



VOL. 29, Nº 2

DICIEMBRE 2009

ISSN 0717-2915

**Revista  
Journal**

**SELPER**

SOCIEDAD LATINOAMERICANA DE PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN ESPACIAL  
SOCIEDADE LATINO-AMERICANA EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO ESPACIAL  
LATINAMERICAN SOCIETY FOR REMOTE SENSING AND SPACE INFORMATION SYSTEMS

DIGITAL GLOBE™



***Ciudad de Santa María - Brasil***  
*Imágen de satélite QuickBird de DigitalGlobe*



## FOTO PORTADA

### **Santa María - Brasil**

*Imagen de satélite QuickBird de DigitalGlobe, producto Pansharpened resolución espacial 0.60 metros, en composición Color Natural (3,2,1) de la Ciudad de Santa María tomada el 03 de Mayo de 2009. Santa María, también conocida como Santa María da Boca do Monte por ubicarse en una región rodeada por montes es un municipio brasileño del Estado de Río Grande del Sur. Santa María es sede una de las mayores Universidades públicas de Brasil, la Universidad Federal de Santa María (UFSM). En la imagen se observa el Lago Barragem con su importante diversidad biológica.*



DIRECTORIO SELPER, SEDE CUBA 2008 - 2010  
UCT GEOCUBA IC  
Calle 4 No. 304, e/ 3ra y 3ra A  
Miramar, Playa, La Habana, Cuba CP 11 300  
E-mail investigaciones@geocuba.co.cu

PRESIDENTE  
Eloy Pérez  
Cuba

VICE-PRESIDENTE  
Silvia Lucero Casas  
Mexico

VICE-PRESIDENTE  
Myriam Ardila Torres  
Colombia

VICE-PRESIDENTE  
Pedro Luis García  
Cuba

SECRETARIO GENERAL  
María Antonia García Cisneros  
Cuba

RESPONSABLE DE DIVULGACIÓN ELECTRÓNICA  
Walter F. Sione  
Argentina

TESORERO  
Gastón Hernández  
Cuba

COMITÉ DE RELACIONES INTERNACIONALES  
Paulo Roberto Martini (Brasil)  
Presidente  
Aurelie Sand – Francia  
Maurizio Fea – Italia  
Alfredo Cuello – Argentina  
Victor Barrena – Perú  
Ramiro Salcedo – Venezuela  
Myriam Ardila Torres / Colombia  
María Elena Pezoa - Chile  
Olga Piedad Rudas - Colombia  
Anyul del Pilar Mora - Colombia  
Luis Geraldo Ferreira - Brasil  
Pedro Martínez Fernández - Cuba

COMITÉ EDITORIAL  
María Cristina Serafini (Argentina)  
Presidente  
Miriam Esther Antes – Argentina  
Leila María Fonseca – Brasil  
Francisca Celia González – Argentina  
Fabían Lozano – México  
Jorge Luis Martín – Cuba  
Freddy Flores. – Venezuela

COMITÉ DE EDUCACIÓN  
Tania María Sausen (Brasil)  
Presidente  
Joao Avila - Brasil  
Maria Antonia García Cisneros - Cuba  
Andres Cárdenas - Colombia  
Ethel Rubin de Celis Llanos - Perú

#### CAPÍTULOS CONSTITUIDOS

ARGENTINA  
Francisca Celia González  
Universidad Nacional del Sur  
Departamento de Geología  
San Juan 670 (8000)  
Bahía Blanca, Argentina  
Tel: 54 - 291 - 459 5102 - int. 4360  
Fax: 54 - 291 - 459 5127  
E-mail: ghgonzal@criba.edu.ar

BOLIVIA  
Rodolfo Ayala  
Carrera de Topografía y Geodesia  
Facultad Técnica  
Universidad Mayor de San Andrés  
Av. Arce 2299 1º Piso  
La Paz, Bolivia  
Tel.: 591-2-2441401

BRASIL  
Leila María García Fonseca  
INPE  
Av. Dos Astronautas 1758, Sao José dos Campos  
San Pablo, Brasil  
Tel: 55 - 12-39456000  
E-mail: leila@dpi.inpe.br

CHILE  
Gina Ghio  
AYS Ltda  
Calle Testinos 258 of 811  
Santiago, Chile.  
Tel: 562 - 6903768  
Fax: 562 - 6903790  
E-mail: jnovikov@codelco.cl

COLOMBIA  
Myriam Ardila  
PROSIS S.A.  
Calle 94 A nº 11 A-70  
Santa Fe de Bogotá, Colombia  
Tel: 57-1-6357272  
Fax: 57-1-6357190  
E-mail: mardila@prosis.com

CUBA  
Eloy Pérez García  
UCT GEOCUBA IC  
Calle 4 No. 304, e/ 3ra y 3ra A  
Miramar, Playa, La Habana, Cuba CP 11 300  
investigaciones@geocuba.co.cu

ECUADOR  
José R. Aguiar V.  
CLIRSEN  
Edif. Instituto Geográfico Militar, Piso 4  
Seniergues s/n y Paz y Mifio  
Apartado Postal 17-08-8216  
Quito, Ecuador  
Tel.: 593- 2- 254-3193  
Fax: 593- 2- 255-5454  
E-mail: clirsens@clirsens.com

GUATEMALA  
Carlos Alberto Duarte  
Ingeniería Virtual  
Ruta 4, 6-49 Zona 4, Oficina 14  
Ciudad de Guatemala (01004), Guatemala  
Tel: 502 - 334-1039/4038  
Fax: 502 - 331-9390  
E-mail: chduarte@hotmail.com

