

Suelos salinos en la cuenca del río Cigüela (cuenca alta del Guadina)

P. García Rodríguez y M.E. Pérez González
mpgarcia@ghis.ucm.es

*Dpto. Análisis Geográfico Regional y Geografía Física
Universidad Complutense de Madrid, c/ Profesor Aranguren s/n. 28040 Madrid. España*

RESUMEN

Las imágenes Landsat aportan información sobre los diferentes elementos del medio físico, necesarios para conocer la distribución espacial de los suelos salinos. La comarca de La Mancha, debido a su topografía llana, reúne condiciones idóneas para interpretar los movimientos de las aguas superficiales y la distribución espacial de los diferentes sedimentos. La combinación de ambos factores son determinantes en la formación de suelos salinos.

El objetivo del trabajo es conocer la distribución espacial de los suelos salinos y el área con riesgos de inundación. Las imágenes Landsat TM y ETM son utilizadas para discriminar los sedimentos mesozoicos ricos en sales y/o las áreas con alto contenido en humedad. La combinación en falso color 5-3-1 (R-V-A) discrimina claramente la cuenca alta del río Guadiana. Las imágenes obtenidas aplicando el índice hidrotérmico permiten diferenciar la llanura de inundación, las áreas inundables y los humedales. El NDVI es muy útil para establecer el límite de la vegetación halófila. Así es posible determinar la localización y extensión de los suelos salinos, aunque no es posible su clasificación por medio de la teledetección, pues suelen ir asociados a otros grupos de suelos. Por ello, toda la información obtenida a partir de las imágenes de satélite ha sido complementada con datos de campo.

PALABRAS CLAVE: salinización, calidad suelos, Cigüela, teledetección.

ABSTRACT

Landsat images supply significant information on the different aspects of the physical environment necessary to know distribution of salty soils. This work centers on La Mancha area (Central Spain), which, due to its flat topography, exhibits the ideal conditions to show surface and groundwater movement, as well as sediment distribution. Combination of these factors is essential for salty soils development.

The main goal of this study is to determine the distribution of salty soils, as well as the area subject to flood risk. Landsat TM and ETM images are useful for mesozoic sediments rich in salts and/or areas with high humidity content discrimination. Combination in false color 5-3-1 (R-G-B) draws clearly the upper basin. The images obtained using hydrothermal index allows to discriminate river flood-plains, floodable areas and wetlands. The application of NDVI is very useful to establish the limits of the halophytic vegetation. So it is quite possible to predict with a high degree of probability the development of saline soils, but their precise classification is not always possible, due to they are usually associated to other soil groups. Complementary fieldwork is necessary in order to confirm digital values.

KEY WORDS: salinization, quality soils, Cigüela, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

La comarca de La Mancha reúne condiciones físicas y humanas muy favorables para el estudio de suelos mediante teledetección: topografía muy llana, escaso recubrimiento vegetal y un aprovechamiento agrícola con predominio de cereales en seco. Los cultivos de regadío están limitados en la cuenca alta del río Guadiana a las llanuras de inundación, ya que el agua subterránea es ligera-

mente salobre. El uso de imágenes de satélite permite conocer la extensión de los diferentes sedimentos y los movimientos del agua subsuperficial, cuya interrelación determinarán el desarrollo de suelos salinos.

Numerosos investigadores utilizan la teledetección para detectar y cartografiar este tipo de suelos en áreas semiáridas (Mulders, 1987; Hick y Russell, 1990; Rao y Venkataratnam, 1991; Mougenot y Pouget, 1993; Sharma *et al.*, 1994; Verma *et al.*,

1994; Wiegand *et al.*, 1994; Kalra y Kalra, 1996; Metternicht y Zinck, 1997; Peng, 1998; Dwivedi *et al.* 1999; Zinck, 2001; Dehaan and Taylor, 2002; Al-Khaier, 2003; Metternicht y Zinck, 2003; Schmid, 2004, etc.).

