

# Memoria

Taller

de análisis de  
tecnologías para la  
identificación de  
suelos ensalitrados,  
mediante percepción  
remota



**TALLER DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS  
PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS  
ENSALITRADOS, MEDIANTE PERCEPCIÓN  
REMOTA**

**MEMORIAS**



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Taller de análisis de tecnologías para  
la identificación de suelos ensalitrados,  
mediante percepción remota

Memorias

IMTA

Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje

México, 2005

---

631.416 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

I65

*Taller de análisis de tecnologías para la identificación de suelos ensalitrados, mediante percepción remota. Memorias / Leonardo Pulido Madrigal (comp.) / Jiutepec, Morelos: IMTA, 2005.*

107 pp. 15.5 x 22.5 cm.

1. Suelos salitrosos 2. Percepción remota 3. Capacitación

---

Coordinación editorial:

Coordinación de Tecnología de Comunicación,  
Participación e Información.

Subcoordinación de Editorial y Gráfica.

Formación:

Luisa Guadalupe Ramírez Martínez.

Diseño de portada:

Óscar Alonso Barrón.

Primera edición: 2005.

RD-0501

D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532,

Progreso, Jiutepec, Morelos

CP 62550

Impreso en México - *Printed in Mexico*

## AUTORES

*Dennis L. Corwin.* Soil & Environmental Scientist. George E. Brown, Jr. Salinity Laboratory, USDA-ARS. 450 West Big Springs Road, Riverside, CA 92507-4617.

*Craig L. Wiegand.* Formerly Research Soil Scientist, Remote Sensing Research Unit, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, 2401 E. Business Highway 83, Weslaco, TX.

*Leonardo Pulido-Madrigal.* Especialista en Hidráulica de la Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, 62550; Jiutepec, Morelos.

*Fernando Cabrera-Carbalaj.* Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; Centro de Investigación Regional del Noroeste; Campo Experimental Valle del Mayo, Navojoa, Sonora.

*Manuel de J. Beltrán-Fonseca.* Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; Centro de Investigación Regional del Noroeste; Campo Experimental Valle del Mayo, Navojoa, Sonora.

*José Luis González-Barrios.* Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera; Gómez Palacio, Durango.

*Ignacio Sánchez-Cohen.* Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera; Gómez Palacio, Durango.

*Juan Guillermo Martínez-Rodríguez.* Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera; Gómez Palacio, Durango.

*Donald D. L. Suarez.* Director. George E. Brown, Jr. Salinity Laboratory, USDA-ARS. 450 West Big Springs Road, Riverside, CA 92507-4617.

*Carlos Rodríguez-Franco.* USDA-Agricultural Research Service-Office of International Research Programs. International Affairs Specialist. USDA-Foreign Agricultural Service Scientific Cooperation Research Program. 5601 Sunnyside Avenue, Bldg. 4-1191, Beltsville, MD 20705-5141.

*Julión Martínez-Beltrán.* Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Servicio de Recursos, Fomento y Aprovechamiento de Aguas. Dirección de Fomento de Tierras y Aguas. Roma, Italia.



## ÍNDICE

Salinity Assessment at Field and Landscape Scales Using ECa Sensing Data. <i>D. L. Corwin.</i>	11
The Plant Indicator Method for Mapping Crop Yields and Root Zone Soil Salinity in Irrigation Districts. <i>Craig L. Wiegand.</i>	21
Identificación de la salinidad del suelo y estimación del rendimiento de los cultivos con sensores remotos a la escala de un distrito de riego. <i>Leonardo Pulido-Madrigal.</i>	31
Avances de investigación del efecto de la calidad del agua de riego en el distrito de riego 038, Río Mayo. <i>Fernando Cabreva Carvajal y Manuel de J. Beltrán Fonseca.</i>	43
Avances de investigación del INIFAP CENID RASPA para evaluar la degradación de los suelos con salinidad o elementos tóxicos. <i>José Luis González Barrios; Ignacio Sánchez Cohen y Juan Guillermo Martínez Rodríguez.</i>	57
Models as a Tool for Soil Management with Examples from a Field Scale Sodic Soil Reclamation Project and Boron Leaching Studies. <i>Donald D. L. Suarez.</i>	61
Funding Opportunities for Agricultural Research. <i>Carlos Rodríguez Franco.</i>	77
Informe final. Taller de análisis de tecnologías para la identificación de suelos ensalitrados mediante percepción remota. <i>Leonardo Pulido Madrigal.</i>	85
Report of the Workshop Analysis of Technologies for Identification of Soil Salinity Through Remote Sensing. <i>Leonardo Pulido Madrigal y Carlos Rodríguez Franco.</i>	94





## PRÓLOGO

En el mundo, solamente  $1.5 \times 10^9$  ha se cultivan, de las cuales alrededor de  $0.34 \times 10^9$  ha (23%) están afectadas por sales y  $0.56 \times 10^9$  ha (37%) tienen problemas de sodio. Los suelos salinos y sódicos cubren alrededor del 10% de la superficie cultivable y existen en más de cien países. Los suelos afectados por sales no se limitan a las regiones áridas y semiáridas; en muchas otras regiones, el clima y la movilidad de las sales producen temporalmente aguas y suelo salinos.

A nivel mundial, se estima que entre 5 y 7 millones de hectáreas de tierra cultivable se pierden para la producción cada año, por la degradación del suelo; de esta cifra dos millones de hectáreas corresponden a la salinización del suelo.

En México, la salinidad es considerada un problema serio porque aproximadamente el 30% del área total de los distritos de riego del país (3.6 millones de hectáreas) está afectada por las sales en diferente grado. Esta situación es causa de que se obtengan menores rendimientos, se subutilice la infraestructura hidroagrícola y se produzca desempleo, entre otras consecuencias (Fernández, 1990; De la Peña, 1993).

El problema de afectación por sales es dinámico en el tiempo y en el espacio, por lo cual es de interés tanto del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) como del Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos (ARS), llevar a cabo en forma conjunta trabajos de investigación que permitan disponer de tecnologías aplicables en campo, para generar información sobre la ubicación y extensión de las áreas afectadas por sales. Mediante la aplicación de estas tecnologías deberán producirse mapas a la escala de una cuenca, de un distrito de riego y de una parcela, en forma económica, que den resultados de calidad y cuya elaboración sea más rápida comparada con la que actualmente se logra con los métodos tradicionales. Los mapas de salinidad así generados servirán para que autoridades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y productores dispongan de una herramienta útil para prevenir y manejar los problemas de salinidad.

Con el fin de identificar y poner en marcha proyectos que atiendan problemáticas comunes ambientales de México y Estados Unidos, el 30 de julio de 2003, se firmó el Memorandum de Entendimiento entre la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (SEMARNAT-USDA).

Para dar continuidad a los términos señalados en el citado Memorándum de Entendimiento, los días 18 y 19 de noviembre un grupo de 20 especialistas de México, de los Estados Unidos y de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), se reunieron en el Centro de Capacitación Progreso del IMTA, ubicado en Jiutepec, Morelos, para llevar a cabo el “Taller de análisis de tecnologías para la identificación de suelos ensalitrados mediante percepción remota”.

Las actividades realizadas durante estos dos días de trabajo, permitieron elaborar el siguiente documento, en el que se incluyen los trabajos que se presentaron, así como los compromisos establecidos entre los participantes.

Dr. Benjamín de León Mojarro

**TALLER DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS PARA LA  
IDENTIFICACIÓN DE SUELOS ENSALITRADOS MEDIANTE  
PERCEPCIÓN REMOTA  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004**

**WORKSHOP ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR  
IDENTIFICATION OF SOIL SALINITY THROUGH REMOTE  
SENSING  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004**

**SALINITY ASSESSMENT AT FIELD AND LANDSCAPE  
SCALES  
USING  $EC_a$  SENSING DATA**

Dennis Corwin  
USDA-ARS  
George E. Brown, Jr. Salinity Laboratory  
Riverside, CA, USA  
dcorwin@ussl.ars.usda.gov

## **INTRODUCTION**

It is estimated that 7% of the world's land area (930 million ha) is salt affected (Szabolcs, 1994). Even though salinity buildup on irrigated lands is responsible for a declining resource base for agriculture, the exact extent to which irrigated soils are salinized, the degree to which productivity is being reduced by salinity, the increasing or decreasing trend in soil salinity development, and the location of contributory sources of salt loading to ground and drainage waters are not known. Measurement, monitoring, mapping, and assessment of the spatial and temporal distribution of soil salinity are crucial pieces of information that are needed to sustain the productivity of irrigated agricultural soils.

Measurements of apparent soil electrical conductivity ( $EC_a$ ) have become one of the most frequently used measurements for mapping and assessing salinity at field and landscape scales (Corwin and Lesch, 2003, 2005a). Corwin and colleagues have demonstrated the utility of geospatial  $EC_a$  measurements in a variety of

salinity-related applications including (i) modeling salt loading to ground water (Corwin *et al.*, 1999), (ii) delineating site-specific management units for an irrigated arid-zone soil (Corwin *et al.*, 2003a; Corwin and Lesch, 2005a), and (iii) assessing soil quality of a saline-sodic soil (Corwin *et al.*, 2003b). Although each of these applications of  $EC_a$  will be discussed in the oral presentation, only the latter will be presented herein due to space limitations; therefore, it is the objective of this paper to present the practical technology and methodology for mapping, and assessing soil salinity (and associated soil properties) using geospatial  $EC_a$  measurements to characterizing spatio-temporal changes in soil quality at a drainage water reuse site.

## MATERIALS AND METHODS

This study is part of an on-going, multi-disciplinary collaboration investigating the sustainability of drainage water reuse on forage production as an alternative method for the disposal of drainage water in California's San Joaquin Valley (Kaffka *et al.*, 2002; Corwin *et al.*, 2003b). After an initial soil quality assessment in August 1999, an assessment was conducted in April 2002, followed by a third assessment in the winter of 2004, and a final assessment to be conducted in the spring of 2007. The data presented shows spatio-temporal trends in soil quality from August 1999 to April 2002. Details of the methodology can be found in Corwin *et al.* (2003b, 2005).

### *Study site description*

The study site is a 32.4-ha saline-sodic field (fine, montmorillonitic, thermic, Typic Natrargid) located on Westlake Farm on the west side of the San Joaquin Valley (Fig. 1).

### *EC<sub>a</sub> survey and EC<sub>a</sub>-directed soil sampling*

An initial  $EC_a$  survey was conducted on 12–16 Aug. 1999 using mobile electromagnetic induction (EM) equipment. The  $EC_a$  survey followed the protocols

**Figure 1. Site map of the Westlake Farm study site. (Taken from Corwin *et al.*, 2005).**



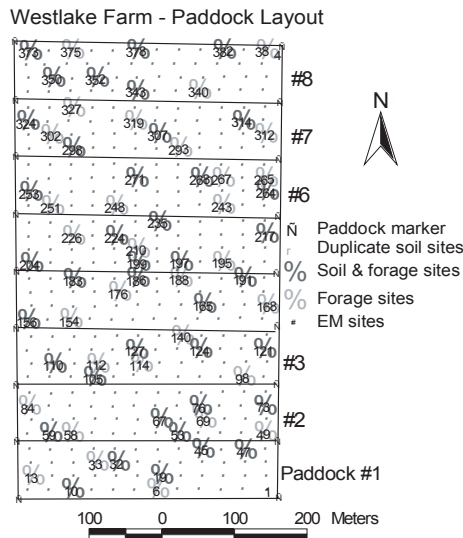
outlined by Corwin and Lesch (2005b). The survey consisted of a grid of  $EC_a$  measurements arranged in a 4 (row) x 12 (position within row) pattern within each of 8 paddocks for a total of 384 sites (Fig. 2). The spacing between the 384 sites was approximately 20 m in the N-S direction and 30 m in the E-W direction. All 384 sites were geo-referenced to sub-meter precision with GPS. Measurements of  $EC_a$  were taken using a EM38 unit<sup>1</sup> (Geonics Ltd., Mississauga, Ontario, Canada) with the coil configuration oriented in the vertical ( $EM_v$ ) and in the horizontal ( $EM_h$ ) position. Follow-up  $EC_a$  surveys were conducted in Apr. 2002 and Dec. 2004.

The  $EC_a$  measurements taken in 1999 were used to establish the location of 40 sites where soil core samples were taken. A model-based,  $EC_a$ -directed soil sampling approach, specifically a spatial response surface (SRS) sampling design, was used to locate the 40 sample sites.

#### Soil core sampling and soil analyses

At each of the 40 sites, soil core samples were taken at 0.3-m increments to a depth of 1.2 m. To observe spatio-temporal changes, soil core samples taken in 19–23 Aug. 1999 were compared to samples taken 32 months later (i.e., 15–17 Apr. 2002).

**Figure 2. Paddock layout showing the sites where  $EC_a$  was measured with electromagnetic induction, combined soil and forage sites, forage samples sites, and duplicate soil sites. (Taken from Corwin *et al.*, 2005).**



<sup>1</sup> The citation of particular products or companies is for the convenience of the reader and does not imply any endorsement, guarantee, or preferential treatment by the U.S. Department of Agriculture.

Soil cores were analyzed for physical and chemical properties deemed important for soil quality assessment of an arid zone soil whose function was forage production for livestock.

Soil chemical properties included: electrical conductivity of the saturation extract ( $EC_e$ );  $pH_e$ ; anions ( $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ) and cations ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ) in the saturation extract; trace elements (B, Se, As, Mo) in the saturation extract;  $CaCO_3$ ; gypsum; cation exchange capacity (CEC); exchangeable  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{++}$  and  $Ca^{++}$ ; ESP; SAR; total C; and total N. Soil physical properties included saturation percentage (SP), volumetric water content ( $\theta_v$ ), bulk density ( $\rho_b$ ), and clay content.

#### *GIS and map preparation*

To display and manipulate the spatial data a commercial geographic information system (GIS) was used (i.e., ArcView 3.1; ESRI, 1992).

## **RESULTS AND DISCUSSION**

Sustainability of drainage water reuse at the Westlake Farm site depends upon spatio-temporal changes to soil properties that either detrimentally impact forage production or detrimentally impact livestock health. Increased salinity reduces forage yields due to toxic ion (e.g., Na toxicity) and osmotic effects. Infiltration of low EC water can be adversely affected by high SAR levels in soil, reducing the available water for forage. There is a narrow range over which B is beneficial to plants. The digestive system of ruminant livestock is adversely affected by forage containing elevated levels of Mo ( $>3-5 \text{ mg kg}^{-1}$ ). These factors established  $EC_e$ , SAR, Mo, and B as the most important properties for evaluating the study site's soil quality.

#### *Correlation between $EC_e$ and soil properties*

Table 2 provides the 1999 and 2002 correlation coefficients between  $EC_a$  (both  $EM_h$  and  $EM_v$ ) and soil properties over the 0–1.2 m depth. In most instances there is little change between 1999 and 2002. Of particular concern are the properties of  $EC_e$ , SAR, Mo, and B, which are significantly correlated with  $EC_a$  at the  $\leq 0.01$  level.

#### *Spatio-temporal trends in $EC_e$ , SAR, B, and Mo*

The general spatio-temporal trends with depth for  $EC_e$ , SAR, B, and Mo were examined using mixed linear ANOVA. Table 3 shows the significance levels (p-values) corresponding to the F-tests for no dynamic spatial variation and no shift in the mean level over time for each of these soil properties. In the case of  $EC_e$ , dynamic spatial variation is present in the 0–0.3 m depth increment ( $p < 0.01$ ) and in the 0.3–0.6 m depth increment ( $p < 0.05$ ). The mean levels are reduced in these two sample depth increments (see Table 4). Overall, the salinity results suggest that leaching of salts has occurred in the near surface depth of 0–0.6 m with negligible leaching below 0.6 m.

**Table 2. Correlation coefficients between EMI  $EC_a$  (both  $EM_h$  and  $EM_v$ ) and soil properties measured over 0–1.2 m for 1999 and 2002. N=40. (Taken from Corwin *et al.*, 2005).**

Soil Property	$EM_h EC_a$	$EM_v EC_a$	$EM_h EC_a$	$EM_v EC_a$
	1999		2002	
$\theta_v$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.62**†	0.64**†	0.59**	0.63**
$\rho_b$ (Mg/m <sup>3</sup> )	-0.35†	-0.31†	-0.34	-0.30
Clay (%)	0.29‡	0.25‡	0.33	0.28
$EC_e$ (dS/m)	0.74**	0.78**	0.89**	0.84**
pH <sub>e</sub>	0.01	-0.01	0.40**	0.43**
SP (%)	0.25	0.22	0.22	0.30
Anions in saturation extract (mmolc/L)				
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.05	0.06	0.56**	0.59**
Cl <sup>-</sup>	0.34*	0.43**	0.77**	0.81**
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.47**	0.34*	—	—
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.81**	0.82**	0.87**	0.79**
Cations in saturation extract (mmolc/L)				
Na <sup>+</sup>	0.76**	0.80**	0.88**	0.83**
K <sup>+</sup>	0.69**	0.69**	0.74**	0.71**
Ca <sup>++</sup>	0.18	0.23	0.07	0.13
Mg <sup>++</sup>	0.74**	0.65**	0.74**	0.61**
Exchangeable cations (mmolc/kg)				
Na <sup>+</sup>	0.19	0.21	0.68**	0.68**
K <sup>+</sup>	-0.15	-0.15	-0.13	-0.01
Ca <sup>++</sup>	-0.34*	-0.36*	0.12	0.15
Mg <sup>++</sup>	0.14	0.14	0.14	0.12
SAR	0.64**	0.70**	0.84**	0.82**
ESP (%)	0.31*	0.32*	0.28	0.30
B (mg/L)	0.48**	0.42**	0.43**	0.40**
Se (:g/L)	0.56**	0.51**	—	—
As (:g/L)	0.15	0.15	—	—
Mo (:g/L)	0.58**	0.45**	0.45**	0.40**
CaCO <sub>3</sub> (g/kg)	-0.44**	-0.37**	-0.28	-0.28
Gypsum (g/kg)	0.19	0.18	0.13	0.10
Total C (g/kg)	-0.52**§	-0.49**§	-0.40**	-0.29
Total N (g/kg)	-0.13§	-0.10§	-0.21	-0.08

\*Significant (test for  $r^* = 0$ ) at  $P \leq 0.05$  level; \*\* Significant (test for  $r^* = 0$ ) at  $P \leq 0.01$  level; † N=31; ‡ N=41; § Measured over 0–0.6 m.

Dynamic spatial variation is present for SAR in the 0–0.3 m depth increment ( $p < 0.01$ ) and in the 0.3–0.6 m depth increment ( $p < 0.05$ ), and narrowly misses being significant in the lower two depth increments. Unlike the  $EC_e$  levels, the mean SAR levels appear to be significantly reduced across all four depth increments. For B, dynamic spatial variation appears to be clearly present ( $p < 0.01$ ) in all but the first depth increment. The mean B level is significantly reduced in the 0–0.3 m depth increment, and significantly elevated in the 0.6–0.9 and 0.9–1.2 m depth increments. Mean Mo levels appear to be reduced ( $p < 0.01$ ) in all but the 0.6–0.9



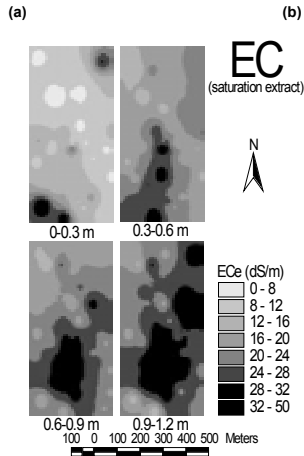
**Table 3. F-test significance levels associated with mixed linear modeling result. (Taken from Corwin *et al.*, 2005).**

Chemical property	Sample depth increment (m)	Pr>F for dynamic spatial variation	Pr>F for shift in mean level
EC <sub>e</sub>	0-0.3	0.0002	0.0415
	0.3-0.6	0.0269	0.0006
	0.6-0.9	0.1610	0.8869
	0.9-1.2	0.3187	0.2700
SAR	0-0.3	0.0003	0.0135
	0.3-0.6	0.0158	0.0001
	0.6-0.9	0.0670	0.0145
	0.9-1.2	0.0562	0.0006
B	0-0.3	0.8459	0.0022
	0.3-0.6	0.0051	0.8597
	0.6-0.9	0.0025	0.0001
	0.9-1.2	0.0084	0.0002
Mo	0-0.3	0.5153	0.0033
	0.3-0.6	0.0028	0.0022
	0.6-0.9	0.1158	0.0579
	0.9-1.2	0.0642	0.0076

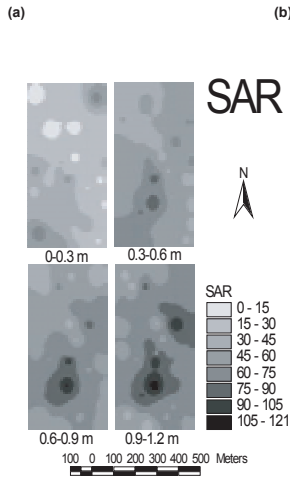
**Table 4. Mean, range, standard deviation (SD), and coefficient of variation (CV) statistics of EC<sub>a</sub>, SAR, B, and Mo for 1999 and 2002. (Taken from Corwin *et al.*, 2005).**

Soil Property	Mean	Min.	Max.	SD	CV	Mean	Min.	Max.	SD	CV
<u>Depth: 0-0.3 m</u>			1999			2002				
EC <sub>a</sub> (dS/m)	13.0	5.6	35.7	7.5	57.8	11.43	4.83	30.60	6.06	53.05
SAR	28.2	8.3	70.2	16.5	58.7	23.46	5.62	59.50	14.4	61.39
B (mg/L)	17.0	1.1	42.5	8.2	48.2	14.21	2.64	33.23	7.35	51.75
Mo (µg/L)	862.3	442.0	3043	532.5	61.8	632.1	150.0	3291	592.1	93.66
<u>Depth: 0.3-0.6 m</u>			1999			2002				
EC <sub>a</sub> (dS/m)	20.2	13.5	34.5	5.3	26.0	17.46	6.11	34.00	6.55	37.48
SAR	51.4	30.3	89.5	12.9	25.1	40.31	9.13	78.87	15.31	37.99
B (mg/L)	19.0	13.6	38.1	5.6	29.7	19.06	6.69	32.35	6.09	31.97
Mo (µg/L)	750.5	180.0	2488	430.2	57.3	576.5	220.0	1783	375.8	65.18
<u>Depth: 0.6-0.9 m</u>			1999			2002				
EC <sub>a</sub> (dS/m)	22.5	9.7	43.2	6.5	28.7	22.49	7.94	37.90	6.96	30.96
SAR	59.0	24.0	107.6	16.6	28.1	53.35	16.26	91.90	16.00	30.00
B (mg/L)	17.5	9.4	31.3	4.8	27.2	21.49	11.17	34.19	5.84	27.17
Mo (µg/L)	780.5	183.0	1756	338.9	43.4	661.6	252.0	2372	451.5	68.24
<u>Depth: 0.9-1.2 m</u>			1999			2002				
EC <sub>a</sub> (dS/m)	25.2	8.0	49.7	7.9	31.5	24.30	7.84	45.30	8.14	33.51
SAR	64.9	16.8	120.2	19.5	30.0	57.46	16.51	103.1	17.96	31.25
B (mg/L)	17.9	6.5	31.8	6.3	35.0	21.71	7.89	39.0	6.59	30.36
Mo (µg/L)	946.9	330.0	2856	450.7	47.6	720.7	240.0	2991	451.5	62.65

**Figure 3.** IDW interpolated maps of (a)  $EC_e$  for 1999 at depth increments of 0-0.3, 0.3-0.6, 0.6-0.9, and 0.9-1.2 m and (b) change in  $EC_e$  from 1999 to 2002 at depth increments of 0-0.3 and 0.3-0.6 m. (Taken from Corwin *et al.*, 2005).



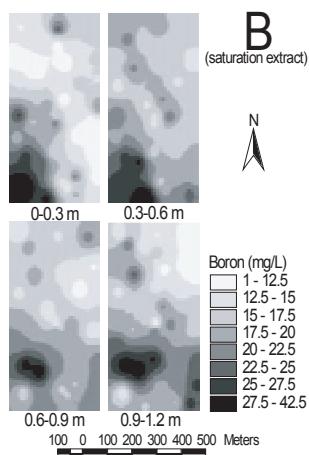
**Figure 4.** IDW interpolated maps of (a) SAR for 1999 at depth increments of 0-0.3, 0.3-0.6, 0.6-0.9, and 0.9-1.2 m and (b) change in SAR from 1999 to 2002 at depth increments of 0-0.3 and 0.3-0.6 m. (Taken from Corwin *et al.*, 2005).



m depth increment, which narrowly misses being significant at the 0.05 level. The degree of dynamic spatial variation in the Mo pattern appears uncertain, only one of the four dynamic variation tests can be judged significant.

To visually evaluate their spatio-temporal trends, 1999 baseline and spatio-temporal difference maps for  $EC_e$ , SAR, and B are shown in Figs. 3 through 5, respectively.  $EC_e$  and SAR display similar spatial patterns and temporal changes

**Figure 5. IDW interpolated maps of (a) B for 1999 at depth increments of 0-0.3, 0.3-0.6, 0.6-0.9, and 0.9-1.2 m and (b) change in B from 1999 to 2002 at depth increments of 0-0.3 and 0.3-0.6 m. (Taken from Corwin et al., 2005).**



(see Figs. 3 and 4). These similarities are the consequence of the dominance of  $\text{Na}^+$  salts in the total salinity, so similarities would be expected. Figures 3b and 4b show the changes that have occurred in  $\text{EC}_c$  and SAR, respectively, over the 32-mn study period. The blue areas represent areas of decreases in salinity and SAR, while red areas indicate areas of increases from 1999 to 2002. Comparison of Figs. 3b and 4b shows that general leaching patterns are similar. It is clear from the spatial patterns and from Table 3 that (i) leaching is occurring and (ii) leaching pathways are complex and far from uniform. Tables 3 and 4 indicate that leaching occurs within the top 0.6 m for salinity and extends through the top 1.2 m for sodium.

The dominant spatial feature of B distribution for the 1999 assessment is high B (i.e.,  $> 10$  mg/L) in the southwest corner (Fig. 5a). Boron levels peak at the 0.3–0.6 m depth increment. From 1999 to 2002, mean B for the entire field decreases in the top 0–0.3 m by 16%, remains the same from 0.3–0.6 m, and increases below 0.6 m (Table 4). B has leached primarily from the top 0.3 m and to some extent from 0.3–0.6 m into the depths below 0.6 m where it is accumulating. The strong adsorption of B onto clay surfaces retards the movement of B causing it to leach only near the soil surface and to accumulate at the deeper depths (i.e., 0.6–1.2 m).

