

Análisis espacio-temporal de la degradación de suelos afectados por salinidad en el sistema lacustre del Valle de Texcoco (México)

Oliver-Burwitz, L. ⁽¹⁾, Rodríguez-Esteban, J.A. ^(1,2), Torres-Costa, V. ^(1,3), Hernández, Z. ^(1,4)

⁽¹⁾ Grupo de Teledetección UAM, Universidad Autónoma de Madrid, España.

⁽²⁾ Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid, España.

⁽³⁾ Departamento de Física Aplicada, Universidad Autónoma de Madrid, España.

⁽⁴⁾ Facultad de Ciencias, Universidad de La Laguna, Tenerife, España. zhermanh@ull.edu.es

Resumen: El Valle de Texcoco, uno de los cinco lagos que conformaban el gran lago de Tenochtitlan en el periodo colonial de la ciudad de México (año 1520), es hoy en día una de las regiones del planeta con mayor superficie de suelos afectados por salinidad extrema (>10 000 ha). La salinidad de los suelos es un grave problema en regiones áridas o semiáridas, ya que afecta a la productividad agrícola y la calidad de las aguas, con graves consecuencias socioeconómicas, como la desertificación y migración a las ciudades. Además, las sales se disuelven con facilidad en el suelo, por lo que se requieren herramientas de monitorización precisas que permitan evaluar la alta variabilidad espacio-temporal de los suelos afectados por sales. Este trabajo tiene como objetivo evaluar el estado de los suelos afectados por salinidad en el valle de Texcoco, así como los cambios de uso de suelo acontecidos en los últimos 30 años. Para ello se emplearán técnicas de GIS, imágenes de satélite Landsat desde la década de los 80 hasta la actualidad (1985-2015), y radiómetros de campo para identificar las firmas espectrales de los suelos en condiciones de laboratorio. Una vez procesadas las imágenes de satélite Landsat (corrección radiométrica y atmosférica, y aplicación de filtros), se identificaron diferentes cubiertas o usos de suelo: agua, vegetación semi-natural, tierras de cultivo, suelos sin vegetación y suelos salinos. Se calcularon diferentes índices radiométricos para distinguir la vegetación de las tierras de cultivo y de los suelos salinos. El sistema de clasificación no supervisada mostró cambios de uso de la tierra en el 80% de la superficie en 30 años. Disminuye el agua potable y las tierras agrícolas e incrementan en más de un 20% los suelos degradados por sales o de uso urbano. Se trata de una región con riesgo extremo por pérdida y degradación de las tierras de cultivo por efecto de la salinidad.

Palabras clave: Landsat, radiómetro, sales, degradación de suelos.

Spatio-temporal analysis of the degradation of salts-affected soils in the lacustre system of Texcoco Valley (Mexico)

Abstract: *The Valley of Texcoco, one of the five lakes that formed the great lake of Tenochtitlan in the colonial period of Mexico City (year 1520), is today one of the regions with the largest surface area of soils affected by extreme salinity (>10 000 ha). The salinity of soil is a serious problem in arid or semi-arid regions. It affects to agricultural productivity and water quality, with serious socioeconomic consequences, such as desertification and migration of the rural populations to the cities. So, salts dissolve easily in the soil, so precise monitoring tools are necessary to evaluate the high spatio-temporal variability by salts-affected soils. The aim is to evaluate the state of salts-affected soils in the Texcoco Valley, as well as the land use changes in the last 30 years. GIS, Landsat satellite images from the 1980s to the present (1985-2015), and field radiometers will be used to identify the spectral signatures of salts-affected soils under laboratory conditions. Once processed the multispectral images (radiometric and atmospheric correction, and filters application), different land uses were identified: water, semi-natural vegetation, agricultural lands, soil without vegetation and saline soils. Different radiometric indices were used to differentiate vegetation from agricultural and saline soils. The unsupervised classification system showed changes at 80% of the surface in land use in 30 years. Clear water and agricultural land decreased and increased at 20% the soils degraded by salts or urban use. It is a region with extreme risk due to the salts-affected soils.*