La reflectividad de los suelos salinos en los distintos canales del espectro electromagnético facilita la extrapolación de dichos suelos, descritos puntualmente en campo y laboratorio, a otras áreas con valores digitales similares. Así, la teledetección se añade como técnica a la práctica habitual de cartografía de suelos mediante fotografía aérea. No obstante, esta técnica tiene algunas limitaciones, que vienen condicionadas por la resolución espacial y espectral del satélite y, por la gran variabilidad anual e interanual de los suelos a cartografiar. En la cuenca alta del Guadiana la mayor dificultad en la cartografía de los suelos salinos (Solonchaks) estriba en que con frecuencia ocupan extensiones muy pequeñas en los humedales hipersalinos o están espacialmente asociados a otros suelos ricos en yesos y/o carbonatos, de similar respuesta espectral, pero no salinos (gipsisoles, kastanocems y calcisoles principalmente) (Monturiol *et al.* 1984 y Carlevaris *et al.* 1992).

Los numerosos humedales del área de estudio se han generado bajo diferentes condiciones: fluviales, kársticas y surgencias de aguas subterráneas. Los suelos salinos se han desarrollado sobre sedimentos triásicos y en áreas deprimidas. Además, el manejo por parte del hombre del caudal del río Cigüela (que forma parte del trasvase Tajo-Segura), en un área con complejos movimientos de aguas subsuperficiales y subterráneas, incrementa todavía más la variabilidad espectral de estos suelos. Esto lleva a realizar un exhaustivo trabajo de selección de imágenes de satélite que registren fielmente los suelos salinos.

Así, el principal objetivo del estudio es determinar la distribución de suelos salinos y las áreas con riesgo de inundación. Estas áreas incluyen las llanuras de inundación de los ríos (en algunos tramos de orden kilométrico, puesto que apenas hay desarrollo de terrazas) y el entorno de los humedales, difíciles de delimitar mediante fotografía aérea panorámica.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para identificar los suelos salinos se han analizado seis imágenes Landsat de los sensores TM y

ETM de diferentes meses y años, con la finalidad de elegir aquéllas que permitan una mejor discriminación espectral y espacial de estos suelos. Las imágenes corresponden a miniescenas flotantes TM (entre las órbitas 200/32 y 200/33) de fechas 5-11-1992, 26-8-1995, 20-2-1997 y escenas ETM (órbita 201/32) del 6-6-2001, 10-9-2001 y 25-6-2002.