The spatial distribution of Mo in 1999 was similar to that of  $\text{EC}_c$ , SAR, and B, with the highest levels occurring in the southwest corner. Levels of Mo consistently decrease 15–27% from 1999 to 2002 for each depth increment (Table 4). This reduction appears to be consistently significant (or nearly significant) throughout the soil profile (Table 3). Since the F-tests for dynamic spatial variation were generally not significant, spatio-temporal trend maps for Mo are not shown. The substantial and almost uniform decrease in Mo for each depth increment from 1999 to 2002 indicates that Mo is highly mobile at the study site.

## **CONCLUSION**

Data and statistical analyses have been presented that demonstrate the flexibility and utility of EC<sub>a</sub>-directed soil sampling as a basis for assessing management-induced spatio-temporal changes in soil quality. While only one type of management applied at one location was considered, the implication extends beyond the localized, though significant, finding that EC<sub>a</sub> can be used to monitor drainage water reuse in a saline-sodic soil system. More importantly, when EC<sub>a</sub> is correlated with soil properties associated with soil quality (and/or productivity), EC<sub>a</sub>-directed soil sampling is an effective tool to broadly evaluate the spatio-temporal impact of management on soil resources. Assessment and interpretation guidelines are currently available to document the effects of current and alternative soil and crop management strategies on soil resources (Corwin and Lesch, 2003, 2005b).

## **ACKNOWLEDGMENTS**

The author wishes to acknowledge the collaborative assistance of Scott Lesch, Stephen Kaffka, James Oster, Pete Shouse, and Jim Ayars on the collective projects, and the past technical assistance of Clay Wilkinson, Jack Jobses, JoAn Fargerlund, and Harry Forster.

## **REFERENCES**

- Corwin, D.L. & Lesch, S.M. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. *Agron. J.* 95 (3): 455–471.
- Corwin, D.L. & Lesch, S.M. 2005a. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture, *Comput. Electron. Agric.* (in press).
- Corwin, D.L. & Lesch, S.M. 2005b. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: Survey protocols. *Comp. Electron. Agric.* (in press).
- Corwin, D.L., Carrillo, M.L.K., Vaughan, P.J., Rhoades, J.D. & Cone, D.G. 1999. Evaluation of GIS-linked model of salt loading to groundwater. *J. Environ. Qual.* 28: 471–480.
- Corwin, D.L., Kaffka, S.R., Hopmans, J.W., Mori, Y., Lesch, S.M. & Oster, J.D. 2003b. Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline sodic soil, *Geoderma* 114 (3–4): 231–259.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M., Shouse, P.J., Soppe, R. & Ayars, J.E. 2003a. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity, *Agron. J.* 95: 352–364.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M., Oster, J.D. & Kaffka, S.R. 2005. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma* (in press).
- ESRI, 1992. ArcView 3.1. ESRI: Redlands, CA, USA.
- Kaffka, S.R., Corwin, D.L., Oster, J.D., Hopmans, J., Mori, Y., van Kessel, C., van Groenigen, J.W., 2002. Using forages and livestock to manage drainage water in the San Joaquin Valley: Initial site assessment. Kearney Foundation Report: 88–110. Univ. of California, Berkeley, CA.

- Rhoades, J.D., & Loveday, J. 1990. Salinity in irrigated agriculture. In B.A. Stewart & D.R. Nielsen (eds.), *Irrigation of Agricultural Crops*. Agron. Monogr. No. 30: 1089–1142. Soil Science Society of America: Madison, WI, USA.
- Szabolcs, I. 1994. Soils and salinisation. In M. Pessarakali (ed.) *Handbook of Plant and Crop Stress*: 3–11. Marcel Dekker, New York, NY.

TALLER DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS PARA LA  
IDENTIFICACIÓN DE SUELOS ENSALITRADOS MEDIANTE  
PERCEPCIÓN REMOTA  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004

WORKSHOP ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR  
IDENTIFICATION OF SOIL SALINITY THROUGH REMOTE  
SENSING  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004

**THE PLANT INDICATOR METHOD FOR MAPPING  
CROP YIELDS AND ROOT ZONE SOIL SALINITY IN  
IRRIGATION DISTRICTS**

Craig L. Wiegand

Formerly Research Soil Scientist, Remote Sensing Research Unit,  
Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture  
2401 E. Business Highway 83, Weslaco, TX  
craigwiegand@aol.com

The Plant Indicator Method (PIM) of mapping soil salinity and crop yields at irrigation and river basin scales is described after reviewing the reflectance characteristics of plant canopies that distinguish them from soils and water, the other components of the agricultural landscape. It is shown that reflectance observations in the visible red and near-infrared wavelength intervals of sunlight can measure the photosynthetic size of plant canopies. Expressed as vegetation indices (VI) they are shown by equations (referred collectively as spectral components analysis) to relate to leaf area index (LAI), absorbed photosynthetically active radiation (APAR), crop yield, and root zone soil salinity as revealed by plant growth response to soil salinity.

In the PIM, electrical conductivity of saturated soil extracts (ECe) and crop yield (Y) are measured at sample sites in a few representative fields and the digital counts for the same sites are extracted from the satellite data for cropped fields already entered into a geographic information system (GIS). Regression equations are developed that estimate root zone weighted ECe (WECE) and crop yield, respectively, from the satellite observations. Then every pixel in the scene is submitted to the regression equations, the estimates are sorted into yield (or salinity) intervals, the number of pixels in each category is cumulated, and each category is assigned a color. This enables color maps of soil salinity and yields to be created.

The fraction of planted area that is salt-affected, and the yield losses due to salinity are well estimated. Image analysis software that does unsupervised classification into the requested number of spectrally distinct classes tabulates the mean of each band for each class. Insertion of these spectral class means into the regression equations also converts these classification maps to WECe and yield maps.

The PIM method maps both crop yield and soil salinity efficiently at irrigation and river basin scales and gives quantitative estimates of the extent (number of hectares) and severity (yield losses) of root zone salinity. The technology used is off-the-shelf. The yield losses, that can be summed across salinity classes, times current market prices provide the cost [to farmers and society] information needed for cost: benefit analyses of proposed reclamation and amelioration efforts.

## **INTRODUCTION**

Worldwide, 45.4 million hectares (Mha) of irrigated land are salt affected (Ghassemi *et al.*, 1995) and approximately 1 Mha of cropland become too saline for economic crop production annually (Smedema, 1995). The increase in world population combined with a fresh water supply that is fixed and already nearly fully exploited means that to maintain agricultural productivity, we must use every cost effective management practice to delay further salinization, ameliorate salt-affected irrigated land, and dispose of return flow and drainage water in ways that minimize the degradation of downstream water resources.

In a report to FAO, Rome, Italy by the author (Wiegand, 2000) numerous proposed methods of assessing soil salinity were reviewed. In it, an approach was recommended that integrates visible red and near infrared wavelength satellite observations of crop growth in response to salinity, ground based electromagnetic induction measurements, plant and soil sampling, geographic information systems (GIS), global positioning systems (GPS), image analysis, and statistics to map not only soil salinity of the root zone but also crop yields at river basin or regional scales. The purpose of this paper is to explain the theory/rationale behind the method as well as the method itself. We named it the plant indicator method (PIM) (Wiegand, 2000).

## **SPECTRAL CHARACTERISTICS OF PLANTS, SOIL, AND WATER**

The chlorophyll and other pigments in green leaves of plants absorb the visible (500-700nm), especially the red (Red) wavelength interval very efficiently leaving little energy available for reflection or transmittance. However, in the near infrared, (750-1350nm) wavelength interval plant leaves reflect about half and transmit about half of the impinging solar irradiance and absorb almost none. A portion of the NIR energy transmitted through the upper leaves in the plant canopy is reflected back upward from leaves deeper in the canopy; an asymptotically approached maximum reflectance, termed infinite reflectance, is approached at a leaf area index (LAI) of 6 to 8. On the other hand, the reflectance minimum, or infinite reflectance, for the visible red wavelength is reached at between 1 and 2 leaf layers. Since reflectance increases in the NIR band and decreases in the Red

band with increasing canopy size and density, the healthier the vegetation and the larger the LAI the larger the differences between the NIR and Red responses.

Soils are generally more reflective than plants in the Red and less reflective than vegetation canopies in the NIR. In both bands soils reflect less energy when wet, roughened, and high in organic matter, than the same soils that are drier, smoother, or lower in organic matter. Soils with salt crystals on the surface reflect more light in both bands than soils without salt crystals. Soils fall on a line in 2-dimensional NIR and Red space when the response in the two bands is graphed against each other.

Water the other feature of interest in agricultural landscapes absorbs most of the solar irradiance in the NIR wavelength interval. Muddy water has about the same reflectance in the Red band as soil, but clear water is less reflective than vegetation.

The described differences in reflectance for vegetation canopies, soil, and water provide the contrast that makes it possible to unambiguously distinguish among them so that highly accurate images and maps (georeferenced images) can be produced. In addition, within the vegetation category, the response sensitivity to vegetation density enables the responses to be surrogates of leaf area index (LAI), intercepted or absorbed photosynthetically active radiation (IPAR, APAR), photosynthetic size of the canopy, and yield (Y) or relative yield ( $Y/Y_0$ ) where  $Y_0$  is the yield in the absence of stresses.

Spectral observations are currently available from several systems mounted in orbiting spacecraft with ground resolution ranging from about 1.5 to 30 m. Spectral intervals (called "bands" in the remote sensing literature) as narrow as 10nm are used. Scene size ranges from 8km x 8km to 185km x 185km and typically at least four bands are offered. Such data are suitable for salinity assessment in irrigation districts and river basins. The systems provide an observation in every band for every pixel (picture element) within each ground scene. Data are comparable worldwide because the same instrumentation and data preprocessing are employed worldwide.

## **VEGETATION INDICES**

Various spectral vegetation indices (VI) have been developed that reduce the multiband observations to a single number that is typically a sum, difference, ratio, or other linear combination of reflectance factors or digital counts. The most commonly used VI are the normalized difference vegetation index (Tucker *et al.*, 1979),

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}-\text{Red})/(\text{NIR}+\text{Red}) \quad [1]$$

and the perpendicular vegetation index (Richardson and Wiegand, 1977) which is most conveniently calculated from the equation for the perpendicular distance from a point to a line, a standard mathematical formula. When NIR is on the



abscissa and Red is on the ordinate, the equation is

$$PVI = [a_1(NIR) - Red + a_0] / [1 - (a_1)^2]^{1/2} \quad [2]$$

Wherein  $a_0$  = the soil line intercept, and  
 $a_1$  = the slope of the soil line.

Sample observations of bare soil areas within the scene(s) establish the soil line. There are procedures for calculating spectral indices for any number of bands (Jackson, 1983). For the two visible and two near infrared bands commonly used on commercial satellites, the defining equation for the “greenness” or vegetation component has the form

$$GRN4 = -b_1 (\text{Band}1) - b_2 (\text{Band} 2) + b_3 (\text{Band} 3) + b_4 (\text{Band} 4). \quad [3]$$

## SPECTRAL COMPONENTS ANALYSIS

Wiegand and Richardson (1984, 1990) recognized that plants express their development, stress response, and yield capability through the spectrally observable canopy and developed equations referred to collectively as “spectral components analysis” (SCA) for linking spectral observations to plant processes. They include:

$$APAR (VI) = LAI (VI) \times APAR (LAI) \quad [4]$$

and

$$Y(VI) = LAI(VI) \times Y(LAI). \quad [5]$$

For application to soil salinity a third equation is:

$$Y(VI) = Y(WECe) \times WECe (VI) \quad [6]$$

(Wiegand and Lingle, 1994a; Wiegand *et al.*, 1994b).

In these equations,

APAR = absorbed photosynthetically active radiation  
 VI = vegetation index of choice  
 LAI = leaf area index  
 Y = economic yield (salable plant part—grain, fruit, root, biomass...  
 WECe = weighted electrical conductivity of root zone soil saturation extracts, dS m<sup>-1</sup>.

We have used WECe = 0.6 (0-30cm ECe) + 0.4 (30-60cm ECe) and WECe = 0.5 (0-30 cm ECe) + 0.3 (30-60cm ECe) + 0.2 (60-90cm ECe).

Equation [4] is verbalized, e.g., as APAR as a function of VI is equal to LAI as a function of VI times APAR as a function of LAI.

In equation [6] we estimate WECe for each pixel of cropland in the scene of interest from the spectral VI, even though we know that salinity causes the variation in VI (estimating VI from WECe has little utility). If one has electromagnetic induction observations calibrated to the site or scene of interest and paired yield observations, yield can be estimated from the first right hand term in Eq. [6]. The Y(WEC) term provides yield loss information needed for cost: benefit analysis.

In the PIM method, root zone salinity and actual yields are sampled at representative sites in the fields of crops of interest, and the spectral data for those sample sites are extracted from the satellite observations. From those sample data, regression equations are developed that estimate WECe from VI, and yield from VI. Then the respective equations are applied pixel by pixel for all cropland pixels of interest to estimate soil salinity and yield “wall to wall”. Turnrows, roads, borrow ditches, canals, residences, etc., are deleted to leave only pixels within crop fields.

The 30m ground resolution of Landsat-7 extended thematic data (ETM) data available since 1999 yield 11 estimates of Y and WECe per hectare, the 20m ground resolution SPOT satellite sensor data available since 1986 gives 25 estimates per hectare, and the 2.8m resolution QuickBird launched in 2001 gives 1276 estimates per hectare.

In addition, most satellite systems offer a panchromatic band within the wavelength interval 500-900nm with much higher resolution than the individual scanner bands. For Landsat-7 (July 1999 and later), the “pan” band has 15m resolution; the SPOT “pan” band has 10m resolution; and QuickBird offers 0.7 m “pan” data (Wiegand, 2000; Yang *et al.*, 2003). The narrow band data can be resampled to the scale of the panchromatic band. This gets spectral data down to the ground size represented by yield monitor readings made per second. For corn, e.g. the combine swath width was 4.7m and the forward travel speed was 2.0m/sec or 4.5 miles per hour. (Yang, *et al.*, 2001).

## **PLANT INDICATOR METHOD PROCEDURES**

The procedures used have been presented with some variations by Wiegand *et al.* 1994, 1996; Madrigal *et al.* 1997, 2003; Wiegand, 2000; Yang *et al.* 2001). Very briefly they involve use of the following:

1. A geographic information system (GIS) so that all data can be rectified to a standard reference system. The location of sample sites and other points of interest are usually input from differential GPS readings. Since all the data points have a latitude and a longitude associated with them the information can be mapped.
2. Preprocessed satellite spectral observations from commercial suppliers. The user usually uses control points within the scene to further rectify the observations to the map base.
3. Measurements of ECe and plant yields at the sample sites. (See “Discussion” for more details.)

4. Programs for image analysis (unsupervised and/or supervised classifications) and statistics.
5. Necessary equipment, workers knowledgeable in all the above areas, and funding.

To calibrate observations to local conditions, the WECe and yield observations from the sample sites are regressed on the spectral band observations or VI derived from them (as extracted from the whole scene data) and checked for reality (See Discussion section). If multiple crops are studied, this is done crop by crop. Then the WECe and yield can be calculated for every pixel in the data set and the number of pixels in predetermined categories can be counted. The known pixel size times the number of pixels in each category enables the area in each category to be converted to hectares. Likewise, the number of pixels in each category divided by number of pixels in all categories for a crop is the decimal fraction in each category for that crop. Also, the difference between the mean yield and the nonsaline category (or class) and the mean yield of each of the salt-affected categories is the yield loss for the respective categories. The method provides high quality information on the cost of soil salinity to society, farmers, FAO, the World Bank, etc. probably the best that has ever been available.

For salt tolerant crops such as cotton, grain sorghum, and wheat, logical salinity categories are 0-4, 4-8, 8-12, 12-16, 16-20, and  $> 20 \text{ dSm}^{-1}$ . For salt sensitive crops such as corn and sugarcane, logical categories are 0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10 and  $> 10 \text{ dSm}^{-1}$ . Logical yield categories for grain crops is 0-1, 1-2, 2-3... or 0-1.5, 1.5-3.0, 3.0-4.5...metric tons hectare<sup>-1</sup>. For sugarcane, which can yield up to 150 metric tons of stalks hectare<sup>-1</sup>, the difference between yield categories can be as much as 30 metric tons hectare<sup>-1</sup>. Each salinity or yield category can be assigned a color and a color map printed.

Another technique is to use unsupervised classification. In it the user specifies the number of spectrally distinct classes and the image analysis program produces them and displays them in color. The program also lists the number of pixels in each class and the digital value of the spectral band means for each class. These mean digital values when entered in the sample site regression equations then define the mean salinity and mean yield of each spectral class. We have specified 16 classes (Wiegand *et al.*, 1996) and averaged the mean salinity (or yields) of adjacent classes to estimate the upper and lower limits of each class. Classes whose salinity (or yield) are close together can be combined into fewer classes. Usually 6 is adequate.

## **DISCUSSION**

### *Timing of spectral observations*

Spectral observations are best made just prior to and continuing through most of the reproductive stage of plant development, a period of 6 to 8 weeks duration in tropical and semitropical climates and longer at higher latitudes where lower ambient temperatures slow the rate of crop senescence. Specifically our experience for several crops is: for grain sorghum and corn it is the time interval from 2 to 3

weeks prior to heading (sorghum) or tasseling (corn) until physiological maturity of the grain (black layer formation). For cotton, it is from early boll set until first open boll. For wheat (also oats and barley), it is from stem elongation to the milk stage of grain filling (Aase and Siddoway, 1981). For sugarcane, the spectral observations can be made anytime between 70% ground cover and harvest; lower leaves that senesce are replaced by new leaf growth at the top of the canopy keeping the VI high and stable for 6 or more months.

### *Plant and Soil Sampling*

Sample sites are simpler to locate in the spectral data manually if located on a grid, but with global positioning system (GPS) coordinates for sample sites embedded in georeferenced spectral scenes the sample sites can be located automatically. In either case, for 30m ground resolution spectral observations, we locate sample sites no closer than 40m from the ends and sides of fields and 60m apart on transects in the directions of the rows. The sample sites need to fall at sites that have salinities over the full range from non affected to just saline enough to be barren. Even the most tolerant crop plants (cotton sorghum) either fail to emerge or die as seedlings at WECe in the 18-20 dSm<sup>-1</sup>, so the soil is bare. Therefore, for regressing WECe against yield and VI, sites with WECe > 20 dSm<sup>-1</sup> should be deleted. Likewise, nonsaline sites (WECe < 2) should not exceed about 15% of the sample. In short, the data set needs to represent the salinities that affect plant growth as well as the end points.

If the threshold salinity, the salinity that begins affecting yield, (Maas, 1990; Maas and Hoffman, 1990) is known the data set can be segmented into two sets; one for data points for WECe less than the threshold value and another for > the threshold value and the two data sets regressed separately. However, this is tricky for real world data taken under stressful conditions (high temperatures, water deficits, etc.) because the osmotic stress of soluble salts adds to the matric stress of water deficits. For example, the threshold salinity for grain sorghum is reported to be 6 dSm<sup>-1</sup> (Maas and Hoffman, 1990). In field data, however, sometimes data indicates a reduction in growth (VI observations) and yield at WECe > than approximately 2 dSm<sup>-1</sup> so the data set may not need to be segmented. My bias is to believe what the plants are telling me. In any case, soil salinity usually overwhelms other sources of variation when soils are salt-affected. Plant responses to differing management practices and stresses such as foliar diseases cause smaller responses in VI. Drought will occur some years and not in others; compared with a good year drought's effect on yield can also be quantified.

## **REFERENCES**

- Aase, J.K. and F.H. Siddoway. 1981. Assessing winter wheat dry matter production via spectral reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.* 11: 267-277.
- Ghassemi, F., A.J. Jakeman, and H.A.Nix. 1995. *Salinization of Land and Water Resources. Human Causes, Management and Case Studies* CAB INTERNATIONAL, Walling, Oxon, United Kingdom 526 pp.

- Jackson, R.D. 1983. Spectral indices in n-space. *Remote Sens. Environ.* 13: 409-421.
- Madrigal, L.P., C.L. Wiegand, C.R. Zavaleta, and Steve Neck. 1997. Imágenes de satélite para identificar la salinidad del suelo en los distritos de riego. *Terra* 15(2): 201-210.
- Madrigal, L.P., C.L. Wiegand, J.G. Meraz, B.D.R. Rubio, X.C. Estrada, and O.L. Ramirez. 2003. La salinidad del suelo y su efecto en el rendimiento de los cultivos estudiados con imágenes de satélite en tres distritos de riego. *Ingen. Hidráulica en México*. XVIII (2): 83-97.
- Maas, E. V. 1990. Crop salt tolerance. In: Tanyi, K.K. (ed.): *Agriculture Salinity Assessment and Management*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71, pp. 262-304. Amer. Soc. Civil Engineers, New York.
- Maas, E.V. and G.J. Hoffman. 1997. Crop salt tolerance – current assessment. *J. Irrig. And Drainage* 103 (IR2): 115-134
- Richardson, A.J. and C.L. Wiegand. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng.* 43: 1541-1552.
- Smedema. L.K. 1995. Salinity control of irrigated land. pp. 144-150. In: *Use of Remote Sensing Techniques in Irrigation and Drainage*. Proc. of Expert Consultations (Montpellier, France 2-4 Nov. 1993). Water Report No. 4. A. Vidal (ed.), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Tucker, C. J., J. H. Elgin, J.E. McMurtrey, III and C.J. Fan. 1979. Monitoring corn and soybean crop development with hand held radiometer spectral data. *Remote Sens. Environ.* 8: 237-248.
- Wiegand, C.L. and A.J. Richardson. 1984. Leaf area, light interception, and yield estimates from spectral components analysis. *Agron. J.* 76: 543-548.
- Wiegand, C.L. and A.J. Richardson. 1990. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration, and yield: I. Rationale. *Agron J.* 82: 623-629.
- Wiegand, C.L. and S.E. Lingle. 1994a. Effect of soil salinity on growth and yield of Sugarcane, pp. 378-379. In "Trans 15<sup>th</sup> World Cong. Of Soil Science (Acapulco, Mexico, 10-16 July 1994). Vol 3b.
- Wiegand, C.L., J.D. Rhoades, D.E. Escobar, and J.H. Everitt. 1994b. Photographic and videographic observations for determining and mapping the response of cotton to salinity. *Remote Sens. Environ.* 49: 212-223.
- Wiegand, C., G. Anderson, S. Lingle, and D. Escobar. 1996. Soil salinity effects on crop growth and yield – Illustration of an analysis and mapping methodology for sugarcane. *J. Plant Physiol.* 148: 418-424.
- Wiegand, C.L. 2000. Use of remote sensing for salinity assessment. Tech. Writer Report to FAO, Rome, Italy. 71 pp.
- Yang, C., J.M. Bradford, and C.L. Wiegand. 2001. Airborne multispectral imagery for mapping variable growing conditions and yields of cotton, grain sorghum, and corn. *Trans ASAE* 44(6): 1983-1994.
- Yang, C., J.H. Everitt, and R.S. Fletcher. 2003. Evaluation of QuickBird imagery for crop identification and area estimation. Proc. 19<sup>th</sup> Bien. Workshop on Color Photography, Videography and Airborne Imaging for Resource Assessment, Amer. Soc. Photogram. And Remote Sens. CDROM.

## **PROCEDURES**

1. GIS and differential GPS units (control points and sample site locations)
2. Preprocessed satellites spectral observations
3. ECe and plant yields from sample sites
4. Image analysis and statistical programs

5. Equipment, workers, and funding

$$\text{NDVI} = (\text{NIR}-\text{Red})/(\text{NIR}+\text{Red}) \quad [1]$$

$$\text{PVI} = [a_1(\text{NIR}) - \text{Red} + a_0]/[1-(a_1)^2]^{1/2} \quad [2]$$

$$\text{GRN4} = -b_1(\text{Band1}) - b_2(\text{Band 2}) + b_3(\text{Band 3}) + b_4(\text{Band 4}) \quad [3]$$

$$\text{APAR (VI)} = \text{LAI (VI)} \times \text{APAR (LAI)} \quad [4]$$

$$\text{Y(VI)} = \text{LAI(VI)} \times \text{Y(LAI)}. \quad [5]$$

$$\text{Y(VI)} = \text{Y(WECe)} \times \text{WECe (VI)} \quad [6]$$

APAR = absorbed photosynthetically active radiation

VI = vegetation index of choice

LAI = leaf area index

Y = economic yield (salable plant part—grain, fruit, root, biomass...)

WECe = weighted electrical conductivity of root zone soil saturation extracts, dS m<sup>-1</sup>.



**TALLER DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS PARA LA  
IDENTIFICACIÓN DE SUELOS ENSALITRADOS MEDIANTE  
PERCEPCIÓN REMOTA  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004**

**WORKSHOP ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR  
IDENTIFICATION OF SOIL SALINITY THROUGH REMOTE  
SENSING  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004**

**IDENTIFICACIÓN DE LA SALINIDAD DEL SUELO Y  
ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS  
CON SENSORES REMOTOS A LA ESCALA DE UN DISTRITO  
DE RIEGO**

Leonardo Pulido-Madrigal  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Progreso, 62550, Jiutepec, Morelos, México  
lpulido@tlaloc.imta.mx

Entre 1994 y 1998 se determinaron las áreas con afectación por salinidad, y su impacto sobre el rendimiento de trigo (*Triticum aestivum*), algodón (*Gossypium hirsutum*), sorgo (*Sorghum bicolor*) y maíz (*Zea mays*) en cuatro distritos de riego (DR) del noroeste de México, el DR 076 Valle del Carrizo, el DR 041 Río Yaqui, el DR 038 Río Mayo y el DR 075 Río Fuerte, utilizando imágenes de satélite Landsat TM y un sensor electromagnético EM-38. La salinidad de las áreas sembradas con estos cultivos en los ciclos de siembra de otoño-invierno 1993-1994, 1994-1995, 1995-1996 y 1997-1998, fue detectada correlacionando la conductividad eléctrica del suelo (CE,  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ), medida en parcelas de observación, con los valores espectrales extraídos de las imágenes de las bandas en el verde (TM2), rojo (TM3) e infrarrojo cercano (TM4) para la generación de modelos de regresión lineal múltiple. Los modelos fueron utilizados para realizar una clasificación supervisada de los cultivos, y así generar un mapa parcial de salinidad. El mapa completo de cada DR se obtuvo integrando al mapa parcial un segundo mapa de salinidad producido con el sensor electromagnético EM-38 y el sistema global de posicionamiento (GPS), mediante mediciones de la CE georeferenciadas, en sitios que no estuvieron ocupados con los cultivos señalados. El área cartografiada en los cuatro DR fue de 600,680 ha, de las cuales 288,200 ha se clasificaron como salinas ( $\text{CE} > 4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ). El rendimiento y producción total de estos cultivos se estimó correlacionando los datos de cosecha de las parcelas de observación, con los valores espectrales de las bandas



referidas, para obtener modelos de regresión con los cuales se clasificaron por rendimiento las subimágenes de los cultivos. De este modo, en los cuatro DR se elaboraron mapas por cultivo por lo que se estimó una producción global de 1'838,650 toneladas de trigo, algodón, sorgo y maíz, y se calculó una pérdida total de producción de 245,770 toneladas por efecto de la salinidad.

