

Memorias



Sociedad Latinoamericana en
Percepción Remota y Sistemas
de Información Espacial
Capítulo Colombia

30
AÑOS

Medellín, Colombia
29 de Septiembre al 3 de Octubre de 2014



Estimación de la variabilidad del nivel del Lago de Chapala (Jalisco, México) a partir de la firma espectral del agua.

Estimating level variability of Chapala Lake (Jalisco, Mexico) from the spectral signature of water

Cristina Noyola-Medrano¹ y Luis Enrique Vázquez-Santana²

^{1,2}Universidad Autónoma de San Luis Potosí / Facultad de Ingeniería / A. Civil / Ingeniería Geomática
Av. Manuel Nava No. 8, Campus Universitario Poniente, CP 78290, San Luis Potosí, SLP.
cristina.noyola@uaslp.mx, kikazo_elmo@hotmail.com

RESUMEN

En México, el Lago de Chapala es el cuerpo de agua más monitoreado. Sin embargo, el monitoreo de superficies de agua no es igual para todo México. Por eso, resulta útil establecer métodos para monitorear zonas donde los recursos de medición terrestre o altimetría satelital son restringidos. El presente trabajo propone una metodología para monitorear variabilidad de nivel a partir del análisis de firmas espectrales del agua, extraídas de imágenes Landsat. Para ello se utilizaron 9 imágenes cubriendo un periodo que abarca de 1986 a 2011, complementando con registros de limnómetros. Con los datos extraídos de imágenes satelitales y registros de campo, se generaron análisis de regresión lineal simple y múltiple. La regresión lineal simple muestra que las bandas por separado no explican la altimetría. Sin embargo, la raíz cuadrada de la superficie mostró una buena correlación con respecto al nivel de la superficie de agua (R^2 de 0.8168). La regresión lineal múltiple, muestra la relación de reflectividad de todas las bandas y altimetría, mejoran la correlación (R^2 de 0.91). Los resultados sugieren que un 91% del comportamiento altimétrico se explica a partir de la firma espectral y que el área también aporta información valiosa respecto a la altimetría.

Palabras claves: Firma espectral, Landsat TM, reflectividad, regresión lineal, altimetría de la superficie de agua.

ABSTRACT

In Mexico, Lake Chapala is the body of water most monitored. Nevertheless, the water surfaces monitoring is not the same for whole Mexico. For this reason, it is useful to establish methods to monitor areas where the resources of terrestrial measurement or satellite altimetry are restricted. This paper proposes a methodology for monitoring the variability of level based on the analysis of spectral signatures of the water, extracted from Landsat imagery. To do this, it was used 9 images covering a period from 1986 to 2011, complemented by record gages. With data obtained from satellite images and field records, it was performed, a simple linear regression analysis and a multiple linear regression analysis. Simple linear regression shows that the bands separately do not explain the altimetry. However, the square root of the surface showed a good correlation with the level of the water surface (R^2 of 0.8168). The multiple linear regression shows that the

relationship between the reflectivity of all bands and the altimetry, improve the correlation (R^2 of 0.91). The results suggest that 91% of the altimetric behavior is explained from the spectral signature and that the area also provides valuable information about altimetry.

Keywords: Spetral signature, Landsat TM, reflectance, lineal regression, water surface altimetry.

INTRODUCCIÓN

El uso del agua se divide fundamentalmente en dos grandes grupos: entre los diferentes usos derivados de la actividad humana (energía, desarrollo urbano, alimentación, agricultura, piscicultura, industria, etc.), y entre los diferentes usuarios (regiones administrativas, países, estados o municipios que comparten una misma cuenca) (UNESCO-WWAP, 2003). Este consumo, cada día, se vuelve más crítico debido al crecimiento poblacional, el cual implica una fuerte presión sobre los recursos hídricos (UNESCO-WWAP, 2003; Marín *et al.*, 2011; Fonte *et al.*, 2012). Además, el agua superficial terrestre es uno de los componentes más inciertos de la hidrología continental con respecto a su distribución espacial y temporal. Por tal motivo, los gobiernos tienen entre sus principales preocupaciones el monitoreo constante de los diversos cuerpos de agua que constituyen una parte de sus territorios (Milman & Short, 2008; Meyerhoff *et al.*, 2014). Uno de los parámetros a los que más seguimiento se le da, es el nivel de la lámina de agua, pues éste indica de manera directa la cantidad de agua superficial que puede ser utilizada de manera sustentable para las diferentes actividades humanas (UNESCO-WWAP, 2003). Una de las técnicas más comúnmente utilizada para la medición del nivel del agua es el uso de limnómetros, como lo muestran varios trabajos efectuados sobre cuerpos de agua marinos y continentales. La medición de los niveles de agua han tenido varios propósitos como el de reconstruir la historia de la fluctuación del agua (Quinn & Sellinger, 1990; Meyssignac *et al.*, 2011), para comprender la relación que guarda el cambio de nivel de agua con el cambio climático (Pasquini *et al.*, 2008), para evaluar deformaciones corticales (Hamilton, 1987), y para batimetría y análisis de descarga promedio de agua de ríos (Durand *et al.*, 2014) entre otros. Algunos de los trabajos que han considerado el uso de limnómetros para la medición de los niveles de agua, mencionan explícita o implícitamente la necesidad de una gran cantidad de horas equipo y hombre a fin de obtener un buen seguimiento (Pasquini *et al.*, 2008; Palaseanu & Pearlstine, 2008; Meyssignac *et al.*, 2011). Una buena alternativa para la medición de niveles de agua ha sido el uso de la altimetría satelital. Esta técnica se implementó con el objetivo de monitorear cambios en el nivel del mar y de la capa de hielo de los polos. Más recientemente, se ha visto su potencial en el seguimiento de los cambios de nivel de masas de agua continental (Calmant & Seyler, 2006; Singh *et al.*, 2012; Jarihani *et al.*, 2013).