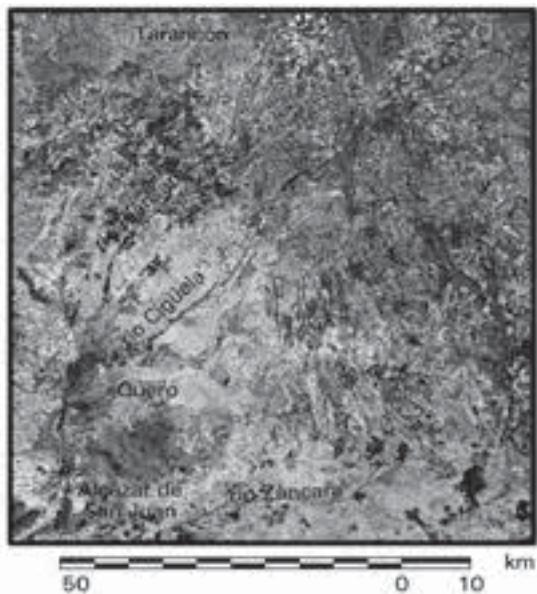
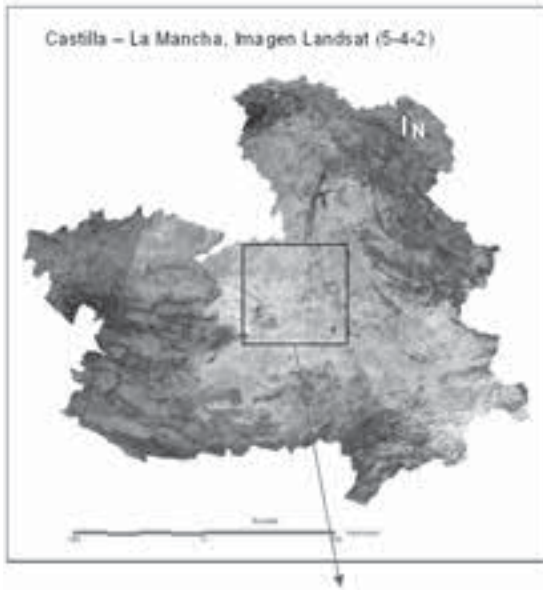
La imagen visualizada corresponde a un corte del mosaico de Castilla-La Mancha, en el que se incluyen parte de las escenas 200-33 del 25-4-2000 y 200-32 del 30-6-2001, correspondientes al área limítrofe de las provincias de Toledo, Ciudad Real y Cuenca (Fig.1 a). Las imágenes Landsat se han georeferido a coordenadas UTM usando ciento cuarenta y cinco puntos de control, aceptando un error RMS inferior a 0.33. También han sido corregidas radiométrica y espectralmente: eualización del histograma, combinación de bandas, análisis de componentes principales, índice de vegetación (NDVI) e índices para la interpretación geológica (índice de minerales arcillosos -banda 5/banda 7-, índice hidrotermal -5/7, 3/1, 4/3- e índice de composición mineral -5/7, 5/4, 3/1-). De todos los índices aplicados, los que mejores resultados ofrecen son el hidrotermal y el de la Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos salinos de la cuenca alta del río Guadiana se desarrollan fundamentalmente en dos ámbitos geomorfológicos concretos: humedales salinos e hipersalinos y llanuras de inundación con surgencias de aguas subterráneas a partir de dolinas o torcas. En estos sectores con movimientos de aguas subterráneas o subsuperficiales se lavan los sedimentos mesozoicos subyacentes, que suelen estar vinculados con los suelos salinos y que sólo pueden reconocerse mediante sondeos *in situ*. No obstante, conocer la extensión exacta de los suelos salinos es complejo, pues suelen estar asociados a otros no salinos: (regosoles, fluvisoles, calcisoles y kastanozems).

Para localizar dichos suelos se han considerado dos factores fundamentales: la topografía (están en áreas muy llanas o deprimidas) y la litología (más frecuentes en materiales triásicos y en los sedimentos aluviales cuaternarios). La topografía inci-

Figura 1a: Mosaico de Castilla La Mancha con imágenes Landsat.



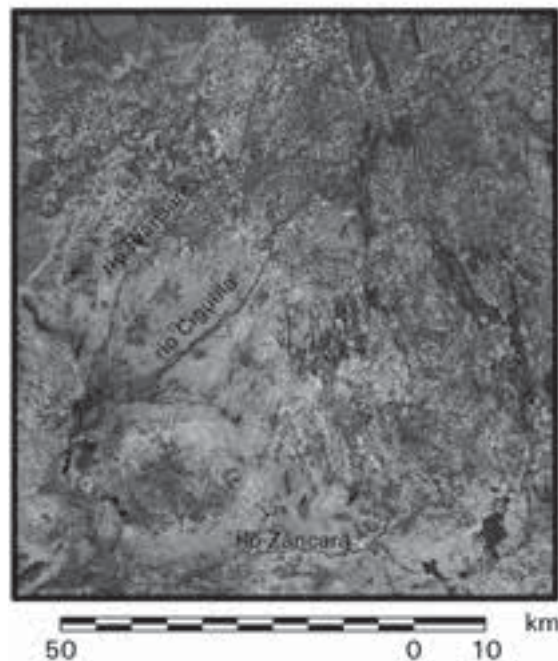
***Figura 1b:** Localización de la cuenca alta del río Guadiana, bandas 5-3-1 (R-V-A)

de en el desarrollo de los suelos, dificultando el lavado de las sales cuando se localizan en áreas deprimidas, por lo que se acumulan con frecuencia en superficie, produciendo eflorencias salinas con altos valores de reflectancia. Para diferenciar los suelos salinos del resto de las unidades de sue-

los que constituyen la asociación en las llanuras de inundación y entornos lagunares deben localizarse los materiales triásicos, formados por areniscas y arcillas del Buntsandstein y margas, arcillas y yesos del Keuper.