Keywords: *Landsat, radiometer, salts-affected soils, desertification.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El antiguo lago de Texcoco

Desde la época colonial (año 1520), algunos historiadores han reportado que el lago de Texcoco, que formaba parte del gran complejo de lagos y lagunas de Tenochtitlan, tenía “aguas salobres” (Thomas, 1994). La lejanía al mar parece no sostener la hipótesis de un posible origen marino. Al localizarse Texcoco en el eje neovolcánico, lo más plausible es que se trate de sales de origen volcánico, cuya deposición se verían favorecidas por el mal drenaje de la cuenca endorreica.

Otra posible hipótesis para explicar la salinidad en regiones volcánicas es que se tratase de un “dono salino” que, por efecto de la erosión y drenaje, se desplomase formando un valle, pero no existen elementos en el paisaje que corroboren esta hipótesis. Tras numerosas inundaciones acontecidas en el periodo de los vicerreinatos, durante los siglos XVI–XVIII, el lago Texcoco ha sido objeto de diversos cambios en el territorio, siendo el más dramático la canalización de las aguas y la desecación del mismo. Quinientos años después del periodo colonial, el valle de Texcoco se encuentra entre las regiones del planeta con un

nivel extremo de sales (JRC, 2019), donde la mayoría de los suelos están afectados por salinidad (>10000 ha). En la actualidad, está prevista la construcción del nuevo aeropuerto de la Ciudad de México sobre el antiguo lago de Texcoco.

1.2. La degradación de los suelos por salinidad

La salinidad de los suelos es un grave problema agronómico y ambiental, especialmente en regiones áridas o semiáridas. Afecta a la productividad agrícola y la calidad de las aguas, resultando en pérdidas de la superficie agraria útil y en la degradación de los suelos. La presencia de materiales geológicos salinos es la causa natural más común. Sin embargo, el problema se agudiza aún más en regiones donde se riega con aguas de mala calidad y se emplean fertilizantes, como ocurre en el Valle de Texcoco. Las sales se disuelven fácilmente en el suelo, por lo que la salinidad tiene una alta variabilidad espacio-temporal. Es importante monitorizar los cambios para predecir desastres naturales como la desertificación y mitigar las drásticas consecuencias socioeconómicas como las migraciones de las áreas rurales a la ciudad de México.

1.3. El estudio de suelos por teledetección

Las técnicas de teledetección se han utilizado ampliamente para evaluar la salinidad del suelo. Tienen la ventaja de que la detección es rápida y no destructiva, la amplia cobertura espacial y la posibilidad de realizar seguimientos a largo plazo, de forma relativamente económica. La detección y cuantificación adecuadas de la salinidad del suelo se pueden lograr utilizando índices digitales, derivados de diferentes bandas espectrales de imágenes satelitales y relacionándolos con mediciones de la conductividad eléctrica del suelo (Gorjia *et al.*, 2017). También se podrían diferenciar las áreas afectadas por sales en función de la abundancia de plantas halófitas. En general, la actividad fotosintética se ve afectada por las sales, lo que se traduce en una mayor reflectancia en el visible (VIS) frente a una limitada reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) (Fernández-Buces *et al.*, 2006)

