



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MODELO BATIMÉTRICO DE LA BAHÍA  
DE PETACALCO**

**T E S I S**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO GEOMÁTICO**

P R E S E N T A :

**MARÍA ELENA OSORIO TAI**



DIRECTOR DE TESIS: ING. AGUSTÍN FERNÁNDEZ EGUIARTE

MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA 2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

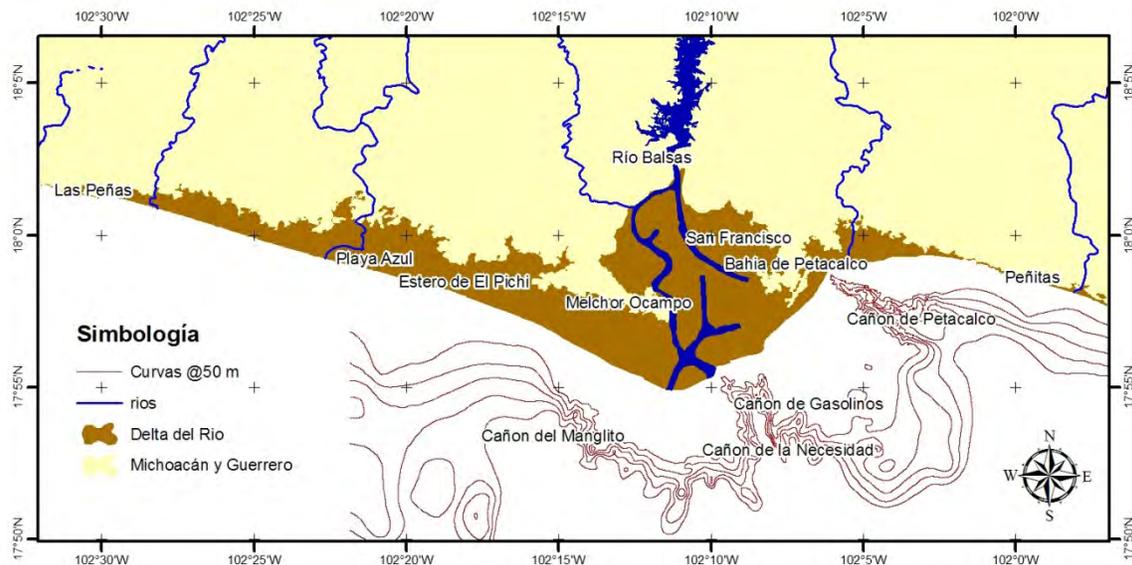
## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	2
<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>5</b>
1.1. Estudios previos de la batimetría en la Bahía de Petacalco .....	5
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>7</b>
2.1. Objetivo general .....	7
2.2. Objetivos particulares .....	7
<b>3. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN.....</b>	<b>8</b>
3.1. ¿Qué es un Modelo Digital de Elevación? .....	9
3.2. Distintas formas de representación cartográfica, usos y aplicaciones .....	11
<b>4. DATOS .....</b>	<b>23</b>
4.1. La <i>Carta batimétrica general del océano</i> .....	24
4.2. Portulano del Puerto de Lázaro Cárdenas .....	26
4.3. Datos obtenidos en estudios anteriores .....	29
4.4. Mediciones directas .....	30
<b>5. METODOLOGÍA .....</b>	<b>36</b>
5.1. Exploración de los datos .....	36
5.1.1. Procesamiento y representación de datos .....	36
5.1.2. Identificación de observaciones inconsistentes .....	39
5.2. Generación de línea de costa como frontera .....	42
5.3. Métodos de interpolación empleados .....	43
5.3.1. Kriging .....	44
5.3.2. Distancias inversas ponderadas .....	44
5.3.3. Red de triángulos irregulares.....	45
5.3.4. Spline .....	45
5.4. Comparación de los datos interpolados .....	46
5.5. Representación y salidas de la información .....	65
5.5.1. Importancia de la representación cartográfica .....	65
5.5.2. Simbologías .....	67
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
6.1. Mapas temáticos .....	69
6.2. Modelo digital de elevación en tres dimensiones .....	73
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>75</b>
 BIBLIOGRAFÍA .....	 76

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es levantar y generar el modelo batimétrico del Cañón de Petacalco, localizado en la bahía del mismo nombre en el estado de Guerrero (Figura 1).

El Cañón de Petacalco está asociado a la cuenca del Río Balsas, que en su zona deltaica tiene, en la actualidad, dos brazos principales: el de Melchor Ocampo y el brazo de San Francisco [8]. El Río Balsas delimita los estados de Michoacán y Guerrero, localizándose al oeste de su cauce la Ciudad de Lázaro Cárdenas, Michoacán, y hacia el este la población de Petacalco Guerrero. [1]



**Figura 1.** Mapa de ubicación, el Río Balsas delimita con el estado de Michoacán al oeste y al este con el estado de Guerrero.

El delta del río Balsas y su zona costera es parte integral de una de las mayores cuencas hidrológicas que descargan en la vertiente del Pacífico mexicano. Como tal, es un bien ecológico y económico irremplazable de nuestra base de recursos. Sus funciones son insustituibles en cualquier proyecto de sociedad que aspire a acceder a un desarrollo duradero.

El delta es un sistema ambiental complejo y abierto, dominado y subsidiado por procesos físicos, químicos y biológicos de sus sistemas adyacentes: el fluvial y la zona costera-marina, en la que se desarrollan una serie de actividades económicas e industriales que han modificado en gran medida esta región. El sistema ecológico del río Balsas está determinado también por intensos intercambios bióticos y abióticos: la cuenca, el valle aluvial, la compleja zona orográfica, la planicie deltaica, la cuenca de recepción y la zona marina. Sus procesos globales (especialmente los flujos de sedimentos, nutrientes y materiales) han sido afectados por las drásticas transformaciones derivadas del aprovechamiento de sus recursos, fragmentando sus cuencas alta y media, su delta y su zona costera y marina adyacentes.

La zona de estudio, presenta marea mixta predominantemente semidiurna, con una pleamar máxima de 0.922, una bajamar mínima de -0.724, con pleamar media superior de 0.257 y una bajamar media inferior de -0.277. Resultando un rango de marea de 0.534 metros. [26].

La figura 1.1 corresponde a la estación mareográfica de la Ciudad de Lázaro Cárdenas y la figura 1.2 muestra una parte del calendario de marea para Septiembre de 2010.



**Figura 1.1.** Ubicación de la estación mareográfica.



**Figura 1.2.** Calendario de marea.

La pérdida de los servicios ambientales del delta del Río Balsas ha sido consecuencia de los impactos urbano, agrícola, pesquero, industrial, portuario y de las actividades inherentes, entre las que destacan:

- La construcción de las Presas Infiernillo y La Villita
- El desarrollo agrícola de la región
- El desarrollo urbano de las ciudades de Lázaro Cárdenas y de Petacalco
- La inexistencia, insuficiencia y mal estado de las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales
- El desarrollo industrial de la región
- La explotación de los recursos pesqueros

En el año 1992 durante la fase final de construcción de las unidades generadoras de la Central, y hasta el inicio de pruebas operacionales y primeras fases de la operación comercial hasta agosto de 1994, CFE contrató la realización del estudio *Evaluación del Impacto al Ambiente Marino por la Descarga Térmica de la C. T. Petacalco*, llevado a cabo por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. [4].

Posteriormente, durante los años 1999 a 2001 la Universidad Nacional Autónoma de México llevó a cabo el estudio *Diagnóstico Ambiental en la Zona de Influencia de la Central Termoeléctrica Plutarco Elías Calles*. En el año 2003 se llevó a cabo el *Estudio de Evaluación de los Impactos Ambientales por Difusión Térmica en la Bahía de Petacalco*, realizado por el Departamento de Hidrobiología de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1. Estudios previos de la batimetría en la Bahía de Petacalco

En 1926 se llevó a cabo un levantamiento hidrográfico de la zona costera en los límites de los estados de Guerrero y Michoacán, incluyendo la parte frente a la desembocadura del Río Balsas, este estudio es el más antiguo del que se tiene conocimiento en el área y dio pie a la posible idea de establecer, posteriormente, un puerto en la región del Balsas. El estudio fue levantado únicamente con fines de navegación y el departamento a cargo del proyecto fue la oficina hidrográfica de Estados Unidos. [15].

Tiempo después, con el objetivo de verificar la existencia de una fosa submarina que aparecía en el levantamiento efectuado en 1926, en 1938 el Ing. Tomás Marín, teniendo como base la batimetría de la zona y los fenómenos observados, diseñó y localizó la ubicación de un muelle en “T”, en la bahía de Petacalco, para las maniobras de alijo que se venían llevando a cabo por medio de canoas. Desde el primer levantamiento efectuado en la zona, y con la finalidad de localizar un puerto se efectuaron diversas campañas para efectuar mediciones en 1951, 1954 y 1959.

En el año 1954 la Secretaría de Marina inició estudios frente al estero del Pichi (Figura 1) en Michoacán, que consistieron en el levantamiento topo-hidrográfico de la zona, analizando el oleaje para proponer el diseño de las obras exteriores e interiores del futuro puerto.

Durante el gobierno del General Lázaro Cárdenas, se promovió el aprovechamiento de los yacimientos ferríferos de “Las Truchas” [7] y los de carbón en Coahuila, para ello se planteó la posibilidad de construir una siderúrgica, en Guanajuato, Querétaro o Michoacán; sin embargo, tras estallar la Segunda Guerra Mundial, el proyecto del Presidente Lázaro Cárdenas, queda inconcluso, debido a que los proveedores de los insumos necesarios eran europeos. Un año después la Secretaria de Marina complementó los estudios realizados en

1951 y 1954 definiendo la localización aproximada del puerto que coadyuvaría al desarrollo de la zona económica del bajo Río Balsas y lugares circundantes. [6].

Estos estudios abarcaron una amplia zona comprendida entre la desembocadura del Río Acalpican hasta la ensenada de Petacalco, quedando incluido el estero de Pichi, la conclusión de este estudio dió como resultado que era precisamente la zona de Michoacán la que reunía las mejores condiciones físicas para la instalación del puerto; sin embargo, no se contaron con suficientes datos para su proyecto definitivo, por lo que hubo necesidad de llevar a cabo una serie de campañas a lo largo de varios años con el objetivo de localizar el sitio más propicio para el puerto y determinar las necesidades de las obras a realizar.

En 1960 se llevó a cabo un estudio desde el Río Acalpican hasta la fosa marina de Petacalco, efectuándose sondeos frente a El Pichi y en la mencionada fosa. Al año siguiente la empresa alemana Krupp, entregó el proyecto de la siderúrgica solicitados por la Comisión del Tepalcatepec, la cual era presidida por el Gral. Cárdenas y un año más tarde la Comisión del Río Balsas acepta el proyecto, dictándose el decreto que autorizaría la construcción del complejo siderúrgico durante el sexenio de Gustavo Díaz Ordaz. Se integró una Comisión Intersecretarial con el objetivo de realizar los estudios y la organización de dicha empresa, ese mismo año se realizaron estudios marítimos y terrestres en la Bahía de Petacalco, con el objetivo de determinar las condiciones para el establecimiento de un puerto en dicho sitio, habiéndose sondeado desde la Barra de San Francisco (o del Naranjito), hasta Las Peñitas (Figura 1). [15].

En el año de 1963 se hicieron estudios topográficos en la zona del río con el fin de localizar el canal y estudiar en el terreno la viabilidad de la construcción del puerto, sin embargo finalmente se decidió establecer el puerto justamente en el delta del Balsas. A finales de los sesenta se concluyeron los estudios para la construcción del puerto y se inicia el dragado del canal de acceso. [15].

## **2. OBJETIVOS**

### 2.1. Objetivo general

Elaborar una cartografía batimétrica de la Bahía de Petacalco localizando con precisión el Cañón ubicado en la Bahía.

### 2.2. Objetivos particulares

- Elaborar una batimetría de la Bahía de Petacalco en alta resolución para modelar los accidentes de la Bahía.
- Elaborar distintos productos cartográficos que sirvan de base a los especialistas para modelar la circulación de la Bahía.
- Elaborar la cartografía que describa la morfología del Cañón de Petacalco.
- Identificar el eje del Cañón de Petacalco, así como la evolución de la profundidad a lo largo del cañón en la zona cercana a la costa.

### **3. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN**

En diversas ocasiones no es posible obtener información continua y únicamente se puede obtener de manera discreta, dicho problema ha guiado al desarrollo de metodologías para moldear y representar en forma continua casi partiendo solamente de los puntos muestreados, con el propósito de construir una representación lo más semejante posible a una realidad.

Dentro del ámbito de la Geomática el objetivo de los modelos es realizar una representación casi continua de alguna variable dentro de un área geográfica, la cual es generalmente, un archivo raster. El raster es una representación de la realidad en la que solamente se ocupan algunas de las propiedades.

Se puede decir que la latitud y la longitud o X, Y, nos ubican en el espacio y Z puede ser cualquier variable a representar dentro de ese espacio.

Hay que tener en cuenta que esa representación o modelo solo muestra, a través de alguna metodología, ciertas propiedades de un sistema real, minimizando, en muchos casos, la complejidad de esa realidad. Debido a esto, debemos ser conscientes de que al querer representar algo con una cierta cantidad de datos, el resultado tiene asociado un error inherente en los procesos de modelaje, que lógicamente se trata de minimizar.

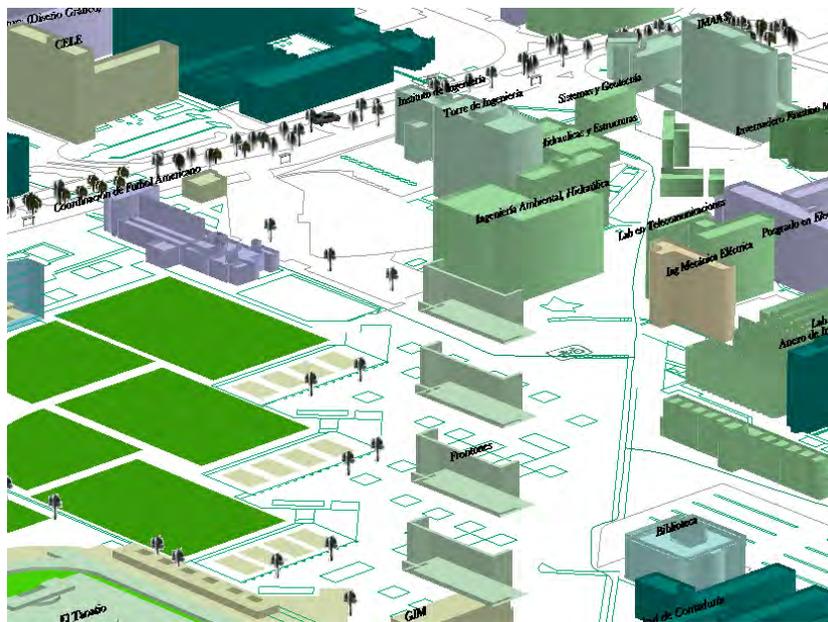
Los modelos sirven para responder a cuestiones sobre algún comportamiento que, en la actualidad y de manera directa, no se puede todavía o no existe la manera de acceder.

Para que el modelo sea funcional y tenga una buena representación, es necesario considerar varios factores relevantes a la problemática y a las relaciones que pudieran existir. Se puede mencionar que el conocimiento de las variables es esencial para generar un buen modelo, en caso de no haberlo, se recurre entonces a la experimentación y comprobación. Entre mayor sea la cantidad de datos y de relaciones que se puedan incluir, harán un modelo más complejo de tratar, pero más cercano a la realidad.

Cuando la variable  $z$  que se busca representar es la topografía, se habla de los modelos digitales de terreno o elevación.

### 3.1. ¿Qué es un Modelo Digital de Elevación?

De manera general, se puede decir que un modelo digital de elevación, representa a una variable  $Z$  que no es necesariamente la superficie del terreno, pudiendo ser, por ejemplo, las construcciones en una ciudad, algún contaminante dentro de un lago, determinado gas en la atmósfera, etc.



**Figura 3.1.** Modelo digital con elevación de construcciones.

Cuando la variable representada, es la topografía o la superficie del terreno, se está refiriendo a los “Modelos Digitales de Terreno” o MDT, similar a los modelos batimétricos, los cuales hacen referencia a la superficie subacuática.

La batimetría se refiere a la configuración del suelo marino o a un mapa en donde esté delineado el perfil del fondo de un cuerpo de agua, por medio de contornos de igual profundidad (isóbatas). [13].

Los levantamientos batimétricos se clasifican en básicos, de revisión, especiales o de reconocimiento. [25].

Los levantamientos hidrográficos se llevan a cabo para generar la configuración del fondo marino, de ríos, lagos y bahías, los cuales proporcionan información necesaria para llevar a cabo la navegación y diversos estudios.

El levantamiento realizado para este trabajo, cae dentro de la clasificación de especiales o de reconocimiento, ya que se refieren a levantamientos de áreas pequeñas para ratificar la existencia en este caso del Cañón de Petacalco y complementar información de levantamientos anteriores.

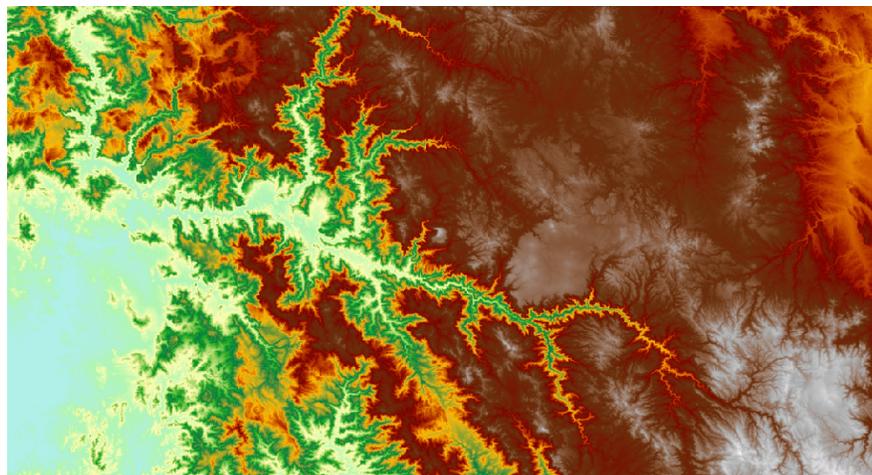
El término “Modelo Digital del Terreno” (MDT) fue acuñado por Miller y La Flamme [14], ingenieros del Instituto Tecnológico de Massachusetts, a finales de los años 50. [16]. Según estos investigadores un modelo digital del terreno es una representación estadística de una superficie continua del terreno mediante un conjunto finito de puntos cuyos valores en X, Y y Z son conocidos y están definidos en un sistema de coordenadas arbitrario. [2].

Cuando se menciona “Modelo Digital de Elevación”, la palabra elevación, enfatiza en el concepto de medición de altura con respecto a un datum y la generación por parte del modelo a partir de valores absolutos de altura. Este término se utiliza con frecuencia para describir valores de elevación obtenidos por métodos fotogramétricos o cartográficos.

En este trabajo se deja a un lado la discusión que pudiera haber entre modelos digitales de elevación y los modelos digitales del terreno, se tomarán de manera similar, y se hará hincapié simplemente en la variable que se representa.

Inclusive, para ver como se manejan estos conceptos, podemos mencionar que el INEGI [23] llamó a su modelo digital de terreno, “Continuo de Elevaciones Mexicano” (CEM). Entonces, en este trabajo, un modelo digital de terreno es la superficie de la tierra omitiendo cuestiones antropogénicas y las masas de vegetación que existen sobre ella, en

este sentido, es aquella superficie donde se presentarían las escorrentías en la superficie de la tierra, lo cual nos lleva a la topografía del lugar.



**Figura 3.2.** Ejemplo de un modelo digital de terreno con datos satelitales de SRTM.

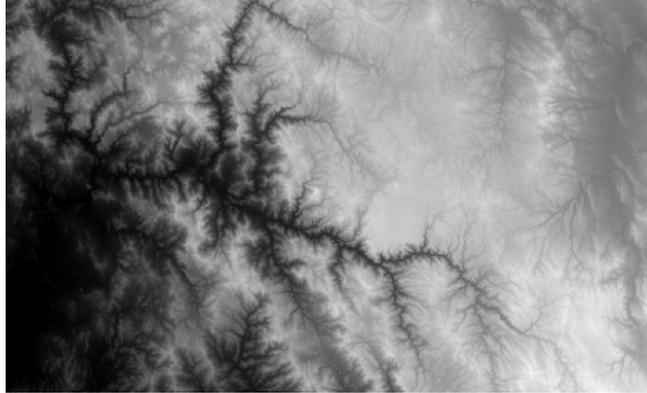
Actualmente muchos usuarios desconocen como se generan algunos MDT o MDE, lo cual es importante al hacer uso de la información, ya que esto determina exactamente qué superficie se está representando, y por lógica se sabe, si es conveniente utilizarla o no.

En este trabajo se adopta el término “Modelo Digital de Elevación”, debido a que la variable a representar es el fondo marino (propriadamente seria un modelo digital de profundidad, MDP) de la bahía de Petacalco, es decir, la batimetría del lugar.

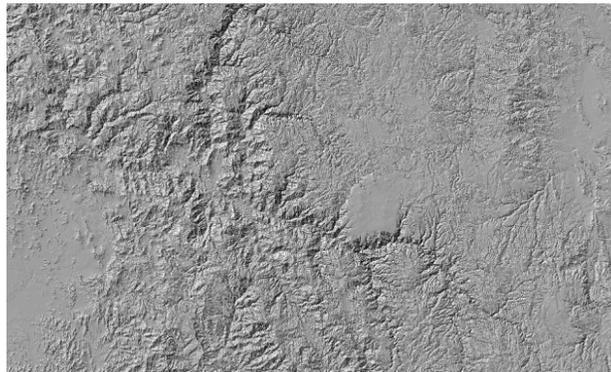
### 3.2. Distintas formas de representación cartográfica, usos y aplicaciones

Otra discusión sobre los MDT o MDE se presenta en la información contenida en ellos, ya que algunas personas ven a los modelos como la representación cartográfica final que pudieran adoptar y no como el archivo digital fuente que permite realizar tales representaciones. Un ejemplo claro son los relieves sombreados que simplemente son un producto derivado de un MDT o MDE y su representación genera una visión más clara sobre la topografía o relieve del lugar.

Entonces, se está hablando de dos cosas distintas, la primera se refiere al modelo, y la segunda, a las representaciones cartográficas finales que se pueden adoptar dependiendo de la finalidad.



**Figura 3.3.** Representación del relieve en escala de grises.



**Figura 3.4.** Relieve sombreado basado en los datos representados en la figura anterior.

La función del relieve sombreado en los Sistemas de Información Geográfica, también llamada “Hillshade”, obtiene la iluminación hipotética de una superficie mediante los valores de elevación de cada celda. Al definir una posición de iluminación determinada (tanto en posición horizontal como vertical), se obtiene un raster de salida que permite mejorar la calidad visual de la representación cartográfica. Sobre todo, al utilizar las transparencias de capas [9].