Calmant & Seyler (2006) discuten sobre las ventajas del uso de la altimetría satelital para el monitoreo de los cambios de flujos intracanal de cualquier río, incluyendo aquellos que tengan cauces con estrangulamiento como el caso de ríos meándricos, humedales y llanuras aluviales. Sin embargo, también se presentan algunos inconvenientes en este sistema, mencionando como los más importantes, la dificultad para identificar y separar picos de

energía reflejada por cuerpos de agua pequeños y, las variaciones de medición con respecto a datos de campo, que pueden ser de centímetros hasta más de un metro. Aunque la precisión y el nivel de adquisición han mejorado con nuevos satélites como ERS-2 y SARAL Altika, esta técnica hasta el momento ha funcionado mejor con cuerpos de agua grandes que con aquellos cuerpos de agua pequeños.

En el caso específico de México, una gran parte de los cuerpos de agua continental, son pequeños con excepción del Lago de Chapala que constituye el cuerpo de agua continental más grande de la República Mexicana (CEA-Jalisco, 2014). Debido a la importancia que tiene para las actividades que se desarrollan alrededor de él, también es uno de los lagos más estudiados. Dentro del acervo de trabajos encontrados para este cuerpo de agua, se cuenta con estudios de calidad de agua (Chávez-Alcántar *et al.*, 2011), análisis de la oscilación del nivel debido a fenómenos hidrometereológicos (Filonov *et al.*, 1998), problemas de desecamiento (Helbig, 2003) y, otros aspectos como la relación que guarda el manejo del recurso hídrico del lago con respecto a las actividades económicas de la región (Hansen & Van Afferde, 2004)

Sin embargo, el monitoreo de la mayoría de las masas de agua continental mexicanas no siempre es posible. Por eso, resulta útil establecer otros métodos de monitoreo para zonas en donde los recursos de medición terrestre o de altimetría satelital son restringidos. Por esta razón, el objetivo de este trabajo es presentar una metodología para monitorear el nivel de la superficie del agua a partir del análisis de firmas espectrales extraídas de imágenes Landsat. Con la finalidad de poder calibrar los resultados obtenidos por este método se utilizó como objeto de estudio el lago de Chapala, debido a la gran cantidad de datos de altimetría generados para este cuerpo de agua a partir de limnímetros.

LAGO DE CHAPALA

El Lago de Chapala es el más grande de la República Mexicana y está ubicado a 50 kilómetros de la zona metropolitana de Jalisco. Tiene una capacidad total de 7,897 millones de metros cúbicos (Mm^3), con una superficie promedio de 1,146.59 hectáreas km^2 , mostrando como dimensiones máximas (79 kilómetros de ancho y 28 kilómetros de largo), de las los cuales Jalisco ocupa el 86% y Michoacán el 14% (CEA de Jalisco, 2014; Figura 1).

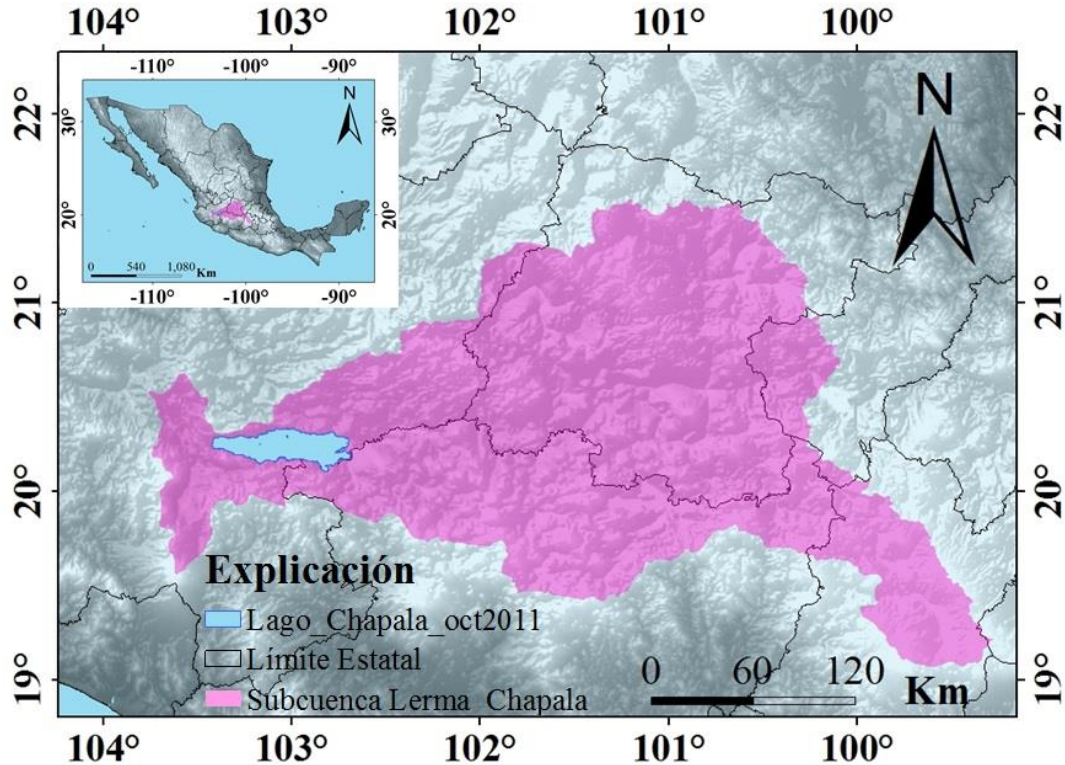


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. El lago de Chapala está comprendido dentro de la Cuenca Lerma Chapala.