Sin embargo, existen pocos trabajos donde se haya abordado el análisis de los suelos desprovistos de vegetación (Schmid *et al.*, 2005). Por dos razones. En primer lugar, porque los suelos suelen estar cubiertos por vegetación, por lo que se ha prestado más atención a la cubierta vegetal. Y, en segundo lugar, porque los suelos presentan señales de reflexión diagnósticas en el infrarrojo medio (SWIR), esto es, entre 1-2,5 μm . En esta región espectral, los satélites presentan pocas bandas de diagnóstico, lo que ha limitado este tipo de estudio por satélite. Sin embargo, el uso de radiómetros de campo donde se obtienen imágenes hiperespectrales, permite realizar estudios más profundos donde podemos diferenciar los suelos por su composición mineral.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis espacio-temporal de los cambios que han afectado los suelos en el antiguo lago de Texcoco, México. Así como evaluar los cambios de usos de suelo que han tenido lugar en 30 años en la periferia norte de la Ciudad de México. Para ello se emplearán técnicas de teledetección: imágenes de satélite y radiómetros de campo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se lleva a cabo en la región lacustre de Texcoco, México, localizada a escasos kilómetros de la zona metropolitana de México (19°20' LN e 99°00' W). El valle de México presenta un clima tropical pluvioestacional húmedo, con una temperatura media de 16°C y una precipitación media anual de 721 mm (clasificado como Cwb por el sistema Köppen-Geiger). Las lluvias se concentran en los meses estivales. Esta región lacustre ocupaba uno de los cinco lagos del antiguo Valle de México, con una superficie total de 3000 km² y una altitud media de 2337 m, siendo el lago de Texcoco el de menor cota altitudinal y el único que tenía aguas salobres. Su origen volcánico, junto con la formación posterior de la cuenca endorreica a finales del Cuaternario, le confieren materiales litológicos poco estables y altamente degradables, con un alto contenido de plagioclasa (un feldespato calcosódico) proveniente de rocas como la dacita y la andesita. Entre los diferentes tipos de suelos descritos para la región lacustre se encuentran los Entisoles, Vertisoles, Calcisoles y Solonchaks (WRB, 2014), para los cuales existe una etimología local: suelos cacahuatados, suelos de barro, suelos blancos y suelos salobres, respectivamente. Estos últimos son suelos salinos no aptos para la agricultura (Figura 1).

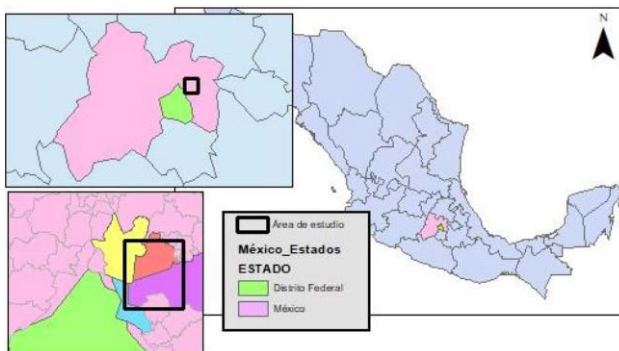


Figura 1: Localización geográfica del área de estudio en la región lacustre de Texcoco, México.

2.2. Análisis de imágenes de satélite

Para analizar los cambios de uso de suelo en los últimos 30 años, se emplean imágenes Landsat de dos periodos de tiempo: 1985 y 2015. Se obtienen en el servidor de la NASA: <https://glovis.usgs.gov/>. Se utiliza una imagen Landsat 5 con un sensor MSS para los años 80 (1985) y una Landsat 8 con los sensores OLI y TIRS para el periodo reciente (2015). La imagen de Landsat 5 tiene 5 bandas distribuidas en el VNIR-SWIR, mientras que la Landsat 8 presenta 11 bandas, incluidas 2 bandas en el infrarrojo térmico. Presentan una resolución espacial de 30×30m. Las imágenes son pre-procesadas: corrección geográfica, atmosférica y aplicación de filtros, usando el software ENVI 5.0. (Figura 2).

Una vez delimitada el área de estudio, se obtienen los valores de reflectancia y las firmas espectrales de las diferentes cubiertas terrestres. Por otro lado, se calculan diferentes índices (como el NDVI) para distinguir las

tierras de cultivo de los suelos no productivos. Por último se realiza una agrupación no supervisada y una clasificación supervisada (K-medias) para comparar los cambios de uso de suelo en los dos periodos (1985 y 2015) y la superficie ocupada por cada uso.

