

Calculation of the volumetric capacity in Humaya main channel dikes using an acoustic Doppler current profiler

Cálculo de la capacidad volumétrica en diques del canal principal Humaya usando un perfilador de efecto Doppler

Alberto González-Sánchez*; Ernesto Olvera-Aranzolo

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Riego y Drenaje.

Paseo Cuauhnáhuac núm. 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C. P. 62550, MÉXICO.

*Corresponding author: alberto_gonzalez@tlaloc.imta.mx, tel. 01 777 3293600 ext. 115.

Abstract

Introduction: The capacities of the Humaya main channel (HMC) dikes were determined in 1966 and currently, because they are receptors of rough waters, they present varying degrees of sediment accumulation. This situation has caused a decrease in their initial capacity, so there is a need to update the bathymetry of the dikes.

Objectives: Determine the bathymetry of the HMC dikes using an acoustic Doppler current profiler to estimate the volumetric capacity, the flooded area and the maximum depth of each dike.

Materials and methods: A total of 11 dikes were studied, in which the experimental phase consisted of two stages. First, the coordinates of the water mirror of each dike were collected. Subsequently, the information was introduced into a modeling software by interpolation for the construction of three-dimensional models, which allow estimating the volume and contour lines of the dikes.

Results and discussion: Dikes 1 and 2 increased their capacity due to recent maintenance and enlargement work. On the other hand, Batamote, Agua fría, Hilda, Mariquita and Cacachila showed a loss of volumetric capacity (of 16.87 % on average), most likely due to the sediment problem.

Conclusions: The acoustic Doppler current profiler is an extremely useful tool to obtain information about dike depth. However, its use was limited by the presence of aquatic weeds and excessive sediment accumulation. Therefore, only seven dikes could be sounded correctly. It is essential to carry out an effective sediment control program in the most affected dikes.

Keywords: bathymetry, sediment, real-time kinematic satellite navigation, conservation.

Resumen

Introducción: Las capacidades de los diques del canal principal Humaya (CPH) se determinaron en 1966 y actualmente, debido a que son receptores de aguas broncas, presentan diversos grados de acumulación de azolve. Esta situación ha provocado la disminución de su capacidad inicial, por lo que existe la necesidad de actualizar la batimetría de los diques.

Objetivos: Determinar la batimetría de los diques del CPH utilizando un perfilador acústico de efecto Doppler para estimar la capacidad volumétrica, el área inundada y la profundidad máxima de cada dique.

Materiales y métodos: Se estudiaron un total de 11 diques, en los cuales la fase experimental consistió de dos etapas. Primero se recopilaron las coordenadas del espejo de agua de cada dique. Posteriormente, la información se introdujo a un software de modelado por interpolación para la construcción de modelos tridimensionales; los cuales permiten estimar el volumen y las curvas de nivel de los diques.

Resultados y discusión: Los diques 1 y 2 incrementaron su capacidad, esto debido a trabajos de mantenimiento y ampliación realizados recientemente. Por otro lado, Batamote, Agua fría, Hilda, Mariquita y Cacachila presentaron una pérdida de la capacidad volumétrica (de 16.87 % en promedio), muy probablemente debida a la problemática de azolve.

Conclusiones: El perfilador acústico de efecto Doppler es una herramienta sumamente útil para obtener información de la profundidad de los diques. No obstante, su uso estuvo limitado por la presencia de maleza acuática y la acumulación excesiva de azolve. Por lo anterior, solo siete diques pudieron ser sondeados de manera correcta. Es fundamental realizar un programa efectivo de control de azolve en los diques de mayor afectación.

Palabras clave: batimetría, azolve, cinética satelital en tiempo real, conservación.



Introduction

The Humaya main channel (HMC), opened on October 8, 1952, belongs to Culiacán-Humaya Irrigation District 010 and is one of the most important in Mexico. It is located in the central region of the state of Sinaloa, passing through the municipalities of Culiacán, Navolato, Mocorito, Angostura and Salvador Alvarado. The district has a current irrigated area of 212,374 ha, of which 106,835 ha belong to ejidos and 105,539 ha to small properties (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2005). For administrative purposes, the district is organized into 12 irrigation modules, of which six are supplied by the HMC (Figure 1).

The HMC is supplied by the Adolfo López Mateos dam, is 156 km long and has a large number of structures (26 reservoirs, a 1,310-m-long tunnel and 12 dikes; Pedroza-González & Hinojosa-Cuéllar, 2014). During its construction, in order to maintain depressions and take advantage of the runoff of some of the streams that cross the HMC, dikes were placed at different points along the channel (Table 1), whose initial capacity was determined with the volume that can be stored at different elevations depending on the channel's operating levels.

Several studies, both geotechnical and hydraulic, have been carried out in the HMC, highlighted by the work conducted in 1997 with increasing the height of the banks in the first 5 km of the channel and in some intermediate-level sections, as well as cleaning work,

Introducción

El canal principal Humaya (CPH), fundado el 8 de octubre de 1952, pertenece al Distrito de Riego 010 Culiacán-Humaya y es uno de los más importantes de México. Está localizado en la región centro del estado de Sinaloa, entre los municipios Culiacán, Navolato, Mocorito, Angostura y Salvador Alvarado. El distrito tiene una superficie actual de riego de 212,374 ha, de las que 106,835 ha son ejidales y 105,539 ha de la pequeña propiedad (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2005). Para su administración, el distrito se encuentra organizado en 12 módulos de riego, de los cuales seis son abastecidos por el CPH (Figura 1).

El CPH es abastecido por la presa Adolfo López Mateos, tiene 156 km de longitud y cuenta con una gran cantidad de estructuras (26 represas, un túnel de 1,310 m de longitud y 12 diques; Pedroza-González & Hinojosa-Cuéllar, 2014). Durante su construcción, con el fin de salvar depresiones y aprovechar los escurrimientos de algunos de los arroyos que cruzan el CPH, se colocaron diques en diferentes puntos a lo largo del canal (Cuadro 1), cuya capacidad inicial se determinó con el volumen que pueden llegar a almacenar a diferentes cotas en función de los niveles de operación del canal.