Palabras clave: distrito de riego, salinidad del suelo, trigo, algodón, sorgo, maíz, imagen de satélite, modelo de regresión, rendimiento, sensor electromagnético.

Soil salinity and yield were studied in four irrigation districts (ID) in northwestern Mexico, using Landsat TM imagery a portable sensor and a global positioning system (GPS). The reference crops evaluated were wheat (*Triticum aestivum*), cotton (*Gossypium hirsutum*), sorghum (*Sorghum bicolor*) and maize (*Zea mays*). Soil salinity of the cropped areas was detected by correlating soil electrical conductivity (in the saturation extract) of field samples to spectral values extracted from the green (TM2), red (TM3) and infrared (TM4) bands of the Landsat images. Soil and yield samples were collected at point sites located in previously designated fields, and multiple regression models were developed to estimate salinity and yield. The planted areas were digitized on the images to obtain an unsupervised classification and all the pixels were grouped by reflectance. Based on the multiple regression models, codes were created to classify all the pixels into several classes to generate a partial salinity map and yield maps. A second partial map was obtained with the electromagnetic readings, and finally both maps were joined together to get a single map covering the total area of the district. The area of the four ID encompasses 600,686 ha, from which 288,198 ha were classified as saline land. It was estimated a total lost of 245,700 tons of wheat, cotton, sorghum and maize.

Key words: irrigation district, soil salinity, wheat, cotton, sorghum, maize, satellite image, regression model, yield, electromagnetic sensor.

## **INTRODUCCIÓN**

En México, las áreas de producción agrícola que presentan mayores problemas de salinidad y drenaje se localizan principalmente en los distritos de riego (DR) del norte del país, siendo las áreas agrícolas más productivas. La salinidad en estos distritos se considera un problema grave, debido a que aproximadamente el 21% de esta superficie se encuentra afectada (De la Peña, 1993). Algunas de las consecuencias de esta situación son la disminución de los rendimientos, pérdida de ingresos y desempleo (Pulido *et al.*, 1996).

Debido a la dinámica del proceso de salinización en los suelos, se requiere de métodos y procedimientos que proporcionen resultados a corto plazo sobre la ubicación de las áreas afectadas, y que ayuden a dar seguimiento a las medidas aplicadas para su rehabilitación (Wiegand *et al.*, 1994). Tradicionalmente en México, los estudios de salinidad analizada en distritos de riego se obtienen tomando muestras de suelo con base en una cuadrícula de uno o dos kilómetros lo cual representa largos periodos de tiempo y alto costo. Asimismo, se requiere de procedimientos ágiles para estimar el rendimiento de los cultivos con propósitos de planeación para establecer el patrón de cultivos, para la proyección del mercadeo y de conocer el potencial de producción del suelo, ya que la salinidad afecta en forma diferencial a cada cultivo.

Los objetivos de este trabajo son dar a conocer la metodología aplicada y comparar los resultados obtenidos para la identificación de la salinidad del suelo y para

estimar la disminución de rendimiento causada por la salinidad, en los distritos de riego 076 Valle del Carrizo, Sinaloa; 041 Río Yaqui, Sonora, 038 Río Mayo, Sonora, y 075 Río Fuerte, Sinaloa, con base en el uso de imágenes de satélite, un sensor electromagnético EM-38, y el sistema global de posicionamiento.

Wiegand *et al.* (1992 y 1993) en estudios realizados en California y Texas, Estados Unidos, utilizaron parcelas de observación de 36 y 59 ha cultivadas con algodón (*Gossypium hirsutum*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en las que obtuvieron datos de salinidad y parámetros fisiológicos en sitios de muestreo, para calibrar imágenes del satélite Spot-1 HRV, imágenes videográficas y fotografía aérea infrarroja. Las parcelas se clasificaron espectralmente y se desarrollaron modelos estadísticos a partir de los datos de campo y la información espectral, lo que les condujo a la estimación de la salinidad de todos los píxeles de las parcelas estudiadas y a la obtención de mapas de clasificación por salinidad. Analizaron la relación entre la salinidad y el rendimiento de caña de azúcar y encontraron que por cada  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  que aumentó la salinidad en la zona radical se redujo el rendimiento en 22 toneladas métricas por hectárea. Concluyeron que cualquiera de los sensores señalados podrían utilizarse para identificar la salinidad o para monitorear el proceso de rehabilitación de un suelo.

El primer trabajo de esta naturaleza realizado en México tuvo el propósito de identificar la salinidad del suelo en el Distrito de Riego 076 Valle del Carrizo (Pulido *et al.*, 1996) para lo cual se utilizaron imágenes de satélite Landsat TM y Spot Pancromática para cartografiar 19,387 ha, de las cuales 6,927 ha fueron clasificadas como salinas. Se generó un mapa de rendimiento de trigo y se estimó una disminución de 9,943 ton de producción, a causa de la salinidad.

## **METODOLOGÍA**

Los estudios se realizaron en el DR 076 Valle del Carrizo, Sinaloa (1994), en el DR 041 Río Yaqui, Sonora (1995) (Pulido, *et al.*, 1997), el DR 038 Río Mayo, Sonora (1996) (Pulido, *et al.*, 1998), y en el DR 075 Río Fuerte (Pulido, *et al.*, 1999) localizado al norte del estado de Sinaloa; todos ellos están ubicados en el noroeste de México. El DR Valle del Carrizo abarca 43,259 ha; el DR Río Yaqui comprende 228,723 ha; el DR Río Mayo tiene una extensión de 96,587 ha; el DR Río Fuerte comprende una superficie regada de 236,231 ha. Estas superficies son regadas por métodos superficiales casi en su totalidad (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1964; Reyes, 1994).

### *Obtención de datos de campo y toma de las imágenes*

Se tomaron muestras de suelo a dos profundidades (0-30 y 30-60 cm) para analizar su conductividad eléctrica (CE,  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ), así como muestras de cosecha para estimar rendimiento, en parcelas comerciales sembradas con trigo (invierno), algodón (invierno), maíz (invierno y primavera) y sorgo (primavera). Estos cultivos fueron considerados como indicadores de la salinidad ó cultivos de referencia debido a que ocuparon una mayor área de siembra durante la época de realización de los estudios. Además, son cultivos semitolerantes a la salinidad, con excepción del maíz, lo cual les permite desarrollarse en un rango amplio de condiciones de salinidad (Ayers y Westcot, 1987).

Para obtener los datos de campo se seleccionaron un total de 47 parcelas, de aproximadamente 10 ha cada una: 20 parcelas de trigo, 11 de algodón, 7 de sorgo, y en el DR Río Fuerte seis de maíz de otoño-invierno (O-I) y tres de maíz de primavera-verano (P-V). Dichas parcelas quedaron ubicadas en áreas afectadas por salinidad dentro de sus respectivos distritos. El trabajo de campo se llevó a cabo cuando los cultivos se encontraban en la fase final de la etapa de desarrollo vegetativo e inicio de la etapa de floración, que son las etapas en que las plantas desarrollaban la más intensa actividad fisiológica, poseían una mayor cobertura vegetativa, y consecuentemente se lograba un mayor reflejo de la luz solar. Considerando que la resolución de una imagen Landsat TM es de  $30 \times 30$  metros, las parcelas fueron muestreadas en mallas de  $60 \times 60$  metros en los DR Valle del Carrizo, Río Yaqui, y Río Fuerte, y de  $40 \times 40$  m en el DR Río Mayo, teniendo un promedio de 23 sitios por parcela.

La toma de las imágenes de satélite se realizó en la misma fecha en que se llevó a cabo el trabajo de campo. Las imágenes de satélite Landsat TM adquiridas comprendieron escenas completas, en formato digital, orientadas a mapa, con corrección de sistema, con proyección UTM, y sin corrección geográfica, abarcando una superficie de  $175 \times 180$  km por escena completa. En el DR Valle del Carrizo se utilizó una imagen cuya escena se identifica como 034/042, tomada el 26 de febrero de 1994; en el DR Río Yaqui se utilizaron dos imágenes 034/041, adquiridas el 24 de marzo de 1995, para estudiar el área de trigo y el 28 de junio de 1995 para el área de algodón. En el DR Río Mayo se tomaron dos imágenes 034/041, una el 23 de febrero de 1996 con la cual se cartografió el área de trigo y la otra el 14 de junio de 1996, para cartografiar las áreas de algodón y sorgo. En el DR 075 se utilizaron dos imágenes para estudiar al trigo y maíz de O-I, escenas 033/042 y 034/042 tomadas el 5 y 12 de febrero de 1998, respectivamente, y dos imágenes más de las mismas escenas para estudiar al algodón, sorgo y maíz de P-V, tomadas el 3 y 12 de mayo del mismo año. Las imágenes fueron corregidas geográficamente con base en la obtención de las coordenadas geográficas de puntos de control conocidos, localizados sobre las imágenes con el auxilio de un equipo receptor del sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés), en los DR Río Mayo y DR Río Fuerte, o en cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), a escala 1:50,000 en los DR Valle del Carrizo y Río Yaqui.

Los sitios de muestreo de las parcelas de los distritos de riego Río Yaqui, Río Mayo y Río Fuerte fueron geoposicionados utilizando el GPS, para lo cual se realizaron 10 mediciones en promedio por parcela. Las lecturas realizadas con los aparatos para corregir geográficamente las imágenes y para localizar las parcelas en las imágenes, se sometieron a un postprocesamiento para reducir el error de ubicación, y para transformar las lecturas a coordenadas UTM. Con esta conversión fue factible la localización de las parcelas de observación en las imágenes.

#### *Análisis de datos y clasificación de las subimágenes por salinidad y rendimiento*

El procesamiento de las imágenes fue realizado en estaciones de trabajo del Laboratorio de Sensores Remotos del Servicio de Investigación Agrícola, en Weslaco, Texas (DR Valle del Carrizo y DR Río Yaqui), y en una estación de

trabajo y una computadora personal en el IMTA (DR Río Mayo y DR Río Fuerte). Los softwares utilizados fueron GRASS (Geographical Resources Analysis Support Systems, U.S. Army) y el Sistema PCI. Las parcelas se localizaron en las bandas TM2 (región del verde, 0.52 a 0.60  $\mu\text{m}$ ), TM3 (región del rojo, 0.63 a 0.69  $\mu\text{m}$ ) y TM4 (región del infrarrojo cercano, 0.76 a 0.90  $\mu\text{m}$ ). Se imprimieron en papel los valores espectrales correspondientes a las bandas indicadas, y se localizaron manualmente los pixels correspondientes a los sitios de muestreo en cada una de las bandas. Todas las áreas sembradas extensivamente con los cultivos de referencia, dibujadas en los mosaicos de cultivo elaborados manualmente ex profeso, fueron digitalizadas sobre las imágenes Spot Pancromática (Valle del Carrizo y Río Yaqui) y Landsat TM (Río Mayo y Río Fuerte).

De acuerdo con Wiegand *et al.* (1993) el análisis de la información consistió en correlacionar las observaciones de suelo y cosecha (R) con los valores espectrales mediante la técnica de regresión. Además, se analizaron los valores de CE con las observaciones de rendimiento de cada cultivo, para estimar la disminución de producción por efecto de las sales. El valor de CE utilizado en el análisis resultó de ponderar la salinidad encontrada a 0-30 cm y 30-60 cm:

$$CE_w = 0.6CE_1 + 0.4CE_2 \quad (1)$$

Donde:  $CE_w$  es la conductividad eléctrica ponderada del estrato 0-60 cm;  $CE_1$  es la conductividad eléctrica,  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , medida en el estrato 0-30 cm, y  $CE_2$  es la conductividad eléctrica,  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , observada en el estrato 30-60 cm.

Se realizó una clasificación espectral no supervisada a cada subimagen digitalizada para agrupar los pixels por su nivel de reflectancia, utilizando entre 7 y 12 clases. Mediante esta clasificación se obtuvieron los valores espectrales medios de las bandas TM2, TM3 y TM4 para cada clase. La clasificación supervisada consistió en sustituir estos valores en los modelos de regresión lineal múltiple obtenidos en las parcelas de observación, generándose valores de salinidad y de rendimiento que sirvieron como base para elaborar un algoritmo que asignara un valor de salinidad y rendimiento a todos los demás pixels de las subimágenes. Los correspondientes valores de salinidad se agruparon de acuerdo con rangos de salinidad utilizados por la Comisión Nacional del Agua (CNA), generándose mapas de salinidad, mismos que fueron integrados de tal forma que se obtuvo un mapa parcial de salinidad para cada distrito de riego. Los mapas de rendimiento se generaron procediendo de igual manera, con la diferencia de que los rangos de rendimiento variaron entre cultivos y aún dentro de una misma especie, y de que los mapas se elaboraron por cultivo y por distrito de riego.

#### *Detección de la salinidad con el sensor electromagnético EM-38*

En los DR Río Mayo y Río Fuerte las fracciones de terreno que no fueron estudiadas con las imágenes debido a que existieron cultivos diferentes a los de referencia, y a que hubo áreas sin cultivo y áreas improductivas, la salinidad se detectó con un sensor de inducción electromagnética EM-38 de Geonics Ltd. El sensor se calibró en algunas de las parcelas de observación realizando las mediciones al momento

de tomar las muestras de suelo para analizar su CE en laboratorio, tomando lecturas con el aparato en posiciones vertical y horizontal, a dos alturas sobre la superficie del suelo para estimar la conductividad eléctrica a 0-30 y 0-60 cm (Rhoades, 1992). En el DR 038 se utilizaron 70 sitios de medición y en el DR 075 se hicieron mediciones en 90 sitios. Mediante las lecturas del sensor y la CE del suelo se elaboraron modelos estadísticos para transformar las lecturas del aparato a valores de CE estimada. Los modelos se aplicaron para estimar la salinidad en 206 sitios en el DR 038 y 620 sitios en el DR 075. Las lecturas de salinidad con el sensor se georeferenciaron con el GPS, lo cual hizo posible la generación de mapas de salinidad (isoconductividad eléctrica) parciales en cada uno de los distritos de riego, generando isolíneas de CE de cinco niveles (0-4, 4-8, 8-12, 12-16 y >16  $dS\cdot m^{-1}$  con el software Surfer.

#### *Obtención de mapas de salinidad del área completa del distrito de riego*

En los distritos de riego 038 y 075 se obtuvieron mapas de salinidad del área total de los distritos mediante la integración de los mapas de salinidad parciales generados con las imágenes de satélite y con el sensor electromagnético. Las áreas ensalitradas se clasificaron en cinco clases de salinidad, diferenciándolas con un color e indicando la superficie y porcentaje ocupado por cada una de ellas. Los mapas se editaron e imprimieron a una escala conveniente.

## **RESULTADOS**

#### *Generación de modelos para estimar la salinidad con imágenes de satélite*

Las correlaciones de los valores espectrales de las bandas TM2, TM3 y TM4 con la CE generaron modelos para clasificar por salinidad las subimágenes de los cultivos (Cuadro 1). Los coeficientes de correlación para estimar la CE de las áreas de trigo, único cultivo que se utilizó como indicador de la salinidad en los cuatro distritos, variaron de 0.68 (DR Río Fuerte) a 0.86 (DR Valle del Carrizo). En las áreas de algodón los coeficientes de correlación variaron desde 0.65 (Río Yaqui) hasta 0.80 (Río Mayo). En sorgo los coeficientes fueron de 0.71 (DR 075) y de 0.73 (DR 038). En maíz, que solo se ha utilizado en el estudio que se realizó en el DR 075 como indicador de la salinidad, los coeficientes de correlación resultaron de 0.75 y 0.85 para los ciclos O-I y P-V, respectivamente. Las diferencias entre las estructuras de los modelos y sus coeficientes de correlación dentro de un mismo cultivo pudieron deberse a diferentes factores como la fecha de toma de las imágenes que no fue la misma en todos los distritos; el manejo del cultivo; diferencias en la fecha de siembra y la variedad de semilla sembrada en el mismo distrito. Comparativamente, Wiegand *et al.* (1994) reportaron valores de  $r^2$  de 0.39 a 0.68, y de 0.39 a 0.59 para las áreas de algodón utilizando fotografía infrarroja y sistemas de video.

#### *Elaboración del mapa de salinidad definitivo*

Las subimágenes de cada cultivo fueron clasificadas por salinidad utilizando los modelos del Cuadro 1. En cada distrito las clasificaciones resultantes se integraron para disponer de mapas de salinidad parciales. Las áreas estudiadas parcialmente

fueron de 19,387 ha (44.8 % del área total de riego) en el DR Valle del Carrizo, 140,545 ha (61.4 %) en el DR Río Yaqui, 71,448 ha (74.0 %) en el Río Mayo, y 135,033 ha (57.1%) en el DR 075. De lo anterior se desprende que en el DR Río Mayo se cartografió el mayor porcentaje del área por medio de las imágenes de satélite.

**Cuadro 1. Modelos de regresión para estimar con imágenes de satélite la salinidad del suelo de parcelas sembradas con cinco cultivos de referencia.**

Distrito de riego	Cultivo	Modelo de regresión	r	n
Valle del Carrizo	Trigo	CE <sup>1</sup> = 0.819+0.551(TM2)-0.011(TM3)-0.100(TM4)	0.86	43
Río Yaqui	Trigo	CE= -13.541+0.815(TM2)+0.140(TM3)-0.043(TM4)	0.73	74
	Algodón	CE= 2.756+0.777(TM2)+0.770(TM3)+0.022(TM4)	0.65	34
Río Mayo	Trigo	CE= 7.063+0.617(TM2)-0.166(TM3)-0.177(TM4)	0.72	64
	Algodón	CE= 5.205-0.396(TM2)+0.484(TM3)-0.010(TM4)	0.80	57
	Sorgo	CE= 11.330+0.596(TM2)-0.268(TM3)-0.142(TM4)	0.73	52
Río Fuerte	Trigo	CE= 28.937-1.683(TM2)+0.867(TM3)-0.07(TM4)	0.68	47
	Algodón	CE= 17.076+0.2819(TM2)-0.216(TM3)-0.151(TM4)	0.67	53
	Sorgo	CE= 3.632-0.897(TM2)+0.683(TM3)+0.041(TM4)	0.71	34
	Maíz O-I	CE= 5.071-0.240(TM2)+0.835(TM3)-0.145(TM4)	0.75	72
	Maíz P-V	CE= 5.186-0.189(TM2)+0.283(TM3)-0.072(TM4)	0.85	39

<sup>1</sup>CE= conductividad eléctrica estimada en el estrato 0-60 cm, dS·m<sup>-1</sup>; TM2= banda en el verde; TM3= banda en el rojo; TM4= banda en el infrarrojo cercano; r= coeficiente de correlación; n= número de observaciones.

En los DR Río Mayo y Río Fuerte el área cartografiada con las imágenes de satélite se complementó utilizando al sensor EM-38 y un GPS. Los modelos estadísticos obtenidos para convertir a valores de CE las lecturas efectuadas extensivamente con el sensor, se señalan a continuación:

$$\text{DR Río Mayo: } CE_a = 0.009EM_H + 0.002EM_V; r = 0.95 \quad (2)$$

$$\text{DR Río Fuerte: } CE_a = 0.025EM_H - 0.008EM_V; r = 0.86 \quad (3)$$

Donde: CE<sub>a</sub> = conductividad eléctrica aparente, dS·m<sup>-1</sup>; EM<sub>H</sub> = lectura del sensor en posición horizontal; EM<sub>V</sub> = lectura del sensor en posición vertical; r= coeficiente de correlación.

Con los valores de CE estimados a partir de estos modelos en los sitios de medición, que a su vez fueron geoposicionados para disponer de sus coordenadas latitud y

longitud, se produjeron nuevamente mapas parciales de salinidad para los DR 038 y 075. Los mapas de salinidad generados con imágenes de satélite y el sensor fueron integrados para crear un mapa de salinidad del área total de cada uno de los dos distritos de riego. El resultado final de la clasificación por salinidad realizada en cada uno de los cuatro distritos de riego estudiados se indica en el Cuadro 2. El área total cartografiada en los cuatro distritos de riego fue de 600,686 ha que representan el 99.3% de las 604,800 ha de riego. En los cuatro distritos, 288,198 ha (47.97%) se clasificaron como salinas, con una CE > 4 dS·m<sup>-1</sup>. El promedio por distrito de superficie afectada por sales resultó de un 46.95 %.

**Cuadro 2. Clasificación de suelos por salinidad de los distritos de riego estudiados con imágenes de satélite y el sensor electromagnético EM-38.**

CE (dS·m <sup>-1</sup> )	Valle del Carrizo		Río Yaqui		Río Mayo		Río Fuerte	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
0 – 4	12,460	64.27	59,800	42.5	58,597	48.5	181,631	56.8
4 – 8	5,615	28.96	43,379	30.8	32,037	26.5	69,316	21.6
8 – 12	1,150	5.93	19,463	13.8	19,327	16.0	27,428	8.6
12 - 16	159	0.82	9,308	6.8	10,604	8.8	14,909	4.7
> 16	3	0.01	8,595	6.1	212	0.2	26,692	8.3
Área estudiada	19,387	99.99	140,545	100.0	120,778	100.0	319,976	100.0
Área con sales	6,927	35.7	80,745	57.4	62,181	51.5	138,345	43.2
Área total cartografiada: 600,686 ha								

#### *Clasificación por rendimiento de las áreas cultivadas*

La correlación de los valores espectrales de las bandas TM2, TM3 y TM4 con el rendimiento obtenido en las parcelas de observación, generaron los modelos de regresión lineal múltiple del Cuadro 3. Los coeficientes de correlación de los modelos variaron desde 0.60 (DR 075), hasta 0.81 (DR 038). Se observó que en trigo, que ha sido el único cultivo utilizado en los cuatro DR, los coeficientes variaron menos; comparativamente en algodón se observó mayor variación. Lo anterior pudo deberse a que el trigo es un cultivo que presenta mayor uniformidad en su período de siembra y a que el manejo del cultivo es similar en los diferentes distritos, lo que lo hace adecuado para la toma de la imagen ya que el período de floración es uniforme y ello facilita decidir la fecha de toma de la imagen; además el trigo tiene la ventaja de cubrir con su follaje mayor superficie de terreno. Por su parte el algodón tiene un período de siembra mayor y el período de floración es más amplio, además de que cuando está en la etapa de máximo desarrollo no alcanza a cubrir bien el terreno, como lo hace el trigo. Los coeficientes de correlación desarrollados en el DR 075 fueron en general inferiores que en los otros distritos de riego.

**Cuadro 3. Modelos de regresión generados en las parcelas de observación, a partir de valores espectrales y observaciones de rendimiento.**

Distrito de riego	Cultivo	Modelo de Regresión	r	n
V. del Carrizo	Trigo	$R^1 = 3.87 - 0.372(TM2) + 0.152(TM3) + 0.077(TM4)$	0.80	43
Río Yaqui	Trigo	$R = 9.130 - 0.432(TM2) + 0.042(TM3) + 0.052(TM4)$	0.77	74
	Algodonero	$R = 7.086 - 0.052(TM2) - 0.083(TM3) - 0.002(TM4)$	0.70	34
Río Mayo	Trigo	$R = 1.934 - 0.115(TM2) - 0.028(TM3) + 0.076(TM4)$	0.75	64
	Algodonero	$R = 3.748 - 0.063(TM2) - 0.031(TM3) + 0.009(TM4)$	0.81	57
	Sorgo	$R = -1.540 - 0.277(TM2) + 0.140(TM3) + 0.096(TM4)$	0.77	52
Río Fuerte	Maíz de O-I	$R = 15.094 - 0.489(TM2) - 0.191(TM3) + 0.083(TM4)$	0.65	72
	Trigo	$R = -5.178 + 0.459(TM2) - 0.212(TM3) + 0.042(TM4)$	0.67	47
	Algodonero	$R = 1.638 - 0.141(TM2) + 0.065(TM3) + 0.034(TM4)$	0.60	53
	Maíz de P-V	$R = 1.004 - 0.2857(TM2) + 0.071(TM3) + 0.123(TM4)$	0.78	39
	Sorgo	$R = -0.975 + 0.272(TM2) - 0.233(TM3) + 0.049(TM4)$	0.68	34

<sup>1</sup>R= rendimiento de trigo, ton·ha<sup>-1</sup>; r = coeficiente de correlación; n= número de observaciones; DR= distrito de riego; TM= reflectancia en el verde; TM3= reflectancia en el rojo; TM4= reflectancia en el infrarrojo cercano.

Cada una de las subimágenes se sometió a una clasificación supervisada con diferentes categorías de rendimiento con el propósito de generar los mapas de rendimiento del área ocupada por cada cultivo. Los resultados obtenidos en el trigo se indican en el Cuadro 4.

**Cuadro 4. Clasificación por rendimiento de la superficie sembrada con trigo, a partir de imágenes de satélite.**

Valle del Carrizo		Río Yaqui		Río mayo		Río Fuerte	
Rendimiento (ton·ha <sup>-1</sup> )	Área (%)	Rendimiento (ton·ha <sup>-1</sup> )	Área (%)	Rendimiento (ton·ha <sup>-1</sup> )	Área (%)	Rendimiento (ton·ha <sup>-1</sup> )	Área (%)
>6.5	13.9	>6.5	5.1	>6.0	14.5	>5.0	5.1
5.5 – 6.5	28.8	5.5 – 6.5	17.2	4.5 – 6.0	35.0	3.0 – 5.0	55.4
4.5 – 5.5	28.4	4.5 – 5.5	24.0	3.0 – 4.5	23.0	1.5 – 3.0	30.9
3.5 – 4.5	17.3	3.5 – 4.5	28.1	1.5 – 3.0	15.3	0 – 1.5	8.6
2.5 – 3.5	8.8	2.5 – 3.5	2.7	<1.5	12.2		
<2.5	2.9	2.5 – 1.0	13.0				
		<1.0	5.3				

De acuerdo con el Cuadro 4, en el DR Valle del Carrizo en el 57.4% del área se estimaron rendimientos de trigo superiores a la media estimada, de 5.5 ton·ha<sup>-1</sup>. Comparativamente, en el DR Río Yaqui en el 46.3% de la superficie cartografiada se estimaron rendimientos superiores a 4.5 ton·ha<sup>-1</sup>; el rendimiento medio estimado fue de 4.7 ton·ha<sup>-1</sup>. En el DR Río Mayo en el 49.5% del área de trigo se estimaron rendimientos mayores al promedio estimado de 4.6 ton·ha<sup>-1</sup>. Por su parte, en el 60.5% del área cartografiada del DR Río Fuerte el rendimiento estimado superó las 3.0 ton·ha<sup>-1</sup>; el promedio estimado fue de 4.1 ton·ha<sup>-1</sup>.