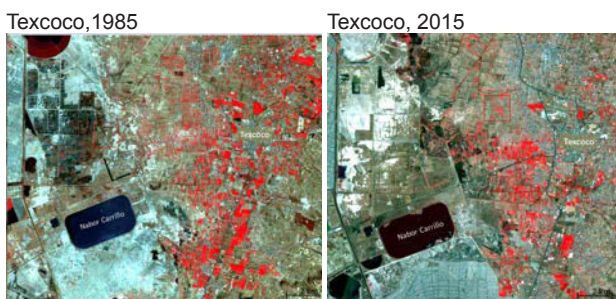


Figura 2. Imágenes satelitales de Landsat 5 (1985) y Landsat 8 (2015) en falso color (RGB 4/3/2) en el sistema lacustre del valle de Texcoco, México.

2.3. Uso de firmas espectrales

En este trabajo se emplea un espectro-radiómetro FieldSpec, en condiciones de laboratorio, en un rango continuo de 0,45-2,50 μm , para obtener firmas hiperespectrales de los materiales. Al no disponer de muestras de suelo del Valle de Texcoco se emplean materiales geológicos y/o tipos de suelos “blancos”, como la calcita, yeso y halita, del Laboratorio de Geología de la UAM.

3. RESULTADOS

3.1. Interpretación de imágenes de satélite

Los resultados de las imágenes de satélite para los dos periodos (1985-2015) permitieron identificar diferentes usos de suelo en la depresión lacustre de Texcoco en función de la reflectividad en el rango VNIR-SWIR. Se

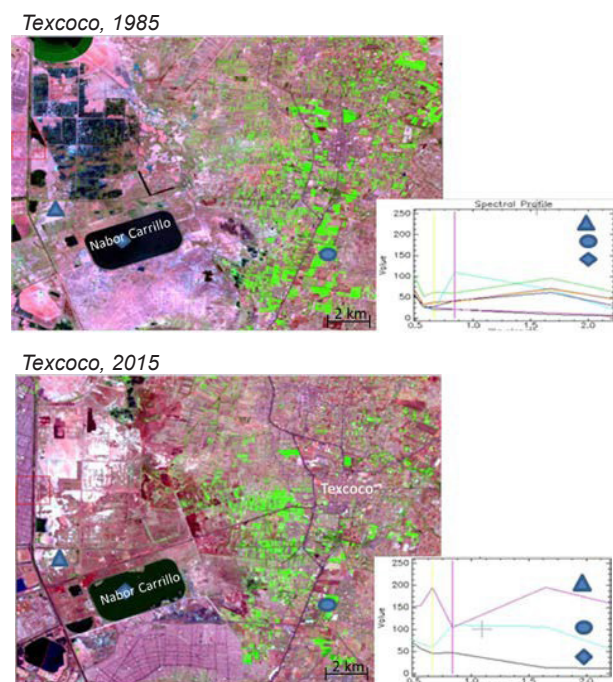


Figura 3. Imágenes Landsat 5 y 8 del Valle de Texcoco, México, en RGB 7/4/3. Leyenda: 1) Agua (◆), 2) vegetación (●), y 3) suelos salinos (▲).

distinguen hasta 5 cubiertas (Figura 3), agrupadas en: 1) cuerpos de agua (lagunas, embalses, zonas encharcadas o afloramientos de las aguas freáticas) con baja señal en todo el VNIR-SWIR 2) vegetación seminatural (matorrales halófitos) con alto VIS, bajo NIR Y SWIR, 3) tierras de cultivo con alto NIR y bajo SWIR, 4) suelos desprovistos de vegetación, con bajo NIR y SWIR, denotando la presencia de suelos más oscuros (posiblemente debido a las condiciones reductoras). Aparecen también otros suelos desprovistos de vegetación, con mayor VIS y SWIR. En la imagen de Landsat 8, podemos diferenciar claramente la existencia de 5) suelos blancos, desprovistos de vegetación (bajo NIR), con alto VIS y SWIR, que podrían corresponder con Calcisoles o Solonchacks.