Con base a los registros obtenidos de la Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA de Jalisco), en el año de 1955 el lago presentó el nivel más bajo en la historia (1516.8 msnm), con un volumen de 953.98 m³ y un área de inundación de 670.088 km². En el año de 1926 se registró el nivel más alto que corresponde a 1525.38 msnm, con un volumen de 9,721.18 m³ y un área de inundación de 1160.93 km². En los últimos 3 años, el nivel del lago ha estado disminuyendo; en el año 2012 el nivel promedio fue de 1520.81 msnm, para el año 2013 fue de 1519.97 msnm y en lo que va del año 2014 el promedio es 1519.89 msnm (Figura 2).

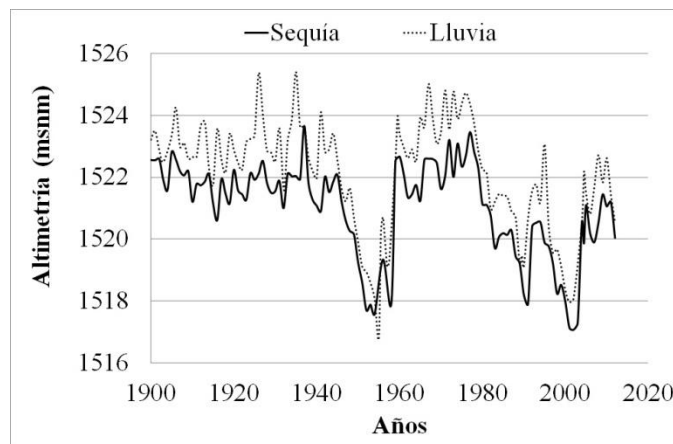


Figura 2. Variaciones del nivel de agua para el lago de Chapala. La serie de tiempo cubre desde 1900 hasta el año 2013. La gráfica fue realizada a partir de datos obtenidos de la página de CEA Jalisco.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Imágenes satelitales y software

Para este estudio se utilizaron nueve imágenes Landsat que cubre un periodo de 1986 a 2011. Las imágenes fueron descargadas de manera gratuita del sitio GLOVIS que es gestionado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (USGS por sus siglas en inglés). El rango analizado cubre periodos de sequía y de lluvia, por lo que se trabajaron con imágenes de enero (7/01/1986, 10/01/1993, 14/01/2000, 16/01/2001, 25/01/2010 y 12/01/2011) para cubrir el periodo de sequía y con imágenes de septiembre a noviembre (26/11/1993, 20/10/1997 y 10/09/2000) para la época de lluvia. Al descargar las imágenes se cuidaron algunos aspectos como que el cubrimiento de nubes fuera menor al 10% y tratar de evitar imágenes distorsionadas y/o con bandeamiento. Todos los procesos de pre-tratamiento, tratamiento y pos-tratamiento fueron realizados con ENVI 4.7, los resultados y trabajo de mapas fue realizado con ArcGIS 10.2 y los análisis de correlación y regresión múltiple se efectuaron con Excel.

Pre-tratamiento

El pre-tratamiento inició con la edición del encabezado de cada banda como paso previo para la conversión de números digitales (ND) a valores de radiancia (L_λ). Los datos que se requieren para calcular la L_λ son: la longitud de onda, el ancho de banda (FWHM), ganancia y sesgo de la radiancia. Una vez que se ha editado el encabezado, cada banda se escala radiométricamente utilizando la ecuación propuesta por Chander y colaboradores (2009) (Ecuación 1):

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde: $LMAX_{\lambda}$ = Radiancia espectral, Q_{cal} = Valor de ND del pixel a calibrar, Q_{calmin} = Valor mínimo de ND de la banda, Q_{calmax} = Valor máximo de ND de la banda, $LMIN_{\lambda}$ = Radiancia espectral del sensor con la cual es escalado Q_{calmin} ($W / (m^2 \text{ sr } \mu m)$) y $LMAX_{\lambda}$ = Radiancia espectral del sensor con la cual es escalado Q_{calmax} ($W / (m^2 \text{ sr } \mu m)$).

Una vez que se tuvieron las bandas con valores de radiancia, se procedió a llevar a cabo la corrección atmosférica para obtener valores de reflectividad. Para este paso se utilizó el algoritmo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes*) de ENVI. El algoritmo FLAASH permite realizar la corrección atmosférica de bandas que estén ubicadas entre el visible y el infrarrojo medio ($0.4 \mu m$ a $3.0 \mu m$). A diferencia de otros programas de corrección atmosférica que interpolan las propiedades de transferencia de radiación a partir de una base de datos pre-calculada, FLAASH utiliza un código de transferencia de radiación tipo MODTRAN (*Moderate resolution atmospheric Transmission*). Para utilizar el algoritmo FLAASH es necesario integrar todas las bandas en una sola imagen, por lo que previo a la corrección atmosférica, todas las bandas con radiancia fueron unidas en un solo archivo de imagen y los valores de radiancia se deben re-escalar de micrómetros a nanómetros, pues el algoritmo sólo trabaja con unidades en nanómetros. Como las imágenes resultantes estaban en función de unidades de nanómetros, entonces se procedió a re-escalar todas las bandas con valores de 0 a 1 para facilitar su utilización, tanto para la comparación con bibliotecas espectrales como para los análisis de correlación y regresión. Para re-escalar se utilizó la ecuación 2 que fue introducida en la herramienta de *band math* de ENVI:

$$\rho_e = \left((b1 \text{ le } 0) * 0 \right) + \left((b1 \text{ ge } 10000) * 1 \right) + \left((b1 \text{ gt } 0 \text{ and } b1 \text{ lt } 10000) * (b1/10000) \right) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde: ρ_e = reflectividad escalada; $b1$ = banda a convertir, le = menor o igual que (*less than*), ge = mayor o igual que (*greater than or equal*), gt = mayor que (*greater than*). El valor de 10000 se utiliza porque los valores que arroja FLAASH están comprendidos de -10000 a 10000.

