

# CONTRIBUCION DE LA DECONVOLUCIÓN DE EULER Y LA SEÑAL ANALÍTICA EN 3D AL ANÁLISIS DE RIESGOS POR FALLAS EN EL GRABEN DE VALLE DE BANDERAS.

## 3D EULER DECONVOLUTION AND ANALYTIC SIGNAL CONTRIBUTING TO FAULT RISK ANALYSIS IN THE VALLE DE BANDERAS GRABEN.

Miguel A. Alatorre-Zamora<sup>1</sup>, José Rosas-Elguera<sup>1</sup>, Gerardo Pérez-Rodríguez<sup>1</sup> y José O. Campos-Enríquez<sup>2</sup>,  
Roberto Maciel-Flores<sup>3</sup>

<sup>1</sup> [alatorre2004@hotmail.com](mailto:alatorre2004@hotmail.com) / <sup>2</sup> [ocampos@tonatiuh.igeofcu.unam.mx](mailto:ocampos@tonatiuh.igeofcu.unam.mx)

Recibido: enero 27, 2011 /Aceptado: noviembre 22, 2011 /Publicado: enero 11, 2012

**RESUMEN.** Se ha realizado un estudio de amenazas y riesgos por fallas y hundimientos en el Municipio de Bahía de Banderas, Nayarit, aplicando la deconvolución de Euler y la señal analítica en tres dimensiones a datos de anomalías aeromagnéticas que se hallan libres en Internet, para la inferencia de las mismas fallas. El Municipio de Bahía de Banderas es un polo de gran desarrollo turístico para el país, y se localiza sobre un valle aluvial formado en una estructura tectónica que puede tener cierta actividad, denominada graben de Valle de Banderas. Algunos estudios exhiben la presencia del graben y de una incipiente actividad tectónica en el mismo.

Los resultados obtenidos infieren la presencia de grandes fallas orientadas preferentemente NE-SW delimitando un hundimiento del basamento granítico que forma al graben de Valle de Banderas. La frontera NW de dicho graben se constituye en una amenaza por hundimientos para las edificaciones de los mayores núcleos poblacionales del Municipio de Bahía de Banderas, ya que en su densidad de fracturamiento calculada se hallan dentro de la influencia de tales fallas.

**PALABRAS CLAVE:** Deconvolución de Euler, riesgos, fallas, graben.

**ABSTRACT.** A risk study by faults and subsidence at the Municipio de Bahia de Banderas in the State of Nayarit was realized. To do this study the 3D Euler deconvolution and analytic signal were applied to aeromagnetic data to infer faulting. The Municipio de Bahia de Banderas is a high development touristy pole for Mexico, and is located in an alluvial valley formed in a tectonic structure with some activity, called as Valle de Banderas graben. Some studies exhibit the presence of the graben with an incipient tectonic activity.

The obtained results infer the presence of great faults oriented with NE-SW direction; these faults bound a settlement of the granitic basement that forms the graben of Valle de Banderas. The NW boundary of such a graben constitutes a settlement risk for the facilities of the main populations of the Municipio de Bahia de Banderas, due to they are inside an area of equal fracturing density of that inferred faults.

**KEYWORDS:** Euler deconvolution, risks, faults, graben.

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Topografía, División de Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Revolución 1500, CP.

<sup>2</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Del. Coyoacán, cp. 04510, México, D. F., México.

<sup>3</sup> Centro Universitario de Ciencias Biológicas Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. Km 15.5 Carretera a Nogales, Predio las agujas, Zapopan, Jalisco, México

## INTRODUCCION

La Geofísica Aplicada se ha empleado exitosamente a través de los años en diversas problemáticas del subsuelo, desde el amplio desarrollo que ha tenido para la exploración de hidrocarburos, hasta fenómenos ambientales, pasando por exploración de minerales, de agua subterránea y cuestiones geotécnicas o arqueológicas [37; 33].

Las estructuras geológicas más investigadas por la Geofísica lo son sin duda las fallas, definidas como planos que ocurren ante el rompimiento de un cuerpo de roca y el consiguiente desplazamiento y separación del cuerpo en dos partes [11]. Ante la presencia de fallas ocurre el desarrollo de cuerpos minerales de valor económico, aumenta la permeabilidad para que exista un yacimiento geotérmico explotable para la producción de energía eléctrica, o se pueden concentrar aguas subterráneas. Por otra parte, el rompimiento provoca vibraciones o desplazamientos que pueden tener graves efectos en la superficie y que conllevan un riesgo, y es en ese sentido que se les considera en este trabajo.

Varias ciudades de la República Mexicana están padeciendo de afectaciones por desplazamientos, hundimientos y agrietamientos. El caso más conocido a nivel nacional es el de la Ciudad de México [15]; agrietamientos en edificaciones por estos fenómenos del subsuelo también ocurren en ciudades importantes como Aguascalientes, Salamanca, Celaya, Irapuato, Morelia, San Luis Potosí y Querétaro [14; 27; 1; 16; 9; 4], lo que se está convirtiendo en un problema serio. Al occidente de México, concretamente en la ciudad de Ameca, existen evidencias de la aparición de grietas desde hace más de 25 años, afectando en la actualidad a más de 700 edificaciones y pasando por el centro de la ciudad.

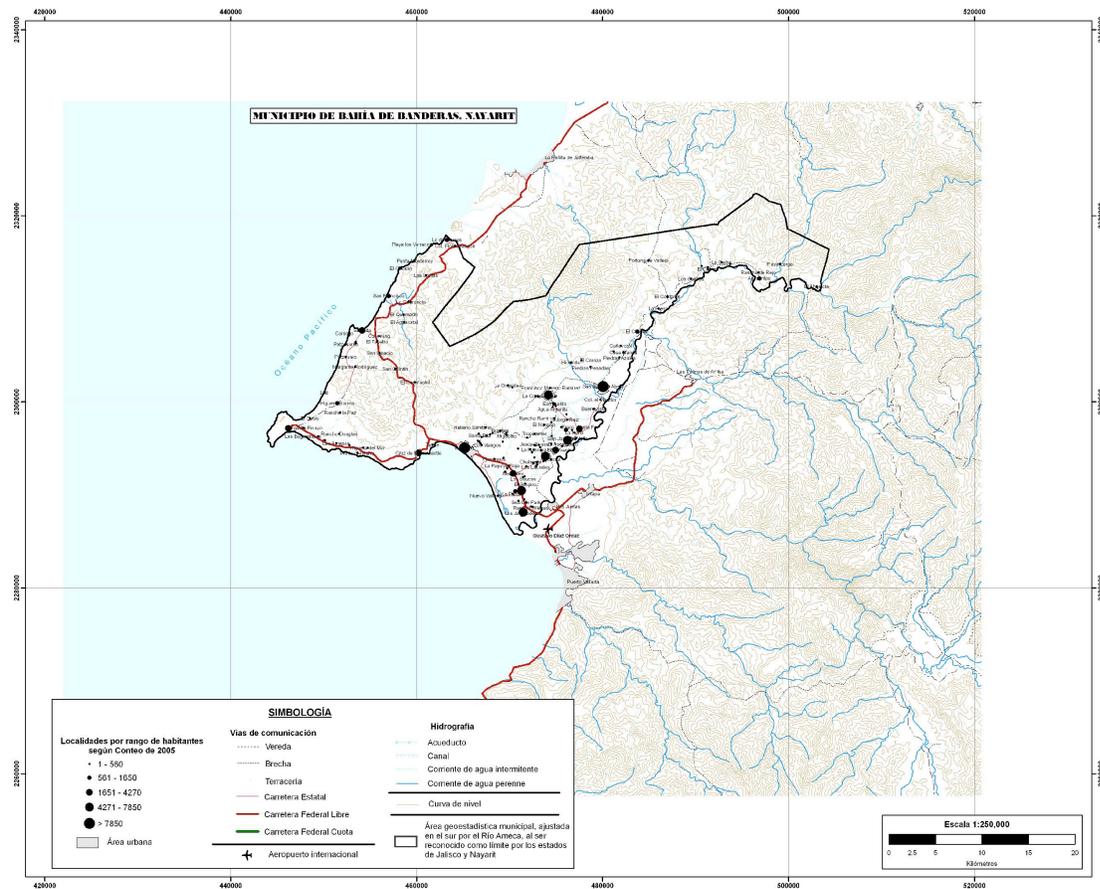
Todos estos casos tienen algunos denominadores comunes; los que se pueden considerar como principales son la distribución de estas poblaciones sobre valles aluviales formados sobre estructuras tectónicamente distensivas, conocidas como rifts, ubicadas a lo largo del Eje Neovolcánico; otro común denominador es que los agrietamientos y hundimientos son debidos básicamente a la actividad tectónica o a la reactivación de las fallas que delimitan a estos sistemas tectónicos, y en cierta medida a la sobreexplotación de los mantos acuíferos.

Otras regiones del país que se hallan en ambientes geológicos similares pero que no han sufrido de agrietamientos en sus edificaciones deben considerar, para su desarrollo, el poder determinar si en alguna zona se presentarán agrietamientos por efectos de la subsidencia, y en caso de que se presenten, establecer el nivel de riesgo de la zona en cuestión, de tal manera que no se afecten futuras construcciones. En la actualidad no es posible predecir con precisión la aparición de agrietamientos en lugares específicos, aunque existen varios trabajos encaminados hacia ese fin [22; 23; 20; 36; 21]. En este estudio se aplicará una técnica de interpretación de datos aeromagnéticos relativamente novedosa para la predicción a largo plazo de la aparición de fallas y grietas, localizando fallamientos e irregularidades en el basamento rocoso que subyace a la capa de material sedimentario, y correlacionándolos con fallas vecinas preexistentes. Este análisis se realiza principalmente sobre el Municipio de Bahía de Banderas, Nayarit, debido a que, por una parte, es considerado como un fuerte polo de desarrollo turístico en el país y se localiza sobre un graben con evidencias de actividad tectónica [30], y por otra parte, no es tan fácil apreciar fallas muy definidas y su área de influencia, tan importante en estudios de riesgos. El análisis se ha realizado empleando una herramienta de inversión conocida como deconvolución de Euler [38].

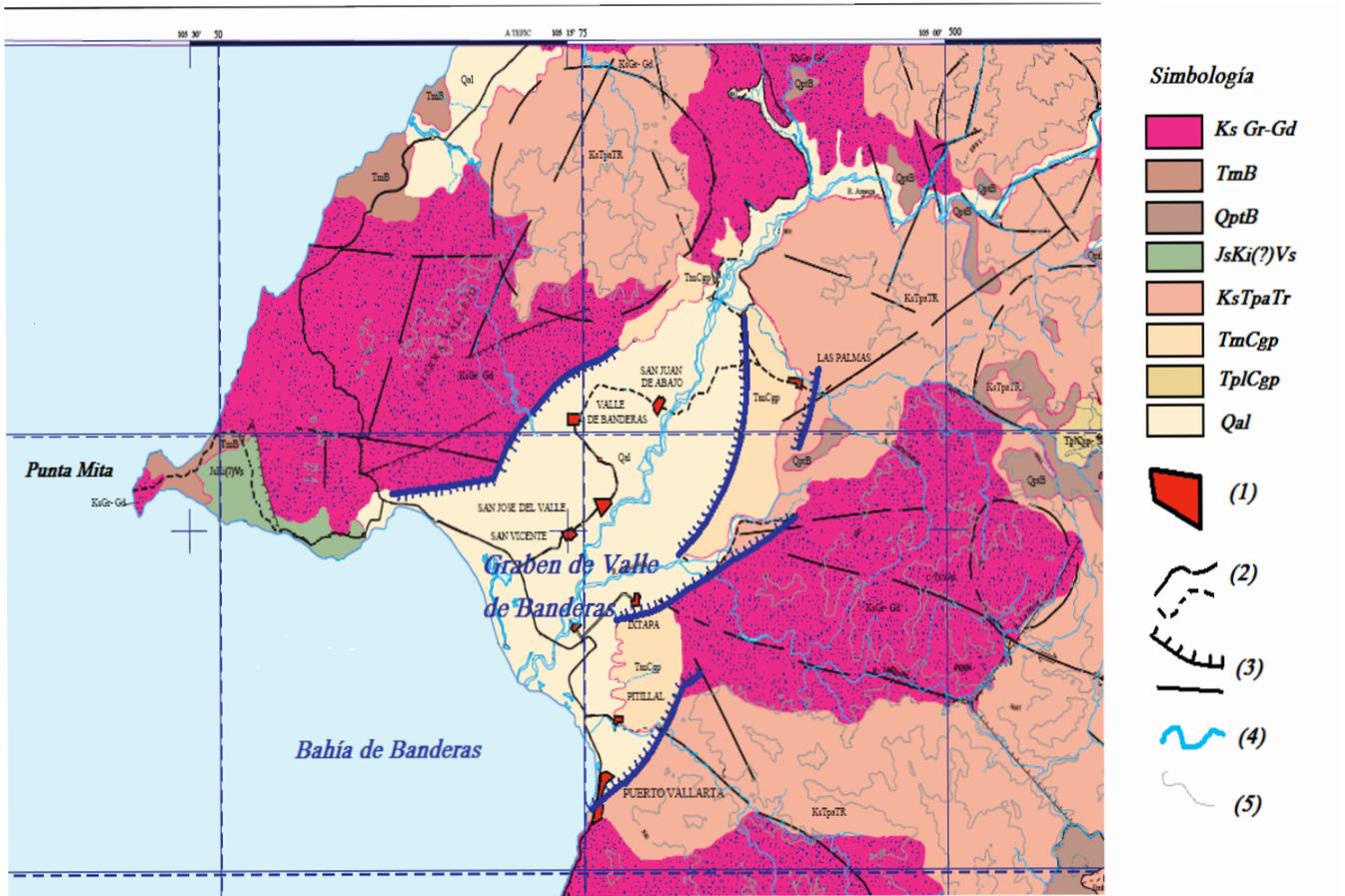
Cabe aclarar que se analiza e infiere la probable aparición de la amenaza o peligro natural de un fracturamiento y/o hundimiento por un deslizamiento de cuerpos de roca debido a actividad tectónica sin realizar algún cálculo posterior en términos probabilísticos tal como lo refiere el Manual del Cenapred [10]. Sólo se calcula el área de influencia de un fallamiento determinado que ha sido inferido mediante la deconvolución de Euler. Por otra parte, en el Manual referido [10] no hay mención alguna de tales amenazas naturales. Lo que mejor se aproxima es desarrollado en el capítulo sobre deslizamientos de laderas, aunque éste es un fenómeno muy distinto al que aquí nos ocupa.

## DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO Y MARCO GEOLOGICO REGIONAL

El Municipio de Bahía de Banderas se localiza en el extremo suroriental del Estado de Nayarit y colinda con el Municipio de Puerto Vallarta, Jalisco (Figura 1), al occidente del país. Bahía de Banderas es un Municipio de reciente creación, surgiendo de la división del Municipio de Compostela, Nayarit. Su actividad económica principal reside en la industria turística, de ahí la importancia de estudios de este tipo. Además, las poblaciones con mayor número de habitantes se hallan sobre el valle aluvial denominado Valle de Bahía de Banderas o Valle de Banderas y de hecho, su cabecera municipal se encuentra en el valle (Figura 1), al igual que Puerto Vallarta y otros poblados de Estado de Jalisco. Esto es, comparte al valle de Bahía de Banderas con el Estado de Jalisco.



**Figura 1.-** Municipio de Bahía de Banderas localizado al occidente de México. El límite del mismo se señala con una línea cerrada. La simbología está dada en el recuadro en la parte inferior izquierda. Las coordenadas están dadas en UTM, en kilómetros..



**Figura 2.-** Geología del área de Bahía de Banderas. Simbología: Qal – Cuaternario, aluvión; Qptb – Cuaternario, basaltos; TmCgp – Terciario, conglomerados; Tmb, Terciario medio, basaltos; KsTpaTr – Cretácico superior, tobas; KGrGb – Cretácico superior, granitos; JsKi(?)Vs – Posiblemente Jurásico

El área de Punta Mita, en el extremo noroeste de Bahía de Banderas, contiene tres unidades geológicas principales: granito, basalto y areniscas y conglomerados recientes. Las rocas graníticas predominan en el área que rodea a Bahía de Banderas (Figura 2). La edad de algunos granitos ha sido estimada entre 90 y 100 Ma [12]. Las rocas basálticas en el área de la Fisura Las Coronas no han sido datadas; sin embargo, edades radiométricas de basaltos localizados al norte y noreste de la bahía varían desde 0.48 a 3.4 Ma [26; 34; 35]. La edad de un afloramiento basáltico en Punta Mita es reportada por [17] como de 10.2 Ma.

La presencia del graben del Valle de Banderas en la zona es clara (Figura 2); el río Ameca en combinación con el océano, han aportado los sedimentos que rellenan al graben [6].

Desde un punto de vista estructural, el graben de Valle de Banderas podría representar la frontera NW del Bloque Jalisco [24]. Trabajos batimétricos sugieren que este graben se prolonga mar adentro en lo que se denomina como semigraben de Bahía de Banderas [2; 3]. Observaciones directas parecen indicar que el semigraben de Bahía de Banderas y el graben de Valle de Banderas son una sola estructura, aunque hay un cambio de dirección entre ambos de aproximadamente 30 grados. Este cambio se ha asociado con un episodio tectónico regional ocurrido hace aproximadamente 5 millones de años [2].

El origen del semigraben de Bahía de Banderas se asocia con la separación de Baja California ocurrida en el Mioceno Medio [28], mientras que [13] ubican el origen del graben de Valle de Banderas entre el Mioceno Tardío y el Plioceno Temprano. [13] describen un desplazamiento vertical de casi 600 metros en las fronteras del graben, y un conglomerado fallado en la parte este que sugiere que el patrón extensional ha continuado hasta el Reciente.

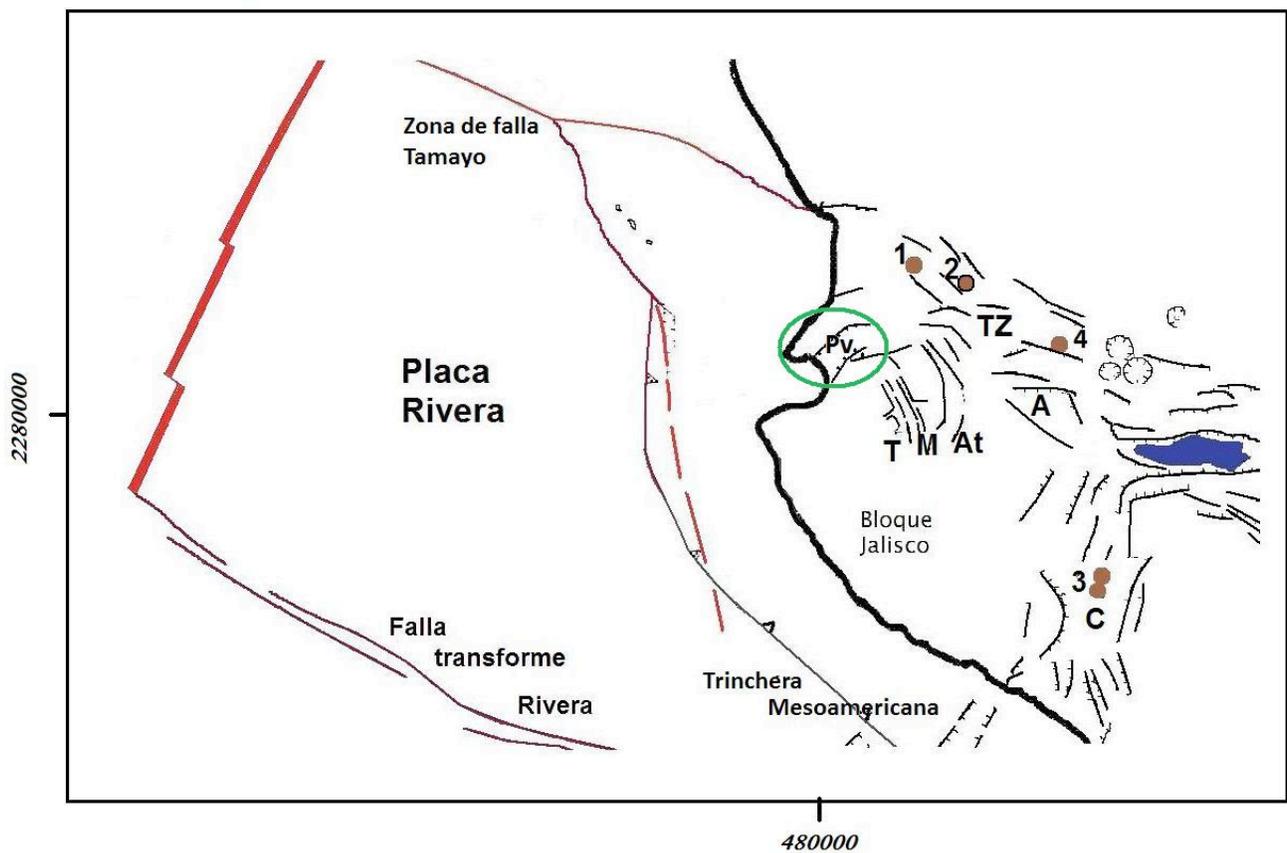
La franja noroeste del graben parece presentar actividad sísmica, de acuerdo a la información recabada por [31]. En el área de Punta Mita la presencia de actividad sísmica e hidrotermal costera sugiere una reactivación tectónica del área.

## ANTECEDENTES

La geología de Bahía de Banderas y del Valle del mismo nombre en que se prolonga tierra adentro ha sido investigada a lo largo de varios años especialmente por su relación con procesos geodinámicos que dieron lugar a la apertura del Golfo de California y a la separación de la península de Baja California.

Recientemente ha despertado el interés de la comunidad en Ciencias de la Tierra, que comenzó por enfocarse a la investigación de los sistemas tectónicos submarinos aledaños (Figura 2). La mayor cantidad de estudios realizados corresponden con ese último punto de vista, además de investigaciones sobre la actividad sísmica de la zona [30].

Son pocos los estudios con técnicas geofísicas desarrollados dentro y en los alrededores del Municipio de Bahía de Banderas, sobre todo para la inferencia de fallas y otras estructuras geológicas. A pesar de lo anterior, los resultados mostrados por estos estudios [3; 6] son muy coincidentes con los resultados expuestos en estudios sísmicos y tectónicos anteriores [30]. Por esta razón, otros resultados que no suelen aparecer en estudios superficiales enriquecen el conocimiento de fallas geológicas enmascaradas y escondidas que pueden conllevar al desarrollo de la prevención general de riesgos a futuro.



**Figura 3.-** Rasgos tectónicos del occidente de México (Modificado de [13]). El Bloque Jalisco es limitado al norte por el rift Tepic-Zacoalco (TZ), y al este por la zona del Rift Colima (C). T, M y At son los grabens

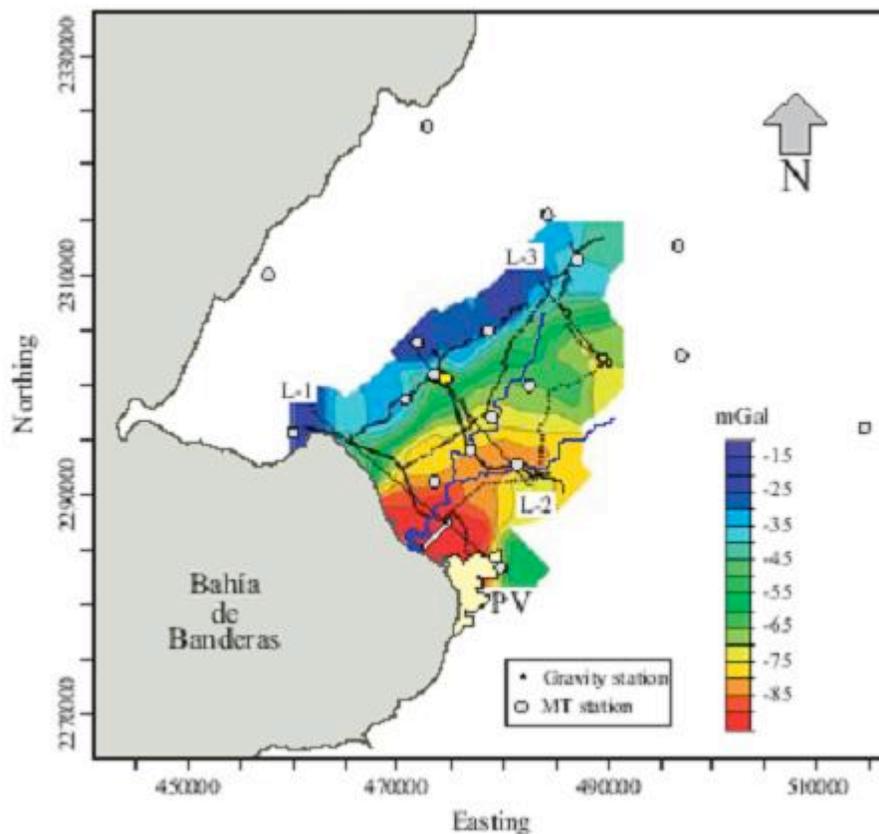
Talpa, Mascota y Atenguillo; A- graben de Ameca; Pv-graben de Valle de Banderas. 1-Volcán Sangangüey; 2-Volcán Ceboruco; 3- Volcán y Nevado de Colima; 4-Volcán Tequila. Encerrada en un óvalo verde se indica el área de estudio.

## **ESTUDIOS GEOFISICOS PREVIOS**

En un estudio reciente se aplican gravimetría y sondeos magnetoteléuricos [6]. La gravimetría investiga variaciones laterales en la densidad de las rocas de la corteza terrestre. Así, zonas rellenas de sedimentos que cubren rocas más densas son relativamente fáciles de investigar mediante esta técnica. Tales zonas se verían como “hundimientos” o valores mínimos en los resultados de gravedad graficados en mapas de intensidades gravimétricas. No obstante, un mapa de este tipo no mostraría sino una idea burda de la presencia de estructuras de riesgo como las fallas. Para definir de manera más clara la ubicación de una falla sería necesario llevar a cabo una interpretación de los datos mediante procesos de modelado directo o por inversión.

Por otro lado, el método magnetoteléurico, que de cierta manera sería el complemento de la técnica eléctrica de resistividad para situaciones más regionales y profundas, se sirve de las leyes de Maxwell, para analizar la resistividad eléctrica relativa a estructuras y cuerpos geológicos muy profundos.

[6] tienen una buena cobertura de estaciones magnetoteléuricas; sin embargo, su trabajo gravimétrico se limita a la cubierta sedimentaria del graben de Banderas (Figura 4), en tres largas líneas que tienden SW-NE combinadas en forma paralela a la boca de la Bahía de Banderas.