Generalmente para tener una representación correcta de la topografía, los parámetros manejados comúnmente son: azimut de  $315^\circ$  y una elevación de  $45^\circ$ . El cambiar estos parámetros genera una perspectiva distinta del relieve y resulta ser la fuente para otros procesos.

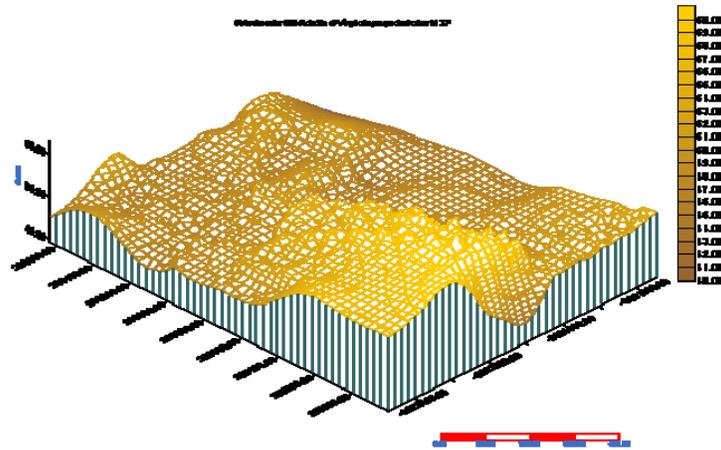
Cabe mencionar que las representaciones espaciales y el manejo de la información dentro de la geomática, más específicamente, en el área de los sistemas de información geográfica, nos lleva a hablar sobre las estructuras raster como datos espaciales.

Una forma de representar los rasgos geográficos, es usar el formato raster. Este formato, representa siempre un área rectangular, la cual esta subdividida por cuadrados, denominados pixeles o celdas, las celdas están alineadas de manera horizontal y vertical, y cada celda tiene una posición dentro del área rectangular, la cual está dada por la intersección de la columna y el renglón correspondientes. Cada celda, almacena un solo valor numérico, el cual representa a toda su área.

Dicho formato permite generalizar zonas (de acuerdo al tamaño de la celda), para hacer clasificaciones y algunos análisis de una forma más sencilla. Los datos raster pueden ser utilizados como base o fondo de un mapa, o como una fuente de origen de datos de la cual se puede derivar otra información.

Un modelo raster sirve para modelar realidades continuas de nuestro mundo. Los modelos digitales de elevación, están en los arreglos de celdas mencionados en los párrafos anteriores, sus pixeles tienen asociada en el centro, su ubicación geográfica y el valor de la celda representa la elevación, o en este caso la profundidad de la superficie.

Dentro de las representaciones espaciales, se pueden mencionar las salidas simples, como una malla o cuadrícula, como las que arroja el programa Surfer en una de sus opciones.

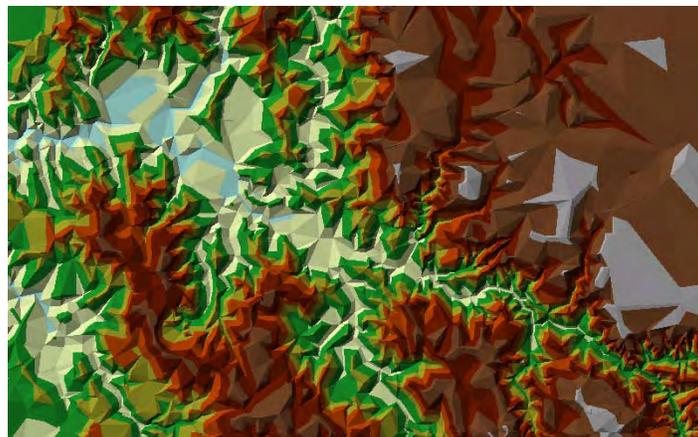


**Figura 3.5.** Malla generada con Surfer.

Donde se puede observar la información en 3D y girar los ángulos de visualización. Esta forma de visualizar la información es clásica.

Actualmente, con el empleo de nuevos programas de cómputo se generan formas más complejas, e inclusive se puede decir que más realistas.

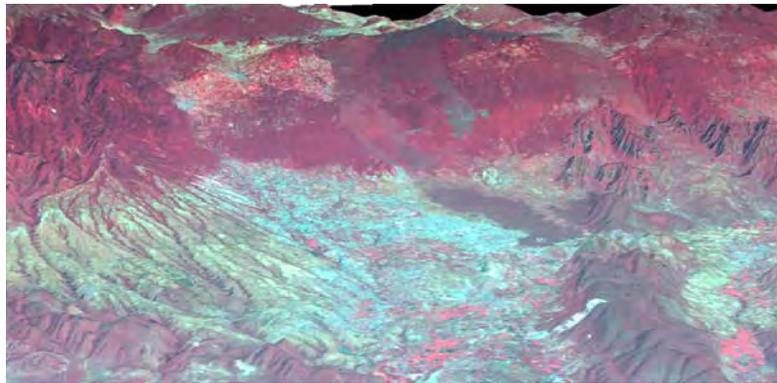
La representación TIN, (Red irregular de triángulos), por sus siglas en inglés, es otra forma de ver un modelo digital de elevación. Este formato no es propiamente información raster o vector, sino más bien es un híbrido, donde está contenida la información de ambas.



**Figura 3.6.** Representación de un TIN.

Los modelos TIN son ideales para generar representaciones muy buenas de la superficie del terreno, tienen la desventaja de ser información que requiere una capacidad importante de recursos de la computadora para lograr un buen manejo y despliegue. Este modelo es propiamente también un tipo de interpolación.

Otra forma de ver el modelo, es con información adicional sobre él, dependiendo de la variable que se maneje. Por ejemplo, a un MDT se le puede sobreponer una imagen de satélite, una ortofoto, algún mapa de vegetación o de rocas. Normalmente puede ser cuando el modelo en sí, es un insumo para otro análisis.



**Figura 3.7.** Imagen SPOT sobre un modelo digital de terreno, logrado gracias a la georreferencia de los datos.

Los modelos también se pueden visualizar a través de lentes que permiten hacer, estereoscopia, cuya forma más común es utilizando el sistema de lentes anáglifos.

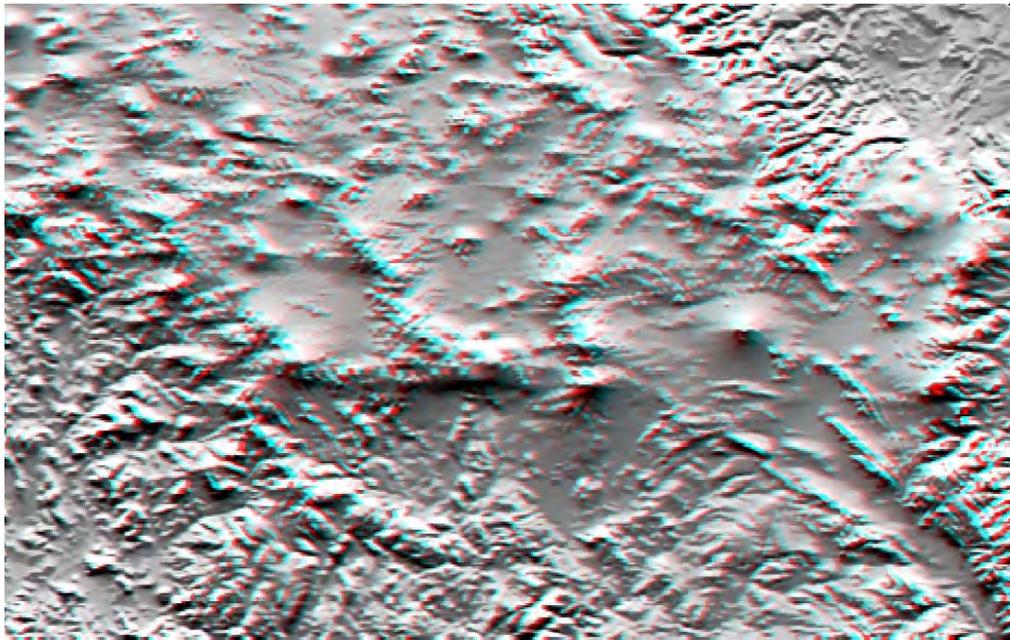
La estereoscopia es la técnica que se utiliza para crear una ilusión de profundidad sobre imágenes.

Las imágenes que forman un par estereográfico son sobrepuestas previamente, y coloreadas utilizando tonos complementarios (rojo - azul, rojo - verde, ámbar - azul). El observador debe utilizar unas gafas con los filtros de color correspondientes. El resultado puede ser una imagen en color o en tonos de escala de gris.



**Figura 3.8.** Anaglifos.

Cuando se observa través de los lentes, el cerebro fusiona las imágenes dando un efecto de profundidad.



**Figura 3.9.** Modelo digital de elevación para mirar con anaglifos.

En la actualidad, diversos programas informáticos permiten generar estas representaciones. Otra manera de hacer estereoscopía es con unos lentes especiales por medio de la polarización, donde las dos imágenes son proyectadas mediante dispositivos dotados de filtros polarizadores, girados  $90^\circ$  uno respecto del otro. En este caso una pantalla conserva la polarización de la luz reflejada y el observador debe utilizar gafas con lentes polarizados de forma congruente con los proyectores.

## Aplicaciones

Hasta el momento solo se ha descrito la manera de representar un modelo, pero, ¿como se determina o se llega a tal modelo? Esta es la parte principal y más importante del proceso.

Dependiendo de la metodología ocupada, será qué tanto se acerca el modelo a la realidad, teniendo en cuenta la validez de uso y la temporalidad de la información. Hablar de metodologías para determinar el modelo nos lleva al principio de este capítulo, donde se mencionó que se parte de información puntual para producir información continua. Esto se logra mediante interpolación.

El tema de interpolación se vuelve muy importante en nuestros días ya que el generar valores en donde no se tienen observaciones resulta de gran ayuda y facilita el estudio de alguna región. Con esto se pueden comprender, entender, analizar, manejar y representar ciertos fenómenos.

El problema de analizar y procesar la información no radica en los métodos que se puedan ocupar para interpolar, sino en encontrar el método que dé los mejores resultados dependiendo el uso y la variable a modelar. Cabe mencionar que el problema de saber qué método ocupar ha sido obviado por muchas personas que manejan este tipo de información, esto tiene que ver con la facilidad y acceso a los nuevos paquetes de cómputo que ha provocado que no se dé la importancia debida al manejo y trato de la información. Por eso en este trabajo se realiza un análisis riguroso de los datos manejados y se muestran los resultados obtenidos con diversos métodos de interpolación.

Con base en ciertos criterios como estadísticos y personales (según experiencia de la persona que realiza la interpolación), se podrá decidir cuál método arroja un mejor modelo.

A continuación se mencionan algunos métodos con el fin de ejemplificar sus usos y aplicaciones más comunes.

## Métodos de Interpolación

Los métodos de interpolación producen funciones continuas, en el rango de los datos (o bien entre los valores) conocidos, que se aproximan lo más posible a los datos. De los métodos más comunes para interpolar se tienen: Spline, Distancia inversa ponderada (IDW), Vecinos Naturales, Trend, TIN, Kriging y TopoGrid.

### Spline

Este método de interpolación de uso genérico ajusta una superficie de curvatura mínima a través de los puntos ingresados. Es apropiado para superficies que varían en forma gradual tales como la topografía si no es muy abrupta, la precipitación, temperatura, concentraciones de contaminantes y profundidad. Sin embargo puede no ser útil cuando existe una gran cantidad de variaciones en una distancia horizontal relativamente pequeña.

La figura 3.10 muestra ejemplos de como los splines en una dimensión se ajustan a los puntos, sin crear cambios abruptos de pendientes. Esta es la principal característica de los splines.



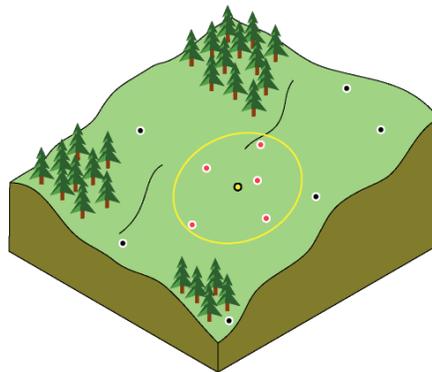
**Figura 3.10.** Interpolación con Spline.

### IDW

Este método de interpolación asume que cada punto posee una influencia local que disminuye en función de la distancia. De esta manera, el método pondera con mayor fuerza a los puntos cercanos a la celda procesada y con menor intensidad sobre aquellos ubicados a mayor distancia.

Este método es apropiado cuando la influencia de variable analizada disminuye conforme aumenta la distancia desde cada punto analizado. Por ejemplo, cuando se intenta interpolar una superficie que representa el potencial de compra de los consumidores respecto de una tienda, mientras más lejos se encuentren los consumidores de la tienda, menor será la influencia ejercida por las entidades para atraer a los potenciales clientes y viceversa [9].

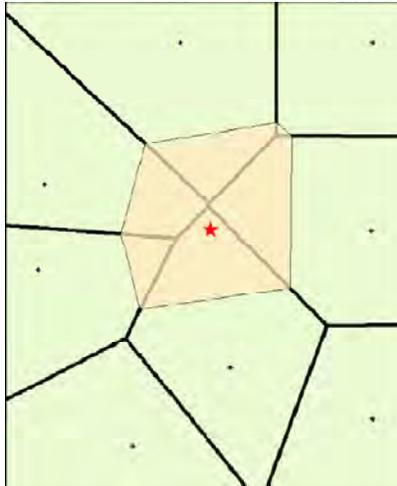
Otros casos válidos para este método serán, la reducción en la intensidad de un terremoto a partir de su epicentro o la reducción en la temperatura del aire a partir de puntos focales de incendios



**Figura 3.11.** Interpolación con el método de distancias inversas.

### Vecinos Naturales

Al igual que IDW, este tipo de interpolación utiliza un método de ponderación promediada. Sin embargo, en vez de generar un valor de interpolación basado en el promedio ponderado de sus distancias, la interpolación de este tipo (“cercanía” o “proximidad natural”) genera una *triangulación de Delauney*, a partir de las ubicaciones medidas y selecciona los nodos más cercanos para crear polígonos o escudos convexos alrededor de las ubicaciones que los conforman. Luego, pondera sus valores en base a un área proporcionada. [9].

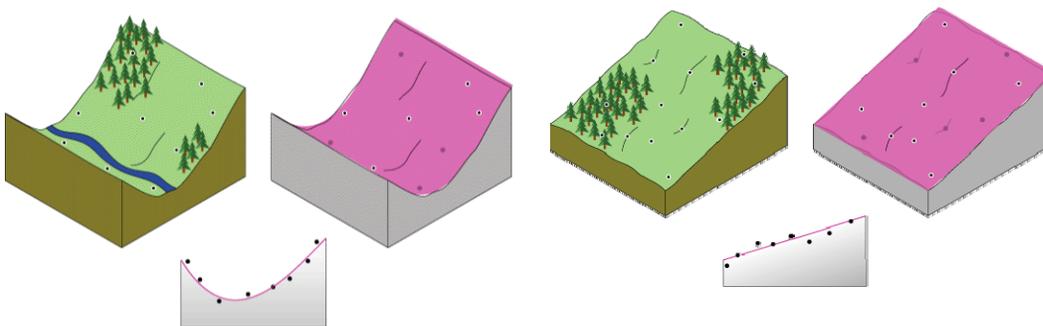


**Figura 3.12.** Interpolación por cercanía.

## TREND

Este método de interpolación ajusta una función matemática (Polinomial de un orden especificado por el usuario) a todos los puntos ingresados. Trend utiliza un ajuste de regresión por mínimos cuadrados que da como resultado un raster que minimiza la varianza de la superficie en relación a los puntos ingresados.

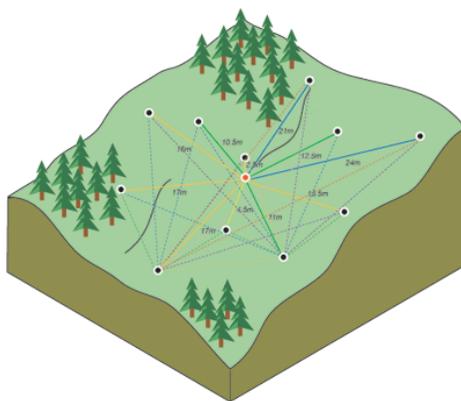
Esta superficie está construida de manera tal que para cada ubicación de la interpolación, el total de las diferencias entre los valores actuales y los valores estimados (la varianza) será siempre lo más pequeño posible. De esta manera el resultado final será un raster que contiene la tendencia generalizada de los valores contenidos en los puntos ingresados [9].



**Figura 3.13.** Interpolación de puntos con el método TREND.

## Kriging

Kriging pertenece al grupo de interpolación basado en modelos estadísticos que incluyen por ejemplo la autocorrelación (relación estadística entre los valores medidos). Debido a esto, no solo estas técnicas poseen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que además, proveen algunas herramientas para medir la certeza o precisión de estas predicciones [9].



**Figura 3.14.** Interpolación con Kriging

## TopoGrid

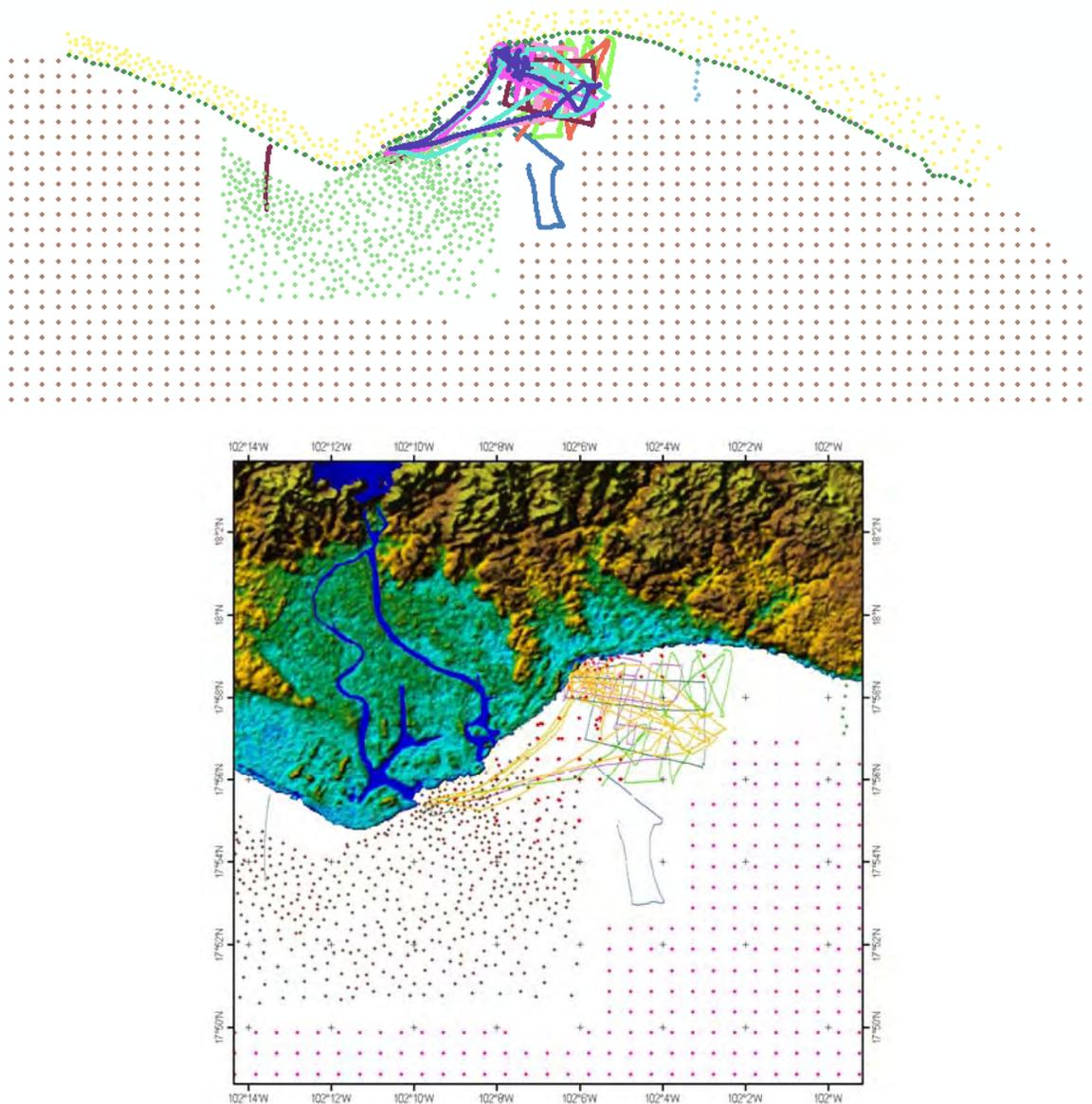
Es un método de interpolación basado en ANUDEM [27] (Australian National University DEM) de Hutchinson (1988, 1989), éste método fue diseñado para crear modelos digitales de terreno para modelar correctamente las características hidrológicas. [21].

En resumen, los usos de los modelos digitales son muy variados, entre los que podemos mencionar:

- Estimaciones de volúmenes a remover o rellenar en trabajos de ingeniería
- Cartografía topográfica
- Mapeo y estudios batimétricos e hidrológicos
- Mapeo geológico y geofísico
- Simulación y análisis del paisaje
- Estimación de áreas a inundar en proyectos hidroeléctricos
- Estudios de intervisibilidad para definir ubicación de antenas para telecomunicaciones
- Análisis estadístico del terreno
- Agrícola
- Ambiental
- Etc.

#### 4. DATOS

Los conjuntos de datos que se usan en este trabajo para construir la carta batimétrica se integraron en el mapa de la figura 4.0. La descripción detallada de la obtención y filtrado de los datos se analiza en la continuación de este capítulo.



**Figura 4.0.** Arriba, distribución total de los datos en el área de estudio. Abajo, mapa con la distribución de los datos con un acercamiento a la zona donde se encuentran los cañones de Petacalco, de la Necesidad y el de Gasolinos. Los colores indican diferentes fuentes de datos o fechas de muestreo.

#### 4.1. La Carta batimétrica general del océano

La Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO) [22], es un proyecto que da continuidad al establecido por el Príncipe Alberto I de Mónaco en 1903, cuyo principal objetivo fue la elaboración de la serie de 24 cartas batimétricas escala 1:10 000 000, con cubrimiento del océano mundial. Para la realización del proyecto se creó un Comité Rector auspiciado por dos organizaciones internacionales: la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) y la Organización Hidrográfica Internacional (OHI), [12].

El Comité Rector COI/OHI está integrado por 10 miembros permanentes, cinco nominados por la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) y cinco por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI).

