

MÉTODO INDIRECTO PARA CALCULAR EL VOLUMEN DE AGUA EN EMBALSES PEQUEÑOS

Cervando Castillo Romano, Jorge Enrique Brena Zepeda
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

Esta propuesta surgió por la necesidad de cuantificar la capacidad de almacenamiento de cuerpos de agua pequeños de los cuales no se tiene información alguna. A diferencia de las grandes presas que se tiene control de su almacenamiento diario estos cuerpos carecen de datos e inclusive muchos de ellos no se reportan en la cartografía oficial por ser de reciente creación; generalmente son de poca capacidad y no perenes, limitados por un bordo que asume la función de una cortina, lo que es un indicador de su poca capacidad. Sin embargo en algunas cuencas se cuentan por decenas, que al sumar la cantidad de agua que retienen necesariamente impacta en los estudios de balance hidrológico.

El método propone una secuencia indirecta de procedimientos para calcular el volumen de agua retenida a partir de datos geográficos distribuidos por INEGI y de imágenes de satélite o de cualquier otra fuente de sensor remoto; actualmente las imágenes se pueden visualizar y extraer información básica de ellas sin costo en sistemas geográficos disponibles en la Internet; en este caso solo se requiere el archivo vector del contorno o espejo de agua. En términos generales el método propone la generación de un Modelo Digital del Terreno (MDT) hidrológicamente correcto en un espacio del terreno que no cuenta con datos para generarlo; posteriormente se calcula el volumen que almacena.

Palabras clave: Curvas topográficas, red hidrográfica conectada, contorno de espejo de agua, cálculo del volumen del embalse, curva elevación-área-capacidad.

Objetivo

Obtener el MDT del terreno de acuerdo con la distribución espacial de la red hidrográfica y modelar en 3D el embalse para calcular el volumen que almacena.

Introducción

En la cartografía topográfica escala 1:50,000 publicada por INEGI existe una gran cantidad de cuerpos de agua que están ubicados espacialmente en el terreno pero de los cuales no se tiene información de su capacidad de almacenamiento; en otros casos no existen porque fueron creados posterior a la última actualización de la cartografía. La particularidad de estos cuerpos de agua es que están situados en espacios donde no existe información topográfica con datos de elevación por lo que se dificulta su modelado. Podría pensarse que utilizando algún algoritmo de interpolación sería suficiente para obtener el MDT que se pretende obtener con este método, sin embargo no sucede así, la falta de datos en áreas muy grandes provoca que los interpoladores no generen modelos del terreno lógicos o acordes

con la distribución irregular de las curvas de elevación; por otra parte, los modelos no se comportan de acuerdo con la distribución de la red hidrológica y tampoco con el límite del cuerpo de agua. En esencia este método propone lograr un MDT hidrológicamente correcto, es decir de acuerdo con la fisiografía de su entorno.

Recientemente el INEGI publicó la cartografía de la Red Hidrográfica continua 2.0 escala 1:50,000 por Región Hidrológica. Anteriormente esta red no era continua, se interrumpía por la presencia de la simbología que está presente en la cartografía topográfica, como ciudades, puentes, redes eléctricas, carreteras, etcétera. Esta pérdida de información era una limitante para hacer modelos del terreno acordes con la red hidrográfica porque no se tenía certidumbre de la dirección de la trayectoria espacial del flujo de la corriente. Por lo que ahora, disponer de esta información abre muchas posibilidades para el modelado tridimensional.

Por otra parte, existen algunos portales en la web donde las imágenes de satélite de baja y mediana resolución están disponibles a los usuarios en diferentes formatos para consulta visual y en algunos casos para disponer de ellas sin costo alguno. Las imágenes de mediana resolución, 25 m por pixel o un poco mayor, proporcionan información con la calidad de la escala 1:50,000.

Método

Datos de entrada

El método utiliza tres fuentes de datos en formato digital:

- Curvas de elevación de las Cartas Topográficas escala 1:50,000 de INEGI.
- Red Hidrográfica Continua 2.0 escala 1:50,000 de INEGI.
- Límite del espejo de agua que se va a modelar.

