



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELO TRIDIMENSIONAL DE LA SECUENCIA
ESTRATIGRÁFICA DEL ÁREA DE TUZANTLA,
MICHOACÁN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O G E O L O G O

P R E S E N T A :

J U D I T H C A L L E J A S M O R E N O

ASESOR: DRA. ELENA CENTENO GARCÍA



CD. UNIVERSITARIA

ENERO, 2008

A Rodrigo.

El Universo tiene un sólo
sentido cuando tenemos con
quien compartir nuestras
emociones.

P. Cohelo

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Ingeniería, mi alma mater, por darme la oportunidad de aprender y por darme una formación incomparable.

A la Doctora Elena Centeno, por darme la oportunidad de participar en un proyecto, dejarme aprender y conocer más de la geología. A mis sinodales Claudia Mendoza, Gilberto Silva, Emiliano Campos y Mariano Cerca, por sus comentarios y sugerencias y por el tiempo que dedicaron en la revisión de esta tesis.

A mis padres, Estela y Melesio, por su cariño y apoyo y por la confianza en que algún día lo lograría.

A mis hermanos, Estela y Oscar, por su apoyo incondicional, su confianza y por hacerme sentir que cuento con ustedes.

A Miguel Morales por compartir conmigo tus conocimientos, por tu apoyo en campo y por el ánimo que me has dado en todo este tiempo.

A Mara y Carlos, por sus consejos y apoyo, a todos los de la barra, Gerardo, Abraham, Georgina, Josseline, Gabriel, Mara, Nadia, Cesar por haberse cruzado en mí camino y hacer mi estancia en la Facultad de Ingeniería más agradable.

A Giovanni, a Benjamín, por ser buenos amigos, por compartir conmigo y por estar en todo momento, a Fanny y Luis porque siempre estuvieron motivándome para continuar.

A Emilio y Mario por estar pendientes de mi trabajo, por escucharme siempre que lo necesité, a mis compañeros del instituto, por su atención y apoyo en el desarrollo de mi trabajo.

A toda la gente que no menciono, pero que es importante y que hizo posible la culminación de esta tesis.

Un agradecimiento especial a **Rodrigo**, por todo, por tu ayuda en campo, en la magnetometría, por compartir conmigo tantos momentos bonitos, por tu paciencia, por tu amor y apoyo y porque no hubiera sido lo mismo sin tu presencia. Muchas Gracias.

INDICE**LISTA DE FIGURAS**

RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	3
II. ASPECTOS GENERALES	5
II.1. LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO	5
II.2. OBJETIVOS	7
II.3. METODOLOGÍA	8
II.4. CLIMA, VEGETACIÓN Y ACTIVIDADES ECONÓMICAS	12
II.5. ESTUDIOS PREVIOS	13
III. GEOMORFOLOGIA	16
IV. ESTRATIGRAFÍA	20
IV.1. GEOLOGÍA REGIONAL	20
IV.2. ESTRATIGRAFÍA Y FACIES DE LA ZONA DE ESTUDIO	23
IV.2.1. BASAMENTO	25
IV.2.2. FORMACIÓN TIQUICHEO	27
IV.2.3. FORMACIÓN TUZANTLA	29
MIEMBRO ARROYO SECO	30
MIEMBRO CABILDO	31

IV.2.4. FORMACIÓN MEXICANA	33
IV.2.5. FORMACION YERBABUENA	34
IV.2.6. TOBA TAMARINDO	37
IV.2.7. DIQUE TUZANTLA	38
IV.2.8. DEPÓSITOS DE TERRAZAS. CONGLOMERADO DE LA CIMA	39
IV.3. GEOLOGIA ESTRUCTURAL	40
V. MAGENTOMETRIA	42
V.1. INTRODUCCIÓN	42
V.2. RESULTADOS	45
VI. MODELADO DE LA SEDIMENTACIÓN Y EROSIÓN	58
VI.1. MODELO 3D	61
VI.2. EVOLUCIÓN ESTRATIGRÁFICA	63
VI.3. DISCUSIÓN	66
VII. CONCLUSIONES	69
APÉNDICE 1. CLASIFICACIÓN DE FACIES DE MIALL	71
APÉNDICE 2. EL GEOMAGNETISMO	73
APÉNDICE 3. BASE DE DATOS MEGNETOMETRICOS	77
REFERENCIAS	88

Lista de figuras

- Figura 1.** Ubicación del área de estudio y principales vías de acceso.
- Figura 2.** Panorámica mostrando la adquisición de datos magnéticos.
- Figura 3.** Mapa hidrológico de México con la cuenca del Río balsas.
- FIGURA 4.** Mapa geológico de la zona.
- Figura 5.** Columna estratigráfica general del área.
- Figura 6.** Detalles del basamento y amonitas contenidas en él.
- Figura 7.** Detalle de la formación Tiquicheo
- Figura 8.** Esquema representativo de las facies de la formación Tiquicheo.
- Figura 9.** Esquema representativo de las facies del miembro Arroyo Seco de la Formación Tuzantla.
- Figura 10.** Panorámica de la Formación Tuzantla, miembro Cabildo.
- Figura 11.** Afloramiento de la formación Mexicana, sobre la carretera a Tiquicheo.
- Figura 12.** Detalle de la formación Yerbabuena, facies Gris.
- Figura 13.** Panorámica de la Toba Tamarindo y detalle de plantas fósiles en la base.
- Figura 14.** Afloramiento del dique Tuzantla.
- Figura 15.** Afloramiento de una terraza.
- Figura 16.** Fotografía aérea de la región con sus estructuras geológicas.
- Figura 17.** Anomalía magnética antes y después de reducción al polo.
- Figura 18.** Mapa de campo magnético y localización de datos

Figura 19. Mapa de campo magnético y sobreposición con la geología.

Figura 20. Mapa de corrección temporal y sobreposición con el mapa geológico.

Figura 21. Mapa de primera derivada y sobreposición con el mapa geológico.

Figura 22. Mapa de segunda derivada vertical y sobreposición con el mapa geológico.

Figura 23. Mapa de anomalía magnética reducida al polo y sobreposición con el mapa geológico.

Figura 24. Procesos magnéticos: Anomalía magnética, anomalía magnética reducida al polo, primera derivada y segunda derivada.

Figura 25. Mapa de localización de columnas con las cuales se realizó el modelado.

Figura 26. Evolución estratigráfica modelada en RockWorks

Resumen

Al suroeste del poblado de Zitácuaro, en la porción sureste del estado de Michoacán se trabajó en las secuencias sedimentarias continentales del oriente de La Cuenca de Cutzamala (sur de México). En estos depósitos se reconocieron litofacies para su reagrupación en formaciones en las cuales se definieron sus características litológicas. Las unidades litoestratigráficas informales que se proponen son las siguientes: formación Cabildo, formación Arroyo Seco, formación Yerbabuena, formación Mexicana y toba Tamarindo. Además se observaron una serie de terrazas fluviales y un dique de composición básica, denominado dique Tuzantla. El basamento del área está constituido por rocas marinas cretácicas previamente deformadas, y que delimitan a la cuenca sedimentaria continental estudiada.

Se realizó un modelado tridimensional, en el software para PC RockWorks, de la estratigrafía y su evolución. Con dicho software se realizaron mapas basados en las columnas medidas en campo, y modelos de correlación en dos y tres dimensiones para tener una mejor visión de la estratigrafía de la zona.

Se identificaron diferentes eventos de erosión-depósito, entre las unidades y con base en las observaciones de campo se concluye que el cauce actual del Río Tuzantla no ha tenido una variación significativa desde el depósito de la formación Tuzantla ya que estas terrazas se encontraron a unos cuantos metros del cauce actual y además las plantas fósiles observadas en la base de la toba Tamarindo y el mismo depósito de la toba que parece haber sido emplazado en el valle formado por el río.

La secuencia sedimentaria ha sido afectada por diversas estructuras, entre ellas la falla Tuzantla, a través de la cual se emplazó un dique de composición básica, que tiene una longitud aproximada de 19km y un espesor en el área de 25m en promedio. Se infiere la probable existencia de un sistema de fallas posterior a este emplazamiento, con dirección NW-SE. Dicho sistema se infiere, primero por los lineamientos que se pueden observar en las imágenes aéreas y que coinciden aparentemente con el desplazamiento del dique Tuzantla, Además, se infirieron dichas fallas a partir de los resultados del análisis de los datos magnéticos.

También se realizó un estudio magnético como apoyo y para correlación con los resultados obtenidos en el trabajo geológico. El objetivo de este estudio fue determinar la distribución del basamento en el subsuelo y los contactos de las formaciones, así como la distribución de las estructuras geológicas. Mediante los diferentes procesos como reducción al polo, primera y segunda derivadas, y otros, se pudieron inferir algunos contactos y estructuras que no afloran en la zona.

I. Introducción

La arquitectura de la sedimentación en cuencas continentales está caracterizada, por lo regular, por una geometría compleja. Esto se debe a que es controlada por varios procesos que actúan al mismo tiempo y que determinan la historia de erosión-depósito de una región. La arquitectura deposicional se define como la geometría de cuerpos sedimentarios mayores (a escala de decenas, cientos y miles de metros) y es controlada por: 1) la geometría de la cuenca de depósito, 2) la pendiente y la orientación de los paleotaludes de la cuenca, 3) la elevación del área fuente, 4) los procesos de erosión, transporte y depósito, 5) el clima y sus cambios y 6) la alternancia de eventos de subsidencia y levantamiento. La mayoría de estos factores están, en cierta medida, controlados por la tectónica regional (Miall, 1996).

La porción noreste del Estado de Michoacán es una región idónea para estudiar los procesos que controlan la sedimentación continental, ya que su estratigrafía cenozoica está bien preservada, y se presentan afloramientos de varios kilómetros de la columna a lo largo de carreteras y cañadas. En particular se eligió la región de Tuzantla porque en ella no se había realizado ningún trabajo a detalle, ni de cartografía, ni de estratigrafía-sedimentología, además de que presenta un número considerable de paquetes sedimentarios, con características y composiciones diversas, y que están limitados por importantes discordancias erosionales.

La presente tesis tiene por objetivo determinar la arquitectura deposicional y definir cuántos eventos de erosión-depósito ocurrieron en la región de Tuzantla. Con el objetivo de construir y tener una mejor visualización de la historia deposicional, se decidió

realizar un modelo de la sedimentación en tres dimensiones con software especializado. Por otra parte, esta tesis es una muestra de la aplicación de un software diseñado para el modelado de información de columnas estratigráficas (RockWorks) a áreas con columnas expuestas en la superficie.

También se presenta la cartografía geológica detallada con una nueva propuesta de unidades litoestratigráficas y un análisis de facies de las sucesiones sedimentarias continentales de la región.

Se realizó un estudio magnético para observar el comportamiento y la distribución de las unidades litológicas y estructuras en superficie y en el subsuelo, generando mapas que se correlacionaron con la información geológica.

II. Aspectos generales

II.1. Localización y vías de acceso

El área de estudio se encuentra localizada en los alrededores del poblado de Tuzantla, aproximadamente a 30km al suroeste de la ciudad de Zitácuaro, en el estado de Michoacán de Ocampo. Esta zona pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur y es la parte oriental de la Región de Tierra Caliente.

La hoja topográfica E14-A45 Tuzantla, publicada por el INEGI contiene el área estudiada, la cual está limitada por las coordenadas 19°10' a 19°15' de latitud norte, y 100°37' a 100°29' de longitud oeste, y abarca una superficie aproximada de 100km². Dentro del área se encuentran los poblados de Tuzantla, Caña Quemada, La Yerbabuena, Los Pinzanes, Mesa del Aire, San Juan de Dios, Arroyo Seco y Las Anonas, entre otros.

El acceso a la zona es por la carretera federal 51, partiendo de la Ciudad de Zitácuaro y con rumbo a Huetamo, Michoacán. El pueblo de Tuzantla da nombre también al municipio del cual es cabecera. El municipio de Tuzantla limita al norte con los municipios de Hidalgo y Jungapeo, al sur con el Estado de México, al este con el municipio de Benito Juárez y Susupuato y al oeste con el municipio de Tiquicheo. (Figura 1).

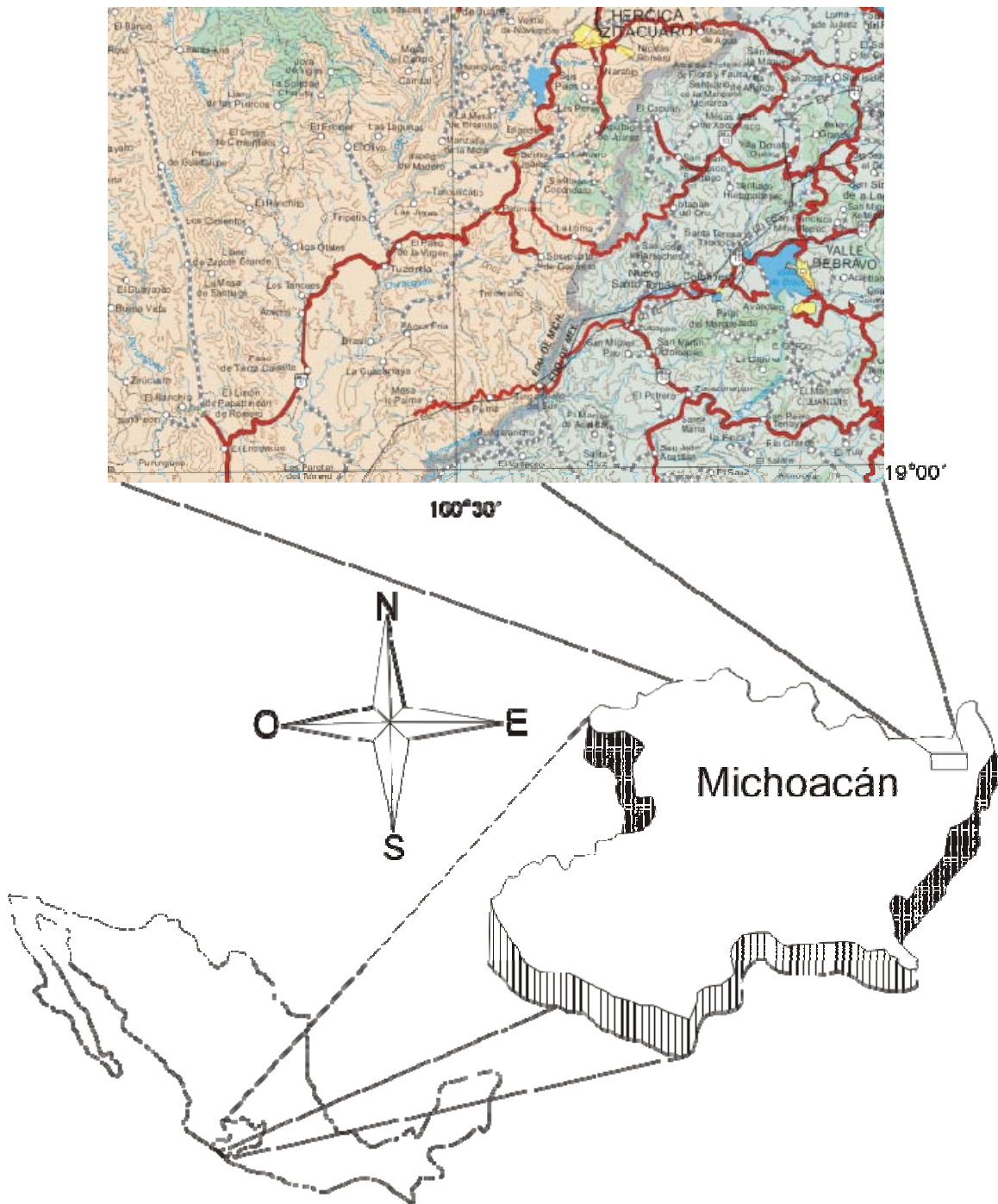


Figura 1. La zona de estudio se localiza en el suroeste de México, al noreste en el estado de Michoacán, como se observa en la figura.