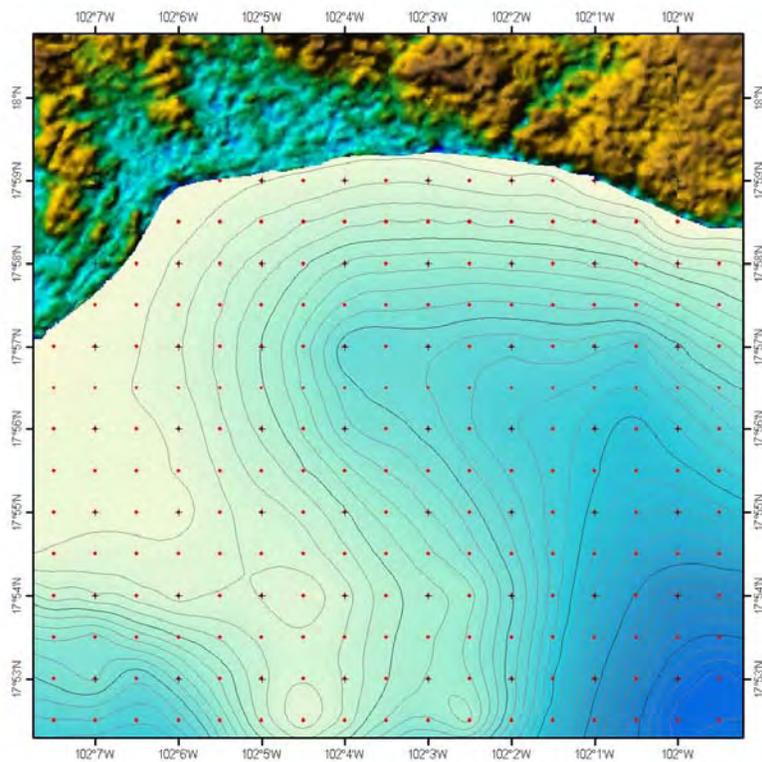
Los datos de GEBCO utilizados en este trabajo, pertenecen a la versión *GEBCO\_08 Grid*, el cual es un modelo de terreno para Tierra y Océano con una resolución espacial de 30" de arco, donde la parte batimétrica de la malla fue generada en gran medida con la combinación de sondeos de buque con calidad controlada y datos derivados de gravedad satelital.

La malla fue desarrollada inicialmente como un esfuerzo de colaboración por las siguientes organizaciones:

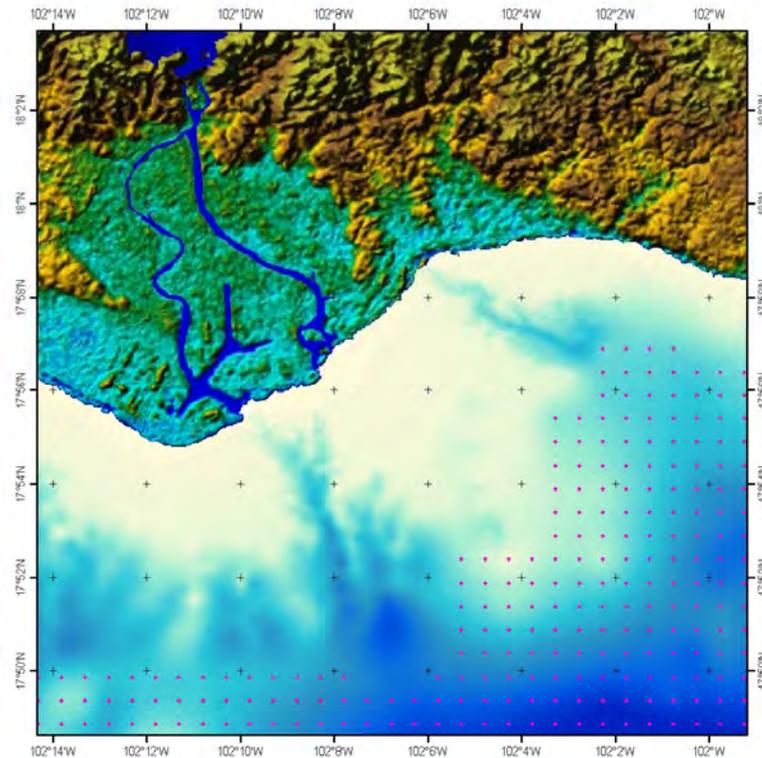
- La Carta Batimétrica General del Océano (*GEBCO*)
- Oficina Hidrográfica Internacional (*IHB*)
- Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (*NGA*)
- La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*NOAA*)
- Oficina de Oceanografía Naval (*NAVO*)
- Institución Scripps de Oceanografía (*SIO*)
- Consejo de Investigación Natural Ambiental (*NERC*)

Los datos para el área de Tierra, son derivados de la versión 2.0 del modelo digital de elevación de la Misión Topográfica de Radar (*SRTM30*) del Servicio Geológico de Estados Unidos (*USGS*).

Los datos que distribuye GEBCO a través de su sitio de internet [22], se descargan para el área de estudio, se procesan y generan sus isobatas (Figura 4.1.a). En los datos de GEBCO observa el Cañón de Petacalco, aunque se encuentra algo suavizado, debido a la resolución de los datos (30" de arco). También se observa un área somera en el lado oeste del Cañón de Petacalco, plataforma que se aleja de la costa aproximadamente 11 kilómetros.



**Figura 4.1a.** Modelo batimétrico creado a partir de datos de GEBCO con isobatas cada 20 metros. La malla de puntos rojos son los datos originales de GEBCO y el modelo de elevación en tierra es un producto con base en datos ASTER con resolución de 30 m.



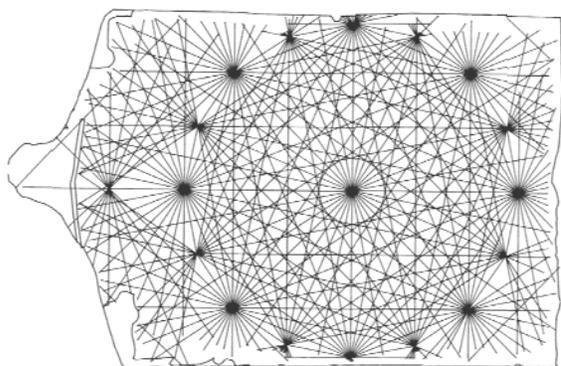
**Figura 4.1b.** Mapa que representa los 997 puntos extraídos de la malla del GEBCO con una resolución espacial de 30" de arco.

#### 4.2. Portulano del Puerto de Lázaro Cárdenas

Se entiende por “portulano” a todas las cartas náuticas cuyo auge se dio entre los siglos XIII al XVII, en un principio este término fue solo usado para designar a las libretas en donde los navegantes anotaban todos aquellos datos trascendentales en sus recorridos, tales como rumbos y distancias entre los diferentes puertos. [24].

Gracias a la utilización de la brújula, instrumento común en la navegación desde finales del siglo XII y a la utilización del astrolabio, las cartas náuticas se hicieron precisas y alcanzaron su perfección en los portulanos realizados a partir del siglo XVI. Estas cartas náuticas se elaboraban sobre pergamino, en donde la parte que correspondía al cuello del animal se colocaba en la parte izquierda.

Una de las principales características de los portulanos era la red de líneas que los cruzan en todas las direcciones y que forman una especie de tela de araña, llamadas "líneas de rumbos". [28].



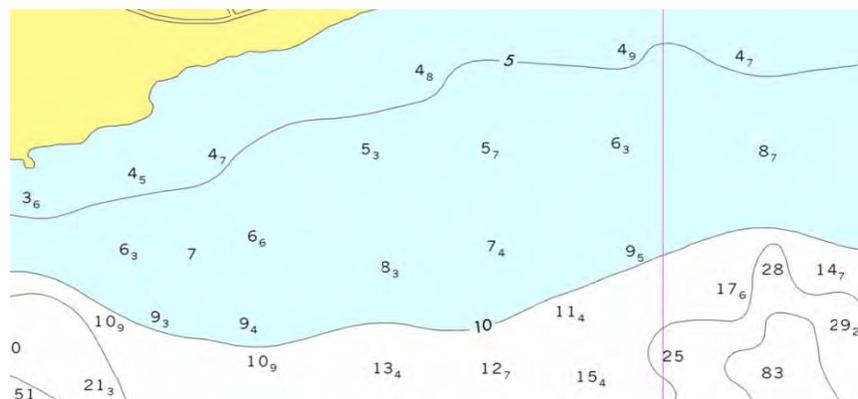
**Figura 4.2.** Esquema de rumbos



**Figura 4.3.** Portulano de Ben Zara, 1472

A partir de los levantamientos hidrográficos efectuados hasta el año 2003 por la Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología, de la Dirección General de Investigación y Desarrollo Costa Oeste, se logró elaborar la carta S.M. 513.2, Carta Náutica del Puerto Lázaro Cárdenas. Secretaría de Marina (Figura 4.4), donde los puntos sondeados fueron reportados.

En esta carta, los sondeos menores de 30 metros, se especifican en metros y decímetros, los mayores a 30 m solo en metros. Se encuentran en Proyección Mercator con Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS 84) y reducidos al nivel de Bajamar Media Inferior.

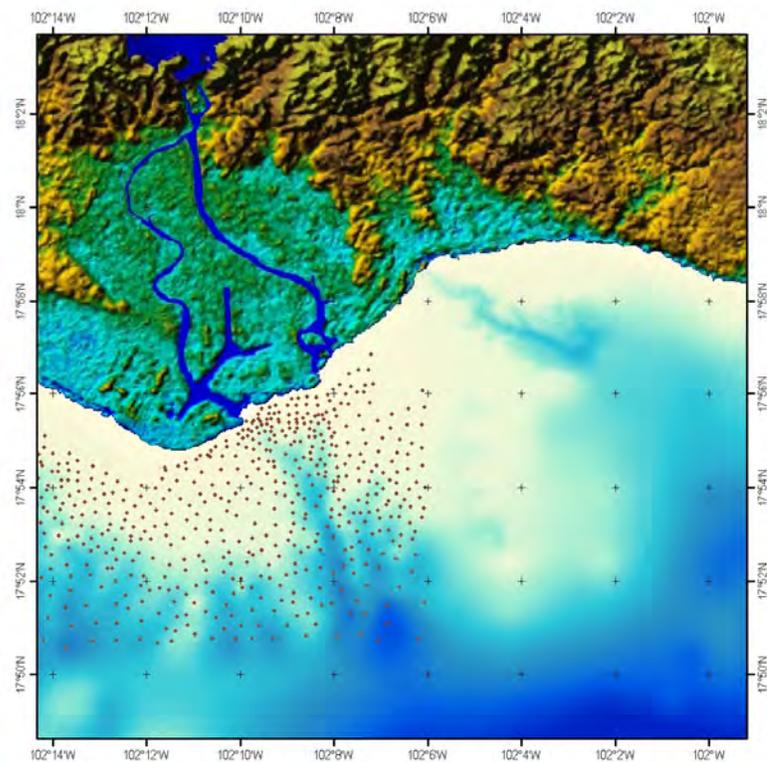


**Figura 4.4.** Acercamiento a un área de la Carta Náutica S.M. 513.2.

Esta carta se digitalizó punto a punto para poder manejar todos los datos en formato vectorial con tema de puntos dentro del Sistema de Información Geográfica (SIG).

El total de puntos digitalizados en el SIG fueron 560, los cuales se manejaron en coordenadas geográficas para el despliegue en los posteriores mapas.

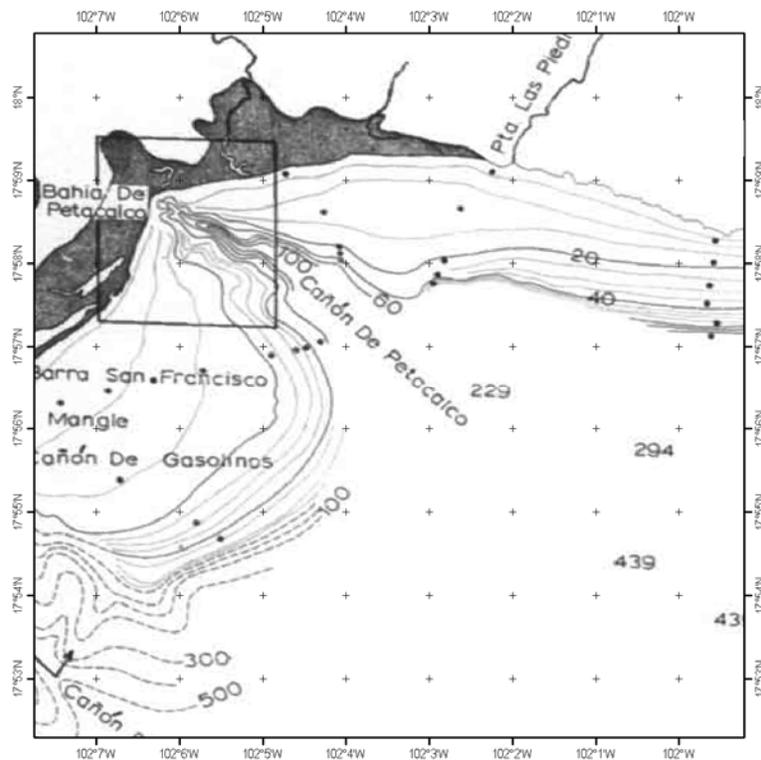
La figura 4.5 muestra la distribución de los puntos de la Carta del Puerto Lázaro Cárdenas. Esta carta representa una zona muy bien estudiada por la Secretaría de Marina, con buena distribución y densidad de puntos, con los cuales se localiza bien al Cañón de Gasolinos y al Cañón de la Necesidad, pero no incluye el área del Cañón de Petacalco.



**Figura 4.5.** Distribución de puntos obtenidos en levantamientos realizados por la Secretaría de Marina.

### 4.3. Datos obtenidos en estudios anteriores

A continuación se muestra un mapa, realizado en base a mediciones hechas en varias campañas a finales de los años sesenta [18] y encuadro el área donde se desea más resolución en los datos, del cual se tomaron los puntos que se encuentran al este, debido a que no existe información en esa zona de fuentes recientes. Esto permite que al realizar la interpolación, la plataforma mantenga su forma a lo largo de la costa en esas longitudes.



**Figura 4.6.** Mapa del Cañón de Petacalco sacado de Reimnitz y Gutierrez-Estrada (1970).

#### 4.4. Mediciones directas

Se llevó a cabo un levantamiento hidrográfico en el área de estudio, con el propósito de tener una información más detallada para modelar el Cañón de Petacalco.

Los sondeos realizados fueron perpendiculares a la costa a lo largo del Cañón y perpendiculares al eje del Cañón. Debido a las características del Cañón, se requirió densificar el muestreo, por lo que se hicieron más transectos en las zonas donde se identificaron bajos y acantilados. El levantamiento se realizó a bordo de una lancha con 4 personas: motorista y auxiliar y dos personas dedicadas al levantamiento con ecosonda y GPS.

Dentro de los componentes principales de la ecosonda están: el GPS, que maneja una precisión de 15 metros y cuando tiene activado el sistema WAAS, la precisión llega a  $\pm 3\text{m}$ , el sonar, el cual tiene un rango de medición de temperaturas de  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $55^{\circ}\text{C}$  y la máxima profundidad que puede medir es de 450 metros aproximadamente, con una frecuencia de 200 kHz. El modelo de ecosonda utilizada es Garmin de la serie 440.



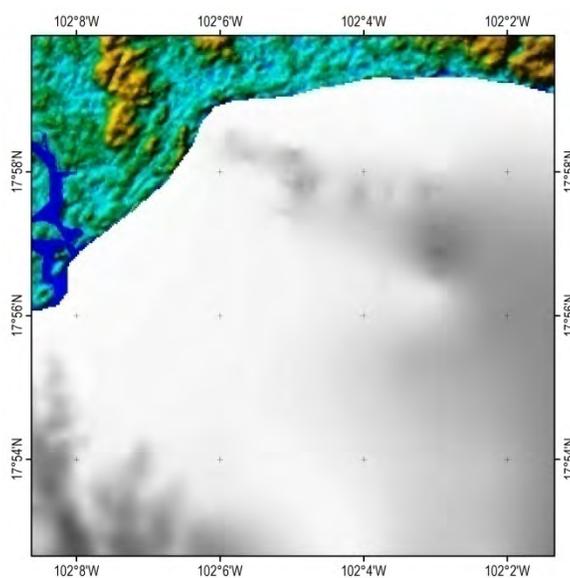
**Figura 4.7.** Brigada encargada del levantamiento batimétrico (izquierda) y fotografía (lado derecho) de la pantalla del GPS donde va guardando y graficando la ruta de sondeo.

A continuación se muestra una tabla en la cual se concentraron las campañas con ecosonda, siendo un total de 26,753 puntos recabados hasta el mes de septiembre del año 2010.

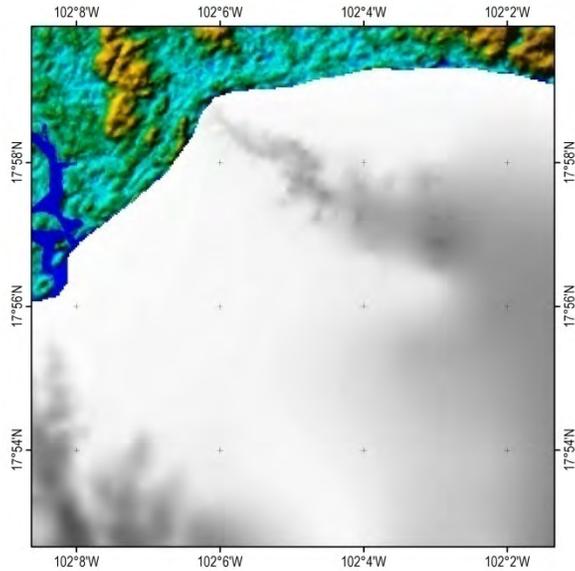
**Tabla 1.** Campañas de sondeo batimétrico y número de puntos medidos en cada una de ellas.

Fecha	Puntos medidos
Julio de 2008	3,425
Septiembre de 2008	4,284
Noviembre de 2008	1,138
Septiembre de 2009	4,843
Abril de 2010	11,576
Septiembre de 2010	1,487

Basándose en el mapa de Reimnitz publicado en 1970 [10], se decidió hacer el primer levantamiento para su localización (Figura 4.9), en la campaña posterior se realizaron transectos para detallar el cañón y realizar su respectivo modelo batimétrico (Figura 4.10). Esta información se agregó a los datos descritos en los temas 4.1, 4.2 y 4.3, referentes a datos de la SEMAR, de GEBCO y de los artículos anteriores.

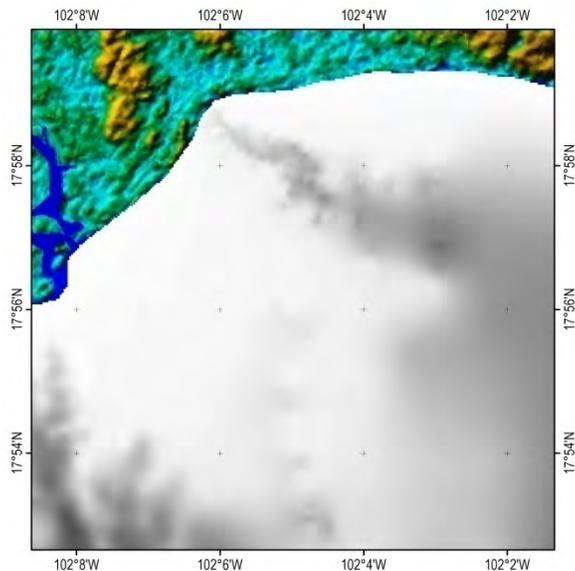


**Figura 4.9.** Modelo generado con datos obtenidos hasta julio de 2008.

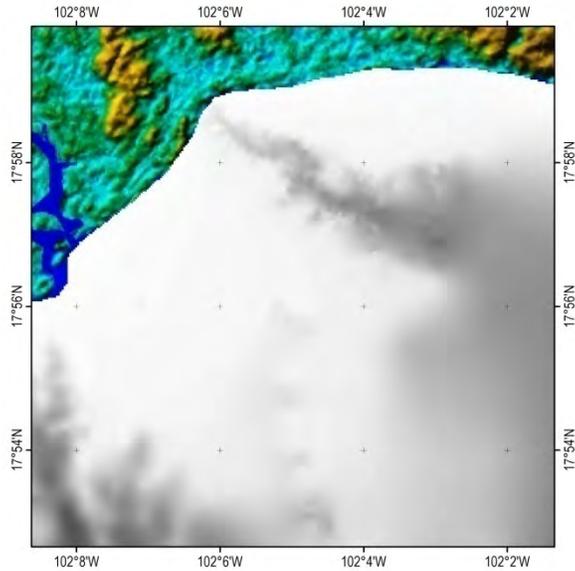


**Figura 4.10.** Modelo generado con datos obtenidos hasta el mes de septiembre de 2008.

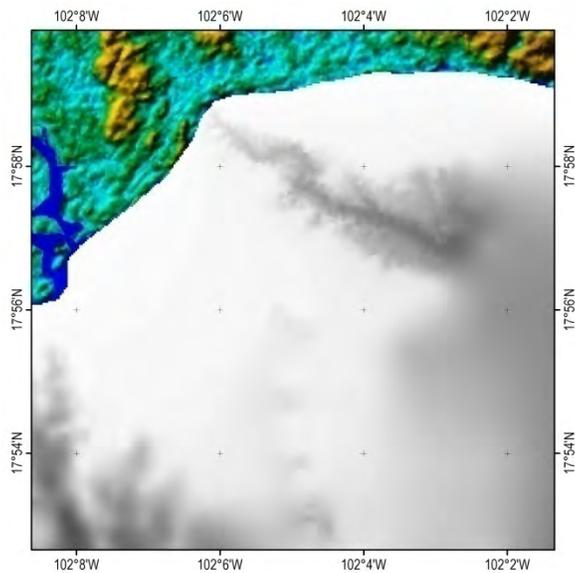
Después sacar la malla interpolada con estos datos, se analizaron las zonas donde no se había sondeado para realizar nuevos transectos para describir mejor el cañón. A partir de esta nueva información se trazó la ruta de sondeo para las próximas campañas (Figura 4.11, Figura 4.12 y Figura 4.13). En el sondeo de noviembre de 2008 se buscó confirmar un bajo y una zona en que la planicie se extienda costa afuera. En los sondeos de septiembre de 2009 se buscó identificar los límites del cañón en la zona relativamente alejada de la costa.