En el CPH se han realizado diversos estudios, tanto geotécnicos como hidráulicos. De entre estos destacan los trabajos realizados en 1997 con la sobre-elevación de bordos en los primeros 5 km del canal y en algunos tramos a nivel intermedio, así como trabajos

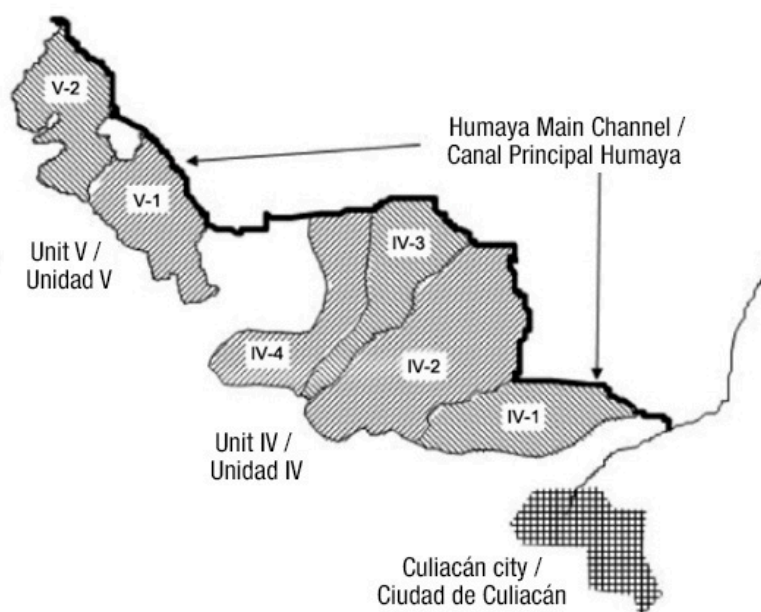


Figure 1. District 010 irrigation modules that supply the Humaya main channel (Pedroza-González & Hinojosa-Cuéllar, 2014).

Figura 1. Módulos de riego del Distrito 010 que abastece el canal principal Humaya (Pedroza-González & Hinojosa-Cuéllar, 2014).

Table 1. Dikes of the Humaya main channel, including cumulative distance and length.
Cuadro 1. Diques del canal principal Humaya, incluyendo cadenamamiento y longitud.

Dike/Dique	Cumulative distance (channel)/Ubicación (canal)		Length (m)/ Longitud (m)
	Entrance km/km entrada	Exit km/km salida	
1	13+240	13+536	296.30
2	14+388	15+213	824.12
Batamote	35+678	36+696	1,018.06
Arroyo Prieto	37+120	37+630	510.00
Agua Fría	42+255	42+710	455.17
Hilda	43+539	43+851	312.33
Mariquita	52+311	56+851	4,539.51
Palos Amarillos	96+390	96+775	385.00
Acatita	99+130	100+380	1,250.00
Cacachila	138+632	139+169	537.31
Aeropuerto	155+950	156+911	961.00

water lily control in the lateral lagoons belonging to the dikes and expansion of reservoirs to increase their hydraulic area (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 1997). However, the bathymetry of the dikes has not been updated in the last fifty years and various factors have decreased their volumetric capacity, such as sediment and aquatic weeds (Camarena-Medrano & Aguilar-Zepeda, 2012).

Some authors indicate that the lack of maintenance in the HMC (such as sediment removal) causes 2.5 % losses in its conduction (Vargas & Pedroza, 2000). It is important to mention that poor sediment management can cause flooding, pollute the water supply and result in crop losses, among other problems. Therefore, it is necessary to carry out adequate conservation tasks to maintain the original storage capacity of each dike, avoiding or reducing the accumulation of sediment in the areas of preferential circulation.

A necessary task in quantifying sediment is bathymetry (Brock, Wright, Clayton, & Nayegandhi, 2004), which consists in determining the relief at the bottom of waterbodies (lakes, reservoirs and dikes) (Planella-González, Gómez-Pivel, & Alcoba-Ruiz, 2013). It is done by collecting the coordinates (x , y , z) of points distributed along the length and width of the waterbody, where x , y correspond to the location on the horizontal plane and z to the depth (being in turn the one that presents the greatest complexity; Farjas-Abadía, 2005). The latter has given rise to the development of sounding techniques.

Until the beginning of the last century, the most efficient sounding techniques involved physical contact using poles or ropes with lead, which posed major drawbacks. In the 1920s, work began on acoustic

de limpieza, control de lirio acuático en las lagunas laterales pertenecientes a los diques y ampliación de represas para aumentar su área hidráulica (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 1997). No obstante, la batimetría de los diques no ha sido actualizada en los últimos cincuenta años y diversos factores han disminuido su capacidad volumétrica, como el azolve y la maleza acuática (Camarena-Medrano & Aguilar-Zepeda, 2012).

Algunos autores indican que la falta de mantenimiento en el CPH (como la remoción de azolve) provoca pérdidas de 2.5 % en su conducción (Vargas & Pedroza, 2000). Es importante mencionar que un mal manejo del azolve puede provocar inundaciones, contaminar el suministro de agua y causar la pérdida de cultivos, entre otros problemas. Por ello, es necesario realizar labores de conservación adecuadas para mantener la capacidad de almacenamiento original de cada dique, evitando o disminuyendo la acumulación de azolve en las zonas de circulación preferencial.

Una tarea necesaria en la cuantificación de azolve es la batimetría (Brock, Wright, Clayton, & Nayegandhi, 2004); la cual consiste en determinar el relieve del fondo de los cuerpos de agua (lagos, embalses y diques) (Planella-González, Gómez-Pivel, & Alcoba-Ruiz, 2013). Se realiza a partir de la recolección de coordenadas (x , y , z) de puntos distribuidos a lo largo y ancho del cuerpo de agua; donde x , y corresponden a la ubicación en el plano horizontal y z a la profundidad (siendo a su vez la que presenta mayor complejidad; Farjas-Abadía, 2005). Esta última ha dado pie al desarrollo de técnicas de sondeo.