GUYANA FRANCESA  
Laurent Polidori  
Directeur de Recherche IRD / US ESPACE 140  
Institut de Recherche pour le Développement  
(ex-ORSTOM)  
Route de Montabo - BP 165 - 97323 Cayenne  
cedex  
Tel. (+594) 594 29 92 81  
Fax (+594) 594 31 98 55  
E-mail: polidori@cayenne.ird.fr

MÉXICO  
Silvia Lucero Casas  
UAM Agronomía y Ciencias  
Universidad Autónoma de Tamaulipas  
Centro Universitario Victoria  
Cd. Victoria Tamaulipas, México  
E-mail: scasas@uat.edu.mx

URUGUAY  
Antonio Alarcón  
Servicio de Sensores Remotos Aeroespaciales  
Fuerza Aérea Uruguaya  
Ruta 101 s/n Km. 19500  
Carrasco, Canelones, Uruguay  
Tel.: 598 -2 601 4083  
Fax: 598 -2 601 4090  
E-mail: director@sra.gub.uy

VENEZUELA  
Ramiro Salcedo  
Centro de Procesamiento Digital del Instituto de  
Ingeniería en Caracas  
Apdo. Postal 40200 / Caracas, Venezuela  
Tel/fax: 58 - 212 - 903 -4682  
E-mail: ramiro@fii.org

PERÚ  
Victor Barrena Arroyo  
Universidad Nacional Agraria La Molina  
Av. La Universidad s/n  
La Molina, Lima, Perú  
Tel / Fax: 51-1-349-5647 anexo 232/349-2041  
E-mail: vbarrena@lamolina.edu.pe

#### CAPÍTULOS EN FORMACIÓN

PARAGUAY  
Sergio M. Burgos Sosa  
IPPA  
Dr. César Sánchez 431  
San Lorenzo, Paraguay  
Tel/Fax: 595 -21-574909  
Email: smburos@highway.com.py

#### CAPÍTULOS ESPECIALES

ALEMANIA  
Klaus Reiniger  
DLR  
D-8031 Oberpfaffenhofen  
Alemania  
Tel: 49- 8153- 281.189  
Fax: 49- 8153- 281.443

CANADÁ  
Fritz P. Dubois  
25 Nidland  
Crs Nepean Ontario Kh2-8n2  
Ontario, Canadá  
Tel: 613- 596-4164  
Fax: 613- 723-9626

ESPAÑA  
José L. Labrandero  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)  
Pinar 25- Madrid 28006, España  
Tel: 34- 411.10.98  
Fax: 34- 562.55.67

FRANCIA  
Aurelie Sand  
CNES  
31401- Toulouse Cedex 9  
France  
Tel: 33-1- 447.67500  
Fax: 33-1-447.67849  
E-mail: aurelie.sand@cnes.fr

HOLANDA  
Carlos Valenzuela  
ITC  
350 Boulevard 1945, P.O.X. 6. 7500 AA  
Enschede, Holanda  
Tel.: 31 53 874-444  
Fax: 31 53 874-400

ITALIA  
Maurizio Fea  
ESA/ESRIN  
Via Galileo Galilei, 00044  
Frascati, Italia  
Casilla Postal 64  
Tel: 39 - 694180940  
Fax: 39 - 694180942  
E-mail: Maurizio.Fea@esa.int

USA  
Patricia M. Ravelo  
SPOT  
Estados Unidos  
Tel: 1-800-ask-spot ext. 137  
Fax: 703-648.1813  
E-mail: ravelo@spot.com

**COMITÉ EDITORIAL**

**María Cristina Serafini** (Argentina)  
PRODITEL  
Universidad Nacional de Luján  
Cruce rutas 5 y ex 7  
(6700) Luján, Buenos Aires, Argentina  
Tel: 54-2323-423171 int248  
Fax: 54-2323-425795  
E-mail: proditel@mail.unlu.edu.ar

**Miriam Esther Antes** (Argentina)  
PRODITEL  
Universidad Nacional de Luján  
Cruce rutas 5 y ex 7  
Luján, Buenos Aires, Argentina  
Tel: 54-2323-423171 int248  
Fax: 54-2323-425795  
E-mail: proditel@mail.unlu.edu.ar

**Leila María Fonseca** (Brasil)  
INPE  
Av. Dos Astronautas 1758, Sao José dos Campos, Sao Paulo, Brasil  
Tel: 55 - 12-39456000  
E-mail: leila@dpi.inpe.br

**Fabián Lozano** (Mexico)  
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey  
Av. Eugenio Garza Sada # 2501 sur, Col. Tecnológico, Monterrey, Nuevo León, México  
Tel: 52 - 81 - 8358 - 1400 ext 5275  
Fax: 52 - 81 - 8358 - 6280  
E-mail: dflozano@itesm.mx

**JJorge Martín Chiroles** (Cuba)  
E-mail: ciencia@geocuba.com.cu

**Jorge Luis Martín** (Cuba)  
E-mail: ciencia@geocuba.com.cu

**Francisca Celia González** (Argentina)  
Universidad Nacional del Sur  
Departamento de Geología  
San Juan 670 (8000)  
Bahía Blanca, Argentina  
Tel: 54 - 291 - 459 5102 - int. 4360  
Fax: 54 - 291 - 459 5127  
E-mail: ghgonzal@criba.edu.ar

**Freddy Flores** (Venezuela)  
Fundación Instituto de Ingeniería  
Carretera Vieja de Baruta, Sector Sartenejas, Urb. Monte Elena II  
Caracas, Venezuela  
Tel: 58 2-903 4661-4610  
Fax: 58 2- 903 4780  
E-mail: freddyf@fii.org