En este caso, para probar el método se seleccionó un cuerpo de agua que se localiza en la cuenca del Río Lerma, se obtuvo de una imagen de satélite LANDSAT TM con resolución de 25 m por pixel. La proyección de los tres datos está en UTM, Zona 14 y el Datum es WGS 1984.

Para calcular el límite del espejo de agua se recomienda que la fecha de toma de la imagen de satélite o la imagen de otro sensor remoto sea de la temporada de precipitación pluvial, con esto se asegura que se obtendrá un volumen de almacenamiento muy cercano al máximo. En la figura 1 se muestra la posición geográfica de las tres fuentes de entrada de datos; en este caso las curvas topográficas seleccionadas tienen una diferencia de elevación de 10 metros, la menor tiene un valor de 1,760 y la mayor de 1,780 msnm. Con respecto a la red hidrográfica, se indica la dirección del flujo con las flechas para indicar el recorrido que realiza y su confluencia en el cuerpo de agua.

Como se puede observar, el cuerpo de agua, color rojo, está en la parte baja del terreno, limitado por un bordo que impide la continuidad de la corriente de manera natural provocando la acumulación de agua. En el espacio que ocupa no existen datos de elevación, solamente la dirección del flujo de la red, por lo tanto se asume una condición para aplicar el método: el terreno es relativamente suave porque la

diferencia en elevación de las dos curvas más cercanas al cuerpo de agua es de 10 metros, por lo tanto la profundidad de este debe ser menor a 10 metros. En la cartografía el espaciamiento entre curvas varía de acuerdo con la sinuosidad del terreno, en áreas con poca rugosidad generalmente es de 10 metros.

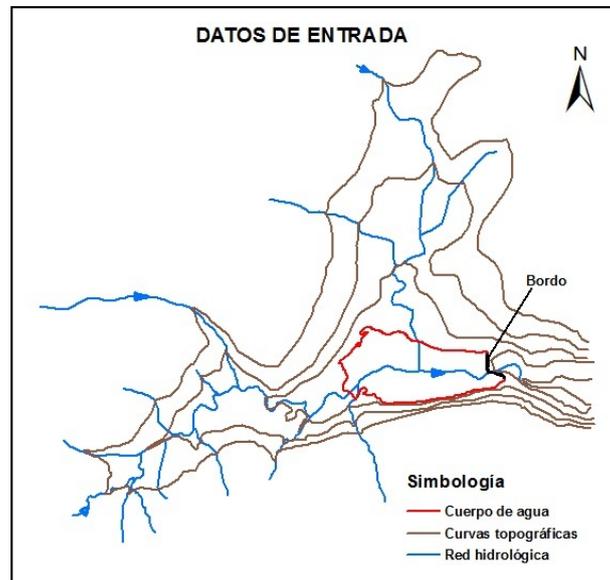


Figura 1. Datos de entrada

Red Hidrográfica

Como se mencionó, lo que se pretende es obtener un modelo del terreno hidrológicamente correcto, por lo que el siguiente procedimiento está enfocado a obtener valores de elevación en el espacio donde no existen datos. Para obtenerlos se parte de la posición de la red hidrográfica en el cuerpo de agua; en este caso se observan dos corrientes principales que confluyen en el embalse de acuerdo con la dirección del flujo, uno tiene la dirección oeste-este que es el más largo y otro va de norte a sur. La trayectoria oeste-este es la única que toca a la curva de menor elevación y la siguiente en valor ascendente (1,760 y 1,770 msnm), la otra solo toca una de estas dos curvas, por esta razón se extrae este tramo de la red y se transforma en formato de puntos, se sugiere que el espaciamiento sea equidistante aunque puede no serlo, se crea un conjunto de puntos donde cada uno posee coordenadas x,y (latitud y longitud) de acuerdo con su distribución en el espacio.