**Figura 4.11.** Modelo generado con datos obtenidos hasta noviembre de 2008.

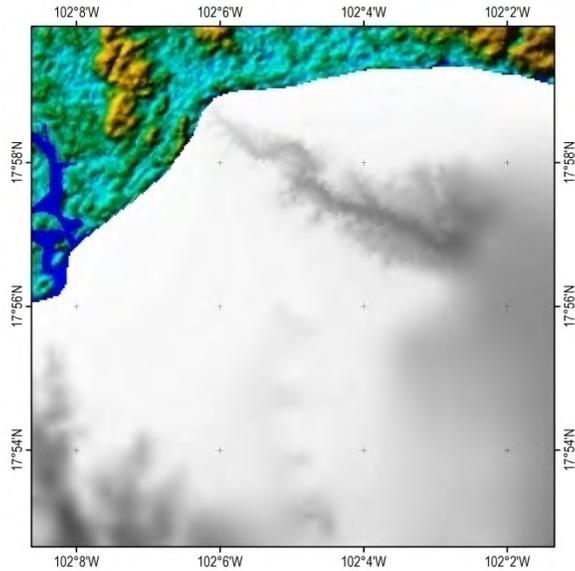


**Figura 4.12.** Modelo generado con datos obtenidos hasta septiembre de 2009.



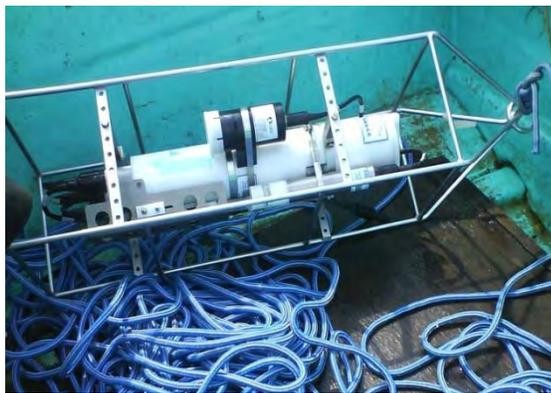
**Figura 4.13.** Modelo generado con datos obtenidos hasta abril de 2010.

En la campaña de abril de 2010 se buscó densificar la información en la zona del Cañón, con énfasis en la zona cercana a la costa. En la campaña de septiembre de 2010 (Figura 4.14) se realizó el transecto sobre el eje del cañón el cual fue identificado en los modelos generados con los datos medidos en las campañas anteriores.



**Figura 4.14.** Modelo generado con datos obtenidos hasta Septiembre de 2010.

El CTD (*Conductivity Temperature Depth*) es un aparato perfilador que mide conductividad eléctrica, temperatura y presión. El sensor de presión del CTD soporta una profundidad de 350 metros con una precisión de 0.002%. [19].

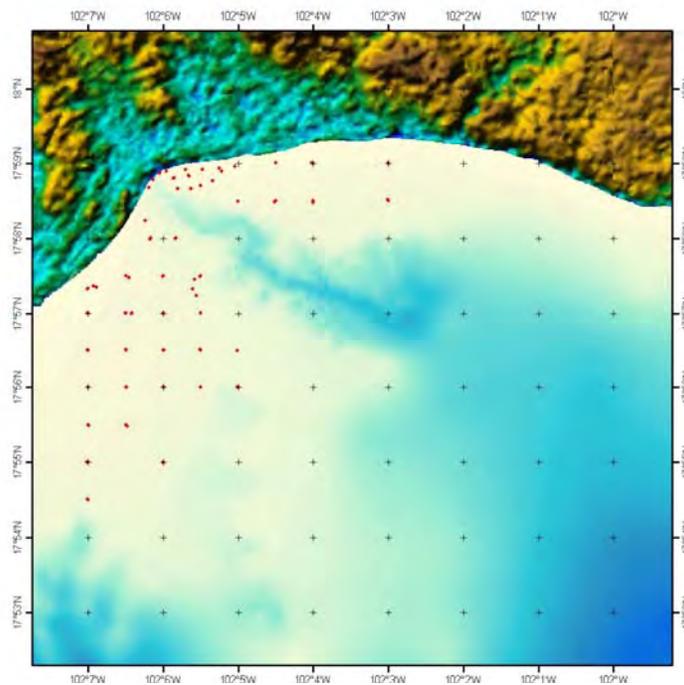


**Figura 4.15.** CTD



**Figura 4.16.** Mediciones hidrográficas con CTD.

La figura 4.17 muestra la distribución de la red de estaciones realizadas con el CTD, que fueron utilizadas para obtener datos de profundidad. Estas se encuentran en aguas someras y en ellas se bajó el instrumento hasta el fondo. El procedimiento que se sigue en los muestreos hidrográficos es el siguiente: estando situados en la coordenada correspondiente al punto que se va a medir, se baja el CTD amarrado con una cuerda, hasta que toque fondo, y luego se sube.



**Figura 4.17.** Red con 97 puntos cada uno con valor de profundidad obtenidas con CTD.

## 5. METODOLOGÍA

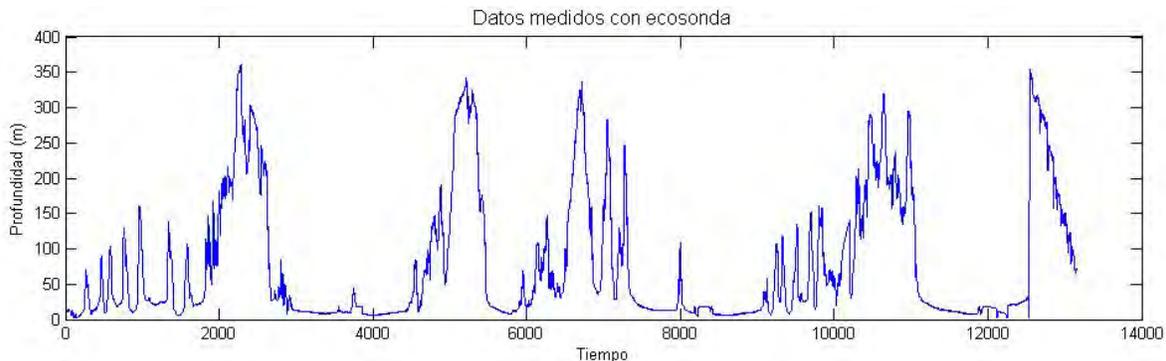
### 5.1. Exploración de los datos

#### 5.1.1. Procesamiento y representación de datos

Para realizar el modelo digital a partir de los datos de batimetría, recabados con ecosonda, CTD, cartas batimétricas elaboradas por la Secretaría de Marina y datos de GEBCO, se determinó la siguiente metodología para la organización e integración del conjunto de datos.

Para probar que la ecosonda diera mediciones correctas, se calibró y se hicieron pruebas de lecturas en la fosa de clavados de la alberca de Ciudad Universitaria, posteriormente, en cada campaña, se le dio una revisión en el Río Balsas, en donde con apoyo de las cartas de la SEMAR, se cotejaron las medidas de la ecosonda con la carta náutica.

La corrección por marea aplicada a los datos, se hace restando a la observación del nivel del mar la diferencia entre las lecturas del mareógrafo y el nivel medio del mar. La serie con las correcciones se muestra en la figura 5.



**Figura 5.** Serie de datos corregidos por marea.

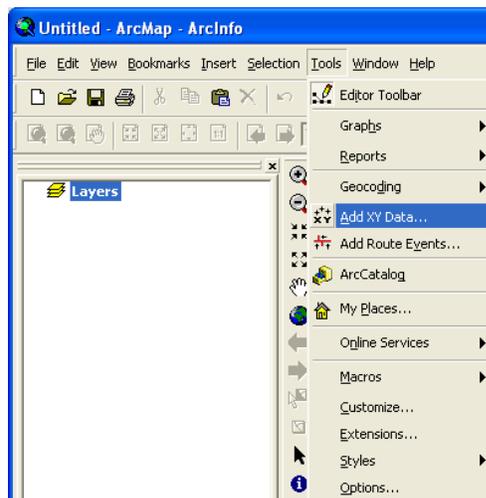
Es importante señalar que debido a que la zona de estudio tiene profundidades relativamente grandes, el rango de marea representa entre el 1 y el 0.1 % de las profundidades observadas en el Cañón de Petacalco.

En este caso no se hizo una corrección por oleaje, el cual puede ser del orden de 1 m, pero debido a que la ecosonda se programó para reportar el promedio de 10 lecturas este error es menor que el valor arriba mencionado.

Otra fuente de error es la debida a la estimación de la velocidad del sonido en el agua de mar, que depende de la salinidad, la temperatura y la presión. En este estudio la temperatura se lee del sensor de la ecosonda (aunque representa solamente la temperatura superficial).

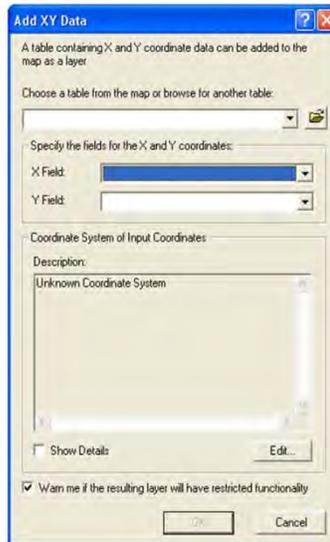
Para el manejo de datos dentro del SIG, se convirtió primeramente toda la información en formato shape para poder hacer el procesamiento de datos en el programa ArcGis. La información que no se tenía en formato shape y que se encuentra en tablas, se obtuvo con el siguiente procedimiento:

1. Abrir el programa *ArcGis*.
2. En el menú *Tools*, seleccionamos *Add XY Data*. (Figura 5.1).



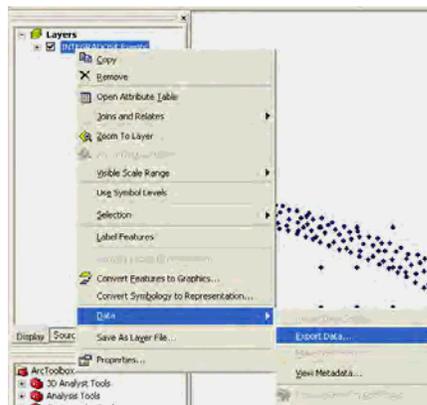
**Figura 5.1.** Despliegue del menú *Tools*.

3. Se llenan los campos que se muestran en blanco (ubicación de la tabla, seleccionar del encabezado el campo correspondiente a las coordenadas “X” y “Y”). (Figura 5.2)
4. Para aplicarlo, dar clic en *OK*.

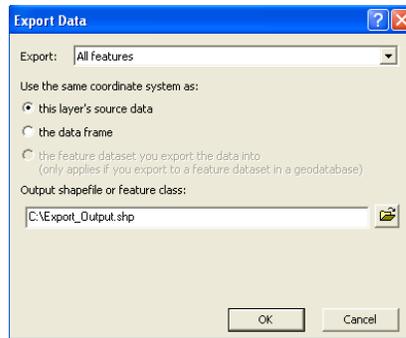


**Figura 5.2.** Cuadro de diálogo de Add XY Data.

5. Para manejar estos datos en Arc Gis, es necesario exportarlos a formato shape, para esto, se le da clic derecho en la tabla que se acaba de cargar, y selecciona *Data --> Export Data*. (Figura 5.3)
6. Se llena el espacio donde pide la ruta de salida. (Figura 5.4)
7. Para aplicarlo, dar clic en *OK*.



**Figura 5.3.** Ubicación de Export Data.



**Figura 5.4.** Cuadro de diálogo de Export Data.

Para combinar las distintas fuentes de datos, se siguió un criterio sencillo en el cual primero se jerarquizan los datos de acuerdo a su calidad. En este caso, se tomó el siguiente orden de prioridad:

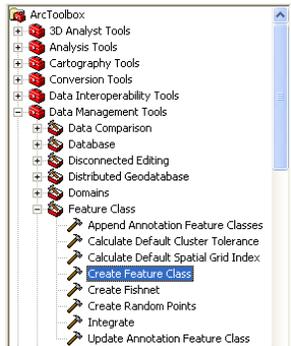
1. Ecosonda.
2. CTD.
3. Cartas batimétricas de la Secretaría de Marina.
4. Reimnitz.
5. GEBCO.

#### 5.1.2. Identificación de observaciones inconsistentes

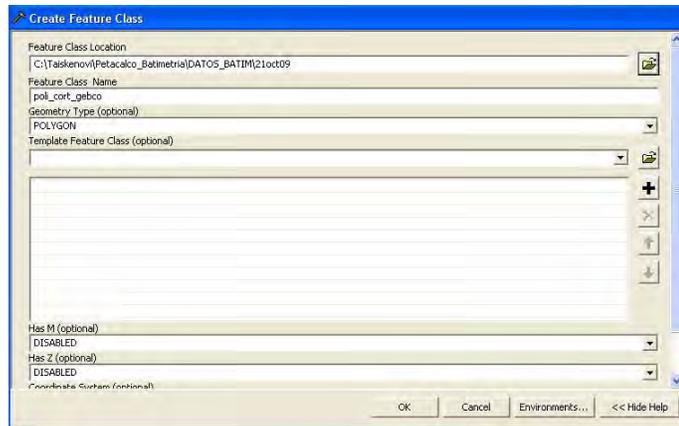
Para que no se mezclen los datos de las distintas fuentes, se eliminan los de menor calidad de las zonas en que se encuentran datos de mayor calidad, según el criterio explicado en el párrafo anterior.

Como los datos de GEBCO se encuentran en una malla cuadrada, se debe delimitar la zona donde se requieren, para esto, se crea un polígono de corte o máscara, en *Arc Toolbox --> Data Management Tools --> Feature Class --> Create Feature Class* (Figura 5.5).

Se llena en el cuadro de diálogo la ruta donde se almacena el *Feature Class*, el nombre que se desee asignar y seleccionar que sea shape de tipo *Polygon* (Figura 5.6).



**Figura 5.5.** Cajas de Herramienta ArcGis.



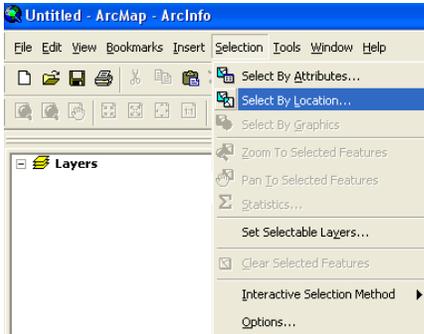
**Figura 5.6.** Creando un *Feature Class*.

El polígono que se requiere para efectuar el corte de la malla de GEBCO, se dibuja de tal manera que cubra el área de los datos de mayor prioridad sin incluir los datos de GEBCO, en la barra de herramientas *Editor* (Figura 5.7), pulsar *Editor* --> *Start Editing* y con la herramienta *Sketch Tool* (en forma de lápiz), se da forma al polígono. Para guardar el polígono en el shape, se va a *Editor* --> *Stop Editing*.

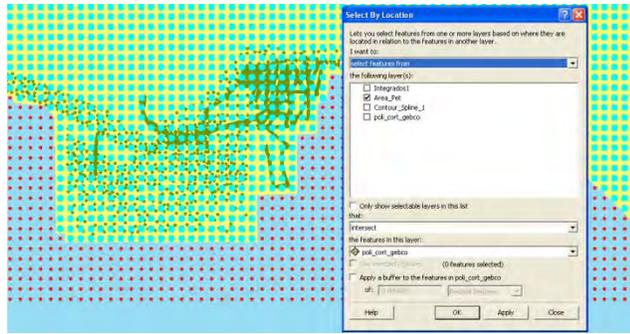
Del shape de puntos que contiene los datos de GEBCO, se inicia Edición con *Editor* --> *Start Editing* y para seleccionarlos, se usa *Select By Location* que se encuentra en la barra de menú *Selection* (Figura 5.8), posteriormente se llenan del cuadro de diálogo los campos necesarios (Figura 5.9), se le da *Apply* y se eliminan los puntos seleccionados.



**Figura 5.7.** Barra de herramientas para Edición.



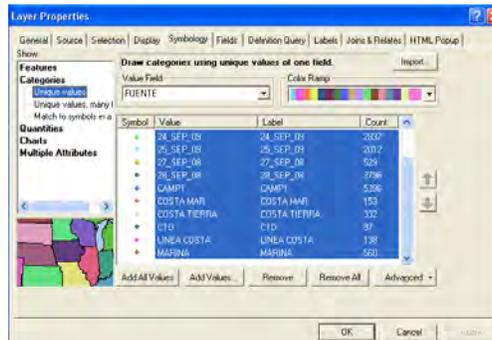
**Figura 5.8.** Herramienta de selección.



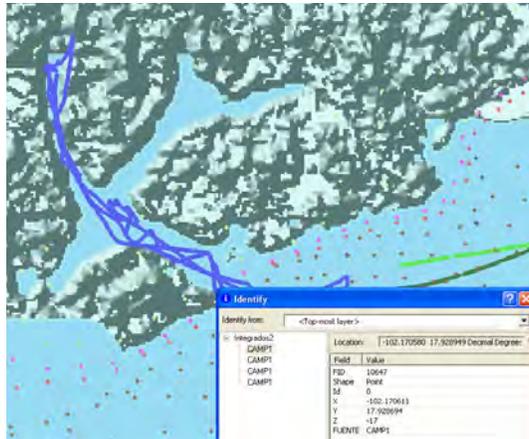
**Figura 5.9.** Cuadro de diálogo de selección.

Después de unir los datos de GEBCO con las otras fuentes de origen, para distinguir la fuente de los datos, se le aplica una clasificación de *Unique value* (distinto color a los datos según la fuente de origen), utilizando el campo *fuentes* (Figura 5.10).

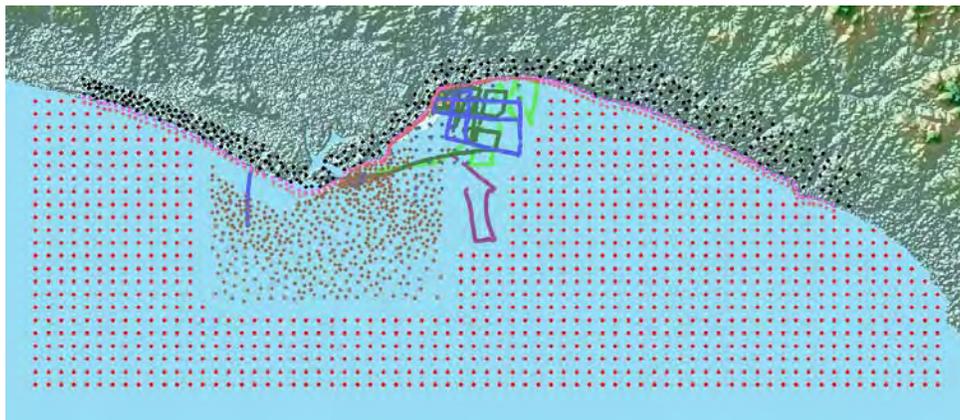
Para evitar que los datos que están en el río (Figura 5.11) metan ruido, se eliminan para evitar problemas debidos a las limitaciones de las técnicas de interpolación objetiva. Para esto, se inicia *Start Editing* como se manejó anteriormente, se seleccionan los datos de la desembocadura y se eliminan (Figura 5.12).



**Figura 5.10.** Tipos de simbología.



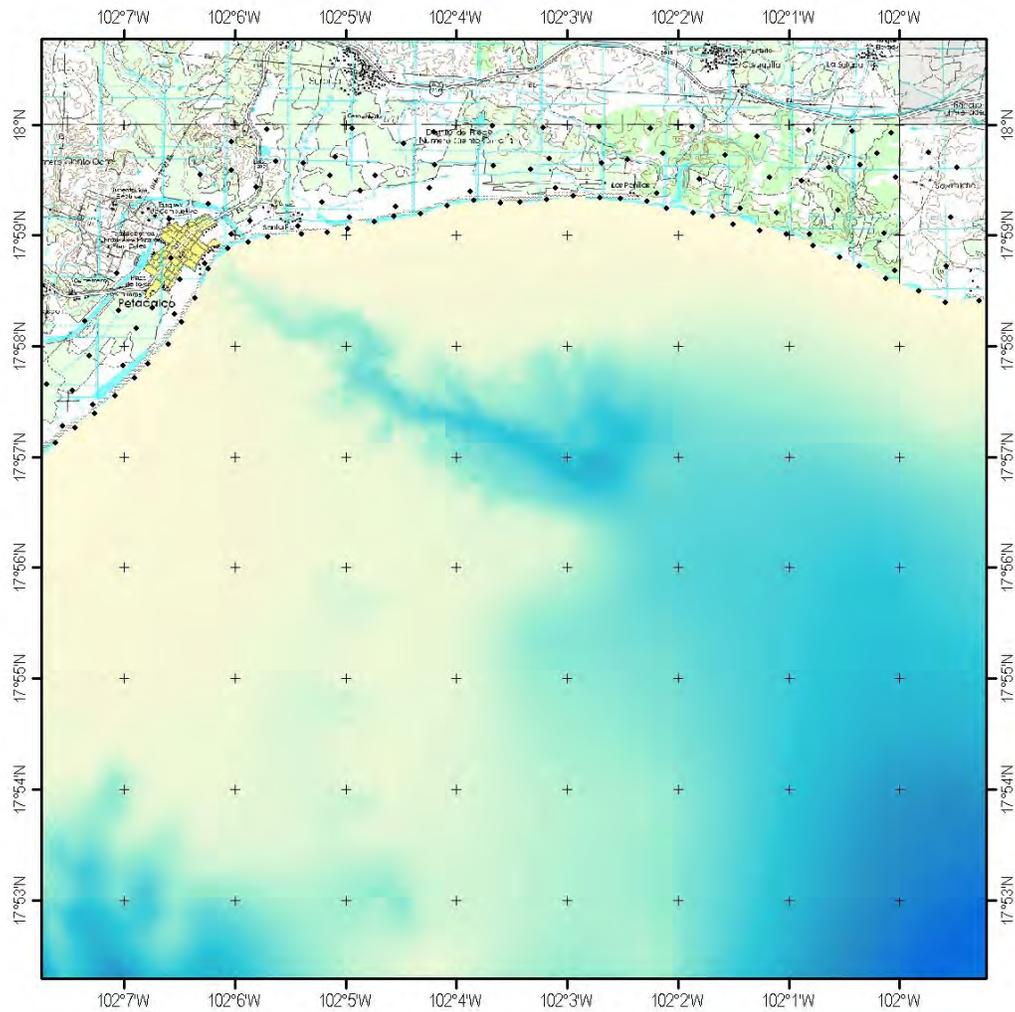
**Figura 5.11.** Datos del río que no fueron tomados en cuenta para realizar la interpolación.



**Figura 5.12.** Concentración de los datos, con una clasificación de color de tipo *Unique Values*, sobre un mapa base elaborado a partir de datos satelitales del sensor ASTER, asignado a este, una paleta de color de elevaciones y un sombreado para generar el efecto de elevación.

## 5.2. Generación de línea de costa como frontera

Se digitalizan puntos distribuidos en el área de estudio a lo largo de la costa, para definirla con precisión (Figura 5.13), tomando de base las cartas topográficas de INEGI a escala 1:50,000, dándoles un valor de cota *cero*, para evitar que extrapole valores erróneos. Estos puntos, se agregan al shape del conjunto de datos.