En las imágenes de satélite se detectan claramente las unidades correspondientes al triásico debido especialmente a su color vináceo en color natural y a la mayor humedad retenida por las arcillas. Las imágenes incluso permiten identificar algunos sectores pequeños en los que aparecen estos materiales y que no han sido reconocidos en los mapas geológicos (Pérez *et al.* 2000).

La combinación en falso color (5-3-1, asignando los cañones rojo, verde y azul) (Fig.1 b) discrimina claramente la cuenca alta del río Guadiana, formada por los afluentes Cigüela y Zancara. Lo más característico de estos ríos es su escasa incidencia en el terreno, especialmente si los comparamos con afluentes del Tajo, lo que determina la casi ausencia



***Figura 2:** Índice hidrotermal de la Cuenca alta del río Guadiana a partir del cual se delimitan las llanuras de inundación. Ocupan gran extensión en las confluencias de los ríos Riánsares y Cigüela y de éste con el Zancara. En estas llanuras se localizan la mayor parte de los suelos salinos.

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

de terrazas y el desarrollo de amplísimas llanuras de inundación en los sectores donde confluyen los principales tributarios: el río Riánsares con el Cigüela y éste con el Záncara. Las llanuras de inundación de estos ríos se reconocen claramente en la figura 1b por los tonos muy oscuros y por su patrón espacial. Llama la atención las citadas confluencias de los ríos con un desarrollo transversal de varios kilómetros, formadas tanto por la planitud del relieve circundante como por los aportes de las aguas subterráneas y subsuperficiales.

A su vez, los sedimentos mesozoicos ricos en sales se discriminan en la imagen en falso color por su color verde intenso y ocupan una gran extensión entre los municipios de Campo de Criptana, Quero y Villafranca de los Caballeros. Sin embargo, cabe destacar que estos sedimentos no dan lugar a suelos salinos en los materiales triásicos entre Alcázar de San Juan y Campo de Criptana, dedicados principalmente a viñedos y sí cuando dichos materiales se localizan en áreas con movimientos de agua periódicos, tanto verticales como horizontales, tan característicos en los numerosos humedales manchegos y llanuras de inundación del alto Guadiana. Por tanto, el cultivo tradicional de secano en La Mancha, fundamentalmente sobre sedimentos mesozoicos, es el idóneo y, debería tenerse un especial cui-

dado en la utilización del regadío, pues existe un alto riesgo de salinización de los suelos.

En la figura 2 se ha seleccionado la imagen obtenida mediante el índice hidrotérmico, que refleja en colores azulados los cauces de los ríos, llanuras de inundación y humedales. Este índice también destaca las parcelas dedicadas al regadío (tono rosa), que se localizan fundamentalmente en las cuencas altas y medias de los ríos Riánsares y Cigüela y, en la provincia de Cuenca, sobre suelos más fértiles. No obstante, se reconocen también algunas parcelas de regadío en las amplias llanuras de inundación de los ríos Cigüela y Záncara, algunas sobre suelos de escasa productividad: salinos o con altos contenidos en yesos.