II.2. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivos principales:

- Identificar las unidades estratigráficas presentes en el área de estudio.
- Determinar la evolución sedimentaria, esto se refiere a identificar cuantos eventos de depósito y erosión ocurrieron en el área.
- Generar un modelo tridimensional del paquete sedimentario del área de Tuzantla.
- Construir un modelo para explicar la arquitectura deposicional de la cuenca.

Los objetivos particulares de este estudio son:

- Elaborar un mapa geológico en escala 1:50,000 del área de estudio.
- Levantar columnas estratigráficas.
- Agrupar los paquetes rocosos en unidades litoestratigráficas informales y determinar sus relaciones espaciales.
- Determinar las facies sedimentarias de manera general.
- Identificar los rasgos estructurales principales.

II.3. Metodología

Para la realización de esta tesis se hizo una recopilación bibliográfica de los trabajos regionales del área y zonas colindantes. Con base en dichos trabajos y sobre una base topográfica a escala 1:25,000, se delimitó el basamento de la cuenca y se infirió su distribución y morfología.

Además, se realizó la interpretación de las fotografías aéreas de la zona, elaborando así un mapa fotogeológico de la región. La información fotogeológica se transfirió a una base topográfica escala 1:12,500, obtenida de una ampliación del mapa topográfico de la zona (INEGI, 2001).

El trabajo de campo consistió en recorridos detallados en toda la zona, durante los cuales se realizaron las descripciones litológicas de los afloramientos, se recolectaron algunas muestras representativas para estudios petrográficos, se hicieron esquemas ilustrativos y se midieron las estructuras sedimentarias primarias y secundarias existentes. El área que se trabajó a detalle se encuentra en los alrededores del poblado de Tuzantla entre las coordenadas 19°11' a 19°15' de latitud norte, y 100°36' a 100°32' de longitud oeste; el resto de la cartografía fue apoyada en las fotografías aéreas y algunos recorridos generales. Con los recorridos de campo y los datos colectados, se ajustó la interpretación de las fotografías aéreas y se elaboró el mapa geológico. Al mismo tiempo se levantaron columnas estratigráficas y se midieron espesores de las unidades para utilizar dicha información en la realización de un modelado en 3D. También se realizaron observaciones de las características sedimentológicas y texturales de las rocas, con la finalidad de determinar de manera

general las facies sedimentarias. Para ubicar los puntos de los recorridos y las descripciones se utilizó un receptor GPS, con el cual se registraron los datos en coordenadas UTM y la elevación en metros que se graficaron en un mapa topográfico.

Se elaboraron columnas estratigráficas y se definieron unidades litoestratigraficas con base en los lineamientos del código de nomenclatura estratigráfica, para establecer la correlación y definir la secuencia estratigráfica.

También se hizo una descripción de la geomorfología y red hidrográfica de la región, considerando la morfología, asociación estratigráfica y su ubicación espacial.

Existe una clasificación de litofacies definida por Miall (1996), la cual esta basada en observaciones en depósitos recientes y se extrapolan a ambientes antiguos, debido a que son procesos similares. Miall (1996) propone una clasificación simple usando un código de letras, las letras mayúsculas indican el tamaño de grano dominante (G=gravas, S=arenas y F=facies de grano fino, incluyendo arena muy fina y lodos); las letras minúsculas se usan para las características texturales de la litofacies (por ejemplo: p=estratificación cruzada planar, ms=matriz soportado).

Con base en dicha clasificación de facies (Ver apéndice 1, tabla 1), se realizó el análisis de facies de cada unidad estratigráfica con el fin de determinar los ambientes sedimentarios. Las facies se definieron a partir de las características litológicas y texturales observables de manera macroscópica.

Para determinar el análisis de facies, se utilizó la tabla de clasificación de facies y elementos texturales en depósitos fluviales de Miall (1996), (Ver apéndice 1, tabla 2). Aquí a cada elemento se le puede asignar dos o tres letras mayúsculas, por ejemplo para canales CH y dependiendo el tamaño o la forma pueden ser CHS o CHR; y estos elementos se correlacionan con la clasificación de facies para acotar el ambiente de depósito y poder así tener una mejor interpretación. Para hacer esta clasificación hay que tener en cuenta la escala a la que se trabaja, tener cuidado si es una facies individual, un set o un coset.

En cuanto al estudio geofísico se utilizó el método magnético terrestre. Los datos fueron obtenidos con un magnetómetro de marca Geometrics, modelo G-826, que funciona bajo el principio de precesión protónica. Se realizaron los levantamientos



Figura 2. Panorámica mostrando la adquisición de datos magnéticos en el área de Tuzantla.

magnéticos a través de diversas líneas con estaciones equiespaciadas y con el objetivo de obtener una amplia cobertura de la zona. Las estaciones fueron referenciadas con el sistema de coordenadas UTM y con el horario de Greenwich (Apéndice 2). A partir de los datos obtenidos se construyó un mapa de la anomalía de campo total. También se

realizaron los procesos convencionales, iniciando por la corrección por variación diurna, para obtener así el mapa de anomalía magnética, el mapa de reducción al polo, así como la primera y segunda derivadas verticales.

Los datos se procesaron con el programa MagneKit 1.0 (Lora y Hernández, 2003) y se graficaron con el programa Surfer 8.0. De cada uno de los procesos se obtuvieron los mapas e interpretaciones correspondientes.

A cada mapa se le sobrepuso la geología para correlacionar la respuesta magnética de cada litología y para intentar obtener la distribución del basamento.

Como parte del manejo de los datos y el conocimiento de diferente software se utilizó el Surfer v.8 de Golden Software y el Global Mapper v5.03, el primero se utilizó en la elaboración de mapas de isolíneas, hipsométricos, mapas en relieve y para hacer interpolaciones de los datos; el segundo se usó para la manipulación y visualización de los datos. Para este trabajo se utilizaron los datos digitales publicados por el INEGI (www.inegi.gob.mx).

La información estratigráfica se capturó en el programa RockWorks, que es un programa para el análisis de cuencas sedimentarias. El RockWorks tiene la característica de exportar las imágenes en diferentes formatos, para la presentación de estas imágenes se exportaron en formato JPG, y la edición final de las imágenes con el programa CorelDRAW 12. Los datos de cada columna estratigráfica fueron introducidos con espesores reales,

ubicación en coordenadas UTM, elevación en metros y a cada formación se le dio un formato gráfico.

La elaboración del modelado consistió en realizar correlaciones columna a columna en dos y tres dimensiones, se realizó la proyección vertical, perfiles en diferentes direcciones para corroborar la consistencia de los datos y así poder concluir con el modelado tridimensional de la sucesión estratigráfica de la zona. La corroboración de los datos fue porque en el software utilizado no se puede tener un control de la representación de los datos, por su configuración.

Las imágenes obtenidas en el RockWorks fueron: columnas estratigráficas, secciones columna a columna y figuras en 3D, cada una de éstas fue interpretada y relacionada con la información de campo.

Para el análisis de la evolución geológica-estratigráfica se infirió la paleotopografía con los datos observados en campo; al no contar con edades ni las tasas de erosión-depósito, se presenta solamente un modelo de cómo ocurrió la secuencia de eventos, tratando de dar una idea de la evolución geológica.

II.4. Clima, vegetación y actividades económicas

El clima de la zona es cálido subhúmedo con lluvias en verano. Las temperaturas oscilan entre 19.9° a 36.7°C. La vegetación está formada principalmente por selva baja caducifolia, la cual cubre poco más de la mitad de la subprovincia del Balsas, y se presenta desde la parte centro hasta la sur de dicha

subprovincia. Esta selva se encuentra intercalada con áreas de pastizales inducidos y con zonas netamente agrícolas de temporal.

Las actividades económicas de la región de estudio son: agricultura, ganadería y extracción de material industrial y para construcción, así como el comercio.

II.5. Estudios previos

Las capas rojas que afloran en el área de estudio fueron originalmente descritas como rocas cenozoicas no diferenciadas en los mapas geológicos editados por el INEGI (INEGI, 1996). Previo al presente trabajo, no se ha realizado ningún estudio de detalle enfocado a entender la estratigrafía de la región de Tuzantla. Los trabajos que mencionan la geología del área de estudio abarcan una zona muy amplia, a escala regional, y se han orientado a entender las estructuras geológicas y eventos de deformación. En dichos estudios, la estratigrafía ha sido abordada de forma general. Esto ha originado problemas de nomenclatura y confusión, ya que se han propuesto diferentes nombres, distintas edades y formas de agrupar las sucesiones de rocas sedimentarias estudiadas en la presente tesis. A continuación se presentan y se discuten, de manera breve, estos trabajos previos.

Pasquaré *et al.* (1991) denominaron a la secuencia continental estudiada como Conglomerado Tuzantla y la asignan, sin presentar evidencias, al Eoceno. También proponen una probable correlación con la Formación Tzitzio que aflora al occidente del área de Tuzantla. En cambio, Menella *et al.* (2000) definen a la misma secuencia sedimentaria de la cuenca Tuzantla como Formación Tuzantla, y proponen una edad Oligoceno-Mioceno. En el presente

trabajo se estableció que las rocas previamente agrupadas bajo una sola unidad, pertenecen a varios eventos de depósito, por lo cual no pueden considerarse bajo el nombre de una sola formación.

En el mapa geológico 1:50,000 del COREMI, clave E14A45, se mencionan a las rocas del área como un conglomerado polimíctico con abundantes clastos de caliza, y lo agrupan junto con las rocas volcano-sedimentarias de edad Cretácico Inferior. Sin embargo, durante el presente estudio se observó una clara discordancia angular entre las capas rojas y las rocas del Cretácico Inferior, por lo cual se considera a estas rocas como unidades separadas.

Altamira-Areyán (2002) realizó un análisis de litofacies de la cuenca Cutzamala-Tiquicheo, localizada al occidente y sur-occidente del área de estudio, en el cual menciona a las rocas de la región de Tuzantla como asociación Tuzantla y las describe sobreyaciendo, de manera discordante, a la facies Bonetes que está formada por conglomerados, areniscas, calizas, brechas y rocas volcánicas. El mismo autor consideró a la facies Bonetes como de edad Paleoceno-Eoceno, sin embargo, Benammi *et al.* (2005) reportan restos fósiles de dinosaurios que fechan a las facies Bonetes como del Cretácico Superior. El trabajo de campo sugiere que el depósito de las unidades más antiguas de la región de Tuzantla (formaciones Tiquicheo y tal vez Tuzantla) pudiera ser contemporáneo al depósito de las rocas estudiadas por Altamira-Areyán (2002) y que subyacen a las Formaciones Mexicana, Hierbabuena de edad indeterminada.

En cuanto a la geología estructural del área, Menella *et al.* (2000) realizaron un estudio de las fallas que afectan a los depósitos continentales, en el cual proponen cuatro eventos de

deformación para la región, a los cuales llamó post-Tzitzio. Para la zona de estudio solo se observan dos eventos de deformación frágil y aunque no se hizo un análisis de detalle con las estructuras del área se puede decir que estos eventos coinciden con los estudiados por Menella en la zona.

Serrano-Durán (2005) efectuó un análisis estructural de los diques y fallas de la región de Tuzantla, Tiquicheo y Nanchititla con lo que propone dos fases de deformación, la primera como una fase de acortamiento que dio lugar al pliegue-falla de Tzitzio, la segunda como el desarrollo de fallas laterales con desplazamientos y orientación principalmente NW-SE, de Eoceno inferior como edad mínima; y además el emplazamiento de diques máficos y varios centros volcánicos. En el área de estudio se observa el segundo evento que corresponde al fallamiento de dirección NW-SE y también se observó el emplazamiento de diques. Es importante mencionar que la geología estructural no fue objetivo de este estudio.

III. Geomorfología

La región en la que se localiza el área de estudio, pertenece a una subcuenca de la cuenca hidrológica del Río Balsas, que para esta zona forma parte de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur y a su vez se encuentra enmarcada en la subprovincia de la Depresión del Balsas (Tierra Caliente). Esta última conforma una depresión al interior del continente en la parte austral de México alrededor del paralelo 19°N y del meridiano 101°W, cubre una superficie aproximada de 20,000km² y presenta una elevación promedio de 1,000m (Figura 3).

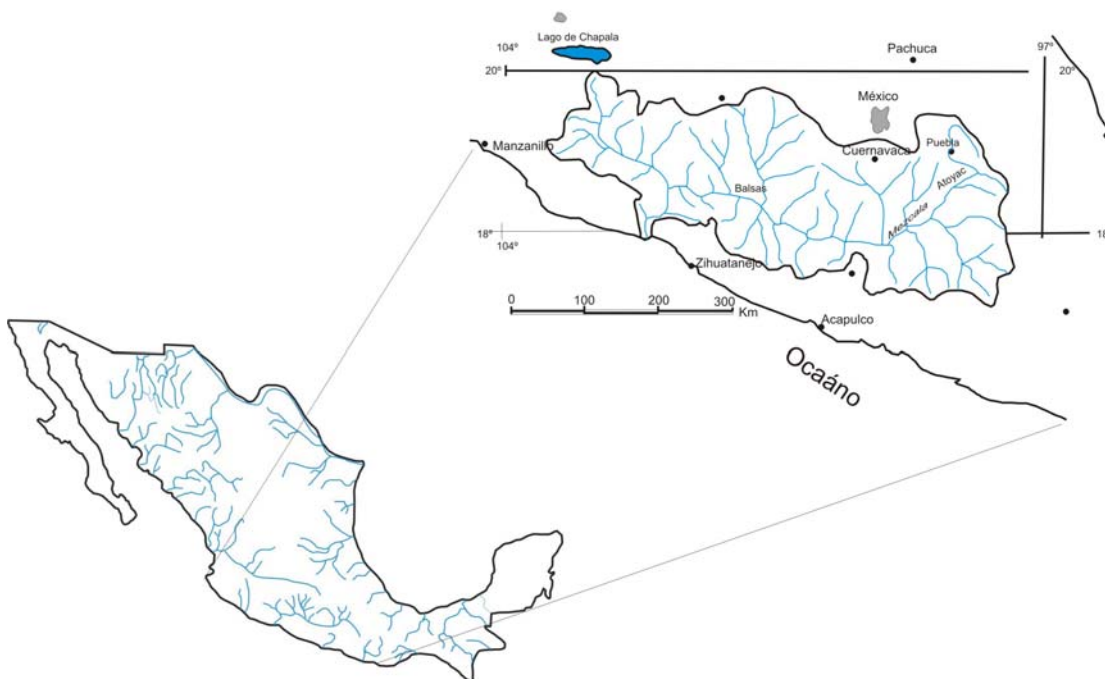


Figura 3. Mapa hidrológico de México, en el que se detalla la localización de la cuenca del Río Balsas.

El área de estudio presenta dos tipos de rasgos geomorfológicos, hacia el norte y al este se encuentra el Eje Neovolcánico que presenta un gradiente en las elevaciones hacia la depresión del Balsas que va de 3,000 a 1,600m (Figura 3), en dicha

cordillera se presentan numerosos afloramientos de rocas volcánicas; la red hidrográfica de esta zona está formada por un drenaje radial que parece estar controlado por las estructuras volcánicas que la conforman, como son volcanes escudo, conos cineríticos, volcanes compuestos, y otros. En la porción central se encuentra una depresión que corresponde a la cuenca del Río Tuzantla, esta depresión presenta una elevación promedio de 1,000m con un relieve de 500m y los rasgos geomorfológicos que están representados en esta zona son: mesas de dimensiones variables que pueden llegar hasta los 5,000m de diámetro, con pendientes abruptas; lomeríos alargados y algunas elevaciones con gran pendiente como el Cerro Cabildo. En esta región la red hidrográfica es en general radial-dendrítica y paralela en algunas zonas. Las corrientes principales del área son, el Río Tuzantla, que es un importante afluente del Río Balsas y que en general drena hacia el sur hasta desembocar en el Río Balsas en las inmediaciones de Ciudad Altamirano; y el Río Chiranguero, que a diferencia del anterior, éste fluye en sentido oeste y es casi perpendicular al Río Tuzantla, existen numerosos afluentes de estos que se presentan como corrientes intermitentes (Figura 3).

