha)	% de área cultivada
Maíz	1.698,4	61,0
Alfalfa	683,9	24,6
Hortalizas	401,9	14,4
Total	2.784,2	100,0

Fuente: JICA, 1995.

CALIDAD DEL AGUA

Constituyentes químicos

El agua del río Lluta se caracteriza por tener una alta concentración de sales y otros elementos químicos como boro, cloruros y sulfatos, que la hacen inútil para ciertos usos. Desde su nacimiento a la desembocadura predominan diferentes contaminantes. La Tabla 9 da cuenta de los constituyentes químicos en los tres sectores del valle; se considera parte alta desde el inicio de la zona de riego, sector Tocontasi, hasta Molinos, parte media entre Molinos y Rosario y parte baja, desde Rosario a Desembocadura.

Tabla 9

Calidad del agua de riego en el valle de Lluta

Parámetro	Parte alta	Parte media	Parte baja
pH	7,89	7,79	8,16
C.E. dS/m	2,2	3,22	5,5
Ca meq/L	6,98	9,75	20,24
Mg meq/L	2,39	4,41	8,46
Na meq/L	8,9	11,41	22,17
K meq/L	1,48	1,57	2,56
CO ₃ meq/L	–	–	1,24
HCO ₃ meq/L	1,88	1,65	1,57
Cl meq/L	12,00	15,05	31,13
SO ₄ meq/L	7,35	10,92	21,3
Boro ppm	12,43	13,46	16,00
RAS	4,11	4,29	5,85
Na %	45,02	42,04	41,65
Clasificación	C3 – S1	C4 – S2	C4 – S2

Fuente: Torres, A.; Jiménez, M., 1998.

Las principales características de la calidad del agua de la cuenca del río Lluta son las siguientes:

- Las mayores fuentes de As son los ríos Azufre y Colpitas Superior que representan el 86,4% del total de As de la cuenca.
- La principal fuente de Fe es el río Azufre, con un porcentaje de 75% del total de Fe de la cuenca.
- Los ríos Azufre y Colpitas Superior son grandes fuentes de B. No obstante, una parte considerable proviene de otras fuentes.

- Los elementos As y Fe disminuyen gradualmente desde Tocontasi hasta Panamericana; en tanto el B, Cl- y SO₄ = aumentan aguas abajo.

En cuanto a RAS, los mayores valores se encuentran en las aguas correspondientes al río Colpitas, en las aguas correspondientes al río Lluta en Panamericana y aguas correspondientes a la desembocadura.

La concentración de iones medida a través de la conductividad eléctrica muestra que existe una tendencia al aumento desde el nacimiento a la desembocadura, situación atribuible a la ganancia de sales durante su recorrido tanto por las aguas de drenaje como por el arrastre de las sales desde los terrenos.

USO DEL AGUA POR LA AGRICULTURA

Para los efectos del regadío el valle de Lluta ha sido dividido en seis sectores; aguas abajo de la localidad de Tocontasi se comienza a usar el agua para el riego, el área regada es servida por 51 canales, la mayor parte de ellos son de tierra. El área de cultivo alcanza a las 2.784,2 ha según JICA (1995), el resto de la superficie no puede ser cultivado por falta de agua, situación que se contrapone con los caudales del río que llegan al mar a lo largo del año y especialmente en la época estival, lo cual se traduce en que el caudal promedio que se pierde al mar sea del orden de los 1.000 l/seg, situación que confirma la necesidad de que las crecidas del río Lluta puedan ser embalsadas para ser posteriormente distribuidas a lo largo del año.

INGENDESA 2003c concluye que en el valle de Lluta la construcción de la presa Chironta es ambientalmente aceptable. Existen numerosos impactos positivos, tales como: Seguridad de riego, seguridad y plusvalía para los predios ribereños, mejoramiento de caminos, etc. Por otra parte, hay pocos impactos negativos y estos son mitigables, como por ejemplo: la eventual alteración de algunos sitios arqueológicos, la pérdida de suelos, laderas y requeríos en la zona de inundación.

El volumen óptimo del embalse recomendado es de 17 Hm³. Este volumen se divide en 10,5 Hm³ para riego y 6,5 Hm³ de volumen muerto. Para esta presa de 76,5 m de altura el costo directo sería de 25,0 millones de dólares, el VAN de 4,95 millones de dólares, la TIR de 11,97% y el IVAN de 0,198. Para este caso la superficie real regada con 85% de seguridad alcanzaría las 3.800 ha, incluyendo dobles cultivos (2.235 ha de superficie física).