En la figura 3 se han recogido dos ejemplos de la aplicación del Índice de la Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) para detectar la vegetación halófila. Este índice resulta de gran utilidad para delimitar la orla de especies halófitas: *Salicornia ramossisima*, *Salsola vermiculada*, *Suaeda vera*, *Microcnemun coralloides*, etc., de las inmediaciones de lagunas salinas e hipersalinas. La figura 3 muestra en tonos claros y formas irregulares la reflectancia de dicha vegetación alrededor de las lagunas de Quero y Alcázar de San Juan. Valores muy altos de NDVI se registran también en las parcelas de regadío, pero éstas se diferencian claramente de la vegetación natural por sus formas geométricas. Debe destacarse que la orla de vegetación halófila, pese a no ocupar una gran superficie y estar dominada por especies de porte enano, queda bien discriminada mediante el NDVI. La vegetación halófila tiene un rango en el NDVI entre 0.23-0.48 y los regadíos entre 0.38-0.81.

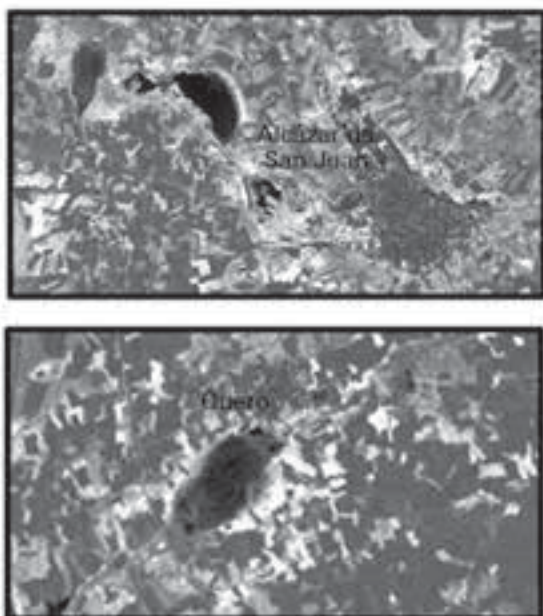


Figura 3: Aplicación del NDVI en las lagunas de Quero y Alcázar de San Juan. Los tonos claros alrededor de los vasos lagunares son debidos a la vegetación halófila.

CONCLUSIONES

Las imágenes Landsat permiten conocer las relaciones entre los diferentes factores ambientales y la distribución de suelos salinos. Los trabajos de campo y laboratorio siguen resultando imprescindibles para la clasificación de los suelos; sin embargo, para áreas muy planas y con múltiples aportes de agua (superficiales, subsuperficiales y subterráneas), como La Mancha, el empleo de las fotografías aéreas para la cartografía de los suelos está muy limitado, por lo que la teledetección resulta de gran ayuda.

En las cuencas de los ríos Cigüela y Záncara los suelos salinos están relacionados con los sedimentos arcillosos mesozoicos, las lagunas, la llanura de inundación y los movimientos de aguas superficiales y subsuperficiales. Todo ello, puede discriminarse a partir del análisis exhaustivo de las imágenes de satélite. Así, los suelos y sedimentos salinos siempre ofrecen alta reflectividad en las bandas visibles. Por el contrario, en los infrarrojos próximos y medios, si los materiales tienen mucha humedad, la absorción del agua conduce a valores digitales muy bajos, por lo que las sales quedan enmascaradas. Por ello, es necesario confrontar la información espectral de las imágenes en diversas fechas, haciendo especial hincapié en los veranos de años muy secos.

La vegetación halófila, indicadora de los suelos salinos, se discrimina mejor en los canales rojo e infrarrojo próximo y, por tanto, en los índices de vegetación que se obtienen de la relación entre estas bandas. Para delimitar las áreas ocupadas por comunidades halófitas en estas lagunas a partir de imágenes de satélite las fechas idóneas corresponden a otoño e invierno, aunque la etapa de mayor actividad clorofílica de estas especies puede variar en función de la meteorología local.

La posibilidad de hacer un seguimiento multi-temporal, en diferentes años y estaciones, con importantes oscilaciones meteorológicas e hidrológicas, permitirá un mayor conocimiento de la repercusión de estos factores en el desarrollo de los suelos salinos, así como de las variaciones en la extensión de las áreas afectadas por salinización.