Un afluente del Río Tuzantla es el arroyo intermitente de la Barranca los Tejones que corta a las unidades más antiguas del área, formadas por rocas volcánicas y sedimentarias marinas, las cuales a su vez están cortadas por diques, cerca del poblado Los Pinzanes. Dichas rocas también afloran al este del Río las Juntas, que es la porción oriental del Río Chiranguero, a una elevación de 700m.

En la parte central del área afloran las rocas de la formación Tuzantla y hacia la parte noroccidental en el arroyo intermitente de

la Barranca La Mexicana se encuentra aflorando la formación Mexicana, formada por un conglomerado calcáreo expuesto con una altitud promedio de 700m. Hacia el sur, en el arroyo Seco, se encuentra aflorando el miembro Arroyo Seco compuesto por un conglomerado con clastos volcánicos y calcáreos y en el arroyo Calicanto, aún más al sur, se encuentra aflorando la formación Tiquicheo formada por capas limo-arenosas expuestas a una altura promedio de 650m.

El Río Chiranguero corta también al dique Tuzantla cerca del poblado de San Miguel.

Las rocas de la formación Tuzantla, que cubren la mayor parte de la zona de estudio, son rocas continentales conglomeráticas cortadas por los Ríos Tuzantla y Chiranguero, estas rocas forman el relieve más importante del área que es en el cerro del Cabildo, el cual tiene importantes diferencias de elevación desde 600 hasta 1,100m. Estas rocas continentales fueron erosionadas dando lugar a una paleotopografía que fue rellenada por sedimentos fluviales y derrames basálticos. Debido a que las rocas sedimentarias son más suaves y se erosionan más rápido que las rocas basálticas, estas últimas, se preservan en forma de mesas.

La erosión diferencial de los derrames y de los depósitos fluviales, formaron dos mesas importantes, la mesa de Teco que está ubicada en la porción noroccidental y presenta una elevación máxima de 880m, y hacia el noreste se encuentra la mesa de Tiamaro, con una altitud máxima de 1,420m.

En las márgenes del cauce del Río Tuzantla se pueden observar cantiles formados por un flujo piroclástico, denominado

toba Tamarindo, expuesto a una elevación promedio de 600m. El depósito de dicha toba relleno el paleocauce de este afluente, siendo a su vez erosionada por la misma corriente, lo que sugiere la incisión del Río Tuzantla, cuyo cauce tiene actualmente una elevación promedio de 565m en la zona de estudio. El proceso de incisión ha formado diferentes terrazas aluviales que se observan a lo largo del río.

En general, el relieve es de 500m y se clasifica como un relieve joven, ya que los valles son muy angostos, de hasta 50m de ancho en la mayoría de la zona de estudio y en las zonas más anchas llegan a tener hasta 1,000m.

IV. Estratigrafía

IV.1. Geología regional

La región de Tierra Caliente, la cual circunscribe el área objetivo del presente estudio, presenta una estratigrafía variable, con relaciones de campo complejas. Las rocas que forman el basamento de la cuenca de Tuzantla han sido agrupadas en dos entidades geológicas con estratigrafía distinta que son el Terreno Zihuatanejo, que forma el límite occidental de la cuenca, y el Terreno Arcelia que constituye el límite oriental de dicha cuenca (Centeno-García *et al.*, 2003).

Las rocas más antiguas del Terreno Zihuatanejo en la región de Huetamo-Tiquicheo son turbiditas formadas por lutitas y areniscas cuarcíticas, intensamente deformadas y localmente metamorfizadas a facies de esquistos verdes del Triásico Superior (Complejo Arteaga) (Altamira-Areyán, 2002; Morales-Gómez, 2005). Las cuales a su vez están cubiertas discordantemente por una secuencia gruesa de rocas marinas someras, principalmente volcaniclásticas, calizas y derrames de lava submarinos, que han sido descritas bajo diferentes nombres de formaciones: Angao, San Lucas, El Cajón, Mal Paso, Eréndira, Cumburindio, Zirándaro, Turitzio, Huetamo, y más. (Buitrón-Sánchez y Pantoja-Alor, 1995; Guerrero-Suástegui, 1997; Omaña-Pulido y Pantoja-Alor, 1998; Buitrón-Sánchez y Pantoja-Alor, 1994, 1998; Morales-Gómez, 2005). Estas unidades de rocas marinas someras, que son de edad Cretácico Inferior, fueron deformadas por un evento orogénico, cuya afinidad se desconoce, antes del depósito de las unidades de capas rojas que rellenan la cuenca.

El Terreno Arcelia esta constituido por lavas almohadilladas intercaladas con lutitas negras, pedernal y turbiditas volcanoclásticas de edad Cretácico Inferior. Dichas rocas fueron depositadas en ambientes marinos más profundos que las unidades del Terreno Zihuatanejo y se encuentran intensamente deformadas y parcialmente metamorfizadas (Talavera-Mendoza *et al.*, 1995).

En la mayor parte de la región de Tierra Caliente, están expuestas gruesos paquetes de capas rojas, el estudio de una porción de estas capas rojas es el objetivo de la presente tesis. Dichas rocas han sido descritas por autores previos como parte de la Formación Balsas del Cenozoico (Mauvois, 1977), o como la Formación Cutzamala del Cretácico Superior (Campa y Ramírez, 1979). Altamira-Areyán (2002) realiza una revisión de la estratigrafía de dichas capas rojas y propone conservar el nombre de Formación Cutzamala. La Formación Cutzamala está compuesta por una secuencia sedimentaria depositada en un ambiente fluvial, y consiste de secuencias de areniscas, conglomerados, lutitas, tobas y depósitos volcanoclásticos.

Los depósitos continentales de la Formación Cutzamala rellenaron una cuenca de grandes dimensiones denominada Cuenca de Tierra Caliente (Centeno-García *et al.*, 2004). Esta cuenca tuvo probablemente una extensión mínima de 150x120km. En este trabajo se analiza el sector oriental que corresponde al área de Tuzantla, donde su límite principalmente sedimentario fue cortado por la falla. La Cuenca de Tierra Caliente aparentemente tenía una forma elongada. El espesor total del relleno de la cuenca se desconoce, pero se calcula que rebasaba los 3,500m. Estos depósitos continentales representan una unidad de traslape sobre los terrenos Arcelia y Zihuatanejo.

En el presente trabajo se reconoció que por lo menos los depósitos continentales más antiguos del área de estudio forman parte de la Formación Cutzamala. Las rocas posteriores a la formación Cutzamala expuestas en el área de estudio y que no afloran en la región descrita por Altamira-Areyán (2002), fueron reagrupadas en nuevas unidades litoestratigráficas que se describen más adelante.

En el poniente y sur, las capas rojas de la Formación Cutzamala están cubiertas de manera discordante por sucesiones volcano-sedimentarias de las cuencas del Cenozoico Temprano, y hacia el norte por las rocas del Eje Neovolcánico Transmexicano.

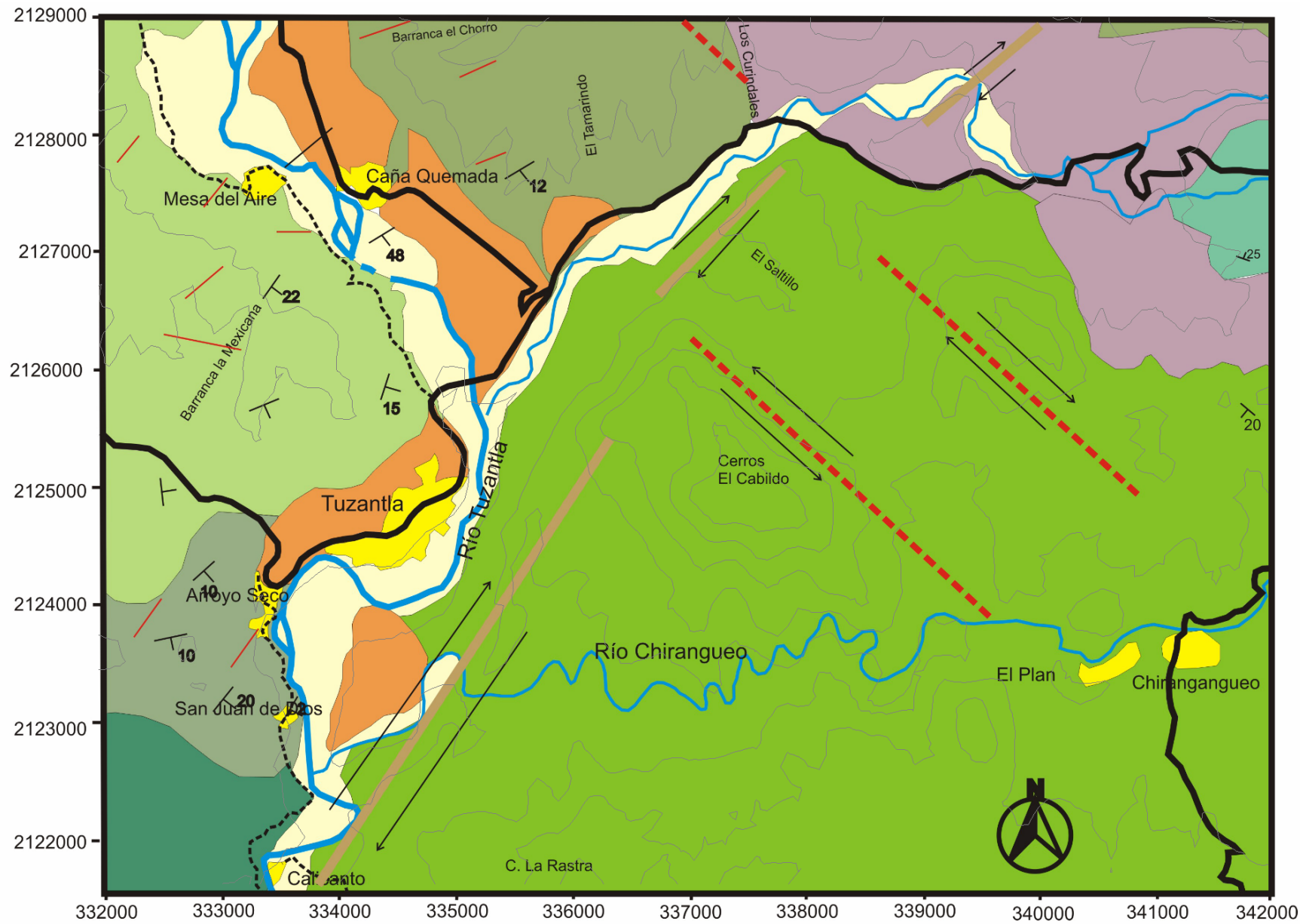
En particular, las capas rojas del área de estudio se encuentran en contacto deposicional o por falla con la sucesión volcano-sedimentaria marina del Cretácico Inferior del Terreno Arcelia (Talavera, 2000). Además, hacia el noroeste del área de estudio afloran calizas, de las que no se sabe a que entidad tectónica pertenecen. Al occidente los depósitos continentales estudiados en el presente trabajo se interdigitan con los depósitos del área de El Limón-Tiquicheo, estudiada por Altamira-Areyán (2002). Al norte y oriente, la secuencia continental del área de estudio está cubierta discordantemente por derrames y flujos piroclásticos pertenecientes a los edificios volcánicos del Eje Neovolcánico Transmexicano.

IV.2. Estratigrafía y facies de la zona de estudio:

La estratigrafía es el estudio de las rocas por su naturaleza, clasificación, espesores, contenido y sus relaciones temporales; estas relaciones pueden variar horizontal o verticalmente. En el presente trabajo, las formaciones se nombraron de manera preliminar de acuerdo a lo mencionado en el código de nomenclatura estratigráfica, el cual define a una formación como una unidad litoestratigráfica que representa un conjunto de estratos adyacentes susceptibles de reconocerse en su conjunto como una unidad en la clasificación de la sucesión estratigráfica, es decir que se pueden expresar en un mapa a escala 1:50,000.

Los paquetes de rocas sedimentarias continentales del área estudiada fueron agrupados por Menella, *et al.* (2000) como una sola unidad, a la cual denominó Formación Tuzantla; en este trabajo se propone mantener dicho nombre para una porción de la columna estratigráfica, la cual se subdividió en dos miembros (Arroyo Seco y Cabildo). El resto de las capas rojas fueron asignadas a otras tres unidades por su composición litológica, textura y relaciones de contacto (Figuras 4 y 5). Además se reconoció en el área de Tuzantla una de las facies de la formación Tiquicheo descrita por Altamira-Areyán (2002) dicha facies es elevada al rango de formación en este estudio.

También se presenta un análisis de las facies que se reconocieron en cada formación. Una facies sedimentaria esta definida como las características físicas generales de una roca (composición, textura, estructuras sedimentarias) y paleontológicas.



LEYENDA

- Depósitos fluviales
- Toba Tamarindo
- Fm. Hierbabuena
- Fm. Mexicana
- Miembro Cabildo
- Miembro Arroyo Seco } Fm. Tuzantla
- Fm. Tiquicheo
- Basamento
- Depósitos no diferenciados

- Fallas
- Rumbo y echado
- Dique-Falla
- Ríos
- Carreteras
- Poblados

0 1000 2000
Escala

Coordenadas UTM

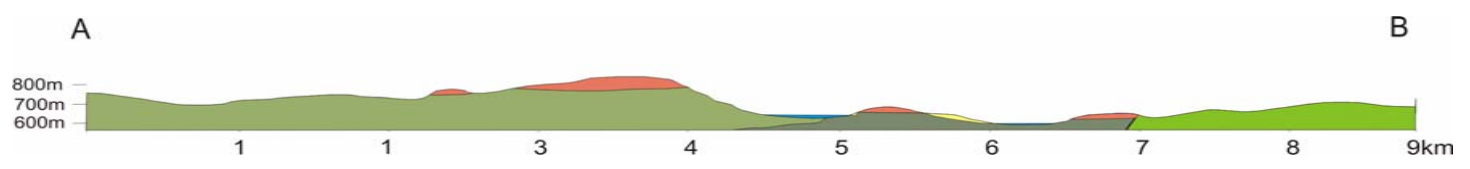


Figura 4. Mapa geológico de la zona

LOCALIZACIÓN

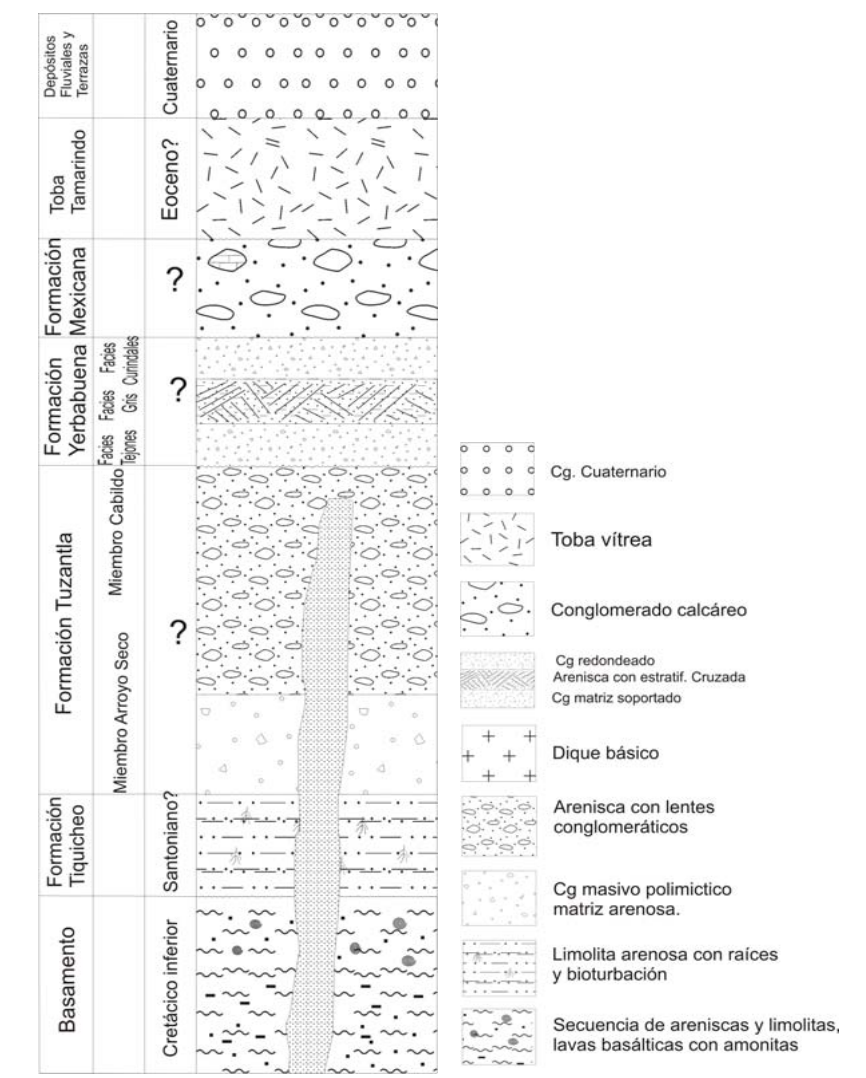
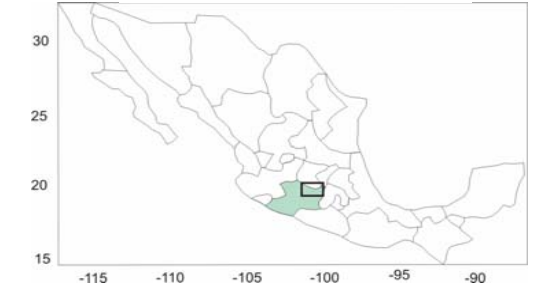