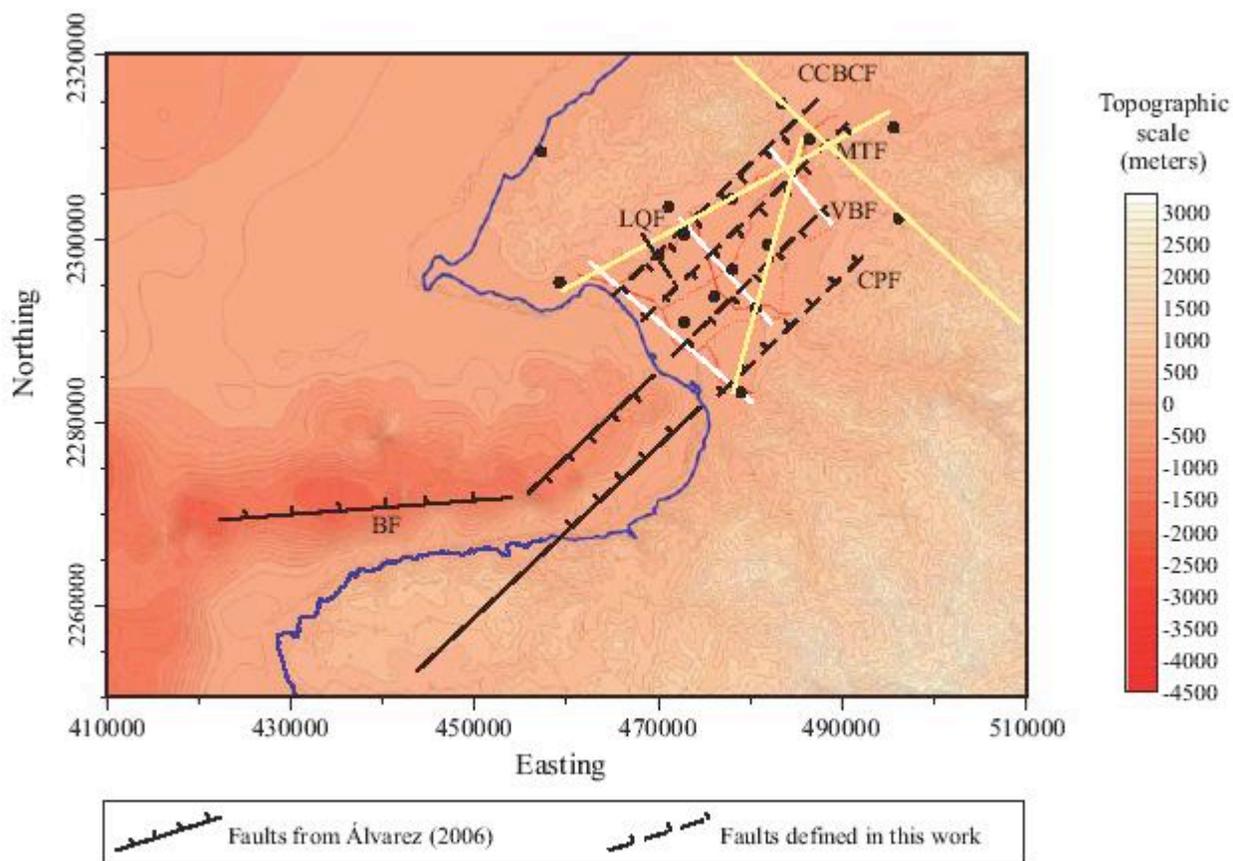


**Figura 4.-** Perfiles gravimétricos interpretados por [6], indicados como L-1, L-2 y L-3, y anomalía de Bouguer completa (tomada de [6]).

El estudio gravimétrico de estos autores fue realizado con el objetivo de modelar el basamento y rastrear cualquier posible continuación tierra adentro de las fallas observadas mar adentro. El plano de gravedad obtenido para la zona muestra la ocurrencia de un sistema tipo graben, donde esfuerzos de separación “abren” las rocas en sentidos opuestos y el hueco formado en medio se rellena de sedimentos. El graben es comúnmente delimitado por fallas de tipo normal bastante apreciables, conocidas como fallas maestras. El basamento es modelado en tres perfiles que fueron seleccionados a través del Valle de Banderas (Figura 4). Además de modelar anomalía de Bouguer, [6] incluyen gradientes horizontales de los mismos perfiles de anomalía de Bouguer. Los valores máximos locales de los gradientes se interpretan como desplazamientos verticales en las rocas basales. [6] asumen que las anomalías de gravedad observadas son debidas principalmente al contraste entre el basamento granítico de densidad promedio de  $2.8 \text{ g/cm}^3$  y el relleno sedimentario del graben, con una densidad combinada promedio de  $2.0 \text{ g/cm}^3$ . El perfil de gravedad más cercano a la boca de Bahía de Banderas muestra una geometría de cuenca amplia.

El máximo grosor estimado para el estrato sedimentario en la boca del valle es de casi 2.5 km, variando en el centro del valle donde se estiman una profundidad máxima al basamento cercana a 2 km y un ancho del graben de casi 17 km. En esencia, el graben del Valle de Banderas es de casi 23 km de ancho en la línea de costa y se angosta hacia el NE a casi 12 km en la parte Norte, donde el espesor sedimentario llega a casi 1.5 km. Un rasgo común de los tres perfiles es una estructura tipo horst de casi 2.5 km de ancho en el fondo del relleno sedimentario. En base a estos modelos y en la topografía del basamento resultante, es

posible asociar una serie de fallas con estas secciones. Las fallas que [6] denominaron como CCBCF (Falla Cabo Corrientes-Bucerías-El Colomo), VBF (Falla del Valle de Banderas), y CPF (Falla Cucharitas-Pitillal) corresponden a fallas previamente identificadas en la bahía [2] cuya traza ha sido extendida ahora dentro del valle. La falla MTF (Falla Mezcales-Tebelchía) es inferida por [6] y parece estar oculta por los sedimentos del valle (Figura 5).



**Figura 5.-** Distribución de fallas en el Valle de Banderas. Las fallas mostradas en la Bahía se tomaron de Álvarez (2005b). Falla Mezcales-Tebelchía (MTF), falla del Valle de Banderas (VBF), falla Pitillal-Cucharitas (PCF), falla Cabo Corrientes-Bucerías-El Colomo (CCBCF), falla Banderas (BF), y falla La Quebrada (LQF) (Tomada de [6]).

En el caso del levantamiento magnetoteléxico se midieron un total de 18 sondeos en Valle de Banderas, con el propósito de localizar posibles cuerpos conductores anómalos vinculados al basamento fallado, es decir, con fallas geológicas. 15 sondeos de MT se realizaron dentro del Valle y tres en los alrededores del mismo [6].

Con los equipos empleados midieron cinco componentes en cinco canales: dos componentes horizontales de los campos eléctricos y tres del campo magnético (llamados  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$  y  $H_z$ ), en un rango de periodos de 0.0025 a 100 segundos. El procesado estándar que realizaron de estos datos incluyó la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier sobre las series de tiempo adquiridas, y una estimación robusta del tensor de impedancia  $Z(r,\theta)$ . Comúnmente  $Z$  se ve afectado por fuentes conductoras que le

provocan dispersión, como fallas locales, la línea de costa e incluso la presencia de agua salada en el subsuelo (efecto conocido como la cuña salina).

Cuando se conocen los valores de  $Z$ , se pueden calcular valores para una resistividad aparente y para la fase de la impedancia. En algunos casos, las curvas de resistividad aparente son iguales, lo que refleja el carácter unidimensional del terreno para una frecuencia medida. Por otra parte, sitios 2-D típicos se caracterizan por tener curvas desiguales. Las estaciones ubicadas dentro del Valle son claramente afectadas por la estructura de graben y reflejan una tierra 2-D. El comportamiento observado se puede explicar por profundas unidades de granito bordeando un graben altamente fallado. Los granitos son bastante homogéneos para una amplia banda de frecuencia, de ahí la respuesta 1-D, mientras que las estructuras de fallas dentro del graben promueven una polarización de la corriente a frecuencias por debajo de 10 Hz.

Finalmente, [6] modelan tres secciones magnetotelúricas usando un algoritmo matemático. Estas secciones dan una idea sobre la estructura eléctrica hasta 10 km de profundidad. Una de estas secciones corta diagonalmente la cuenca del graben, y muestra que el basamento se ve más profundo, implicando que esta diferencia en profundidad ha sido inducida por fallamiento. Otra de estas secciones corta al graben en su parte norte y revela un basamento resistivo relativamente somero, lo que evidencia que en esta latitud el graben se vuelve más somero.

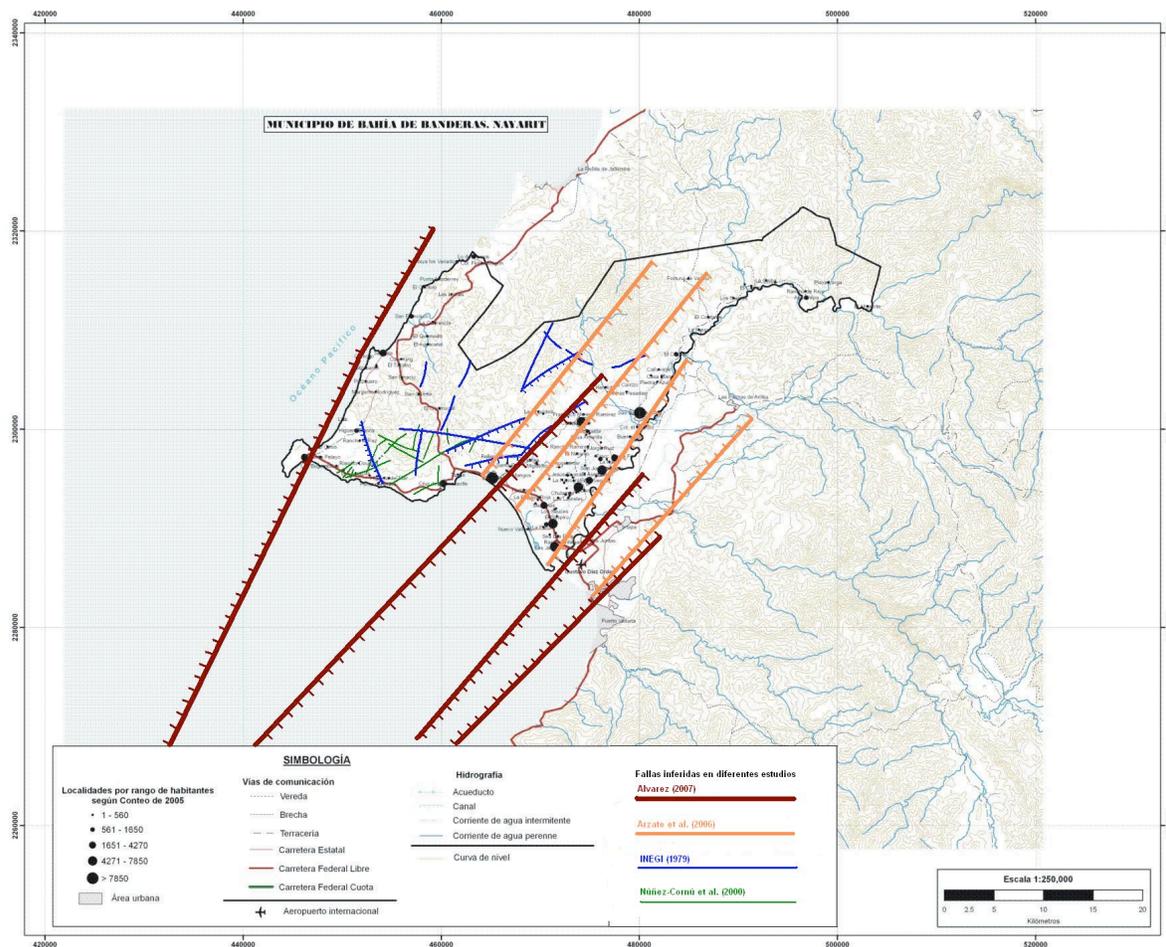
En base a los cambios observados en el espesor relativo de la unidad conductiva, [6] interpretaron varias fallas a lo largo de las tres secciones MT. Aunque la localización precisa de estas fallas no es posible solo a partir de las secciones MT, las diferencias en profundidad a un nivel de conductividad permite controlar tal localización entre sitios contiguos.

Estudios de otra índole exhiben resultados concernientes a la localización de fallas en el área del Municipio de Bahía de Banderas. [30] en una investigación sobre la actividad hidrotermal reciente en Bahía de Banderas, resaltan que dicha actividad parece mostrar un tectonismo activo reciente en la zona, y ese es un punto a considerar para relacionar al área en general con estructuras geológicas de riesgo. Entre sus resultados muestran la ocurrencia de fallas muy locales.

[3] mediante un modelo de elevaciones digital para Bahía de Banderas y su extensión mar adentro, construido con 6872 sondeos batimétricos, identifica varias cuencas y fallas hasta ahora no reportadas. Estas estructuras se correlacionan con fallas antes reportadas y con la actividad sísmica registrada recientemente; dentro de la bahía de Banderas subsiste un cañón submarino cuya asimetría [3] propone como una estructura de tipo semigraben (Figura 11 de [3]).

### **Resumen de fallas inferidas en estudios previos**

En una primera fase se desarrolló un resumen de estructuras geológicas inferidas o determinadas en los estudios previos. Dicho resumen se esboza en la figura 6.



**Figura 6.-** Análisis resumido de fallas geológicas inferidas en estudios recientes. En rojo del estudio de [3], en naranja de [6], en azul las fallas indicadas en los planos de INEGI (1979) y en verde del estudio de [30]. La línea negra encierra al límite del Municipio de Bahía de Banderas, Nayarit.

En este mapa (Figura 6) es posible apreciar que existe una serie de fallas regionales de orientación SW-NE, que le han dado origen al graben y a la Bahía misma. Estas fallas podrían ser sísmogénicas. También podrían provocar hundimientos de la superficie, con lo que se pueden ver afectadas las edificaciones localizadas sobre ellas. Otro problema que pueden ocasionar es el deslizamiento de material, especialmente donde las pendientes y el tipo de roca lo permitan.

## METODOLOGIA

Para inferir grandes fallas existentes en el Municipio de Bahía de Banderas que pudiesen constituir una amenaza por hundimientos o desplazamientos en las edificaciones se ha analizado un conjunto de datos aeromagnéticos obtenidos a 300 msnm; el análisis incluye reducción al polo de una malla digitalizada de

64x64 puntos, gradientes horizontales en (x,y,z) de dicha reducción al polo, y finalmente inversión mediante deconvolución resolviendo la Ecuación de Euler.