**COMITÉ DE EVALUADORES**

**Francisco Redondo**  
(UNLu - Argentina)  
**Graciela Marín**  
SEGEMAR - Argentina)  
**Mirta Aída Raed**  
(CSR, UNLu - Argentina)  
**Alfredo Cuello**  
(UNLu - Argentina)

**ÍNDICE TEMÁTICO**

- **ESTIMACIÓN INDIRECTA DE EMISIONES DE CO2 A PARTIR DE INFORMACIÓN SATELITAL EN ÁREAS QUEMADAS DE AMBIENTES INSULARES DEL DELTA DEL RÍO PARANÁ (ARGENTINA)**  
Walter Sione  
Pablo Aceñolaza  
Lizandra Pamela Zamboni  
María Cristina Serafini  
Hector del Valle  
Juan Gallardo Lancho.....5
- **APLICAÇÃO DE MORFOLOGIA MATEMÁTICA E TÉCNICAS DE PDI NA EXTRAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS COM INTERESSES EM CÁLCULOS DE RESERVATÓRIO E ÁREA INUNDADA POR HIDRELÉTRICAS**  
Erivaldo Antônio da Silva  
Fabricio Leonardi  
Raquel Grandó Stroppa..... 22
- **EFFECTO DEL CALENTAMIENTO GLOBAL SOBRE LAS LAGUNAS DE LA MESA CENTRAL POTOSINA, MÉXICO.**  
Cristina Noyola-Medrano  
Marco Antonio Rojas-Beltran .....31
- **UTILIZAÇÃO DE IMAGENS MSS/LANDSAT PARA O MAPEAMENTO DA COBERTURA FLORESTAL DA PLANÍCIE DO LAGO GRANDE DE CURUAI, PA.**  
V.F. Renó  
E.M.L.M.Novo..... 39

Editado por: SELPER Internacional  
Universidad Nacional de Luján  
Rutas 5 y ex 7, (6700) Luján - Bs. As. - ARGENTINA

## Efecto del calentamiento global sobre las lagunas de la Mesa Central Potosina, México.

Cristina Noyola-Medrano <sup>(1)</sup> y Marco Antonio Rojas-Beltrán <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> IPICYT, Geociencias Aplicadas, San Luis Potosí, Mexico, 0052 834 2049

<sup>(2)</sup> Université Paris 7. PRODIG UMR 8587, Paris, Francia, 0052 841 6828  
(marbel\_red@yahoo.com); (cristina.noyola@titan.ipicyt.edu.mx)

### RESUMEN

El calentamiento global capta cada vez más nuestra atención porque la temperatura media de la superficie ha aumentado desde finales del siglo XIX. Por eso, en este trabajo se analiza el impacto del calentamiento global sobre la región semidesértica de la Mesa Central Potosina (MCP). Nuestro trabajo se enfoca en el cambio de uso de suelo (CUS), la variación de humedad y temperatura superficial de una serie de lagunas someras ubicadas entre los estados de San Luis Potosí (SLP) y Zacatecas (ZAC), México. Las lagunas de esta zona son de origen tectónico y se caracterizan por su poca profundidad, alta salinidad y cuerpos de agua intermitentes. Si bien estas características son propias de lagunas de tipo graben, existen varios factores que afectan la superficie de las lagunas y sus áreas circundantes como el clima, el crecimiento urbano, desarrollo de zonas agrícolas y de producción salina. Para observar diversos cambios en la zona, se realizó un análisis multitemporal y multispectral de imágenes Landsat TM, Landsat ETM+ y ASTER con la finalidad de encontrar cambios de uso de suelo, humedad y temperatura para la zona de estudio entre los años 1990 y 2005. La metodología utilizada incluye análisis de Índice Normalizado de Vegetación e Índice Normalizado de Agua (NDVI y NDWI por sus siglas en inglés), obtención de temperaturas a partir de banda termal y clasificación supervisada. Los resultados muestran incrementos en la zona urbana y de cultivo, disminución y pérdida de la vegetación natural y cuerpos de agua que ocasionan aumentos de temperatura de hasta 8°C en los últimos 15 años. El análisis de las imágenes nos permite constatar que existe una relación entre la desaparición de la vegetación natural, la disminución y/o desaparición de los cuerpos de agua y el aumento de la temperatura de la superficie.

Palabras clave: Landsat, ASTER, temperatura, NDVI, NDWI.

### ABSTRACT

Global warming captures our special attention, because the average surface temperature has

increased since the late nineteenth century. Therefore, this work analyzes the impact of global warming on the semi-desert zone of Mesa Central Potosina (MCP). Our approach is focused on changing land use (CLU), and the variation of surface temperature and humidity on shallow lagoons located between the States of San Luis Potosi (SLP) and Zacatecas (ZAC), Mexico. Lagoons in this area have tectonic origin and they are characterized by shallow depth, high salinity and the presence of water intermittently. While these features are characteristic of graben-type lagoons, there are several factors affecting the surface of them and their surrounding areas, such as, climate, urban growth, development of agricultural areas and salt production. To measure the CLU, changes in humidity and temperature in the region, it was analyzed multitemporal and multispectral Landsat TM, Landsat ETM+ and ASTER images between 1990 and 2005. The methodology includes analysis of vegetation and water indices (NDVI and NDWI), the extraction of surface temperature from the thermal bands and supervised classification. The results show increases in urban and cropping areas, reduction and loss of water bodies and natural vegetation, causing increases in temperature to 8°C, in the last 15 years. The analysis of satellite images has allowed us to verify a correlation between the decrease in natural vegetation, declining of water bodies and increasing the surface temperature.