*Efecto de la salinidad en la producción de los cultivos*

Por medio de los datos de conductividad eléctrica y rendimiento obtenidos en las parcelas de observación, se elaboraron modelos de regresión lineal simple para estimar el efecto de la salinidad en el rendimiento. De este modo, en trigo se obtuvieron los modelos señalados en el Cuadro 5. A excepción del DR Río Yaqui donde el efecto de la salinidad fue 0.266 ton·ha<sup>-1</sup> por cada unidad de aumento de la CE por arriba de 4 dS·m<sup>-1</sup>, en los distritos de riego restantes se estimó un mayor efecto de la salinidad en el rendimiento.

**Cuadro 5. Relación entre el rendimiento de trigo y la conductividad eléctrica dS·m<sup>-1</sup>, obtenidos en las parcelas de observación.**

Distrito de riego	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación	Número de observaciones
Valle del Carrizo	R <sup>1</sup> = 5.39 – 0.359CEw	0.73	43
Río Yaqui	R= 5.59 – 0.266CEw	0.77	74
Río Mayo	R= 6.23 – 0.393CEw	0.82	64
Río Fuerte	R= 5.29 – 0.309CEw	0.82	47

<sup>1</sup>R= rendimiento, ton·ha<sup>-1</sup>, CEw = conductividad eléctrica ponderada del estrato 0-60 cm, dS·m<sup>-1</sup>

En todos los cultivos estudiados los valores de las pendientes de los modelos sirvieron para estimar la disminución de rendimiento relacionándola con la salinidad, para lo cual se aplicó el mismo criterio que con el trigo. Para realizar el cálculo se utilizó la clasificación por salinidad del Cuadro 2, separando las áreas que fueron cartografiadas con el sensor EM-38. Como resultado se estimó la disminución de rendimiento en cada cultivo, asociada con la salinidad (Cuadro 6). De esta forma, se estimó una disminución de rendimiento de trigo de 105,810 ton, equivalentes al 12% de las 881,178 ton de producción de trigo estimadas. En algodón se estimó una disminución del 9.3% de las 108,285 ton de algodón producidas que se estimaron. Las áreas de sorgo cartografiadas en los dos distritos produjeron 109,192 ton; por efecto de la salinidad se estimó una pérdida de 32,723 ton que representó el 30% de la producción. En Maíz cultivado en otoño-invierno se estimó una pérdida de grano del 15% de la producción total, a diferencia del maíz de P-V en el que se estimó un 8.0%. El volumen total de producción estimado considerando los cuatro cultivos y los cuatro distritos de riego, fue de 1,838,655 ton; se estimó que hubo una disminución de producción causada por la salinidad de 245,773 ton.

**Cuadro 6. Disminución de producción estimada mediante imágenes de satélite en cuatro distritos de riego.**

<b>Distrito de Riego</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Superficie cultivada (ha)</b>	<b>Producción (ton)</b>	<b>Rendimiento medio (ton·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Disminución (ton)</b>
Valle del Carrizo	Trigo	19,387	106,482	5.3	9,943
Río Yaqui	Trigo	113,886	537,697	4.7	50,796
	Algodón	22,163	68,717	3.1	3,654
Río Mayo	Trigo	48,250	224,225	4.6	43,350
	Algodón	11,659	24,640	2.1	5,224
	Sorgo	11,539	48,402	4.2	28,124
Río Fuerte	Maíz O-I	84,490	548,127	6.5	81,713
	Maíz P-V	28,276	191,873	6.8	15,434
	Sorgo	14,975	60,790	4.1	4,599
	Trigo	3,129	12,774	4.1	1,721
	Algodón	4,163	14,928	3.6	1,215

## **CONCLUSIONES**

La presente metodología basada en la utilización de imágenes de satélite, un sensor electromagnético portátil, y el sistema global de posicionamiento, para identificar la salinidad del suelo y estimar el rendimiento de los cultivos en los distritos de riego Valle del Carrizo, Río Yaqui, Río Mayo y Río Fuerte, permitió la detección de variaciones de la salinidad del suelo y del rendimiento de los cultivos de trigo, algodón, sorgo y maíz. Así, esta metodología demostró que es suficientemente confiable para realizar este tipo de estudios a la escala de un distrito de riego. El procedimiento aplicado puede ser útil para diagnosticar en distritos de riego áreas afectadas por salinidad y con drenaje natural deficiente, y para la generación de mapas de salinidad y de rendimiento, así como para estudiar el impacto de la salinidad en las economías regionales.

Los resultados de estos estudios pueden ser de utilidad para la planeación de programas de rehabilitación de suelos y en la selección de un patrón de cultivos que considere la siembra de especies tolerantes a las sales en las áreas afectadas, ya que la salinidad afecta en forma diferencial a cada cultivo.

## **REFERENCIAS**

- Ayers, R. S. y D. W. Westcot. (1987). La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO, Riego y Drenaje No. 29, Rev. 1, Roma. pp. 172.
- De la Peña, I. (1993). Problemas de salinidad y drenaje en México. Documento de circulación interna. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional en el Noroeste, Subgerencia de Riego y Drenaje, Cd. Obregón, Sonora, México.

- Pulido-Madrigal, L.; C. L. Wiegand; C. Rodríguez-Zavaleta y S. Neck. 1996. Imágenes de satélite para identificar la salinidad del suelo en los distritos de riego. *Terra*, pp 201-210.
- Pulido-Madrigal, L.; B. Robles-Rubio; C.L. Wiegand y J. López-Hernández. 1997. Aplicación de imágenes de satélite para identificar la salinidad del suelo y las áreas con mal drenaje. En: *Memorias de VII Congreso Nacional de Irrigación*, 22-24 de octubre, Hermosillo, Son.
- Pulido-Madrigal, L.; J. González-Meraz; B. Robles-Rubio; C.L. Wiegand y J. Infante-Reyes. 1998. Actualización con imágenes de satélite de los estudios de salinidad y drenaje en el DR 038 Río Mayo. En: *Memorias del VIII Congreso Nacional de Irrigación*, 2-4 de septiembre, Gómez Palacio, Dgo.
- Pulido-Madrigal, L.; J. López-de Santa Ana; J. González-Meraz; O.X. Cisneros-Estrada y B. Robles-Rubio. 1999. Aplicación de imágenes de satélite, inducción electromagnética y sistemas de información geográfica para estudiar la salinidad del suelo, el drenaje y el rendimiento en el distrito de riego 075 Río Fuerte. En: *Memoria del IX Congreso Nacional de Irrigación*. Culiacán, Sin., 27-29 de octubre de 1999.
- Reyes Quezada, C. (1994). Estudio agrológico semidetallado del Distrito de Riego 038 Río Mayo. Comisión Nacional del Agua. Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, México.
- Rhoades, J. D. 1992. Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. In: Sparks, D. L. (ed.). *Book Chapter in Advances in Agronomy*, pp 201-249.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos. (1964). Estudio de suelos e investigación del uso del terreno. Valle "El Carrizo". IFEX-Geotécnica, S. A. México.
- Wiegand, C. L., J. H. Everitt and A. J. Richardson, (1992). Comparison of Multispectral Video and Spot-1 HRV Observations for Cotton Affected by Soil Salinity. *Int. J. Remote Sensing*, 13(8):1511-1525.
- Wiegand, C. L., D. E. Escobar, and S. E. Lingle. (1993). Growth and yield responses of sugar cane to saline soil: 1. Sensing and mapping using aerial videography. In: *Proc. Inter American Sugar Cane Seminars, "Sugar Cane and our Environment*. Vol. 1. Miami, FL. Sep. 15, 16 and 17, pp. 75-92.
- Wiegand, C. L., J. D. Rhoades., D. E. Escobar and J. H. Everitt. (1994). Photographic and videographic observations for determining and mapping the response of cotton to soil salinity. *Remote Sens. Environ.* 48:1-25.

**TALLER DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS PARA LA  
IDENTIFICACIÓN DE SUELOS ENSALITRADOS MEDIANTE  
PERCEPCIÓN REMOTA  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004**

**WORKSHOP ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR  
IDENTIFICATION OF SOIL SALINITY THROUGH REMOTE  
SENSING  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004**

**AVANCES DE INVESTIGACION DEL EFECTO DE LA  
CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO EN EL DISTRITO DE  
RIEGO 038, RIO MAYO**

Fernando Cabrera Carbajal y Manuel de J. Beltran Fonseca  
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP),  
Centro de investigación Regional del Noroeste (CIRNO),  
Campo Experimental Valle del Mayo (CEMAY).  
cabrera.fernando@inifap.gob.mx

Para realizar una agricultura próspera de riego es necesario disponer de cantidad y calidad de agua aceptable. En el Valle del Mayo, la disponibilidad del agua captada a través de los años no ha sido constante, esto ha generado la necesidad de utilizar agua del acuífero y mezclarla con la de la presa Adolfo Ruiz Cortínez. Lo anterior, implica incrementos en el contenido de sales que luego se incorporan al suelo a través del agua de riego. Así que tanto suelo como cultivo están en constante riesgo de ser afectados. Por tal motivo el presente trabajo detalla una serie de resultados sobre el efecto de la calidad del agua en cultivo y suelo.

Los resultados encontrados con respecto a la factibilidad del uso del agua por salinidad se encontró que la del acuífero que alimenta el canal 3+300 es de uso restringido para uso directo en el riego, ya que además la salinidad efectiva y potencial, así la clasifican. Los índices peligro por sodio, bicarbonatos, magnesio y cloro no resultaron restrictivos en ninguno de los cauces analizados.

Las mezclas de agua por su parte presentaron un incremento de sales totales a través del tiempo (mensual y anual), lo cual obedeció al poco almacenamiento de agua en presa que llevo al incremento de uso de agua del acuífero y por tanto el aumento en su salinidad media

sin alcanzar niveles restrictivos en la mayor parte del periodo, los demás índices similarmente se mantuvieron aceptables.

Con respecto a la respuesta de los cultivos a diferentes concentraciones de sales en el agua de riego los resultados mostraron que hay tendencias a disminuir el rendimiento por efecto de salinidad del agua salina marcándose mas el impacto en aquellos sensibles a las sales.

## **INTRODUCCION**

Para realizar una agricultura próspera de riego es necesario disponer de cantidad y calidad de agua aceptable. Actualmente esta dualidad se ha venido modificando debido a las sequías recurrentes y la exigencia de volúmenes crecientes de producción de alimentos; y con ello mayor demanda de agua, lo cual va en detrimento de su calidad.

En el Valle del Mayo, el agua captada a través de los años no ha sido constante, debido al déficit de precipitación anual que se ha presentado en los últimos diez años, esto ha generado la necesidad de utilizar agua del acuífero y mezclarla con la de la presa Adolfo Ruiz Cortínez para satisfacer su demanda de los cultivos. Lo anterior, implica incrementos en el contenido de sales que luego se incorporan al suelo a través del agua de riego. Así, todos los suelos de esta región al ser irrigados, están bajo un riesgo potencial de ser degradados por salinización y el efecto de la salinidad del agua sobre el cultivo en condiciones de campo se desconoce.

En base a lo anterior y al considerar que en la actualidad ya existe ensalitramiento en una considerable superficie de los suelos del bajo Río Mayo, la calidad del agua utilizada bajo estas condiciones, produce incertidumbre entre los productores en relación a si las concentraciones promedio de sales que ésta lleva, produce efectos negativos en los cultivos que se establecen.

Este escrito detalla los resultados de las evaluaciones de la calidad del agua y su efecto en cultivo y suelo, con el objetivo de ir estableciendo las bases de una serie de estrategias que sirvan para un mejor manejo del uso conjunto del agua subterránea y superficial que incide en el sur de Sonora, teniendo como área piloto el distrito de riego No. 038, del río mayo.

## **ANTECEDENTES**

El concepto de calidad del agua se refiere a las características que puedan afectar su factibilidad a un uso específico, en otras palabras la relación entre la calidad del agua y las necesidades del usuario; por lo que se define el concepto en base a una relación entre éstas y las características físicas, químicas o biológicas que hacen ver las preferencias personales, como el sabor, pueden constituir también una simple evaluación de aceptabilidad, pero recalcan los autores que en la evaluación de la calidad del agua para el riego, se toman en cuenta sobre todo las características químicas y físicas y pocas son las veces que se consideran otros factores importantes (Ayers y Westcot 1987).

Otros autores mencionan que para determinar la conveniencia de utilizar el agua con fines de riego, debe tomarse en cuenta la composición química de ésta, la tolerancia de los cultivos a las sales, las propiedades físicas y químicas de los suelos, las prácticas de manejo de suelos, aguas y cultivos, las condiciones climatológicas, el método de riego por emplear y las condiciones de drenaje interno y superficial del suelo (Aguilera 1980, Rhoades *et al.* 1992 y CNA 1997).

Por otra parte afirman que el agua de riego es una de las principales fuentes de sales e incluso cuando es de excelente calidad; también precisan que, una aportación anual de 1000 mm de agua de riego conteniendo solamente 250 ppm (250 mg/l) de sales disueltas, aporta 2500 Kg de sales por hectárea al año. Si no se eliminan estas de la zona radical, la salinización es inevitable (Ramírez *et al.* 1988).

Los criterios para evaluar el daño potencial que presentan las aguas de riego, se encuentran relacionados con el carácter químico del agua, la concentración total de sales solubles, la cantidad de sodio, la alcalinidad por carbonatos, el boro y otras sustancias tóxicas. Se indica que estos criterios pueden ser utilizados como instrumentos de clasificación de calidad según los efectos esperados sobre el crecimiento vegetal y las propiedades físico-químicas del suelo (Herrera y Ortega 1996).

En el Valle del Mayo además del agua de la presa, hay una acuífero con una recarga media anual del orden de 155 Mm<sup>3</sup>, la cual proviene en parte del mismo Río Mayo de la alimentación a través de la infiltración de la lluvia y mayormente de las infiltraciones del agua de riego de las parcelas así como la de los canales y drenes del Distrito de Riego No. 38. Este suministro mixto de agua, permite mantener un estado de equilibrio relativo en la salinidad, el cual puede ser alterado negativamente durante los años de sequía, por lo que se afirmó que el acuífero del Valle del Mayo constituye una fuente de abastecimiento que puede aprovecharse con algunas restricciones conjuntamente con el agua de la presa (Canales y Robles 1997).

Rehusar el agua salina del drenaje agrícola se vuelve importante cuando la buena calidad es limitado. El uso de este líquido con ese origen y calidad se reporta en Egipto en donde han establecido como norma oficial su utilización directa para riego cuando su salinidad es menor de 700 ppm; mezclarla 1:1 con la del río Nilo (180-250 ppm) si la concentración total del agua de drenaje es de 700 a 1 500 ; o hacer mezclas 1:2 o 1:3 con la del Nilo si la concentración es de 1 500 a 3 000 ppm; así como evitar rehusarla si el índice de salinidad excede las 3 000 ppm (Rhoades *et al.* 1992).

En California, el agua salina del drenaje subterráneo se mezcla con la de canal para producir mezclas de agua con una salinidad equivalente a 3.2 dS/m y los principales cultivos que se establecen son algodón, cebada y alfalfa. Otras partes donde se utiliza esta pobre calidad de agua son el Valle del Río Arkansas de Colorado, el Valle del río Salado de Arizona y los Valles del Río Pecos y Río Grande de Nuevo México y Oeste de Texas donde los principales cultivos son algodón, remolacha, alfalfa y cereales.

Las plantas, generalmente, son tolerantes a la salinidad durante la germinación, pero empiezan a ser más sensibles durante la emergencia y las primeras etapas de desarrollo de las plántulas, si esta salinidad produce una reducción en el establecimiento de una población adecuada (como es frecuente ver), entonces el rendimiento potencial será reducido aún más que el valor estimado por cualquier método.

Una nota importante en relación a la tolerancia de los cultivos a la salinidad es que esta depende del tipo, método y frecuencia de riego, y que a la fecha la información solo se aplica a cultivos irrigados superficialmente y con el manejo de riego convencional; sin embargo, lo ideal para expresar la tolerancia es relacionar la salinidad ponderada a través del ciclo de cultivo y medida donde las raíces absorben la mayor proporción del agua.

El uso de agua salina en numerosos lugares del mundo evidencia que esta es productiva siempre y cuando se interrelacione adecuadamente con los componentes suelo, clima, cultivo y prácticas de manejo de riego. Esto también pone de manifiesto que los esquemas tradicionales de clasificación de la calidad del agua tiene utilidad práctica limitada y al mismo tiempo establece la necesidad de contar con un método mas cuantitativo que estime la factibilidad del agua para riego, pero que tome más en cuenta algunas de las condiciones específicas de uso. Por otra parte se deberá conocer como afecta la condición presente del suelo la factibilidad de uso para riego del agua en la producción del cultivo.

Los autores mencionan que en la búsqueda de criterios más interactivos para evaluar la factibilidad de uso de la calidad del agua para riego se han establecido los siguientes:

Efecto de la permeabilidad y soltura del suelo, el cual expresa el riesgo que hay cuando el agua que se utiliza tiene sodio intercambiable alto o excesivo, pH alto y concentración de electrolitos baja (sales solubles), cuando se presenta esto produce efecto de disgregación, encostramiento e impermeabilidad, lo cual se manifiesta en tasa baja de infiltración. Para tal efecto se deben generar combinaciones entre RAS y CE del agua.

Efecto de salinidad, su efecto se manifiesta sobre la transpiración y desarrollo del cultivo, debido a la fuerte presión osmótica que produce la concentración total de sales, lo cual se manifiesta por una reducida transpiración y retraso del desarrollo vegetativo (plantas con muy bajo porte, con pocas hojas y muy pequeñas).

Efecto de toxicidad y desbalance nutrimental, lo cual se refiere al efecto de someter a estrés de iones específicos, sobre el desarrollo de la planta, especialmente del Cl, B y Na, cuyos efectos se aprecian por lo general por quemaduras en las hojas y defoliación.

Con referencia a la concentración salina de las aguas freáticas que ascienden por capilaridad pueden afectar los horizontes superiores del suelo y destruir las plantas

cuando su concentración es de 2-3 g/l (2 000 a 3 000 ppm) y para agua con sodio 0.7 g/l (700 ppm); pero si las concentraciones son menores que los especificados, se pueden cultivar plantas usando la agua del nivel freático con muy buenos resultados (Aceves N. E. 1979).

## **UBICACION DEL AREA EN ESTUDIO**

El área de estudio corresponde a la parte baja del Río Mayo, que tiene una altura media de 5.2 msnm, y abarca los módulos de riego 1, 5, 6 y 7 del Distrito de Riego No. 38, en el municipio de Huatabampo, Sonora.

## **CLIMA**

Según datos estadísticos históricos de algunos elementos del clima de la estación termopluiométrica de Huatabampo, se aprecia que el régimen de lluvia varía de 200 a 400 milímetros anuales, donde el 85% se presenta en los meses de julio a octubre, la evaporación media anual es de 2118.1 mm y las temperaturas medias varían de 30 °C en agosto a 15 °C en enero. El clima de acuerdo a Köppen modificado por García (1983), corresponde a seco muy cálido con régimen de lluvias de verano, con humedad deficiente todo el año y temperatura media anual que varía de 22 °C a 24 °C, simbólicamente se representa como BW(h') w(e'). La temperatura máxima registrada es de 45 °C, y la mínima de 5 °C.

## **METODOLOGIA**

### *Muestras*

Para monitorear periódicamente la calidad del agua que llega a los módulos bajo estudio se ubicaron puntos de muestreo sobre los canales de distribución de cada módulo, los cuales fueron seleccionados para evaluar los cambios de la salinidad (mediante la conductividad eléctrica) a partir de que entran a cada módulo, de tal manera que se obtuviera la dinámica promedio de la calidad del agua de riego utilizada. Se realizaron dos muestreos cada semana a partir del mes de Abril de 1997 hasta diciembre del 2000.

### *Para análisis químicos*

Calcio y Magnesio se determinaron por titulación con EDTA. Sodio y Potasio por flamometría con espectrofotómetro de flama. Los cloruros se determinaron por titulación con nitrato de plata. Los sulfatos por turbidimetría con un espectrofotocolorímetro y los Carbonatos y Bicarbonatos por titulación. El pH de las soluciones se determinó mediante el uso de un potenciómetro de lectura directa. Los índices de calidad utilizadas fueron las propuestas por Palacios y Aceves citado por Aguilera (1980). La salinidad total o STD se estimó mediante la relación  $STD = CE \times 640$ , en la que CE es la conductividad eléctrica (mmhos/cm) obtenido en los puntos de muestreo con puente Orión modelo 125. Su restricción de uso se hizo en base a los límites de referencia que se dan en Ayers y Westcot 1989. La relación de adsorción de sodio (RAS) se estimó mediante la siguiente ecuación:



$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

### *Efecto de la calidad del agua en cultivo*

En condiciones de campo los experimentos se establecieron en parcelas de agricultores cooperantes en el Municipio de Huatabampo, Sonora. Se utilizaron como tratamientos tres mezclas de agua, las cuales fueron aplicadas en parcelas de 6 metros de ancho por 6 metros de largo, en las cuales se aplicó el agua de riego con las mezclas determinadas siempre teniendo como base aquella que se proporcionaba por el módulo de riego. Las concentraciones se prepararon en nodrizas, la lamina usada fue equivalente a la que el productor aplica en su parcela. Posteriormente el seguimiento agronómico o manejo del cultivo fue realizado por el productor hasta la cosecha.

## **RESULTADOS**

### **Factibilidad de uso del agua de riego en base a los diferentes índices de clasificación**

#### *Peligro por salinidad*

La calidad del agua de pozos, gravedad y mezclas analizadas durante tres años se muestran en los cuadros 1 y 2. Se observa que los pozos que están en el canal margen derecho (Cuadro 1), vierten agua con grado de restricción moderado en términos de sales totales. Sin embargo, su uso directo esta condicionado debido a que existe cierto peligro en suelos de textura pesada, ya que presentan riesgo de acumulación de sales de carbonato y magnesio que vienen disueltas en agua. Esto se sustenta en el valor de salinidad efectiva (SE) ya que es mayor de tres. Así mismo la salinidad potencial (SP) registrada cae en la misma categoría, esto significa que se debe tomar en cuenta el tipo de suelo en caso de usarse para riego directo, dado que los suelos de textura arcillosos o pesados imponen una restricción moderada, además de que se requiere de un cuidado gradual en la elección de los cultivos y de las alternativas de manejo, para alcanzar el potencial de rendimiento.

Para el caso de los pozos localizados en el canal 3+300 (Cuadro 2), la calidad del agua es altamente salina, lo cual no es recomendable usarse para riego directo; ya que esta restricción implica la gradual degradación del suelo y/o cultivo, reducción en el rendimiento y la necesidad de contar con un manejo hábil y efectivo para lograr rendimientos aceptables.

Por el contrario el agua de gravedad procedente de la presa, como se observa en ambos cuadros, no tiene restricción para el uso agrícola, ya que su salinidad total es menor que los 250 ppm, similarmente cualquiera de los índices presentan valores mínimos de restricción.

En relación a la calidad de la mezcla de agua (Cuadro 1 y 2) es decir, la que utiliza el productor de los módulos de riego 1, 5, 6 y 7; presenta un incremento generalizado de sales totales a través del tiempo (mensual y anual); lo anterior obedeció al poco almacenamiento de agua que hubo en la presa; en consecuencia se incrementó el bombeo por lo tanto ocasionó que en este último año los contenidos de sales llegaran a un nivel de salinidad media a moderada, no presentando una restricción para su uso agrícola a excepción del mes de junio del canal margen derecha que presentó un nivel alto de salinidad. En cuanto a los valores de salinidad efectiva (SE), la mezcla del canal 3+300 presentó restricción de uso en los meses de abril, mayo y junio que al rebasar el valor de 15.0 y con ello el peligro de que las sales solubles del agua de riego pasen a formar parte de la solución del suelo.

#### *Peligro por sodio (RAS)*

La presencia excesiva de sodio en el suelo causa condiciones físicas y químicas adversas en los suelos. Cuando se encuentran húmedos estos se vuelven impermeables al aire y al agua y secos se endurecen provocando una gran dificultad para el arado. También se puede desarrollar una costra en la superficie del suelo que dificulta la germinación y la emergencia. La evolución de este índice a través del tiempo mostró que nunca se alcanzó el valor crítico (10) de RAS en la mezcla, sin embargo se distingue que si hay incrementos al aumentar el volumen extraído del acuífero (obsérvese valores de abril a octubre de 1999 en el Cuadro 3 y de abril a junio en el Cuadro 4).

#### *Peligro por bicarbonatos*

Existe en la actualidad el riesgo de que en el suelo los aniones  $\text{HCO}_3$  y  $\text{CO}_3$  asociados con los cationes Ca y Mg tienden a precipitarse como carbonatos insolubles de la solución y con esto el sodio se convierte en el catión dominante. Este riesgo puede ser evaluado en términos de carbonato de sodio residual (CSR); el cual al pasar de 2.5 meq/l el agua no es apropiada para fines de riego. En el caso del agua analizada tanto del canal margen derecha como del 3+300 no presentaron valores que lleguen a la unidad, por lo tanto se establece que no existe la posibilidad de que se formen carbonato de sodio residual en el suelo.

#### *Peligro por magnesio*

Según los valores obtenidos en los Cuadros 3 y 4, respecto a los índices de magnesio solo se registraron ligeras restricciones al pasar los valores de 50 en la mayoría de los casos.

#### *Peligro por cloro*

El agua que fluye por el canal margen derecha solo presentó restricción por cloro el último año, es decir 1999, en los meses de abril a octubre, ya que se rebasó el valor de 5.0 (Cuadro 3), igual condición se presentó en el canal 3+300 mostrando restricción los meses de abril, mayo, junio y octubre (Cuadro 4).

Sin embargo, Ruiz (1994), menciona que éste ión es evaluado en relación a su efecto sobre los cultivos únicamente, puesto que no produce ningún efecto sobre las propiedades físicas del suelo; por lo tanto el contenido de cloro en la solución del suelo dependerá de la capacidad de absorción de humedad del suelo y del drenaje.