Tratamiento

En la etapa de tratamiento se llevaron a cabo varios procedimientos. Uno de ellos consistió en recortar la imagen para trabajar sólo con el área que incluía el Lago de Chapala y sus alrededores. Todas las imágenes fueron cortadas utilizando la misma extensión. Para los

siguientes pasos se utilizó esta imagen recortada. El siguiente paso a realizar fue la extracción de la zona que corresponde al Lago de Chapala. Para ello se realizó una clasificación mediante árbol de decisión. El clasificador de árbol de decisión lleva a cabo las clasificaciones mediante el uso de una serie de decisiones lógicas para colocar a cada píxel en una clase. Cada decisión divide a los píxeles en dos clases con base a una expresión. Cada clase tiene la posibilidad de ser nuevamente dividida en dos clases mediante otra expresión. El algoritmo de árbol de decisión puede ser alimentado por datos provenientes de diferentes fuentes. Para el caso específico del Lago de Chapala, solamente se alimentó con la banda TM5 de cada imagen Landsat y la expresión que se utilizó es la que se muestra en la ecuación 3.

$$Agua = b5 \text{ lt umbral} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde: b5 = Banda TM5, lt = menor que (*less than*), umbral = Valor mínimo definido con base a la estadística de cada banda utilizada. Para el caso de la banda TM5 los valores están muy cercanos a 0 debido a que en la longitud de onda de la banda TM5 el agua absorbe gran parte de la energía, por esta causa los valores de reflectividad son muy pequeños. De esta manera se establecieron dos clases: tierra y agua. Estos datos que estaban en formato raster, posteriormente, fueron convertidos a formato vectorial.

Post-tratamiento

En esta etapa, los esfuerzos fueron enfocados en utilizar los vectores extraídos en la etapa anterior para dos propósitos: a) Establecer visible y cuantitativamente los cambios de nivel de agua para el Lago de Chapala y b) Realizar un enmascaramiento de la imagen para extraer la estadística de los promedios de reflectividad para cada banda, pero sólo considerando el Lago de Chapala. Los vectores obtenidos fueron exportados a ArcGIS 10.2 para realizar el proceso cartográfico y la presentación final del mapa con las diferentes superficies de inundación. Las máscaras fueron realizadas en ENVI 4.7 en donde se utilizaron los diferentes vectores para delimitar la zona de interés con respecto al resto de la imagen. Con las imágenes que tenían máscara se procedió a realizar la estadística mediante la herramienta de *Compute Statistics* de ENVI y con esto se extrajo información del valor promedio de reflectividad para cada banda de las imágenes Landsat TM analizadas. Estos datos fueron exportados a Excel, al igual que los datos de superficie calculados en ArcGIS. Con esta información se estableció una base de datos que incluyó los datos extraídos en ENVI y ArcGIS, así como los datos de altimetría tomados de la página de CEA (Jalisco) que fueron obtenidos con limnímetros. En Excel se realizaron los análisis de regresión lineal simple entre los valores de reflectividad promedio de cada banda por separado (variable independiente) con respecto a los valores de altimetría (variable dependiente) (Ecuación 4). Para la regresión lineal múltiple se utilizaron los valores promedio de reflectividad de todas las bandas como variables independientes y los valores de altimetría de campo representaron a la variable dependiente (Ecuación 5).

$$Y = A + B_1X_1 \quad (\text{Ec. 4})$$

$$Y = A + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + \dots B_nX_n \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde: A = valor de la ordenada donde la línea de regresión se intercepta con el eje Y, B1...Bn = coeficientes de regresión; X1....Xn = variables independientes (valores promedio de reflectividad para las bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 y TM7) y Y = valor de altimetría calculado.

La ecuación resultante de este proceso fue aplicada a cada imagen analizada en este trabajo para obtener el valor promedio del espejo de agua (altimetría) que posteriormente fue comparado con el valor registrado en el terreno.

También se estableció una relación simple entre la raíz cuadrada de la superficie de inundación con respecto a la altimetría con el propósito de saber si el parámetro de superficie podía dar una buena indicación de la altimetría del lago.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Superficies de inundación

Los resultados muestran que la máxima superficie fue alcanzada en enero del 2011 (1118.75 km²) y la mínima superficie se presenta en enero del 2001 (836.49 km²). Por lo tanto en el periodo de estudio se presenta una variación de 25.23% en la superficie de inundación (Figura 3). Contrariamente a lo que se hubiera esperado, las mayores superficies de inundación no se presentaron en las fechas de lluvias, sino en las fechas de sequía (Tabla 1). Esto puede indicar que los periodos de precipitación son cada vez más escasos, pues al observar los valores de superficie para la época de lluvia, se observa una disminución de superficie entre el año 1993 y 2000 de 14.26%. Esta situación también ha sido discutida por el CEA de Jalisco y por Helbig (2003) quién presenta la problemática de la desecación del lago de Chapala. Es importante señalar que algunas de las áreas desecadas del Lago de Chapala son utilizadas para actividades no permanentes de agricultura (Figura 4).

Tabla 1. Superficies de inundación registradas para el Lago de Chapala. Las superficies fueron obtenidas a partir de la banda TM5 de las imágenes Landsat.