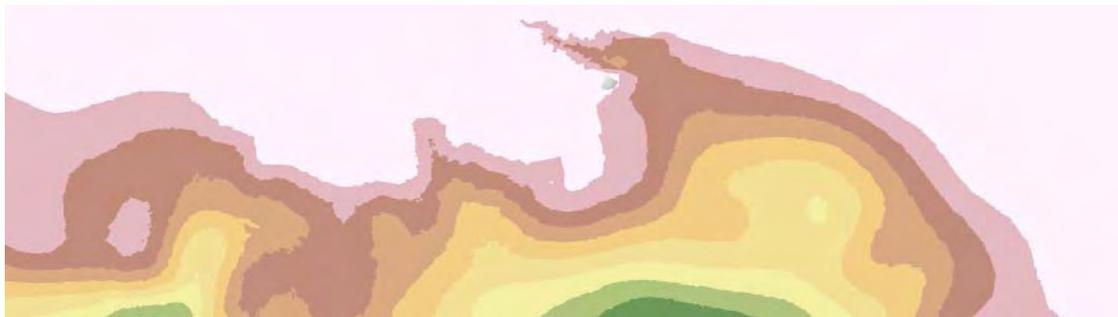
**Figura 5.13.** Línea de costa: 623 puntos distribuidos a lo largo de la costa sobre cartas topográficas de INEGI.

### 5.3. Métodos de interpolación empleados

Para interpolar los datos, se prueban distintos métodos que facilita el programa de SIG. El resultado de la salida con el método de interpolación Kriging (Figura 5.14), IDW (Figura 5.15), TIN (Figura 5.16), Spline (Figura 5.17).

### 5.3.1. Kriging

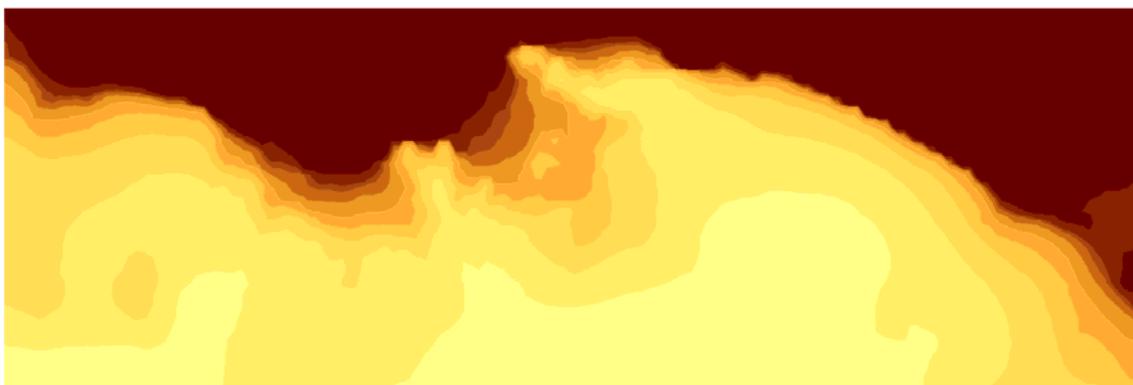
El método de interpolación Kriging indica que entre la dirección y distancia existente entre los datos hay una correlación espacial, la cual sirve para modelar una variable, ajustándola a un modelo teórico con el cual se proporcionará el error y la confianza que se puede dar a los datos interpolados, dependiendo del modelo que se utilice para ajustar los datos. Luego se asignan pesos, los cuales están en función de la interrelación que exista entre los puntos.



**Figura 5.14.** Modelo generado mediante Kriging.

### 5.3.2. Distancias inversas ponderadas

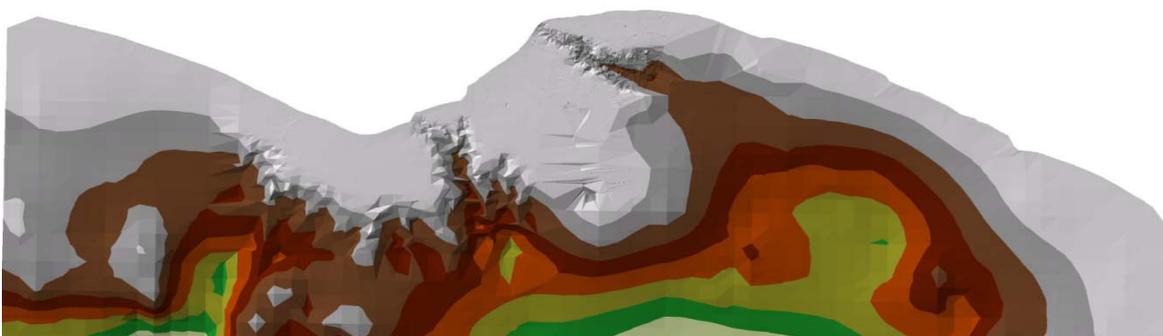
Este método le asigna pesos a los datos en función inversa de la distancia que existe entre los datos, esto quiere decir que cuanto más cerca se encuentre el punto a interpolar de sus puntos vecinos, tendrán más peso. Es considerado un interpolador local y por lo tanto es muy preciso al generar la malla. Su uso no resulta complicado y no requiere de muchos recursos informáticos.



**Figura 5.15.** Modelo generado mediante Distancias Inversas.

### 5.3.3. Red de triángulos irregulares

El modelo consiste en una red de puntos con valores de profundidad, los cuales se encuentran conectados por líneas, las cuales dan lugar a una red de triángulos. Esta estructura por sus siglas en inglés *triangulated irregular network* (TIN) por su generación y manejo es una de las más usadas [17]. En el TIN, la densidad de triángulos está en función de la distribución de los puntos.



**Figura 5.16.** Modelo generado con una Red de Triángulos Irregulares.

### 5.3.4. Spline

Este método, es relativamente sencillo, ya que se trata curvas formadas por polinomios de bajo grado, así pues, se evita generar ruido y oscilaciones no deseadas. Las curvas se utilizan para aproximarse lo más posible a los puntos, sin generar estructuras con cambios bruscos de pendiente, esto quiere decir que con Splines se consigue una estructura suavizada.



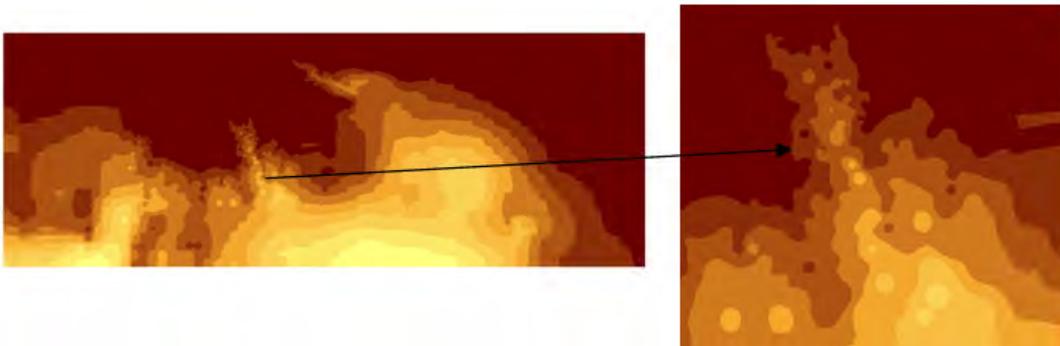
**Figura 5.17.** Modelo generado mediante Spline.

#### 5.4. Comparación de los datos interpolados

Una vez analizados los datos ocupados en las interpolaciones y ver los resultados, se procede a ver cuál de los métodos arroja el mejor modelo.

*Análisis del IDW.* Como este método está basado en el inverso de las distancias, es decir, entre más se aleja de un punto muestreado disminuye el valor, se puede ver como pequeñas islas se generan en el modelo.

Si se conociera la superficie a través de imágenes, la topografía o en este caso la batimetría y se observara un comportamiento suave en forma de pequeños montes espaciados, posiblemente esta interpolación sería útil, pero como no es así, el modelo generado resulta engañoso por el comportamiento predefinido de las cimas en los puntos muestreados, y si además consideramos que los datos de GEBCO forman una malla regular de puntos, este efecto se acentúa un poco más.



**Figura 5.18** Islas formadas por el método IDW

Aunque hay parámetros y clasificaciones que pueden disminuir este comportamiento, la eliminación total de la aparición de las islas no se logra. Se tendrá siempre como valores máximos los muestreados, alrededor de ellos valores menores y por lo tanto la pequeña generación de islas es inevitable.

*Análisis de Kriging.* Este método de interpolación es muy utilizado, se basa en métodos estadísticos que buscan la autocorrelación de los valores medidos. La geoestadística es cada vez más utilizada en diversas variables. Este método permite técnicas que dan certeza a los resultados de la interpolación.

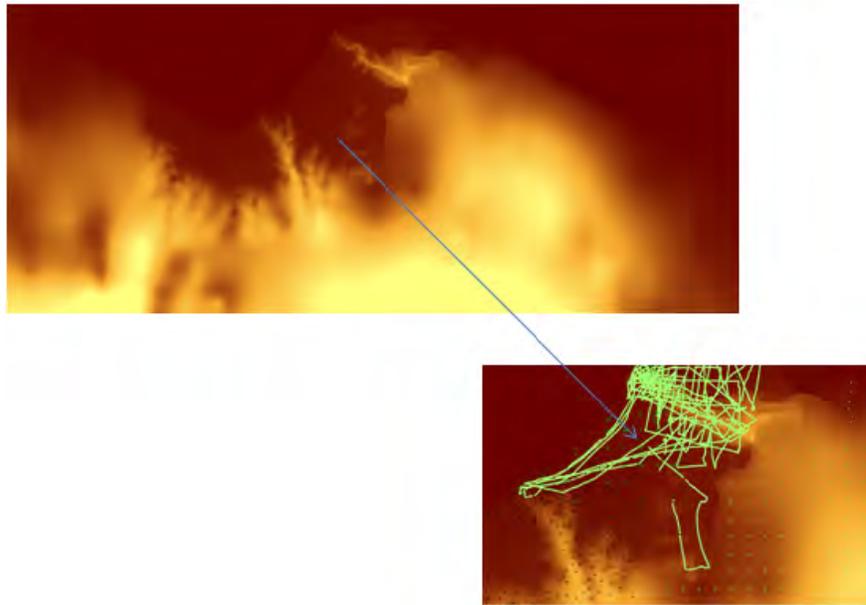
Es importante mencionar que para poder llevar a cabo un análisis con Kriging se necesita conocer la variografía, es decir, la estructura en la variabilidad espacial de los datos.

Debe existir un supuesto inicial de una variable regionalizada, como por ejemplo, decir que “Los puntos cercanos en el espacio/tiempo suelen adoptar valores similares”

Aquí se podría juzgar qué relación espacial hay en la profundidad del fondo marino, como ejemplo está el Cañón de Petacalco, que como se observa, cae docenas de metros en distancias horizontales de centímetros, pero también tenemos zonas suavizadas, por ejemplo en la zona sur-este del modelo. Además de la tendencia obvia de la existencia de datos más profundos mar adentro.

Por lo tanto, como es difícil determinar la zona de variabilidad, es un modelo anisótropo. Aunque si se secciona el área estudiada se podría encontrar esta variable regionalizada.

En un análisis estadístico el muestro es esencial y como en este trabajo se mencionó, son distintas fuentes de información las que se manejaron y a las cuales se les dio distinto peso, esto influye directamente en la interpolación con Kriging ya que es a través de métodos estadísticos que se obtienen los valores.

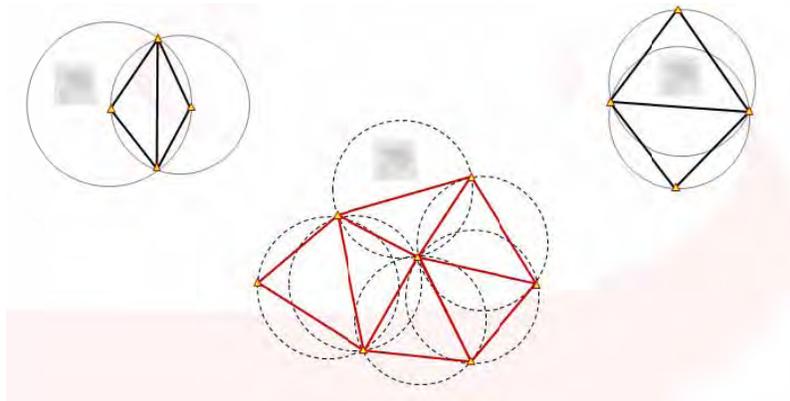


**Figura 5.19** Modelo generado con Kriging, con datos que ajusta por default el programa. En este modelo se observan figuras muy inconsistentes con lo que debería ser el comportamiento del fondo marino. También se ve una influencia del muestreo.

No se descarta que con un análisis más riguroso utilizando kriging, se pueda obtener una superficie o modelo mejor que el mostrado en la figura 5.19.

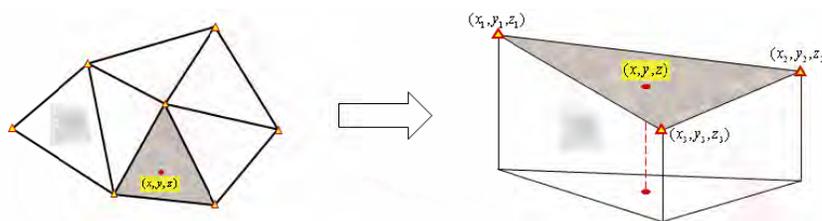
Pero por otro lado no se debe pensar que, porque es método bastante riguroso, arroje mejores resultados que los otros métodos de interpolación. Hay que considerar la variable que se está manejando, su distribución de los puntos observados y la finalidad del modelo.

*Análisis con red de triángulos irregulares.* Este método se basa en el criterio de Delauney, el cual garantiza que ningún vértice está en el interior de los círculos circunscritos de los triángulos de la red.



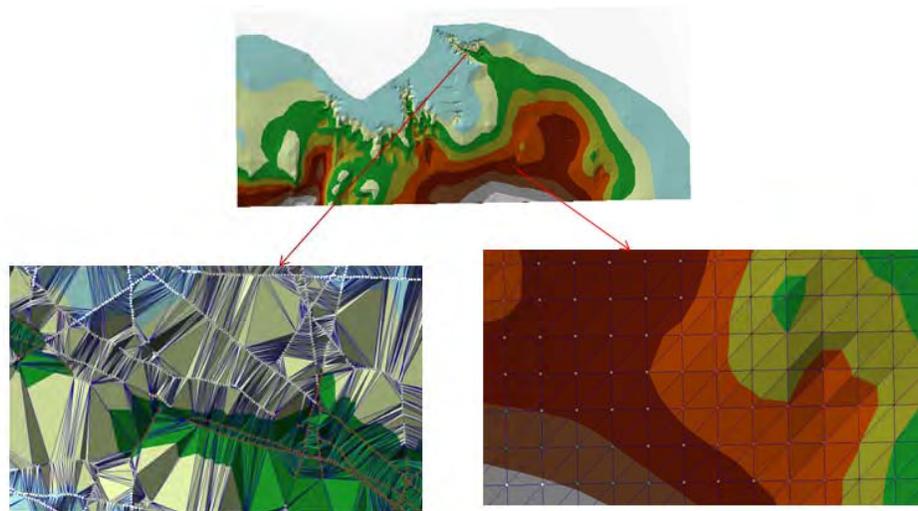
**Figura 5.19** “INEGI - métodos de interpolación”

Se construye una función lineal a partir de los vértices del triángulo, para derivar cualquier punto de la región.



**Figura 5.20** “INEGI - métodos de interpolación”

El modelo TIN ha sido muy ocupado para representar la superficie de terreno. Analizando el caso de este modelo en particular, se puede observar que los puntos levantados y obtenidos de diversas fuentes tienen gran influencia en el modelo resultante, ocasionando una mala representación o modelaje.

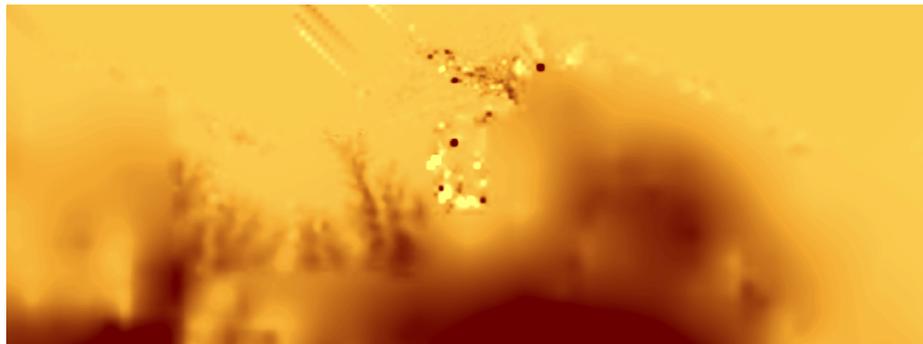


**Figura 5.21** Análisis del modelo generado con TIN, los puntos levantados con transectos y malla de GEBCO afecta de gran manera el resultado final.

*Análisis del Spline.* Este método ajusta superficies a la nube de puntos y puede controlarse de tal manera que las superficies se ajusten lo máximo posible a los puntos, con lo cual se obtienen superficies un poco suavizadas en primera instancia, pero con las opciones del programa, en este caso ArcGis, también se pueden modificar parámetros para generar ajustes más suavizados. El problema de este método puede presentarse en zonas con gran variabilidad vertical y en un área pequeña, ya que el método Spline trata de enmascarar o encubrir las variaciones grandes.

Dentro del programa se tienen dos formas de ocupar el Spline que son:

- **Regularizado.** Este método crea una superficie suave de manera gradual, combinando la superficie con los valores que pueden estar fuera de la gama de datos de la muestra.
- **Tensión.** Suaviza la rigidez de la superficie según el carácter del fenómeno modelado. Esto crea una superficie lisa con valores estrechamente ligados a los valores de la muestra.



**Figura 5.21** Interpolación con Spline método regularizado

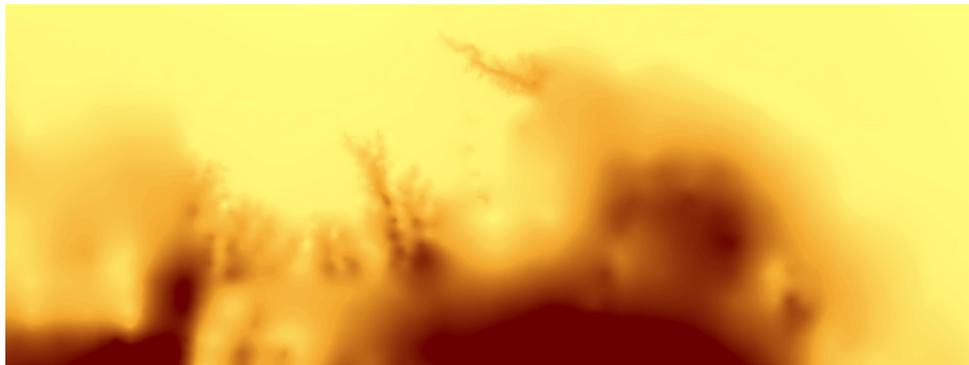


**Figura 5.22** Interpolación con Spline método tensionado. Las superficies son suavizadas

*Análisis de Topo to Raster.* Método de interpolación dispuesto en el programa es este que ocupa una técnica iterativa de interpolación en diferencias finitas, y fue diseñado específicamente para la creación de MDE, en función de un modelaje hidrológico correcto.

Este procedimiento de interpolación, en sus opciones de los datos de entrada, cuenta con las ventajas de aquellos algoritmos locales, como el IDW y la de los algoritmos globales como son el Kriging y el Spline.

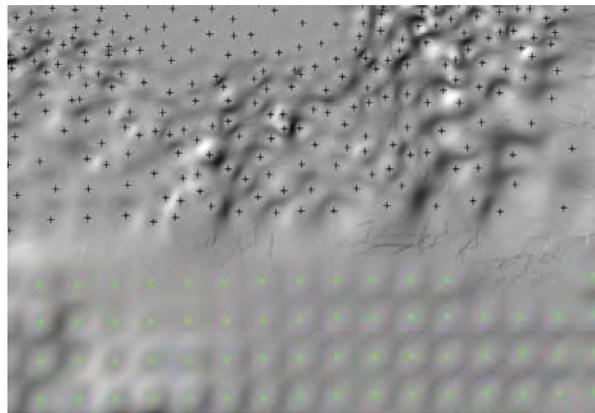
Se puede considerar que la técnica de interpolación desarrollada está basada en los métodos anteriores ligeramente modificados para que el cálculo pueda combinar el ajuste en cambio brusco de pendiente y en otras zonas pueda suavizarse.



**Figura 5.22** Interpolación con TopoGrid. El resultado es todavía más suavizado que ocupando el Spline. No son evidentes los cambios que hay por combinación de puntos de diversa fuentes.

Ahora la evaluación formal de los modelos generados requeriría de nuevos levantamientos para conocer la confiabilidad. Este trabajo se apoya en la experiencia y los resultados mostrados por cada método.

En un principio el *IDW*, mostró como principal característica la generación de islas, más acentuadas donde se tienen los datos GEBCO y en los cañones con los datos medidos con ecosonda, la generación de estas islas, fue el factor decisivo para no ocupar este método de interpolación para la generación del modelo.



**Figura 5.23** Generación de islas con el método IDW en la zona con datos de GEBCO.

El método de *Kriging*, aunque es un método bastante robusto, requiere de un análisis sobre la correlación espacial. Este método no se puede descartar del todo para análisis de superficie de terreno o profundidad, como es el caso. Pero es difícil encontrar la correlación en este tipo de superficies que suelen ser muy variables en zonas pequeñas o muy regulares en grandes extensiones, por lo tanto no es tan utilizado para determinar este tipo de superficies.

Aun así, a manera de ver los resultados de *Kriging*, se extrajeron todos los valores arrojados por este método de interpolación y se compararon con los datos originales para ver la variabilidad entre ellos.

FUENTE	Original	Kriging
21_NOV_08	-28.9	-29.215405
21_NOV_08	-29.3	-29.144033
21_NOV_08	-28.9	-29.144033
21_NOV_08	-28.9	-30.032375
21_NOV_08	-59.4	-59.42062
21_NOV_08	-59.7	-59.650707
21_NOV_08	-59.6	-59.650707
21_NOV_08	-59.6	-59.437054
21_NOV_08	-59.3	-59.437054
21_NOV_08	-59.5	-59.517471
21_NOV_08	-59.4	-59.517471
21_NOV_08	-60	-60.056309
21_NOV_08	-60.1	-60.056309
21_NOV_08	-60.2	-60.130413
21_NOV_08	-59.9	-60.130413
21_NOV_08	-60	-60.130413
21_NOV_08	-63.3	-61.553188
21_NOV_08	-59.4	-61.553188

Figura 5.24 Ejemplo de comparación en la parte con Ecosonda.