3.2. Firmas espectrales de los suelos

La salinidad en el valle de Texcoco puede deberse a la presencia de sales o cloruros, sulfuros o carbonatos. La diferencia entre estos materiales depende de su solubilidad. A continuación, se presentan las firmas espectrales de estos materiales, obtenidas usando el radiómetro en el rango VNIR-SWIR en condiciones de laboratorio (Figura 4). Cuando comparamos estas firmas espectrales con las señales multispectrales del satélite (Figura 3), tenemos que los suelos salinos presentan una alta señal en el R (0,65 μm), baja en el NIR (0,85 μm) y alta en el SWIR (mayor a 1,6 que a 2,2 μm), por lo que no se puede descartar que se trate de cloruros (alto VIS).

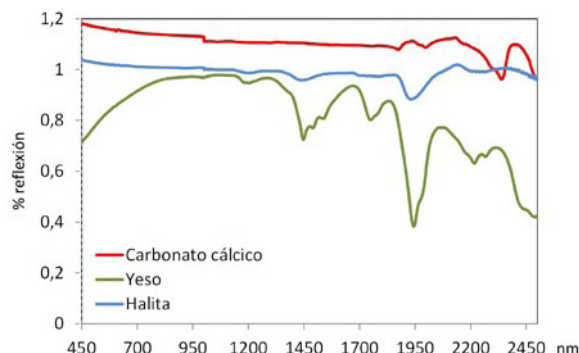


Figura 4. Firmas espectrales en el VNIR-SWIR de sales, sulfuros y cloruros, obtenidas con el radiómetro FieldSpec en condiciones de laboratorio.

3.3. Métodos de clasificación de imágenes

Los resultados de la clasificación de los píxeles usando un método supervisado (dispersogramas y firmas espectrales) permiten analizar los cambios de uso del suelo en superficie en 30 años, entre 1985-2015 (Tabla 1), obteniéndose una reducción del 10% de la superficie de agua y de las tierras cultivadas y un aumento de más del 25% de suelos no aptos para el cultivo, con un incremento del 10% de suelos blancos o degradados por salinidad.

Tabla 1. Porcentaje de superficie ocupada por clase de uso de suelo en los dos periodos de tiempo.

Año/Usos suelo	1985	2015
Agua, embalses, tierras inundables	14,2	4,1
Suelos afectados por sales	10,7	16,9
Tierras cultivadas	29,4	20,5
Tierras no aptas para cultivo o urbanas	39,5	64,7