Fecha	Superficie de inundación	Fecha	Superficie de inundación	Fecha	Superficie de inundación
12/01/2011	1118.75	14/01/2000	872.54	10/09/2000	857.19
25/01/2010	1093.90	10/01/1993	957.84	20/10/1997	980.28
16/01/2001	836.49	07/01/1986	1052.68	26/11/1993	999.77

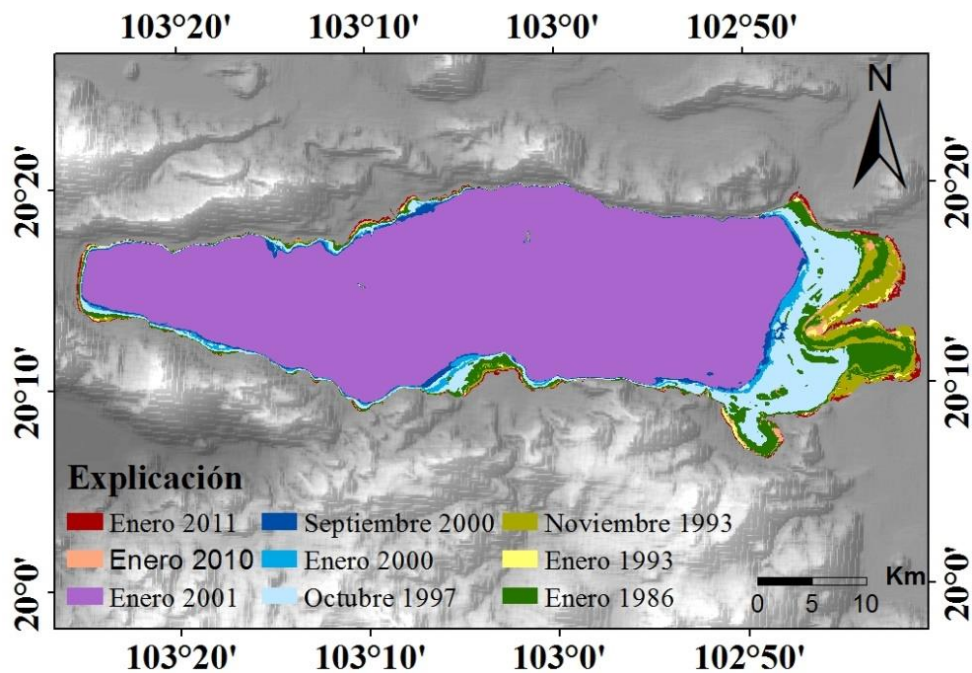


Figura 3. Superficies de inundaciones observadas en el Lago de Chapala entre 1986 y 2011.



Figura 4. Vista satelital del lago de Chapala en donde se puede apreciar una zona de cultivos. Cuando el lago se deseca la zona de cultivos crece temporalmente. La vista satelital corresponde a una imagen IKONOS y fue extraída de Google Earth (2014).

Al analizar la relación que existe entre la superficie de inundación y los valores de nivel del agua, se observó que existe una buena correlación entre superficie y altimetría con un R^2 de 0.8168, esto es, que poco más del 80% del nivel del agua puede ser explicado en función de la superficie de inundación (Figura 5).

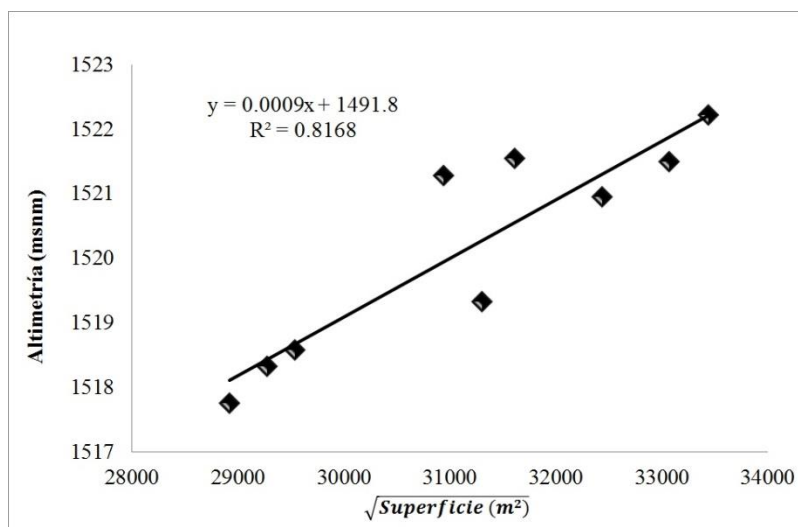


Figura 5. Relación entre la raíz cuadrada de la superficie con respecto a la altimetría. Las unidades de la altimetría están en metros sobre el nivel del mar (msnm)

Relación entre altimetría y bandas TM

Los resultados de la regresión lineal simple demuestran que por sí sola, una banda no puede explicar la altimetría del Lago de Chapala. Como se observa en la figura 6, la banda TM4 es la que mayor correlación tiene con la altimetría del lago. Sin embargo, su coeficiente de correlación R^2 de 0.3719 sugiere una correlación muy baja pues explica menos del 40% de la altimetría. Aunque son bajas las correlaciones se puede apreciar que para las bandas del visible (TM1, TM2 y TM3) el sentido es positivo, mientras que para las bandas del infrarrojo (TM4, TM5 y TM7) el sentido es negativo. Esto es congruente con el comportamiento espectral de un cuerpo de agua, en donde, a mayor volumen de agua, la reflectividad en el visible será mayor, mientras que en el caso del infrarrojo, a mayor volumen y profundidad del agua, la energía es absorbida. Por esta razón, en los resultados de regresión lineal simple lo que se observa es que a mayor altimetría se tiene un valor mayor de reflectividad. Caso contrario en el infrarrojo donde a mayor altimetría se presentan valores más bajos de reflectividad.