#### a) Reducción al polo.

Una parte necesaria en el procesado de datos magnéticos es la aplicación de la reducción al polo que tradicionalmente se realiza ya sea por filtrado en el dominio del espacio o por filtrado en el dominio del número de onda [7; 8; 19; 25]. En el caso bidimensional este procedimiento es estable sin importar la latitud, ya que el rumbo de la fuente no es paralelo a la proyección horizontal del campo geomagnético. Sin embargo, en el caso tridimensional, el filtrado de reducción al polo es estable solo a altas latitudes magnéticas. A latitudes inferiores a los 15° no es de uso práctico debido a una inestabilidad que aumenta fuertemente en el ecuador magnético.

La reducción al polo consiste en una transformación matemática de la intensidad de campo magnética total en una declinación (D) e inclinación (I) observadas en la declinación e inclinación del polo magnético (es decir,  $D = 0^\circ$ ,  $I = 90^\circ$ ). Esto ayuda en la interpretación puesto que cualquier asimetría en el campo reducido al polo se puede luego atribuir a la geometría de la fuente y no a las propiedades magnéticas.

#### b) Gradientes y Señal Analítica.

Aunque los gradientes pueden tener valor por si solos para la interpretación de anomalías de campos potenciales, estos son más lucrativos si se combinan en la técnica denominada como Señal Analítica [18; 29], también conocida como el método de gradiente total. Esta técnica produce un tipo de mapa particular con realce de una anomalía de campo potencial, el que es usado para definir las fronteras de distribuciones de densidad o magnetización geológicamente anómalas.

En principio un gradiente es la diferencia en valores de campo por unidad de distancia entre dos puntos.

Los máximos mapeados (cordilleras y picos) en la señal analítica calculada de un mapa de anomalías magnéticas localizan las orillas y esquinas de los cuerpos fuente de anomalías (e.g., fronteras de bloques fallados del basamento, contactos litológicos del basamento, zonas de fallas, diapiros ígneos y salinos, etc.). Los máximos de la señal analítica son útiles al ocurrir directamente sobre fallas y contactos, sin importar el echado o inclinación estructural que pueda estar presente, y al ser independientes de la dirección de las magnetizaciones inducidas y/o remanentes.

#### c) Método de la deconvolución de Euler

Este método de estimación de la profundidad se basa en el concepto de que los campos magnéticos son funciones homogéneas de las coordenadas de las fuentes y por lo tanto satisfacen a la ecuación de Euler. Esta ecuación por lo tanto se puede resolver paramétricamente para las localizaciones de las fuentes. En años recientes, el uso de este método se ha vuelto muy popular al ser automatizado para trabajar ya sea con mallas o perfiles de datos.

##### i) Homogeneidad.

Matemáticamente es posible iniciar con una definición:

*Homogeneidad:* Sea  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  una función de valor real. Entonces  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  es *homogénea de grado  $k$*  si  $\lambda^k f(x) = f(\lambda x)$  donde  $\lambda \geq 0$  ( $x$  es el vector  $[x_1 \dots x_n]$ ). En otras palabras, una función es denominada *homogénea de grado  $k$*  si al multiplicar *todos* los argumentos por una constante escalar  $\lambda$ , se incrementa el valor de la función por  $\lambda^k$ , i.e.

$$\lambda^k f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(\lambda x_1, \lambda x_2, \dots, \lambda x_n)$$

El teorema de Euler establece que bajo una homogeneidad de grado 1, una función  $f(x)$  se puede reducir a la suma de sus argumentos multiplicados por sus primeras derivadas parciales.

## ii) Teoría de la deconvolución de Euler.

La técnica de [38] se basa en la solución, mediante la convolución de un operador, de la ecuación homogénea de Euler, cuya expresión surge de considerar una función de tres variables  $f(x,y,z)$ ,  $z$  positivo hacia abajo.  $f(x,y,z)$  es homogénea de grado  $n$  si

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z)$$

Siendo  $f(x,y,z)$  homogénea, se debe satisfacer la ecuación

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = nf$$

que se conoce como la ecuación de homogeneidad de Euler [38]. Supóngase ahora que  $f(x,y,z)$  tiene la forma funcional general

$$f(x, y, z) = \frac{G}{r^N}$$

donde  $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ , y  $N=1,2,3,\dots$ .  $G$  no depende de  $(x,y,z)$ . Esta ecuación es homogénea de orden  $n=-N$ . Muchas fuentes magnéticas puntuales satisfacen la forma de esta ecuación [38]. La relación entre estas fuentes simples y los datos magnéticos medidos se puede discutir considerando una “fuente puntual” (un dipolo magnético, una masa puntual, etc.) localizada en el punto  $(x_0, y_0, z_0)$ . La intensidad magnética total tendría la forma general

$$\Delta T(x, y) = f[(x - x_0), (y - y_0), z_0]$$

La ecuación de Euler para esta expresión se puede escribir como

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial y} - z_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N \Delta T(x, y)$$

en la superficie,  $z=0$ .

Reordenando tenemos

$$x \frac{\partial \Delta T}{\partial x} - x_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + y \frac{\partial \Delta T}{\partial y} - y_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial y} - z_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N \Delta T(x, y)$$

Los gradientes pueden ser calculados o medidos, así que  $x_0$ ,  $y_0$  y  $N$  son las únicas cantidades desconocidas. Las coordenadas  $(x_0, y_0, z_0)$  representan la localización y profundidad de la fuente puntual, y  $N$ , que es el grado de homogeneidad de la ecuación, representa al tipo de fuente y es llamado el *índice estructural* [38].

Recientemente se han bosquejado y desarrollado expresiones modificadas para la ecuación de Euler, como

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = N(B - \Delta T)$$

donde  $B$  es un valor regional de  $\Delta T$  [32].  $N$  es la razón de cambio de un campo con la distancia. La Tabla I resume valores de  $N$  para diferentes formas y cuerpos.

**Tabla 1.** Índices estructurales y modelos relativos (modificado de [38]; [39]).

Rasgo Geológico	Modelo Cultural	Modelo Simple	Nº de Dimensiones	Índice Estructural
Contacto	Orilla de un gran tanque	Línea de dipolos	3(X,Y,Z)	0.0
Falla	Escalón alto	Línea de dipolos	2(X,Z)	0.5
Manto	Láminas horizontales	Línea de polos	2(X,Y)	1.0
Dique	Láminas verticales	Línea de polos	2(Z,X-Y)	1.0
Cilindro, tubo Horizontal	Tuberías, tambos	Línea de dipolos	1(X-Y)	2.0
Tronco	Muro	Polo puntual	1(Z)	2.0
Esfera	Tanque	Dipolo puntual	0	3.0

La forma de aplicar la técnica consiste en calcular o medir los gradientes (estos son las derivadas en  $x, y, z$  de los valores de la intensidad magnética), localizar o proponer una ventana cuadrada de 3 o más puntos, proponer valores de  $N$  apropiados a cada caso particular, y resolver la ecuación usando técnicas de inversión de matrices (por ejemplo, descomposición de Cholesky, que se emplea en este estudio).

Finalmente, se grafican los mapas de las soluciones considerando un mapa para cada índice y usándose un símbolo con un tamaño proporcional a la profundidad  $z_0$  [32].

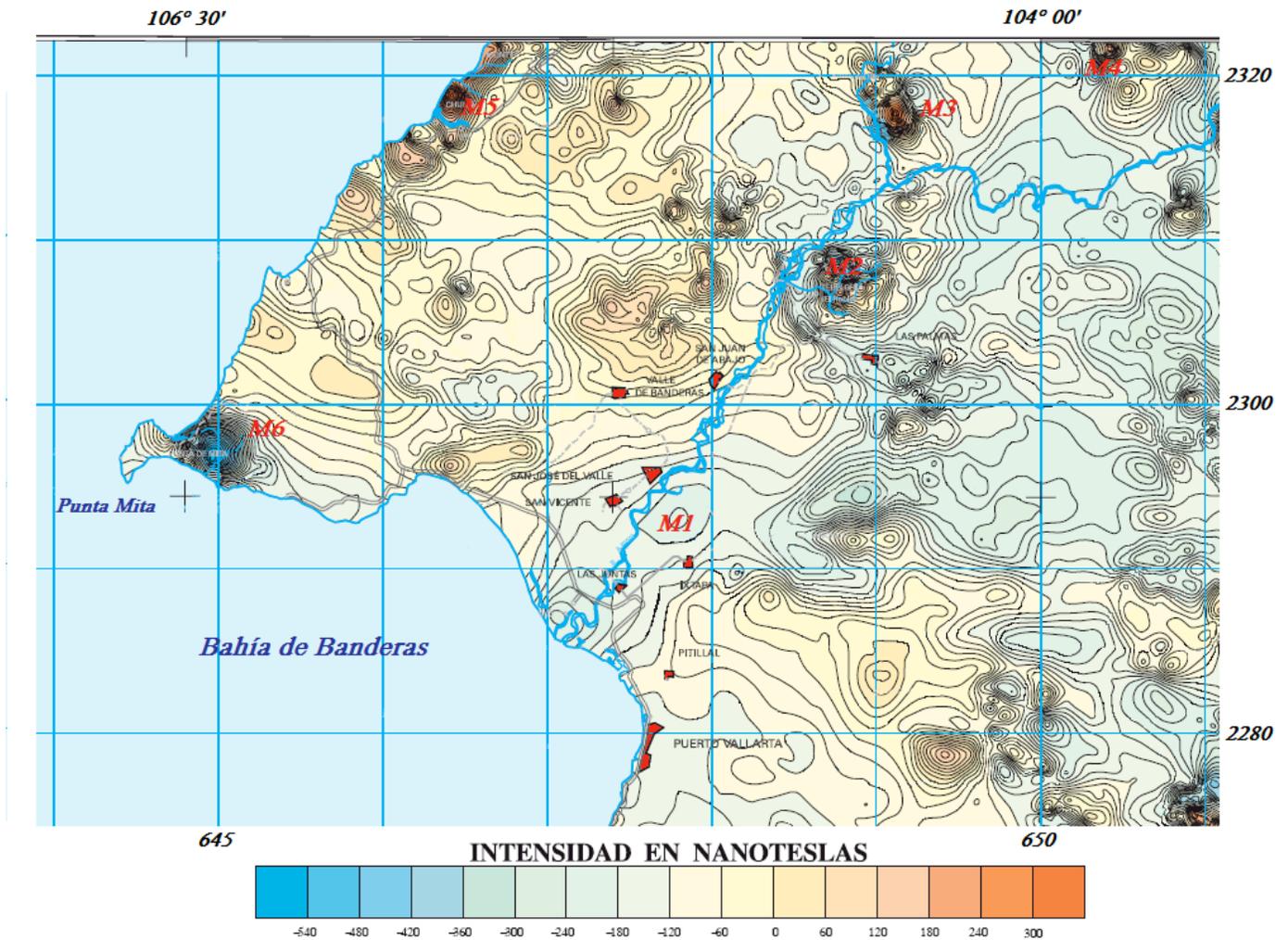
Los resultados de esta técnica han sido muy exitosos ([38]; [32]; [39]) dada la ventaja de independencia de la forma de las fuentes.

## RESULTADOS

Los estudios geofísicos que existen hasta hoy han sido realizados en el Valle de banderas [6; 30], y sólo se registran en el borde oriental del Municipio de Bahía de Banderas. Existiendo información aeromagnética libre en internet, se ha aprovechado para analizar la posible presencia de estructuras en la superficie del Municipio. Tales estructuras pueden considerarse de riesgo por deslizamientos de laderas o por sismicidad.

### Anomalías aeromagnéticas de campo total

La Figura 7 corresponde al plano de anomalías aeromagnéticas de campo total, sin reducir al polo. En este plano se aprecia una anomalía negativa predominante y de gran amplitud, que parece ser debida al hundimiento del basamento granítico en el graben de Valle de Banderas (indicada como M1).



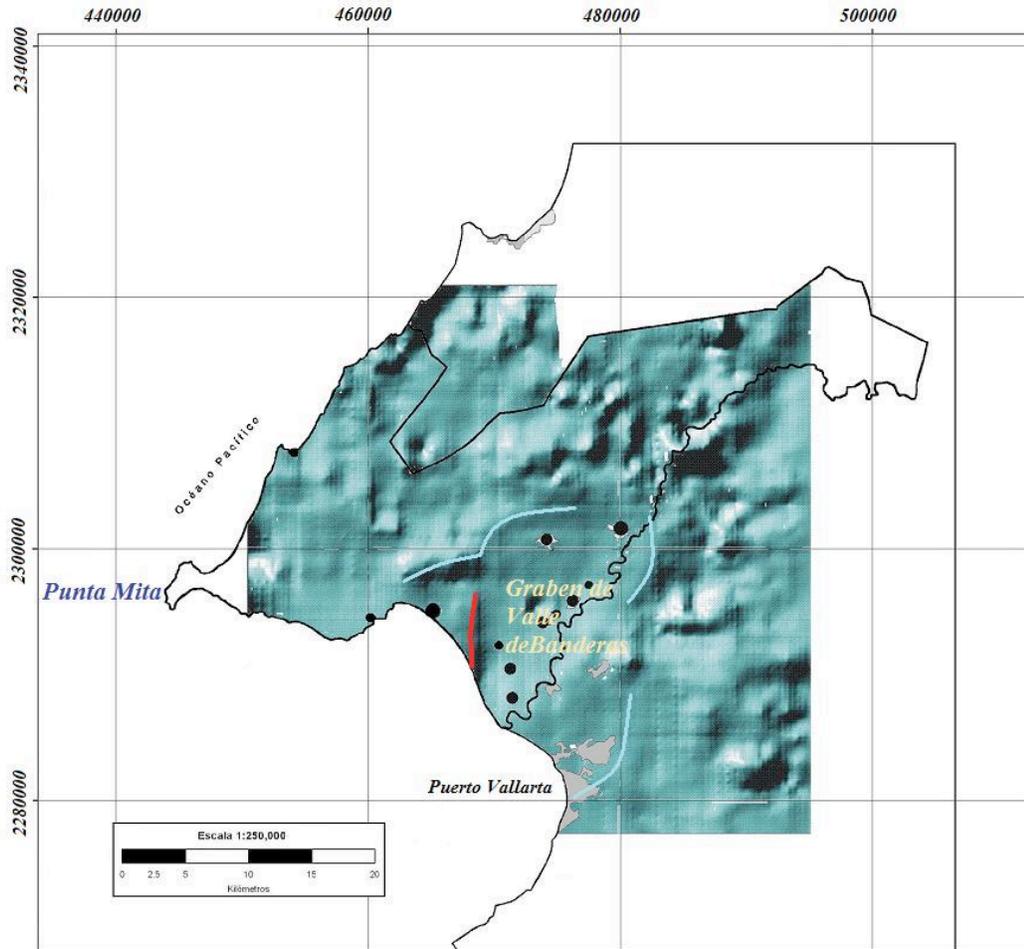
**Figura 7.-** Plano de anomalías aeromagnéticas de campo total para la zona de Bahía de Banderas (modificada del SGM, 2000). Poblaciones más importantes se muestran en cuadros rojos. M1 corresponde a una anomalía negativa de escala regional correspondiente con el graben de Valle de Banderas. M2, M3, M4, M5 y M6 son anomalías de fuerte gradiente. Coordenadas dadas en el sistema UTM, en kilómetros. Isolíneas dadas cada 60 nanoTeslas.