Demanda de agua

La demanda de agua de cada sector se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10

Demanda de agua por sectores de riego ($10^3 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$)

Sector	Maíz	Vegetales	Forraje	Total
Alto	1.983,9	184,8	1.980,8	4.149,4
Primero	2.089,5	577,4	4.707,6	7.374,5
Segundo	1.528,3	1.311,2	4.118,2	6.957,7
Tercero	8.027,3	1.873,2	4.065,1	13.965,6
Cuarto	20.178,8	4.641,9	1.848,0	26.668,7
Quinto	2.318,5	1.724,4	1.439,1	5.482,0
Total	36.126,4	10.312,8	18.158,7	64.597,9

Fuente: JICA, 1995.

JICA, 1995 estimó que el agua realmente consumida en riego en el valle de Lluta entre Vilacollo y la desembocadura es de $29.897 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}$, lo cual expresado en caudal continuo es de 951 L s^{-1} .

El área de cultivo alcanza a las 2.784,2 ha (JICA, 1995), es decir, sólo el 69% de la superficie agrícola del valle es regada, las restantes 2.248,2 ha equivalentes al 31,0% no pueden ser cultivadas por falta de agua. Esta situación se contrapone con los caudales del río que llegan al mar a lo largo del año y especialmente en la época estival; así se estima que el caudal promedio que se pierde al mar es del orden de los 1.000 L/seg, cantidad suficiente como para regar con una eficiencia aceptable para un sistema mecánico a lo menos 2.000 ha.

DISCUSIÓN

USO DEL SUELO

En la actualidad la salinidad de los suelos y del agua de riego determina que sólo unos pocos cultivos puedan desarrollarse en Lluta. Entre ellos el maíz (*Zea mays*) (amiláceo), local denominado Lluteño, algunas variedades de cebollas (*Allium cepa L.*), la alfalfa (*Medicago sativa L.*) y algunas hortalizas menores. Sin embargo, por las bondades del clima estos cultivos se pueden desarrollar en cualquier época del año.

La salinidad del suelo es una de las principales limitaciones del medio ambiente para la

productividad de los cultivos en todo el mundo. El enfoque “biológico” para este problema se centra en el manejo, explotación o el desarrollo de plantas capaces de prosperar en los suelos afectados por la sal. (Ashraf, M.; Athar, H. R.; Harris, P. J. C.; Kwon, T. R., 2008) indican que al tratar las semillas antes de plantarlas con químicos inorgánicos u orgánicos o con temperaturas altas o bajas, como la estrategia de la aplicación exógena de químicos orgánicos, tales como betaína glicina, prolina o reguladores del crecimiento vegetal o químicos inorgánicos se logran mejoras considerables en el crecimiento y el rendimiento en un número de cultivos que utilizan estos enfoques.

En cuanto a la mejora genética se han realizado grandes esfuerzos para desarrollar líneas tolerantes a la sal o cosecha de cultivos utilizando mejoramiento genético convencional para las plantas. Sin embargo, la complejidad de los mecanismos de tolerancia, la falta de criterios de selección y la variación de las respuestas de las plantas en diferentes etapas de desarrollo se han traducido en un solo éxito limitado, pero puede volverse cada vez más efectiva con un mejor conocimiento de los complejos mecanismos que están implicados en la tolerancia que adquieren las plantas a la sal.

El uso del suelo en el valle de Lluta está fuertemente regulado por las siguientes limitantes:

- salinidad, tanto de los suelos como del agua del río Lluta representada, fundamentalmente, por una alta concentración de sulfatos, cloruros y de sodio solubles,
- concentración de boro en el agua del río Lluta cuyo rango oscila entre 9 y 29 mg/l que se traduce en una limitante general para la adaptación de nuevos cultivos al valle,
- problemas de drenaje interno de los suelos, que amplifica el efecto de las limitantes anteriormente mencionadas e impiden las prácticas de lixiviación de sales.

CALIDAD DEL AGUA

El contenido de sales se estima por medio de la conductividad eléctrica (CE); cantidades elevadas originan disminución en la disponibilidad de agua en la zona radical con la consiguiente reducción de rendimientos debida a su efecto osmótico. La presencia de sodio intercambiable crea condiciones de inestabilidad de los agregados del suelo y del sistema poroso, el hinchamiento y la dispersión

coloidal restringen la permeabilidad del suelo al agua y a los gases, y conduce consecuentemente a problemas de anegamiento, encostramiento, escurrimiento y pobre aireación (SO H.B. and L.A.G. Aylmore, 1993; Levy, G.; Goldstein, D.; Mamedov, A., 2005).

El uso de agua con un alto contenido salino genera una acumulación en el perfil de suelo, lo que depende de las características físicas de este como lo es la textura, la condición de drenaje (El-Swaify, S., 2000).