Los puntos se grafican y se les aplica un ajuste lineal de puntos a una recta utilizando el método de mínimos cuadrados, de esta manera los puntos quedan ordenados en una línea y se facilita el cálculo del valor z. Al ajustar las coordenadas de los puntos a una línea se simplifica el relieve de la superficie del terreno, por lo tanto solo existe un valor para la pendiente evitando el cálculo para cada uno de los puntos, esto quiere decir que la red hidrográfica ahora corre por esta línea. Generalmente la red hidrográfica que pasa o cruza los cuerpos de agua pequeños no presenta grandes cambios en la dirección de su trayectoria, tiende a ser recta porque el espacio que ocupa es pequeño con respecto a la escala original de donde se extrajeron los datos. Asumiendo esta condición empírica se aplica el ajuste lineal.

Para mostrar el resultado del cálculo se muestra la figura 2, se aprecia en la gráfica la distribución de los puntos equidistantes de la dirección oeste-este con su

respectivo ajuste de puntos, quedando distribuidos en el terreno como se muestra en el mapa donde se presenta la distribución espacial de los datos geográficos. Lo mismo se aplica para los puntos de la corriente norte-sur pero su extremo sur se ajusta a la recta, es decir su valor inicial lo tomará de esta.

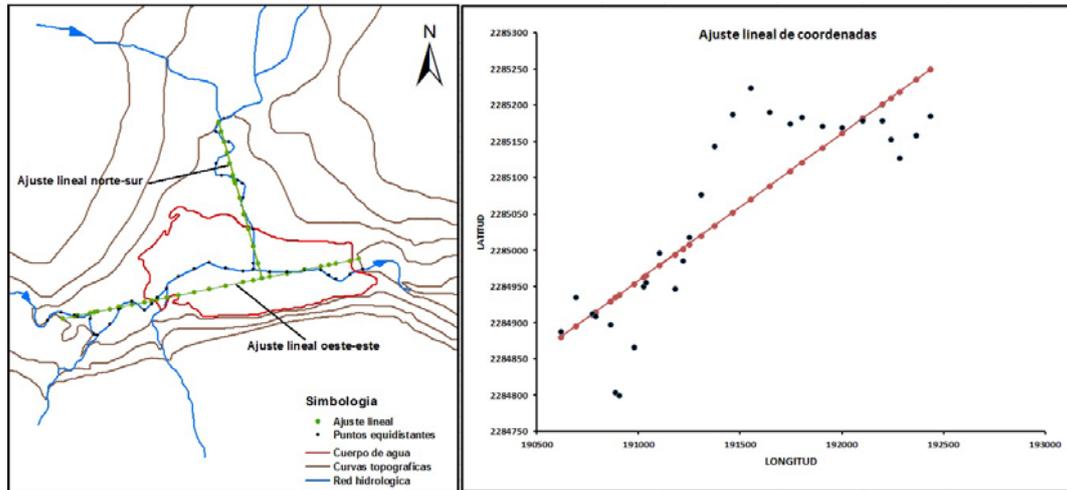


Figura 2. Ajuste de regresión lineal y su distribución en el terreno.

Una vez calculados los ajustes se obtienen las coordenadas x,y de los puntos ajustados para obtener su valor de z , para calcularlo se utiliza la ecuación continua de la recta en el espacio:

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}$$

Donde:

x_1, y_1, z_1 = coordenadas del punto ajustado en la curva ($z=1,760$ msnm)
 x_2, y_2, z_2 = coordenadas del punto ajustado en la curva ($z=1,770$ msnm)
 x,y = coordenadas de los puntos ajustados que no están en las curvas originales

Una vez que se han calculado los valores de z para los puntos ajustados, es necesario dar un valor de elevación al límite del espejo de agua que es representado por un vector, que a su vez se considera como una curva de elevación cerrada. En este caso el ajuste se lleva a cabo a partir de los puntos por donde se intersecta con las rectas oeste-este y la norte-sur; el valor de z en ambos casos no es el mismo como debería de ser en una curva de elevación; esto se debe a la fuente original que se utilizó para obtener el contorno, que en este caso es una imagen de satélite LANDSAT TM de 25 metros de resolución por pixel. En esencia esto quiere decir que el contraste entre dos condiciones de la superficie, en este caso suelo y agua, existe por lo menos un área de 25 m^2 que puede pertenecer a una u otra condición, lo que repercute en la posición del límite calculado; al utilizar imágenes de satélite esta condición se presenta en todos los casos. La manera más práctica de resolver esto es calcular un promedio de los valores y asumir que el resultado es el valor z de la curva cerrada que delimita el cuerpo de agua, en este caso resultó de $1,765.58$ msnm.