Figura 5. Columna estratigráfica general del área

En las unidades sedimentarias del área de Tuzantla se identificaron diferentes facies de areniscas y conglomerados, utilizando la nomenclatura de Miall (1996) establecida para los elementos deposicionales en ambientes fluviales. La clasificación de facies utilizada en el presente estudio se resume en la metodología y en las tablas del Apéndice I.

A continuación se describen los aspectos estratigráficos y las facies del área de estudio:

IV.2.1. Basamento.

El basamento de la cuenca está expuesto en la parte nororiental del área de estudio y cubre un área de 4km² aproximadamente, aflora en la desviación hacia Chiranguero y se extiende hasta las faldas del cerro La Cruz y al norte de los Pinzanes, en el Río Campanario y en la Barranca los Tejones (Figuras 4 y 5).

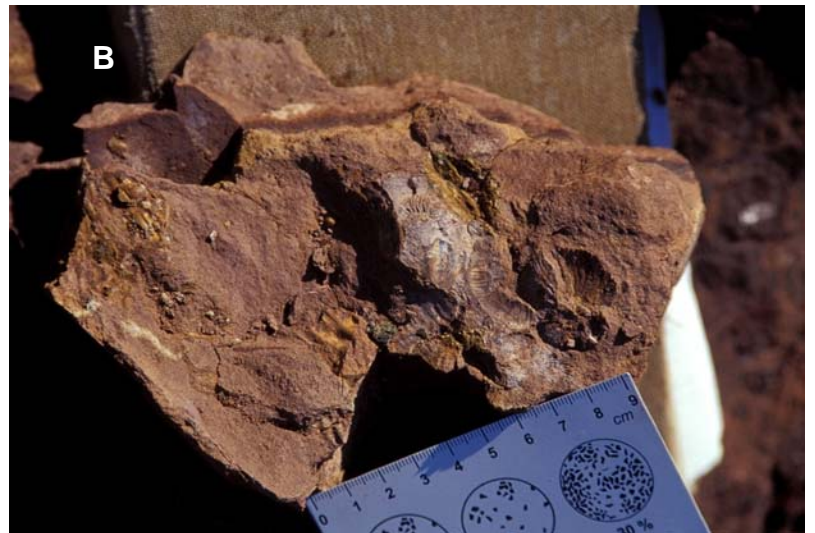
Está constituido por una secuencia marina de areniscas, limolitas, y derrames de lavas basálticas y andesíticas, y contiene gran cantidad de amonitas. No se tiene control del espesor de estas unidades debido a que no están expuestas en su totalidad. Estas rocas son del Cretácico inferior, fechadas por la presencia de amonitas (com. per. R. Barragán Manzo) (Figura 6). De manera discordante lo cubre un paquete de capas rojas no diferenciadas y sedimentos aluviales como producto de la erosión.

En la Barranca los Curindales se encuentra expuesta una secuencia de areniscas y lutitas con deformación intensa la cual no

se estudió a detalle, presenta estratificación delgada, paralela y continua es de color amarillo y no se observó contenido fósil. Sobreyaciendo a esta unidad se encuentra en contacto discordante un conglomerado polimíctico, matriz soportado (Figura 6), cuya edad se desconoce. Ambas unidades contienen estratos calizas, por lo que se consideran como depósitos marinos que forman parte de las unidades del basamento. Estas rocas fueron descubiertas en el transcurso del trabajo de campo, se consideran que corresponden a las rocas sedimentarias de la Formación Angao de la región de Huetamo Michoacán, (Talavera y Suastegui, 2000)



Figura 6. Se muestra la unidad denominada Basamento. A) areniscas y lutitas deformadas, en la parte superior se observa un conglomerado no diferenciado, sobreyaciendo a las capas deformadas. B) Detalle de las amonitas encontradas en esta unidad.



IV.2.2. Formación Tiquicheo.

Se denominan en este trabajo de manera informal como Formación Tiquicheo a las capas rojas limo-arenosas de gran espesor y estructura masiva, cuyas facies son similares a las descritas por Altamira-Areyán (2002) en la región de Tiquicheo. Sin embargo, no se determinó en este trabajo si pertenecen a un mismo nivel estratigráfico o podría ser que sea más joven en el área de Tuzantla.

Aflora en la parte suroccidental del área sobre la terracería a El Trafique y también se encuentran hacia el norte del área sobre la carretera que va a El Olivo en las orillas del Río Tuzantla (fuera del área de estudio) (Figuras 4 y 5).

Es la unidad continental más antigua que aflora en el área, su contacto inferior no está expuesto en la región y el contacto superior es erosivo discordante con la Formación Tuzantla; en el sector suroeste aparece en contacto por falla con la misma formación, y en dicho contacto se emplazó el dique Tuzantla.

Esta unidad se encuentra cortada por pequeñas fallas (Figura 7) de orientación NE-SW y NW-SE con desplazamiento lateral de unos cuantos metros, no se pudo identificar el sentido del desplazamiento.

El espesor de la formación Tiquicheo se desconoce puesto que no se observó la base, pero se infiere, con las observaciones realizadas en el área, que afloran por lo menos 100m de espesor. Se considera como del Cretácico tardío (Santoniano-Maastrichtiano)

a la Formación Tiquicheo de edad semejante a la propuesta por Benammi *et al.* (2005)



Figura 7. Detalle de la formación Tiquicheo, se logra observar un plano de falla con algunas estrías en la porción central de la fotografía.

La formación Tiquicheo está constituida por dos facies (Figura 8) una de limolita arenosa que corresponden a las facies Fsm (limo y arcilla masivos) y la facies Fr (limo y arcillas masivas con raíces y bioturbación) (Miall, 1996) (Apéndice 1). Se trata de una limolita ligeramente arenosa, masiva, con restos de raíces, no presenta laminación o indicios de estratificación, es muy deleznable, y contiene clastos poco abundantes del tamaño de arena fina.

La interpretación de estas facies (tabla 2) se asocia a planicies de inundación o canales abandonados donde el flujo es muy lento (FF). La ausencia de estructuras primarias nos indica que la actividad orgánica destruyó las estructuras y dio lugar a este tipo de limolita masiva, esto se apoya en el hecho de que contiene rizolitos.

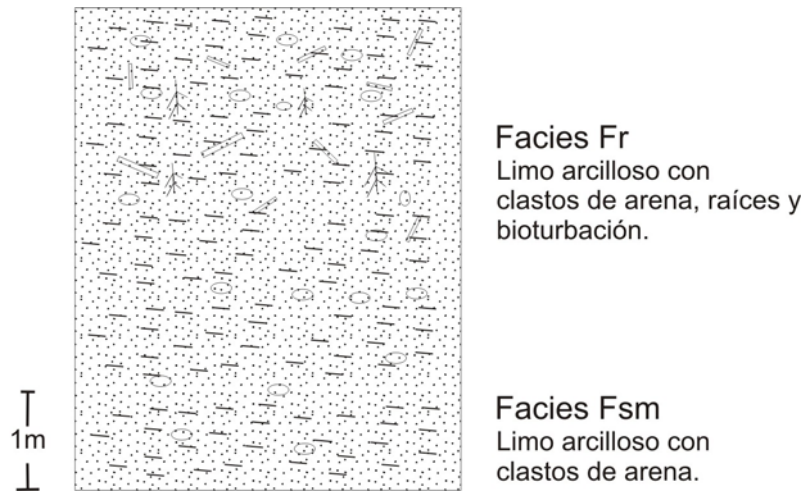


Figura 8. Esquema representativo de las facies de la formación Tiquicheo medidas en campo, en un afloramiento sobre la terracería que conecta la población de San Juan de Dios con la del Tráfiq.

IV.2.3. Formación Tuzantla.

Se redefine informalmente con este nombre al paquete sedimentario, constituido por un conglomerado rojizo masivo de matriz arenosa, que se encuentra aflorando en la parte centro y sur del área, en los cerros Cabildo y La Rastra, abarcando un área de 45km² dentro del área cartografiada (Figuras 4 y 5). La formación está constituida por un conglomerado rojizo masivo de matriz arenosa.

Se encuentra en contacto tectónico hacia el oeste con la formación Tiquicheo, mediante la falla que contiene al dique Tuzantla, y hacia el norte por la falla La Yerbabuena, de orientación NW-SE, que lo pone en contacto con la formación Yerbabuena.

La base de esta secuencia no aflora en el área, pero su espesor mínimo es de 600m. La edad se desconoce, se infiere que pudieran ser del Cretácico tardío por su posición estratigráfica.

La Formación Tuzantla se dividió en dos miembros: el Miembro Arroyo Seco que es el más antiguo, y el Miembro Cabildo, ya que se encontraron diferencias en textura y composición.

Miembro Arroyo Seco

Se localiza en la parte este del poblado de Tuzantla, cerca de San Juan de Dios, cubre una extensión aproximada de 4km².

Está constituida por un conglomerado polimíctico, matriz soportado, mal clasificado, sin gradación ni estratificación, con horizontes de arena gruesa y arena conglomerática, no se observa material fósil (Figura 9), presenta gran cantidad de fallas de desplazamiento lateral de orientación preferencial NW-SE.

El Miembro Arroyo Seco sobreyace de manera discordante, en contacto erosivo a la formación Tiquicheo, y subyace también discordantemente a la formación Mexicana. Se desconoce el espesor total de este miembro, en el área afloran aproximadamente 50m. Estos contactos fueron inferidos por la posición de los estratos y por algunas observaciones fuera del área de estudio.

Las facies identificadas en este miembro son (Figura 9):

Facies Gmm (conglomerado matriz soportado) que se intercala con facies St y Sp de areniscas (areniscas muy gruesas y con estratificación planar). La facies conglomerática es matriz soportada, los clastos son subángulosos a subredondeados. La composición de

la mayoría de los clastos es volcánica de tamaño entre uno y 18cm y están muy mal clasificados. Los horizontes de areniscas son de grano muy grueso, subredondeados y está bien clasificada.

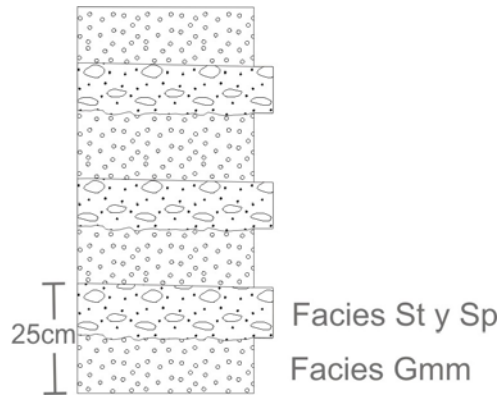


Figura 9. Esquema representativo de las facies del miembro Arroyo Seco, de la Formación Tuzantla.

Miembro Cabildo

Este conglomerado es polimodal, con clastos de subángulosos a angulosos, de composición volcánica principalmente, el tamaño de estos clastos varía desde 5cm hasta 60cm de diámetro. La estratificación es paralela y discontinua, de estratos gruesos y no contiene material fósil.



Figura 10. Panorámica de la Formación Tuzantla, miembro Cabildo.

Esta formación cubre la mayor parte del área, aproximadamente 45km², formando los cerros Cabildo y la Rastra.

Las facies identificadas en el miembro Cabildo son:

Arenisca en facies Sh, que contiene lentes conglomeráticos en facies Gmm. La arenisca es de grano medio a grueso y está alternada con las facies de conglomerado grueso (Gp). La facies de arenas presenta estratificación discontinua, paralela, los estratos están medianos y sin gradación (Figura 10), está pobremente clasificado y contienen una pequeña cantidad de clastos de cuatro a un centímetro de diámetro y son subredondeados. La composición es en su mayoría volcánica, aunque también se observan clastos de areniscas y cuarzo. No se encontraron fósiles.

Se considera que las areniscas están asociadas a un ambiente fluvial, la presencia de los lentes conglomeráticos sugiere que se formaron por los rellenos de canales. La repetición de la estratificación de areniscas con los lentes conglomeráticos sugiere una ciclicidad en el ambiente fluvial, por sus características textuales aparentemente corresponde a depósitos de abanico aluvial.

IV.2.4. Formación Mexicana.

En el presente trabajo se propone el nombre de formación Mexicana para las rocas localizadas hacia el noroeste de Tuzantla, en la base de la Barranca La Mexicana (Figura 11), y que cubren un área de 7km² aproximadamente (Figura 4).

La morfología de esta unidad se presenta en arroyos paralelos, con laderas suaves, aunque en algunas zonas se observan acantilados de 10 a 20m.

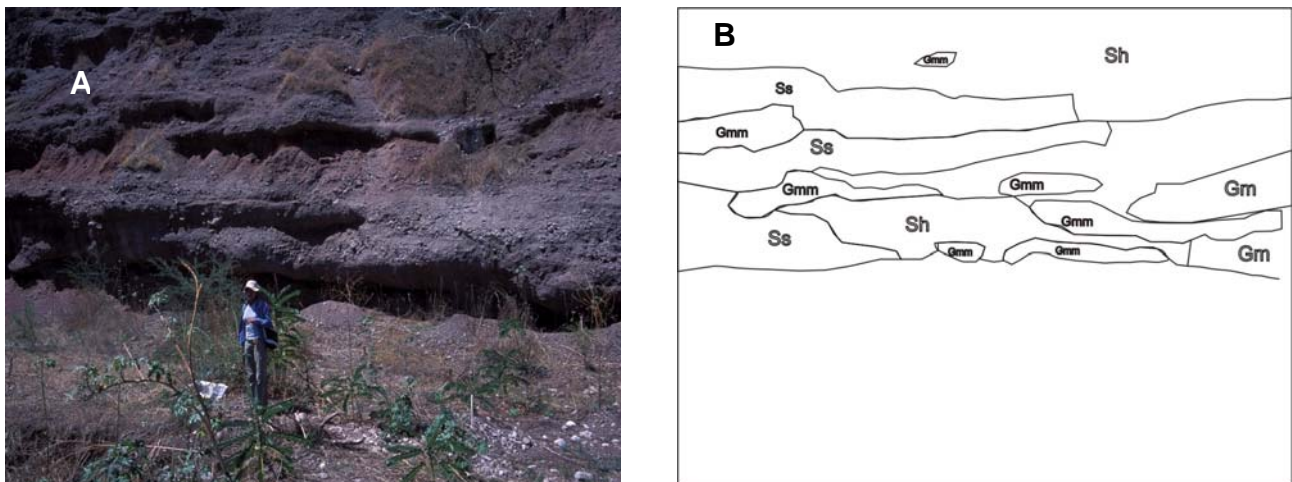


Figura 11. A) Afloramiento de la formación Mexicana, sobre la carretera a Tiquicheo. B) Esquema en el que se muestra la distribución de facies en este afloramiento.