La salinidad del agua es el principal factor limitante para el desarrollo agrícola de Lluta. En este caso la agricultura está restringida solamente a aquellos cultivos que resisten la salinidad total y toxicidad específica por boro, sulfatos y cloruros, lo que limita sustancialmente la diversificación de cultivos su producción

La alta concentración salina del agua de riego, la toxicidad específica antes indicada y la condición de drenaje de los suelos han originado una acumulación de sales en el perfil de suelo; gran parte de los suelos presentan condiciones de drenaje restringido, lo cual dificulta el lixiviado, generándose una acumulación permanente y ascendente, que hace poco factible la incorporación de cultivos resistentes a las actuales condiciones, por cuanto, de no intervenir el sistema de drenaje, el suelo cultivado y regado con el agua, actualmente disponible, alcanzará niveles de sales que superarán los niveles de los posibles nuevos cultivos introducidos en el valle.

Aproximación de soluciones

Para mejorar la agricultura del valle de Lluta es necesario disminuir los efectos negativos de la salinidad del agua y del suelo a través de prácticas de lavado de suelos.

La cantidad de agua de lavado y el lapso de tiempo que se requiere depende de la profundidad del suelo a ser recuperado, nivel de salinidad inicial, tipo de sales presentes y características del suelo, tales como textura, estructura, infiltración y permeabilidad (Harker D.B. and D.E. Mikalson, 1990).

El proceso de lixiviación de cada uno de los iones depende de su solubilidad, pues mientras que, por ejemplo, los cloruros prácticamente son removidos con los primeros efluentes, para al final del proceso extraerse una mínima cantidad,

en cambio los carbonatos al inicio se extrae una cantidad muy pequeña, incluso en ocasiones no detectables, incrementándose paulatinamente conforme avanza el lavado. Los conceptos antes expresados son reportados por diferentes autores, como Gobran G.R.; J.E. Dufey and H. Laudelout, 1982; Frenkel H.; Z. Gerstl, and N. Alperovitch, 1989; Kosmas C., and N. Moustakas, 1990).

La condición de drenaje de los suelos de la parte media y baja del valle de Lluta dificulta el uso de la técnica de lavado como una alternativa para disminuir la concentración salina, por lo que es fundamental rediseñar y construir una nueva red de drenaje que reemplace a la construida en la década de los 60 por el Estado de Chile, proyecto que sobre la base de las producciones posibles de alcanzar con los niveles de salinidad del agua de riego resulta no rentable

A continuación se presentan algunas posibles soluciones y sus limitaciones.

1. Crear y establecer cultivos resistentes a las condiciones del valle de Lluta. Esta solución puede presentar los siguientes inconvenientes:

- El actual balance salino de los suelos que presentan problemas de drenaje permite estimar un aumento de salinidad en forma permanente, con lo cual los suelos alcanzarán rápidamente los niveles máximos de salinidad que puedan tolerar los nuevos cultivos.
- Es necesario mejorar el sistema de drenaje de los suelos para garantizar la lixiviación de sales y de esa forma mejorar el balance salino.

2. Mejoramiento de la calidad química del agua de riego. Se pueden considerar las siguientes opciones:

- Evitar los tributarios que contaminan al río Lluta, lo que implica la construcción de obras civiles de alto costo; el funcionamiento de las obras generaría una disminución en la actual disponibilidad de agua.
- Captar agua adicional en la cabecera de la cuenca a través del desvío de cauces naturales presenta el inconveniente de que actualmente esa agua es utilizada por las comunidades altoandinas en el riego de bofedales y, además, es compartida con Perú o Bolivia.

- Mejorar la conducción y distribución del agua en la zona de riego del valle, es decir evitar que las aguas de riego se mezclen con las aguas de drenaje y se derramen en las parcelas como ocurre en la actualidad al usar el río como un canal principal del cual nacen los canales derivados. La medida consiste en la construcción de un canal matriz que capte las aguas de riego en la parte alta del valle, al inicio de la zona de riego, en donde el agua presenta una menor carga de sales, desde este canal matriz se debe distribuir el agua a través de canales derivados a cada sector de riego. Esta opción significa una disminución en la disponibilidad de agua, por cuanto los derrames del riego y los drenes no ingresarían al sistema de distribución de agua como ocurre actualmente.
- Eliminar los contaminantes del agua de riego. Esta solución es técnicamente posible, pero requiere de la inversión en una planta de tratamiento sea esta por osmosis inversa y/o tratamiento en columnas de intercambio, decisión que está ligada a los niveles de producción que se puedan alcanzar con el agua producida.