Hasta principios del siglo pasado, las técnicas de sondeo más eficientes eran de contacto, con bastones o cuerdas con plomo, presentando grandes inconvenientes.

echo measuring equipment, which no longer required physical contact with the water bottom and streamlined the measurement process. Currently, acoustic Doppler current profilers (ADCP) are used to perform depth measurements, while incorporating a geolocation device to acquire the coordinates (x, y). These devices allow performing bathymetric surveys quickly and accurately, being an alternative to the traditional methods that determine the planimetry and altimetry separately (Farjas-Abadía, 2005). With the ADCP it is possible to obtain, among other estimates, the shape of the section, the speeds in the three dimensions and the flow of the channels with great precision (Hiebl & Musso, 2007; Leu & Chang, 2005).

Recently, conservation activities in the HMC made it necessary to determine the bathymetry of the dikes that make up the channel's conduction system. The HMC was designed to conduct a flow of $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; however, until 2013, the maximum that had been transported was $85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Since then, the freeboard has been reduced for the channel's operation, disabling the flood works and allowing free flow in the floodgates. To increase the channel's flow, by increasing the height of the dike walls, a review of the new operating conditions, including all the dikes installed, is required.

Therefore, the objective of this work was to determine the bathymetry of the HMC dikes using an acoustic Doppler current profiler to estimate the volumetric capacity, the flooded area and the maximum depth of each dike. The results were compared with the volumetric capacities published in 1997.

Materials and methods

Acquisition of coordinates and depth measurements

The coordinates (x, y, z) of the bathymetric study were determined with an acoustic Doppler current profiler (ADCP; model M9, SonTek brand) (Figure 2) with an accuracy of 1 % of the mean value and a resolution of 0.001 m, using a 0.5 MHz ultrasonic transducer. This instrument calculates the water velocity components in different layers in the three directions. As its name implies, this equipment uses the Doppler effect, as it transmits sounds at a fixed frequency and captures the echoes returned by water reflectors (Lee, Mukai, Lee, & Lida, 2008). The reflectors are small microscopic particles of sediment or plankton present naturally in water (Hiebl & Musso, 2007). When the sound sent by the ADCP reaches the reflectors there is a frequency displacement proportional to the relative speed between the ADCP and the reflectors. Part of the sound is reflected once again to the ADCP. This second displacement is used to calculate the speeds (Figure 3).

En la década de los veinte se comenzó a trabajar con equipos de medición del eco acústico; los cuales ya no requerían un contacto físico con el fondo acuático y agilizaban el proceso de medición. Actualmente, se emplean perfiladores acústicos de efecto Doppler (PAED) para realizar la medición de la profundidad, a la vez que incorporan un dispositivo de geolocalización para adquirir las coordenadas (x, y). Estos equipos permiten realizar levantamientos batimétricos de manera rápida y precisa, siendo una alternativa a los métodos tradicionales que determinan la planimetría y la altimetría por separado (Farjas-Abadía, 2005). Con el PAED se pueden obtener, entre otras estimaciones, la forma de la sección, las velocidades en las tres dimensiones y el caudal de los canales con una gran precisión (Hiebl & Musso, 2007; Leu & Chang, 2005).

Recientemente, actividades de conservación en el CPH hicieron necesaria la determinación de la batimetría de los diques que integran el sistema de conducción del canal. El CPH fue diseñado para conducir un gasto de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; sin embargo, hasta 2013, lo máximo que se había logrado transportar eran $85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Desde entonces, para la operación del canal se ha reducido el bordo libre, deshabilitando las obras de excedencia y dejando libre el flujo en las compuertas. Para aumentar el gasto del canal, a través de la sobre-elevación, se requiere una revisión de las nuevas condiciones de operación, donde se incluyan todos los diques instalados.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar la batimetría de los diques del CPH utilizando un perfilador acústico de efecto Doppler para estimar la capacidad volumétrica, el área inundada y la profundidad máxima de cada dique. Los resultados se compararon con las capacidades volumétricas publicadas en 1997.

Materiales y métodos

Adquisición de coordenadas y medición de profundidades

Las coordenadas (x, y, z) del estudio batimétrico se determinaron con un perfilador acústico de efecto Doppler (PAED; modelo M9, marca Sontek) (Figura 2) con exactitud de 1 % del valor medio y resolución de 0.001 m, usando un emisor de ultrasonido de 0.5 MHz. Este instrumento calcula las componentes de velocidad del agua en diferentes capas en las tres direcciones. Como su nombre lo indica, este equipo utiliza el efecto Doppler, transmite sonidos a una frecuencia fija y capta los ecos retornados por los reflectores del agua (Lee, Mukai, Lee, & Lida, 2008). Los reflectores son pequeñas partículas microscópicas de sedimentos o plancton presentes de forma natural en el agua (Hiebl & Musso, 2007). Cuando el sonido enviado por el PAED llega a



Figure 2. SonTek M9 equipment used to obtain depth data.

Figura 2. Equipo M9 de Sontek usado para obtener los datos de profundidad.

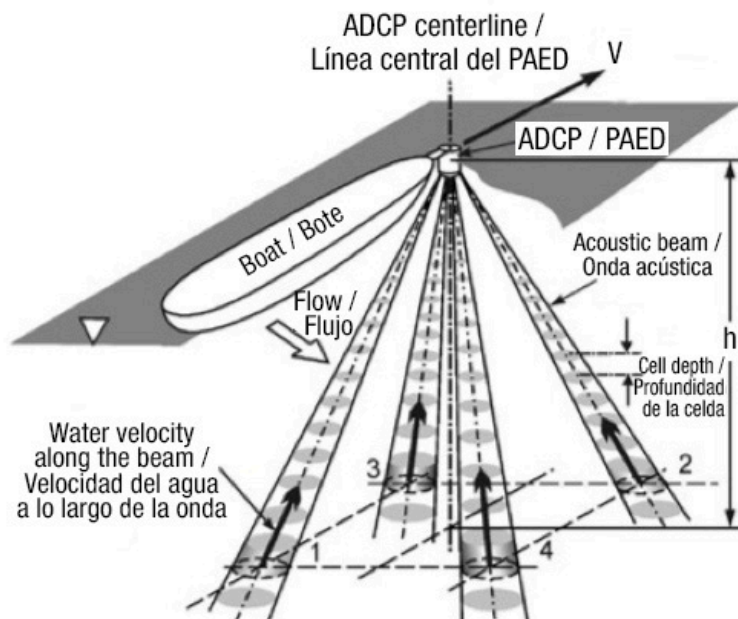


Figure 3. Operating principle of an acoustic Doppler current profiler (ADCP). Adapted from Muste, Kim, and Fulford (2008).