Litológicamente es un conglomerado fino masivo con estratificación incipiente y con lentes de conglomerado grueso, contiene clastos de rocas ígneas y abundantes clastos de caliza, las partículas son subredondeadas. El conglomerado está mal clasificado y es polimodal (Figura 11).

Sobreyace al miembro Arroyo Seco y la cima que está erosionada llega hasta los 700m de altitud (Figura 5). Por lo que se infiere un espesor de más de 100m.

Su edad es desconocida, por su composición y posición estratigráfica se infiere una edad aproximada del Cretácico superior, ya que es más joven que la Formación Tuzantla y más antigua que la toba Tamarindo.

La formación Mexicana presenta principalmente facies de arenisca gruesa conglomerática Sh, Sp y Ss; esto nos indica que se formó en canales, también se observan lentes conglomeráticos en facies Gmg: que indican mayor energía en el flujo. Localmente sobreyacen en forma discordante sobre los paquetes descritos, depósitos de arenisca muy gruesa. Estas areniscas soportan lentes conglomeráticos de medio metro de espesor con estratificación normal, en los cuales los clastos son muy angulosos con composición exclusivamente calcárea. El promedio del tamaño de los clastos es de 12cm.

En algunas zonas se observa un conglomerado con matriz de arena conglomerática, aproximadamente 50% del conglomerado arenosos. Estas areniscas se interpretan como un abanico aluvial, los lentes conglomeráticos muestran indicadores de paleocorrientes.

IV.2.5. Formación Yerbabuena.

Esta formación se encuentra aflorando en la parte norte del área en las Barrancas el Tamarindo, el Arco, el Chorro y sobre la carretera federal No. 51 hacia Huetamo, abarca una superficie de 8km aproximadamente (Figura 4).

Esta constituida por tres facies: La facies Basal denominada **Facies Tejones** de estratificación media a delgada sin gradación de areniscas gruesas medianamente clasificadas con lentes conglomeráticos de partículas subredondeadas y de forma prismática, clasto soportado, con clastos de dos hasta 10cm con gradación grano decreciente en algunas zonas. El espesor medio de esta unidad es de cinco m en las zonas más gruesas.

La asociación de facies intermedia denominada **Facies Gris** está compuesta por estratos delgados limoarenosos con estratificación cruzada planar y paralela, con base y cima erosiva. El espesor de esta unidad es de 3 y hasta 5 m. (Figura 8)

La asociación **Facies Curindales** está compuesta por arena conglomerática matriz soportada con lentes de conglomerado clasto soportado, mal clasificado, polimodal, con estratos insipientes. En mayor porcentaje clastos volcánicos, areniscas, conglomerado, granito y caliza en menor porcentaje.

La característica importante de las facies Tejones y Gris es que en esta zona siempre se encuentran juntas en contacto erosivo con la toba Tamarindo.

Las facies de la formación Yerbabuena son (Figura 5):

Arenisca en facies Sp, Ss, Sh con lentes conglomeráticos Gci. Se trata de una arenisca de grano medio a grueso, de estratificación no paralela, no presenta gradación, medianamente clasificada, contiene clastos de 2cm a 5cm; las partículas son redondeadas y de forma prismoidal. La facies conglomerática presenta gradación inversa, es clasto soportada, las partículas son

angulosas y prismáticos, el promedio del tamaño de las partículas es de 7cm aproximados.

También presenta de manera alternada arenisca de facies St, Sp, Sr, y estratos conglomeráticos en facies Gci. La facies de arenas presenta laminación cruzada planar y laminación paralela continua y recta, los clastos están bien redondeados; la facies conglomerática se presenta en estratos con gradación normal y sin imbricación (Figura 12).

Conglomerado Gmm y horizontes de facies Sp. Esta facies se presenta en estratos irregulares, discontinuos.

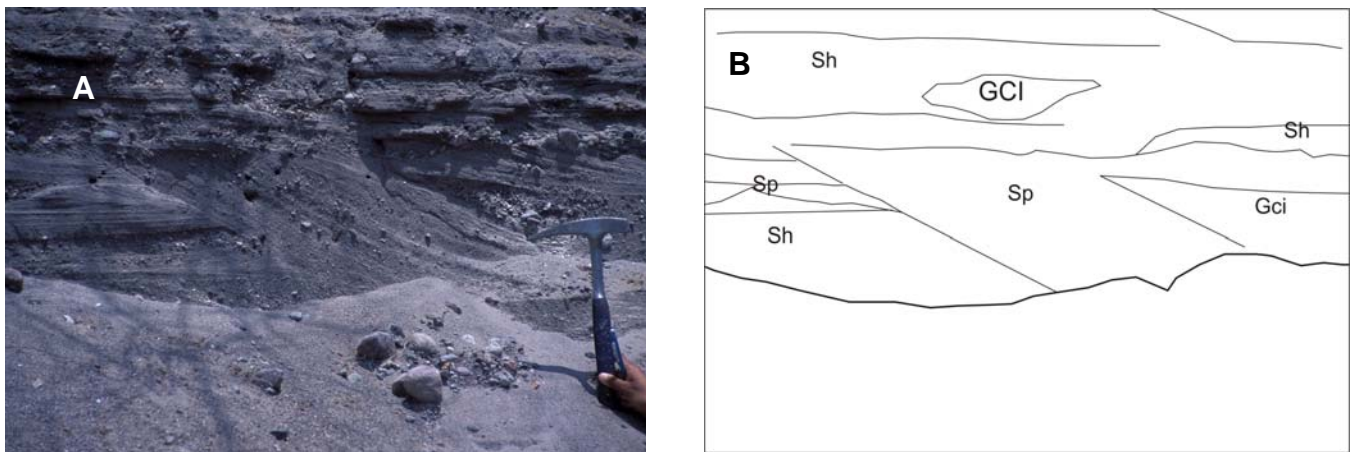


Figura 12. Detalle de la formación Yerbabuena, facies Gris. A) Afloramiento de la formación Yerbabuena en el que se observa con claridad la estratificación cruzada. B) Esquema de la distribución de facies de este afloramiento.

IV.2.6 Toba Tamarindo.

La toba Tamarindo se encuentra distribuida a lo largo del Río Tuzantla (Figura 4), lo que sugiere que representan un relleno del paleocauce de este río, por la disposición a lo largo del río y por el mayor espesor hacia el norte, se interpreta que el flujo fue de norte a sur. (Figura 13)

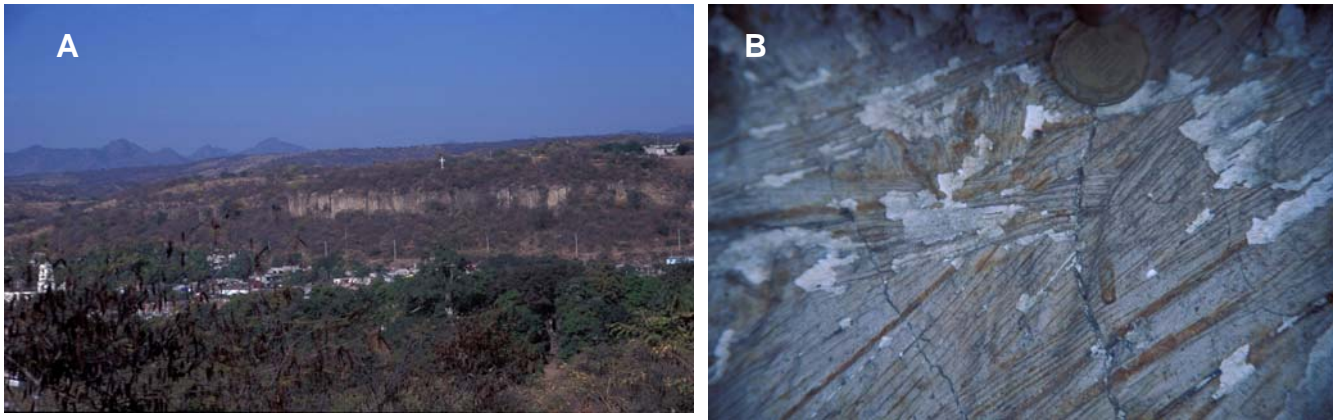


Figura 13. A) Panorámica de la Toba Tamarindo visto desde la carretera que conduce al poblado de San Juan de Dios. B) Detalle de la base de la Toba, en la que se pueden observar impresiones de plantas fósiles.

Es una toba de matriz vítrea en algunas zonas y en otras es arenosa con clastos polimodales desde tres a cinco y hasta 20cm, los clastos tienen diferentes composiciones e incluye desde areniscas, esquistos y rocas volcánicas. Petrográficamente la matriz muestra una textura traquítica. En la base se encuentran plantas fósiles que al parecer eran los pastos que crecían en el paleorío (Figura 13) al momento del flujo piroclástico.

La base es sinuosa y se encuentra sobreyaciendo de manera discordante a la formación Yerbabuena. Su espesor aproximado es de 40m, aunque la cima fue erosionada.

IV.2.7 Dique Tuzantla.

El dique Tuzantla tiene una gran longitud y una dirección NE-SW (Figura 14). De acuerdo a la morfología es sencillo distinguir este cuerpo intrusivo ya que es de gran extensión y resalta en las fotografías aéreas por la erosión diferencial con respecto a la roca encajonante. Es de composición básica (Figura 14), corta a la Formación Tuzantla y la pone en contacto con las Formaciones Yerbabuena y Tiquicheo.

En la presente tesis se propone que este dique probablemente se emplazó en una estructura preexistente, como lo sugiere su gran extensión y linealidad, y las relaciones de contacto de unidades preexistentes. El dique si presenta planos de fallas posteriores al emplazamiento, con estrías que indican desplazamiento lateral aparentemente derecho, paralelo al dique (Figura 14). Por la distribución de las unidades, se propone como hipótesis a resolver en estudios posteriores, que tal vez existió una falla con un sentido normal previa al emplazamiento del dique.



Figura 14. Afloramiento del dique Tuzantla sobre la terracería que comunica a la población de Calicanto. Se observan escalones de falla que indica deformación posterior al emplazamiento del dique.

IV.2.8 Depósitos de Terrazas. Conglomerado de la cima.

Como parte de los depósitos fluviales tenemos una serie de depósitos de terrazas que cubren indistintamente a las unidades previamente descritas (Figura 4). Se caracterizan por conglomerados soportados por clastos, muy bien redondeados, de 5cm a 15cm de diámetro, bien clasificados, sin estratificación y en algunas zonas se observa imbricación.

El conglomerado de la cima, se encuentra sobre la toba Tamarindo y esto nos indica que después del depósito de esta toba que rellenó el cauce del río, este retoma su cauce erosionando a la toba y las unidades subyacentes. La erosión continua ha formado las terrazas (Figura 15).



Figura 15. Afloramiento de una de las terrazas fluviales en la carretera federal 51 Tuzantla-Tiquicheo, dentro de la formación Yerbabuena. La línea discontinua indica el límite de la terraza.

La importancia de estas terrazas es que nos indican el paleocauce del río y como ha ido evolucionando ya que estas terrazas se encuentran sobreyaciendo a diferentes formaciones.

IV.3. Geología estructural

La geología estructural del área ha sido estudiada por varios autores los cuales proponen diferentes eventos de deformación. En el presente trabajo se observaron algunas de estas estructuras previamente identificadas por Menella, *et al.* (2000) y Serrano-Durán (2005). Los dos rasgos principales de deformación frágil son la falla Tuzantla de dirección NE-SW y la falla la Yerbabuena de dirección NW-SE (Figura 16).

La falla Tuzantla es muy importante regionalmente porque en ella se emplazo un dique de composición básica que tiene una longitud de 19km aproximados. No se sabe la dirección original de desplazamiento de la falla pero por el desplazamiento que presentan los contactos estratigráficos se infiere que la componente normal fue considerable, ya que del lado occidental de la falla aflora el contacto inferior de la Formación Tuzantla con la formación Tiquicheo (bloque piso), el cual se encuentra en el subsuelo en el bloque oriental de la falla (bloque de techo). Algunos indicadores cinemáticos dentro del dique muestran que esta falla se reactivó con un desplazamiento lateral derecho al emplazamiento del dique.

La falla de la Yerbabuena aflora en al noreste del Cerro Cabildo, pone en contacto a las formaciones Cabildo y el Basamento. La falla Organista no aflora, sin embargo por las relaciones de campo y el desplazamiento del dique se infiere que es una falla lateral izquierda con un desplazamiento de 50m

aproximados; esto se interpretó con base en las imágenes aéreas y en los resultados obtenidos con la magnetometría, pero no se observó directamente en el afloramiento.

Las fallas Yerbabuena y Organista se encuentran cortando al dique Tuzantla, la primera con un desplazamiento lateral derecho y la segunda con un desplazamiento lateral izquierdo.

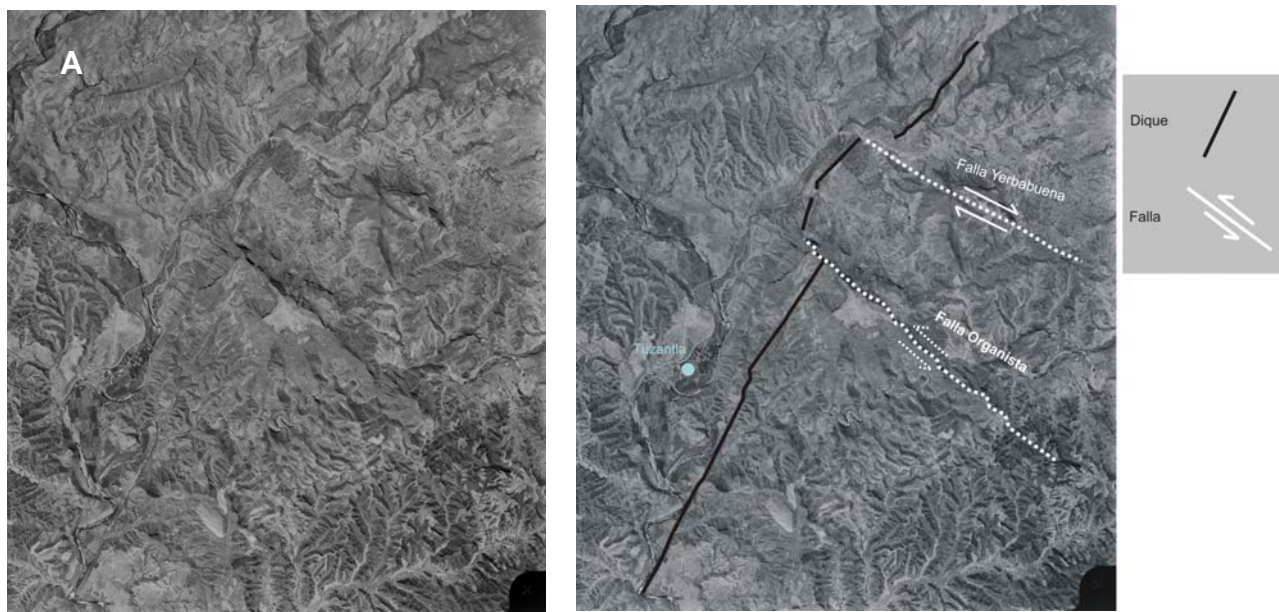


Figura 16. Fotografía aérea de la región en donde se dibujan las principales estructuras vistas en la fotointerpretación y posteriormente verificadas en campo.