**Cuadro 1. Comportamiento de los índices de salinidad del agua de riego del Canal Margen Derecha durante tres años. CEMAY.**

Año	1997	1998	1999	1997	1998	1999	1997	1998	1999
	Sales totales (ppm)			Salinidad efectiva (me/l)			Salinidad potencial (me/l)		
	Agua de bombeo (pozos)								
	826	834	890	6.86	7.10	7.34	5.4	5.7	6.0
	Agua de gravedad (presa)								
	154	166	179	0.60	0.60	0.65	0.55	0.55	0.57
	Mezcla de agua (gravedad-bombeo)								
Enero		296	640		1.8	6.1		1.4	5.2
Febrero	365	365	550	3.1	3.1	5.0	2.3	2.3	4.3
Marzo		365	640		3.1	6.1		2.3	5.2
Abril		454	960		3.8	9.1		3.0	6.7
Mayo	346	480	1229	2.7	5.0	14.4	1.8	4.4	10.3
Junio	710	640	1626	6.6	6.1	20.1	4.9	5.2	18.7
Julio	269	640		1.8	6.1		1.4	5.2	
Agosto		710	1274		6.6	15.3		4.9	15.2
Septiembre		448	1274		3.4	15.3		2.6	15.2
Octubre		448	1088		3.4	12.0		2.6	10.6
Noviembre		339	429		2.5	3.0		2.1	2.4
Diciembre		416	410		4.0	3.9		3.5	3.4

**Cuadro 2. Comportamiento de los índices de salinidad del agua de riego del Canal 3+300 durante tres años. CEMAY.**

Año	1997	1998	1999	1997	1998	1999	1997	1998	1999
	Sales totales (ppm)			Salinidad efectiva (me/l)			Salinidad potencial (me/l)		
	Agua de bombeo (pozos)								
	1830	1990	2048	19.0	21.0	21.0	17.0	19.0	19.0
	Agua de gravedad (presa)								
	224	198	192	1.0	1.3	1.2	0.6	1.4	1.1
	Mezcla de agua (gravedad-bombeo)								
Enero	493	480	691		5.1	7.3		3.7	6.0
Febrero		454	602	5.2	5.2	6.2	3.9	3.7	5.2
Marzo		422	602		6.2	6.2		3.2	5.2
Abril		390	1306		3.1	15.4		2.7	11.7
Mayo	390	352	1306		2.7	15.4	3.0	2.0	11.7
Junio	422	403	1306	4.0	4.0	15.4	3.1	3.0	11.7
Julio	262	349		4.0	3.8		0.9	3.5	
Agosto		390	896	1.3	3.1	7.2		2.3	5.6
Septiembre		359	723		3.5	6.7		3.2	5.8
Octubre		403	1120		3.2	12.1		2.7	10.2
Noviembre		275	704		1.9	6.9		1.8	5.9
Diciembre		416	634		2.6	6.7		3.5	5.8

**Cuadro 3. Comportamiento de los índices de calidad del agua de riego del canal Margen Derecha durante tres años. CEMAY.**

Año	Relación de adsorción de sodio (me/l)			Carbonato de sodio residual (me/l)			Magnesio (me/l)			Cloro (Me/l)		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999	1997	1998	1999	1997	1998	1999
Pozos	2.6	2.5	2.7	0.13	0.5	0.6	35.0	34.0	41.0	2.9	3.3	3.6
Gravedad	0.4	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	40.0	40.0	40.0	0.3	0.3	0.4
<b>Mezcla de agua de gravedad-pozo</b>												
Enero		1.3	2.7		0.0	0.0		30.0	78.0		0.8	3.8
Febrero	1.5	1.5	2.2	0.0	0.0	0.0	41.6	43.0	57.0	1.3	1.3	2.9
Marzo		1.7	2.7		0.0	0.0		44.0	78.0		1.4	3.8
Abril		1.5	3.8	0.0	0.0	0.0		73.0	50.0		2.1	5.6
Mayo	1.6	2.4	4.7	0.0	0.0	0.0	39.3	57.0	50.0	1.0	2.9	5.6
Junio	2.4	2.7	6.4	0.0	0.0	0.0	31.8	56.0	50.0	3.0	3.8	6.2
Julio	1.3	2.7			0.0		29.6	56.0		0.8	3.8	
Agosto		2.4	5.2		0.0	0.0		32.0	48.0		3.0	13.2
Septiembre		1.6	5.2		0.0	0.0		33.0	48.0		1.4	13.2
Octubre		1.6	4.9		0.0	0.0		33.0	56.0		1.4	7.4
Noviembre		1.2	1.7		0.0	0.0		65.0	61.0		1.4	1.1
Diciembre		1.5	1.5		0.0	0.0		53.0	54.0		2.6	2.1

### Efecto de la calidad del agua sobre cultivo en condiciones de campo

#### Algodonero

En la parcela localizada en el Etchoropo, Módulo 5, cuyo cultivo establecido fue algodón (Cuadro 5), se puede ver una tendencia a disminuir el rendimiento al incrementar de 300 a 1000 ppm la concentración salina del agua. Sin embargo, no hubo significancia estadística. Lo anterior concuerda con lo citado por Ayers y Westcot (1987) quienes reportan este cultivo como tolerante a la salinidad del agua de riego. Por su parte al evaluar el efecto sobre la conductividad eléctrica y el porcentaje de sodio intercambiable en el suelo a una profundidad de 0-60 cm, con una composición granulométrica de 16.3% de arena, 55% de limo y 28.6% de arcilla. Se observó que no hubo diferencia significativa entre ambos tratamientos después de aplicados los riegos.

**Cuadro 4. Comportamiento de los índices de calidad del agua de riego del Canal 3+300 durante tres años. CEMAY.**

Año	Relación de adsorción de sodio (me/l)			Carbonato de sodio residual (me/l)			Magnesio (me/l)			Cloro (me/l)		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999	1997	1998	1999	1997	1998	1999
Pozos	4.0	4.2	4.2	0.0	0.0	0.0	51.0	50.0	52.0	8.6	8.6	8.7
Gravedad	0.9	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	32.0	46.0	46.0	0.3	1.0	1.9
<b>Mezcla de agua de gravedad-pozo</b>												
Enero		2.4	2.2		0.0	0.0		48.0	82.0		2.5	4.3
Febrero	2.5	2.2	2.2	0.0	0.0	0.0	48.0	45.0	64.0	2.6	2.3	3.8
Marzo		2.0	2.2		0.0	0.0		52.0	64.0		2.2	3.8
Abril		1.2	9.4		0.0	0.0		67.0	48.0		2.2	7.6
Mayo	2.3	1.5	9.4	0.0	0.0	0.0	31.0	44.0	48.0	2.0	1.0	7.6
Junio	2.4	2.5	9.4	0.0	0.0	0.0	26.0	51.0	48.0	2.2	2.1	7.6
Julio	1.0	2.4		0.0	0.0		38.0	51.0		0.5	2.1	
Agosto		1.5	2.2		0.0	0.0		58.0	58.0		1.3	4.5
Septiembre		2.4	2.4		0.0	0.0		58.0	68.0		1.3	4.4
Octubre		1.4	4.8		0.0	0.0		63.0	59.0		1.8	7.3
Noviembre		1.0	2.2		0.0	0.0		47.0	56.0		1.4	4.6
Diciembre		1.5	2.1		0.0	0.0		53.0	59.0		2.6	4.4

**Cuadro 5. Efecto de la salinidad del agua de riego en el rendimiento de algodónero en suelos salinos de dos localidades de Huatabampo, Son. CEMAY, 1997.**

Sales totales Disueltas	Rendimiento en hueso, ton/ha	
	El Etchoropo	Mochibampo
300 ppm	1.459	1.683
1000 ppm	1.300	0.590

### *Algodonero*

En la parcela ubicada en Mochibampo, hubo un nivel de salinidad alto en el suelo. Al evaluar el efecto de la salinidad del agua de riego con 300 y 1000 ppm en el cultivo de algodónero, se encontró que hubo impacto en el rendimiento, ya que con 300 ppm se obtuvo cerca de 1.7 ton/ha y con 1000 ppm 0.590 ton/ha (Cuadro 5). Esto se asocia con el efecto de la salinidad del agua, ya que produjo aumentos en la CE del suelo, cuyo valor con 300 ppm fue de 9.92 en promedio y con 1000 ppm se alcanzó los 16.91 mmhos/cm. Similar efecto ocurrió en el PSI, ya que con 300 ppm se obtuvo un promedio de 19.50 y con 1000 ppm aumentó a 24.87.

### *Alfalfa*

La alfalfa fue otro cultivo que se sometió a 3 tratamientos con diferente concentración de sales en el agua (300, 600 y 1000 ppm), en el cual se midió el rendimiento de materia seca. Los resultados se presentan en el Cuadro 6, en el que se observa que hay tendencia a disminuir cuando se aplicaron 1000 ppm, aunque no hubo significancia estadística entre tratamientos. Otra variable que muestra la misma tendencia es la altura de planta, en el que el efecto por tratamiento (con 300 y 600 ppm) marca una reducción con diferencia estadística cuando la salinidad en el agua fue de 1000 ppm. En lo que respecta al comportamiento de la CE del suelo, (a una profundidad de 0-60), no se observó diferencia entre ambos tratamientos (300 y 1000 ppm) después de aplicados los riegos, pero si hubo un aumento de la CE con el tratamiento de 1000 ppm, respecto a la CE inicial del mismo. En cuanto al PSI (a una profundidad de 0-60), se observó que después de aplicado el tratamiento con 300 ppm este se redujo (0.84) respecto al PSI inicial; en cambio cuando se aplicaron 1000 ppm este no se alteró en relación al PSI inicial. La tendencia de un incremento leve en los valores de la salinidad y sodicidad en el suelo se explica por las características físicas del suelo ligero (52% de arena), que le imparte apropiado drenaje vertical, bajo intensidad de capilaridad y por tanto poca dinámica en el contenido de sales a través del perfil, en consecuencia tuvo un efecto ligero en la producción de forraje.

**Cuadro 6. Efecto de la salinidad del agua de riego en la producción de materia seca y tamaño de planta de alfalfa. La Escalera, Huatabampo, Son. CEMAY.**

Sales Totales Disueltas (ppm)	Materia seca (ton/ha)	Tamaño de planta (cm)
300	2.270	28
600	2.245	27
1000	2.037	21

### Frijol

En el sitio Juliantabampo donde no hay problema de salinidad, se estableció frijol y se sometió al efecto de salinidad del agua (400, 600 y 1000 ppm). La evaluación mostró impacto sobre la altura de planta al mostrar tendencia a disminuir (diferencia significativa con 1000 ppm) cuando la salinidad en el agua de riego aumentó. Esa misma tendencia se encontró en el número de vainas por planta y en el número de grano por vainas. Respuesta similar se tuvo en rendimiento de grano por hectárea (Cuadro 7), el cual fue disminuyendo al incrementar la concentración de sales en el agua de riego aplicada en el cultivo, aunque la diferencia no fue significativa. En cuanto al comportamiento de los parámetros químicos del suelo a una profundidad de 0-60 cm; se observó que la CE del suelo incrementó después de aplicados los tres tratamientos respecto a la CE inicial de mismo. Alcanzando mayor magnitud cuando la salinidad total fue de 1000 ppm. En lo que se refiere al PSI éste tendió a disminuir después de aplicados los tratamientos, pero esa reducción fue menor cuando se aplicaron 1000 ppm, en lo que se infiere que hay cierto efecto de lavado de sodio, ya que dadas las propiedades físicas del suelo las condiciones son adecuadas para que eso suceda.

**Cuadro 7. Respuesta del frijol a la salinidad del agua de riego, Juliantabampo, Huatabampo, Son. Módulo 1, CEMAY, 1997-98.**

Sales Totales Disueltas(ppm)	Altura de planta (cm)	Número de vainas	Granos por vaina	Rendimiento de grano (ton/ha)
400	37.0	14.0	5.25	2.156
600	36.7	11.0	5.00	2.078
1000	32.7	10.7	4.50	2.035

### Trigo

En este cultivo los resultados indican que al medir el efecto de los tratamientos, en el rendimiento de grano y altura de planta, se encontró que no hubo diferencia significativa entre las aplicaciones de tres calidades de agua de riego (400, 600 y 1000 ppm), como se puede apreciar en el Cuadro 8. En lo que respecta al efecto de salinidad del agua sobre el suelo a una profundidad de 0-60 cm, se encontró que la CE, se incrementó de 5.87 a 6.40 mmhos/cm al aplicar 400 y 600 ppm en el agua de riego, en cambio cuando se aplicó 1000 ppm la CE disminuyó de 4.7 a 4.3 mmhos/cm. En cuanto al PSI, se observó que al aplicar 400 y 1000 ppm éste se redujo de 5.01 a 4.75 y de 3.11 a 2.08 respectivamente, en cambio con la aplicación de 600 ppm el PSI se incrementó de 5.01 a 6.89. Los resultados muestran que el cultivo de trigo no se vio afectado en su rendimiento al aplicar 1000 ppm en el agua de riego, coincidiendo con lo citado por Ayers y Westcot (1987), quienes afirman que se puede utilizar un agua con una CE de 3.8 mmhos/cm (2400 ppm) sin afectar el potencial de rendimiento de éste cultivo.

**Cuadro 8. Respuesta del trigo a la salinidad del agua de riego. Etchoropo, Huatabampo, Son., Módulo 5. CEMAY. Ciclo O-I, 1997-98.**

<b>Sales Totales Disueltas (ppm)</b>	<b>Altura de planta (cm)</b>	<b>Rendimiento de grano (ton/ha)</b>
400	94.2	8.033
600	95.7	8.200
1000	96.0	8.133

### *Trigo*

Se ubicó otra parcela, identificada como Mochibampo, en donde el nivel de salinidad es alto. Al evaluar el efecto de la salinidad del agua de riego con 400, 600 y 1000 ppm en el cultivo de trigo, se encontró que hubo impacto en su rendimiento, ya que con 400 ppm se obtuvo 5.73 ton/ha y con 1000 ppm 4.55 ton/ha (Cuadro 9), así mismo se observó una disminución en altura de planta de 17 cm al aplicar 1000 ppm con respecto a la aplicación de 400 ppm. Por su parte al evaluar el efecto sobre el suelo a una profundidad de 0-60 cm se observó que al aplicar 400 y 600 ppm la CE disminuyó levemente; en cuanto al PSI se mostró un incremento en los tres casos siendo mayor el aumento con la aplicación de 1000 ppm. Las condiciones del suelo donde se estableció el experimento, fueron adversas ya que es un suelo “pesado”, con un 43.4% de arcilla, clasificado como salino-sódico y con un manto freático cuya profundidad osciló entre 1.0 y 1.44 m con una salinidad de hasta 6000 ppm y con drenaje deficiente.

**Cuadro 9. Respuesta del trigo a la salinidad del agua de riego, Mochibampo, Huatabampo, Son. Módulo 6. CEMAY. Ciclo O-I 1997-98.**

<b>Sales Totales Disueltas (ppm)</b>	<b>Altura de planta (cm)</b>	<b>Rendimiento de grano (ton/ha)</b>
400	75.0	5.73
600	67.0	6.55
1000	58.0	4.55

### *Trigo*

En otro sitio (El Caro) al evaluar el efecto de la salinidad del agua, en el rendimiento de grano y peso de la semilla de trigo se encontró que no hubo diferencia al aplicar dos calidades de agua de riego (900 y 1200 ppm), como se pudo apreciar en el Cuadro 10. En lo que respecta a los efectos de los tratamientos en el suelo a una profundidad de 0-60 cm, se encontró que la CE, se incrementó de 2.25 a 7.65 mmhos/cm al aplicar 900 ppm en el agua de riego, en cambio cuando se aplicaron 1200 ppm la CE disminuyó de 2.75 a 2.0 mmhos/cm. En cuanto al

PSI, se observó que al aplicar 900 ppm, éste aumentó de 5.03 a 9.33 en contraste con la aplicación de 1200 ppm el PSI se redujo de 10.28 a 7.27; estos efectos aparentemente contradictorios, son resultados que están influidos probablemente por el método de riego utilizado (riego por surquería en el tratamiento con 900 ppm y riego por melgas en el tratamiento con 1200 ppm), por lo cual se obtuvo un efecto de lavado en éste último. El análisis de resultados, mostró que el cultivo de trigo no fue afectado en su rendimiento al aplicar agua con 1200 ppm, en el agua de riego, coincidiendo con lo citado por Ayers y Westcot (1987), quienes dicen que se puede utilizar agua de riego con una CE de 3.8 mmhos/cm (2400 ppm) o menos sin afectar su potencial de rendimiento.

**Cuadro 10. Respuesta del trigo a la salinidad del agua. El Caro, Huatabampo, Son., Módulo 1. CEMAY. Ciclo O-I, 1998-99.**

Salas Totales Disueltas (ppm)	Rendimiento de grano (ton/ha)	Peso de 100 semillas (g)
900	6.128	4.5
1200	6.514	4.8

DMH= 0.05

### Frijol

Al evaluar el efecto de la salinidad del agua en el rendimiento de grano y altura de planta, se encontró que hubo diferencia significativa entre las aplicaciones de dos calidades de agua de riego (400 y 800 ppm), como se puede apreciar en el Cuadro 11, el cual muestra una merma en el rendimiento de grano de 466 kg/ha y una reducción de 4 cm de altura de planta al aumentar la concentración salina del agua. En cuanto al efecto de los tratamientos en el suelo, se observó un mínimo incremento de 0.23 mmhos/cm de salinidad en la CE al aumentar la concentración salina del agua de 400 a 800 ppm. El análisis de resultados muestra que el cultivo de frijol es afectado significativamente en su rendimiento al aplicar 800 ppm en el agua de riego, coincidiendo con lo evaluado por Beltrán *et al.* en 1998, y otras fuentes que indican a este cultivo como sensible al estrés por salinidad.

**Cuadro 11. Respuesta de frijol a la salinidad del agua de riego. Juliantabampo, Huatabampo, Son., Módulo 1. CEMAY. Ciclo O-I, 1998-99.**

Salinidad del agua (ppm)	Rendimiento de grano (ton/ha)	Altura de planta (cm)
400	2.601	40.17
600	2.135	36.20



## **REFERENCIAS**

- Aceves N. E. 1979. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Aguilera C. M. y Martínez E. R. 1980. Relaciones Agua, suelo, planta atmósfera 2ª edición Dpto. de Enseñanza Investigación y Servicio en Irrigación. Chapingo, México.
- Ayers S. R. y Westcot W. D. 1987. La Calidad del Agua en la Agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1.
- Beltrán F. M., Cabrera C. F., Lam B. J., Lozano Z. A. 1999. Informe 1998: Efecto del uso conjunto del agua subterránea y superficial en la productividad de los suelos del Valle del Mayo. Documento de trabajo, CEMAY. Navojoa, sonora.
- Canales E. A. y Robles C. F. 1997. Acuífero del Valle del Mayo, primer seminario Acuíferos costeros de Sonora. UNISON Dpto. De Agricultura y Ganadería.
- CNA 1997. Requerimiento de Agua para Riego Capitulo 2, parte 623 Manual Nacional de Ingeniería.
- García De M. E. 1983. Apuntes de climatología. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Herrera G. F. y Ortega E. M. 1996. Composición Iónica de las Aguas Subterráneas del Estado de Aguas Calientes. Colegio de postgraduados centro de Hidrociencias.
- Ramírez M.O, Ortega E. M. , Rodríguez O.J. , Ramírez A. C. , Rone P. L. 1988. Determinación experimental de la capacidad germinativa de algunos cultivos agrícolas en soluciones salinas de diferentes concentraciones total y composición cualitativa. Segundo Congreso Nacional de Halofitas Cd. Obregón, Son.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A. y Mashali, A. M. 1992. The use of saline waters for crop production. FAO Irrigation and drainage paper 48.
- Ruiz, V. M. Y Ortega, E. M. 1994. Composición iónica de las aguas residuales en el sistema Hidrográfico Zumpango-Ixmiquilpan. Colegio de postgraduados, centro de Hidrociencias.

**TALLER DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS PARA LA  
IDENTIFICACIÓN DE SUELOS ENSALITRADOS MEDIANTE  
PERCEPCIÓN REMOTA  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004**

**WORKSHOP ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR  
IDENTIFICATION OF SOIL SALINITY THROUGH REMOTE  
SENSING  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004**

**AVANCES DE INVESTIGACIÓN DEL INIFAP CENID RASPA  
PARA EVALUAR LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS CON  
SALINIDAD O ELEMENTOS TÓXICOS**

José Luis González Barrios, Ignacio Sánchez Cohen,  
Juan Guillermo Martínez Rodríguez  
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)  
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta  
Atmósfera (CENID - RASPA)  
gonzalez.barrios@inifap.gob.mx

Siendo la salinidad y la presencia de elementos tóxicos un problema que afecta los suelos de aproximadamente 2 millones de hectáreas en México (CONAZA, 1994; Díaz, 1988), el INIFAP a través del CENID RASPA ha desarrollado trabajos de investigación durante los últimos quince años para valorar ese problema en varias regiones y distritos de riego.

Diferentes escalas espacio-temporales han sido utilizadas para este propósito, abarcando desde el horizonte edáfico hasta la cuenca hidrográfica en el medio natural; y de la parcela agrícola al distrito de riego en medio productivo.

Los principales métodos y herramientas usados a nivel del horizonte y perfil edáfico son: el análisis fisicoquímico, la caracterización morfo-genética mediante el análisis de imagen, la geoquímica isotópica, el uso de dispositivos experimentales en campo y en laboratorio así como la modelación. Ejemplos de estos trabajos son el estudio de procesos (sodización, alcalización, calcización, lavado salino) en horizontes edáficos sometidos a precolación con aguas de diferente calidad

por Díaz en 1988 y por González Barrios en 1992; los estudios de morfología microscópica de poros con técnicas de análisis de imagen (González Cervantes *et al.*, 2004); los estudios de la dinámica del nitrógeno en el perfil edáfico con ayuda de geoquímica isotópica ( $^{15}\text{N}$ ) y de lisímetros de drenaje (Cueto, 2002); y el uso de modelos LEACHM y NLEAP para la evaluación del transporte de nitratos (Cueto, en curso).

A nivel de parcela agrícola, los principales métodos y herramientas usados abarcan además el uso de conductivimetría electro-magnética (con equipo EM-38) para el mapeo de la salinidad y el estudio de su dinámica en parcelas irrigadas (Job *et al.*, 1998; Job *et al.*, 1999) así como el uso de métodos analíticos en laboratorio para la valoración agrícola de bio-sólidos de plantas tratadoras de agua que contienen nutrientes, pero también sales y elementos traza como el Plomo, Cadmio, Níquel y Cromo (Potisek *et al.*, en curso).

En lo que se refiere a los métodos y herramientas usados a nivel distrito de riego se han utilizado sistemas de información geográfica (SIG) y la simulación numérica. Ejemplo de ello son los trabajos de cartografía de suelos salinos en el distrito de riego 017 con el sistema IDRISI (Santamaría, 2001) y la sistematización de los modelos de Letey y Dinar 1986 y de Prendergast, 1993 en el paquete MODELSAL para prever los rendimientos agrícolas con aguas de riego salinas (Rivera, 1995).

Finalmente, a nivel de cuenca hidrográfica se integra el uso de percepción remota para complementar los métodos anteriores. Ejemplos de estos trabajos son la regionalización de la edad y calidad del agua subterránea y su impacto en los suelos irrigados en la cuenca baja del río Nazas (Brouste, 1996; González Barrios, 1997); la percepción remota de terrenos salinos en el fondo endorreico del bolsón de Mapimí. (González Barrios, 1988); el estudio de vulnerabilidad a la contaminación por nitratos en la cuenca de villa Juárez Durango (Martínez, 2002); y el estudio de contaminación por estiércoles porcinos en la cuenca del Lerma-Chapala (INIFAP-FAO, 2000)

Todas estas experiencias a lo largo de los últimos quince años, permiten apoyar la toma de decisiones sobre el desarrollo agrícola y aprovechamiento del territorio nacional, así como auxiliar a la elaboración de normas mexicanas para la protección de la salud pública y del medio ambiente.

## REFERENCIAS

- CONAZA. 1994. Plan de acción para combatir la desertificación en México. PACD – México. Comisión Nacional de Zonas Áridas.
- Cueto, Wong, J. en curso. Proyecto “Calibración de Modelos de simulación de Flujo de Agua y Nitrógeno para Predecir Riesgos de Contaminación por Nitratos en Acuíferos Someros”. Informe de avances. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio Durango. México.
- Cueto, Wong, J. 2002. Proyecto “Desarrollo de Alternativas de Bajo Impacto Ambiental para Manejo de los Fertilizantes Nitrogenados en sistemas intensivos de producción”. Informe final. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio Durango. México.
- Díaz, Espino L. F. 1988. Comparación de metodologías para recuperar un suelo salino. In: INIFAP CENID RASPA. Informes de investigación 1988. Gómez Palacio Durango, México.177-209.
- González, Cervantes, G. , I. Sánchez Cohen, J. P. Rossignol. 2004 Morfología de los poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. Ingeniería hidráulica en México, Vol. XIX No.3 15-23.
- González, Barrios, J. L. 1992. Eaux d’irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine; exemple dans la “Comarca Lagunera”. Tesis doctoral. Université de Montpellier, Francia 316 p.
- González, Barrios, J. L. 1997. El ensalitramiento por riego en la Comarca Lagunera. Memorias del 25 aniversario del CENID RASPA INIFAP 37-41. Gómez Palacio Durango. México.
- González Barrios, J.L. 1988. Correspondances entre caractères de salinité du sol et leur expression sur image SPOT: exemple dans un bassin endoreique de la Réserve de Mapimi (Mexique). Mém. DEA National de Pédologie INA-PG, Université de Paris VI, Univ. Nancy, Univ. Beçanson, ENSA-Rennes, France.
- INIFAP-FAO. 2000. Integración por zonas (IPZ) de ganadería y de agricultura especializadas. Opciones para la porcicultura en la zona centro de México. Proyecto INIFAP FAO AWI (Area-wide Integration of specialized Crop and Livestock Activities) Reporte final INIFAP México.
- Job, J.O., J. L. González Barrios, M. Rivera González. 1998. Algunos usos de la inducción electromagnética en el estudio de los suelos salinos. TERRA. 309-315.
- Job, J.O., J. L. González Barrios, M. Rivera González. 1999. Effect of soil moisture on the determination of soil salinity using electromagnetic induction. European Journal of environmental and Engineering Geophysics. 3.187-199.
- Letey, J. y A. Dinar. 1986. Simulated Crop-water production functions for several crops when irrigated with saline water. Hilgardia Vol. 54 No. 1 32p.
- Martínez, Rodríguez, J. G. 2002. Contaminación de un Acuífero por Lixiviación de Nitratos, Distribución Espacial de su Vulnerabilidad Caso del Acuífero de Villa Juárez, ComarcaLagunera. Informe final. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio Durango. México.
- Potisek, Talavera, M. C. en curso. Proyecto “Aprovechamiento de Bio-sólidos en la Producción Agrícola y Forestal: Una Alternativa Regional de Disposición Final para aminorar Riesgos de Salud Pública y Contaminación Ambiental”. Informe de avances. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio Durango. México.
- Prendergast, J.B. 1993. a model of crop yield response to irrigation water salinity: theory, testing and application. Irrig. Sci. 13:157-164.