Relación de calidad del agua con el rendimiento de los cultivos

Maas, E. W. and G. H. Hoffman, 1977, definen una relación lineal entre la salinidad del suelo y la disminución en la producción de los cultivos que se expresa como:

$$Y = 100 - b (CEs - a)$$

donde “Y” es la producción del cultivo en porcentaje con respecto al máximo, “CEs” es la conductividad eléctrica del extracto de saturación en dS m⁻¹ y “a” y “b” son dos parámetros cuyos valores son constantes para cada cultivo. Esta ecuación puede representarse gráficamente:

El valor “a” representa el máximo de conductividad para la cual la producción es del 100%, pudiéndose definir como el umbral de salinidad para cada cultivo. A continuación viene un tramo inclinado que forma con la horizontal un ángulo “alfa” cuya tangente es el parámetro “b”, y que se puede considerar como el porcentaje de disminución

de rendimiento por unidad de CEs que supere el valor de “a” (expresa la sensibilidad del cultivo a los aumentos de salinidad).

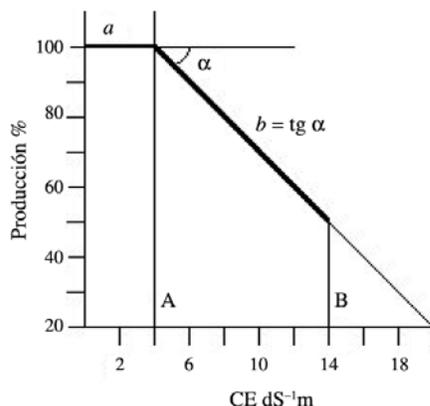


Figura 1. Disminución del rendimiento por efecto de la salinidad.

En la Tabla 11 se presenta el rendimiento de diferentes cultivos versus la conductividad eléctrica del agua de riego, antecedentes que permitieron definir las ecuaciones para poder estimar la reducción del rendimiento por efecto de la salinidad del agua de riego en los cultivos del valle; estas ecuaciones se presentan en la Tabla 12.

Tabla 11

Rendimiento de diferentes cultivos versus conductividad eléctrica del agua de riego

Cultivo	% del rendimiento máximo				
	100	90	75	50	0
	C.E. del agua de riego dS/m				
Maíz (<i>Zea mais, amilaceo</i>),	1,1	1,7	2,5	3,9	10,0
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	0,9	1,4	2,1	3,4	9,0
Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	0,8	1,2	1,8	2,9	7,5
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	1,3	2,2	3,6	5,9	15,5
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.)	1,7	2,3	3,4	5,0	8,4
Betarraga (<i>Beta vulgaris</i>)	2,7	3,4	4,3	6,4	15,0
Brócoli (<i>Brassica oleracea botrytis</i>)	1,9	2,6	3,7	5,5	13,5
Espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>)	1,3	2,2	3,5	5,7	15,0
Palma datilera (<i>Phoenix dactylifera</i>)	2,7	4,5	7,3	12,0	32,0
Habas (<i>Vicia faba</i>)	1,1	1,8	2,0	4,5	12,0
Granada (<i>Punica granatum</i>)	1,8	2,6	3,7	5,6	14,0

Fuente: FAO. 1987.

Utilizando las ecuaciones de la Tabla 12 y la salinidad total del agua de riego indicada en la Tabla 9 se estimó el rendimiento relativo que se puede obtener en los cultivos seleccionados para el valle, lo cual se presenta en la Tabla 13.

Tabla 12

Ecuaciones para estimar la reducción de rendimiento por efecto de la salinidad del agua de riego

Cultivo	Rendimiento en % =	r ²
Maíz	104,00 - (10,883 * C.E.)	0,962
Tomate	124,94 - (14,889 * C.E.)	0,999
Cebolla-ajo	103,86 - (14,387* C.E)	0,962
Lechuga	102,96 - (11,894 * C.E)	0,959
Habas	100,00 - (8,645 * C.E.)	0,950
Palma datilera	101,62 - (3,301 * C.E.)	0,963
Espinaca	102,23 - (7,081 * C.E.)	0,965
Brócoli	108,26 - (8,320 * C.E)	0,961
Betarraga	112,40 - (7,767 * C.E.)	0,956
Granado	106,91 - (7,927 *C.E.)	0,961

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13

Rendimiento relativo de los cultivos en el valle de Lluta

Cultivo	Parte alta	Parte media	Parte baja
	%		
Maíz	80,85	69,75	44,93
Cebolla-ajo	72,21	57,53	24,73
Lechuga	76,79	64,66	37,54
Alfalfa	86,91	79,94	64,36
Betarraga	95,32	87,40	69,70
Brócoli	89,96	81,47	62,50
Espinaca	86,65	79,43	63,28
Datilera	94,36	90,99	83,46
Habas	80,98	72,16	52,45
Granado	89,47	81,39	63,31
Tomate	92,18	77,00	43,05

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al contenido salino del agua expresada como conductividad eléctrica, en los tres sectores del valle sería posible aumentar los

rendimientos de los cultivos a través del mejoramiento de la calidad del agua.