Modelo Digital del Terreno

Después de obtener los valores de z de los puntos ajustados se calcula el MDT del terreno. El primer paso es convertir todos los datos de entrada en puntos y unirlos en un solo archivo o capa, cada punto debe contar con coordenadas x,y,z ; los datos ajustados de origen fueron puntos por lo que estos solo se incorporan al archivo. El siguiente paso es aplicar un algoritmo de interpolación para calcular la modelación del terreno; existe una gran cantidad de algoritmos de interpolación incorporados en los Sistemas de Información Geográfica que pueden utilizarse para este fin, sin embargo se recomienda utilizar un algoritmo que esté enfocado al modelado de la superficie hidrológicamente correcta, para lograrlo es fundamental que la distribución espacial de los datos sea lo más armónica posible para lograr la continuidad de las curvas topográficas en la superficie.

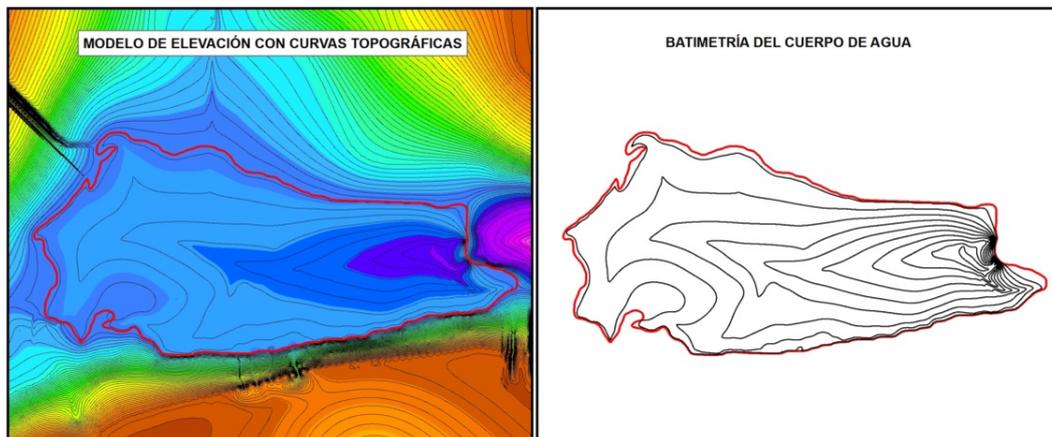


Figura 3. MDT obtenido y las curvas de nivel que proporciona.

En la figura 3 se muestra el MDT (imagen en color) obtenido después de aplicar el algoritmo de interpolación, también se muestran las curvas de elevación que se obtienen a partir de él, en este caso la diferencia de elevación entre curvas es de 50 centímetros, además se sobrepuso el límite del cuerpo de agua para ubicarlo espacialmente el MDT. La otra parte de la figura 3 muestra las curvas que están dentro del cuerpo de agua, de hecho estas curvas pasan a ser la batimetría a partir de la cual se calcula el volumen almacenado.

Volumen almacenado

Una vez que se tiene el archivo vectorial con la batimetría y el límite del cuerpo de agua, se inicia el proceso para calcular el volumen almacenado, el primer procedimiento es transformar el archivo vectorial a una red irregular triangulada (TIN, por sus siglas en inglés), es una forma eficiente y precisa de representar una superficie continua del terreno de los valores de z para transformarlos a un modelo tridimensional, esto se lleva a cabo por medio de triángulos no superpuestos que permiten modelar la superficie porque tres puntos definen una forma única de una parte del total. En la figura 4 se muestra el modelo tridimensional del embalse que se obtuvo a partir de la estructura TIN, se incorporan las curvas de elevación y el límite del cuerpo de agua.

