

## Monitoreo de la salinidad en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, México, mediante sensores remotos

L. Pulido Madrigal<sup>1</sup>, J. González Meraz<sup>1</sup>

(1) Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, 62550. Jiutepec, Morelos, México. E-mail: lpulido@tlaloc.imta.mx

### ABSTRACT

A soil salinity survey was carried out in the Rio Mayo irrigation district (ID) in 1996, using satellite imagery along with an EM-38 electromagnetic (EM) device. Data from Landsat TM imagery were calibrated with field data, according to the Plant Indicator methodology. This methodology yielded a partial salinity map of the ID, but including only those areas where indicator crops were cultivated. The remaining non-mapped areas were surveyed with an EM-38 electromagnetic device, generating a second partial salinity map. Both partial maps were integrated to get a complete soil salinity map of the ID. In 2001, another soil salinity survey was carried out using solely the EM device. The results of both methodologies were analyzed, resulting in less affected areas in 2001 compared to those obtained in 1996.

### 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. Debido a que los DR son las áreas agrícolas más productivas, la salinidad es considerada un problema serio ya que aproximadamente entre el 26 y el 30% del área está afectada por exceso de sales en diferente grado y por manto freático superficial. En el DR 038 Río Mayo se tiene afectada por salinidad un 20% de su superficie y por manto freático superficial aproximadamente un 53% de su área (Pulido *et al.*, 2003).

Pulido *et al.* (2003) en estudios realizados para identificar la salinidad del suelo en los DR 076 Valle del Carrizo y 041 Río Yaqui, adaptaron la metodología descrita por Wiegand *et al.* (1992), denominada de la Planta Indicadora (Wiegand *et al.*, 2005). Con este propósito utilizaron como indicadores de la salinidad la condición espectral de trigo y algodón sembrados extensivamente. En parcelas afectadas por salinidad sembradas con estos cultivos, se tomaron muestras de suelo y se determinó su concentración salina. Estos datos se analizaron conjuntamente con datos espectrales extraídos de imágenes de satélite Landsat TM a través de los cuales se generaron modelos estadísticos para obtener clasificaciones supervisadas de las áreas establecidas sobre las imágenes, lo cual condujo a la generación de mapas de salinidad.

Los sensores de inducción electromagnética son instrumentos que inducen pequeñas corrientes eléctricas en el suelo en forma de remolino con círculos, las cuales miden la magnitud del campo magnético generado por dichas corrientes. La magnitud de la corriente es directamente proporcional a la conductividad eléctrica del suelo (CE, dS/m) en las inmediaciones de esos círculos de corriente. Cada círculo de corriente genera un campo electromagnético secundario que es proporcional al valor del flujo de corriente dentro del mismo. Una fracción del campo secundario electromagnético inducido de cada círculo es interceptado por la bobina receptora, y la suma de estas señales es amplificada y transformada en voltaje el cual está linealmente relacionado con la CE aparente (CE<sub>a</sub>) de la profundidad ponderada del suelo (Rhoades, 1992).

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) actualizar el mapa de salinidad del suelo del distrito de riego 038 Río Mayo, utilizando imágenes de satélite, un sensor electromagnético EM-38 y un equipo receptor del sistema de posicionamiento global, 2) comparar los mapas de salinidad obtenidos en 1996 y 2001.

### **METODOLOGÍA**

El presente estudio se realizó durante los años 1996 y 2001 en el DR 038 Río Mayo, Son. El distrito se localiza entre los paralelos 26° 21' y 28° 31' N y meridianos 108° 26' y 110° 05', con una altura media de 40 m. Su clima es estepario semiárido, la precipitación media anual es de 388 mm, la temperatura media anual es de 21.4° C, y la evaporación media anual es de 2,222 mm.

#### **Muestreo de suelo y planta, medición de coordenadas geográficas y adquisición de la imagen**

La identificación de la salinidad con imágenes de satélite, requiere del uso de uno o más cultivos extensivos, que son utilizados como indicadores para detectar la salinidad. Los cultivos que mayor superficie ocuparon en el distrito de riego en los ciclos otoño-invierno 1995-1996 y primavera-verano 1996 son el trigo (*Triticum aestivum*), algodónero (*Gossypium hirsutum*) y sorgo (*Sorghum bicolor*). En terrenos cultivados con trigo, algodónero y sorgo, y afectados en diferente grado por la salinidad, se seleccionaron 10 parcelas comerciales de aproximadamente 10 ha cada una para realizar la calibración de la imagen de satélite. En las parcelas se tomaron muestras de suelo a 0-30 cm y de 30-60 cm de profundidad en cada sitio, para luego determinar en el laboratorio la CE del extracto de saturación del suelo. Se adquirieron dos imágenes del satélite Landsat 5 TM; al DR 038 lo cubre la escena 034/041. Para cartografiar la superficie de trigo, se utilizó una imagen de satélite del 23 de febrero de 1996 y para cartografiar las áreas de algodónero y sorgo, una imagen del 14 de junio de 1996.