- Rivera, González, M. 1995. MODELSAL modelos de simulación para la obtención de funciones de producción de cultivos regados con aguas salinas. Manual del usuario. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio Durango, México.
- Santamaría C. 2001. Productividad de los cultivos forrajeros bajo condiciones restrictivas de salinidad de los suelos y agua de riego en la Comarca Lagunera. INIFAP-SAGARPA. Reporte interno CELALA. Matamoros Coahuila, México.
- Models as a Tool for Soil Management with Examples from a Field Scale Sodic Soil Reclamation Project and Boron Leaching Studies.

**TALLER DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS PARA LA  
IDENTIFICACIÓN DE SUELOS ENSALITRADOS MEDIANTE  
PERCEPCIÓN REMOTA  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004**

**WORKSHOP ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR  
IDENTIFICATION OF SOIL SALINITY THROUGH REMOTE  
SENSING  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004**

**MODELS AS A TOOL FOR SOIL MANAGEMENT  
WITH EXAMPLES FROM A FIELD SCALE SODIC SOIL  
RECLAMATION PROJECT AND BORON LEACHING  
STUDIES**

Donald D.L. Suarez  
George E. Brown Salinity Laboratory, USDA-ARS 450 W Big Springs Road,  
Riverside CA, 92507 USA.  
dsuarez@ussl.ars.usda.gov

There are increasing demands for limited fresh water for municipal and industrial use. In arid areas water use is already in excess of sustainable quantities. Irrigation as currently practiced with use of high quality waters is not likely to continue. In order to maintain agricultural productivity we need improved water use efficiency such as conversion to drip irrigation as well as alternative water supplies. Most regions have abundant quantities of low quality saline, drainage and sewage waters, most of which could be used for irrigation. This will require new strategies for water management as well as alternative crops or varieties. In many areas the overall water requirements can be met by a combination of rain, fresh water and saline water. In some instances periodic reclamation of the soil or continuous application of amendments will be necessary to control salinity sodicity and toxic element concentrations. These practices must be economically efficient and minimize degradation of waters receiving the subsequent drainage water. Computer models such as UNSATCHEM can be used as tools to analyze the performance of various management practices. Examples are given from a large scale field reclamation study using gypsum as an amendment, a field study with cyclic use of fresh and drainage water and boron leaching studies and model simulations of the impact of irrigation with high B waters.

## **INTRODUCTION**

The demands for high quality water in arid and semi-arid regions continue to increase. These demands include more water for municipal use due to increasing population, water use for industrial production in the urban sector, as well as increased need for irrigation to meet increasing food demands. In addition, most arid regions are presently extracting and consuming fresh water at rates vastly in excess of the replenishment rate. Since this is not a sustainable condition, agriculture, currently the major consumer of water, will have to either utilize low quality waters or decrease water use. A necessary part of the solution is to increase water use efficiency on existing agricultural lands.

In terms of alternative water supplies, irrigated agriculture will have to consider reuse of irrigation drainage waters, urban wastewaters as well as other brackish waters, all of lower than optimal quality. Fortunately the opportunities may be greater than suggested by existing water quality criteria. Water quality criteria for irrigation were originally proposed with a focus on avoiding salinization and infiltration problems in an era when fresh water was sufficient and irrigation projects were being developed. These criteria were thus conservative, rejecting all waters that may be detrimental.

Use of degraded waters for irrigation include saline waters, sodic waters and waters with potentially toxic element concentrations as well as waters with nutrient imbalances and high or low pH. Use of degraded waters generally requires special management practices. In some instances use of these waters is not a sustainable practice and periodic application of amendments, leaching or cyclic use of higher quality waters is required. This is especially important where cropping rotations are utilized, as the individual crops generally have varying salt tolerance.

Saline waters, including drainage waters, have been utilized in many regions of the world. However, many uses have been developed in the context of subsistence farming, where low yields may be acceptable. Computer models, if they consider the necessary variables and interactions, have the potential to be used as management tools to evaluate various practices or options related to the use of degraded water. Numerous transport models exist and have been used to simulate field data of plant growth and transport of saline water. However the majority of the models do not consider multicomponent chemistry routines including cation exchange and calcite reactions. Of the models that consider these processes, variably saturated water flow, plant growth and water uptake, only UNSATCHEM (Suarez and Simunek, 1997) considers the effect of chemistry on soil hydraulic properties and the production/ transport of carbon dioxide. The following section briefly describes the UNSATCHEM model. Subsequent sections demonstrate how the model can be used to evaluate irrigation management options associated with saline water and soils. These options include how to best use fresh and saline waters in a sequential cropping system, supplemental irrigation of a high boron ground water, and reclamation of a saline sodic soil.

UNSATCHEM (Suarez and Simunek, 1997) successfully predicts changes in soil carbon dioxide and water content during a growing season with variations in

seasonal temperature as well as rainfall distribution (Suarez and Simunek, 1993). In addition it has been successful in evaluating reclamation of a sodic saline soil upon leaching and application of gypsum (Suarez, 2001).

*Unsatchem model*

The UNSATCHEM (Simunek and Suarez, 1996; Suarez and Simunek, 1997) contains several unique features, including 1) the prediction of CO<sub>2</sub> concentrations in the root zone using a production transport model, 2) prediction of the effects of soil chemistry on hydraulic properties 3) a kinetic model to describe calcite dissolution and precipitation. 4) use of the constant capacitance model to predict B transport. The model is based on a modified version of the one-dimensional Richards= equation

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \frac{(\partial h)}{\partial z} + 1 \right] - S \quad [1]$$

where  $\theta_w$  is the volumetric water content,  $K$  is the hydraulic conductivity,  $h$  is the water pressure head,  $t$  is time,  $z$  is the spatial coordinate (positive up), and  $S$  is the sink term representing removal of water from the soil by plant roots. This equation neglects the effects of thermal and density gradients, and is used with the assumption that the gas phase dynamics do not affect water flow.

The unsaturated soil hydraulic properties are described by a modified version of those proposed by van Genuchten (1980). The hydraulic conductivity functions are given by

$$K(h) = K_s K_r r = K_s r S_e^{1/2} \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad [2]$$

where

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [3]$$

and where  $\theta_r$  and  $\theta_s$  are the residual and saturated water content [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>], respectively,  $K_s$  is the saturated conductivity [cm/d],  $K_r$  is the relative hydraulic conductivity,  $S_e$  is relative saturation and  $m$ ,  $n$ , and  $\alpha$  [1/cm] are the empirical parameters of the hydraulic characteristics. The term,  $r$ , unique to this model, is a dimensionless reduction parameter that represents the effect of soil chemistry on hydraulic properties. It is considered that for most irrigation management simulations it is sufficient to choose the default hydraulic characteristics based on soil texture (Carsel and Parrish, 1988) and adjust the saturated hydraulic conductivity value to that of the specific soil.

*Chemical effects on soil hydraulic conductivity*

Equation 2 differs from previous relations in that it includes a chemical reduction term,  $r$ , which depends on pH, SAR and EC and scales the hydraulic conductivity



in relation to these variables. Optimal soil chemical conditions for infiltration are represented by the condition  $r_1$ . Elevated levels of exchangeable sodium especially at low salinity, results in swelling of expandable clays dispersion, and subsequent clay migration and blocking of soil pores and reduction of hydraulic conductivity (McNeal, 1968). In addition, it has been determined that elevated levels of pH adversely impact saturated hydraulic conductivity, separate from the sodicity and salinity interactions (Suarez *et al.*, 1984). Suarez and Simunek (1997) represented the chemical effects on hydraulic properties by the use of a reduction function,  $r$ , given by

$$r=r_1 r_2 \quad [4]$$

where  $r_1$  is the reduction due to the adverse effects of low salinity and high exchangeable sodium percentage (ESP) on the clay and  $r_2$  is the adverse effect of pH. The  $r_1$  term is calculated from relationships given by McNeal (1968). The  $r_2$  term (effect of pH on hydraulic conductivity), was calculated from the data of Suarez *et al.* (1984), after first correcting for the salinity and high exchangeable sodium using calculated  $r_1$  values. Soils respond to these factors differently, thus these values may not be accurate generalized predictors, although they do represent conditions of a range of arid land soils examined at the U.S. Salinity Laboratory.

#### *Carbon dioxide production and transport*

Chemical models for the unsaturated zone typically neglect CO<sub>2</sub> effects by fixing the pH or rarely require CO<sub>2</sub> as a fixed input. Specification of a fixed CO<sub>2</sub> does not consider spatial and temporal fluctuations due to production and transport of CO<sub>2</sub>. Simunek and Suarez (1993) presented a general soil model for CO<sub>2</sub> production and transport that is included in UNSATCHEM. The CO<sub>2</sub> production is the sum of the production rate by soil microorganisms,  $\gamma_s$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>d], and the production rate by plant roots,  $\gamma_p$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>d]

$$P=\gamma_s + \gamma_p = \gamma_{s0} \prod_i f_{si} + \gamma_{p0} \prod_i f_{pi} \quad [5]$$

where the subscripts s and p refer to soil microorganisms and plant roots, respectively,  $\vartheta f_i$  is the product of reduction coefficients dependent on depth, temperature, hydraulic pressure head, CO<sub>2</sub> concentration, osmotic head and time. The parameters  $\gamma_{s0}$  and  $\gamma_{p0}$  represent, respectively, the optimal CO<sub>2</sub> production by the microorganisms or plant roots for the soil profile at 20 °C under optimal conditions. The reduction expressions are given in Simunek and Suarez (1993). Discussion and selection of the optimal production values and reduction function coefficients are given in Suarez and Simunek (1993). The one-dimensional carbon dioxide transport model presented by Simunek and Suarez (1993), considered CO<sub>2</sub> transport in the unsaturated zone occurs in both the liquid and gas phases.

#### *Plant water uptake*

Root water uptake is described by the following equation

$$S = Sp\alpha_s(h)\alpha\phi(h\phi) \quad [6]$$

where  $S$  is the root extraction term and  $\alpha_s(h)$  is given by

$$\alpha_s(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p} \quad [7]$$

where  $h_{50}$  [m] and  $p$  are empirical constants derived from the salt tolerance of the individual crop. These terms are evaluated at each time step and at each soil depth. Equation 6 differs from most other model water uptake expressions in that it does not add the matrix and osmotic potential stresses. Separate stress response functions for matric and osmotic potential are developed using separate expressions of equation 7. These stresses are then multiplied to obtain the overall prediction of the reduction in water uptake and plant biomass production. Recent studies have confirmed that in the presence of multiple stresses, the adverse response is less than the sum of the two separate responses and that an expression such as equation 6 is more appropriate. The terms  $h_{50}$  [m] and  $p$  also using a separate version of equation 6 are empirical constants derived from water stress tolerance of the individual crop.

#### *Chemical model*

The chemical model currently includes consideration of 9 aqueous components, Ca, Mg, Na, K,  $\text{SO}_4$ , Cl, alkalinity,  $\text{NO}_3$  and B. It is assumed that all aqueous species are in equilibrium as defined by the ion association expressions and constants. The model includes cation exchange for the ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , and  $\text{K}^+$ , with provision for specifying the selectivity coefficient. Equilibrium with respect to gypsum is maintained wherever gypsum is present or the solution becomes saturated. The user can specify the option of calcite equilibrium or a kinetic model for calcite dissolution. Similarly dolomite dissolution can be specified with a kinetic model. Dissolution and precipitation of hydromagnesite, nesquehonite and sepiolite (Mg silicate) can also be considered if present. In all cases the program tracks the quantities and changes of the minerals in each soil layer.

Suarez and Simunek (1997) described a generalized application of the constant capacitance model to describe B adsorption and desorption. The model utilizes average soil constants of 9.3, -10.6, and 5.5 for the values of  $\log K_+$ ,  $\log K_-$ ,  $\log K_B$ , respectively from Goldberg and Glaubig, (1985). Also from the data in Goldberg and Glaubig, (1985) the following general expression

$$[\text{SOH}]_T = 2.53 \times 10^{-7} + 4.61 \times 10^{-9} S \quad [8]$$

was found to predict the adsorption site density from the soil surface area ( $r=0.96$ ). The advantage of this approach is that surface adsorption can

be predicted using the generalized constants and a measurement of soil surface area (using EGME). This is especially useful for simulation of boron transport in agricultural fields, where it would not be practical to conduct time consuming detailed adsorption studies for each soil horizon in each sample.

## MODEL EVALUATION

### *Use of fresh and saline water in a cyclic cropping system*

Rhoades *et al.* (1988a) described a field irrigation experiment in which drainage water (Alamo River, Imperial Valley CA) was used to partially substitute for Colorado River water. The Alamo River water is derived from drainage water from subsurface drains, tail water and operational spills. The fields were irrigated in the past only with Colorado River water. An experiment with a three year rotation of wheat, sugarbeets, cantaloupe, typical of cropping patterns at that time, was utilized as a test of the predictive capability of the UNSATCHEM model and use as a management tool. As shown in Table 1, the drainage water is relatively saline (EC 4.0 dS/m) and contains an elevated SAR value. Drainage is difficult in this clay soil thus there is concern about the ability to leach salts, especially when saline water is applied. Typically vegetables or melons, salt sensitive crops, are grown in the winter as part of a two or three year crop rotation.

**Table 1. Composition of Irrigation Water\***

	EC dS/m	Ca	Mg	Na	K	Alkalinity mmol <sub>e</sub> /L	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>
Colorado River	1.25	4.1	2.6	5.7	0.11	2.6	6.6	3.1	0.05
Drainage Water (Alamo River)	4.0	10.3	8.9	25.1	0.32	4.4	22.2	18.4	0.70

\*Rhoades *et al.*, 1988

The initial chemical composition of the soil water was estimated from the initial EC values of the soil saturation extracts and the composition of Colorado River water (Table 2). Since the salts above the drains are derived from concentration of the Colorado River water, we estimated the leaching fraction from the EC ratio of the irrigation water and saturation extract. Assuming the root zone extends to 100 cm the estimated leaching fraction was 14%. This value is in excellent agreement with overall Valley wide estimates based on yearly volumes of irrigation and drainage water.

**Table 2. Initial Soil Solution Compositions**

Depth (cm) dS/m	EC	Ca	Mg	Na mmol <sub>e</sub> /L	K	Alkalinity	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>
0 – 5	1.25	4.10	2.60	5.70	0.11	2.60	6.60	3.10	0.05
5 – 20	5.00	16.0	10.0	22.0	0.40	10.2	26.2	12.0	0.20
20 – 60	6.30	20.5	13.0	28.5	0.55	13.0	33.0	15.5	0.25
60 – 100	9.00	29.5	18.7	41.0	0.80	18.7	47.5	22.3	0.36
100 – 300	10.0	32.8	20.8	55.6	0.88	20.0	52.8	24.8	0.40

The water balance for the crops is presented in Table 3 (after Rhoades *et al.*, 1988b). The wheat was initially planted and germinated with Colorado River water (13.2 cm). Subsequently 42.4 cm of irrigation water were applied. The estimated crop ET<sub>p</sub> was 65.5 cm of water, thus the crop was under-irrigated, with an estimated water deficit of 10 cm of water. Since this is a clay soil, the water storage in the profile could have made up the deficit. There are no independent estimates of the drainage volumes.

**Table 3. Water Balance (cm)**

	Colo. R Water	Drainage	Total	ET <sub>p</sub>
1982 Wheat	13.2	42.4	55.6	65.5
1983 Sugar Beets	44.7	80.0	124.7	102.9
1983 Cantaloupes	62.7	0	62.7	42.7

The UNSATCHEM simulation used as input for initial conditions the values presented in Tables 1-3. The irrigation and ET<sub>p</sub> values were distributed over the 120 d growing season for wheat and the 150 d growing season for sugarbeets. Shown in Figure 1 is the EC relationship with time during the wheat growing time. Except for the last value at 120 d, all other values are shown at the midpoint in time between irrigations, thus the water contents are roughly comparable. Consistent with the under-irrigation, the salinity levels increased in the root zone over time and there was little downward migration of the salt front. At the end of the season conditions are drier thus the EC of the soil water is even greater. These soil water EC values are those experienced by the crop. Expression of the data in terms of EC extract would show a smaller increase for the last time interval.

Despite the under-irrigation there was a predicted drainage of 7 cm, likely due to assumptions about the initial soil water conditions at the start of the experiment. This drainage is primarily from drainage in the depth of 1 to 3 m (data not shown). The UNSATCHEM predicted relative yield was 0.98, consistent with the observations of Rhoades *et al.* (1988a) that there was no reduction in wheat yield relative to the control, when this sequence of fresh and saline water was used. The model predicts the full yield potential of this management as practiced. The influence of the saline water at this time is predicted to extend only to 140 cm, but

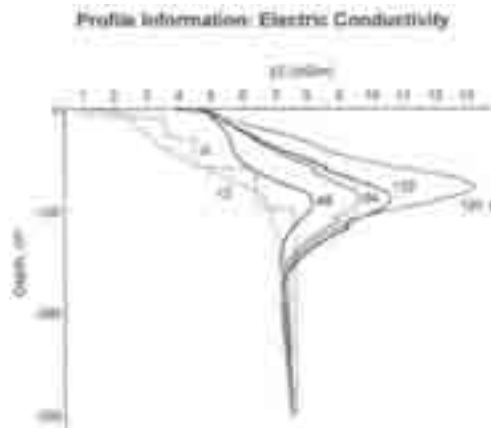
the profile has been significantly salinized and continued to increase in salinity due to the lack of leaching from the root zone.

The salinity and water flow during the second crop, sugarbeets, was predicted using the predicted ending conditions of the first crop. As shown in Figure 2 there was an initial leaching of the soil to 80 cm as a result of the application of fresh water in excess of ET. After application of drainage water starting on day 79, there was an increase in salinity. There was essentially no increase in further increase in root zone salinity after day 119. Conditions at day 150 in the root zone represent changes in water content rather than an increase in salt mass. Irrigation was sufficiently in excess of ET for this crop that salinity was maintained despite predominant use of drainage water for irrigation during the growing season. Consistent with the irrigation regime, the salt front is observed migrating to the drains (see Figure 2, EC values at the bottom of the profile). The model predicted 0.98 relative yield, also consistent with the observations of Rhoades *et al.* (1988a) that there was no reduction in sugarbeet yield, relative to the controls using Colorado River water. The predicted water lost to the drains during the sugarbeet growing season was 17 cm, in close agreement with the field application of 22 cm of water above the ET requirement. The measured EC extract values were converted to EC soil water by multiplying by a factor of 1.5 to correct for water content changes. Figure 3 shows the good agreement between the measured (Rhoades *et al.*, 1988b) and model-predicted EC in the root zone after two years, at the end of the sugar beet experiment. The differences between model predictions and measurements may result from less than optimal assumptions made about the root density distribution with depth.

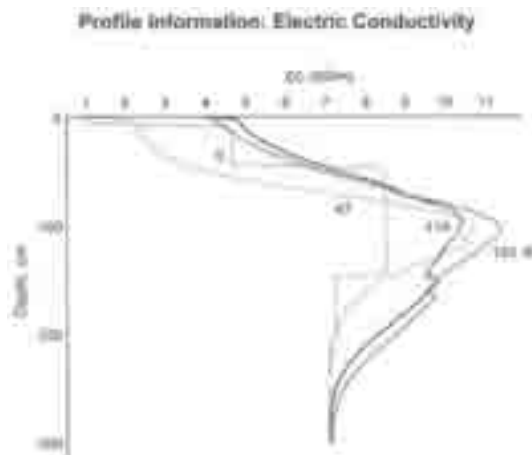
#### *Boron adsorption and desorption*

Toxic levels of B in drainage water are one of the major limitations to drainage water reuse in the western U.S. As mentioned earlier, there is a need to develop

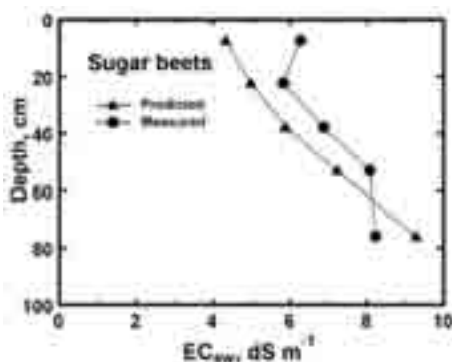
**Fig. 1 EC depth relationship with time for wheat crop simulation using a sequence of 13.2 cm of fresh water and 42.4 cm of drainage water.**



**Fig. 2** EC depth relationship with time for sugarbeet simulation using a sequence of 44.7 cm of fresh water and 80 cm of drainage water for irrigation.



**Fig. 3** Comparison of predicted and observed salinity with depth after 2 years of cropping with sequential use of fresh and drainage water.



management practices for use of these waters. The following examples (Suarez, 2002) demonstrate the predictive capability of the model and its utility as a management tool when leaching high B soils or irrigating with high B waters.

Air-dried Pachappa soil samples were packed into plastic columns to a depth of 7.5 cm and initially leached with water containing 0.9 mmol/L Ca and Cl. Next a similar solution was used except that 0.082 mmol/L of boric acid was also present. The columns were leached with 50 cm of water and the effluent of the columns was collected. Next the columns were leached with 50 mL of Ca and Cl water with addition of Br as a tracer, and with trace amounts of B (0.008 mmol/L). The solution effluents were analyzed for major ions, pH, B, Cl and Br.

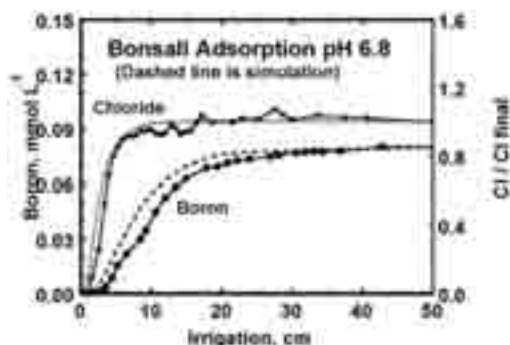
Column results were predicted using the UNSATCHEM 3.1 model (Suarez and Vaughan, (2005 in preparation). Water compositions were those specified above. Conditions simulated included major species, B, the Br tracer and soil solution pH. Both Cl and Br are considered to be non-reactive tracers. The predictive relationships for B were those described above. The EGME surface area of this soil was  $100 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ .

Changes in drainage composition as a function of amount of applied high B water are shown in Figure 4 (Suarez, 2002). As shown, the nonreactive Cl rapidly reached a concentration approaching the equilibrium concentration after only 6 cm of water was applied. This soil is of relatively low surface area and thus does not highly adsorb B, especially at this moderate pH. The model was able to very accurately predict the Cl breakthrough curve and satisfactorily predict the B breakthrough curve. The fit is very satisfactory considering that there was no optimization of parameters for this soil based on either these data or related measurements; the only soil specific variable being the measured surface area.

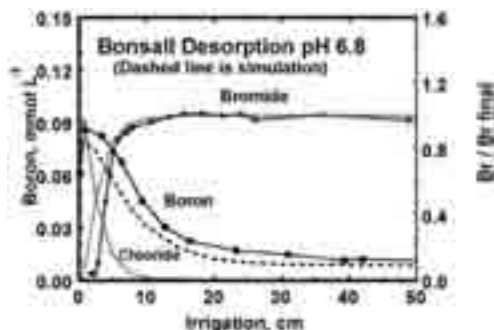
The results of the column leaching (application of low B water) are shown in Figure 5 (Suarez, 2002). The Br concentration change with time demonstrated the rapid infiltration and breakthrough of a non-reactive species. The model was again well able to predict the drainage concentration of a tracer with time. As expected B was slowly released from the soil and almost 40 cm of water was required to reach the new equilibrium concentration of the input water. The model was again well able to simulate the B release from the soil. These results suggest that the model can adequately predict soil solution B concentrations and thus can be utilized for simulation of various management options relating to use of B irrigation waters. There is a high dependence of both adsorption and desorption on pH, as demonstrated both by additional experiments and model simulations.

The use of the model for management when irrigating with high B waters is demonstrated with the following example (Suarez, 2002). We assume that either a limited quantity of high quality water is available or that there is some rainfall, but

**Fig. 4 B and Cl drainage water concentrations upon application of water containing 0.082 mmol/L of B. Comparison of measured and predicted values (Suarez, 2002).**



**Fig. 5 Desorption of B from column as a function of irrigation volume. Comparison of measured and predicted values (Suarez, 2002).**



this high quality, low B water must be supplemented with low quality, high B water. Although the low quality water is often not usable for sustained agricultural production it might be utilized either in a cyclic fashion with higher quality water, the soil might be periodically reclaimed via leaching, or the waters might be used on separate fields on crops of varying tolerance. Model predictions can be made in terms of soil salinity and composition including B (if available) and relative crop yield.

Irrigation drainage water from the Westside of the Central Valley in California typically contains 0.4 to 0.8 mmol L<sup>-1</sup> B and an EC of 8-14 dS/m. In these simulations we used a B concentration of 0.8 mmol L<sup>-1</sup>, assumed a uniform root distribution and uniform water uptake in a 50 cm root zone. The profile was initially free of B.

We considered two soil types, a sand with low adsorption and a clay with high adsorption for B (Suarez, 2002). The ET was input as 1 cm/day with irrigations corresponding to an average input of 2 cm/d (leaching fraction of 0.5). A total of 200 cm of water was applied during the 100 day growing season. The surface area of the sandy soil was taken as 100 m<sup>2</sup>/g. The high leaching and low adsorption capacity resulted in movement of the B front into the soil relatively rapidly. A quasi steady state profile was established in the root zone after 80 days, with a maximum concentration of 1.6 mmol/L. The concentration below the root zone will eventually be constant at 1.6 mmol/L.

A similar simulation was made with a clay soil with a 1000 m<sup>2</sup>/g surface area, corresponding to a soil with high B adsorption capacity (Suarez, 2002). The high adsorption capacity (or site density) results in a steeper B front and less rapid movement of B into the soil profile. This profile was very far from steady state despite 100 d of irrigation and the B solution concentrations were significantly lower than those for the sandy soil.

Similar simulations were made with a leaching fraction of 0.1. The daily ET is still 1.0 cm/day, however the water applications were reduced to 1.11 cm/day.