Limitaciones por sodio. Se ha entendido originalmente que los suelos presentan problemas de sodificación cuando el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) es mayor o igual a 15%, Marshall, T. *et al.*, 1996, mencionan que muchos suelos son afectados con valores tan bajos como 6% de PSI; para el caso de estudios de riego se ha propuesto la utilización de la RAS del extracto de saturación como un buen índice para estimar el deterioro por sodificación del suelo. Cook G.D. and W. Muller, 1997 en una amplia revisión de estos criterios encuentran que el PSI y la RAS son de escasa sensibilidad y que a su vez varían ampliamente con el tipo de suelo. Proponen en definitiva la utilización del contenido de sodio intercambiable (CSI). Este elemento tiene efectos sobre la física de los suelos, dispersa los agregados, lo cual se traduce en una disminución de la cantidad de agua disponible para los cultivos (El-Swaify, 2000) asociada a una pérdida de la estructura, lo que se asemeja al efecto de bajos contenidos de materia orgánica (Tarkiewicz, and Nosalewicz, A., 2005); el efecto finalmente se traduce en una disminución en la velocidad de infiltración dificultando los procesos de lavado, necesarios cuando se utiliza agua con un alto contenido salino. El contenido de sodio en el suelo expresado en porcentaje de sodio de intercambio puede ser estimado a través de la RAS del agua de riego por medio de la siguiente expresión:

$$PSI = \frac{100 (-0,0126 + 0,01475 RAS)}{1 + (-0,0126 + 0,01475 RAS)}$$

Según la ecuación anterior los porcentajes de sodio de intercambio en los suelos de las tres zonas definidas en el valle de Lluta se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14

Porcentaje de sodio de intercambio en los suelos de los sectores considerados

Sector del valle	PSI%
Alto	4,56
Medio	4,29
Bajo	5,85

Fuente: Elaboración propia.

Limitaciones por cloro: los niveles que presentan las aguas en cada uno de los sectores según las directrices propuestas por FAO 1987, el agua del río presenta problemas graves dado que el contenido es mayor a 10 meq/L.

Limitaciones por boro: el boro es un elemento esencial en la nutrición mineral de las plantas. Éste es absorbido por las raíces como ácido bórico neutro ($B[OH]_3$) y como borato ($B[OH]_4^-$). La absorción se produce por tres mecanismos: difusión pasiva, transporte facilitado a través de canales proteicos y transporte activo por proteínas específicas (Läuchli, A., 2002; Dannel, F.; Pfeffer, H.; Römheld, V., 2002; Brown, P.H. *et al.*, 2002). Forma parte de la pared celular y complejos estables en la membrana plasmática, y estimula la germinación del polen y la elongación del tubo polínico (36). En la mayoría de los cultivos los síntomas de toxicidad se presentan cuando la concentración de boro en las hojas supera 250 a 300 mg kg⁻¹ (peso seco) (Ayers, R.S.; Westcot, D.W., 1989).

Al comparar el rendimiento que logran algunos agricultores de la parte baja del valle con el rendimiento relativo posible de lograr según la salinidad del agua de riego que se indica en la Tabla 13, es posible inferir que el problema de los bajos rendimientos de los cultivos en el valle de Lluta no puede ser sólo atribuido a la salinidad total; al respecto, Albornoz, F. *et al.*, 2007, reportan que el rendimiento del tomate regado con agua tratada del río con una conductividad eléctrica de 1,75 dS/m y 0,7 ppm de boro es superior al que se logra con agua del río sin tratar o agua sin sales pero con boro, diferencias que son estadísticamente significativas. Esto permite concluir que el factor limitante para la producción de los cultivos en el valle de Lluta lo representa el contenido de boro.

Según lo anterior, es fundamental la eliminación del contenido de boro en el agua de riego si se pretende hacer un buen uso de las condiciones climáticas del valle de Lluta y transformar este valle en un centro productor de primores similar al del valle de Azapa.