Figura 3. Operación del perfilador acústico de efecto Doppler (PAED). Adaptado de Muste, Kim, y Fulford (2008).

As a backup measure, the coordinates (x, y) were also captured with real-time kinematic (RTK) satellite navigation equipment. The equipment used was of the Topcon brand, with horizontal resolution of $10 \text{ mm} + 1.0 \text{ ppm}$ and has support for various systems, such as GPS, GLONASS, QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), SBAS (Satellite Based Augmentation System) and Galileo. The RTK improves the precision of other positioning systems, such as the use of the Global Positioning System (GPS) or the Differential GPS (DGPS),

los reflectores hay un desplazamiento frecuencial proporcional a la velocidad relativa entre el PAED y los reflectores. Parte del sonido es reflejado nuevamente hacia el PAED. Este segundo desplazamiento es utilizado para calcular las velocidades (Figura 3).

Como medida de respaldo, las coordenadas (x, y) también se capturaron con un equipo de navegación cinética satelital en tiempo real (RTK, por sus siglas en inglés). El equipo utilizado fue de la marca Topcon, con resolución

allowing high-precision readings in real time, even if the receiver is in motion (Langley, 1998). An RTK consists of two stations, one static (reference) and the other mobile. The latter contains the movement receiver with which the coordinates will be determined in real time (with the option to do so in the local reference system). The reference station provides instantaneous corrections for the mobile station (Paar, Novakovic, & Kolovrat, 2014).

To perform the reading of the coordinates in each dike, the ADCP and the RTK were mounted on a motor boat (Figure 4). In general, a tour was made along the edge of the dike, sweeping every 20 m in both directions. This allowed the collection of points that associate the depth levels with the position within the dikes. As an example, in Figure 5 the route and the position of the sampled points in Dike 1 were schematized. The equipment was programmed to perform the automated capture of the coordinates: ADCP every 4 s and RTK every 10 s.

Some dikes exhibited problems of floating and emergent weeds in a partial (Figure 6) or even total manner, which limited the scope of the sweeps. Therefore, in the Arroyo Prieto, Hilda, Mariquita, Palos Amarillos, Acatita, Cacachila and Aeropuerto dikes it was difficult to cover the entire surface. On average, 20 % of the area (mainly on the edge of the dikes) was unfathomable.

Construction of the bathymetric models

The depth and position data obtained were reviewed and analyzed with Google Earth and Esri ArcGis Desktop. The Google Earth application provided a first visual approximation to the location of the points, which allowed detecting that in three dikes there was an offset of the coordinates (x, y), possibly due to



Figure 4. RTK equipment used for backup information.
Figura 4. Equipo RTK usado como respaldo de la información.

horizontal de 10 mm + 1.0 ppm y cuenta con soporte para diversos sistemas, como GPS, GLONASS, QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*), SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) y Galileo. El RTK mejora la precisión de otros sistemas de posicionamiento, como el uso de *Global Positioning System* (GPS) o el *Differential GPS* (DGPS), permitiendo lecturas de alta precisión en tiempo real, incluso si el equipo receptor está en movimiento (Langley, 1998). Un RTK está conformado por dos estaciones, una estática (de referencia) y la otra móvil. Esta última contiene el receptor de movimiento con el cual se determinarán las coordenadas en tiempo real (con la opción de hacerlo en el sistema de referencia local). La estación de referencia provee correcciones instantáneas para la estación móvil (Paar, Novakovic, & Kolovrat, 2014).

Para realizar la lectura de las coordenadas en cada dique, el PAED y el RTK se montaron en un bote de motor (Figura 4). De forma general, se hizo un recorrido por la orilla del dique, barriendo cada 20 m en ambas direcciones. Esto permitió la recolección de puntos que asocian los niveles de profundidad con la posición dentro de los diques. Como ejemplo, en la Figura 5 se esquematizó el recorrido y la posición de los puntos muestreados en el Dique 1. Los equipos se programaron para realizar la captura automatizada de las coordenadas: PAED cada 4 s y RTK cada 10 s.

Algunos diques presentaron problemas de maleza flotante y emergente de manera parcial (Figura 6) o incluso total, lo que limitó el alcance de los barridos. Por lo que, en los diques Arroyo Prieto, Hilda, Mariquita, Palos Amarillos, Acatita, Cacachila y Aeropuerto se tuvieron dificultades para cubrir toda la superficie. En promedio, 20 % del área (principalmente en las orillas de los diques) fue insondable.

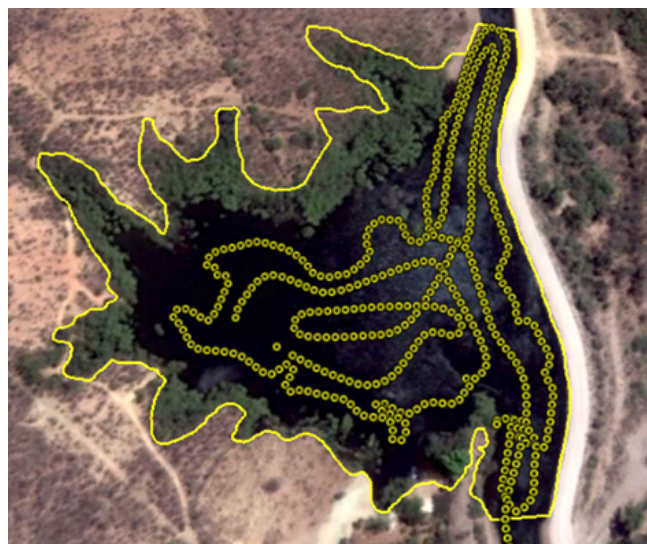


Figure 5. Route of the equipment for the bathymetric survey of Dike 1.
Figura 5. Recorrido del equipo para el levantamiento batimétrico del Dique 1.