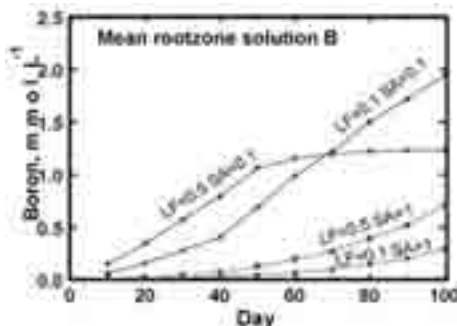


In these simulations a total of 1.11 m of water was applied over the irrigation season. After 100 days the sandy soil profile is still not at steady state and the B front is just reaching the 100 cm depth. The maximum soil B concentration will eventually reach  $8.0 \text{ mmol L}^{-1}$ . After 100 days the B concentration front for the clay extends only to 25 cm and the maximum concentration is only  $0.80 \text{ mmol/L}$ , much lower than the steady state value of  $8.0 \text{ mmol/L}$ , and just slightly greater than the irrigation water B concentration. Consistent with the high surface area and thus a large number of adsorption sites, the concentration front is relatively steep.

The mean root zone B concentrations are presented in Figure 6 for each of the 4 simulations (Suarez, 2002). The simulations indicate that for a soil with high affinity, there is little B hazard during the initial cropping season. The highly leached, high surface area soil had a higher root zone B concentration throughout the growing season. At steady state the lower leaching management would eventually result in considerably higher B concentrations than the more heavily leached soil. However the system can be managed in a continuous transitional state. Under this scenario, the recommended management practice (in the absence of salinity considerations) would be minimal water applications. The mean B concentration in the root zone would be sufficiently low that most crops could be grown without yield loss. Sustained management would require winter rains or leaching with higher quality water.

As shown in Figure 6, the low surface area soils rapidly increase in B concentration in the root zone, at both high and low leaching. During the early portions of the season low leaching management results in lower root zone B, as steady state values are not yet achieved. Around day 70 there is a crossover with the low leaching fraction management resulting in higher root zone B concentrations. In this scenario, it would appear preferable to utilize a low leaching approach at least early in the irrigation season, especially if B sensitivity is greater during early stages of growth. For low surface area soils, most crops would have significant yield reduction due to B toxicity.

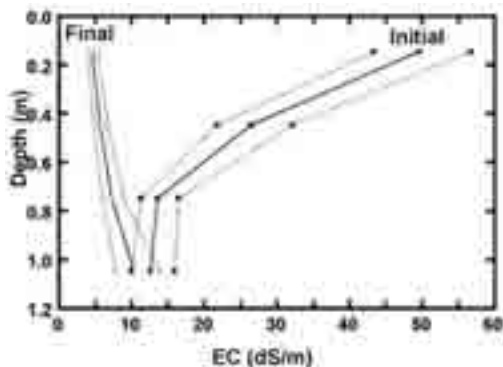
**Fig. 6 Mean root zone soil solution B concentration with time as related to leaching fraction (LF) and soil surface area (SA), expressed in  $10^3 \times \text{m}^2 \text{g}^{-1}$  (Suarez, 2002).**



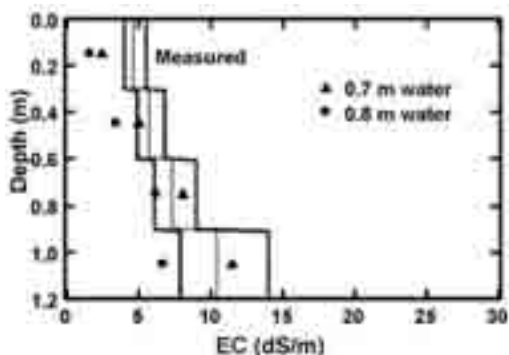
*Reclamation of a saline sodic soil*

The use of UNSATCHEM to predict reclamation of a saline sodic soil and to evaluate different management practices, was demonstrated by Suarez (2001). An initially saline sodic field was reclaimed by addition of 24 Mg/ha of gypsum and leaching with 73 cm of water. As shown in Figure 7 there was initially a large concentration of salts at the surface. The SAR ranged from 130 at the surface to 90 at 120 cm (data not shown). Simulations were performed using only average soil cation exchange capacity estimated from clay content and mineralogy, default cation selectivity values and catalogue hydraulic properties and given initial conditions. The results shown in Figure 8 and 9 (Suarez, 2001) demonstrate good predictive capability for both EC and SAR.

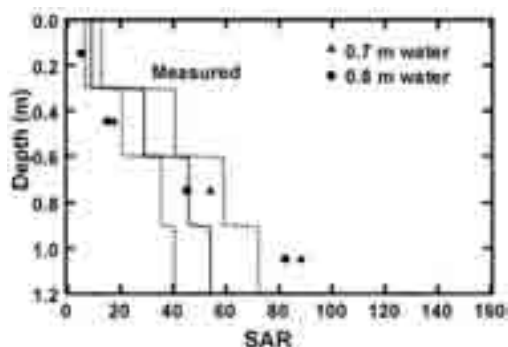
**Fig. 7 Median EC values with depth for both initial and final (after leaching) conditions of field study. Reclamation consisted of application of 24 Mg/ha gypsum and application of 114 cm of water. The dashed lines indicate the 95% confidence limits of median for the field (Suarez, 2001).**



**Fig. 8 Comparison of measured and model predicted changes in EC with depth after mixing 24 Mg/ha of gypsum into the top 15 cm and then infiltration of 70 and 80 cm of water. The dashed lines indicate the 95% confidence limits of median for the field. Symbols represent simulation values for the 30 cm depth intervals (Suarez, 2001).**



**Fig. 9 Comparison of measured and model predicted changes in SAR with depth after mixing 24 Mg/ha gypsum into the top 15 cm and then infiltration of 70 or 80 cm of water. Symbols represent simulation values for the 30 cm depth intervals (Suarez, 2001).**



The use of the model for optimizing reclamation was further demonstrated (Suarez, 2001) in a series of simulations where gypsum placement depth was evaluated in terms of water requirements to achieve a specified reduction in ESP. It was further predicted that this field could have been reclaimed using green manuring practices if approximately twice as much water had been applied.

## CONCLUSION

The UNSATCHEM model was able to predict results of a cyclic use of saline and fresh water for irrigation of wheat and sugarbeets without yield loss. Boron adsorption and desorption observed in column experiments was well predicted using the constant capacitance routines, without use of soil specific measurements or optimization of parameters. The utility of the model was demonstrated for irrigation management when using high B waters in transient scenarios, especially for soils that strongly adsorb B. An example was given of the successful application of the model to predict of reclamation of a saline sodic soil. Simulations suggested both how to optimize depth of gypsum placement to reduce water requirements in leaching and how the use of gypsum could have been avoided if the farmer was able to use approximately twice as much water for leaching and about three times as much time. The uniqueness of each individual case makes generalization of results difficult and suggests the need for modeling approaches to manage saline and degraded soils and water for irrigation.

## REFERENCES

Carsel, R.F. and R.S. Parrish. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24:755-769.

- Goldberg, S., and R.A. Glaubig. 1985. Boron adsorption on aluminum and iron oxide minerals. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:1374-1379.
- McNeal, B. L. 1968. Prediction of the effect of mixed-salt solutions on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. of Am. Proc.* 32:190-193.
- Rhoades, J., F. Bingham, J. Letey, A. Dedrick, M. Bean, G. Hoffman, W. Alves, R. Swain, P. Pacheco, and R. Lemert. 1988a. Reuse of drainage water for irrigation: Results of Imperial Valley Study I. Hypothesis, experimental procedures and cropping results. *Hilgardia* 56:1-16.
- Rhoades, J., F. Bingham, J. Letey, P. Pinter, R. Lemert, W. Alves, G. Hoffman, J. Repogle, R. Swain and P. Pacheco. 1988b. Reuse of drainage water for irrigation: Results of Imperial Valley Study II. Salinity and water balance. *Hilgardia* 56:17-44.
- Simunek, J., and D.L. Suarez, D.L. 1993. Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 2. Model development. *Water Resour. Res.* 29:487-497.
- Simunek, J., and D.L. Suarez. 1996. UNSATCHEM Code for Simulating the one-dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport, and multi-component solute transport with major ion equilibrium and kinetic chemistry, Part A. U. S. Salinity Laboratory Research Report No. 128. U.S. Salinity Laboratory USDA, Riverside, CA.
- Suarez, D.L. 2001. Sodic soil reclamation: Model and field study. *Aust. J. of Soil Res.* 39: 1225-1246.
- Suarez, D.L. 2002. Evaluation of management practices for use of low quality waters for irrigation: Model simulations. In *Proceedings, Meeting of International Union of Soil Scientists, August 14 -21 Bangkok, Thailand, Symposiums No. 34.* 1096:1-8.
- Suarez, D. L., J.D. Rhoades, R. Lavado, and C.M. Grieve. 1984. Effect of pH on saturated hydraulic conductivity and soil dispersion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:50-55.
- Suarez, D.L., and J. Simunek. 1993. Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 2. Parameter selection, sensitivity analysis and comparison of model predictions to field data. *Water Resour. Res.* 29:499-513.
- Suarez, D.L., and J. Simunek. 1997. UNSATCHEM: Unsaturated water and solute transport model with equilibrium and kinetic chemistry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1633-1646.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.



TALLER DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS PARA LA  
IDENTIFICACIÓN DE SUELOS ENSALITRADOS MEDIANTE  
PERCEPCIÓN REMOTA  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004

WORKSHOP ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR  
IDENTIFICATION OF SOIL SALINITY THROUGH REMOTE  
SENSING  
JIUTEPEC, MORELOS. 2004

**FUNDING OPPORTUNITIES FOR AGRICULTURAL  
RESEARCH**

Carlos Rodríguez-Franco  
USDA-Agricultural Research Service-Office of International  
Research Programs  
International Affairs Specialist  
USDA-Foreign Agricultural Service Scientific Cooperation Research Program  
carlos.rodriquez@NPS.ARS.USDA.GOV

**INTRODUCTION**

Public agricultural related research activities all over the world are carried out at federal research agencies, colleges, universities, and private national research agencies, in addition to international research institutions hosted in the specific countries.

Federal budget for agricultural research is allocated in several ways. It can be direct funding for national government agencies with the fundamental mission of supporting the national system of science and technology; these agencies have the specific mandate to perform agricultural research at the national and state levels; national and state universities, and several related special funds. Private funding for agricultural research only comes from International Foundations for specific research subjects in specific countries and/or regions of the world. Private companies involved in agricultural research do not fund public or private research agencies other than themselves, although in some countries they pay for specific research work related to their products.

Currently, federal funding for agricultural research in many countries has a tendency to decrease, especially in the developing world. According to Pardey, Alston and Smith (1997) changes in the financing, management, and organization of agricultural research and development are occurring rapidly. After decades of sustained growth, the rate of growth of spending on agricultural research has slowed in most countries since the early 1980s, and in some countries spending has even shrunk. The private sector is paying for and conducting their own agricultural research, while governments are reducing their agricultural research and development spending.

These and other changes have pushed governments to adopt new funding schemes for agricultural research. Most of these new models are competitive grant schemes, which are increasing in use to fund agricultural research proposals. Competitive grant agricultural research funds are used, because they can target the use of the funding in specific research subjects, which are considered by the scientific community as the main priorities for the country; agricultural research subjects that are slowing down the national development in a specific science field; to stimulate collaborative research between different agencies; and to stimulate collaborative research between different countries.

Funding for international agricultural research represents a small fraction of the global funding spent by national governments in research, but it has proven to be a very efficient and effective way of not only carrying out research, but providing scientific opportunities for national scientists to strengthen their national research programs, and build scientific capacity. However, financing for international collaborative research is still scarce. The main objective of this paper is to present general information existing online for funding opportunities for international collaborative agricultural research available to scientists.

The annual competitive Scientific Cooperation Research Program welcomes proposals for joint international activities of mutual benefit in food security, sustainable agriculture, natural resource management, marketing, and trade. Priority will be given to innovative, mutually beneficial proposals.

The 2005 Scientific Cooperation Research Program (SCRCP) provides U.S. scientists up to \$15,000 each year for international research collaboration projects ranging from one to three years. A maximum of \$45,000 is available for any one long-term project. SCRCP funds may be used on direct research-related costs for international travel, including maintenance, per diem, and health insurance for foreign scientists in the U.S., supplies, equipment, and support for research associates.

<http://fedgrants.gov/Applicants/USDA/FAS/FAS/USDA-GRANTS-122904-001/Grant.html>

## **USDA-NATIONAL RESEARCH INITIATIVE**

The purpose of the NRI Program is to support research, extension, and education grants that address key problems of national, regional, and multistate importance

in sustaining all components of agriculture (farming, ranching, forestry including urban and agroforestry, aquaculture, rural communities, human nutrition, processing, etc.). Providing this support requires that NRI advance fundamental sciences in support of agriculture and coordinate opportunities to build on these discoveries. Building on these discoveries will necessitate new efforts in education and extension that deliver science-based knowledge to people, allowing them to make informed practical decisions. In FY 2005, the NRI Program will accept applications for fundamental research, mission-linked research, and integrated research, extension, and education projects. Application due dates vary by program. See the list of due dates at the end of the FY 2005 NRI Request for Applications (RFA).

<http://www.fedgrants.gov/Applicants/USDA/CSREES/OEP/USDA-GRANTS-090304-001/Grant.html>

### **USDA-FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE-THE COCHRAN FELLOWSHIP PROGRAM**

The purpose of CFP is to provide U.S.-based agricultural training opportunities for senior and mid-level overseas specialists and administrators from the public and private sectors that are concerned with agricultural trade, agribusiness development, management, policy, and marketing. CFP provides short term training opportunities that match participants with professionals in their fields. Training programs vary, but most include technical instruction, “hands on” experience and practical field observations. Eligible countries are those considered middle income, emerging markets or emerging democracies. Applications must be submitted in English. Candidates are interviewed and evaluated by a USDA committee. To be eligible, a country may be classified as middle-income, an emerging democracy, or an emerging market. In any case, the country’s principal agricultural exports must not compete significantly with U.S. agricultural commodities and products in international trade.

<http://www.fas.usda.gov/icd/food-industries.cfp/index.html>

### **USDA-FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE-THE NORMAN E. BORLAUG INTERNATIONAL AGRICULTURAL SCIENCE AND TECHNOLOGY FELLOWS PROGRAM.**

The Norman E. Borlaug International Agricultural Science and Technology Fellows Program is a faculty and scientist exchange program with developing countries. The program provides short-term scientific training for international agricultural research scientists and policymakers from selected developing countries. Each Fellow is assigned a mentor who will coordinate the Fellow’s training and visit the Fellow’s host country after completion of the training. Training venues include U.S. land grant universities, USDA or other government agencies, private companies, not-for-profit institutions and international agricultural research centers.



The program is open to participants from developing and middle income countries. At this time, the priority regions of coverage are Africa, Latin America and the Caribbean, and Asia, with active programs in Bulgaria, Central America, Morocco, the Philippines, Romania, Serbia-Montenegro, Vietnam, and West Africa.

The purpose of the Borlaug Fellows Program is to help countries strengthen their agricultural practices through the transfer of new science and agricultural technologies. The program encompasses a wide variety of agricultural technologies, including those related to production, processing and marketing. The program also addresses obstacles to the adoption of technology, such as ineffectual policies and regulations. Areas of training can be in any agriculture-related field, and include traditional areas such as agronomy, plant pathology, entomology, veterinary sciences, microbiology, agricultural economics, but also may include food safety, sanitary and phytosanitary topics, environmental sciences, agricultural biotechnology, global climate change, water quality and management, among others.

<http://www.fas.usda.gov/icd/borlaug/program.htm>

## **NATIONAL SCIENCE FOUNDATION-PARTNERSHIPS FOR INTERNATIONAL RESEARCH AND EDUCATION**

Partnerships for International Research and Education will enable U.S. institutions to establish collaborative relationships with foreign groups or institutions in order to advance specific research and education objectives and to make possible a research effort that neither side could accomplish on its own. As science and engineering become increasingly global, U.S. scientists and engineers must be able to operate in teams comprised of partners from different nations and cultural backgrounds. International partnerships are, and will be, increasingly indispensable in addressing many critical global scientific problems. The program is intended to catalyze a cultural change in U.S. institutions by establishing innovative new models for international collaborative research and education. It is also intended to facilitate greater variety in student participation and preparation, and to contribute to the development of a diverse, globally-engaged, science and engineering workforce.

[http://www.nsf.gov/funding/pgm\\_summ.jsp?pims\\_id=12819&org=NSF&from=fund](http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=12819&org=NSF&from=fund)

## **NATIONAL SCIENCE FOUNDATION-INTERNATIONAL RESEARCH FELLOWSHIP PROGRAM**

The objective of the International Research Fellowship Program (IRFP) is to introduce scientists and engineers in the early stages of their careers to research opportunities abroad, thereby furthering NSF's goal of creating a diverse, competitive, and globally-engaged U.S. workforce of scientists, engineers, technologists and well-prepared citizens. These awards are available in any field of science and engineering research

and education supported by NSF. Foreign science or engineering centers and other centers of excellence in all geographic regions are eligible host institutions.

[http://www.nsf.gov/funding/pgm\\_summ.jsp?pims\\_id=5179&org=NSF&from=fund](http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=5179&org=NSF&from=fund)

## **UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT (USAID)**

Since 1978, USAID has supported research, education, and outreach through the Collaborative Research Support Programs (CRSP). The CRSPs harness the expertise of U.S. universities in low-cost, high-impact programs that contribute knowledge, trained personnel, and technology to agriculture worldwide in the fight against hunger and poverty. The nine CRSP programs funded by USAID and other collaborating organizations focus research upon crops, including beans and cowpeas, sorghum and millet, and peanuts; broadening access to factors and strengthening input systems; livestock; integrated pest management; pond dynamics and aquaculture; soil management; and sustainable agriculture and natural resources management. CRSP programs help build national agricultural research capacity in developing countries as well as benefit American agriculture. CRSP programs embody the mutual dependence of research, outreach, and training, in which training is integrated with research, and applied solutions require outreach.

The Agency also funds research grant programs to promote development-focused technical cooperation among Middle Eastern countries, and the utilization of U.S. and Israeli expertise by developing countries. The Middle East Regional Cooperation (MERC) Program and the U.S.-Israel Cooperative Development Research (CDR) Program both fund competitively reviewed, applied research projects. CDR supports joint research projects involving U.S. and Israeli scientists working with counterparts in developing countries in Africa, Asia, and Latin America on topics relevant to the needs of the developing-country partners. MERC supports development in the Middle East via projects that involve direct Arab-Israeli cooperation. Developing-country institutions receive a substantial share of the funds from each of the nearly 100 CDR and MERC grants for the training of scientists, laboratory equipment, and other capacity-strengthening measures. These research programs are open to nearly all relevant technical topics and have produced advances in saline and arid lands agriculture, enhanced understanding of emerging diseases and other threats to human health, improved water management technology, advances in biological pest management, and improved systems for natural resources and wildlife management.

[http://www.usaid.gov/our\\_work/agriculture/research.htm](http://www.usaid.gov/our_work/agriculture/research.htm)

## **INTERNATIONAL FOUNDATION FOR SCIENCE**

IFS is a research council with international operations and the mission to build the scientific capacity of developing countries in sciences related to the sustainable management of biological and water resources.

IFS believes that the interests of both science and development are best served by promoting and nurturing the research efforts of promising young science graduates, who have the potential to become leading scientists in their countries. Since 1974, IFS has provided support to more than 3500 IFS Grantees in some 100 developing countries in Africa, Asia, the Pacific, Latin America and the Caribbean.

<http://www.ifs.se/>

## **FULBRIGHT PROGRAM**

The Fulbright Program, the U.S. government's flagship program in international educational exchange, was proposed to the U.S. Congress in 1945 by then freshman Senator J. William Fulbright of Arkansas. In the aftermath of World War II, Senator Fulbright viewed the proposed program as a much-needed vehicle for promoting "mutual understanding between the people of the United States and the people of other countries of the world." His vision was approved by Congress and the program signed into law by President Truman in 1946.

The Worldwide Fulbright Scholar-in-Residence Program brings visiting scholars and professionals from abroad to lecture at U.S. colleges and universities for one semester or one academic year. Fulbright Scholars-in-Residence can have a significant impact on U.S. colleges and universities. In addition to teaching courses, scholars give campus-wide and community lectures, help initiate international programs and contribute to curriculum development. Although preference is given to proposals in the humanities or social sciences, other fields focusing on international issues will be considered. The program is especially appropriate for small liberal arts colleges, minority-serving institutions, and community colleges, many of which do not often have the opportunity to host visiting scholars.

<http://www.cies.org/sir/sir.htm>

<http://www.comexus.org.mx/Mexicanos/InvInv.htm>

## **AGRICULTURAL RESEARCH FUNDING GUIDE**

This webpage provides access to a complete list of web sites for funding sources for agricultural research. Sponsors listed at this webpage support international or domestic agricultural research in several fields. This is one of the most complete lists of funding agencies.

[http://www.fao.org/sd/2003/KN0104a4\\_en.thm#t6](http://www.fao.org/sd/2003/KN0104a4_en.thm#t6)

## **REFERENCES**

1. Pardey, P. G., Alston, J. M., and Smith, V. H. 1997. Financing science for global food security. IFPRI 1997 Annual Report.

2. Keith Fuglie, Nicole Ballenger, Kelly Day, Cassandra Klotz, Michael Ollinger, John Reilly, Utpal Vasavada, and Jet Yee. 1996. Agricultural Research and Development: Public and Private Investments under Alternative Markets and Institutions. Agricultural Economics. USDA. ERS. USA. Report No. 735. 88 pp.
3. Allred E., Gouge, E., and Neufville, M. 2003. R&D in the Department of Agriculture. National Association of State Universities and Land-Grant Colleges. 4p.  
<http://www.aaas.org/spp/rd/03pch11.htm>
4. Pray, E. C., Anwar, and N. 2003. The Economics of Agricultural Biotechnology Research. Agricultural and Development Economics Division. The Food and Agriculture Organization of the United Nations. ESA Working Paper No. 03-07. 37p.
5. Pray, E. C., Anwar, N. 2003. Economics of agricultural research. 2003. State of Food and Agriculture report. Chapter 3. The Food and Agriculture Organization of the United Nations.  
<http://www.einaudi.cornell.edu/conf/2003/gmopoverty/pdf/FAOtext-finalcp.pdf>
6. Rubenstein, K.D., Heisey, P.W., Klotz-Ingram, C., and Frisvold, G.B. 2003. Competitive grants and the funding of agricultural research in the United States. Review of Agricultural Economics 25(2): 352-368.



## **INFORME FINAL**

# **TALLER DE ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS ENSALITRADOS MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA**

Leonardo Pulido Madrigal

Jiutepec, Morelos, 22 de noviembre de 2004



## **INTRODUCCIÓN**

La salinidad del suelo de los distritos de riego del norte de la República Mexicana y del sur de los Estados Unidos de América, es uno de los principales factores que causan pérdidas de producción de cosechas en las áreas de riego.

El problema de afectación por sales es dinámico en el tiempo y en el espacio, por lo cual es de interés tanto del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) como del Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos (ARS), llevar a cabo en forma conjunta trabajos de investigación que permitan disponer de tecnologías aplicables en campo, para generar información sobre la ubicación y extensión de las áreas afectadas por sales. Mediante la aplicación de estas tecnologías deberán de producirse mapas a la escala de una cuenca, de un distrito de riego y de una parcela, en forma económica, que den resultados de calidad y cuya elaboración sea más rápida comparada con la que actualmente se logra con los métodos tradicionales. Los mapas de salinidad así generados servirán para que autoridades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y productores dispongan de una herramienta útil para prevenir y manejar los problemas de salinidad.

Los días 18 y 19 de noviembre un grupo de 20 especialistas de México, de los Estados Unidos y de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), se reunieron en el Centro de Capacitación Progreso del IMTA, ubicado en Jiutepec, Morelos, para llevar a cabo el “Taller de análisis de tecnologías para la identificación de suelos ensalitrados mediante percepción remota”.

## **ANTECEDENTES**

Con el fin de identificar y poner en marcha proyectos que atiendan problemáticas comunes ambientales de México y Estados Unidos, el 30 de julio de 2003, se firmó el Memorándum de Entendimiento entre la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (SEMARNAT-USDA). Para su ejecución se establecieron mesas de trabajo correspondiendo al sector agua una de ellas. Es en este ámbito que se establecieron acercamientos entre funcionarios y técnicos del ARS y del IMTA, siendo el primer contacto un taller organizado por ambas instituciones y celebrado el 2 de octubre del 2002 en las instalaciones del IMTA, en el cual se identificaron tres grandes áreas de interés: salinidad y manejo de suelos; manejo y conservación del agua y secuestro de carbono, con ocho subtemas específicos. Posteriormente del 7 al 9 de Mayo de 2003 en Tucson, Arizona en otro taller organizado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y el USDA, se manifestó interés bilateral entre el ARS y el IMTA por la ejecución de tres proyectos uno de ellos en el tema de salinidad, dando así pauta para la realización conjunta del “Taller de análisis de tecnologías para la identificación de suelos ensalitrados mediante percepción remota”, objeto de este informe.



## **OBJETIVO GENERAL**

Selección de metodologías para la identificación y monitoreo de áreas afectadas por salinidad y drenaje deficiente, aplicables a la escala de cuenca hidrológica, de distrito de riego y de parcela.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Analizar y discutir los adelantos tecnológicos del uso de imágenes de satélite, de radar, de técnicas eléctricas, magnéticas y electromagnéticas para la identificación de la salinidad de los suelos.
- b) Analizar y discutir otras tecnologías en etapa de desarrollo, para la identificación de la salinidad a diferentes escalas espaciales.
- c) Establecer proyectos de colaboración para la aplicación y calibración de las diferentes metodologías de identificación y monitoreo de la salinidad de los suelos en distintas escalas.

## **ACTIVIDADES DEL JUEVES 18 DE NOVIEMBRE**

En el primer día de trabajo se llevó a cabo un intercambio de experiencias de investigación y desarrollo tecnológico, para lo cual se presentaron las ponencias que a continuación se señalan:

9:00-9:45 Bienvenida, presentación del taller, objetivos y resultados a alcanzar; mecánica del taller. Dr. Benjamín de León Mojarro

9:45-10:05 Salinity Assessment at Field and Landscape Scales Using ECa Sensing Data. Dr. Dennis Corwin.