Para combatir el exceso de boro, éste se puede lixiviar desde el suelo o ser eliminado desde la fuente de agua. Para lixiviar el boro desde el suelo se requiere una cantidad tres veces mayor de agua que la necesaria para lixiviar la misma cantidad de sodio o cloruro, ya que el boro se mueve

lentamente con la solución suelo, al encontrarse altamente adsorbido a los minerales de arcilla, por ello, además se requiere mayor tiempo de lavado (Ayers, R.S.; Westcot, D.W., 1989; Havlin, J. *et al.*, 1999).

El alto contenido de boro de los suelos puede ser lixiviado, para lo cual se requiere disponer de agua con un contenido de boro inferior del que se quiere dejar el suelo. Disponer de esta agua en el valle de Lluta representa un costo de desborificación; por otra parte, la condición de drenaje de los suelos dificulta el proceso de lavado.

La experiencia local indica que los niveles originales de boro en el perfil de suelo tratado, dadas la alta evaporación de la zona y características morfológicas de los suelos, se alcancen antes de la segunda temporada de cultivo.

Los ensayos para retirar el boro desde las fuentes de agua han incluido tecnologías como la osmosis inversa y el uso de resinas de intercambio, siendo ambos métodos poco eficientes, removiendo menos del 50% del elemento (Sieveka, E.H., 1966).

Investigaciones realizadas en la Universidad de Tarapacá han logrado desarrollar un sistema para reducir la concentración de boro en el agua de riego. El sistema desarrollado es capaz de reducir hasta en un 97% la concentración inicial de boro en el agua (Figuerola, L., 2006).

RELACIÓN DISPONIBILIDAD Y DEMANDA DE AGUA PARA RIEGO

Al considerar la disponibilidad anual de agua de riego y la demanda de los cultivos se puede apreciar que el caudal medio estimado satisface el 88% de la demanda de los cultivos, situación agravada por cuanto existen importantes variaciones de caudal que se producen en la época de las crecidas producto de las precipitaciones altiplánicas.

La situación antes descrita debe ser abordada a través de la implementación de programas de manejo de la cuenca relacionados con la protección de la cabecera de la cuenca a través de programas de forestación, creación de zonas de infiltración, la construcción de obras para disminuir la velocidad de escurrimiento de regulación de crecidas, construcción de una obra de acumulación que permita la regulación de la cuenca.

CONCLUSIONES

- La diferencia de productividad entre los valles de Lluta y Azapa se debe fundamentalmente a la calidad del agua de riego, siendo para el valle de Lluta el alto contenido de boro la principal limitante.
- El agua disponible para riego en el valle de Lluta, según clasificación USDA, representa un alto peligro de salinización dada su conductividad eléctrica, y por su relación de adsorción de sodio (RAS) representa un bajo peligro de sodio.
- El pH de las aguas del río Lluta no presenta variaciones apreciables a lo largo de su recorrido y diversas épocas del año, fluctuando entre 7,42 y 8,18, lo que evidencia una moderada alcalinidad.
- La salinidad de las aguas del río Lluta, evaluada a través de la C.E., aumenta a medida que avanza hacia la desembocadura, con valores de 2 a 6 dS/m. Esto refleja la contaminación salina de que va siendo objeto el río por las descargas de los drenes que posee el valle y los aportes de los desagües de los parceleros en todo su recorrido.
- Desde el sector Sora hasta las Chilcas el problema de la salinidad del río es creciente y aguas abajo de este último sector el problema se torna grave, con valores de C.E. de sus aguas superiores a 3 dS/m.
- La concentración de aniones y cationes de las aguas del río Lluta también presenta un aumento de cordillera a mar y se evidencian variaciones a lo largo del año atribuibles al aumento o disminución del caudal estacional que posee el río.
- El boro se encuentra en altas concentraciones en el agua del río Lluta, incrementándose hacia el poniente, con valores máximos de 22,26 ppm. Se reconoce como una de las principales fuentes de la contaminación por boro de las aguas al río Colpitas y en parte al río Azufre.
- La utilización de las aguas del río Lluta para regadío lleva involucrado un alto riesgo de salinización de los suelos y la limitación en la incorporación de otros cultivos que no sean aquellos ya adaptados a las condiciones salinas del valle.
- El agua superficial del valle de Azapa registra valores de C.E. muy cercanos a 1 dS/m y alrededor de 1,5 dS/m en las aguas del subsuelo, existiendo una clara tendencia al aumento de dicha salinidad.
- El mal drenaje de los suelos del valle de Lluta hace imposible su habilitación a través del uso de enmiendas químicas y posterior lavado. Por otra parte, la baja rentabilidad de los actuales cultivos no justifica una inversión para mejorar la actual red de drenaje del valle.
- Entre algunas medidas para el mejoramiento de la actividad agrícola en el valle de Lluta se pueden plantear:
 - La construcción de embalses acumuladores, que permitan el control de la disponibilidad de agua de riego.
 - Actualización de los estudios para la desviación de las aguas de los tributarios responsables de la mayor contaminación, p.e. río Colpitas y río Azufre, esto presenta el inconveniente de que significa una disminución de la disponibilidad del agua.
- Impulsar trabajos de investigación orientados a la producción de vegetales resistentes a las condiciones adversas del valle de Lluta.
- Eliminar los altos contenidos de boro del agua de riego a nivel del predio a través de intercambiadores específicos.
- Mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego a través de programas de extensión agrícola y transferencia tecnológica.
- Introducción del cultivo sin suelo bajo ambiente controlado.