Además se perciben anomalías debidas a cuerpos con alto contenido de minerales magnéticos (M2, M3, M4, M5 y M6 en la Figura 7); preferentemente dichos cuerpos son volcanes o de origen volcánico, posiblemente formados por rocas de tipo basáltico o andesítico. Uno de estos rasgos anómalos se aprecia muy bien hacia el centro del área de estudio (M2 en la figura 7). Otro se localiza formando a Punta Mita (M6 en la Figura 7).

Este plano fue digitalizado a mano con una precisión de hasta 0.1 nanoTeslas, en un área de 42 x 42 kilómetros, obteniéndose una malla de valores en forma de matriz de 64 x 64 puntos equiespaciados a cada 0.667 kilómetros. Esto nos permitió hacer la reducción al polo y obtener los gradientes o derivadas respectivas aplicando un programa que emplea la Transformada Rápida de Fourier, que requiere de matrices en potencias de dos.



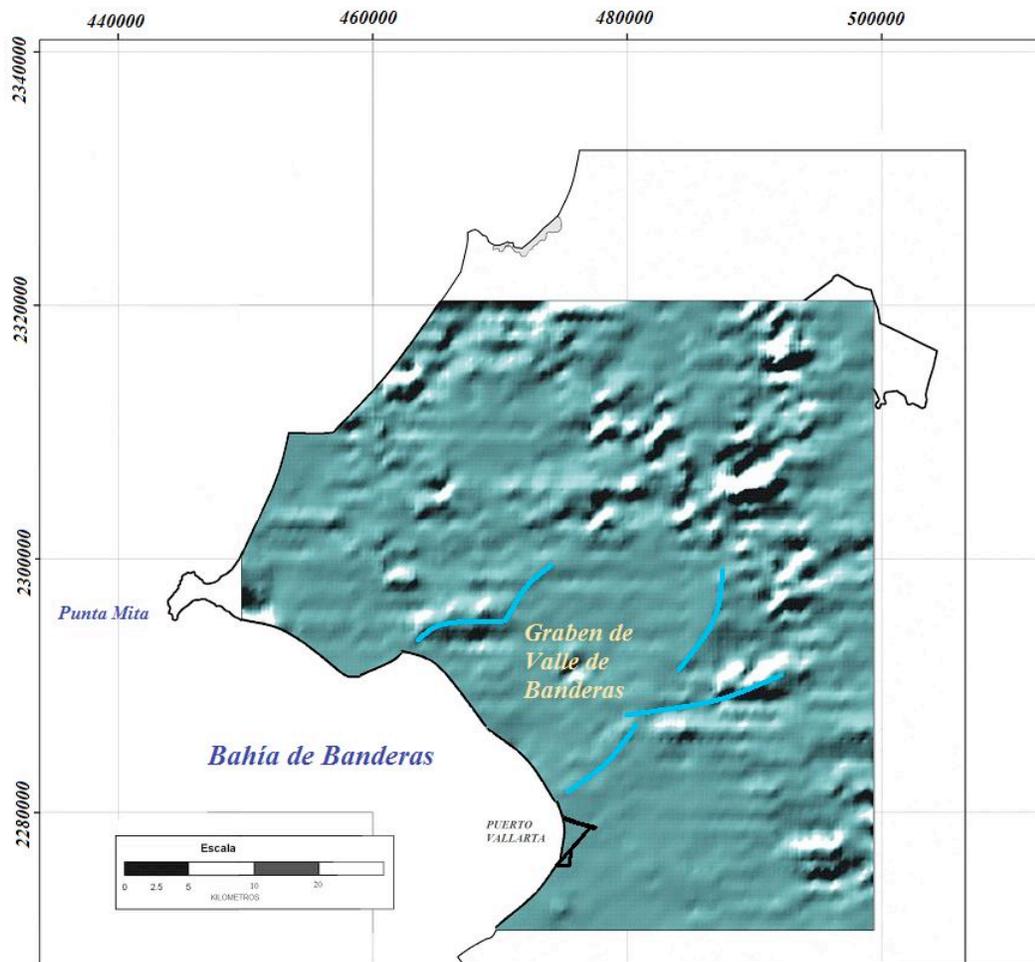
## Gradientes y Reducción al polo



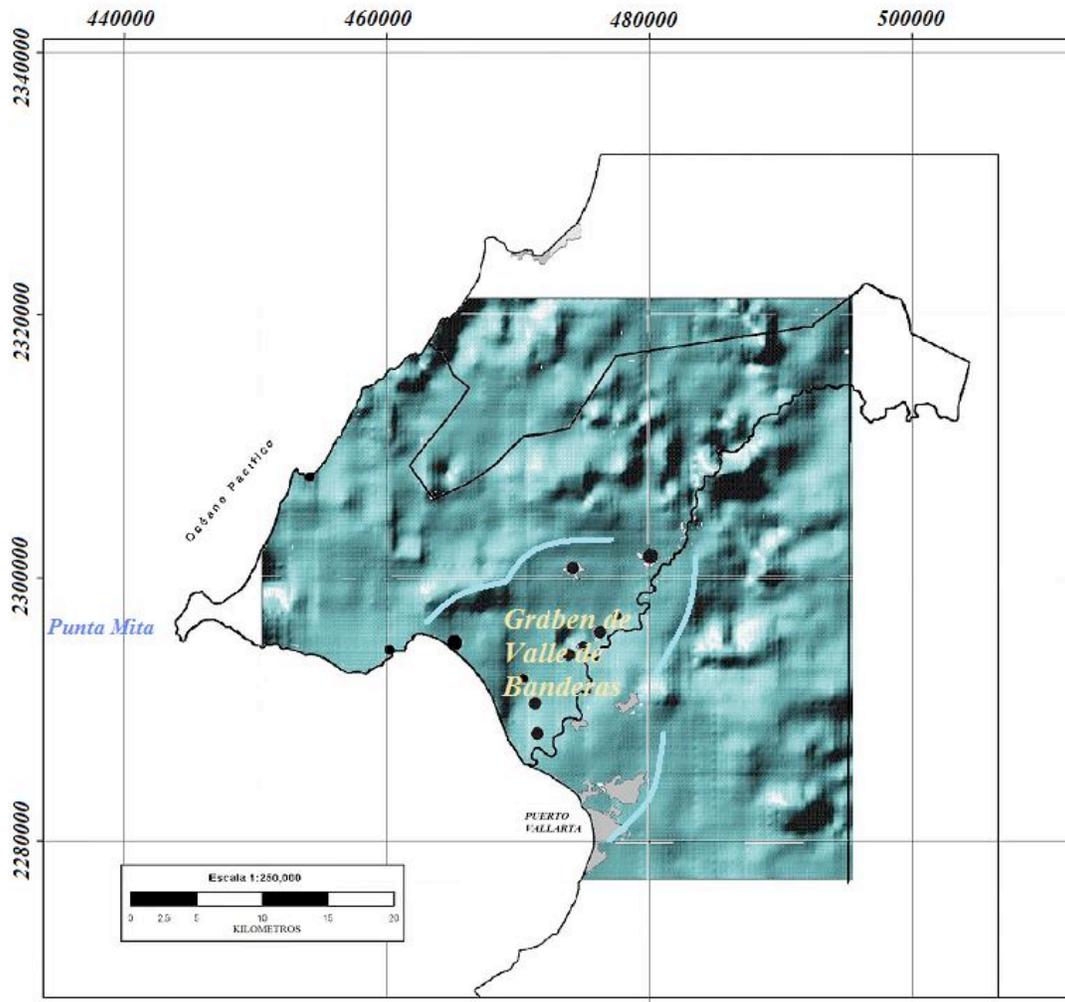
**Figura 8.-** Reducción al polo de la anomalía aeromagnética. El Graben de Valle de Banderas se delimita con fallas en color azul claro. En rojo se indica una estructura de dirección N-S. Los círculos negros representan las poblaciones más importantes. Coordenadas dadas en el sistema UTM, en metros.

La reducción al polo tiende a definir los rasgos anómalos que caracterizan cuerpos magnéticos superficiales, someros y profundos; tanto en la reducción al polo como en sus gradientes resaltan varios rasgos que no aparecen claramente en la deconvolución de Euler que se exhibe más adelante, como la estructura N-S que se observa alcanzando la línea de costa al centro de la Bahía, que se combina con una estructura casi E-W al norte del mismo rasgo N-S, esta última correspondiente a los límites del graben (Figura 8).

El empleo de gradientes en  $(x,y,z)$  suele ser muy útil para la interpretación de anomalías de campos potenciales, especialmente si se obtienen para otras técnicas matemáticas como la deconvolución de Euler y la señal analítica. Esto es bien ejemplificado en las figuras 9 a 11.

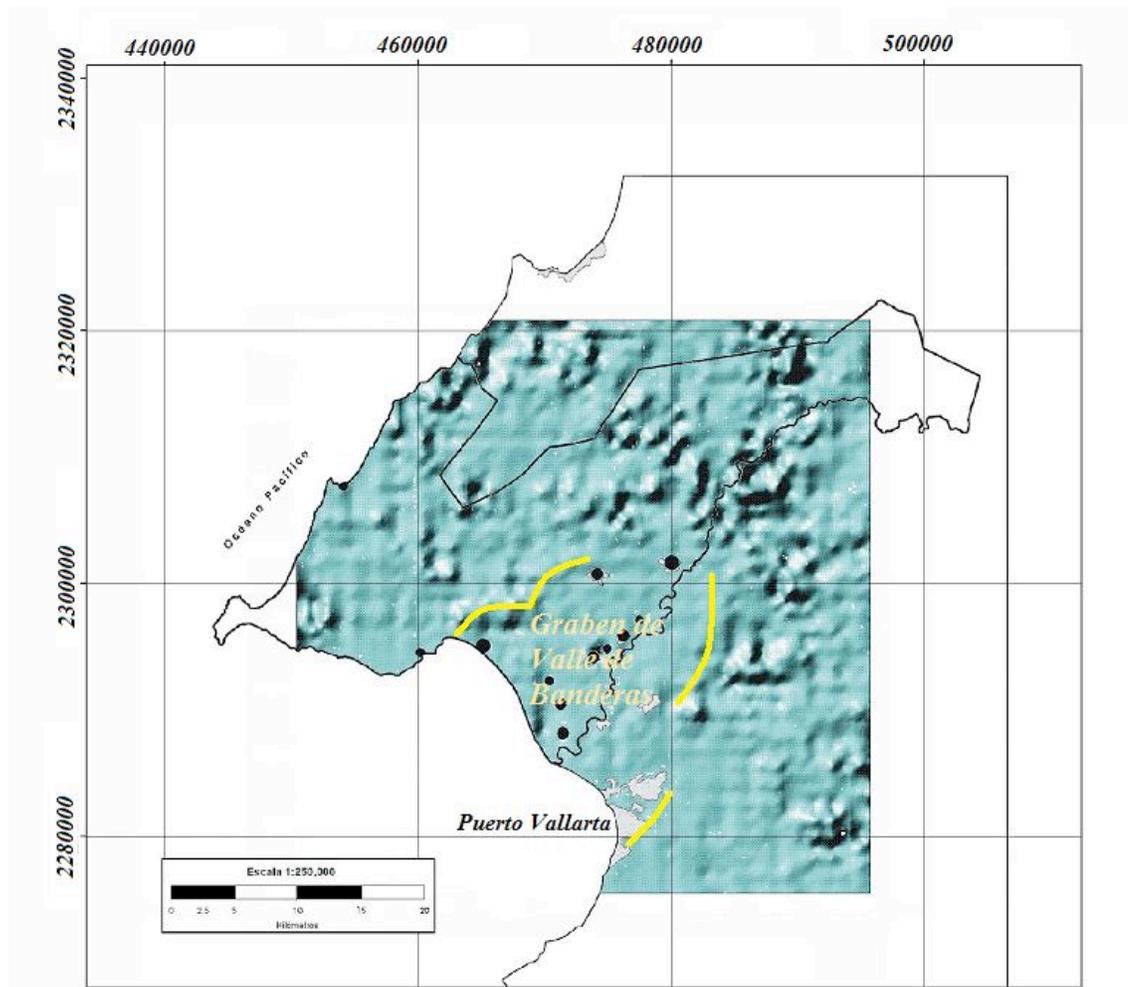


**Figura 9.-** Gradiente horizontal en  $x$  para la anomalía aeromagnética reducida al polo. El Graben de Valle de Banderas se delimita con fallas en color azul claro. Coordenadas dadas en el sistema UTM, en metros.