V. Magnetometría

V.1 Introducción

La magnetometría es un método geofísico relativamente simple en su aplicación, dicho método se realiza obteniendo valores a través de un equipo que se denomina magnetómetro, el cual, mide el vector de campo magnético en un punto, para el instante en el que se realiza la lectura. Los valores que se obtienen en cada punto de mediciones registraron en el Sistema Internacional de unidades para inducción magnética, la Tesla (T).

El campo magnético de la Tierra afecta a todos los cuerpos, las rocas adquieren la orientación del campo magnético en el tiempo de ser conformadas, esto es importante ya que el campo magnético de la Tierra es variable con el tiempo y son estas variaciones en la orientación del campo magnético de cada cuerpo rocoso, las que permiten encontrar contrastes para diferenciarlos desde la superficie. Además, las rocas producen un campo magnético por la interacción de los minerales que las conforman, sin embargo, dicho campo tiene una intensidad casi despreciable en comparación con los otros campos, por ejemplo el inducido.

El método magnético permite identificar las discordancias y las superficies terrestres antiguas ahora cubiertas por otros paquetes rocosos con el fin de explorar y delimitar cuerpos rocosos, estructuras sedimentarias, identificar estructuras geológicas o bien conocer las características magnéticas de un paquete de roca definido.

Las anomalías magnéticas detectadas a través de estudios magnéticos en terreno se explican con variaciones en las propiedades de las rocas como la susceptibilidad magnética y/o la magnetización remanente de las rocas. Estas propiedades solo existen a temperaturas debajo de la temperatura de Curie.

Como ya se mencionó, el magnetismo en las rocas puede ser medido, ya que los minerales se magnetizan, adquiriendo la dirección e intensidad del campo magnético para el punto en donde se encuentran en la Tierra, al cristalizar por debajo de su temperatura de Curie. Dichas propiedades magnéticas pueden ser reemplazadas si por algún proceso geológico, la temperatura rebasara la de Curie, magnetizando de nuevo a los minerales con los valores para ese espacio y tiempo.

El campo magnético terrestre está en función de la posición geográfica y del tiempo, es decir, el campo magnético depende de la posición en la Tierra, en este caso el sistema de referencia utilizados en este estudio son las coordenadas UTM.

Los resultados del levantamiento magnetométrico del área de estudio fueron obtenidos mediante diversos procesos que se detallarán más adelante, a partir de los cuales se realizaron las figuras 18 a 23.

El campo magnético terrestre (F) que se mide en la superficie de la Tierra está compuesto por el valor del campo producido por un dipolo, el valor de campo producido por un campo no dipolar que es producido más superficialmente, un campo cortical y un campo externo, producido por la interacción entre las capas superiores de la Tierra con el viento solar.

El campo magnético tiene variaciones temporales y espaciales, para eliminarlas y poder hacer una interpretación de los datos se realizó la corrección por variación diurna con el objeto de eliminar las variaciones temporales (diurnas, estacionales, actividad solar, y otras) obteniendo así la anomalía magnética de campo total, que es la expresión de la contribución cortical del campo magnético terrestre.

La Anomalía Magnética es el valor de campo magnético de la Tierra, pero enfatizando la distribución cortical. Se obtiene a partir de intentar sustraer los valores de campo magnético que se conocen ajenos a aquellos generados en la porción superficial de la corteza terrestre.

Reducción al polo es la simplificación de la interpretación de las anomalías magnéticas modificando el patrón de anomalías como si estuvieran sujetas a un campo vertical (Figura 17). La reducción al polo puede ser considerada como un complemento de otros métodos y para una mejor visualización de los datos.

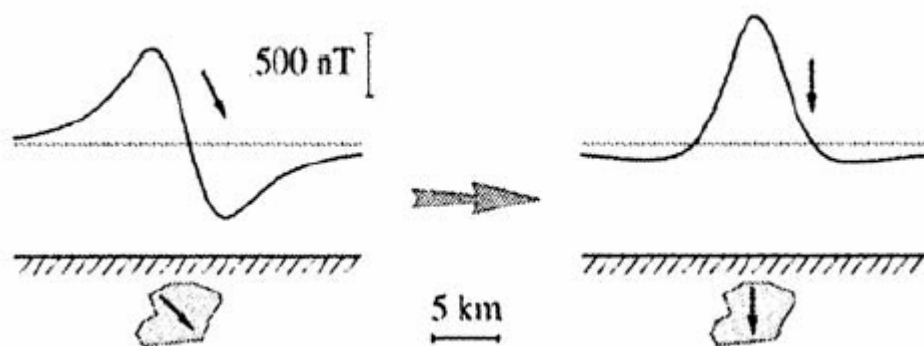


Figura 17. Anomalía magnética antes y después de reducción al polo (tomada de Lora y Hernández, 2003)

La primera derivada es una función matemática que tiene como principio identificar los cambios en el medio. Para este caso la derivada vertical, realza atributos de la señal que originalmente no se observaban y que pueden asociarse con cambios litológicos o estructurales del subsuelo (Hernández, 2003).

La segunda derivada permite separar las anomalías magnéticas compuestas debidas a la superposición de los efectos de varias cuerpos cercanos.

V.2 Resultados

La figura 18-A muestra la ubicación de cada punto donde se tomó el dato de F, que representa el valor de campo magnético, en la figura 18-B se muestra el mapa geológico con las líneas de datos magnéticos medidas. En la parte central del área no se tienen datos, debido a que estos no se pudieron medir por la dificultad de acceder al lugar ya que en este lugar se encuentra el cerro Cabildo que tiene laderas abruptas y se dificulta el ascenso con el equipo; y en el Río Chiranguero donde se hace profundo tampoco se pueden hacer los levantamientos. En los poblados no se pueden hacer las mediciones porque las estructuras de las casas producen un campo que altera la medición del campo magnético de las rocas; lo mismo sucede con los puentes, sobre la carretera y por el paso de vehículos.

La distancia de separación de cada estación en cada línea, se definió con base en la distancia y el objetivo de cada línea, varía entre 20 y 100m.

Los datos se tomaron considerando las condiciones necesarias para evitar tener datos sesgados (sin portar objetos metálicos, alejados de construcciones, automóviles, en general, alejados de objetos metálicos), además de tener una alta resolución espacial y temporal. La representación directa de los datos registrados es muy clara debido a lo antes mencionado y a que la señal no sufrió perturbaciones indeseadas (por ejemplo una tormenta magnética). Se hicieron diferentes pruebas en cuanto al método de interpolación para obtener la mejor representación.

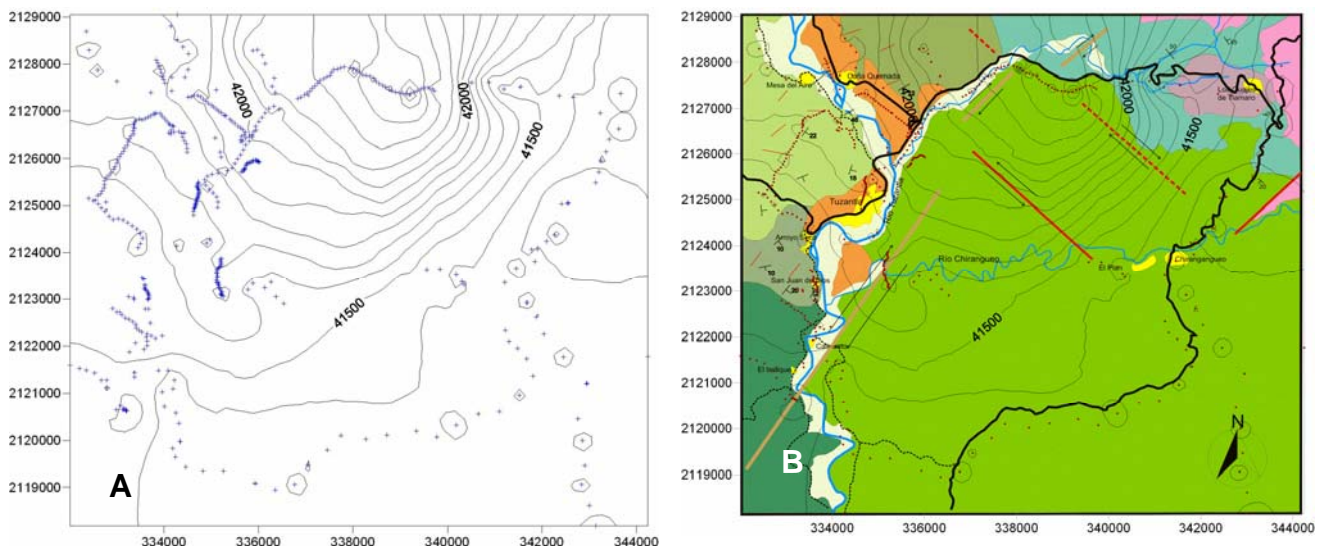


Figura 18. A) Mapa de campo magnético en donde los puntos azules representan una estación de lectura de F y también se representan las isolíneas del campo magnético. B) En esta figura se superpone el anterior mapa al mapa geológico.

En la figura 19 se muestra la representación de los datos tal como se tomaron en campo, estos datos sin procesamiento alguno solo nos dan información acerca del valor del campo magnético terrestre en un punto y en un tiempo, sin discriminar las contribuciones interna y externa. En la figura 19-A se muestra en escala de colores e isolíneas los valores del campo magnético total

y en la figura 19-B los colores representan la litología y las líneas son los valores de campo magnético total de la figura 19-A, aunque si se observa que cada litología refleja diferentes valores de campo, no se puede hacer una conclusión, se necesita hacer los procesos que a continuación se presentan, anomalía de campo total, primera derivada vertical, segunda derivada vertical y otras, sin embargo, esto habla de la fiabilidad de los datos y que el control de calidad durante la toma de datos resultó óptimo.

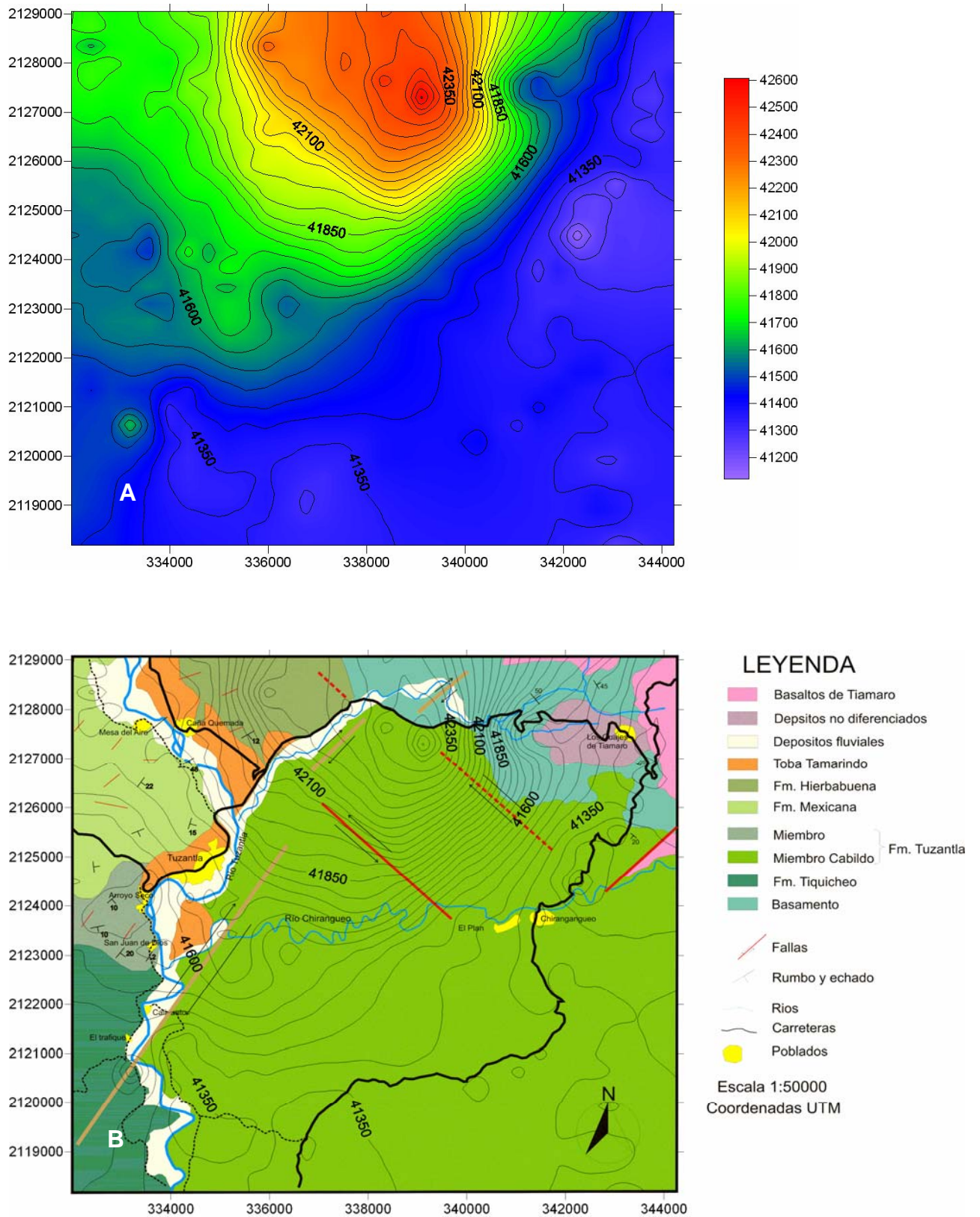


Figura 19. A) Mapa en escala de colores obtenido a partir de los datos filtrados de campo geomagnético. B) Superposición del mapa anterior con el mapa geológico. Las isolíneas representan los valores de F.

En la figura 20 se presenta el mapa de anomalía de campo total. La anomalía de campo total representa los valores de los datos medidos en campo corregidos por variación diurna, es decir ya solo representan la anomalía superficial.

Se observa que en la parte norte se tienen valores de campo más altos por lo que se exhibe como un alto magnético. Esto puede ser debido a la presencia de un cuerpo con mayor contenido de minerales ferromagnesianos, que afecta el área de estudio, pero que seguramente se extiende fuera de ella, hacia el norte. Aún no se puede hacer una correlación precisa, sin embargo nos da indicios de algunas unidades como se verá más adelante.

En la figura 20-A los colores y líneas representan los datos de anomalía de campo total mientras que en la figura 20-B, los colores indican la litología y las líneas la anomalía de campo total.

La figura 21 es resultado de graficar los datos de la primera derivada, en esta figura se observa que la componente magnética crece al norte, tal vez provocado por las raíces del Eje Neovolcánico, las rocas del basamento que se observan en el norte del área, o menos probable por el alto contenido de minerales magnesianos en los detritos depositados al norte. La figura 21-A muestra en colores y líneas los valores de la primera derivada, mientras que en la figura 21-B los colores indican las diferentes litologías y las líneas los valores de primera derivada. Esta interpretación puede ser corroborada al procesar los datos mediante la segunda derivada vertical como se verá más adelante.