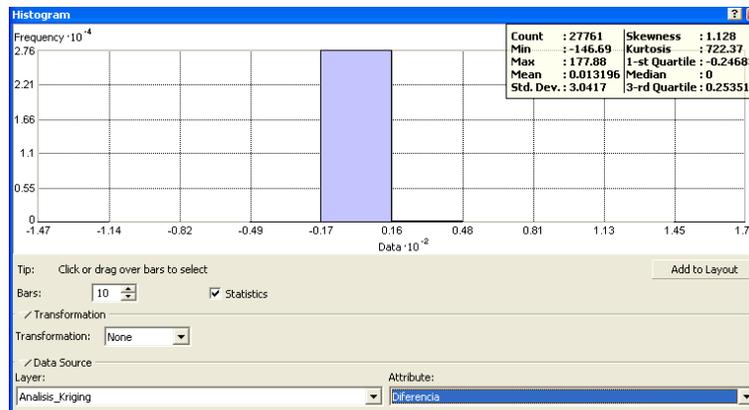
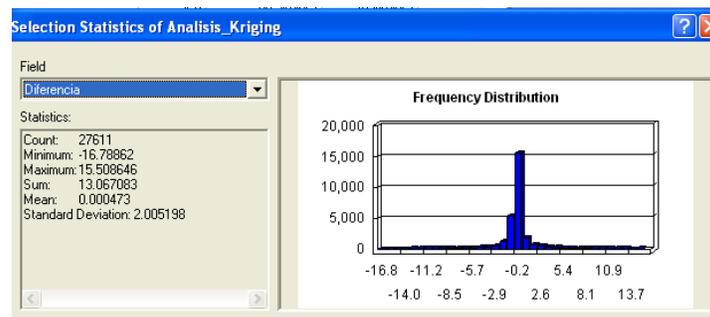
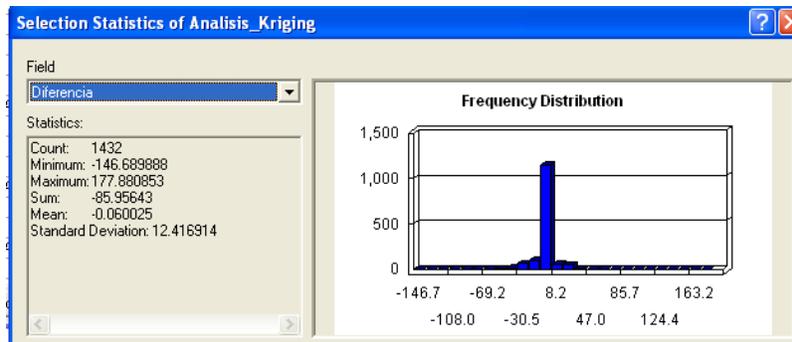


Figura 5.24 Análisis de diferencias entre el valor medido y el obtenido por interpolación con Kriging.

Como se observa, hay valores muy elevados en la diferencia, de -146 a 177 aunque son pocos. Por otro lado los puntos ubicados en la barra más grande abarca errores entre -17 y 16 que es donde cae el grueso de la información.



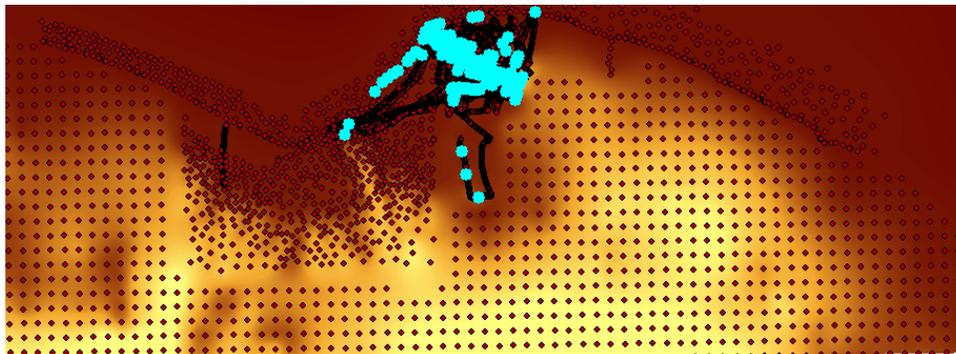
De estos puntos de la barra más grande se tiene las mayores diferencias se encuentran entre -2.9 a 2.6 metros, el total de puntos es de 27611.



**Figura 5.25** 1432 puntos fuera del rango.

Esto equivale al 5% aproximadamente de los puntos donde se presenta la mayor diferencia entre el valor calculado y el medido. La mayoría de valores están entre -30 a 30 metros.

La distribución de muestra en la figura 5.26.



**Figura 5.26** Distribución de puntos donde las discrepancias son considerablemente altas.

El mayor problema con este método como observamos está en la parte de los cañones donde la relación espacial es difícil de determinar, aunado a esto también se ven zonas muy irregulares donde no existe información, ahí el modelo determinó formas que difícilmente tendrían lugar en la batimetría.

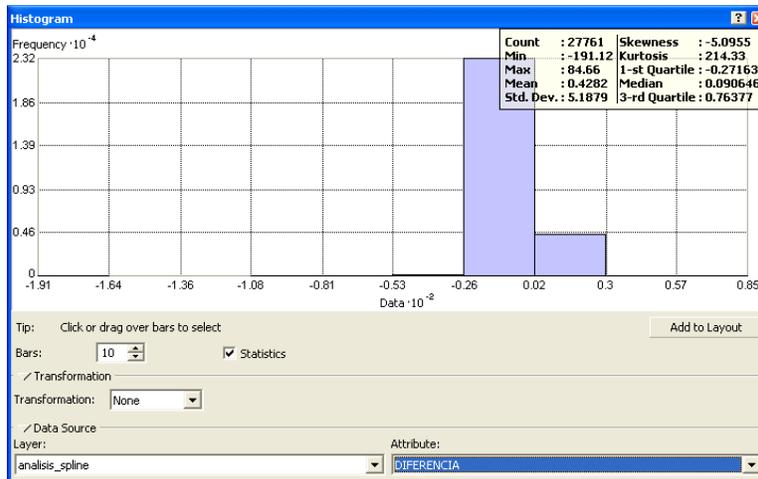
Dentro del modelo de red irregular de triángulos (TIN) la capacidad de manejo u opciones para obtener el modelo es limitada. Si se remite a la figura 5.26 es obvio que este método no es adecuado para este modelo. Cabe mencionar que en otras escalas y otros muestreos o levantamientos el formato es muy utilizado por arrojar buenos resultados.

*Spline* genera superficies que se amoldan a los puntos de entrada con un pequeño suavizamiento, por lo tanto se puede analizar de manera semejante al modelo de Kriging. El primer paso es obtener una tabla donde se tengan los valores originales con respecto a los generados por Spline.

FID	Shape	X	Y	FMBITE	ORIGINAL	CALCULADO
9531	Point	-102.0647	17.945363	20_SEP_00	-106	-87.603317
9532	Point	-102.064717	17.945283	20_SEP_00	-106	-82.209259
9533	Point	-102.064717	17.9452	20_SEP_00	-92.3	-82.209259
9534	Point	-102.064733	17.94481	20_SEP_00	-74.6	-82.209259
9535	Point	-102.064733	17.944863	20_SEP_00	-85.4	-86.198994
9536	Point	-102.064715	17.94489	20_SEP_00	-85.1	-86.198994
9537	Point	-102.064767	17.94489	20_SEP_00	-82.9	-82.404465
9538	Point	-102.064767	17.9447	20_SEP_00	-89.9	-82.404465
9539	Point	-102.064767	17.944617	20_SEP_00	-89.9	-86.05302
9540	Point	-102.064767	17.944617	20_SEP_00	-83.9	-86.05302
9541	Point	-102.06461	17.9444	20_SEP_00	-82	-86.05302
9542	Point	-102.064817	17.944217	20_SEP_00	-81.1	-83.043774
9543	Point	-102.064833	17.944217	20_SEP_00	-80.7	-83.043774
9544	Point	-102.064825	17.944133	20_SEP_00	-49.9	-49.027996
9545	Point	-102.064803	17.94405	20_SEP_00	-49	-49.027996
9546	Point	-102.06489	17.94395	20_SEP_00	-48.6	-49.027996
9547	Point	-102.064833	17.94385	20_SEP_00	-48.3	-48.726531
9548	Point	-102.064817	17.94375	20_SEP_00	-47.2	-48.726531
9549	Point	-102.064817	17.94365	20_SEP_00	-47.6	-47.886436
9550	Point	-102.06489	17.94355	20_SEP_00	-47	-47.886436
9551	Point	-102.064883	17.943453	20_SEP_00	-88.5	-47.886436
9552	Point	-102.064883	17.94335	20_SEP_00	-89.5	-47.886436
9553	Point	-102.064883	17.94325	20_SEP_00	-89.1	-46.943007
9554	Point	-102.06489	17.94315	20_SEP_00	-48	-46.943007
9555	Point	-102.064883	17.943057	20_SEP_00	-85.4	-46.943007
9556	Point	-102.064887	17.942987	20_SEP_00	-45.3	-45.941556
9557	Point	-102.064883	17.942883	20_SEP_00	-45.2	-45.941556
9558	Point	-102.065	17.942783	20_SEP_00	-44.4	-45.939573
9559	Point	-102.065033	17.9427	20_SEP_00	-44.0	-45.939573
9560	Point	-102.065033	17.942617	20_SEP_00	-44.1	-45.939573
9561	Point	-102.065117	17.942517	20_SEP_00	-44.1	-44.189044
9562	Point	-102.065127	17.942433	20_SEP_00	-43.3	-44.189044
9563	Point	-102.0652	17.942333	20_SEP_00	-43.3	-43.515259
9564	Point	-102.06525	17.94225	20_SEP_00	-43	-43.515259
9565	Point	-102.065267	17.942163	20_SEP_00	-42.7	-43.515259
9566	Point	-102.065253	17.942067	20_SEP_00	-42.5	-42.814243
9567	Point	-102.065317	17.941983	20_SEP_00	-42.4	-42.814243
9568	Point	-102.065325	17.941903	20_SEP_00	-42	-41.709705
9569	Point	-102.065333	17.94181	20_SEP_00	-41.0	-41.709705
9570	Point	-102.065433	17.941717	20_SEP_00	-41.5	-41.709705

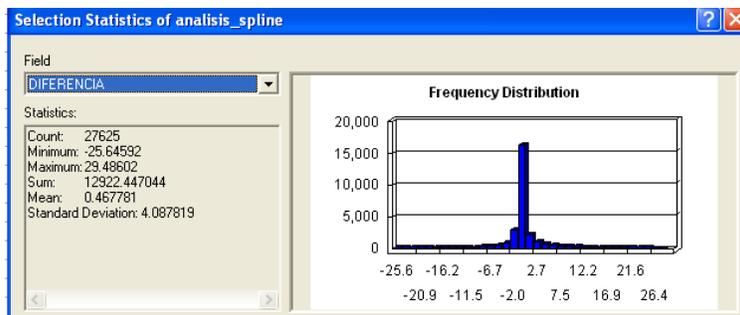
**Figura 5.27** Tabla de comparaciones entre los valores originales y los calculados por Spline.

El gráfico del estadístico de las diferencias se puede observar en la figura 5.28.



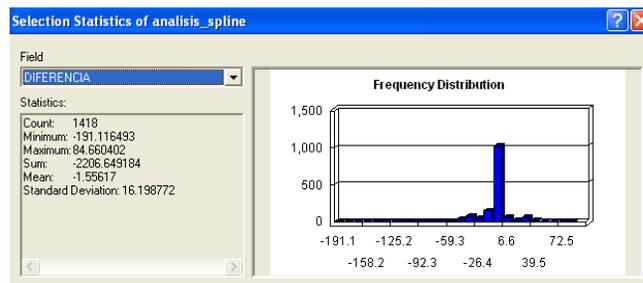
**Figura 5.28** Muestra que el mayor número de puntos están en un rango no mayor de -26 a 3 metros. Con valores extremos de -191 a 84.

Seleccionando los puntos contenidos en las dos barras más grandes se obtiene:

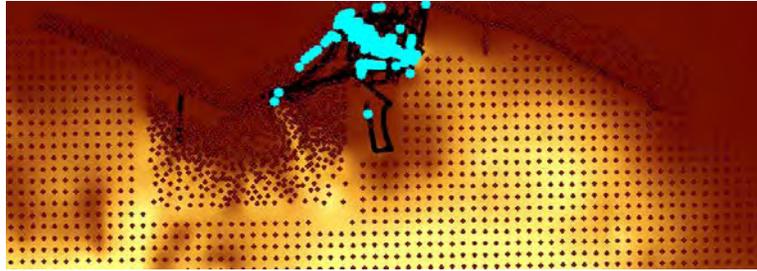


**Figura 5.29** El mayor número de valores están entre -2 a 2.7 metros con valores extremos de -25 a 29.

Los valores que se encuentran fuera del rango anterior son 1418 que equivalen al 5% aproximadamente, con los siguientes datos estadísticos.

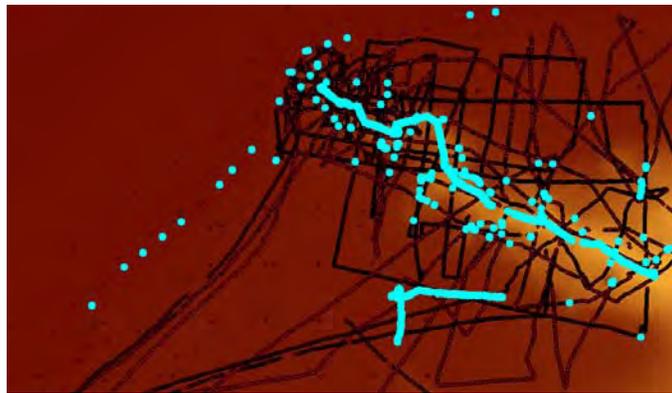


**Figura 5.30** El mayor número de valores está aproximadamente en el rango de -40 a 39 metros, con extremos de -191 a 39.5 metros.



**Figura 5.30** Valores con mayores discrepancias del modelo determinado con Spline, los cuales se concentran más en el cañón.

Haciendo un acercamiento para ver los puntos, se observa que los valores que más difieren con las mediciones, se encuentran en algunos transectos.



**Figura 5.30** El transecto que se ubica al parecer en la parte más honda del cañón es el que resulta con el mayor número de puntos con discrepancias fuertes, lo cual se debe al método de interpolación.

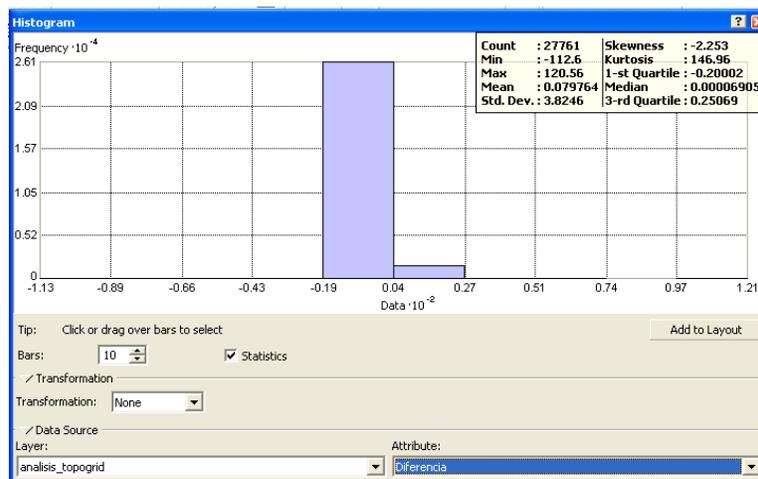
Si se analiza esto en una primera instancia se tendrían que revisar los datos, para ver si no hay valores con “ruido”. Esto se realizó en el análisis de datos y no se encontraron inconsistencias en los valores.

Otro aspecto a considerar es el propio método de interpolación, si se recuerda que el fundamento son *superficies de ajuste*, no sería raro pensar que donde los datos cambian fuertemente de pendiente o en las partes donde cambia la pendiente de sentido o signo, se encuentran los valores menos ajustados al modelo.

TopoGrid. Analizando el último método de manera similar se tiene.

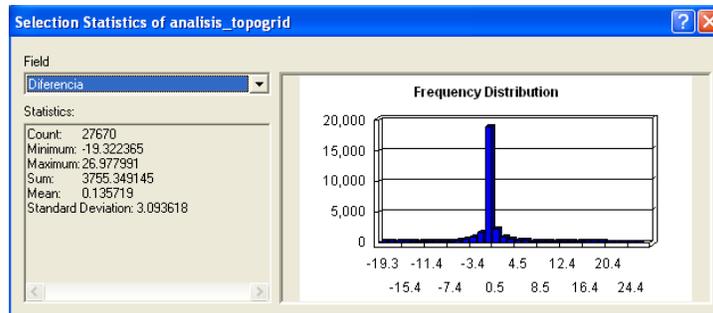
FID	Shape	X	Y	FUENTE	Original	Calculado	Diferencia
13133	Point	-102.071028	17.962083	CAMP1	-.94	-92.241653	-1.758347
13134	Point	-102.070917	17.962056	CAMP1	-.96	-95.660927	-0.239073
13135	Point	-102.070833	17.962056	CAMP1	-.97	-95.660927	-1.239073
13136	Point	-102.070722	17.962028	CAMP1	-.97	-98.632965	1.632965
13137	Point	-102.070639	17.962028	CAMP1	-.97	-98.632965	1.632965
13138	Point	-102.070556	17.962	CAMP1	-.98	-98.632965	0.632965
13139	Point	-102.070444	17.962	CAMP1	-.99	-99.042458	0.042458
13140	Point	-102.070333	17.961972	CAMP1	-.98	-99.042458	1.042458
13141	Point	-102.07025	17.961972	CAMP1	-.99	-99.156174	0.156174
13142	Point	-102.070167	17.961972	CAMP1	-1.01	-99.156174	-1.843826
13143	Point	-102.070056	17.961944	CAMP1	-1.02	-99.156174	-2.843826
13144	Point	-102.069944	17.961917	CAMP1	-1.01	-101.804276	0.804276
13145	Point	-102.069861	17.961861	CAMP1	-1.04	-101.804276	-2.195724
13146	Point	-102.069778	17.961778	CAMP1	-1.07	-108.376968	1.376968
13147	Point	-102.069694	17.96175	CAMP1	-1.07	-108.376968	1.376968
13148	Point	-102.069583	17.96175	CAMP1	-1.12	-108.376968	-3.623032
13149	Point	-102.0695	17.96175	CAMP1	-1.12	-111.214874	-0.785126
13150	Point	-102.069389	17.961722	CAMP1	-1.11	-111.214874	0.214874
13151	Point	-102.069306	17.961722	CAMP1	-1.10	-114.237267	4.237267
13152	Point	-102.069194	17.961722	CAMP1	-1.10	-114.237267	4.237267
13153	Point	-102.069111	17.961694	CAMP1	-1.18	-114.237267	-3.762733
13154	Point	-102.069	17.961694	CAMP1	-1.18	-120.471985	2.471985
13155	Point	-102.068917	17.961667	CAMP1	-1.21	-120.471985	-0.528015
13156	Point	-102.068806	17.961639	CAMP1	-1.24	-128.730652	4.730652
13157	Point	-102.068694	17.961639	CAMP1	-1.29	-128.730652	-0.269348
13158	Point	-102.068583	17.961639	CAMP1	-1.37	-138.405243	1.405243
13159	Point	-102.0685	17.961639	CAMP1	-1.41	-138.405243	-2.594757
13160	Point	-102.068389	17.961639	CAMP1	-1.42	-147.53006	5.53006
13161	Point	-102.068306	17.961639	CAMP1	-1.53	-147.53006	-5.46994
13162	Point	-102.068194	17.961639	CAMP1	-1.54	-147.53006	6.46994
13163	Point	-102.068083	17.961639	CAMP1	-1.55	-154.490067	-0.509933
13164	Point	-102.068	17.961611	CAMP1	-1.56	-154.490067	-1.509933

**Figura 5.30** Tabla que muestra la diferencia entre los valores originales y los arrojados por el modelo.



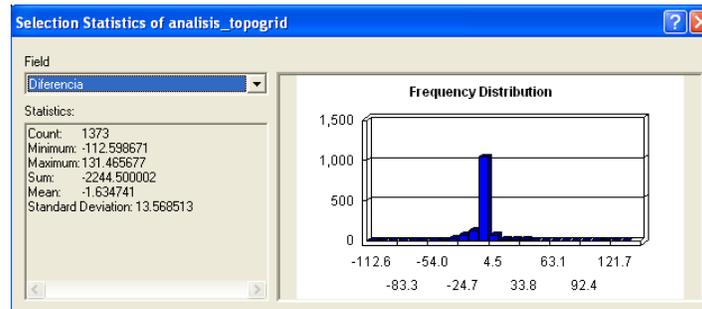
**Figura 5.31** En este nuevo modelo se observan valores extremos de -112 a 120 mts. con una media de 0.079764.

De igual manera el grupo fuerte de valores está en el rango de -19 a 27 mts. Seleccionando las dos barras más grandes se tiene el siguiente resultado.

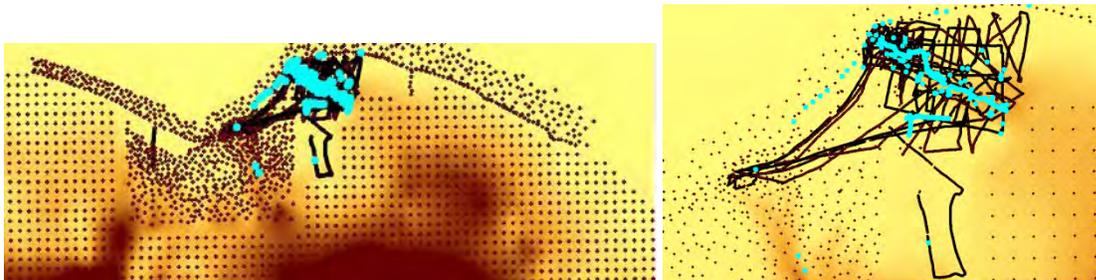


**Figura 5.32** La media del error del grueso de valores es de 0.1357 con valores extremos de -19 a 26 metros.

Los valores restantes son 1373 equivalentes al 4.7%, con las siguientes estadísticas.



**Figura 5.33** La media del error es -1.6 metros, con valores extremos de -112 a 131 mts.



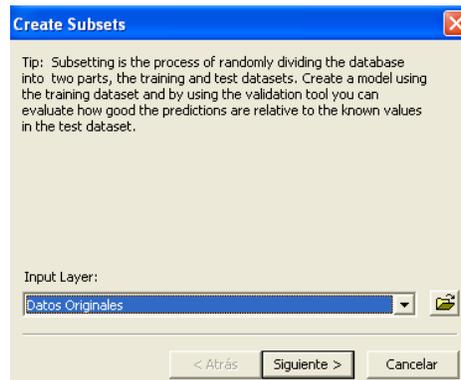
**Figura 5.34** Distribución de puntos en el modelo con mayores discrepancias con TopoGrid.