Figure 6. Lily in Arroyo Prieto dike.

Figura 6. Lirio en dique Arroyo Prieto.

a calibration error of the compass. The points with deviations were corrected based on the RTK backup information, with the ArcGis Desktop program using the timestamp readings to make the correlation. Once the information was integrated, a table with the coordinates (x, y, z) of each dike was obtained.

To construct the models, the coordinates were introduced into the Surfer program. This application allows building contour maps and digital elevation models from the interpolation of the points x, y, z by means of a process called “gridding.” Surfer offers various algorithms for this task. In this work we used the Kriging algorithm (Goovaerts, 1997), which is considered the best interpolation method for spatial data (Jassim & Altaany, 2013). Kriging predicts the value of a spatial attribute in a particular location of already known positions, taking into account spatial dependence and autocorrelation (Bhattacharjee, Mitra, & Ghosh, 2014). Unlike other methods, Kriging attempts to express trends suggested by the data, so that, for example, the high points are connected along a ridge rather than isolated by circular contours (Yang, Kao, Lee, & Hung, 2004). The basic form of the Kriging estimator is (Jassim & Altaany, 2013):

$$P^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i P_i$$

where P_i are the observed points, λ_i is the weighting factor for each point i and P^* is the point that we want to estimate. Therefore, the purpose of the estimator is to determine the weights λ_i that minimize the variance, considering that:

$$E\{P^* - P\} = 0$$

and

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Construcción de los modelos batimétricos

Los datos obtenidos de profundidad y posición se revisaron y analizaron con Google Earth y ArcGis Desktop de Esri. La aplicación Google Earth facilitó una primera aproximación visual a la localización de los puntos; lo cual permitió detectar que en tres diques se presentó desfasamiento de las coordenadas (x, y) , posiblemente producto de un error de calibración de la brújula. Los puntos con desviaciones se corrigieron con base en la información de respaldo del RTK, con el programa ArcGis Desktop usando la marca de tiempo de las lecturas para hacer la correlación. Una vez integrada la información, se obtuvo una tabla con las coordenadas (x, y, z) de cada dique.

Para construir los modelos, las coordenadas se introdujeron en el programa Surfer. Esta aplicación permite construir mapas de curvas de nivel y modelos de elevación digital a partir de la interpolación de los puntos x, y, z por medio de un proceso denominado “enrejillado” (*gridding*). Surfer ofrece diversos algoritmos para esta tarea. En este trabajo se empleó el algoritmo *Kriging* (Goovaerts, 1997), el cual es considerado el mejor método de interpolación para datos espaciales (Jassim & Altaany, 2013). El Kriging predice el valor de un atributo espacial en una localización particular de posiciones ya conocidas, tomando en cuenta la dependencia espacial y la autocorrelación (Bhattacharjee, Mitra, & Ghosh, 2014). A diferencia de otros métodos, Kriging intenta expresar las tendencias sugeridas por los datos; de modo que, por ejemplo, los puntos altos se conecten a lo largo de una cresta y no de forma aislada en contornos circulares (Yang, Kao, Lee, & Hung, 2004). La forma básica del estimador Kriging es (Jassim & Altaany, 2013):

$$P^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i P_i$$

Typically, the weights λ_i are constructed by means of a variogram (whether linear, spherical, or exponential), which describes the spatial behavior of the variable z (Kerry & Hawick, 1997). For this work, the model used was linear with slope equal to one and without anisotropy. This option and parameters are selected by definition in the Surfer program for the execution of the Kriging algorithm. The output for the Kriging method is a file containing data x,y,z in grid format (*file.grd*), which correspond to the interpolated coordinates of the entire gridding region. The z values greater than 0, obtained by the trends detected in the interpolation, were eliminated.

The delimitation of the regions of interest was done with vector maps constructed in the ArcGIS Desktop program, using as reference Google Earth images and points acquired with the RTK at the ends of the dikes. These points also allowed establishing the upper elevation in masl. For their presentation, contours with a separation of 20 cm were obtained. The volumes were also calculated with the Surfer program, which uses the numerical integration to perform the calculation, specifically Simpson's 3/8 rule. Finally, a digital elevation model (DEM) of each dike was obtained.

Results and discussion

The contours and the DEM (Figure 7) allowed obtaining the area and volume data for each elevation. This information allowed generating the elevation-area-capacity graphs of each dike. Figure 8 shows the graph of dike 1, showing the increase in volume (red curve, lower horizontal axis)

donde P_i son los puntos observados, el λ_i es el factor de ponderación para cada punto i y P^* es el punto que se desea estimar. Por lo tanto, el propósito del estimador es determinar los pesos λ_i que minimizan la varianza, considerando que:

$$E\{P^* - P\} = 0$$

y

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Típicamente, los pesos λ_i son construidos por medio de un variograma (ya sea lineales, esféricos y exponenciales), el cual describe el comportamiento espacial de la variable z (Kerry & Hawick, 1997). Para este trabajo el modelo empleado fue lineal con pendiente igual a uno y sin anisotropía. Esta opción y parámetros están seleccionados por definición en el programa Surfer para la ejecución del algoritmo Kriging. La salida para el método Kriging es un archivo de datos x,y,z en formato grid (archivo *grid*), que corresponden a las coordenadas interpoladas de toda la región del enrejillado. Los valores z mayores a 0, obtenidos por las tendencias detectadas en la interpolación, se eliminaron.