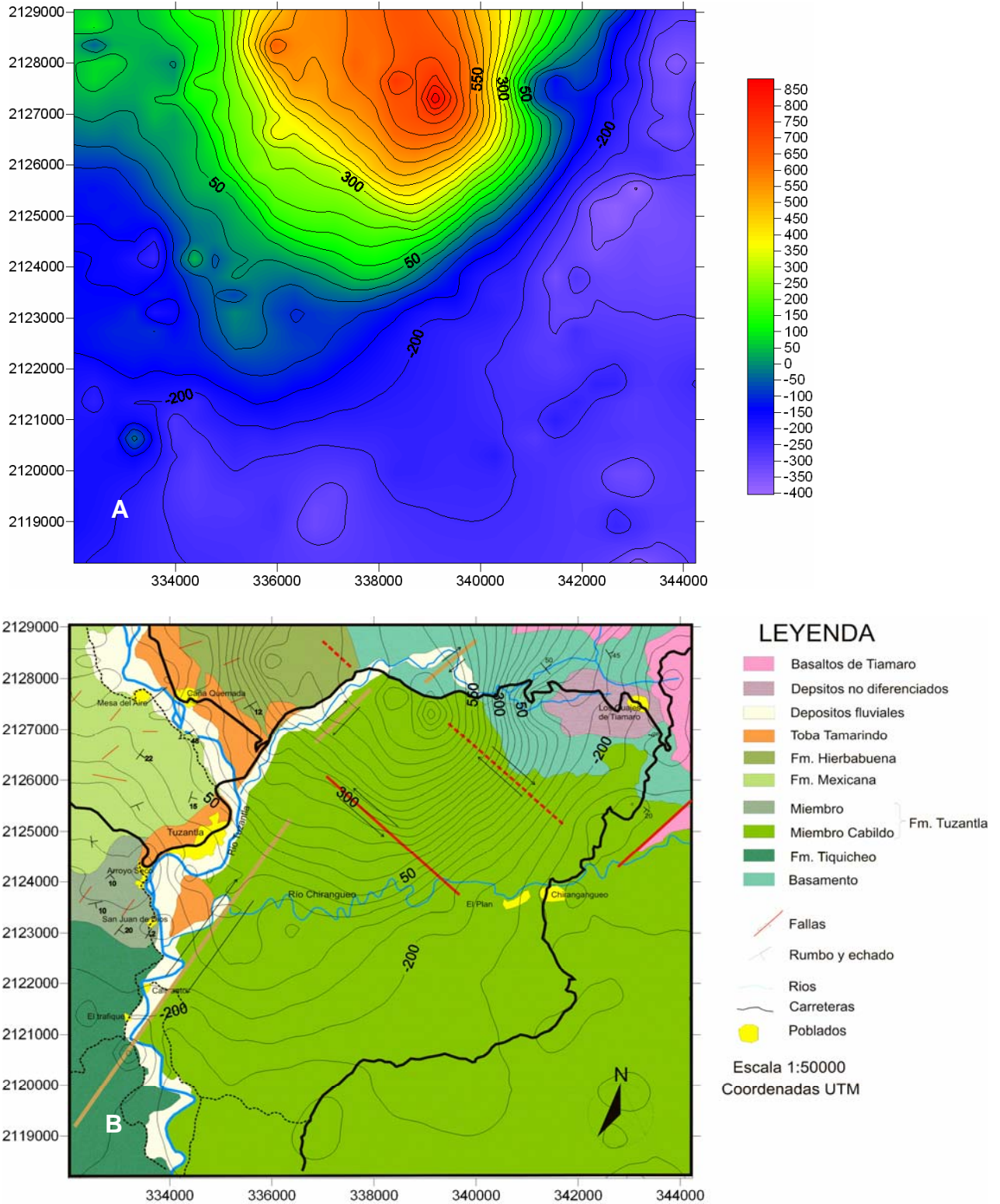


Figura 20. A) Mapa en escala de colores, obtenido a partir de la corrección temporal de los datos del campo magnético. B) Sobreposición del mapa de anomalía magnética con el mapa geológico. Las isolíneas indican los valores de anomalía.

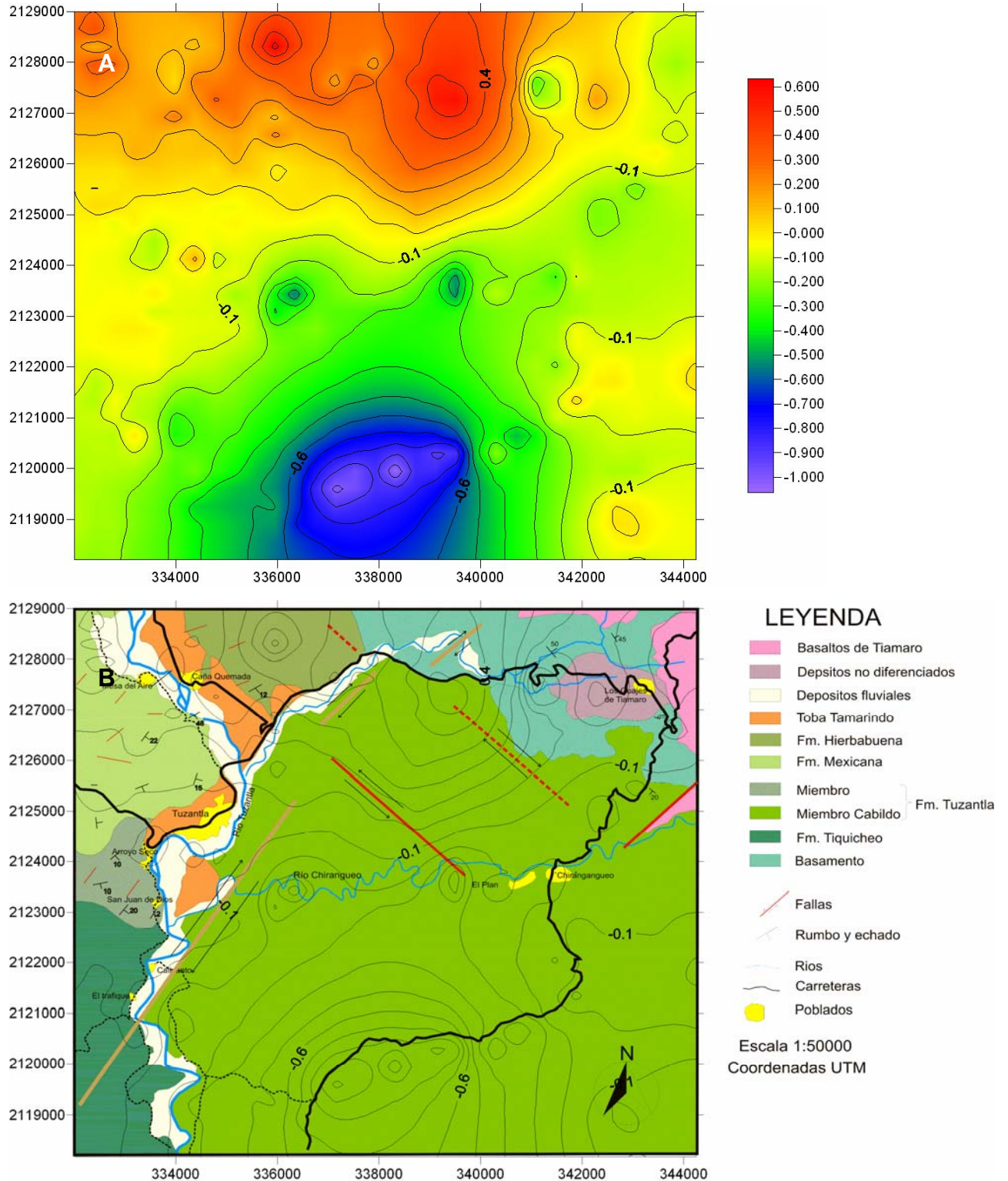


Figura 21. A) Mapa en escala de colores obtenido a partir de la aplicación del proceso de la primera derivada vertical. B) Sobreposición del mapa anterior al mapa geológico. Las isolíneas representan los valores obtenidos a través del proceso.

La figura 22 muestra el mapa de la segunda derivada, en él se pueden observar con mayor precisión algunas estructuras y contactos importantes, mediante este proceso es posible determinar mejor las anomalías que pudieran estar influenciadas por algunas adyacentes mayores, aunque no están bien definidas ya muestran claros indicios y cuerpos en el subsuelo, sin embargo, a continuación se incluye el proceso de reducción al polo con el objetivo de precisar dichas observaciones. La figura 22-A muestra en colores y líneas los datos de segunda derivada y en la figura 22-B, los colores indican la litología y las líneas los valores de segunda derivada.

En la figura 23 se muestra el mapa de reducción al polo de la anomalía en el cual se puede observar que la respuesta magnética en el área de estudio está resaltada por dos anomalías asociadas a los depósitos conglomeráticos de la Formación Tuzantla. En esta figura se aprecia la respuesta dipolar de las estructuras y se pueden interpretar de manera individual o en grupo. La forma de las anomalías está afectada por la cantidad de datos, en las zonas que no hay datos y por el método de interpolación las anomalías pueden ser más pequeñas o circulares de lo que son en realidad. Además esta figura nos sirve para los procesos posteriores y para la correlación de los datos y se muestra en el siguiente apartado.

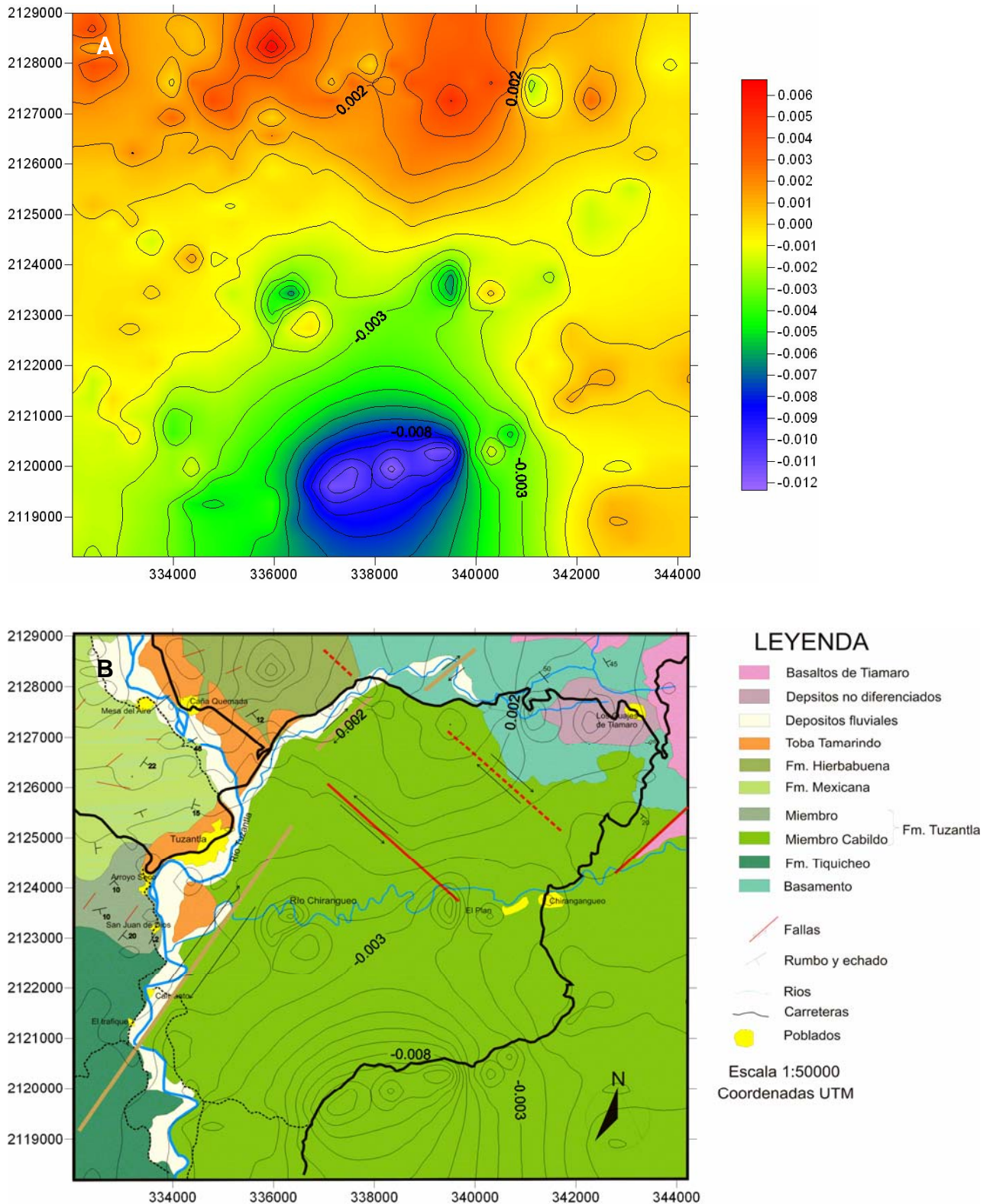


Figura 22. A) Mapa en escala de colores de los valores obtenidos de la aplicación del proceso de segunda derivada vertical. B) Superposición del mapa anterior con el mapa geológico. Las isolíneas representan los valores de la segunda derivada vertical.

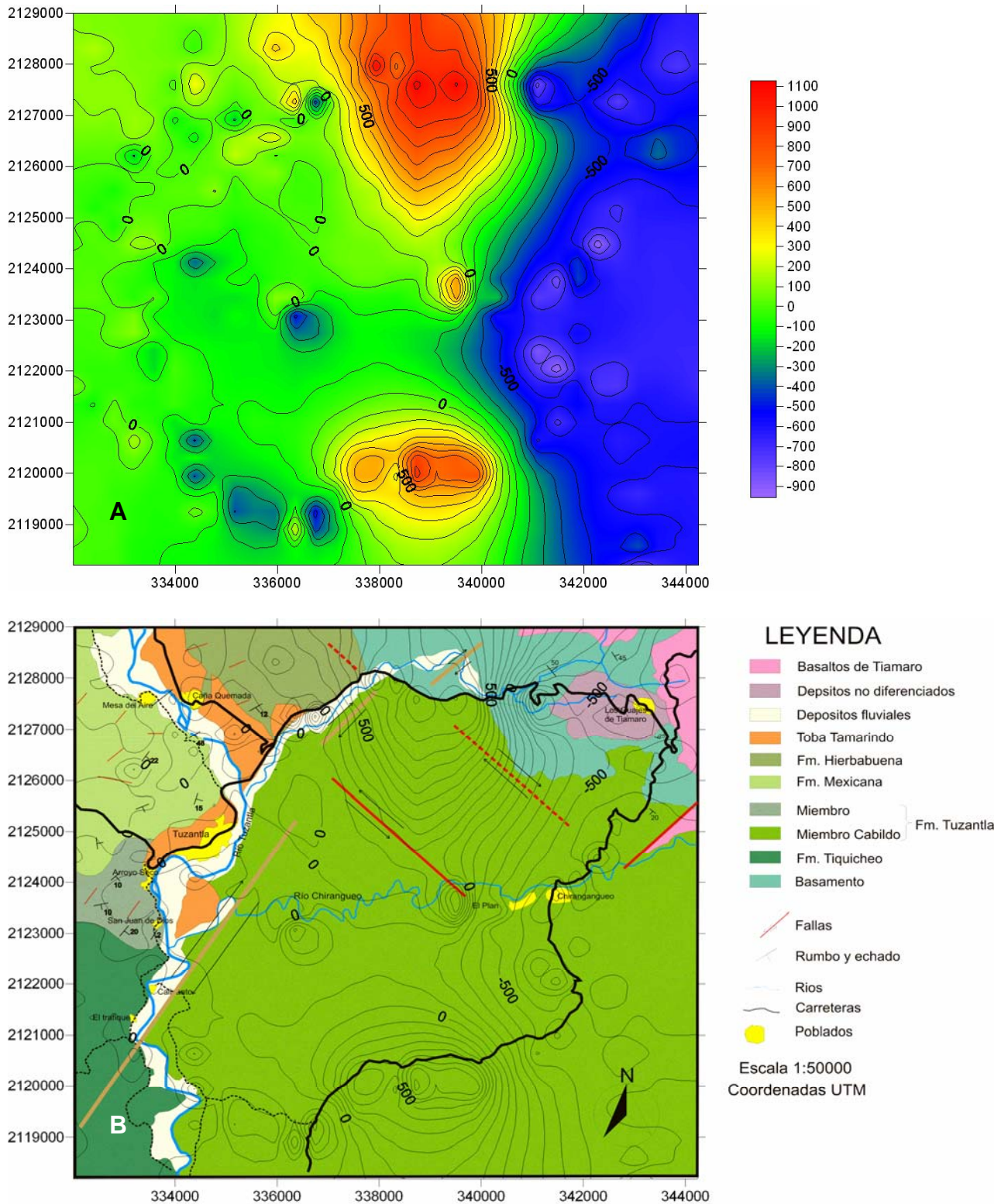


Figura 23. A) Mapa en escala de colores que representa los valores de la anomalía magnética reducida al polo. B) Superposición del mapa anterior con el mapa geológico. Las isolíneas representan los valores obtenidos del proceso.