#### **Obtención del mapa de salinidad a través del análisis de imágenes de satélite**

Las escenas se georeferenciaron y de las ocho bandas que tiene una imagen fueron utilizadas las bandas TM2 (reflectancia en el verde, 500-590 nm), TM3 (reflectancia en el rojo (610-680 nm) y TM4 (reflectancia en el infrarrojo cercano, 790-890 nm). En cada una de ellas fueron localizadas las parcelas de observación referidas, con el propósito de extraer los valores espectrales correspondientes. Estos valores se utilizaron posteriormente para elaborar modelos de regresión lineal múltiple, mismos que sirvieron para clasificar por salinidad la superficie de trigo, algodónero y sorgo. Como resultado se obtuvieron tres mapas de salinidad (uno por cada cultivo), que al ser integrados permitieron disponer de un mapa de salinidad que cubrió parcialmente el área geográfica del distrito de riego.

#### **Medición extensiva de la salinidad con un sensor electromagnético EM-38**

En el estudio de 1996 se utilizó un sensor electromagnético EM-38 de Geonics Limited (Geonics Limited, Mississauga, Ontario, Canadá) para estimar la CE del área del distrito de riego que no fue cartografiada a través de los cultivos indicadores. En el estudio realizado en 2001 se cartografió la totalidad del distrito de riego con el mismo sensor electromagnético. El sensor fue calibrado en forma previa a su aplicación extensiva, lo cual permitió la obtención de modelos estadísticos para cada estudio, que sirvieron posteriormente para estimar la CE de los sitios de medición que se establecieron en los módulos de riego.

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **Obtención de los modelos estadísticos para estimar la salinidad con imágenes de satélite**

La relación entre la CE y los valores espectrales se señalan en la Tabla 1. En vista de que los modelos de la Tabla 1 se obtuvieron con la información de campo y espectral de los

sitios de muestreo, en primer lugar los modelos sirvieron para estimar la salinidad de los píxeles que integran las parcelas de calibración de las imágenes, y en segundo lugar los mismos modelos se utilizaron para realizar una extrapolación en todos los píxeles de la subimagen del cultivo de referencia en el área del distrito de riego, para clasificarlos en función de su valor espectral. Se obtuvieron 3 mapas parciales, uno para la superficie sembrada de trigo (48,250 ha), uno para la de algodónero (11 657 ha), y uno para la superficie de sorgo (11 539 ha).

Tabla 1. Ecuaciones de regresión para estimar la salinidad del suelo a partir de imágenes de satélite.

Cultivo	Ecuación de regresión <sup>1</sup>	F <sub>0,05</sub>		r	n
		Fc	Ft		
Trigo	CEw= 7.015 + 0.5184(TM2) – 0.0765(TM3) – 0.1635 (TM4)	18.299*	2.79	0.74	51
Algodonero	CEw= 5.205 – 0.3969(TM2) + 0.4844(TM3) – 0.0109(TM4)	17.295*	2.934	0.80	33
Sorgo	CEw=11.3309+ 0.5965(TM2) – 0.2684(TM3) – 0.1424(TM4)	17.944*	2.79	0.73	52

<sup>1</sup>CE<sub>w</sub> = conductividad eléctrica ponderada en el estrato 0-60 cm, dS m<sup>-1</sup>; TM2 = reflectancia en el verde; TM3 = reflectancia en el rojo; TM4 = reflectancia en el infrarrojo cercano; Fc = F calculada; Ft = F tabulada; r = coeficiente de correlación; n = número de observaciones.