**Figura 10.-** Gradiente horizontal en y para la anomalía aeromagnética reducida al polo. El Graben de Valle de Banderas se delimita con fallas en color azul claro. Los círculos negros representan las poblaciones más importantes. Coordenadas dadas en el sistema UTM, en metros.

Puede notarse que la estructura subcortical mejor esbozada es el graben de Valle de Banderas en cualquiera de estos gradientes (Figuras 9, 10 y 11).



**Figura 11.-** Gradiente vertical para la anomalía aeromagnética reducida al polo. El Graben de Valle de Banderas se delimita con fallas en color amarillo. Los círculos negros representan las poblaciones más importantes. Coordenadas dadas en el sistema UTM, en metros.

**Inferencia de fallas mediante deconvolución de Euler**

Es importante mencionar que esta técnica se empleó desde sus inicios sobre datos reducidos al polo, y no sobre los valores de intensidad de campo magnético en sí. Esta particularidad se probó en este estudio para ambos casos.

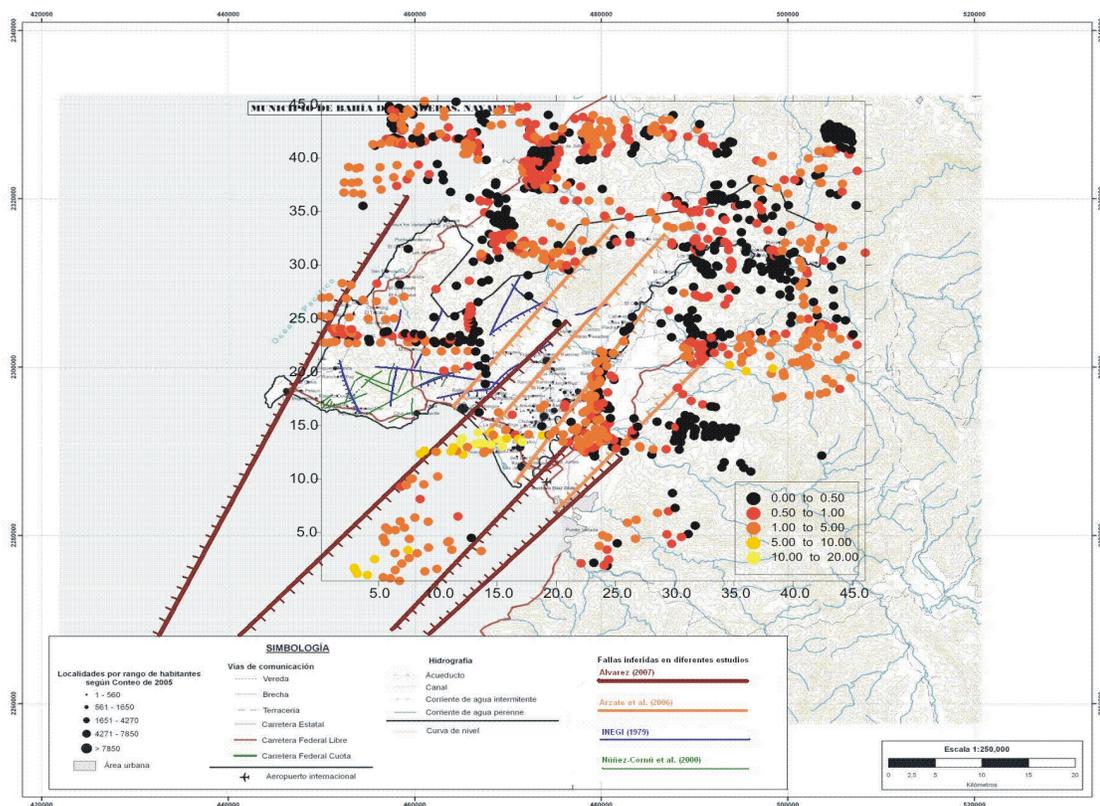
Se usaron además tres índices estructurales (0.0, 0.5 y 1.0) y una ventana de deconvolución de 10 puntos. Los resultados, esbozados con grupos de círculos de colores por rangos de profundidades de fuentes, se exhiben en las figuras 12 a 15.

**Deconvolución de Euler para la intensidad de campo aeromagnético total.**

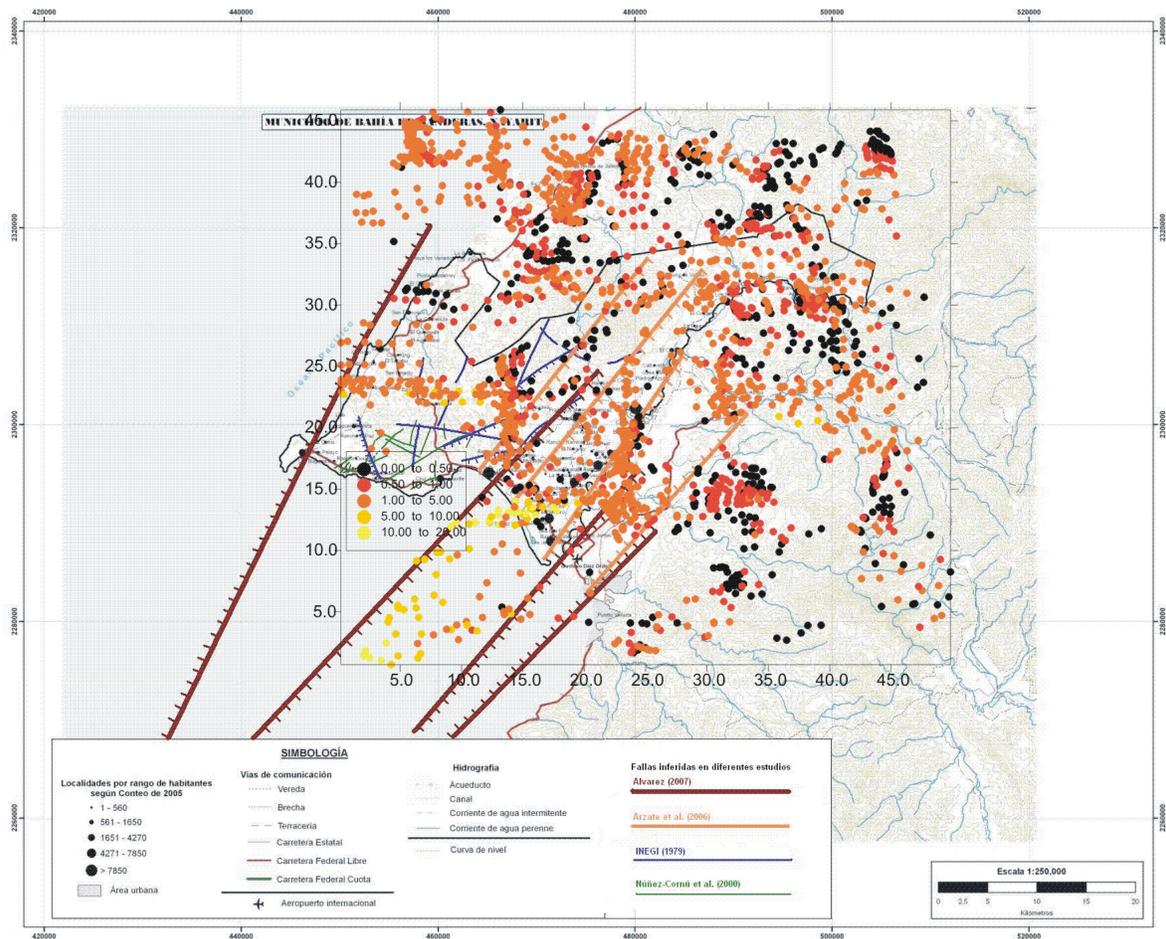


Un primer resultado de la deconvolución de Euler consiste en un plano de localizaciones de fuentes magnéticas para el campo total con un índice estructural de 0.0, que se muestra en la figura 10. En esta figura los círculos negros corresponden a fuentes más someras, mientras que hacia la escala de amarillo se hallan las localizaciones más profundas. El rango de profundidades obtenidas va desde la superficie hasta los 20 kilómetros. Esta última profundidad es un punto que nos condujo a aplicar la deconvolución a datos reducidos al polo. El otro punto, y el más importante tal vez, es la localización tan pobre y con orientaciones poco correctas de estructuras que deben corresponder con fallas. La existencia de fallas obtenidas en estudios previos ayudó en esta ocasión a corroborar que las localizaciones obtenidas con la deconvolución debían desarrollarse sobre planos reducidos al polo.

A pesar de todo, algunas líneas de puntos coinciden perfectamente con algunas fallas, especialmente con las fallas regionales que forman al graben, y con otras más someras que se hallan en superficie. La mayor cantidad de localizaciones recae en el rango de profundidades entre los 0 y los 5 kilómetros. Es notable la presencia de un alineamiento muy superficial orientado Oeste-Este al centro del Municipio de Bahía de Banderas, cortado por otro alineamiento orientado NW-SE.



**Figura 12.-** Localización de fuentes puntuales obtenidas mediante la deconvolución de Euler para un índice estructural de 0.0, sobre el campo aeromagnético total. Rangos de profundidades en el recuadro dados en kilómetros



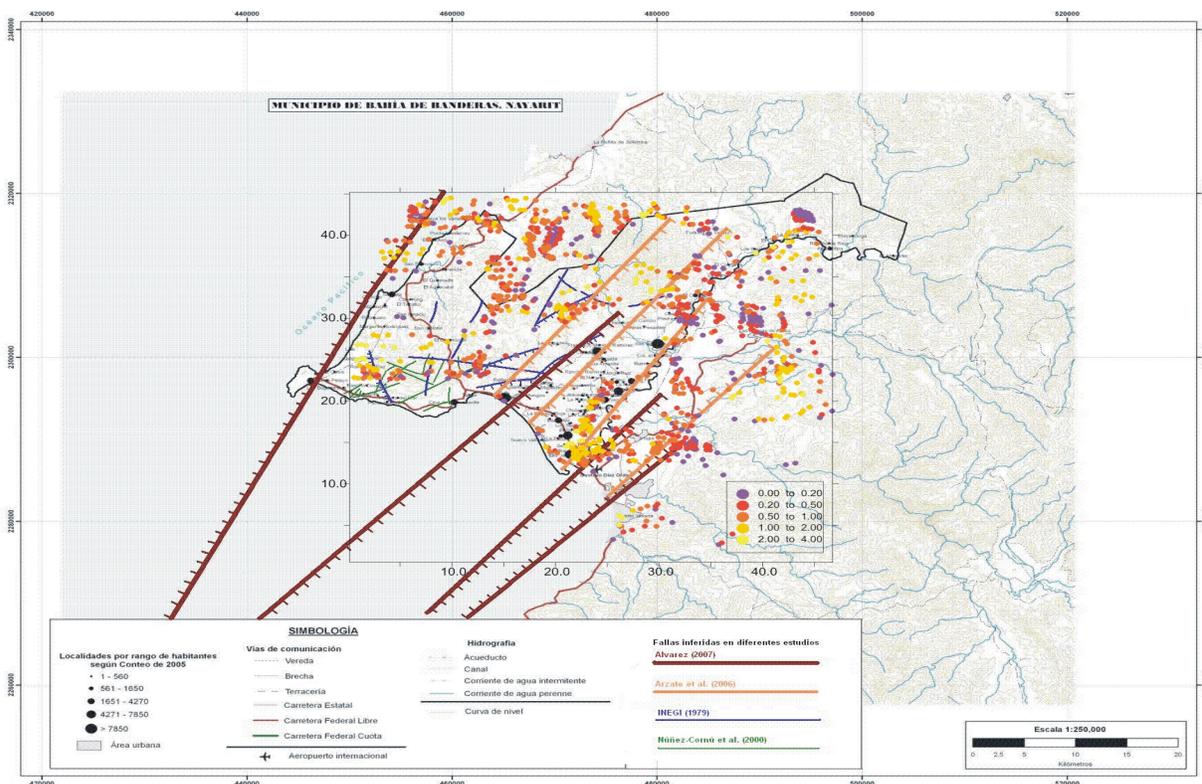
**Figura 13.-** Localización de fuentes puntuales obtenidas mediante la deconvolución de Euler para un índice estructural de 1.0, sobre el campo aeromagnético total. Rangos de profundidades en el recuadro dados en kilómetros

En la deconvolución de Euler para un índice estructural de 1.0 hay una mayor cantidad de localizaciones de fuentes, especialmente de profundidades de entre 1 a 5 kilómetros (Figura 13). Una peculiaridad de este resultado es que las localizaciones tienen una alta tasa de dispersión. A pesar de esta dispersión, se puede apreciar que existen dos lineamientos principales, que llegan hacia la costa próxima a Puerto Vallarta y que tienen una tendencia Norte-Sur, lo que no corresponde con la traza de las fallas principales. Esta poca correspondencia o correlación y la alta dispersión pueden deberse al empleo del campo aeromagnético total para este cálculo.