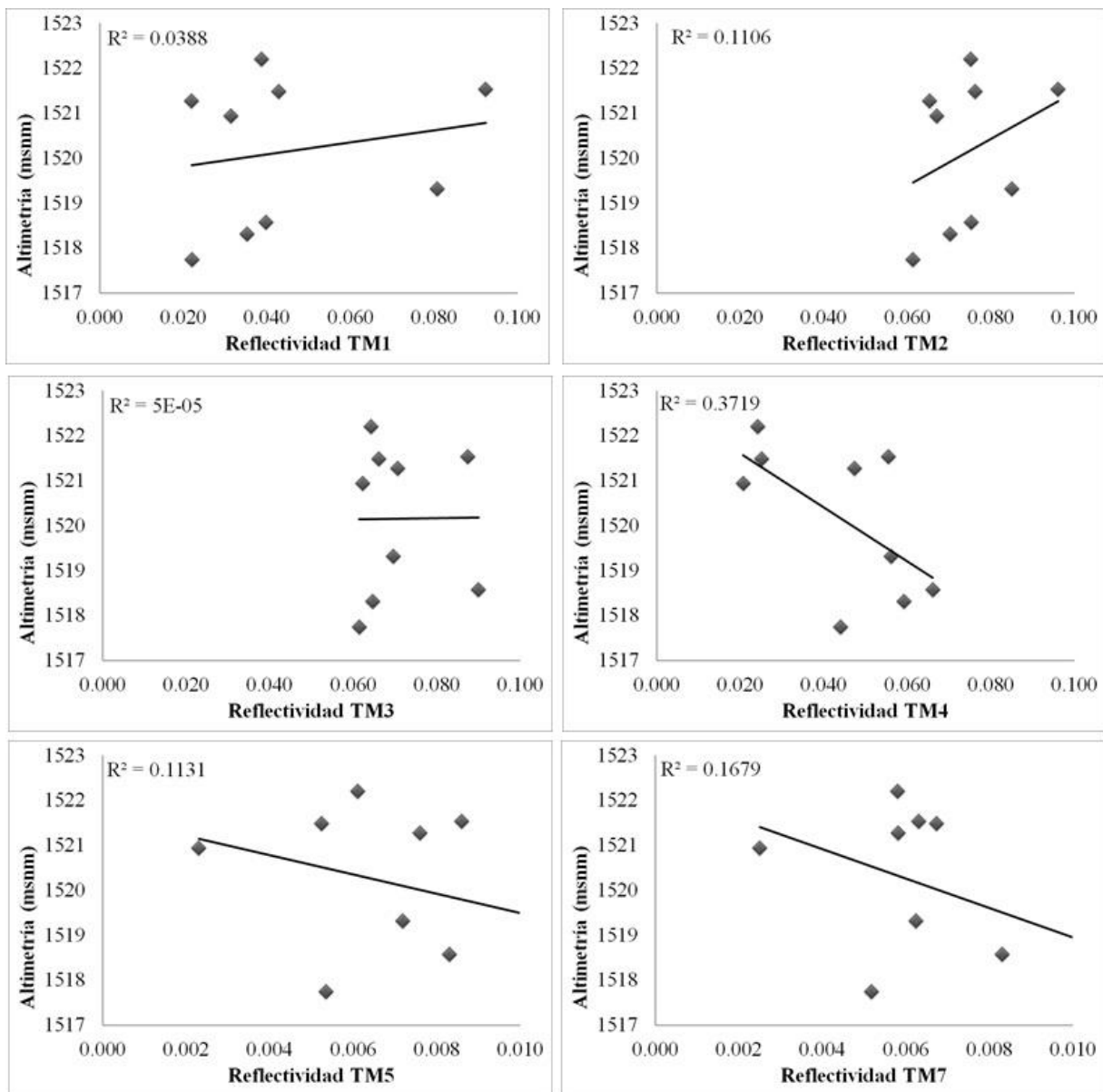


Figura 6. Resultados de la regresión lineal simple. La banda TM4 es la que muestra una mejor correlación. Sin embargo, en general no hay una buena relación lineal entre cada una de las bandas y la altimetría.

Debido a los resultados precedentes, se tuvo la necesidad de buscar otro tipo de relación entre los valores de reflectividad de cada banda y los valores de altimetría. La regresión lineal múltiple es una alternativa para el tratamiento de los datos. Como se puede observar en la tabla 2, existen evidencias para sugerir que la ecuación empírica que se obtuvo es confiable. Al analizar los valores de F (nivel de significación) y F crítico (nivel más bajo de significación) se puede constatar que los valores de F son mayores que los de F crítico por

lo que los resultados pueden ser aceptados como verdaderos, es decir, se puede afirmar que las evidencias muestrales sugieren que sí hay un efecto significativo lineal entre la altimetría promedio y las variables de reflectividad de las bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 y TM7. Además, el coeficiente de correlación de correlación múltiple y el coeficiente de determinación R^2 están arriba de 0.9 indicando una alta correlación.

Tabla 2. Análisis de datos obtenidos mediante una regresión lineal múltiple. Tanto el coeficiente correlación múltiple como el coeficiente de determinación muestran valores superiores a 0.9. Los valores de F y F crítica sugieren que hay un efecto lineal significativo entre altimetría y la reflectividad de las distintas bandas.

<i>Estadísticas de la regresión</i>					
Coeficiente de correlación múltiple		0.954			
Coeficiente de determinación R^2		0.910			
R^2 ajustado		0.640			
Error típico		0.998			
Observaciones		9			

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	6	20.2333	3.3722	3.3801	0.2458
Residuos	2	1.9952	0.9976		
Total	8	22.2286			

Como resultado de este análisis, se estableció que la altimetría guardaba la siguiente relación múltiple con todas las bandas que constituyen a la imagen Landsat TM (Ecuación 6):

$$Al = 1568.94173 + 471.136105TM1 - 1179.869004TM2 + 421.0496464TM3 - 538.8527361TM4 + 2288.300082TM5 - 565.6469732TM7 \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde: Al = Altimetría, TM1, TM2, TM3.....TMn = Bandas de la imagen Landsat TM

Los resultados cuantitativos de la aplicación de esta ecuación sobre las diferentes imágenes se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Datos de altimetría estimados con la ecuación 6 contra datos registrados en campo.