Keywords: Landsat, ASTER, temperature, NDVI, NDWI

### INTRODUCCIÓN

Las temperaturas se han incrementado en las últimas décadas, sobre todo en las latitudes cercanas al norte (Hansen et al., 2006). Este incremento ocasiona cambios en los ecosistemas incluyendo modificación en la cobertura vegetal (Goetz et al., 2005; Zhang et al., 2007) e incremento en la densidad de matorral y chaparral secundario (Sturm et al., 2001; Tape et al., 2006; Goetz et al., 2007). La mayor causa de estos cambios ambientales globales es la actividad del hombre en el pasado y en el presente (Singh, 1996; Loehle, 2004). Uno de los resultados más visibles de las modificaciones del hombre sobre el ecosistema



terrestre es el CUS (Weng, 2001), por lo que la historia del CUS nos ayuda a explicar la extensión espacial y el grado del cambio por sí mismo, y nos permite entender la dinámica del cambio ambiental en relación a la población (Xiao y Weng, 2007).

En la MCP entre los estados de SLP y ZAC se pueden observar una serie de lagunas someras que por las características semiáridas de la región normalmente presentan un tirante de agua intermitente. Las lagunas de regiones semiáridas como las de la MCP, han sido estudiadas en otras partes del mundo, pues ellas constituyen ecosistemas valiosos y productivos que se han ido perdiendo o degradando durante el siglo XX a causa de la presión humana (Davis y Froend, 1999; Tiner, 2002), especialmente por intensificación de la agricultura (Barbier, 2004; Castañeda y Herrero, 2008) y por el cambio global de temperatura que ha incrementado las tasas de evapotranspiración ocasionando pérdida de los cuerpos de agua someros y cambios en la flora original (Iriarte, 2006; Schuol et al., 2008).

En la zona de estudio existen poca o nula investigación con respecto a cambios registrados en temperatura, humedad de la superficie y al CUS. Por eso, el objetivo de este trabajo es establecer una metodología para el estudio de algunas de las lagunas de la MCP y sus zonas aledañas. Este objetivo incluye: (i) Registro de cambios de

temperatura, humedad y lozanía de vegetación y (ii) Observación de CUS. Para cumplir el objetivo hemos realizado análisis a partir de imágenes Landsat TM, ETM+ y ASTER y hemos hecho uso de Sistemas de Información Geográfica como una herramienta de integración de la información de diferentes fuentes, así como la información generada y los datos obtenidos en campo.

### ZONA DE ESTUDIO

Las lagunas de la MCP están situadas en la parte central de México en los límites de los estados de SLP y ZAC, entre 22°22' - 22°39' de latitud Norte y entre 101°40' - 101°47' de longitud Oeste (Figura 1). La zona de estudio cubre una superficie de 425 km<sup>2</sup>. Geológicamente el área presenta una secuencia Mesozoica constituida por turbiditas las cuales están cubiertas discordantemente por rocas volcánicas y conglomerados del Terciario (Silva-Romo et al., 2000; López-Loera et al., 2008). Las lagunas de la región están constituidas principalmente por aluvión del Cuaternario. Su formación y control estructural está regido por el sistema regional de fallamiento, cuyas orientaciones principales son N45E y N35W (Labarthe-Hernández et al., 1982; Aranda-Gómez et al., 1989; Nieto-Samaniego y Alaniz-Alvarez, 1997).

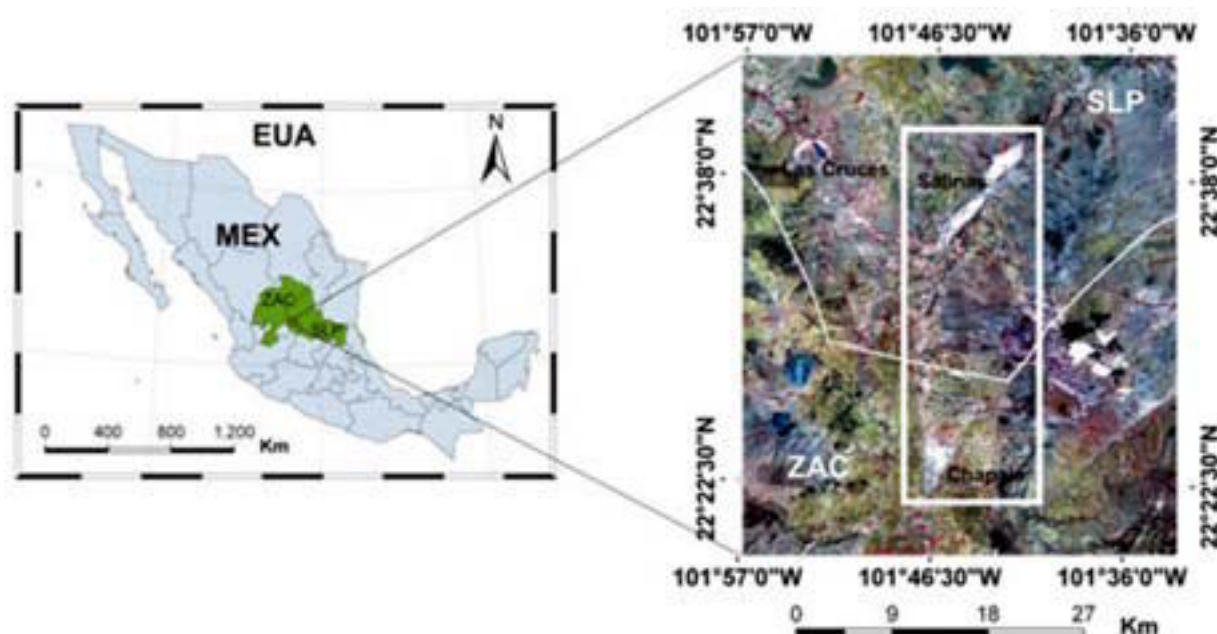


Figura 1. Localización de la zona de estudio. EUA (Estados Unidos de América), MEX (México), SLP (San Luis Potosí) y ZAC (Zacatecas).