La delimitación de las regiones de interés se realizó con mapas vectoriales construidos en el programa ArcGIS Desktop, utilizando como referencia imágenes de Google Earth y puntos adquiridos con el RTK en los extremos de los diques. Estos puntos también permitieron establecer la cota superior en msnm. Para su presentación, se

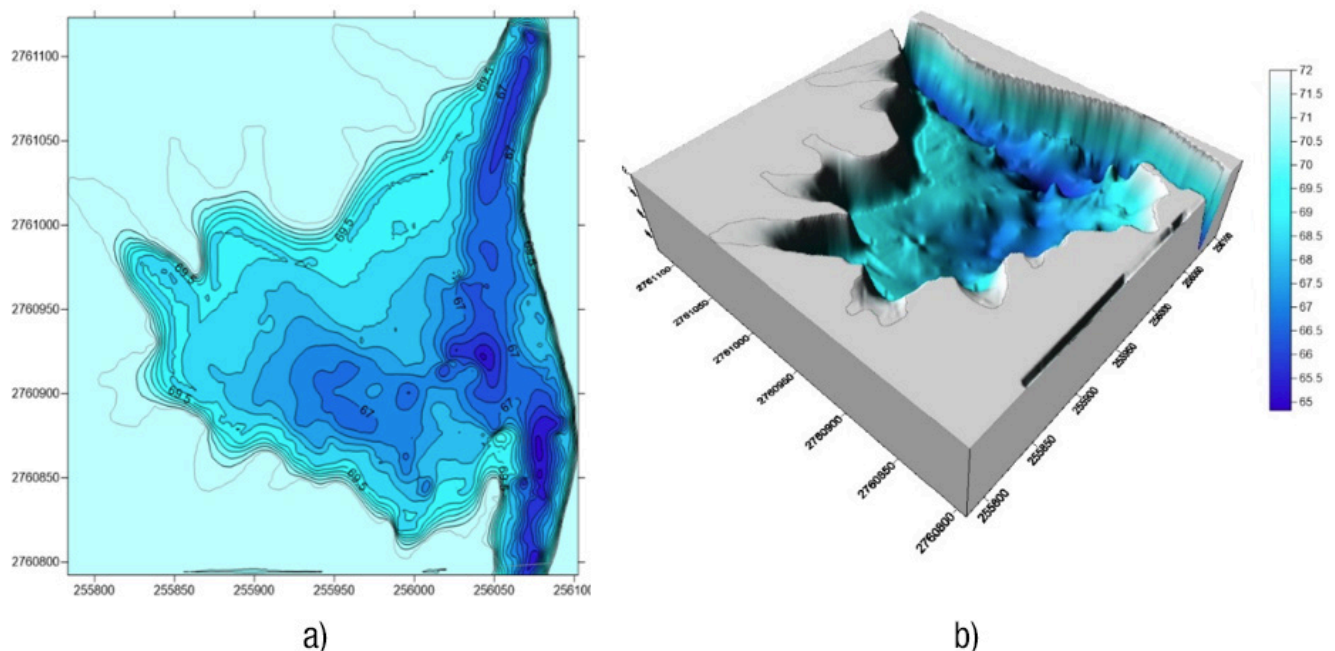


Figure 7. Contours (a) and digital elevation model (b) resulting from the bathymetry of dike 1. Author-made with data obtained from the measurement of dike 1.

Figura 7. Curvas de nivel (a) y modelo de elevación digital (b) resultantes de la batimetría del dique 1. Elaboración propia con datos obtenidos de la medición del dique 1.

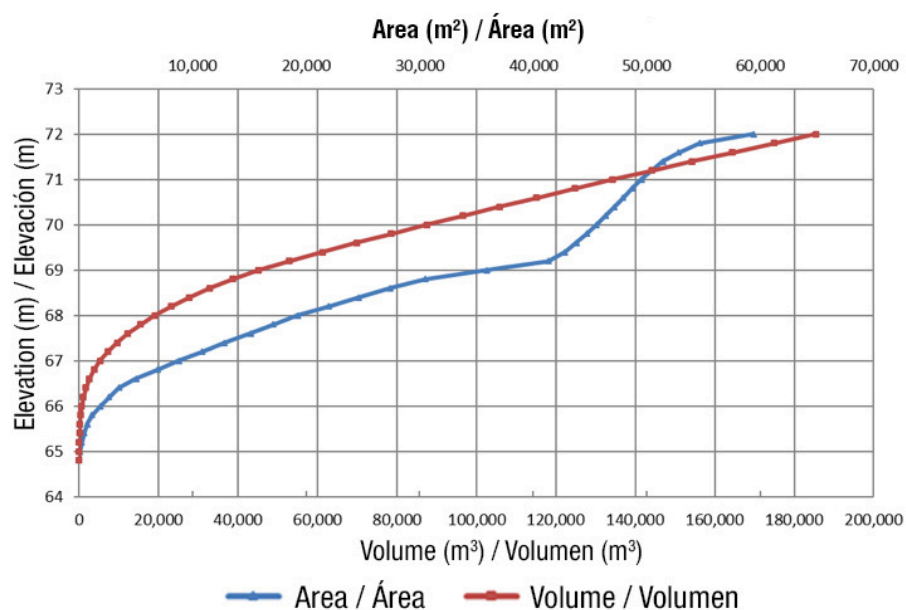


Figure 8. Elevation-area-capacity curve of dike 1 (13+240).

Figura 8. Curva de elevación-área-capacidad del dique 1 (13+240).

and area (blue curve, upper horizontal axis) as a function of depth (vertical axis). For convenience, this last datum is expressed in masl, reaching the bottom at 64.8 masl and the water mirror at 72 masl, giving a depth of 7.2 m. The graph allows quickly identifying the volume and coverage area as a function of the height reached by the water in the dikes.

Table 2 shows the main product of the work carried out, which are the volumetric capacity (m^3), flooded area (ha) and depth (m) data of all the HMC dikes, even those that could not be sounded in their entirety due to aquatic weed problems (4 of the 11 dikes).

obtuvieron curvas de nivel con una separación de 20 cm. Los volúmenes también, se calcularon con el programa Surfer; el cual utiliza la integración numérica para realizar el cálculo, concretamente la regla de Simpson 3/8. Finalmente, se obtuvo un modelo de elevación digital (MED) de cada dique.