LITERATURA CITADA

- AC-DGA, 1998. Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río San José. MOP-DGA S.I.T. N° 43. Santiago, Chile, 314 p.
- ALBORNOZ, F.; TORRES, A.; TAPIA, M. L.; ACEVEDO, E. 2007. El Cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) hidropónico con agua desalinizada y desborificada en el Valle de Lluta. IDESIA 25 (2): 73-80.
- ASHRAF, M.; ATHAR, H.R.; HARRIS, P. J. C.; KWON, T. R. 2008. Some prospective for improving crop salt tolerance. *Advances in Agronomy* 97, 2008, p. 45-110.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. 1989. Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage paper N° 29. FAO. Roma. 174 p.
- BROWN, P.H.; BELLALLOU, N.; WIMMER, M.A.; BASSIL, E.S.; RUIZ, J.; HU, H.; PFEFFER, H.; DANNEIL, F.;

- RÖMHELD, V. 2002.** Boron in Plant Biology. *Plant Biology* 4: 211-229.
- COSERREN. 1980.** Estudio del Valle de Azapa mediante fotointerpretación de registros infrarrojos color. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Riego. Santiago, Chile. 28 p.
- COOK, G.D. AND W. MULLER 1997.** Is exchangeable sodium content a better index of soil sodicity than exchangeable sodium percentage?: a reassessment of published data. *Soil Science* 162 (5): 343-349.
- DANNEL, F.; PFEFFER, H.; RÖMHELD, V. 2002.** Update on boron in higher plants – Uptake, primary translocation and compartmentation. *Plant Biology* 4: 193-204.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 1998.** “Plan director para la Gestión de Recursos Hídricos Cuenca Río San José”. S.D.T. N° 27. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile. 114 p.
- DOUSSOLIN, E Y QUEZADA, C. 2008.** “Manejo de suelos en zonas áridas”. Cap. 2. Suelos en la región desértica de Chile. Eds.: Quezada, C.; Sandoval, M. y Zagal, E. p. 22-30.
- ESPINA, L. 1971.** “Estudio Agroeconómico del Valle de Azapa”. U. de Chile. Facultad de Agronomía. Departamento de Ciencias Económicas y Sociales. 155 p.
- EDWARDS, G.R.; KARZULOVIC, K.J. 1981.** Febrero. “Plan Maestro de Acción Inmediata para el Sistema de Riego del Valle de Azapa”. Tomo II. Informe General. Región de Tarapacá. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. Chile.
- EL-SWAIFY, S. 2000.** Soil and Water Salinity In Plant Nutrient Management in Hawaii, Soils Plant Nutrient Management in Hawaii Soils Approaches for Tropical Agricultura and Human Resources, University of Hawaii at Manoa.
- FAO. 1987.** La calidad del agua en la agricultura. Serie Estudio FAO: Riego y Drenaje N° 29. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 174 p.
- FIGUEROA, L. 2006.** Reducción de la concentración de boro en aguas del río Lluta y su utilización en riego del suelo salino y boratado. *Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Universidad de Tarapacá, Boletín N° 22.* p. 148-150.
- FRENKEL, H.; Z. GERSTL, AND ALPEROVITCH, N. 1989.** Exchange-induced dissolution of gypsum and the reclamation of sodic soils. *J. of Soil Science*, 40: 599-611.
- GOBRAN, G.R.; J.E. DUFLEY, AND LAUDELOUT, H. 1982.** The use of gypsum for preventing soil sodification: effect of gypsum particle size and location in the profile. *J. of Soil Science*, 33: 309-316.
- HARKER, D.B.; AND MIKALSON, D.E. 1990.** Leaching of a highly saline-sodic in southern Alberta: a laboratory study. *Can. J. of Soil Science*, 70:509-514.
- HAVLIN, J.; BEATON, J.; TISDALE, S.; NELSON, W. 1999.** Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. Sexta edición. Prentice Hall. United States of America. 503 p.
- INDERCO, LTDA. 1980.** “Estudio de la Red de Drenaje del Valle del Río Lluta”. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. 125 p.