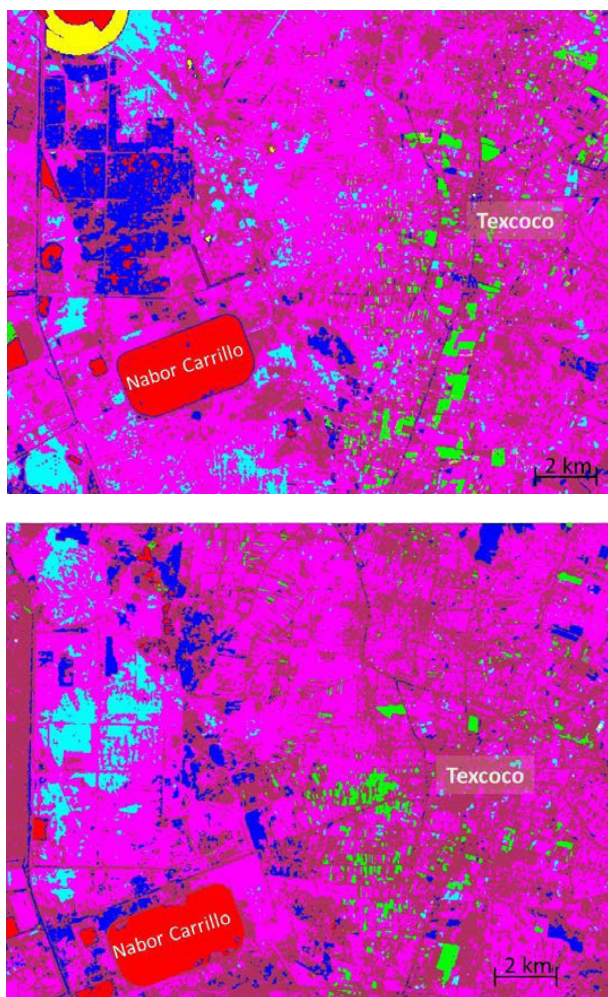


Figura 5: Clasificación supervisada de los diferentes usos del suelo en 1985 (arriba) y 2015 (abajo) del Valle de Texcoco, México: 1) cuerpos de agua (embalses ■) o suelos anegados (■), 2) vegetación o tierras de cultivo, posiblemente vertisoles (■), 4) suelos desprovistos de vegetación, posiblemente entisoles (■) o suelos urbanos (■) y 5) suelos salinizados (■).

4. DISCUSIÓN

Una vez desecado el lago de Texcoco, tras la época colonial, comienza el periodo de formación de suelos sobre los sedimentos del antiguo lago. También llamado edafogénesis. Este proceso ha tenido lugar en apenas los últimos 500 años, quizás favorecido por el origen volcánico de los materiales.

Al desecarse todos los lagos y además ampliarse la zona urbana, se ha agudizado condición endorreica del Valle de México. Al no existir salidas de agua a otros valles ni mezclas con aguas más dulces, las sales se acumulan (se evaporan y depositan constantemente), favoreciéndose procesos de degradación de suelos por salinidad.

La degradación de los suelos por salinidad extrema es una evidencia en el Valle de Texcoco. Según muestran las imágenes de satélite, estos cambios se han agudizado en menos de 30 años (Oliver-Burwitz, 2018). Se trata de un caso donde los cambios de uso de la tierra, en este caso, la desecación del lago, han sido rápidos y drásticos. Las posibles soluciones que existen para la recuperación de

los suelos afectados por sales son muy poco efectivas. La mayoría de los intentos que se han hecho, consistentes en lavar el suelo con aguas menos salinas, manteniendo la capa freática, no han funcionado, por la lentitud y el coste del mismo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- WRB, 2014. World Reference Base of Soil Reference, IUSS Working Group. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Fernández-Buces, N., Siebe, C., Cram, S., Palacio, J.L., 2006. Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: a case study in the former lake Texcoco, Mexico. *Journal of Arid Environmental*, 65 (4), 644–667.
- Gorjia, T., Sertelb, E., Tanikaa, A. 2017. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under datascarc conditions: A case study from Turkey. *Ecological Indicators*, 74, 384–391.
- JRC, 2019. Global map of soil salinization. World atlas of desertification. Joint Research Centre. UE. (<https://wad.jrc.ec.europa.eu/soilsalinization>)
- Oliver-Burwitz, L. 2018. Análisis de la salinidad y factores asociados en el antiguo sistema lacustre de Texcoco. Un estudio de teledetección de la distribución de cubiertas salinas y su caracterización. Tesis de grado. Universidad Autónoma de Madrid, España, 30 pp.
- Schmid, T., Koch, M., Gumuzzio J., Medel, I. 2005. Field and imaging spectroscopy to determine soil degradation stages in semi-arid terrestrial ecosystems. En: *Proceedings of 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, pp. 143-151. Ed. by B. Zagajewski, M. Sobczak, M. Wrzesień, Warsaw University, Warsaw.
- Thomas, H. 1994. *La Conquista de México*. Booket Ed., 1136 pp.