BIBLIOGRAFIA

- AL- KHAIER, F. 2003. *Soil salinity detection using satellite remote sensing*. Thesis for the degree of Master of Science. ITC, Enschede, The Netherlands, 70 pp.
- CARLEVARIS, J.J., HORRA DE LA, J.L. y RODRÍGUEZ, J. 1992. *La fertilidad de los principales suelos agrícolas de la zona oriental de la provincia de Ciudad Real. La Mancha y Campo de Montiel*. CSIC, Madrid y Consejería de Agricultura de Castilla La Mancha.
- DEHAAN, R. y TAYLOR, G. 2002. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization. *Remote Sensing of Environment*, 80: 406-417.
- DWIVEDI, R. SREENIVAS, K y RAMANA, K.V. 1999. Inventory of salt-affected soils and water-logged area: a remote sensing approach. *Int. J. Rem. Sens.*, 20: 1589-1599.
- KALRA, N.K. y KALRA, D.C. 1996. Potentiality of Landsat, Spot and IRS satellite imageries for recognition of salt affected soils in Indian arid zone. *Int. J. Rem. Sens.*, 17: 3001-3014.
- HICK, P.T. y RUSSELL, W.G.R. 1990. Some spectral considerations for remote sensing of soil salinity. *Australian Journal of Soil Research*, 28: 417-431.
- METTERNICHT, G. y ZINCK J.A. 1997. Spatial discrimination of salt and sodium affected soil surfaces. *Int. Journ. of Remote Sensing*, 18; 2571-2586.
- METTERNICHT, G. y ZINCK, J.A. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 85; 1-20.
- MONTURIOL RODRÍGUEZ, F. et al. 1984. *Estudio Agrobiológico de la provincia de Toledo*. Ins. Edaf. Veg. e Inst. Prov. Invest. Estudios Toledanos. Toledo, 378 pp.
- MOUGENOT, B. y POUGET, M. 1993. Remote sensing of salt-affected soil. *Remote Sensing Reviews*, 7: 241-259.
- MULDERS, M. 1987. *Remote Sensing in Soil science*. Elsevier. Amsterdam. The Netherlands. 379 pp.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M^a E; SÁNCHEZ PÉREZ DE EVORA, A.; GARCÍA RODRÍGUEZ, M^a P. y SANZ DONAIRE, J.J. 2000. "Análisis mediante imágenes de satélite de la salinización en la laguna Larga de Villacañas". En *Lecturas Geográficas*, vol. II, 1655-1665.
- PENG, W. 1998. Synthetic analysis for extracting information on soil salinity using remote sensing and GIS: a case study of Yanggao basin in China. *Environmental Management*, 22: 153-159.
- RAO, B. y VENKATARATNAM, L. 1991. Monitoring of salts affected soils; a study using aerial photographs, Salyut-7 space photographs and Landsat TM data. *Geocarto Int.* 6; 5-11.
- SCHMID, T.F. 2004. Integrated Remote Sensing approach to detect changes in semi-arid wetland areas in Central Spain. Tesis Doctoral. Univ. Autónoma de Madrid; 193 pp.
- SHARMA, R.K.; SUNDARA SARMA, K.S. y DAS, D.K. 1994. Crop discriminational in salt affected soils by satellite remote sensing. GIS Development.

- VERMA, K.S.; SAXENA, R.K.; BARTHWAL, A.K. y DESHMUKH, S.N. 1994. Remote sensing technique for mapping salt affected soils. *International Journal of Remote Sensing*. 15 (9): 1901-1914.
- WIEGAND, C.; ANDERSON, G.; LLINGLE, S. y ESCOBAR, D. 1994. Soil salinity effects on crop growth and yield. Illustration of an analysis and mapping methodology for sugarcane. *Jour. Of Plant Physiology*, 148; 418-424.
- ZINCK, J.A. 2001. Monitoring salinity from remote sensing data. Proceedings of 1st Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Remote Sensing for the Developing Countries. Belgium, Ghent University: 359-368.