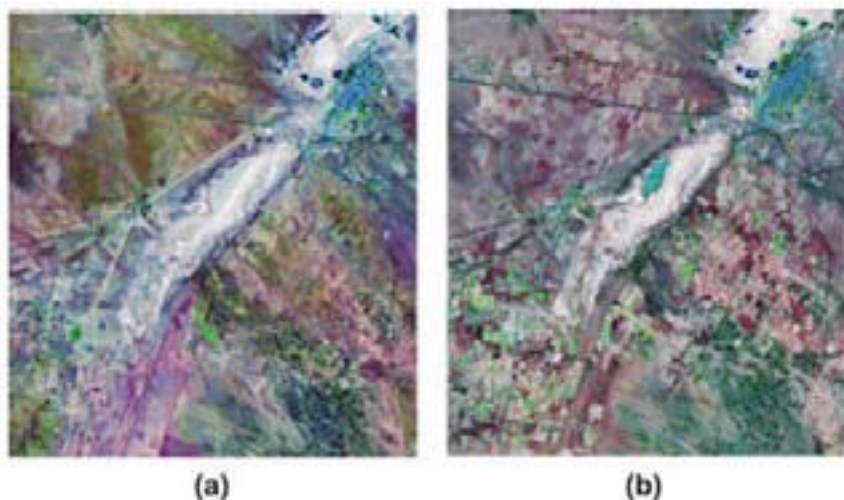
Geomorfológicamente, la zona está constituida por lomeríos alargados y grandes valles. Las alturas varían de 2067 m en los valles hasta 2700 m en las partes más altas de algunas sierras. La hidrografía consiste principalmente de arroyos intermitentes que la mayor parte del año no llevan agua pues el agua de lluvias se infiltra rápidamente. Las lagunas más importantes de la región son las de Salinas, las Cruces y Chapala (Figura 1). El clima varía de seco templado a frío con una temperatura media anual de 17°C, alcanzando temperaturas máximas en julio y temperaturas mínimas en enero. La precipitación media anual varía entre los 300 y 400 mm con un periodo de lluvias de junio a septiembre. El tipo de flora predominante es el matorral micrófilo, desértico, espinoso y pastizales. En el caso de las lagunas de la MCP predominan los suelos sin vegetación, con excepción de la poca vegetación halófila, evidencia

de la proximidad de agua con alta concentración de sales (Figura 2). En cuanto a la fauna de la región, está representada principalmente por gato montés, roedores, algunas aves como halcón, cuervo y tordo, arácnidos y algunas especies de víboras como la cascabel. Las especies domésticas son ganado porcino, equino, ovino, bovino, caprino, conejo y aves de corral. Las principales actividades en la zona son agricultura, pastoreo e industria salinera (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005).

Desde una perspectiva ambiental y global, las lagunas de la MCP están situadas en un territorio vulnerable donde los cambios de paisaje pueden ser interpretados como peligro de degradación debido a la expansión de la agricultura (Koch, 2000). En la zona de estudio, el progreso de zonas de irrigación (Figura 3) es visible en las imágenes de satélite.



*Figura 2. Fotografías de campo en (a) laguna Salinas, (b) laguna las Cruces y (c) detalle de la vegetación halófila sobre laguna Chapala.*



*Figura 3. Laguna Salinas y su zona aledaña: (a) combinación RGB 541 de imagen Landsat TM de 1990 y (b) combinación RBG 432 de imagen ASTER de 2005. Aquí se puede observar crecimiento de la zona urbana (color azul) y aumento de zonas de cultivo en áreas cercanas a la laguna.*

**DATOS ANALIZADOS**

Para este trabajo hemos seleccionado tres imágenes de satélite: Landsat 5 TM (marzo 16, 1990), Landsat 7 ETM+ (noviembre 1, 2001) y ASTER (noviembre 12, 2005). La selección de las imágenes estuvo basada en la facilidad de acceso y al cubrimiento temporal. Los programas utilizados para el tratamiento de imágenes y SIG fueron ENVI v. 4.4 y ArcGIS v. 9.2.

**METODOLOGÍA**

**Pre-procesamiento**

Todas las imágenes fueron georreferidas utilizando el datum WGS84 y el sistema de coordenadas UTM zona 14 Norte. Las bandas de la región del visible e infrarrojo fueron remuestreadas a 30 m y las bandas térmicas fueron remuestreadas a 60 m. Como métodos de calibración se calcularon la radiancia y reflectancia para cada imagen analizada (Tabla 1), utilizando ecuaciones sugeridas por varios autores (Abrams et al., 1999; Chander y Markham, 2003; Huang et al., 2001; Smith, 2008).