Los Sistemas de Información Geográfica generalmente tienen implementado un algoritmo matemático para el cálculo del volumen almacenado en una concavidad

que previamente ha sido modelada como es el caso de la estructura TIN, en nuestro caso el embalse es la concavidad con una cota mínima y una máxima. Para cada par de cotas de elevación el sistema calcula un volumen acumulado y la superficie del espejo de agua queda expuesta dentro del embalse para la cota máxima. De esta manera se va estableciendo la relación área-capacidad-elevación. Una vez que se ha calculado el volumen acumulado para diferentes valores de elevación se traza las curvas que muestran el comportamiento del volumen de agua en el embalse. La gráfica muestra la tendencia de las curvas de acuerdo con las características físicas de la concavidad del embalse y la superficie o espejo de agua para cada elevación. En la figura 4 se muestra el modelo tridimensional y la curva área-capacidad-elevación.

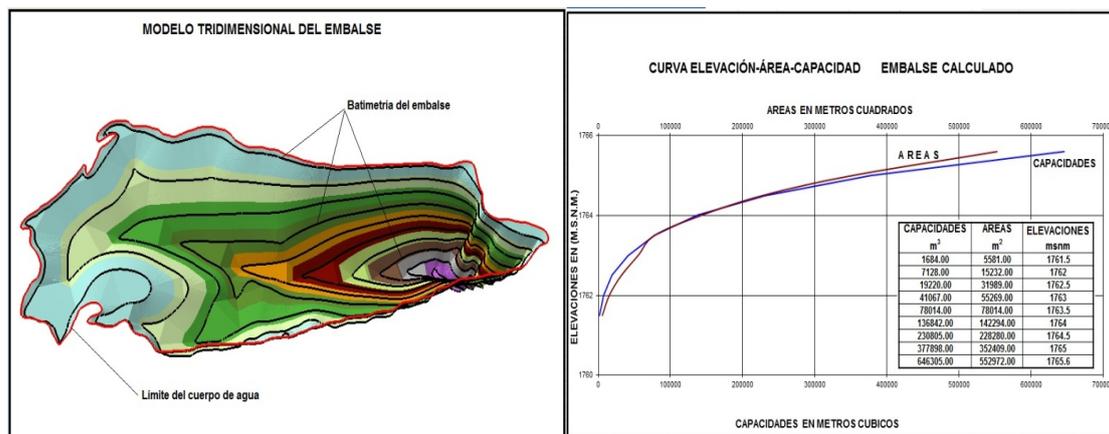


Figura 4. Modelo tridimensional y curva área-capacidad-elevación.

En sentido estricto esta curva no puede ser considerada como una curva elevación-área-capacidad porque solamente es válida para un límite en particular definido por el cuerpo de agua, para que así fuera sería necesario saber la máxima capacidad que puede soportar el bordo, sin embargo la curva ayuda a visualizar el comportamiento de las tres variables que se obtuvieron para este estudio de caso.

Resultados

El método prueba que el procedimiento aplicado llega a los resultados esperados; se obtiene un modelo tridimensional del cuerpo de agua y a partir de este se calcula el volumen que almacena. Como todo método indirecto es necesario confrontarlo con datos obtenidos in situ, para esto se recomienda probarlo en una cuenca y aplicarlo al 15% del total de los cuerpos de agua que existen en la cuenca.

Bibliografía

Hutchinson, Michael F. and Gallant, John C.(2000);Digital Elevation models and Representation of Terrain Shape; In: Terrain Analysis: Principles and Applications; Edited by John P. Wilson and Jhon C. Gallart; John Wiley & Sons; Pags 29-50.

Maguirre D, Goodchild M, Rhind D, and Rhind David. 1993. Geographical Information System, Volume 1: Principles; Edited by Longman Scientific & Technical; 269-297.

Página consultada: <http://www.inegi.gob.mx>