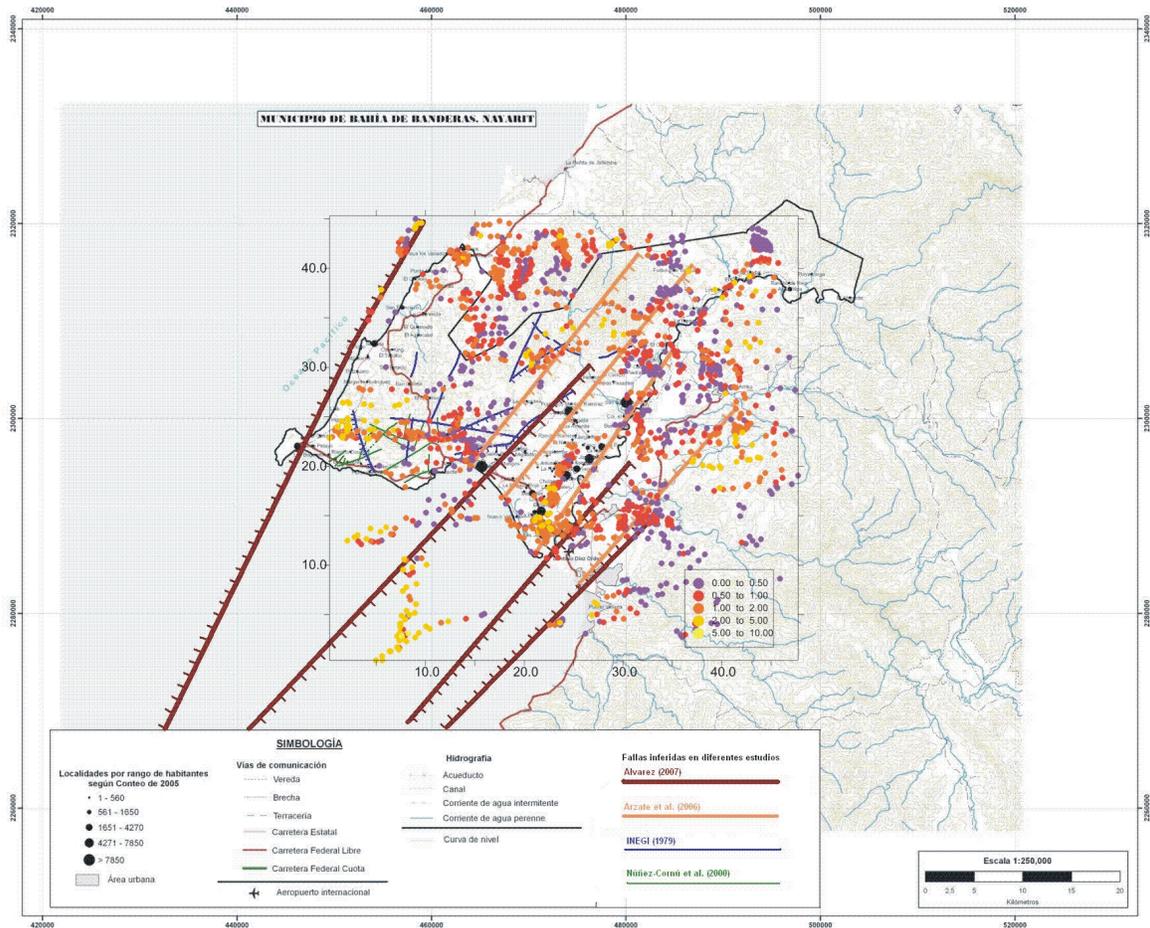


### Deconvolución de Euler de la anomalía aeromagnética reducida al polo

La figura 14 muestra localizaciones obtenidas para un índice estructural de 0.0 pero sobre el campo reducido al polo. Aquí el rango total de profundidades alcanza los 4 kilómetros, lo que sería más congruente para fallas en esta zona que un límite de profundidades de 20 kilómetros, como en los dos anteriores casos. Los alineamientos que proporciona este caso se correlacionan muy bien con las fallas ya inferidas en estudios previos, especialmente dos fallas que representan el límite noroeste del graben de Valle de Banderas, inferida por [6]. Posiblemente la sección más al norte de la primera falla no represente un alto riesgo sismotectónico. Algunas fallas locales indicadas en los planos de INEGI también se aprecian. Un punto notable es que en este estudio se está infiriendo una gran falla que en los estudios previos no se había visto. Esta falla atraviesa de NE a SW a lo largo de la parte central del Municipio, y es etiquetada como B14 en la Figura 18.



**Figura 14.-** Localización de fuentes puntuales obtenidas mediante la deconvolución de Euler para un índice estructural de 0.0, sobre el campo aeromagnético reducido al polo. Rangos de profundidades en el recuadro dados en kilómetros



**Figura 15.-** Localización de fuentes puntuales obtenidas mediante la deconvolución de Euler para un índice estructural de 0.5, sobre el campo aeromagnético reducido al polo. Rangos de profundidades en el recuadro dados en kilómetros

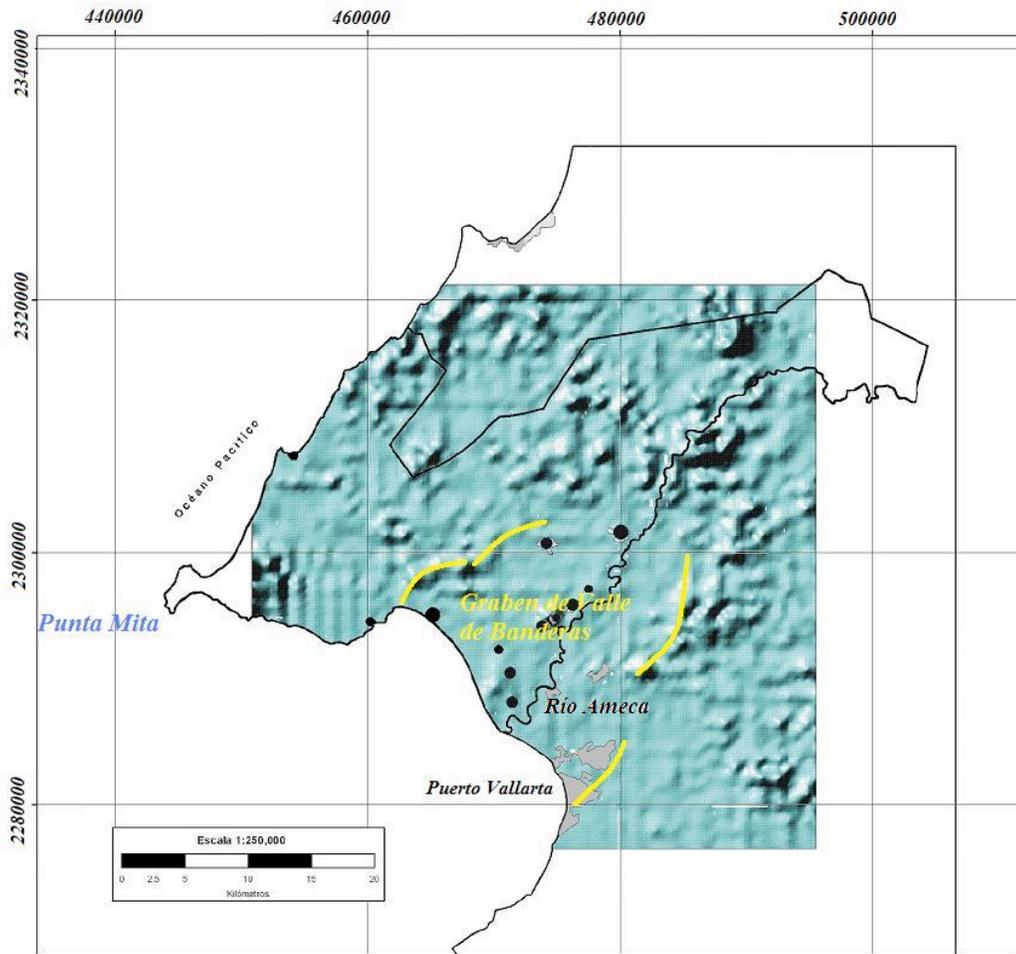
La figura 15 muestra básicamente porqué el índice estructural de 0.5 es el más adecuado para discernir estructuras del tipo de las fallas. Solamente resalta la prolongación mas adentro de la falla inferida al centro de la superficie del Municipio.

**Resultados de señal analítica**

La señal analítica resultante para Bahía de Banderas exhibe claramente la presencia de grandes fallas orientadas NE-SW, particularmente las que delimitan al graben de Valle de Banderas. Es claro que el graben en su parte sur se trunca a profundidad antes de llegar a la línea de costa, mientras que en su parte norte se prolonga mar adentro (Figura 16). Esto revela de alguna manera la poca posibilidad de amenazas por hundimientos hacia la población de Puerto Vallarta, mientras que las poblaciones que se localizan a lo largo del extremo NW (con dirección SW-NE) presentan mayor riesgo por hundimientos o movimientos de



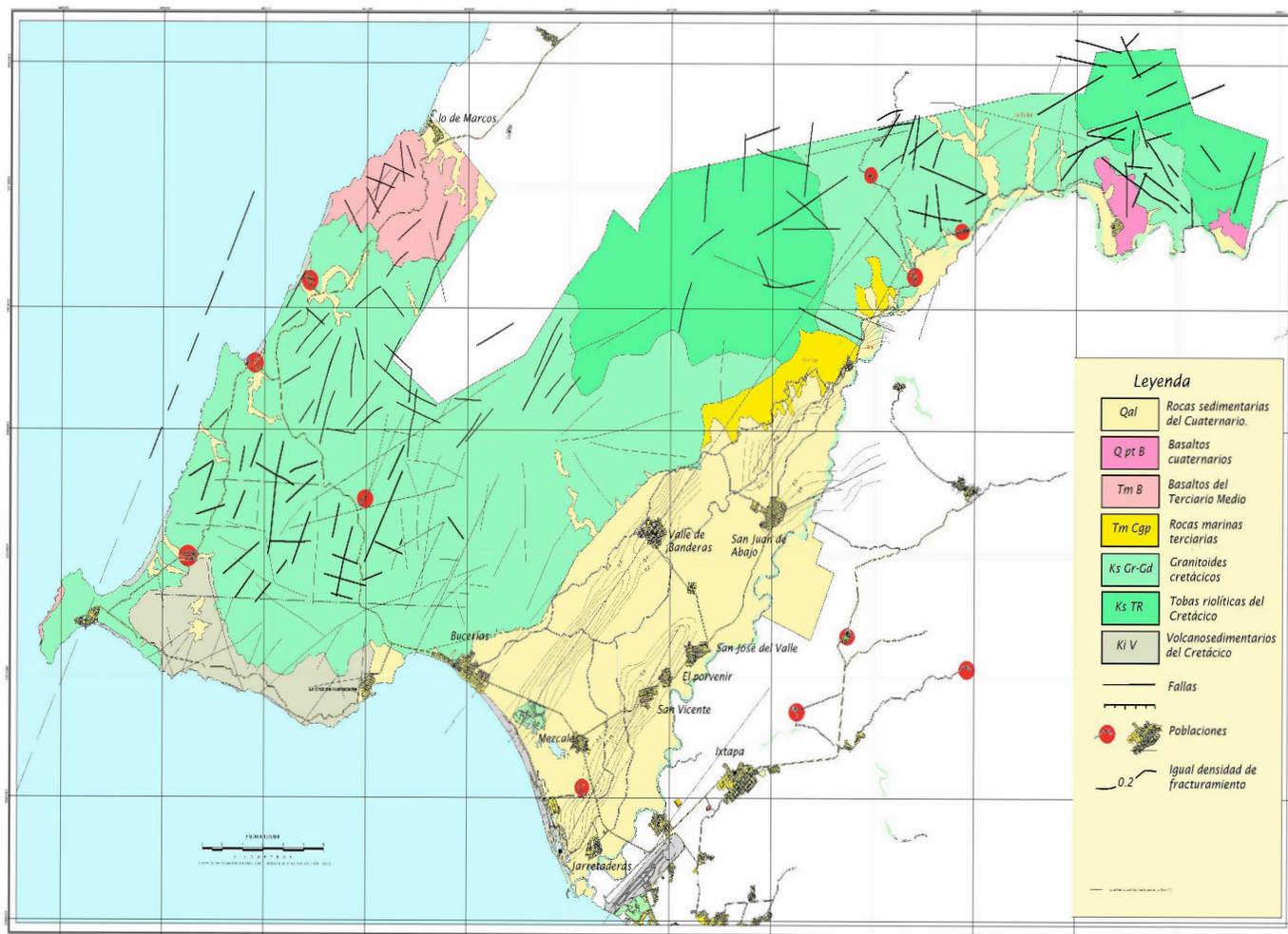
fallas. Esto queda claro para los mayores núcleos de población que se localizan a lo largo del Río Ameca, dentro del Municipio de Bahía de Banderas.



**Figura 16.-** Señal analítica para el área de estudio. El Graben de Valle de Banderas se delimita con fallas en color amarillo. Los círculos negros representan las poblaciones más importantes. Coordenadas dadas en el sistema UTM, en metros.

### Análisis de amenazas y riesgos por fallas y hundimientos

Para revisar el posible riesgo de hundimientos por la amenaza de la presencia de fallas del basamento en el Valle de Bahía de Banderas se realizó el sencillo cálculo de la longitud de fallas inferidas entre el área de influencia de las mismas fallas en un área de 1 km<sup>2</sup>. De esta manera se obtuvo la figura 15 en la que se muestra el área de influencia de las fallas inferidas mediante la deconvolución de Euler para los índices estructurales de 0.0 y 0.5, descrita como igual densidad de fracturamiento.



**Figura 17.-** Densidad de fracturamiento calculada como la razón longitud de traza de falla/área de exposición de fallas, esbozada sobre la geología del área de Bahía de Banderas. Los principales núcleos de población se muestran con círculos rojos.

## DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.

De estudios previos ([30]; [31]; [2]; [6]; [3]) se ha inferido la presencia de grandes fallas que pudieran tener alguna actividad tectónica, con la probabilidad de generación de sismos. Destaca la presencia de fallas formando al graben del Valle de Banderas, orientadas NW-SE, sobre todo a lo largo del extremo sureste del Municipio de Bahía de Banderas.