*Tabla 1. Definición de parámetros y ecuaciones utilizadas.  $L_\lambda$  (radiancia espectral en  $W/(m^2*sr*mm)$ ); ND (Número digital);  $G_{rescale}$  (ganancia en  $W/(m^2*sr*mm)/ND$ );  $B_{rescale}$  (bás en  $W/(m^2*sr*mm)$ ); CC (Coeficiente de conversión);  $r$  (reflectancia);  $d$  (distancia tierra-sol en unidades astronómicas);  $ESUN_\lambda$  (irradiación solar promedio);  $\theta$  (ángulo zenit =  $90 - \text{ángulo de elevación solar}$ );  $T$  (temperatura);  $K1$  (constante 1 en  $W/(m^2*sr*mm)$ ):  $TM = 607.76$  y  $ETM+ = 666.09$ );  $K2$  (constante 2 en Kelvin):  $TM = 1260.56$  y  $ETM+ = 1282.71$ );  $R_{NIR}$  (reflectancia de la banda del infrarrojo cercano TM/ETM+ banda 4 (0.78 - 0.90 mm), ASTER banda 3 (0.76-0.86 mm));  $R_{RED}$  (reflectancia de la banda rojo del visible (0.63 -0.69 mm) banda 3 TM / ETM+ y banda 2 ASTER);  $R_{SWIR}$  (reflectancia para banda del infrarrojo intermedio: banda 5 (1.55 - 1.75 mm) TM/ETM+ y banda 4 (1.6 - 1.7 mm) ASTER). Ecuaciones y datos de calibración tomados de Chander y Markham (2003), Smith (2008) y de Landsat Handbook. Otros datos son tomados directamente de los archivos de encabezado de las imágenes.*

Parámetro	Ecuación
Radiancia Landsat TM y ETM+	$L_\lambda = G_{rescale} * ND * B_{rescale}$
Radiancia ASTER	$L_\lambda = (ND - 1) * CC$
Reflectancia Landsat TM, ETM+ y ASTER	$\rho = \frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * \cos \theta}$
Temperatura	$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)}$
Índice Normalizado de Vegetación	$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$
Índice Normalizado de Agua	$NDWI = \frac{R_{NIR} - R_{SWIR}}{R_{NIR} + R_{SWIR}}$

**NDVI y NDWI**

El cálculo de NDVI y NDWI es comúnmente utilizado para obtener información acerca de la cantidad de clorofila y contenido de humedad presente tanto en la vegetación como en el suelo (Jackson et al., 2004;

Chen et al., 2006; Noyola-Medrano, 2006). En este trabajo hemos calculado ambos parámetros a partir de datos de reflectancia (Tabla 1) con el objetivo de observar su cambio en el tiempo.



Tabla 2. Parámetros registrados a partir de imágenes de satélite para las tres fechas analizadas: S1, S2 y S3 (superficies registradas en porcentaje); T1, T2 y T3 (registros de temperatura) y registros de NDVI y NDWI. La tasa de cambio fue calculada a partir de  $Tc = (T2 / T1)(1/t) - 1$ : donde Tc (tasa de cambio), T2 (unidad en tiempo 2), T1 (unidad en tiempo 1) y t (cantidad de años entre las dos fechas).

Uso de suelo	S1 (%)	S2 (%)	S3 (%)	S1-S2	S1-S3	S2-S3
Matorral seco	41.035	28.699	33.597	-0.032	-0.013	0.040
Encino	3.821	5.889	2.018	0.040	-0.042	-0.235
Pastizal	22.758	19.013	13.314	-0.016	-0.035	-0.085
Cultivo seco	21.773	32.667	38.261	0.038	0.038	0.040
Cultivo verde	0.429	0.603	0.997	0.031	0.058	0.134
Suelo seco	1.857	1.502	2.619	-0.019	0.023	0.149
Suelo húmedo	7.633	10.003	3.771	0.025	-0.046	-0.216
Z. urbana	0.414	0.646	0.9	0.041	0.053	0.086
Agua con sal / veg	0.09	0.789	0.045	0.218	-0.045	-0.511
Uso de suelo	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T1-T2	T1-T3	T2-T3
Matorral seco	27.84	30.15	29.43	0.007	0.004	-0.006
Encino	24.56	27.34	29.11	0.010	0.011	0.016
Pastizal	27.75	30.48	29.52	0.009	0.004	-0.008
Cultivo seco	27.89	29.96	29.94	0.007	0.005	0.000
Cultivo verde	24.32	26.94	29.3	0.009	0.012	0.021
Suelo seco	23.08	27.36	29.17	0.016	0.016	0.016
Suelo húmedo	26.4	29.81	28.11	0.011	0.004	0.015
Z. urbana	25.29	26.53	28.78	0.004	0.009	0.021
Agua con sal / veg	20.69	19.82	27.85	-0.004	0.020	0.089
Uso de suelo	NDVI1	NDVI2	NDVI3	VI1-VI2	VI1-VI3	VI2-VI3
Matorral seco	0.18	0.19	0.01	0.005	-0.175	-0.521
Encino	0.19	0.24	0.1	0.021	-0.042	-0.197
Pastizal	0.16	0.18	-0.01	0.011	-0.169	-0.515
Cultivo seco	0.17	0.22	0	0.024	-1.000	-1.000
Cultivo verde	0.45	0.5	0.15	0.010	-0.071	-0.260
Suelo seco	0.13	0	-0.08	-1.000	-0.032	0.000
Suelo húmedo	0.15	0.13	-0.03	-0.013	-0.102	-0.307
Z. urbana	0.17	0.15	-0.04	-0.011	-0.092	-0.281
Agua con sal / veg	0.12	0.15	-0.04	0.020	-0.071	-0.281
Uso de suelo	NDWI1	NDWI2	NDWI3	WI1-WI2	WI1-WI3	WI2-WI3
Matorral seco	0.09	0.23	0.1	0.089	0.007	-0.188
Encino	0.14	0.26	0.11	0.058	-0.016	-0.193
Pastizal	0.09	0.23	0.11	0.089	0.013	-0.168
Cultivo seco	0.1	0.24	0.1	0.083	0.000	-0.197
Cultivo verde	0.34	0.34	0.15	0.000	-0.053	-0.185
Suelo seco	0.12	0.24	0.12	0.065	0.000	-0.159
Suelo húmedo	0.16	0.25	0.13	0.041	-0.014	-0.151
Z. urbana	0.17	0.25	0.14	0.036	-0.013	-0.135
Agua con sal / veg	0.31	0.48	0.15	0.041	-0.047	-0.252