- INGENDESA. 1993a.** Marzo. Consultoría Dep-012, “Análisis de Descontaminación y Embalse en Río Lluta”. Vol. 4/4- Dirección de Riego. Ministerio de Obras Públicas. 111 p.
- INGENDESA 1995b.** Marzo. Consultoría Dep-012, “Análisis de Descontaminación y Embalse en Río Lluta”. II Parte - Drenaje. Informe Ejecutivo. Dirección de Riego. Ministerio de Obras Públicas. 45 p.
- INGENDESA. 2003c.** Estudio de factibilidad de embalses para los valles de Lluta y Azapa. Resumen ejecutivo. p. 31.
- IREN-CORFO. 1976.** Inventario de Recursos Naturales por métodos de percepción del satélite LANDSAT. I Región de Tarapacá. Convenio IREN-SERPLAC. Santiago, Chile, p. 50-110.
- JORQUERA, L. 1971.** Recursos de agua y su aprovechamiento en el Valle de Azapa. Mimeografiado. 32 p.
- JICA, 1995.** “El Estudio Sobre el Desarrollo de los Recursos de Agua en la Parte Norte de Chile”. Informe Principal Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Chile. 52 p.
- KLOHN, W. 1972.** Hidrografía de las zonas desérticas de Chile, ed. Jean B., Proyecto CHI-35 Investigación de los recursos hidráulicos en el Norte Grande PNUD para el desarrollo, Santiago, Chile. 188 p.
- KARSULOVIC, J. 1968.** Estudio hidrogeológico de la Región de Arica. Santiago, Universidad de Chile, p. 26-38.
- KELLER, R. 1946.** El Departamento de Arica, Ministerio de Economía y Comercio, 334 p.
- KOSMAS, C., AND MOUSTAKAS N. 1990.** Hydraulic conductivity and leaching of an organic saline-sodic soil. *Geoderma*, 46:363-370.
- LÄUCHLI, A. 2002.** Functions of boron in higher plants: recent advances and open questions. *Plant Biology* 4: 190-192.
- LEVY, G., GOLDSTEIN, D., Y MAMEDOV, A. 2005.** Saturated Hydraulic Conductivity of Semiarid Soils: Combined Effects of Salinity, Sodicity and Rate of Wetting. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:653-662.
- MARSHALL T., HOLMES J. AND C. ROSE. 1996.** Soil Physics Third Edition Cambridge University, 453 p.
- MAAS, E. W. AND HOFFMAN, G. H. 1977.** Crop salt tolerance- Current assessment. *J. Irrig. and Drain. Div., ASCE.* 103: 115-134. IR2. Proc. Paper 12993.
- MELÉNDEZ, E. Y WRIGHT, CH. 1961.** Estudio de los suelos del Valle de Azapa. Ministerio de Agricultura, 45 p.
- PIZARRO, F. 1987.** Riegos Localizados de Alta Frecuencia (RLAF), de Mundi Prensa, Madrid, España, p. 73-123.
- OSORIO, A. 1982.** Características y relaciones físicas e hídricas de algunos suelos agrícolas del valle de Azapa, I Región, Chile, IDESIA. Vol. 6: 31-48.
- OSORIO, A.; TORRES, A. Y DE LA RIVA, F. 1987.** Tecnificación del regadío en los valles costeros de la Provincia de Arica, Instituto de Agronomía, U. de Tarapacá. 216 p.
- SIEVEKA, E. H. 1966.** Reverse osmosis pilot plants. En: Merten, U. Desalination by reverse osmosis. The Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts, Estados Unidos de América. pp 239-270.
- SO H.B. AND AYLMOORE L.A.G. 1993.** How do sodic Soils Behave? The effects of sodicity on soil physical behaviour. *Aust. J. Soil Res.* 31:761-778.
- TORRES, A. 1999.** Características químicas e hídricas de los suelos de la parte baja del valle de Azapa. I Región, Chile IDESIA Vol. 16: 7-15.
- TORRES, A. JIMÉNEZ, M. 1998.** “Programa de Investigación en Parcelas Experimentales, Cuenca Río San José”. Universidad de Tarapacá, D.G.A SIT N° 52. Vo. I. 116 p.
- TARKIEWICZ, AND NOSALEWICZ, A. 2005.** Effect of organic carbon content on the compactibility and penetration resistance of two soils formed from loes. *Int Agrophysic*, 19, 345-350.
- WILCOX, L. Y DURUM, W. 1967.** Quality of irrigation water, En: Irrigation of agricultural lands. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. USA. 104-122.