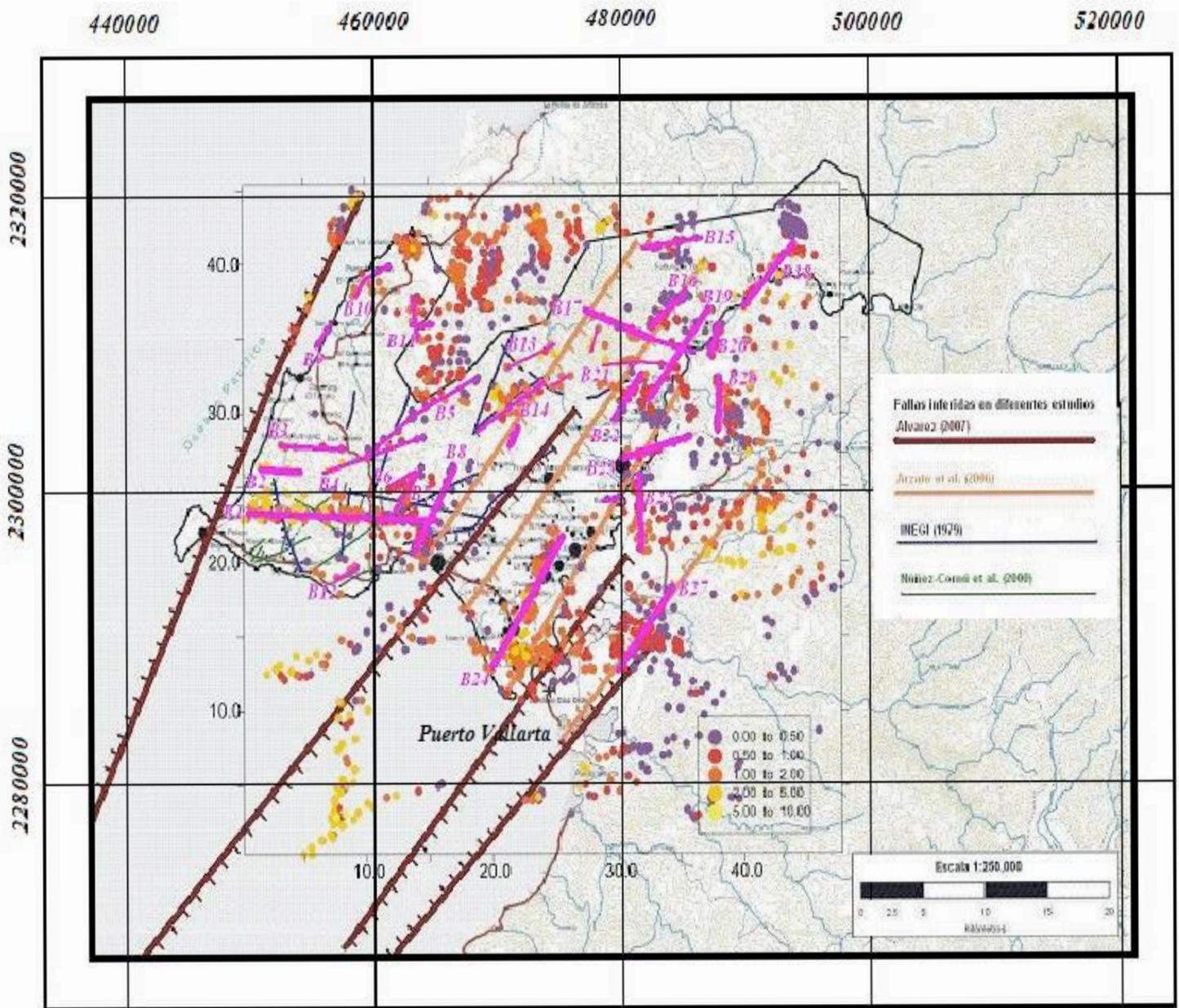
La deconvolución de Euler de datos aeromagnéticos reducidos al polo confirma la presencia especialmente de la falla que forma el borde noroeste del graben de Valle de Banderas, inferida por [3].

Además, el mismo proceso describe una gran falla paralela que atraviesa a lo largo de la parte central del Municipio de Bahía de Banderas acompañada de fallas menos profundas y más locales, y varias fallas que atraviesan algunas poblaciones y que no tienen expresión superficial. Estas fallas posiblemente puedan afectar a dichas poblaciones con hundimientos como los que ocurren en otras poblaciones del país que se asientan en depósitos sedimentarios como los del Valle de Banderas. Un ejemplo drástico se tiene relativamente cerca, en la Ciudad de Ameca, donde existen fallas tectónicas que están dañando a más de 600 construcciones. Considerando los resultados de la deconvolución de Euler con índice estructural de 0.5 se ha esquematizado la presencia de las fallas que se definen bien en la Figura 18. Estas fallas se han denominado B1 a B24. Sobre las trazas de fallas inferidas en la zona del Valle de Banderas se obtuvo una densidad de fracturamiento que representa la posible zona de afectación de tales fallas. Esta densidad de fracturamiento, que se presenta a modo de isolíneas de igual densidad de fracturamiento, se esboza en el plano de la figura 17. Así, se aprecia que las fallas pudiesen afectar básicamente a las poblaciones de San Juan de Abajo, Guadalupana, San José del Valle, San Vicente, San Clemente y El Porvenir.

Otro punto importante es que deberá ponerse atención a las dos fallas de rumbo NE-SW que atraviesan a lo largo del Valle de Banderas, y denominadas B24 y B22, pues parecen ser, por una parte, fallas secundarias acompañantes de una de las grandes fallas inferidas en previos estudios, y, por otra parte, aunque se aprecian como dos fallas, es posible que se trate de una sola. Otra falla importante es la que atraviesa al Municipio de Oeste a Este (Falla B1), ya que si se localiza sobre rocas de baja cohesión, intemperizadas y con un grado de pendientes que conduzcan a deslizamientos, podría acelerar a los mismos; especial énfasis se deberá poner además si existen poblados a lo largo de la misma.

Las fallas anteriormente mencionadas tienen una densidad de fracturamiento apreciable, especialmente porque atraviesan la actual cabecera municipal de Valle de Banderas, constituyéndose en una probable amenaza futura por hundimientos en sus edificaciones. Otras poblaciones importantes que pueden tener una amenaza similar son San Juan de Abajo, San José del Valle, El Porvenir y San Vicente, todas localizadas en el valle aluvial de Banderas.

Realizando el cálculo de longitud de traza de falla inferida entre el área de circunscripción se obtuvieron mapas con igual densidad de fracturamiento o influencia de fallas.



**Figura 18.-** Conjunción total de fallas inferidas en estudios previos y en este estudio. Las Líneas en rosa, y denominadas en el rango de B1 a B24 son las fallas inferidas en este estudio.

## REFERENCIAS

1. Aguirre-Díaz, G. J., Zúñiga Dávila Madrid, R., Pacheco Alvarado, F.J., Guzmán Speziale, M., y Nieto Obregón, J., 2000. El graben de Querétaro, Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo: geos, boletín de la unión geofísica mexicana, v. 20, p.2-7.
2. Alvarez-Béjar, R., 2005. El sistema de fallas de Bahía de Banderas (Resumen), en Unión Geofísica Mexicana, Reunión Anual, 30 de octubre – 4 de noviembre, Puerto Vallarta, Jalisco, México: GEOS, **25**, p. 90.
3. Alvarez, R., 2007. Submarine topography and faulting in Bahía de Banderas, Mexico. Geofísica Internacional, Vol. 46, Num. 2, pp 96-116.
4. Arroyo M. G., Arzate J., Rojas E., Martínez J. R., Yutsis V., Pacheco J., Frías A. O. y Ochoa H. G., 2003. ¿Causas y efectos de las grietas y fallas en el valle de Ameca?: cuaderno de trabajo editado por el CONACYT, Sihgo, Querétaro, mex.
5. Arroyo C., M., Zermeno de León, M. y Castañeda A., J. A., 2004. El agrietamiento en Ameca: causas y efectos, Universidad de Guadalajara, primera edición, isbn 968 5073 902, 227 pp.
6. Arzate, J. A., R. Alvarez, V. Yutsis, J. Pacheco y H- López-Loera, 2006. Geophysical modeling of Valle de Banderas graben and its structural relation to Bahía de Banderas, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 23, Num. 2, pp 184-198.
7. Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies: Geophysics, **22**, 359–383.
8. Bhattacharyya, B. K., 1965. Two-dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation: Geophysics, **30**, 829–857.
9. CENAPRED, 2001. Dagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México: Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana.
10. CENAPRED, 2006. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Geológicos. 280 pp.
11. Chernyshev, S. N. y W. R. Dearman, 1991. Rock Fractures. Butterworth-Heinemann, LTd. 272 pp.
12. Ferrari, L., S. A. Nelson, J. Rosas-Elguera, G. J. Aguirre-Díaz y S. Venegas-Salgado, 1997. Tectonics and volcanism of the western Mexican Volcanic Belt. *In*: Aguirre-Díaz, G.J., J. Aranda-Gómez, G. Carrasco-Núñez, and L. Ferrari (Eds.) Magmatism and tectonics of central and northwestern Mexico – a selection of the 1997 IAVCEI General Assembly Excursions: Mexico, D.F., UNAM, Instituto de Geología, Excursión 12. 85-129.
13. Ferrari, L. y Rosas-Elguera, J., 2000, Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico; The Tepic-Zacoalco rift revisited *in* Delgado-Granados, H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J.M. (eds.), Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper, 334 41-63.
14. Figueroa-Vega, G., 1984. Case history 9.8: México D.F., México: guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal, prepared for the international hydrological programme, working group 8.4, Joseph F. Poland chairman and editor, UNESCO, under the direction of American Geophysical Union, p. 217-232
15. Gallo R., 1925. Estudio de las perturbaciones que en el fondo de la Cd. de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo, por las obras de desagüe y rectificación de los errores a que ha dado lugar una incorrecta interpretación de los efectos producidos: revista mexicana de ingeniería y arquitectura, Vol. iii, no. 2, pp. 96-132.
16. Garduño-Monroy V. H., Arreygue-Rocha E., Israel-Alcántara L. y Rodríguez-Torres G. M., 2001. Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México: revista mexicana de ciencias geológicas, v. 18, núm. 1, p. 37-54.
17. Gastil, G., D. Krummenacher y J. Minch, 1979. The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **90**, 839-857.
18. Hansen, R. O., R. S. Pawlowski y X. Wang, 1987. Joint use of analytic signal and amplitude of horizontal gradient maxima for three-dimensional gravity data interpretation. 57<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, p. 100-102.
19. Hansen, R. O., y Pawlowski, R. S., 1989, Reduction to the pole at low latitude by Wiener filtering: Geophysics, **54**, 1607–1613.
20. Hasbrouck, W.P. 1991. Four shallow-depth, shear-wave feasibility studies, Geophysics, vol. 56, no. 11, p. 1875-1885.
21. Ivanich P. A., Tyburczy J.A., Arrowsmith J.R. y Diaz M., 2003. Measuring bedrock topography using gravity to understand subsidence along a portion of the cap canal in northeast Scottsdale, cap-lter 2003 5th annual poster symposium.



22. Jachens C. R. y Holzer L. T., 1979. Geophysical investigations of ground failure related to ground water withdrawal Picacho Basin, Arizona. *Ground water*, vol. 17, no. 6.
23. Jachens C. R. y Holzer L. T., 1982. Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona. *Geological Society of American Bulletin*, v. 93, p. 998-1012.
24. Johnson, C.A., Harrison, C.G.A., 1990. Neotectonics in central Mexico: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64, 187-210.
25. Keating, P., y Zerbo, L., 1996. An improved technique for reduction to the pole at low latitudes: *Geophysics*, **61**, 131-137.
26. Lange, R. A. y I. S. E. Carmichael, 1991. A potassic volcanic front in western Mexico: The lamprophyric and related lavas of San Sebastian. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 103, 928-940.
27. Lyle, M., Ness, G.E., 1991. The opening of the southern Gulf of California, in Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T., *The Gulf and Peninsular Province of the Californias: American Association of Petroleum Geologists, Memoir*, 47, 403-423.
28. Lugo J., Salas O. y García T., 1999. Grietas en campos de cultivo. *Prevención*, órgano informativo del Sistema Nacional de Protección Civil.
29. Macleod, I.N., J. Jones y T.F. Dai, 1993. 3-D analytic signals in the interpretation of total magnetic field data at low magnitude latitudes. *Exploration Geophysics*, p. 679-688.
30. Núñez-Cornú, F. J., R. M. Prol-Ledesma, A. Cupul-Magaña y C. Suárez-Plascencia, 2000. Near shore submarine hydrothermal activity in Bahía Banderas, western Mexico. *Geofísica Internacional*. Vol. 39, Num. 2, pp. 171-178.
31. Núñez-Cornú, F.J., Rutz L., M., Nava P., A.F., Reyes-Dávila, G., Suárez-Plascencia, C., 2002. Characteristics of seismicity in the coast and north of Jalisco block, Mexico: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 132, 141-155.
32. Reid, A. B., J. M. Allsop, H. Granser, A. J. Millet e I. W. Somerton, 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, vol. 55, p. 80-91.
33. Reynolds, J. M., 1998. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley & Sons, eds., 796 pp.
34. Righter, K. e I. S. E. Carmichael, 1992. Hawaiites and related lavas in the Atenguillo graben, western Mexican Volcanic Belt. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 104, 1592-1607.
35. Righter, K., I. S. E. Carmichael, R. A. Becker y P. R. Renne, 1995. Pliocene-Quaternary volcanism and faulting at the intersection of the Gulf of California and the Mexican Volcanic Belt. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107, 612-626.
36. Rucker M. I., y Keaton J.R., 1998. Tracing an earth fissure using seismic refraction methods with physical verification. Brochers, J.W., ed. *Land Subsidence Case Studies and Current Research*, Proceedings of the dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence, Association of Engineering Geologists, special publication, no 8, p. 207-216.
37. Telford, W. M., L. P. Geldart y R. F. Sheriff, 1990. *Applied Geophysics*. Second Edition. Cambridge University Press. 770 pp.
38. Thompson, D. T., 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, vol. 47, p. 31-37.
39. Yaghoobian, A., G. A. Boustead y T. M. Dobush, 1997. Object delineation using Euler's homogeneity equation: Location and depth determination of buried ferro-metallic bodies. *Proc. of the Symp. on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, San Diego, vol. 2, p.613-632.