Fecha	Altim. medida	Altim. estimada	Fecha	Altim. medida	Altim. estimada	Fecha	Altim. medida	Altim. estimada
12/01/11	1522.21	1522.34	14/01/00	1518.57	1518.51	10/09/00	1518.31	1518.33
25/01/10	1521.49	1521.20	10/01/93	1521.27	1521.91	20/10/97	1519.32	1518.45
16/01/01	1517.74	1517.10	07/01/86	1520.94	1520.36	26/11/93	1521.54	1520.40

En la tabla 4 se presenta los datos estimados de altimetría con relación a la raíz cuadrada de la superficie para la cual resultó la siguiente ecuación (Ecuación 7).

$$Al = (0.0009 * \sqrt{S}) + 1491.8 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde: Al = Altimetría (m) y S = Superficie en m².

Tabla 4. Datos de altimetría estimados a partir de la ecuación 7 y datos de altimetría registrados en campo.

Fecha	Altim. medida	Altim. estimada	Fecha	Altim. medida	Altim. estimada	Fecha	Altim. medida	Altim. estimada
12/01/11	1522.21	1521.90	14/01/00	1518.57	1519.65	10/09/00	1518.31	1518.15
25/01/10	1521.49	1521.57	10/01/93	1521.27	1521.00	20/10/97	1519.32	1519.98
16/01/01	1517.74	1518.37	07/01/86	1520.94	1517.83	26/11/93	1521.54	1520.26

La figura 7 muestra el comportamiento del nivel del agua desde 1986 hasta el año 2011. Como se puede observar, existe una gran similitud entre la forma de la curva de los datos reales con respecto a la forma de la curvas de valores estimados con las ecuaciones 6 y 7. En todas se aprecia que los niveles más altos corresponden a los años 2011 y 1993. Entre los datos de mayor y menor elevación existe una diferencia promedio con respecto a los datos obtenidos de la ecuación 6 de 0.31 metros. Esta misma observación con respecto a las estimaciones obtenidas con la ecuación 7 dan como resultado una diferencia promedio de 0.29 metros.

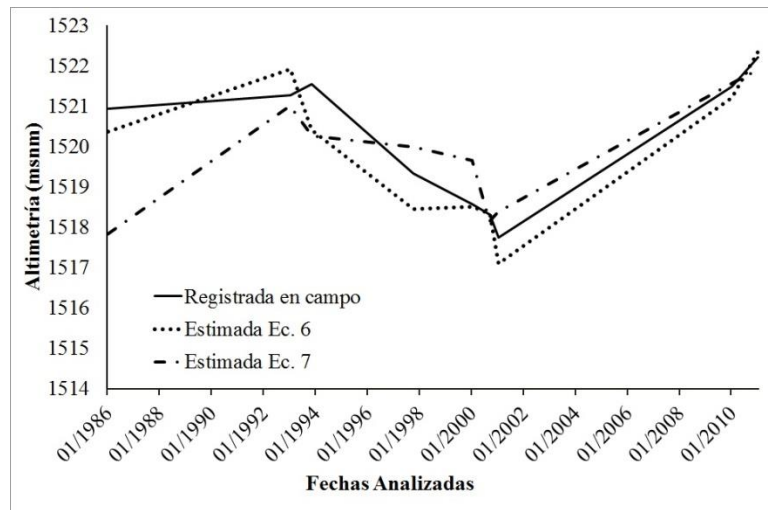


Figura 7. Comportamiento del nivel del agua registrado en campo y estimado a partir de las ecuaciones 6 y 7.

Además en la figura 8 se establece una relación entre los datos registrados en campo y los datos estimados a partir de las imágenes Landsat TM y el coeficiente de correlación ($R^2 = 0.9080$) muestra que ambas variables están altamente correlacionadas. Estos resultados permiten constatar que a partir de la firma espectral del agua del Lago de Chapala es posible establecer una buena estimación de la altimetría de la superficie de agua. Este resultado apoya la posibilidad de dar seguimiento a las variaciones de nivel de Chapala a partir de imágenes satelitales y abre la posibilidad de probar este método en un número mayor de cuerpos de agua, con la finalidad de obtener información sobre la variabilidad de la altimetría del agua en sitios donde no se cuente con mucha infraestructura para obtener registros directamente del campo.

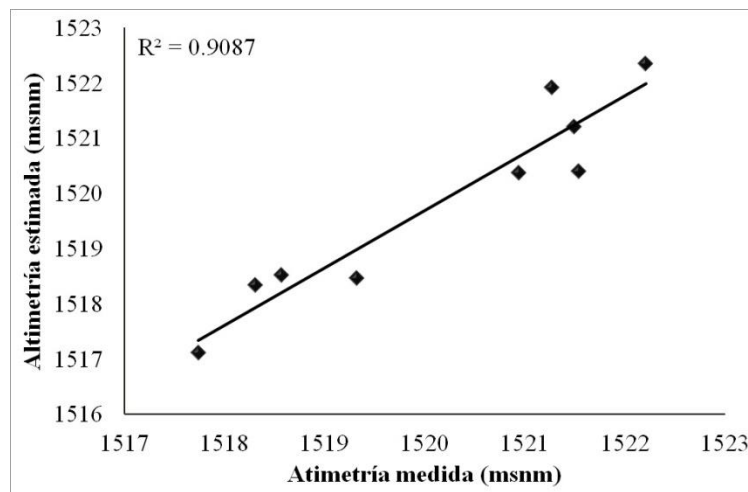


Figura 8. Relación entre los datos obtenidos por la ecuación 6 y los datos registrados en campo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado una metodología para obtener datos del nivel de la superficie del agua en cuerpos de agua continental. El caso que se abordó fue el lago de Chapala el cual fue elegido debido a la gran cantidad de datos que se tienen de él, lo que permite calibrar los resultados del método de estimación propuesto en este estudio. Los resultados muestran que el comportamiento entre el visible y el infrarrojo, en general, es lo esperado en muestras de agua, en donde las bandas del visible (TM1, TM2 y TM3) muestran valores más altos de reflectividad cuando la altimetría es mayor; mientras que, las bandas del infrarrojo (TM4, TM5 y TM7) muestran valores más bajos de reflectividad conforme aumenta el valor de altimetría. Pese a esto, las bandas por separado no muestran buena correlación con respecto al nivel del agua. Los resultados han mejorado al aplicar un análisis de regresión múltiple que incluye a todas las bandas (visible – infrarrojo) de las imágenes Landsat TM.