Nuevamente se ve la zona donde están los mayores problemas del método de interpolación y que es coincidente con los métodos *Spline* y *Kriging*.

Con lo que se puede deducir que el mayor problema en el modelado está en las partes más irregulares y con mayor número de puntos levantados, que es el Cañón de Petacalco.

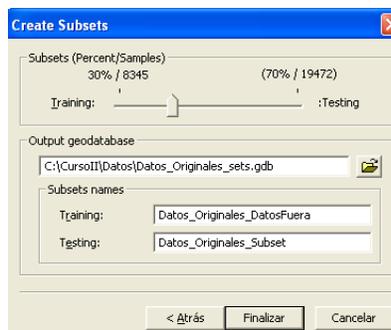
Otro análisis de los métodos de interpolación se puede realizar extrayendo una muestra de los datos de manera aleatoria e interpolar con estos valores, una vez generado el modelo se puede comparar contra los datos que no se tomaron en cuenta, para ver qué tanto se ajustan los valores.

A continuación se presenta esta metodología para los modelos Kriging, Spline y TopoGrid, para esto se ocupará una herramienta de ArcGis que obtiene un SubSet de datos de manera aleatoria de la muestra.

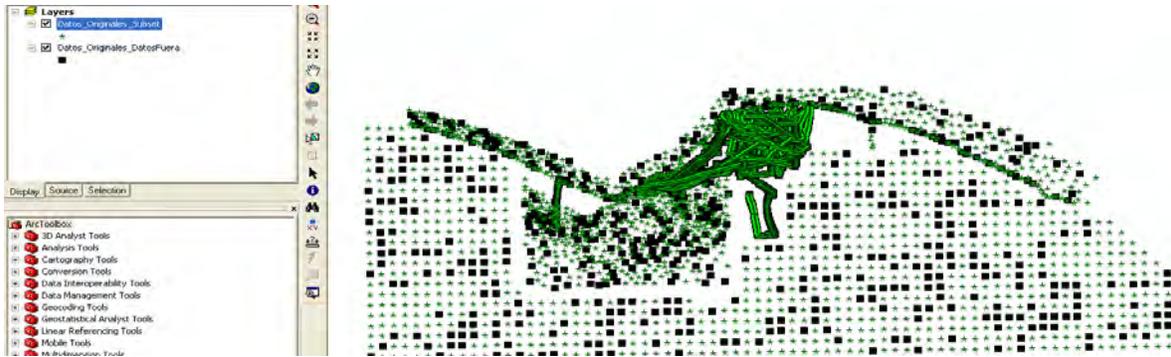


**Figura 5.35** Creación del *Subset*.

La herramienta permite extraer el porcentaje que se desea de la muestra, en esta caso, se manejó con un 70% de la muestra.

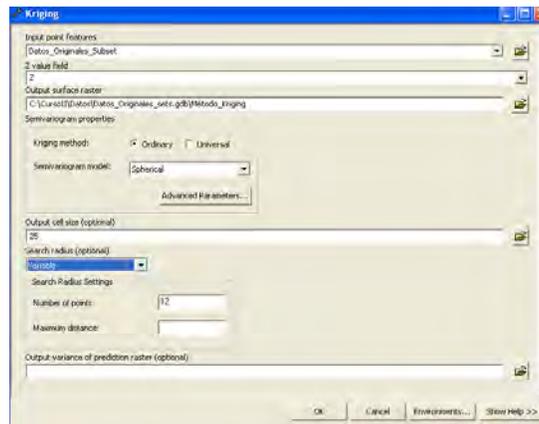


**Figura 5.36** Parámetros introducidos en el *Subset*.



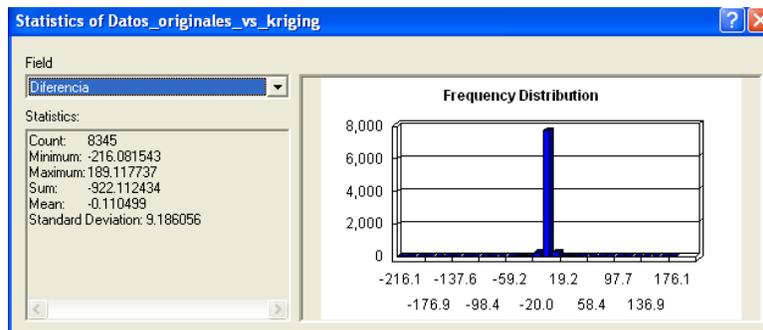
**Figura 5.37** *SubSet* de datos extraídos de manera aleatoria para interpolar nuevamente con la muestra.

### Comparación con Kriging



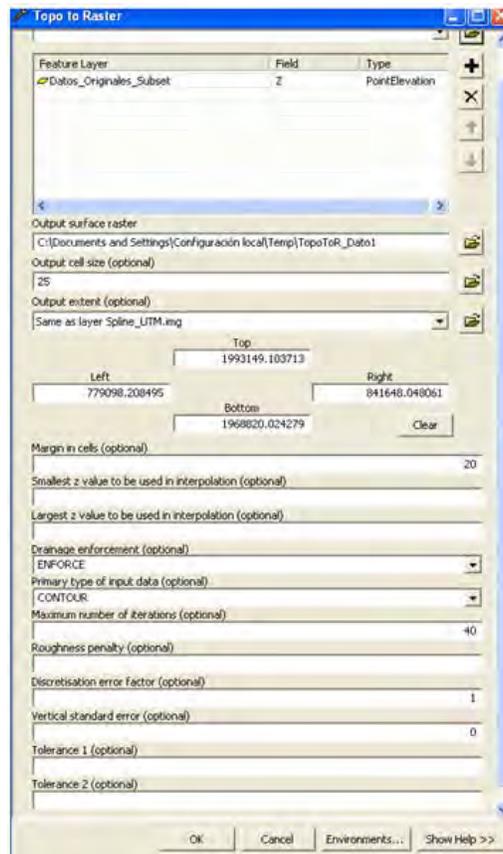
**Figura 5.38** Interpolación con Kriging, con los parámetros por default del programa.

Con el procedimiento anterior se analiza el resultado de los valores.

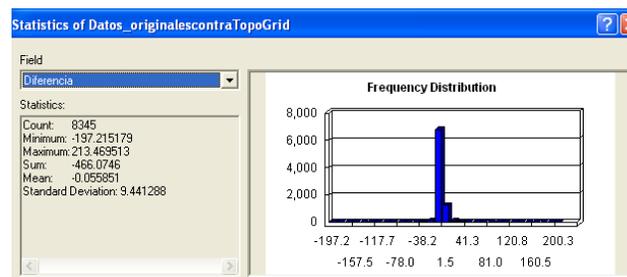


**Figura 5.39** Resumen estadístico de las diferencias entre los valores no tomados en cuenta para la interpolación y el modelo generado con el *Subset* de datos y el método Kriging.

## Comparación con TopoGrid

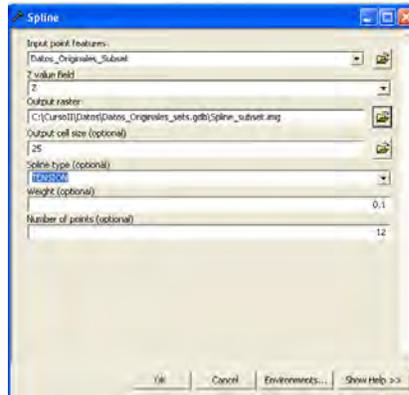


Los datos de entrada se mantienen por default.



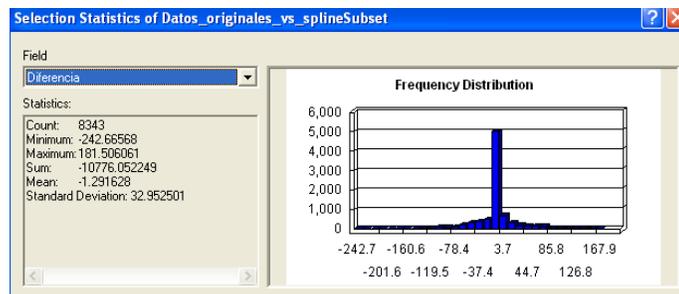
**Figura 5.40** Resumen estadístico de las diferencias entre los valores no tomados en cuenta para la interpolación y el modelo generado con el Subset de datos y el método TopoGrid

## Comparación con Spline.



**Figura 5.41** Parámetros con interpolación Spline.

Los datos de entrada son dejados por default. Solo se cambio al método tensionado.



**Figura 5.42** Resumen estadístico de las diferencias entre los valores no tomados en cuenta para la interpolación y el modelo generado con el Subset de datos y el método Spline tensionado.

## 5.5. Representación y salidas de la información

### 5.5.1. Importancia de la representación cartográfica

Durante el desarrollo de este trabajo se han mostrado diversas maneras de ver la información. Estas formas de representación tienen que ver con la finalidad, el manejo correcto de las simbologías, y con otros elementos que conforman la representación final cartográfica. La facilidad que tienen los programas actuales para construir un mapa, ha llevado a un descuido en el manejo de las técnicas que se deberían emplear para la construcción de un mapa. Y por lo tanto a veces no se cumple realmente con el objetivo para el cual fue creado.

La presentación final debe tomar en cuenta que debe cumplir un cierto objetivo, que normalmente es comunicar diversos niveles de información en un espacio geográfico. Las simbologías ocupadas son una codificación visual para resaltar similitudes o diferencias en los datos.

Por lo tanto la selección adecuada de las simbologías ayudará en gran medida a una interpretación correcta y total de la información, la cual deberá estar fundamentada en aspectos fisiológicos de interpretación visual, que permita además entender el significado de los datos de acuerdo a su valor relativo en la representación final.

Así como se deben cuidar desde el origen y colecta de datos, el tratamiento o proceso que sufran, también debe tenerse el mismo cuidado en las salidas o representaciones finales, ya que una mala representación puede mostrar datos o información incompleta, sobrada, confusa y en algunos casos lo contrario a lo que se requería.

Para llevar a cabo una correcta representación cartográfica, aparte de tener en cuenta los aspectos fisiológicos, también se debe incluir una interacción entre los autores, redactores y cartógrafos. Una vez que se entiende la variable a manejar, se prosigue al manejo de las variables visuales para poder entonces: representar, distinguir, manejar y especializar aquellos objetos y fenómenos que deben representarse.

La utilización de los modelos está relacionado con el nivel de la calidad de los datos, con el tratamiento, organización y su representación cartográfica.

En la representación se tienen que incluir los aspectos relacionados a las nuevas formas o plataformas existentes para el manejo de mapas impresos, mapas de consulta, y mapas dinámicos locales o en Internet.

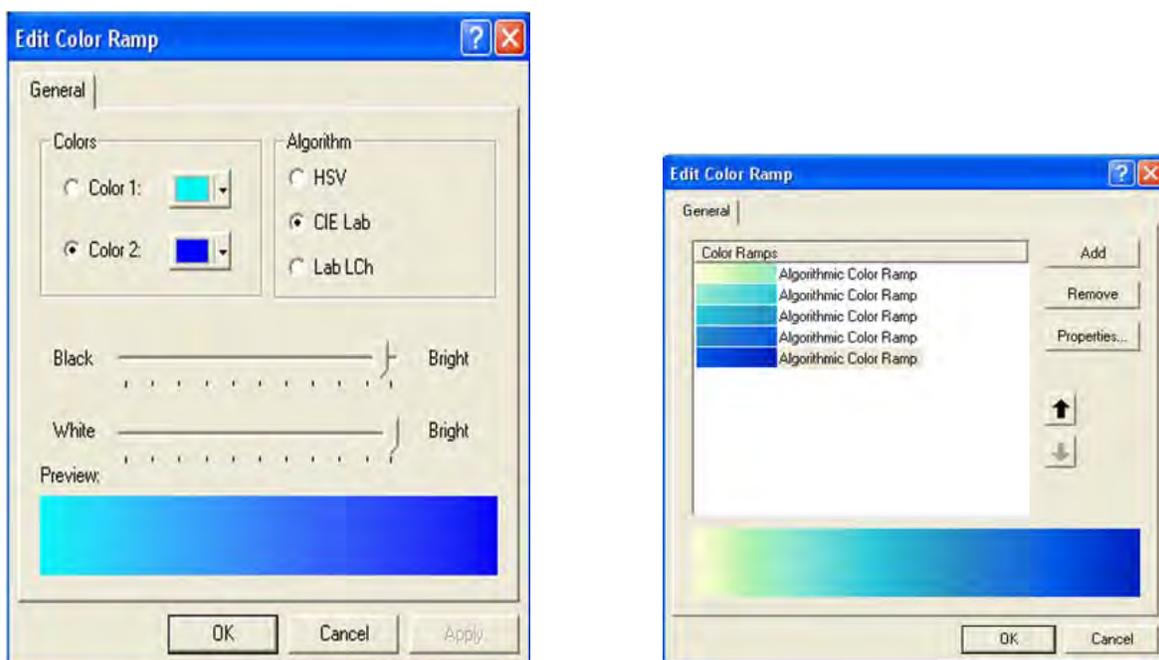
El modelo batimétrico puede cumplir diversas funciones, desde la más básica que es mostrar la forma del fondo de la zona estudiada, hasta mezclarse con otra información como por ejemplo: presión, temperatura, salinidad entre otras; que serviría para otros objetivos finales. Inclusive insertarse en un modelo de escala más grande.

Por lo tanto en este trabajo se han realizado diversas representaciones de la información para ver o resaltar en cada una de ellas algún aspecto. Los valores de gradiente predominan en las representaciones debido al tipo de dato que es numérico.

### 5.5.2. Simbologías

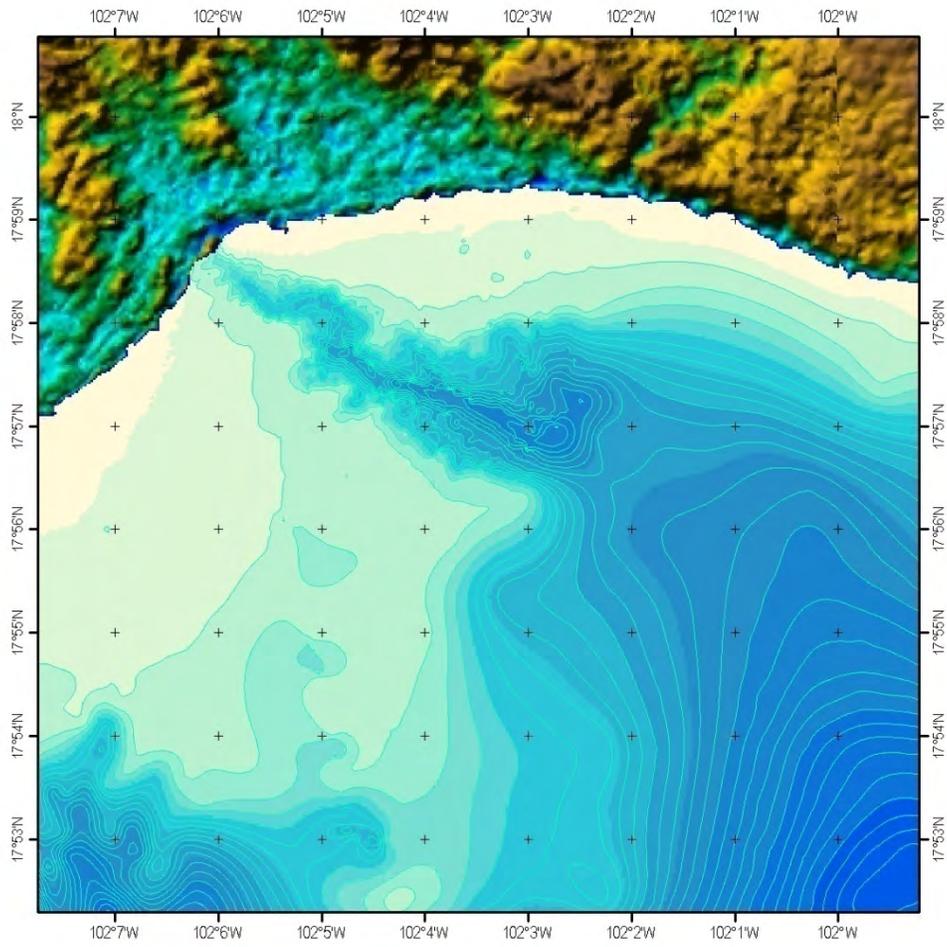
Para generar las salidas se creó una paleta de colores para tener una buena visualización de la batimetría. Como no hay una paleta con los colores adecuados para aplicarle al modelo, se crea una en el sistema de información geográfica.

Se da un clic sobre la barra de color que tiene el raster y luego en cada *Color Ramp*, a la cual se le modifican los colores deseados, tomando en cuenta que haya continuidad en la paleta. Por ejemplo, habrá que poner en el primer color de la segunda rampa el segundo color de la primera. Mediante prueba y error se afina la paleta para quedar al final con 5 rampas.



**Figura 5.18.** Paleta de colores que se aplica al modelo batimétrico, para buena visualización.

Con base a este raster de interpolación de *Spline* genero las curvas a cada 20 m.



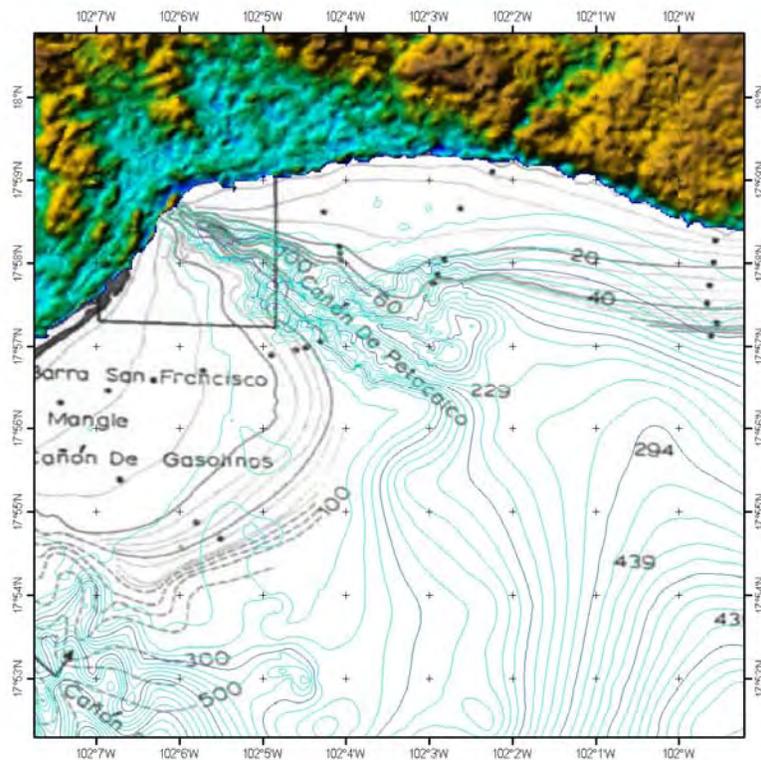
**Figura 5.19.** Modelo digital integrado Tierra-Mar con isobatas a cada 20m.

## 6. RESULTADOS

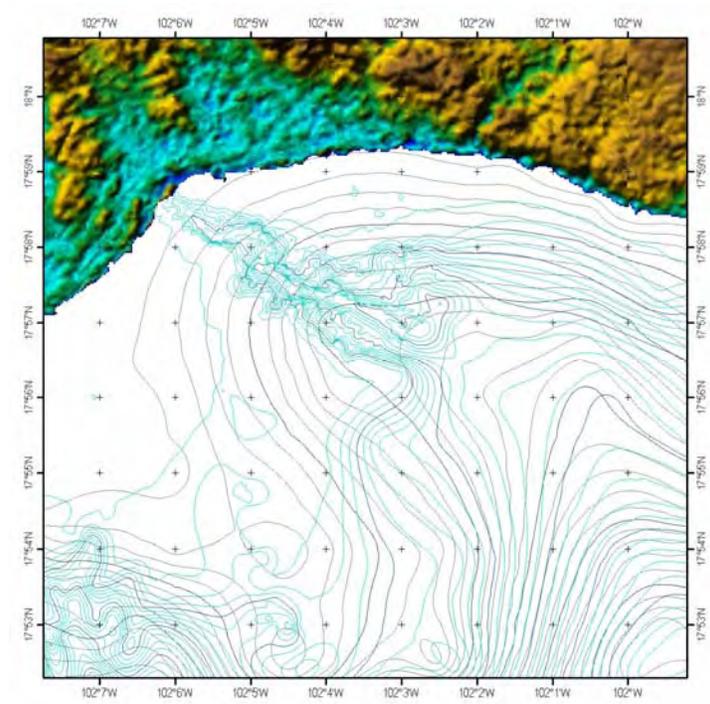
A partir de las salidas de los distintos métodos de interpolación, se eligió el resultado con Spline con el cual se generaron los mapas que se presentan en este capítulo que se usa para describir el Cañón de Petacalco. Estos mapas muestran en esencia el modelo digital integrado Tierra-Mar, los cuales son una conjunción. Se considera en la parte de tierra el modelo digital de elevación derivados de satélite, de la base de datos ASTER y para la parte de mar, el modelo batimétrico desarrollado en este trabajo, con una resolución espacial de 25 metros, el cual es adecuado dada la densidad de puntos con la que se cuenta.

La variable  $z$ , está estructurada, en ambos modelos digitales, con una estructura regular, es decir que mantiene un  $\Delta x$  y un  $\Delta y$  constantes.

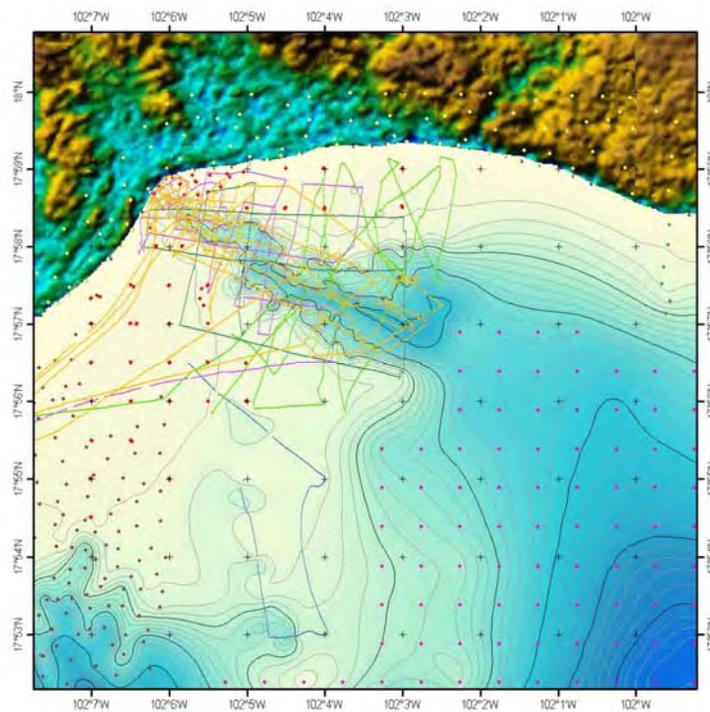
### 6.1. Mapas temáticos



**Figura 6.1.** Comparación de isobatas del mapa del artículo de Reimnitz y Gutierrez Estrada [18] y curvas generadas a partir del modelo batimétrico generado con Spline.