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La clasificación supervisada nos permite constatar que hay cambios importantes en el uso de suelo de la zona de estudio. Por ejemplo, en 1990, la clase de matorral seco es más abundante que en las dos fechas posteriores. También es posible observar un aumento en la clase de encinos para el 2001, en donde se registra un aumento general en los valores de NDVI y de NDWI (Figura 4). Este cambio es debido a mayores periodos de lluvia en la región que fueron corroborados con datos de la estación climatológica ubicada en Salinas. El cambio de la zona urbana es observado sobretudo en Salinas ubicada en el extremo noreste de la imagen. La figura 4 muestra también que en el 2005 se registran las mayores temperaturas y los valores más bajos de NDVI y NDWI.

Con respecto a las zonas de las lagunas observamos que para 1990 y 2001 se registran valores de temperatura menores a 22°C mientras que en el 2005 las zonas de lagunas presentan valores de temperatura que oscilan entre 22°C y 26°C, registrándose por lo tanto una diferencia de al menos 5°C entre las temperaturas observadas en 1990 – 2001 y 2005. Por otra parte, la tabla 2 (cuantificación de la tasa de cambio de cada unidad de uso del suelo), nos permite constatar que los mayores CUS se efectuaron entre 2001 y 2005, en donde las clases de “encino”, “suelo húmedo” y “agua con sal / vegetación” tuvieron pérdidas importantes de superficie.

Una primera relación entre los CUS y los parámetros de NDVI, NDWI y temperatura, nos permite sugerir que los CUS generan también cambios en los otros parámetros. En la tabla 2 observamos que algunas disminuciones importantes de NDVI y NDWI están relacionadas a un aumento de temperatura y a un aumento o disminución importante de cobertura de suelo. Por ejemplo, las disminuciones de superficie de las clases “encino”, “suelo húmedo” y “agua con sal / veg”, están relacionadas con decrementos importantes de NDVI y de NDWI, mientras que la temperatura aumenta considerablemente en este periodo. En el caso de las clases de “cultivo seco” y “cultivo verde” en las cuales registramos un aumento de superficie, observamos también un aumento de temperatura y pérdidas importantes de clorofila y humedad. Estos cambios se deben principalmente a tierras agotadas por prácticas de cultivo inadecuadas, como siembra del mismo tipo de semilla por varios años y abandono del terreno deteriorado, que da origen a vegetación secundaria de tipo pastizal y / o a suelos desprovistos de vegetación. Aunque la zona urbana ocupa extensiones pequeñas de terreno, de cualquier manera contribuye al aumento de temperatura y disminución de NDWI y NDVI en la zona. Chen et al. (2006) y Xiao y Weng (2007) presentan resultados similares a los obtenidos en este trabajo, aunque en el área que ellos estudiaron, los cambios son más evidentes, porque el crecimiento urbano es mayor a lo observado en la MCP, pues la región de Salinas está mayormente

avocada a la agricultura y a la industria salinera, por lo que la zona urbana no ha crecido espectacularmente. Pese a ello, es posible observar la influencia humana y climática en zonas originalmente ocupadas por matorral en donde se registran cambios importantes de superficie como los observados entre 1990 y 2001 en donde el cambio es de 41.04 % a 28.70%.

Los resultados preliminares de este trabajo nos permiten entre otras cosas observar que existe un cambio de temperatura promedio de la zona que va de 24.87°C en 1990 a 25.12°C en 2005. Las mayores variaciones de temperatura se observan en las temperaturas máximas que varían de 31.76°C en 1990 a 35.29°C en 2005, registrándose un aumento de 0.23°C por año, lo cual es una cifra importante aún cuando ésta es inferior a la de 0.5°C reportada por Houghton et al (1995) a escala mundial. Ahora bien, los cambios de temperatura más importantes están relacionados a la expansión de áreas de cultivos y desecación de lagunas, pues en estas zonas la variación de temperatura es superior a 0.35°C por año, aproximándose más a lo reportado por Houghton et al (1995). Estos resultados nos permiten sugerir que en la zona hay dos grandes factores que han contribuido a su deterioro: 1) la actividad antropogénica que ha ganado espacios para la agricultura, crecimiento urbano y zonas para industria salinera y 2) el aumento de temperatura ocasionado por el cambio climático global que aumentan los procesos de evaporación de la zona, contribuyendo a la disminución de los escasos cuerpos de agua y a la pérdida de vegetación natural que no ha sido capaz de adaptarse a los cambios actuales de temperatura.