Al comparar los resultados obtenidos de la regresión lineal múltiple con respecto a los datos de campo, el grado de correlación es alto ($R^2 = 0.9080$). Así mismo, las curvas obtenidas con los datos estimados y los datos reales muestran mucha similitud en la forma, es decir, el dato estimado muestra con bastante precisión los cambios del nivel de la superficie del agua.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que la firma espectral del agua puede ser utilizada de forma confiable para dar seguimiento de la variabilidad del nivel de la superficie del agua.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP), por el apoyo otorgado mediante el proyecto PROMEP/103.5/13/6575. Así mismo, a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por las facilidades otorgadas para el buen desarrollo y presentación de este trabajo.

REFERENCIAS

- Calmant, S., and Seyler, F. (2006) Continental Surface waters from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(14-15): 1113-1122.
- Chander, G., Marham, B.L., and Helder, D.L. (2009) Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113: 893-903.
- CEA-Jalisco. (2014) El Lago de Chapala. Comisión Estatal del Agua de Jalisco. Recuperado el 22 de febrero de 2014. <http://www.ceajalisco.gob.mx/chapala.html#galeria>
- Chávez-Alcántar, A., Velázquez, Machuca, M., Pimentel-Equihua, J.L., Venegas-González, J., Montañez-Soto, J.L., y Vázquez-Gálvez, G. (2011) Hidrogeoquímica de las aguas

- superficiales de la Ciénega de Chapala e índice de calidad de agua. *Terra Latinoamericana*, 29(1): 83-94.
- Durand, M., Neal, J., Rodríguez, E., Andreadis, K.M., Smith, L.C. and Yoon Y. (2014) Estimating reach-averaged discharge for the River Severn from measurements of river water Surface elevation and slope. *Journal of Hydrology*, 511: 92-104.
- ESRI. (2012). ArcGIS (Versión 10.2) [Software de procesamiento digital de imágenes satelitales]. Los Ángeles, Estados Unidos: Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Fonte, S.J., Vanek, S.J., Oyarzun, P., Parasa, S., Quintero, D.C., Rao, I.M., and Lavelle, P. (2012) Chapter Four – Pathways to Agroecological Intensification of Soil Fertility Management by Smallholder Farmer in The Andean Highlands. *Advances in Agronomy*, 116: 125-184.
- Filonov, A.E., Tereshchenko, I.E., and Monzón, C.O. (1998) Oscillations of the hydrometeorological characteristics in the region of Lake Chapala for intervals of days to decades. *Geofísica Internacional*, 37(4): 293-307.
- GLOVIS (Versión 2009). Global Visualization Viewer (Buscador de imágenes satelitales en línea). Recuperado el 20 de enero de 2014. <http://glovis.usgs.gov/>
- Hamilton, W.L. (1987) Water level records used to evaluate deformation within the Yellowstone caldera, Yellowstone National Park. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31(3-4): 205-215.
- Hansen, A.M., and Van Afferden, M. (2004) El Lago de Chapala: Destino final del Río Lerma. En Jiménez B. y Marín L (eds). *El Agua en México Vista desde la Academia*. Academia Mexicana de Ciencias, 1ª edición, Impreso en México, pp. 117-136.
- Helbig, K.M. (2003) El Lago de Chapala en México y su desecamiento. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*, 24: 27-47.
- ITTVIS. (2008). ENVI (Versión 4.7) [Software de procesamiento digital de imágenes satelitales]. McLean, VA, Estados Unidos: ITT Visual Information Solutions, Formerly Research Systems, Inc.
- Jarihani, A.A., Callow, J.N., Hohansen, K., and Gouweleeu B. (2013) Evaluation of multiple satellite altimetry data for studying inland water bodies and river floods. *Journal of Hydrology*, 505: 78-90
- Marín, S.L., Nahuelhual, L., Echeverría, C. y Grant, W.E. (2011) Projecting landscape changes in southern Chile: Simulation of human and natural processes driving land transformation. *Ecological Modelling*, 222(15): 2841-2855.
- Meyerhoff, J., Boeri, M. and Hartje, V. (2014) The value of water quality improvements in the region Berlin–Brandenburg as a function of distance and state residency. *Water Resources and Economics*, 5: 49-66.

- Meyssignac B., Calafat, F.M., Somot, S., Rupolo, V., Stocchi, P., Llovel, W. and Cazenave A. (2011) Two-dimensional reconstruction of the Mediterranean sea level over 1970-2006 from tide gage data and regional ocean circulation model outputs. *Global and Planetary Change*, 77(1-2): 49-61.
- Milman, A., and Short, A. (2008) Incorporating resilience into sustainability indicators: An example for the urban water sector. *Global Environmental Change*, 18(4): 758-767.
- Palaseanu, M. and Pearlstine, L. (2008) Estimation of water Surface elevations for the Everglades, Florida. *Computers & Geosciences*, 34(7): 815-826.
- Pasquini, A.I., Lecomte, K.L and Depetris, P.J. (2008) Climate change and recent water level variability in Patagonian proglacial lakes, Argentina. *Global and Planetary Change*, 63(4): 290-298.
- Quinn, F.H., Sellinger, C.E. (1990) Lake Michigan Record Levels of 1838, a Present Perspective. *Journal of Great Lakes Research*, 16(1): 133-138
- Singh, A., Seitz, F., Schwatke, C. (2012) Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multi-mission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry. *Remote Sensing of Environment*, 123: 187-195.
- Solomon, D., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., and Averyt K. (Eds.) et al., *Climate Change (2007): The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- UNESCO-WWAP, (2003) *Water for people, water for life. Executive Summary of the UN World Water Development Report*. First published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France.