Resultados y discusión

Las curvas de nivel y el MED (Figura 7) permitieron obtener los datos de área y volumen para cada cota. Esta información permitió generar las gráficas de elevación-área-capacidad de cada dique. En la Figura 8

Table 2. Volumetric capacity, flooded area and depth at sediment level of the HMC dikes.

Cuadro 2. Capacidad volumétrica, área inundada y profundidad a nivel de azolve de los diques del CPH.

Dike / Dique	Volumetric capacity (m^3) / Capacidad volumétrica (m^3)	Flooded area (ha) / Área inundada (ha)	Depth (m) / Profundidad (m)
1	185,460	5.41	7.20
2	706,905	227.84	7.50
Batamote	4,414,376	130.00	9.50
Arroyo prieto*	1,020,000	33.00	7.80
Agua fría	268,951	15.60	5.60
Hilda	135,522	13.55	5.75
Mariquita	15,255,513	445.47	11.5
Palos amarillos*	495,667	22.83	4.25
Acatita*	750,000	42.00	4.20
Cacachila	1,223,892	69.00	4.60
Aeropuerto*	977,406	76.72	3.35

*dikes not fully studied due to aquatic weed problems.

*diques no estudiados en su totalidad por problemas de maleza acuática.

Table 3 shows the volumes of each dike compared to those originally calculated in 1966 (IMTA, 1997). To make a proper comparison, the same elevation was used in the curves of both bathymetries, excluding dikes that were not fully covered due to the problem of aquatic weeds. Negative values denote a loss of volumetric capacity. As can be seen, dikes 1 and 2 increased their capacity, due to the maintenance and expansion work that was recently carried out. On the other hand, Batamote, Agua fría, Hilda, Mariquita and Cacachila were those that showed the greatest loss of capacity, most likely due to the sediment. This is important since it is estimated that, on average, the economic losses worldwide due to the reduction of storage capacity for irrigation due to sediment are in the range of 3 to 5 billion dollars per year (International Commission on Large Dams [ICOLD], 2010).

se presenta la gráfica del dique 1, donde se muestra el aumento del volumen (curva roja, eje horizontal inferior) y del área (curva azul, eje horizontal superior) en función de la profundidad (eje vertical). Por conveniencia, este último dato se expresa en msnm, alcanzando el fondo a los 64.8 msnm y el espejo de agua a los 72 msnm, dando una profundidad de 7.2 m. La gráfica permite identificar rápidamente el volumen y área de cobertura en función de la altura que alcanza el agua en los diques.

El Cuadro 2 muestra el producto principal del trabajo realizado, que son los datos de la capacidad volumétrica (m^3), área inundada (ha) y profundidad (m) de todos los diques del CPH, incluso aquellos que no pudieron ser sondeados en su totalidad por problemas de maleza acuática (4 de los 11 diques).

Table 3. Comparison of the volumetric capacity between the 2013 and 1966 bathymetric surveys.
Cuadro 3. Comparación de la capacidad volumétrica entre la batimetría de 2013 y la de 1966.

Dike/ Dique	Elevation (z)/ Cota (z)	Bathymetry 2013 (m^3)/ Batimetría 2013 (m^3)	Bathymetry 1966 (m^3)/ Batimetría 1966 (m^3)	% decrease (-) or increase in volumetric capacity/ % de disminución (-) o incremento de capacidad volumétrica
1	72.00	185,460.04	153,931.03	20.48
2	72.00	706,905.66	637,221.14	10.94
Batamote	68.00	4,414,376.82	5,575,147.84	- 20.82
Agua Fría	66.00	241,774.27	292,500.00	- 17.34
Hilda	66.00	349,356.83	400,000.00	- 12.66
Mariquita	63.00	11,385,259.06	15,700,000.00	- 27.48
Cacachila	49.00	1,223,891.17	1,302,325.58	- 6.02

Conclusions

The dikes of the Humaya main channel are operated as a function of the channel's level and serve as temporary water storage areas in the case of normal flow. In this way, the dikes function as buffers against probable extraordinary contributions, flood flow and floodgate movements, as well as deposits of irregular volumes. Therefore, the dikes act as a protection and buffering system for the CPH, which makes their conservation and timely maintenance extremely important.

An acoustic Doppler current profiler is an extremely useful tool for obtaining the depths of dikes. From its use it was possible to determine the volumetric capacity of the HMC dikes. However, its use was limited by the presence of aquatic weeds and excessive sediment accumulation. For this reason, only seven of the eleven dikes could be sounded correctly.

Of the seven dikes that were almost completely studied, the comparison showed that two increased their capacity due to the correction made in the channel's

En el Cuadro 3 se muestran los volúmenes de cada dique comparados contra los calculados originalmente en 1966 (IMTA, 1997). Para hacer una comparación adecuada, se utilizó la misma cota en las curvas de ambas batimetrías, excluyendo los diques que no cubrieron en su totalidad por el problema de la maleza acuática. Los valores negativos denotan una pérdida de la capacidad volumétrica. Como se puede observar, los diques 1 y 2 incrementaron su capacidad, esto debido al mantenimiento y ampliación que se realizó recientemente. Por otro lado, Batamote, Agua fría, Hilda, Mariquita y Cacachila fueron los que presentaron mayor pérdida de su capacidad, muy probablemente debido al azolve. Esto es importante ya que se estima que, en promedio, las pérdidas económicas a nivel mundial por la reducción de capacidad de almacenamiento para riego debido al azolve están en el rango de 3 a 5 billones de dólares anuales (International Commission on Large Dams [ICOLD], 2010)

Conclusiones

Los diques del canal principal Humaya se operan en función del nivel del canal y son un almacén temporal

main canal. In the remaining five there was no accumulation of sediment, which caused, on average, a 16.87 % decrease in their capacity. This shows the need to carry out an effective sediment control program in the most affected dikes.

Weeds and sediment obstruct the free flow of water through the dikes, causing load losses and significantly influencing the conduction and response capacity of the channel. Poor sediment management not only increases maintenance costs, but also causes significant losses to irrigation users.