## CONCLUSIONES

Este trabajo presenta resultados preliminares del análisis multitemporal y multispectral de imágenes Landsat y ASTER con la finalidad de evaluar el impacto del cambio climático global para la MCP entre 1990 y 2005. El estudio estuvo enfocado a la observación del CUS de lagunas someras y áreas aledañas ubicadas entre los estados de SLP y ZAC. Los resultados muestran que las coberturas con mayor cambio fueron “encino”, “zonas de cultivo”, “zona urbana”, “suelo húmedo” y “cuerpos de agua”. Estos cambios también están relacionados a cambios de temperatura en la superficie, de NDVI y de NDWI, pues se registró un aumento máximo de temperatura 0.23°C por año, y disminuciones importantes de NDVI y NDWI. Los CUS que más contribuyen a cambios en temperatura, NDVI y NDWI son expansión de cultivos y desecación de lagunas, que ocasionan aumentos de temperatura superiores a los 8°C en los últimos 15 años. Las observaciones realizadas nos permiten concluir que la zona está siendo deteriorada por la actividad antropogénica y el aumento de temperatura ocasionado por el cambio climático global.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a IPICYT por el apoyo logístico para el desarrollo de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Aranda-Gómez, J.J., Aranda-Gómez, J.M., Nieto-Samaniego, A.F. 1989. Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el Cenozoico de la Sierra de Guanajuato y la parte meridional de la Meseta Central. *Revista del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México*, 8: 33-46.
- Abrams, M., Hook, S. and Ramachandran, B., 1999, *Aster User Handbook, Version 2*, NASA/Jet Propulsion Laboratory, Pasadena.
- Barbier, E.B. 2004. Agricultural expansion, resource booms and growth in Latin America: Implications for long-run economic development. *World Development*, 32(1): 137-157.
- Castañeda, C., Herrero, J. 2008. Assessing the degradation of saline wetlands in an arid agricultural region in Spain. *Catena*, 72: 205-213.
- Chander, G., Markham, B. 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 41(11): 2674-2677.
- Chen, X.L., Zhao, H.M., Li, P.X., Yin, Z.Y. 2006. Remote Sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104: 133-146.
- Davis, J.A., Froend, R. 1999. Loss and degradation of wetlands in southwestern Australia: underlying causes, consequences and solutions. *Wetlands Ecology and Management*, 7: 13-23.
- Goetz, S.J., Bunn, A., Fiske, G., Houghton, R.A. 2005. Satellite observed photosynthetic trend across boreal North America associated with climate and fire disturbance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102: 13521- 13525.
- Goetz, S.J., Mack, M.C., Gurney, K.R., Randerson, J.T., Houghton, R.A. 2007. Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Environmental Research Letters*, 2, 045031 (9pp) doi:10.1088/1748-9326/2/4/045031.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea D.W., Medina-Elizalde, M. 2006. Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103: 14288-14293.
- Houghton, J.T., Meria, F.L.G., Bruce, J., Lee, H., Callander, B.A., Haites, E., Haris, N., Maskell, K. 1995. *Climate Change 1994: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*. In: Reports of Working Group I and III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK
- Huang, C., Yang, L., Homer, C., Wylie, B., Vogelman, J., DeFelice, T. 2001. *At-Satellite Reflectance: A First Order Normalization of Landsat & ETM+ Images*. USGS Land Cover Program Publications.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. 2005. *Enciclopedia de los Municipios de México – San Luis Potosí*. [http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM\\_sanluispotosi](http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM_sanluispotosi) (consultado el 10 de junio 2008).
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. 2005. *Enciclopedia de los Municipios de México – Zacatecas*. [http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM\\_zacatecas](http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM_zacatecas) (consultado el 10 de junio 2008).
- Iriarte, 2006. Vegetation and climate change since 14,810 14C yr B.P. in southeastern Uruguay and implications of the rise of early formative societies. *Quaternary research*, 65(1): 20-32.
- Jackson, T.J., Chen, D., Cosh, M., Li, F., Anderson, M., Walthall, C., Doriaswamy, P, Hunt, E.R. 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing and Environment*, 92: 475-482.
- Koch, M. 2000. Geological controls of land degradation as detected by remote sensing: a cause study in Los Monegros, north-east Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 21(3): 457-473.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán, M., Aranda-Gómez, J.J. 1982. *Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí*. Folleto Técnico del Instituto de Geología y Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 85: 1-208.
- Landsat Handbook. <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook.html>, (consultado el 7 de mayo 2008)

Loehle, C. 2004. Climate Change: detection and attribution of trenes from long-term geologic data. *Ecological modeling*, 171(4): 433-450.

López-Loera, H., Aranda-Gómez, J.J, Arzate, J.A., Molina-Garza, R.S. 2008. Geophysical surveys of the Joya Honda maar (México) and surroundings; volcanic implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(3): 135-152.

Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Alvarez, S.A. 1997. Origin and tectonic interpretation of multiple fault patterns. *Tectonophysics*, 270: 197-206.

Noyola-Medrano, M.C. 2006, L'évolution morphologique actuelle du Champ Volcanique de la Sierra Chichinautzin (Mexique) à partir de l'analyse tomomorphométrique des cônes de scories et du changement de l'occupation du sol, [thèse de doctorat] : Université Paris 7 Denis-Diderot, Paris, France.

Schuol, J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R., Yang, H. 2008. Estimation of freshwater availability in the West African subcontinent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 352(1): 30-49.

Silva-Romo, G., Arellano-Gil, J., Mendoza-Rosales, C., Nieto-Obregón, J. 2000. A submarine fan in the Mesa

Central, Mexico. *Journal of South American Herat Sciences*, 13: 429-442.

Singh, R.B. 1996. *Global environmental change: Perspective of Remote sensing and Geographic Information system*. Balkema Publishers, Rotterdam.

Smith, A.M.S. 2008. How to convert ASTER radiance values to reflectance. <http://www.cnrhome.uidaho.edu/default.aspx?pid=85984> (consultado el 15 de abril 2008).

Tiner, R.W. 2002. *Watershed-based wetland planning and evaluation. A collection of papers from the wetland millennium event (August 6-12, 2000; Quebec City, Canada)*. Association of State Wetland Managers, Inc., Berne, NY. 141 pp, (compiler).

Xiao, H., Weng, Q. 2007. The impact of land use and land cover changes on land surface temperature in a karst area of China. *Journal of Environmental Management*, 85: 245-257.

Weng, Q. 2001. A remote sensing-GIS evaluation of the urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 22(10): 1999-2014.