Moderador: Dr. Julián Martínez Beltrán

10:05-10:25 Comentarios

10:25-10:45 The Plant Indicator Method for Mapping Crop Yields and Root Zone Soil Salinity in Irrigation Districts. Dr. Craig L. Wiegand

Moderador: M.C. Leonardo Pulido Madrigal

10:45-11:05 Comentarios

11:05-11:25 Identificación de la salinidad del suelo y estimación del rendimiento de los cultivos con sensores remotos a la escala de un distrito de riego. M.C. Leonardo Pulido Madrigal

Moderador: Dr. Donald Suarez

11:25-11:45 Comentarios

11:45-13:00 Comida

13:00-13:20 Avance de investigación del efecto de la calidad del agua de riego en el distrito de riego 038 Río Mayo. M. C. Fernando Cabrera.

Moderador: Dr. Manuel Ortega Escobar

13:20-13:40 Comentarios

13:40-14:00 Avances de investigación del INIFAP CENID RASPA para evaluar la degradación de los suelos con salinidad o elementos tóxicos. Dr. José Luis González Barrios

Moderador: Dr. Carlos Rodríguez Franco

14:00-14:20 Comentarios

14:20-14:40 Models as a Tool for Soil Management with Examples from Field Scale Sodic Soil Reclamation Project and Boron Leaching Studies. Dr. Donald Suarez.

Moderador: Dra. Silvia Casas González

14:40-15:00 Comentarios

15:00-15:10 Receso

15:10-15:30 Programme on Drainage, Control of Salinization and Water Quality Management. Dr. Julián Martínez Beltrán.

Moderador: Dr. Arturo González Casillas

15:30-15:50 Comentarios

15:50-16:10 Funding opportunities for agricultural research. Dr. Carlos Rodríguez Franco. Dr. Carlos Rodríguez Franco.

Moderador: Dr. Benjamín de León Mojarro

16:10-16:30 Comentarios

16:30-16:40 Receso

16:40-17:20 Conformación de los tres grupos para sesionar el día 19 de noviembre a fin de estructurar las propuestas de colaboración.

Moderador: Dr. Benjamín de León Mojarro

## **ACTIVIDADES DEL VIERNES 19 DE NOVIEMBRE**

El objetivo del trabajo realizado durante este día fue la definición de proyectos de investigación en colaboración.

Los participantes en el taller fueron distribuidos en tres grupos de trabajo que atendieron básicamente la escala de estudio de la salinidad a partir de una cuenca, de un distrito de riego y de una parcela.

La metodología que cada grupo debió seguir, consistió en una guía que se elaboró de común acuerdo para realizar su propuesta. La guía consideró los siguientes apartados:

- Título de propuesta; colaboradores; nombre; institución; planteamiento del problema; importancia; impactos, objetivo(s) general y específico(s); metodología; actividades; responsables; calendario; posibles fuentes de financiamiento.
- Cada planteamiento debería ajustarse a las siguientes preguntas: ¿La propuesta es viable científica y tecnológicamente? ¿La realización de la propuesta requiere del desarrollo de nuevo equipo, software, etc. o existen en el mercado? ¿La propuesta tiene una aplicación práctica y cuánto tiempo se requiere para su multiplicación? ¿Cuáles etapas son necesarias para implementar la propuesta? ¿Cuáles son los resultados de la propuesta (planos de salinidad, superficie afectada, etc.)? ¿A quién benefician los resultados: directivos, planificadores, operadores, productores, sociedad en general? ¿Los resultados pueden utilizarse para análisis beneficio/costo? ¿Qué factores externos pueden desanimar o amenazar la puesta en marcha de los resultados?

Los participantes para cada grupo de trabajo buscaron integralidad en las perspectivas, y complementariedad, así quedaron conformados de la siguiente manera:

**GRUPO DE TRABAJO UNO:** hizo una propuesta para un área de la magnitud de una cuenca, participaron: Juan Guillermo Martínez Rodríguez, Christopher Watts, Jorge Brena Zepeda, Jorge González Meraz, Dennis Corwin y Carlos Rodríguez Franco.

**GRUPO DE TRABAJO DOS:** hizo una propuesta para un área de la magnitud de un distrito de riego, participaron: Julián Martínez Beltrán, José Luis González Barrios, Silvia Casas González, Servando Castillo, Craig L. Wiegand y Leonardo Pulido Madrigal.

**GRUPO DE TRABAJO TRES:** hizo una propuesta para un área de la magnitud de una parcela, participaron: Donald Suarez, Benjamín de León Mojarro, Héctor Sanvicente Sánchez, Manuel Ortega Escobar y Carlos Ramírez Ayala.

## **Propuesta realizada por el Grupo 1**

### **Título:**

Evaluación de la salinidad de los suelos a escala de cuenca hidrográfica.

### **Planteamiento del problema:**

Como el área de una cuenca suele ser grande, la teledetección podría ser la tecnología más adecuada a esta escala, debido al costo y al tiempo que requieren los métodos basados en el muestreo convencional de suelos. A esta escala, se pretende evaluar con mayor atención la salinidad de origen natural.

### **Objetivos:**

Identificar en una cuenca piloto las áreas que actualmente tienen problemas de salinidad y las potenciales, mediante análisis de imágenes de satélite y sistemas de información geográfica (SIG).

### **Impactos:**

Establecimiento y validación de un método para la identificación de áreas salinas en una cuenca.

### **Método de trabajo:**

Se pretende identificar áreas actualmente salinizadas o susceptibles de salinizarse, mediante el uso de mapas temáticos (topográficos, climáticos, de suelos) y de información adicional (aguas subterráneas, calidad del agua, historial de la productividad), utilizando imágenes de satélite y sistemas de información geográfica).

Se analizará la información contenida en los mapas para después manejarla mediante el álgebra de mapas de un SIG. Con ello, se podrán identificar unidades geomorfológicas que presenten condiciones naturales que favorezcan la acumulación excesiva de sales solubles en el perfil del suelo.

Dado que existe un vínculo muy estrecho entre el índice de evapotranspiración y la presencia de salinidad en suelos, se pretende utilizar el Algoritmo de Balance de Energía Superficial (SEBAL), con imágenes de satélite multitemporales, para estimar la distribución de los volúmenes de evapotranspiración en toda la cuenca.

Se deberá elegir una cuenca piloto que cuente con la mayor cantidad de información. Se propone que dicha cuenca sea de interés binacional; podrían ser la cuenca del Conchos, la cuenca del Medio Lerma, la cuenca del río Sonora y la cuenca del Nazas.

**Actividades:**

1. Recopilación y análisis bibliográfico.
2. Definición de la cuenca objeto del estudio
3. Recopilación y adquisición de información cartográfica
4. Recopilación de información específica existente en el área objeto del estudio (calidad del agua, niveles freáticos, productividad, etc.)
5. Digitalización de datos.
6. Selección del método de trabajo.
7. Procesamiento de la información.
8. Obtención de mapas preliminares de salinidad.
9. Recorrido de campo, obtención y análisis de muestras de suelo.
10. Validación de los mapas preliminares.
11. Preparación de un documento metodológico.

**Calendario:**

Duración del proyecto: 24 meses

Act	Número de meses																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	x	x	x	x																				
2	x																							
3			x	x	x	x																		
4			x	x	x	x																		
5							x	x	x							x	x	x						
6				x	x	x																		
7									x	x	x	x	x	x	x			x	x	x				
8																			x	x				
9																	x	x	x	x				
10																			x	x	x			
11																							x	x

**Participantes:**

- Juan Guillermo Martínez Rodríguez (CENID-RASPA)  
 Christopher Watts (UNISON)  
 Jorge Brena Zepeda (IMTA)  
 Jorge González Meraz (IMTA)  
 Julián Martínez Beltrán (FAO)  
 Dennis Corwin (USDA)  
 Carlos Rodríguez (USDA)

**Posibles fuentes de financiamiento:**

CONACYT (nacional y estatales); NAD Bank; Scientific Cooperation Research Program (SCRIP), National Research Institute (NRI), FAO, UC Mexus, IMTA.

## **Propuesta realizada por el Grupo 2**

### **Título:**

Identificación de áreas afectadas por salinidad a escala de un distrito de riego mediante teledetección

### **Planteamiento del problema:**

Como en México, la disponibilidad de agua de riego para cubrir las necesidades plenas de los distritos de riego es pequeña, es necesario tomar medidas para utilizar más adecuadamente el agua disponible. En los distritos de riego que tienen problemas de salinidad, es importante identificar las áreas afectadas por sales, debido a que en ellas la producción es menor y para su recuperación demandan mayores volúmenes de agua de riego. Se estima que en los distritos de riego del norte de México y del sur de Texas aproximadamente un 30 por ciento de su superficie está afectada por salinidad, lo cual impacta negativamente en la economía de la región por la disminución de la producción agrícola.

Actualmente la política del Gobierno de México es priorizar el aprovechamiento del agua y del suelo, por lo cual es importante delimitar las áreas agrícolas afectadas por sales y recomendar medidas adecuadas desde el punto de vista técnico, económico, ambiental y social, para aprovechar adecuadamente las áreas afectadas.

### **Objetivos:**

El objetivo general es identificar áreas afectadas por salinidad a escala de un distrito de riego.

### **Objetivos específicos son los siguientes:**

- Obtener mapas que señalen la extensión y severidad de las áreas afectadas por sales.
- Estimar el impacto de la salinidad en la producción de cosechas.
- Interpretar los resultados de salinidad en relación con el clima, los suelos y el manejo agronómico.
- Delimitar las superficies que requieren rehabilitación de suelos.

### **Impactos:**

Este proyecto podría beneficiar a los distritos de riego del norte de México, que en conjunto representan una superficie de dos millones de hectáreas, de las cuales se estima que el 30 por ciento (600 000 hectáreas) están afectadas por salinidad en algún grado. La pérdida de producción en dicha superficie se estima en aproximadamente 300 000 toneladas anuales.

### Método de trabajo:

Aplicación de una tecnología que permita cartografiar las áreas afectadas por sales, basada en las técnicas de percepción remota, con aplicación de sensores electromagnéticos y sistemas de información geográfica. Los métodos a aplicar serían: el método fisiográfico de cartografía de suelos, el método de la planta indicadora y el sensor electromagnético.

Se utilizarán imágenes Spot multiespectrales para calibrarlas con mediciones de campo y llevar a cabo una clasificación que permitirá delimitar las áreas afectadas. Con las imágenes de satélite se hará un estudio de fotointerpretación con visión estereoscópica para definir las unidades geomorfológicas, por la relación existente entre la geomorfología y la salinidad. Mediante el sensor electromagnético se estudiarán las áreas que están cubiertas con vegetación y que no tienen uso agrícola o pecuario. Los sistemas de información geográfica harán posible el análisis conjunto de los parámetros relacionados con la salinidad utilizando, entre otros, mapas topográficos, de suelos, del agua freática, de usos del suelo y de la red de riego y drenaje.

### Actividades:

1. Recopilación de información histórica relacionada con la salinidad.
2. Integración de esta información en un sistema de información geográfica.
3. Obtención de imágenes de satélite (es importante considerar las fechas de adquisición de imágenes según las etapas fenológicas de los cultivos).
4. Obtención del mapa geomorfológico mediante la fotointerpretación de imágenes y apoyo de observaciones de campo.
5. Obtención de datos de campo de salinidad en parcelas de prueba; procesamiento de las imágenes y obtención de un primer mapa parcial de salinidad.
6. Calibración del sensor electromagnético; procesamiento de los datos obtenidos con el sensor y obtención de un segundo mapa parcial de salinidad del distrito de riego.
7. Mediante el sistema de información geográfica comparación del mapa obtenido por teledetección con el mapa geomorfológico, para delimitar áreas afectadas con diferentes niveles de salinidad.
8. Obtención del mapa de salinidad del distrito de riego.
9. Evaluación cuantitativa del impacto económico, social y ambiental de las áreas afectadas por salinidad

### Calendario

Duración: 12 meses

No. Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
1	X											
2	X	X										
3		X	X	X								
4			X	X	X							
5						X	X	X				
6							X	X	X			
7								X	X			
8									X	X	X	X
9											X	X

**Participantes:**

M.C. Leonardo Pulido IMTA  
Dr. Donald Suárez USDA

Coordinadores institucionales:

1. Dr. Craig L. Wiegand: método de la planta indicadora
2. Dr. José Luis González Barrios: Fisiografía-geomorfología-sensor electromagnético
3. Dr. Julián Martínez Beltrán: fisiografía-geomorfología
4. Dra. Silvia Casas González: percepción remota-sistemas de información geográfica

**Posibles fuentes de financiamiento:**

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT); Comisión Nacional del Agua (CNA); FOMIX (Gobierno del Estado-CONACYT); Asociaciones de Usuarios de los Módulos de Riego; Banco Mundial. Con la colaboración de CENID-RASPA-INIFAP, Universidad Autónoma de Tamaulipas, FAO, IMTA, ARS-USDA.

**Propuesta realizada por el Grupo 3**

**Título:**

Uso de imágenes de satélite y de radar terrestre para el manejo de la salinidad y del riego parcelario.

**Planteamiento del problema:**

El diseño y operación del riego parcelario requieren la disponibilidad de datos obtenibles rápida y económicamente, como son la humedad, porosidad y densidad del suelo, y la posición del nivel freático. Esto es especialmente necesario en el riego por gravedad, que en México se utiliza en 5 millones de hectáreas, que necesitan nuevas tecnologías para que el uso del agua sea más eficiente.

**Objetivos:**

El objetivo de esta propuesta es desarrollar métodos de diseño del riego y seguimiento de la salinidad para preparar recomendaciones sobre la mejora de la operación del riego.

**Impacto:**

Con estos métodos de evaluación de los sistemas de riego utilizando planos de humedad y de salinidad, podría reducirse el costo de la toma de muestras de suelos



y su posterior análisis de laboratorio para la determinación de su humedad. Se espera también que mejore la calibración del EM 38.1, y finalmente se ahorre agua y aumente la productividad del agua empleada.

**Método de trabajo:**

Calibración de imágenes de satélite mediante el sensor EM 38, análisis de suelos en laboratorio, determinación del nivel freático mediante lecturas piezométricas y evaluación del riego en cultivos con cobertura total.

**Actividades:**

1. Selección de parcelas.
2. Instrumentación de la medida.
3. Calibración de la señal para diferentes rangos de frecuencia.
4. Obtención de correlaciones de reflectancia del cultivo con la conductividad eléctrica.

Lugares de trabajo: INIFAP-CELAYA; CENID-RASPA; CENATRYD.

Duración del proyecto: 2005-2007.

**Participantes:**

Carlos Fuentes Ruiz; Juan Carlos Herrera Ponce; Marco Antonio Vuelvas Cisneros (IMTA e INIFAP). Con la colaboración del Laboratorio de Salinidad de Riverside (ARS-USDA), el Colegio de Posgraduados, y la FAO.

**Posibles fuentes de financiamiento:**

CONACYT, CNA, SAGARPA, IMTA

**PARTICIPANTES:**

Participante	Institución	Ubicación	Correo electrónico
1. Julián Martínez Beltrán	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación	Roma, Italia	Julian.MartinezBeltran@fao.org
2. Manuel Ortega Escobar	Colegio de Posgraduados	Montecillos, Estado de México	manueloe@colpos.mx
3. Carlos Ramírez Ayala	Colegio de Posgraduados	Montecillos, Estado de México, México	cara@colpos.mx
4. Christopher Watts	Universidad de Sonora	Hermosillo, Sonora, México	watts@fisica.uson.mx
5. Silvia Lucero Casas González	Universidad Autónoma de Tamaulipas	Ciudad Victoria, Tamaulipas, México	scasas@uat.edu.mx
6. José Luis González Barrios	Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Suelo Planta Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias	Gómez Palacio, Durango, México	gonzalez.barrios@inifap.gob.mx
7. Juan Guillermo Martínez	Centro Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Suelo Planta Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias	Gómez Palacio, Durango, México	martinez.juanguillermo@inifap.gob.mx
8. Fernando Cabrera Carvajal	Campo Experimental Valle del Mayo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias	Navojoa, Sonora, México	Cabrera.fernando@inifap.gob.mx
9. Donald L. Suarez	Laboratorio de Salinidad George E. Brown Jr. del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos	Riverside, California, Estados Unidos de América	dsuarez@ussl.ars.usda.gov
10. Dennis L. Corwin	Laboratorio de Salinidad George E. Brown Jr. del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos	Riverside, California, Estados Unidos de América	dcorwin@ussl.ars.usda.gov
11. Craig L. Wiegand	Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos	Weslaco, Texas, Estados Unidos de América	Craigwiegand@aol.com
12. Carlos Rodríguez Franco	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos	Beltsville, Maryland, Estados Unidos de América	Carlos.Rodriguez@NPS.ARS.U.SDA.GOV
13. Benjamín de León Mojarro	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua	Jiutepec, Morelos, México	bleon@tlaloc.imta.mx

14. Leonardo Pulido Madrigal	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua	Jiutepec, Morelos, México	lpulido@tlaloc.imta.mx
15. Jorge González Meraz	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua	Jiutepec, Morelos, México	jgmeraz@tlaloc.imta.mx
16. Arturo González Casillas	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua	Jiutepec, Morelos, México	agonzalc@tlaloc.imta.mx
17. Jorge Brena Zepeda	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua	Jiutepec, Morelos, México	jbrena@tlaloc.imta.mx
18. Servando Castillo	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua	Jiutepec, Morelos, México	cervando@tlaloc.imta.mx
19. Héctor Sanvicente Sánchez	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua	Jiutepec, Morelos, México	hsanvice@tlaloc.imta.mx
20. Patricia Herrera Ascencio	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua	Jiutepec, Morelos, México	pherrera@tlaloc.imta.mx
21. Gloria Hernández	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua	Jiutepec, Morelos, México	ghernan@tlaloc.imta.mx

#### ACUERDOS:

1. Los expositores que no entregaron su ponencia, deberán enviarla en un plazo menor a 30 días, a partir del 22 de noviembre, con el propósito de publicar una memoria del taller.
2. Se elaboraron en forma general tres propuestas de proyecto para abordar el tema de identificación de la salinidad a la escala de una cuenca, de un distrito de riego y de una parcela.
3. Se mantendrá comunicación con los participantes interesados, para concluir la elaboración de las propuestas de proyecto y definir a qué instituciones se presentarán para buscar financiamiento que permita llevarlas a cabo.

**REPORT OF THE WORKSHOP ANALYSIS  
OF TECHNOLOGIES FOR IDENTIFICATION  
OF SOIL SALINITY THROUGH REMOTE  
SENSING**

**Potential Collaborative Research Projects**

Leonardo Pulido Madrigal  
Carlos Rodríguez Franco

Jiutepec, Morelos, 22 de noviembre de 2004



## 1. Soil salinity assessment at watershed levels a study case.

### **Participants**

Juan Guillermo Martínez Rodríguez (INIFAP), Christopher Watts (Sonora University), Jorge Brena Zepeda (IMTA), Jorge González Meraz (IMTA), Dennis Corwin (ARS) y Carlos Rodríguez Franco (ARS), and Julián Martínez Beltrán (FAO).

### **Importance**

Remote sensing tools are most adequate to work at the watershed level, because the area to be cover is a big amount of land surface. The limiting factor when other methodologies are used is the problem of soil sampling, because of their high cost and time consuming. A watershed level the attempt is to assess soil salinity of natural origin due to the work scale.

### **Impact**

Establishment and validation of a tool to assess soil salinity areas at watershed level.

### **Objective**

To evaluate using a GIS and satellite images the potential and current land tracks with salinity problems in a pilot watershed.

### **Methodology**

Using a GIS and satellite images with thematic maps (topography, weather, soils) and other databases such as meteorological stations, underground water, water quality and productivity history susceptible and current areas with salinity problems will be determined.

The information will be analyzed and it will be managed with maps algebra in a GIS. With this geomorphologic units would be generated, and those with natural conditions favoring excessive salt accumulation over and in the soil profile will be determined.

Because of the strong relationship between the evapotranspiration index and soil salinity the algorithm of superficial energy balance (SEBAL) will be used with multi-temporally satellite images to estimate evapotranspiration voluMonth in the watershed.

A pilot watershed must be elected. This watershed must have information as much as is possible. It is proposed that the watershed must be of bi-national interest, and it could be the Conchos' watershed, Lerma middle river watershed, Sonora river watershed, or the Nazas river watershed.

### Activities

1. Literature review and analysis.
2. Definition watershed for study.
3. Collection and acquisition of cartographic information.
4. Collection of specific information of the study area (water quality, water table, productivity, etc.).
5. Data digitalization.
6. Definition of working methodology.
7. Information processing.
8. Preliminary salinity maps generation.
9. Field recognition and soil sampling.
10. Preliminary maps validation.
11. Methodological paper elaboration.

**Calendar.** Duration length 24 months.

Act	Number of months																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	x	x	x	x																					
2	x																								
3			x	x	x	x																			
4			x	x	x	x																			
5							x	x	x							x	x	x							
6				x	x	x																			
7									x	x	x	x	x	x	x			x	x	x					
8																			x	x					
9																	x	x	x	x					
10																				x	x	x			
11																								x	x

### Financing

Possible sources of funding are: CONACYT; NAD Bank; Scientific Cooperation Research Program; NRI; UC-Mexus; IMTA.

2. Remote sensing methods for identification of soil salinity affected areas at irrigation district level.

### **Participants**

José Luis González Barrios (INIFAP); Silvia Casas González (Tamaulipas University); Julián Martínez Beltrán (FAO); Craig L. Wiegand (ARS-retired); Servando Castillo (IMTA); Leonardo Pulido Madrigal (IMTA).

### **Problem**

In the irrigation districts there is low availability of water for irrigation to cover all the needs. This situation demands to think about useful measures to have more efficient water use, especially in those places with salinity problems. In irrigation districts with soil salinity problems is important to identify the areas affected by salt, because of their high demand of water volumes for irrigation and their effect on decreasing crop production. It is estimated that at northern Mexico and South of Texas irrigation districts are affected on 30 % of their area surface by salinity, which is impacting negatively the economy of the region.

### **Importance**

Currently, the Mexican government has a main policy the prioritization of the use of the soil and water, providing high importance to the delimitation of agricultural lands affected by salinity, and the obtainment of technical, economic, environmental and social recommendations for the correct use of these areas.

### **Impacts**

This project could benefit the northern Mexico and South of Texas irrigation districts. In Mexico they represent 2 million hectares, which 30 % (600, 000 ha) are affected by salinity. The production losses are estimated in 300,000 tons per year.

### **Objectives**

Identification of areas affected by salinity at irrigation district level.

#### **Specific objectives**

- Production of Maps showing the amount and severity of salt affected areas.
- To estimate the impact of soil salinity on crop production.
- To interpret the salinity results in terms of agronomic management, soils and weather.
- To delimit the areas those require soil rehabilitation.



## **Methodology**

A methodology that allows the mapping of salt affected areas will be applied. This methodology should have as a main basis the application of remote sensing techniques, electromagnetic sensors and GIS. The methods to be applied consist of: physiographical survey method, plant indicator method, electromagnetic sensor method. Multi-spectral spot images will be used to be calibrated with field measurements to allow the obtainment of affected areas classification.

Satellite images will be used for stereoscopic analysis to define geoforms related with areas affected by salt. Using the electromagnetic sensor the areas cover by vegetation and those without agricultural or animal husbandry use will be studied. The GIS will make possible the whole analysis of the parameters related to salinity, such as soil maps, topographic maps, water table, use of soil, irrigation channels and drainage network, among others.

1. Review of historical information related to salinity.
2. Integration of the information in a GIS.
3. Geomorphic map generation through image fotointerpretation and field observation.
4. Satellite images obtainment.
5. Field salinity data obtainment at testing plots. Images processing, obtainment of first partial salinity map.
6. Electromagnetic sensor calibration; data processing, and generation of the second partial salinity map.
7. Irrigation district salinity map obtainment.
8. Analysis of the map obtained with a GIS and the geomorphic map to delimit affected areas with different levels of salinity.
9. Economic, social, environmental impact assessment of the areas affected by salinity.

## **Responsible(s)**

MC. Leonardo Pulido  
Dr. Donald Suarez

## **Institutional Coordinators**

1. Dr. Craig Wiegand. Plant indicator method.
2. Dr. Jose L. Gonzalez B. Physiographic-geomorphologic-electromagnetic sensor.
3. Dr. Julian Martinez B. Physiographic-geomorphologic
4. Dr Silvia Casas G. remote sensing-GIS

## **Calendar**

Duration 1 year. It would important to consider the acquisition of satellite images with different phenologic stages.

<b>Act/month</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
1	X											
2	X	X										
3		X	X	X								
4			X	X	X							
5						X	X	X				
6							X	X	X			
7								X	X			
8									X	X	X	X
9											X	X

### **Financing**

Possible sources of funding are: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), National Water Commission (CAN), Mexican Secretary of Environment and Natural (SEMARNAT), CONACYT; Water stakeholders associations, World Bank.

3. Use of satellite and terrestrial radar images for soil salinity and plot irrigation management.

### **Participants**

Carlos Fuentes Ruiz (IMTA), Juan Carlos Herrera Ponce (IMTA), Marco Antonio Vuelvas Cisneros (INIFAP), US salinity Lab. (TBD).

**Problem.** Design and operation of irrigation at plot level requires the obtainment of humidity content, porosity, and density, water table position on the fastest and economic way possible.

**Importance.** Gravity irrigation is applied in 5 million hectares, which require new technologies for a more efficient water use.

**Impact.** Decreasing the cost of soil sampling for humidity content laboratory analysis, water savings, productivity, and improvement of the calibration for the EM 38.1 system, data interpretation to assess irrigation systems using humidity and salinity maps.

### **Objectives**

To develop a methodology for the design of irrigation, salinity monitoring, and management improvement recommendations.

### **Methodology**

Image calibration through EM 38, piece meters, crops, laboratory, irrigation monitoring in crops of total cover.

### **Activities**

Plot selection, measurement instrumentation, signal calibration for different frequency ranges, and crop reflectance correlations with electric conductivity.

Responsible(s) IMTA, USDA, and INIFAP.

**Calendar.** 2005 – 2007.

**Financing.** CONACYT, CAN, SAGARPA, IMTA.

**Place.** INIFAP-Celaya, CENID-RASPA, CENATRYD.

The two remaining project proposal were not developed, because they were stated at the end of the workshop at the plenary meeting.

5. Monitoring of soil salinity dynamics through the electric measurement of the apparent resistance. MI Hector Sanvicente (IMTA), US Salinity Lab. (TBD).
6. Management of residual water. Dr. Manuel Ortega (CP), MC Carlos Ramirez (CP), Juan Guillermo Martinez (INIFAP), US Salinity Lab. (TBD).

El libro *Taller de análisis de tecnologías para la identificación de suelos ensalitrados, mediante percepción remota. Memorias*, se terminó de imprimir el mes de abril de 2005 en los talleres del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos. La edición consta de cien ejemplares.