End of English version

References / Referencias

- Brock, J. C., Wright, C. W., Clayton, T. D., & Nayegandhi, A. (2004). *LIDAR optical rugosity of coral reefs in Biscayne National Park, Florida*. *Coral Reefs*, 23(1), 48-59. doi: 10.1007/s00338-003-0365-7
- Bhattacharjee, S., Mitra, P., & Ghosh, S. K. (2014). *Spatial interpolation to predict missing attributes in GIS using semantic kriging*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(8), 4771-4780. doi: 10.1109/TGRS.2013.2284489
- Camarena-Medrano, O., & Aguilar-Zepeda, J. A. (2012). *El IMTA y el control biológico de maleza acuática en distritos de riego del país*. Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Retrieved from http://cenca.imta.mx/pdf/El_IMTA_y_el_control_biologico.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2005). *Formulación del Plan Director para la Modernización Integral del Riego del Distrito de Riego 010 "Culiacán-Humaya" Sinaloa*. Ciudad de México: Gerencia de Distritos y Unidades de Riego - Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola.
- Farjas-Abadía, M. (2005). Levantamientos batimétricos. In: Farjas-Abadía, M. (Ed), *Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-ii/Teoria_Batimetria_Tema_13.pdf. Fecha de consulta 17 de enero del 2017. 19 p.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. New York: Oxford University Press.
- Hiebl, E., & Musso, M. (2007). Christian Doppler: Life and work, principle and applications. *Proceedings of the Commemorative Symposia in 2003*. Salzburg, Prague, Vienna, Venice: Living Edition.
- International Commission on Large Dams (ICOLD). (2010). *Cost savings in dams*. Bulletin 144. Paris: Author. Retrieved from <http://www.cbdb.org.br/bulletins/B144.pdf>
- de agua en el caso de flujo normal. De esta forma, los diques funcionan como amortiguadores ante probables aportaciones extraordinarias, tránsito de avenidas y movimientos de compuertas, así como depósitos de volúmenes irregulares. Por lo anterior, los diques constituyen un sistema de protección y amortiguamiento del CPH, lo que hace sumamente importante su conservación y mantenimiento oportuno.
- Un perfilador acústico de efecto Doppler es una herramienta sumamente útil para la obtención de las profundidades de los diques. A partir de su uso fue posible determinar la capacidad volumétrica de los diques del CPH. No obstante, su uso se vio limitado por la presencia de maleza acuática y la acumulación excesiva de azolve. Por esta razón, solo siete de los once diques pudieron ser sondeados de manera correcta.
- De los siete diques que se lograron estudiar casi en su totalidad, la comparación mostró que dos incrementaron su capacidad debido a la corrección realizada en el cauce principal del canal. En los cinco restantes no hubo acumulación de azolve, lo que ocasionó una disminución de su capacidad de 16.87 %, en promedio. Con ello, se revela la necesidad de realizar un programa efectivo de control de azolve en los diques de mayor afectación.
- La maleza y el azolve obstruyen el libre tránsito del agua a través de los diques, originando pérdidas de carga e influyendo significativamente en la capacidad de conducción y de respuesta del canal. Un mal manejo del azolve no solo aumenta los costos de mantenimiento, también provoca importantes mermas a los usuarios de riego.

Fin de la versión en español

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (1997). *Estudio para la modernización del canal principal Humaya (Anexo D)*. Morelos, México: Coordinación de Hidráulica.
- Jassim, F. A., & Altaany, F. H. (2013). Image interpolation using kriging technique for spatial data. *Canadian Journal on Image Processing and Computer Vision*, 4(2), 16-21. Retrieved from <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1302/1302.1294.pdf>
- Kerry, K. E., & Hawick, K. A. (1997). Spatial interpolation on distributed, high-performance computers. In: *Technical Report DHPC-015*. Australia: Department of Computer Science, University of Adelaide. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.48.5441&rep=rep1&type=pdf>

- Langley, R. (1998). RTK GPS. *GPS World*, 9(9), 70-76. Retrieved from <http://www2.unb.ca/gge/Resources/gpsworld.september98.pdf>
- Lee, K., Mukai, T., Lee, D., & Lida, K. (2008). Verification of mean volume backscattering strength obtained from acoustic Doppler current profiler by using sound scattering layer. *Fisheries Science*, 74(2), 221-229. doi: 10.1111/j.1444-2906.2008.01516.x
- Leu, L., & Chang, H. (2005). Remotely sensing in detecting the water depths and bed load of shallow waters and their changes, *Ocean Engineering*, 32(10), 1174-1198. doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.12.005
- Muste, M., Kim, W., & Fulford, J. M. (2008). Developments in hydrometric technology: new and emerging instruments for mapping river hydrodynamics. *World Meteorological Organization Bulletin*, 57(3), 163-169. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/bulletin/developments-hydrometric-technology-new-and-emerging-instruments-mapping-river>
- Paar, R., Novakovic, G., & Kolovrat, D. (2014). *Vertical component quality comparison of GPS RTK method in combination with laser system vs. conventional methods for height determination*. Prague, Czech Republic: INGENIO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying. Retrieved from https://www.svf.stuba.sk/buxus/docs/web_katedry/gde/ingenio/TS2-05_Paar.pdf
- Pedroza-González, E., & HinojosaCuéllar, G. A. (2014). *Manejo y distribución del agua en distritos de riego. Breve introducción didáctica*. Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Planella-González, L. F., Gómez-Pivel, M. A., & Alcoba-Ruiz, D. D. (2013). Improving bathymetric images exploration: a data mining approach. *Computers & Geosciences*, 54, 142-147. doi: 10.1016/j.cageo.2012.12.009
- Vargas, D. S., & Pedroza, G. E. (2000). *Estimación de pérdidas por operación en canales principales*. Mazatlán, Sinaloa, México: Congreso Internacional de Transferencia de Sistemas de Riego.
- Yang, C. S., Kao, S. P., Lee, F. B., & Hung, P. S. (2004). Twelve different interpolation methods: a case study of surfer 8.0 (pp. 778-785). *Proceedings of the XXth ISPRS Congress*. Retrieved from <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm2/papers/231.pdf>