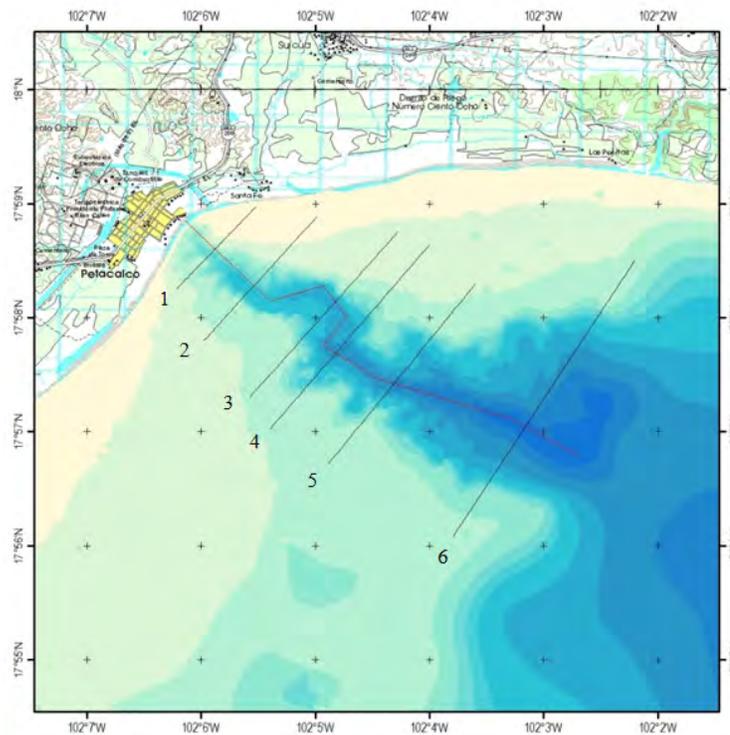
**Figura 6.2.** Comparación de isobatas generadas a partir de los datos de GEBCO (gris) e isobatas generadas a partir del modelo batimétrico resultante (azul).



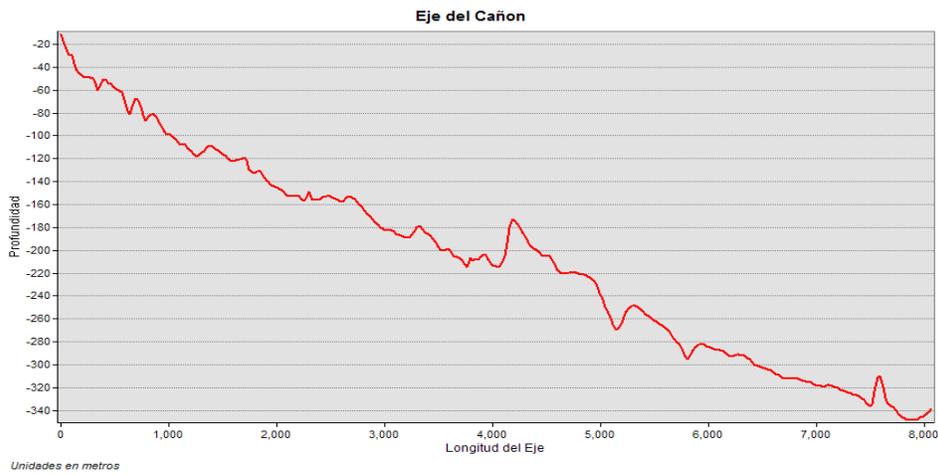
**Figura 6.3.** Distribución de las mediciones de todas las fuentes con isobatas a cada 20m, con el modelo batimétrico que tiene la paleta de colores creada en el capítulo 5.5.2.

El perfil del eje del cañón, sirve para tener otra visión de los valores puntuales que se generaron con el modelo batimétrico. Se extrajo una sección buscando que represente el eje del cañón, el cual está formado por un conjunto de segmentos de líneas conectadas donde hace un quiebre el cuerpo del cañón, de manera que se represente la parte más profunda del mismo, conforme se aleja de la costa. El perfil del eje del cañón (Figura 6.4) va de -10 metros a -350 metros, cubriendo la zona en que la calidad de los datos es la mejor, porque los sondeos se realizaron con ecosonda.

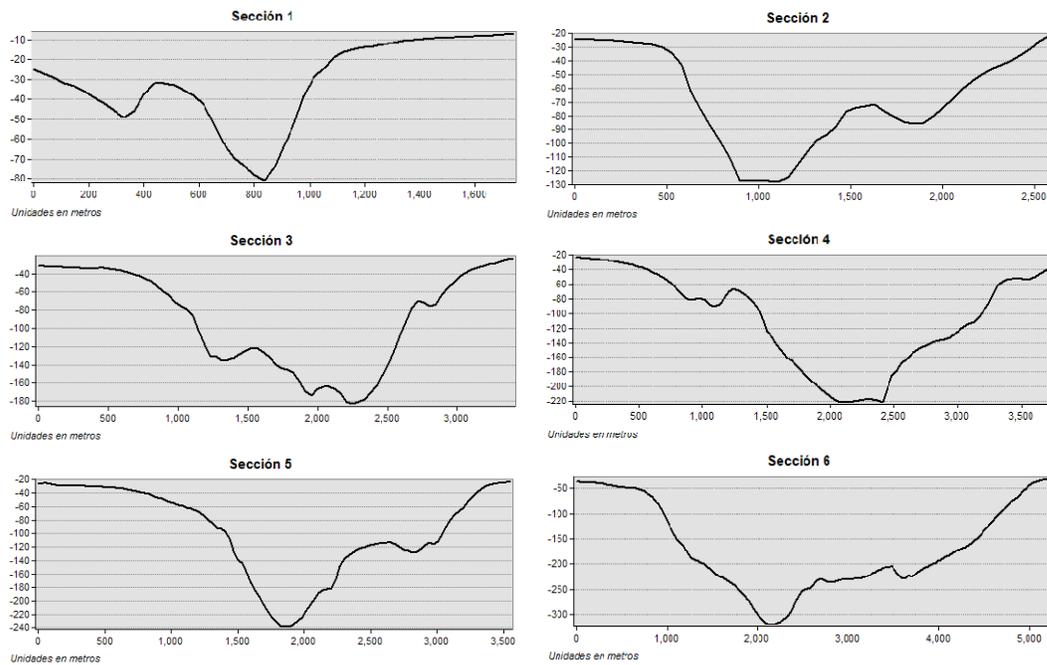
Las secciones son líneas trazadas, idealmente perpendiculares al eje del cañón, con longitudes variadas dependiendo el ancho que alcanza el cañón en esa región.



**Figura 6.4.** Mapa con batimetría y cartas topográficas de INEGI, sobre el cual se trazó el eje y secciones del cañón.



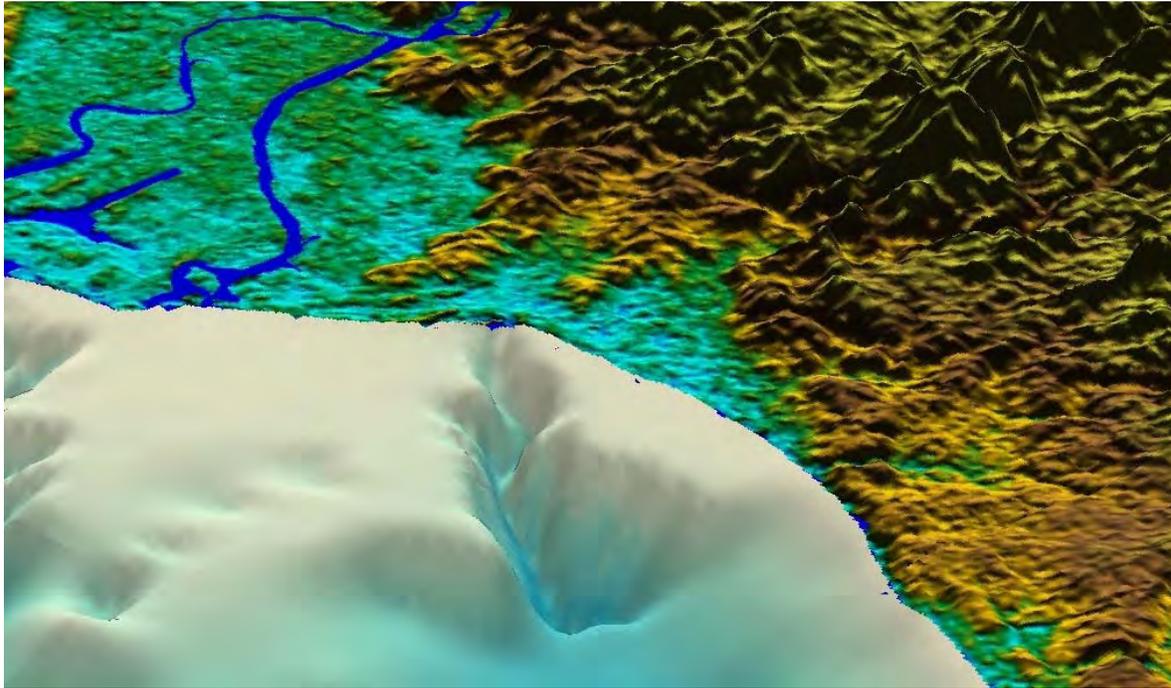
**Figura 6.5.** Perfil del eje del cañón. Las unidades están en metros.



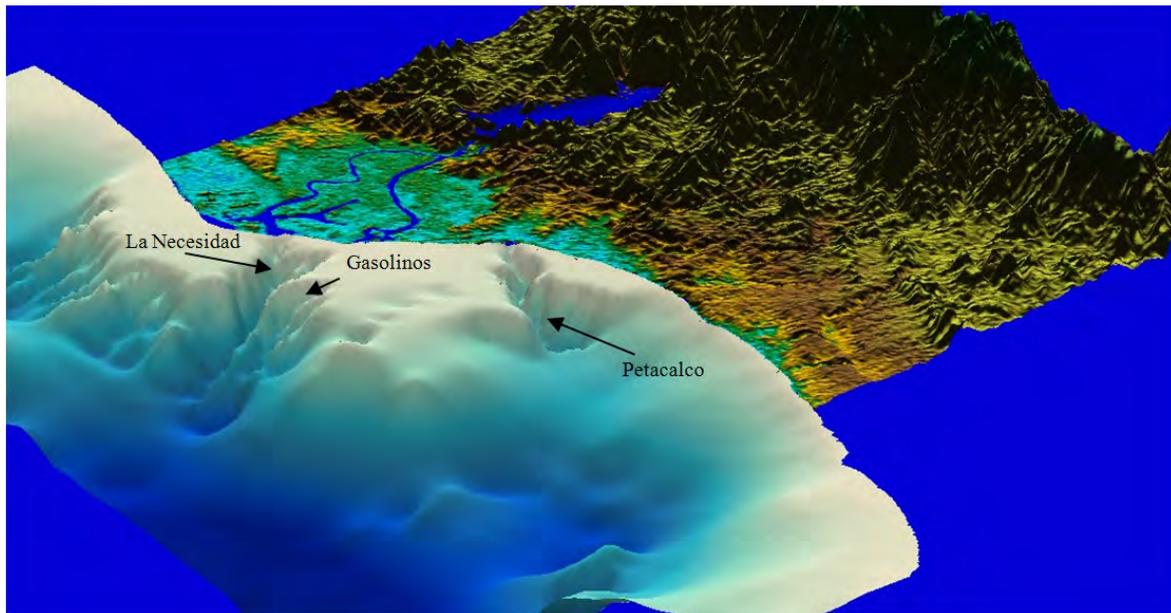
**Figura 6.6.** Muestra las secciones en base al modelo batimétrico generado con Spline.

Nota: La escala vertical y horizontal varía en cada sección.

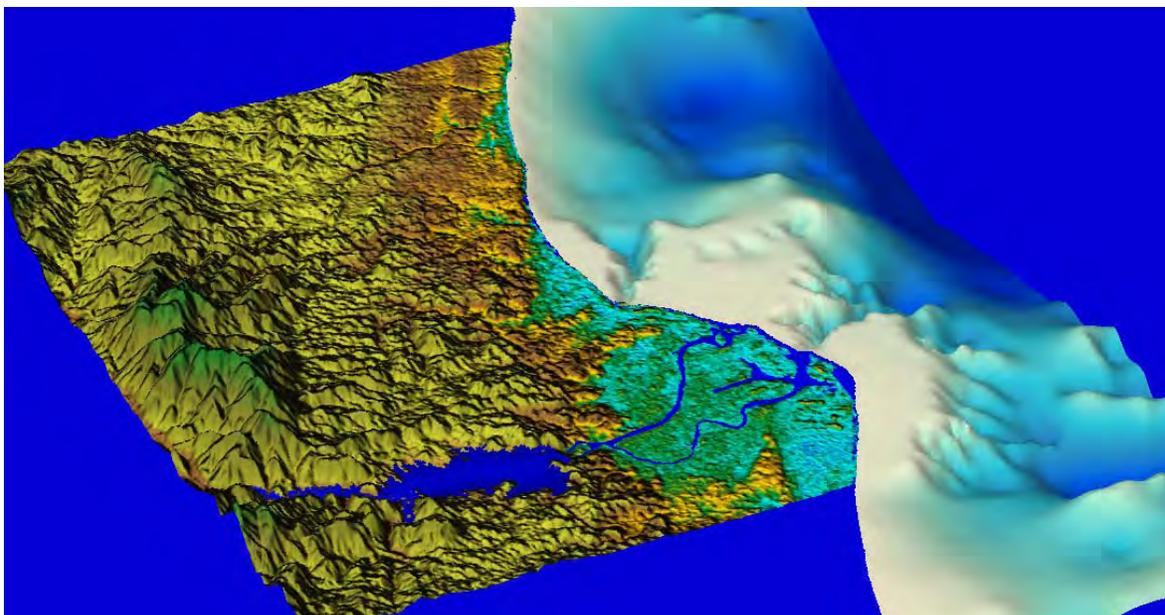
## 6.2. Modelo digital de elevación en tres dimensiones



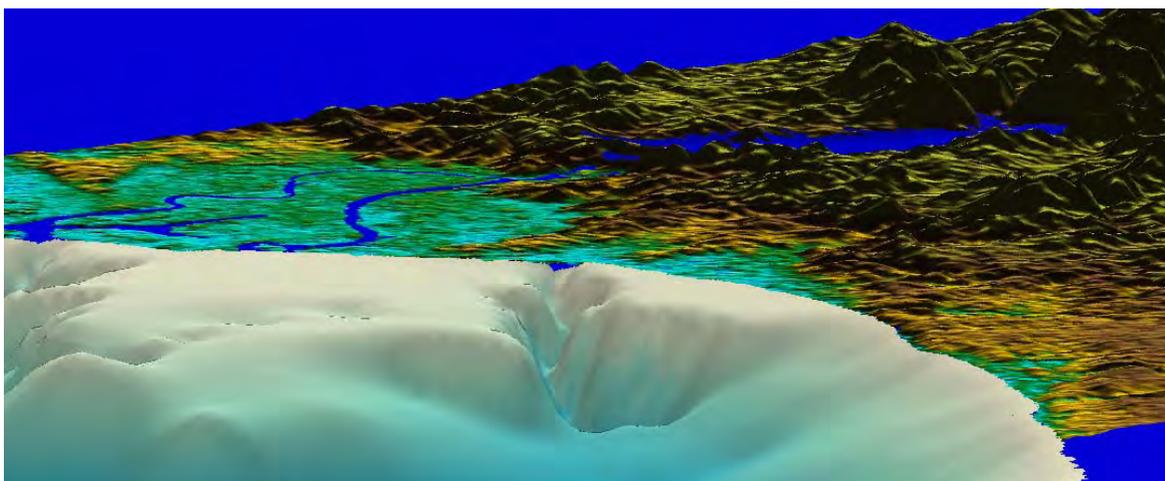
**Figura 6.7.** Vista sobre el Cañón de Petacalco en dirección Sur-Oeste, la parte de mar es en base al modelo digital generado con Spline, en tierra, un despliegue del modelo digital de ASTER.



**Figura 6.8.** Ubicación de los cañones de Petacalco, de la Necesidad, y de Gasolinos vistos desde una posición Sur-Este.



**Figura 6.9.** Vista de los modelos digitales en conjunción, Tierra y mar, en los cuales se observa el delta del Río Balsas y la planicie deltaica submarina, la cual es truncada en cada descarga del río por los cañones.



**Figura 6.10.** Vista sur del Cañón de Petacalco.

## 7. CONCLUSIONES

No existe un método de interpolación universal, la elección del mejor depende de los datos con que se disponga y de como se comporten dichos datos.

Para definir que método de interpolación se utilizaría en este trabajo, se hizo una prueba con cada método que ofrece Arcgis (*Krigging*, *IDW*, *TIN*, *Spline*, *TopoGrid*), y una vez que se hizo la interpolación, se generaron las isobatas con las cuales se tomó la decisión de utilizar el resultado de *TopoGrid* ya que se ajustaba a los datos reales, describía mejor la topografía de fondo marino y visualmente era mejor.

El modelo generado con TIN se desechó, debido a que como se conoce la variable que se está modelando, teóricamente se sabe que el comportamiento de la topografía no es lineal entre dos puntos, por lo tanto la red de triángulos no funciona en este caso. El generado con IDW tampoco resultó, ya que los puntos no son dependientes entre sí y por la falsa generación de islas dentro del modelo. El método Kriging no se usó, ya que no se pudo validar un modelo a la nube de covarianzas de los datos, y al hacer el análisis con el subset, el modelo que dio menor error medio en una muestra aleatoria de puntos fue el TopoGrid, seguido de Kriging y por último el Spline, ya que con éste, se suavizó la superficie.

El modelo batimétrico digital, tiene como ventaja que es de fácil manejo y se puede actualizar de manera sencilla, cuantas veces se requiera, además, su tratamiento numérico no resulta complicado.

El modelo batimétrico también permite realizar simulaciones de la dinámica oceánica, la cual se ve afectada por la topografía del fondo marino. La calidad de las simulaciones y modelos de estos fenómenos físicos está directamente relacionado con la calidad de los datos que se tengan de las propiedades del terreno, en este caso a la precisión y exactitud del modelo digital de batimetría generado en este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bozada y Toledo, *El delta del Rio Balsas, Medio Ambiente, pesquerías y sociedad*. INE-SEMARNAT, 2002.
- [2] Burrough, P.A., *Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment*. Monographs on Soil and Resources Survey. No.12. Oxford University Press. 1986.
- [3] Carter J. R. *Digital representation of topographic surfaces*. Phtogrametric Engineering & Remote Sensing, vol. 54, nº 11, 1988.
- [4] Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), *Evaluación del impacto ambiental marino por la descarga térmica de la C. T. Petacalco*. Informe Técnico, 1995.
- [5] Coleman, J.M. *Processes of deposition & Models for exploration*. Second Edition, International Human Resources Development Co. Boston.EUA.
- [6] Comisión de la Conurbación de la Desembocadura del Río Balsas (CONURBAL), *Plan de Ordenación de la Zona Conurbada de la Desembocadura del Río Balsas*. Cuatro Vols. y un Anexo Gráfico, 1978.
- [7] Consejo de Recursos Minerales (CRM), *Monografía Geológico-Minera del Estado de Michoacán*. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI). Coordinación General de Minería. México, 1995.
- [8] Correa P., G., *Geografía del Estado de Michoacán*, Geografía Física, Gobierno del Estado de Michoacán. México, 1974.

- [9] Environmental Systems Research Institute, Manual of ArcGis Desktop, *Spatial Analysis*.
- [10] Gutiérrez-Estrada, M, *Geología Marina del Delta del Río Balsas, Michoacán*, México, Tesis. Facultad de Ingeniería. UNAM, México, 142 p., 1969.
- [11] Gutiérrez Estrada, M., *Fisiografía y Sedimentología del Delta del Río Balsas*, Michoacán, Méx. Vol. 93 Boletín del Instituto de Geología UNAM, 1971.
- [12] Jaqueline Carpine-Lancre, Robert Fisher, Brian Harper, Peter Hunter, Meirion Jones, Adam Kerr, *History of GEBCO*, March 2003.
- [13] Miguel F. Lavín – Editor, *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 3, Septiembre 1997.
- [14] Miller, C. and La Flamme. *The digital terrain model-theory and applications*. Photogrammetric Engineering, 1958.
- [15] Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo, Tomo CXLIV No. 26.
- [16] Petri, G. and Kennie, *Introduction to terrain modelling-application fields and terminology*, 1990.
- [17] Peucker, *The triangulated irregular network*, Department of Geography, University of western Ontario, 1975.
- [18] Reimnitz and Mario Gutierrez-Estrada, *Rapid changes in the head of the rio Balsas Submarine Canyon System*, U.S. Geological Survey, Instituto de Geología, UNAM, Mexico, 1970.

- [19] Sea-Bird Electronics, Inc, *User Manual, Version 003, SEACAT PROFILER*, SBE 19plusV2.
- [20] Secretaría de Marina (SEMAR), *Compendio de Hidrografía*, México, 1974.
- [21] Smith, Goodchild, Longley, *Geospatial Analysis*, 3rd edition, 2006-2009

#### REFERENCIAS DE INTERNET

- [22] General Bathymetric Charts of the Oceans.  
<http://www.gebco.net/>
- [23] Instituto Nacional de Estadística y Geografía  
<http://www.inegi.org.mx>
- [24] Secretaría de comunicaciones y transportes. Historia de la cartografía.  
<http://dgp.sct.gob.mx/index.php?id=444>
- [25] Secretaría de Marina.  
<http://www.semar.gob.mx/digaohm/hidrografia/levantamientos.htm>
- [26] Servicio Mareográfico Nacional, UNAM.  
<http://www.mareografico.unam.mx/Mareografico/>
- [27] The Fenner School of Environment and Society. Universidad Nacional de Australia.  
<http://fennerschool.anu.edu.au/publications/software/anudem.php>
- [28] Universidad de Cantabria. Esquema de rumbos de un portulano.  
<http://ocw.unican.es/humanidades/teoria-y-metodos-de-la-geografia.-evolucion-del/material-de-clase-1/archivos-modulo-3/mapas-en-t-y-portulanos/esquema-de-rumbos-de-un-portulano>