### Obtención de los mapas de salinidad

La calibración del sensor electromagnético EM-38 permitió la obtención de los modelos estadísticos 1 (1996) y 2 (2001) para estimar la CE en el estrato 0-60 cm:

$$\text{Log CE}_a = 0.009\text{EM}_H + 0.002\text{EM}_V; r = 0.955; n = 70 \quad (1)$$

$$\text{Log CE}_a = 0.003\text{EM}_H + 0.005\text{EM}_V; r = 0.932; n = 71 \quad (2)$$

Donde: EM<sub>H</sub> = lectura del sensor en posición horizontal; EM<sub>V</sub> = lectura del sensor en posición vertical.

En 1996 las 206 lecturas y sus correspondientes coordenadas geográficas permitieron la generación de un mapa parcial de cinco clases de salinidad. Este mapa se manejó como una capa, misma que a través del programa Arc-Info se sobrepuso al mapa parcial de salinidad elaborado a partir de las imágenes de satélite. La sobreposición produjo un mapa de salinidad del área total del distrito de riego. Se cartografiaron 120,778 ha que es la superficie bruta del DR. La superficie ensalitrada, CE > 4 dS m<sup>-1</sup>, fue de 62,181 ha; ésta superficie representó el 51.5% de la superficie total cartografiada (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación por salinidad del área del distrito de riego 038 Río Mayo, obtenida en 1996 mediante la aplicación de sensores remotos.

Salinidad dS m <sup>-1</sup>	Superficie ha	Superficie %
< 4	58,597	48.5
4--8	32,038	26.5
8--12	19,327	16.0
12--16	10,604	8.8
>16	212	0.2
Total	120,778	100.0

En 2001 los resultados mostraron que la superficie cartografiada fue de 122,754 ha, considerando el estrato de 0-60 cm de profundidad, de las cuales 25 305 ha (20.6%) se clasificaron como suelo salino, CE > 4 dS m<sup>-1</sup> (Tabla 3). La superficie total cartografiada en 2001 resultó mayor que la obtenida en 1996, debido a que en algunos módulos de riego se regó una superficie mayor que la programada en el ciclo de siembra otoño-invierno 2000 –

2001. Al comparar los mapas obtenidos en 1996 y 2001, se puede observar que en 2001 la superficie cartografiada con salinidad resultó menor (20.6% vs 51.5%). Sin embargo, debe señalarse que en 2001 únicamente se detectó la salinidad con el sensor EM-38, a diferencia del estudio de 1996 en el que se utilizaron en forma conjunta imágenes de satélite y un sensor electromagnético.

Tabla 3. Clasificación por salinidad del área del distrito de riego 038 Río Mayo, obtenida en 2001 mediante la aplicación del sensor electromagnético EM-38.

Salinidad dS m <sup>-1</sup>	Superficie ha	Superficie %
< 4	97,449	79.4
4--8	12,899	10.5
8--12	5,420	4.4
12--16	3,191	2.6
>16	3,795	3.1
Total	122,754	100.0

## CONCLUSIONES

En el año 2001 se cartografiaron con el sensor electromagnético EM 38 y el sistema global de posicionamiento 122 754 ha considerando la profundidad 0-60 cm, de las cuales 25,305 ha (20.6%) se clasificaron como salinas ( $CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$ ). Esta superficie resultó menor que la obtenida en 1996, de 62,181 ha (51.5%) en el cual la identificación de la salinidad se realizó mediante imágenes de satélite y el sensor EM-38.

## REFERENCIAS

- ❖ Pulido, M. L., C. L. Wiegand, J. González Meraz, B. D. Robles Rubio, O. X. Cisneros Estrada y O. Lemus Ramírez. 2003. La salinidad del suelo y su efecto en el rendimiento de los cultivos estudiados con imágenes de satélite en tres distritos de riego. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XVIII, núm. 2, pp 83-97.
- ❖ Rhoades, J.D. 1992. Recent Advances in the Methodology for Measuring and Mapping Soil Salinity U.S. Salinity Laboratory. *In*: International Symposium on Strategies for Utilizing Salt Affected Lands. Bangkok, Thailand, Feb. 17-25, 1992.
- ❖ 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*. Vol. 13, núm. 8, pp 1511-1525.
- ❖ Wiegand, C.L., Ch. Yang and L. Pulido Madrigal. 2005. The plant indicator method (PIM) for mapping crop yields in response to drought, soil salinity, and other stresses. 20<sup>th</sup> Biennial Workshop on Aerial Photography, Videography, and High Resolution Digital Imagery for Resource Assessment, October 4-6, 2005, Weslaco, Texas.