V.3. Interpretación magnética

En la figura 24 se muestran una recopilación de los diferentes procesos aplicados a los datos magnéticos. La figura 24-A es la gráfica de anomalía magnética; en la 24-B, la anomalía magnética reducida al polo, la 24-C, la primera derivada de la anomalía reducida al polo y en la 24-D, la segunda derivada reducida al polo. Los colores y las líneas representan los datos de cada figura.

Como se mencionó en el apartado anterior, en la figura A se observa una fuerte anomalía al norte del área; en la figura B, una vez realizada la reducción al polo y que las anomalías están en una posición mas “real”, vemos un fuerte contraste entre una zona baja en el oriente y un alto en el centro, hablando en un corredor N-S. La línea roja marcada en la figura 24B se interpreta como el límite entre la respuesta en superficie del basamento y hacia el oeste, de la respuesta de los sedimentos de las formaciones Tuzantla y Yerbabuena. Además en la porción centro-occidental del mapa ya se definen anomalías alineadas NE-SW que se pueden interpretar como fallas.

En la figura 24C, dado que el proceso de la primera derivada nos define mejor las anomalías, podemos confirmar que el basamento de la cuenca se presenta en la zona oriental, pero no va más allá de la porción central, lo que sugiere una rápida profundización de la cuenca de depósito. Las anomalías de las estructuras, al definirse mejor su firma dipolar, nos confirma el carácter de zonas de cizalla. La fuerte expresión de la anomalía en la zona centro-sur del mapa se interpreta como la presencia de una estructura que no aflora, o bien, otro cuerpo rocoso que esta sepultado al SE de la Formación Tuzantla. Las estructuras que

presentan las anomalías y coinciden con los contactos tectónicos de la Formación Tuzantla con otras unidades, dichas anomalías apoyan la interpretación de que éstas son estructuras que continúan a profundidad.

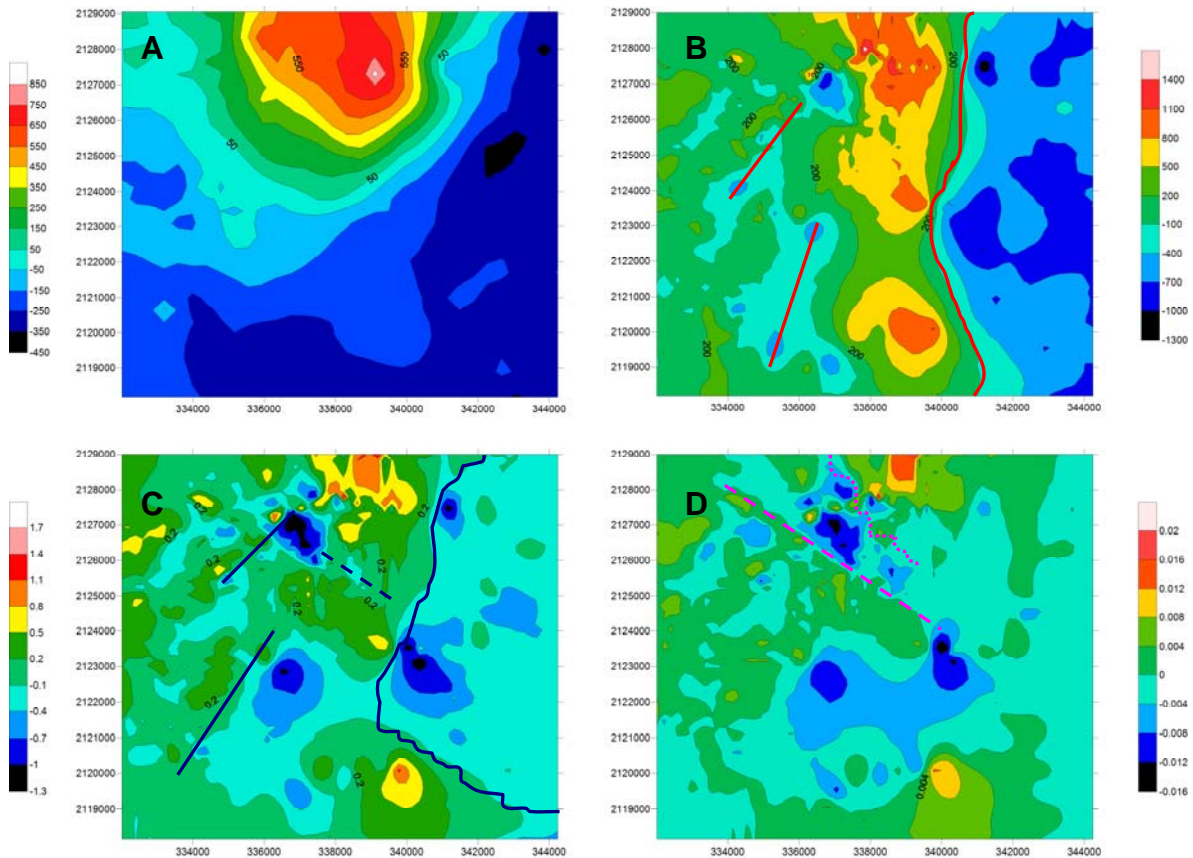


Figura 24. En esta figura se muestran los mapas en escala de colores obtenidos a partir de los procesos que se describieron: A) anomalía magnética; B) anomalía magnética reducida al polo, C) primera derivada vertical de la anomalía reducida al polo y D) segunda derivada vertical reducida al polo.

Para la figura 24D, que representa los resultados del proceso de la segunda derivada, aparecen dos rasgos interesantes, que no se aprecian en las otras figuras. Estos pueden interpretarse como: al norte la línea punteada define el primer rasgo y sugiere tal vez la posición del basamento al norte de la cuenca. El segundo rasgo corresponde en superficie a la prolongación en profundidad de la falla el organista con dirección NW-SE (pero más somera que las interpretadas anteriormente con la figura 24C, o sea, la primera derivada nos da anomalías un poco más profundas que la segunda derivada). La interpretación de las anomalías en este mapa suele ser ya más complicada, por los efectos de frontera, sin embargo, se puede corroborar que el basamento esta cubierto en la parte oriental del área por la formación Tuzantla y por eso se pierde su respuesta. Por otra parte, se define mejor el contraste entre la toba Tamarindo y los sedimentos de la formación Yerbabuena, generando una anomalía por el contraste entre la baja respuesta de las tobas y la mayor respuesta de los sedimentos clásticos.

VI. Modelado de la sedimentación y erosión

El modelado de cuencas es una herramienta básica para obtener una visión diferente de la arquitectura de las estructuras sedimentarias y geológicas de una zona.

La forma en general de una facies o estrato esta en función de la topografía, ambiente y su historia post-depósito. En el modelado de cuencas, al utilizar un software es difícil tener el control exacto de la forma de los paquetes de roca, así que solo se trata de hacer la mejor aproximación a la realidad en paquetes considerables en espesor.

Con el modelado se puede observar el comportamiento en 3D de los cuerpos de roca, esto ayuda a reconstruir la historia de sedimentación-erosión, subsidencia-levantamiento, fundamental para entender la evolución tectónica.

Para la realización del modelado en este trabajo se utilizó el programa RockWorks, que es un instrumento para el análisis y modelado de cuencas.

RockWorks se puede utilizar para datos geológicos, litología y estratigrafía utiliza también registros geofísicos y es muy útil para hacer representaciones en dos y tres dimensiones. También maneja datos estructurales en estereonet, se pueden hacer modelos de agua, introducir los datos geoquímicos para hacer perfiles o modelos, o los procesos que sean necesarios. Los datos se introducen en forma de pozos o columnas estratigráficas, éstas no tienen que ser verticales ya que admite un cambio en la dirección

de los datos. El RockWorks cuenta con manual, un tutorial, y ayuda en línea para la utilización de cada aplicación.

El procedimiento del trabajo en RockWorks fue introducir los datos estratigráficos referenciados geográficamente con elevación y espesores reales, asignando simbologías diferentes para cada una de las formaciones. Se decidió hacer una malla cuadrada de 2x2km para facilitar el modelado en la figura 25 A se muestra la malla de las estaciones reales, en la 25 B la malla cuadrada con los datos estratigráficos.

Posterior a la introducción de los datos litológicos y estratigráficos, que son los mismos pero el RockWorks trabaja procesos diferentes para cada uno, por ejemplo: las vistas en 3D se hacen con la litología, mientras que las vistas en 2D se hacen con los datos de litología.

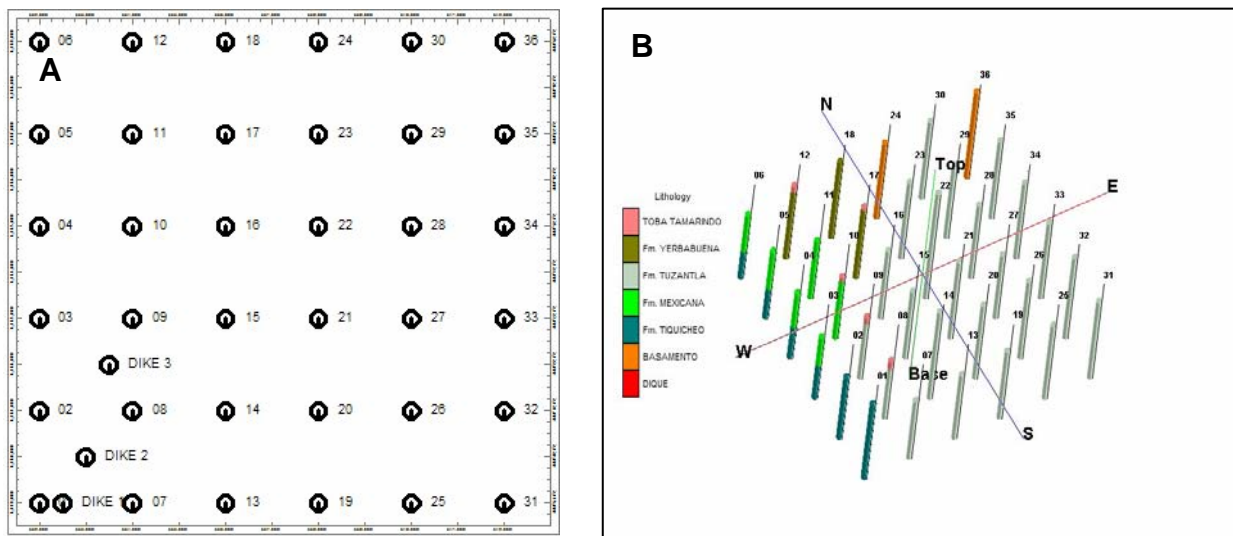


Figura 25. A) Mapa de localización de las columnas con las cuales se realizó el modelado 3D, cada círculo representa la proyección en planta de un pozo. B) Vista en 3D de los pozos y su estratigrafía.

Se realizaron las proyecciones verticales de las columnas en dos y tres dimensiones y secciones pozo a pozo y perfiles geológicos con el fin de validar los datos, ya que este programa interpola con diferentes métodos y para obtener una mejor aproximación a la historia sedimentológica.

Para interpretar las relaciones en tres dimensiones se realizó un modelo en 3D con capas y un modelo sólido 3D

El programa es versátil y tiene varias ventajas, entre ellas:

- Presenta los datos de manera organizada y en forma gráfica.
- Se puede procesar una gran variedad de datos.
- Se pueden importar archivos trabajados previamente en otros programas.
- Los archivos se pueden exportar a otros formatos.
- Grafica en dos y tres dimensiones.
- Se pueden introducir datos de pozos.
- Se trabaja con espesores y datos reales.
- La simbología se puede modificar dependiendo de la necesidad de cada usuario.
- El programa se puede utilizar para digitalizar.
- Se puede modelar con respecto a un nivel.
- Tiene diferentes métodos de interpolación.
- Se pueden graficar los datos en diferentes representaciones incluso 2D Y 3D.
- Se pueden hacer animaciones de los modelos.

Limitaciones:

- No se puede programar la inclinación de las capas

- Los contactos los interpola de una manera discreta por lo que en algunas ocasiones los dibuja rectos, aunque en la realidad no lo son.
 - No se pueden poner capas verticales (en este caso el dique)
- En general el RockWorks es un programa muy completo y útil para la interpretación de la estratigrafía

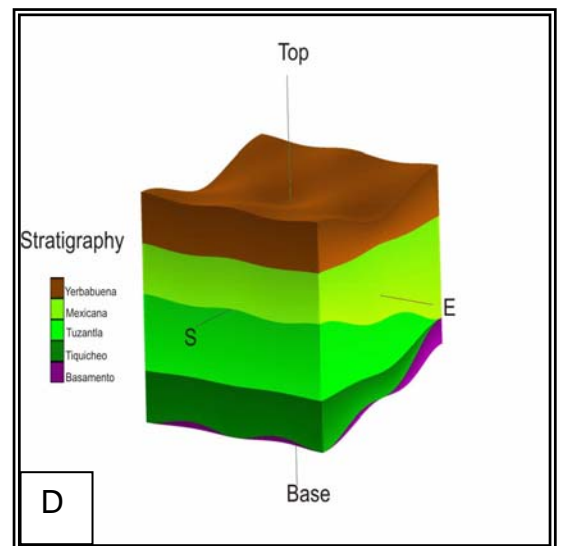
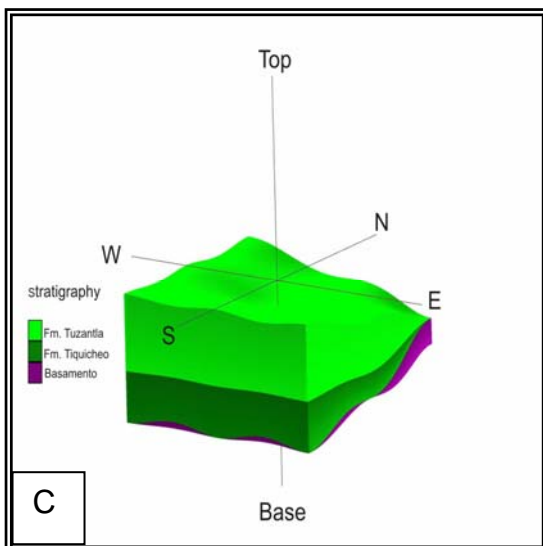
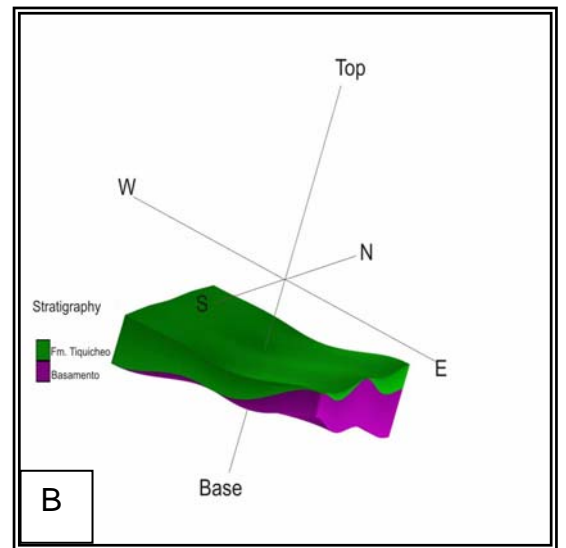
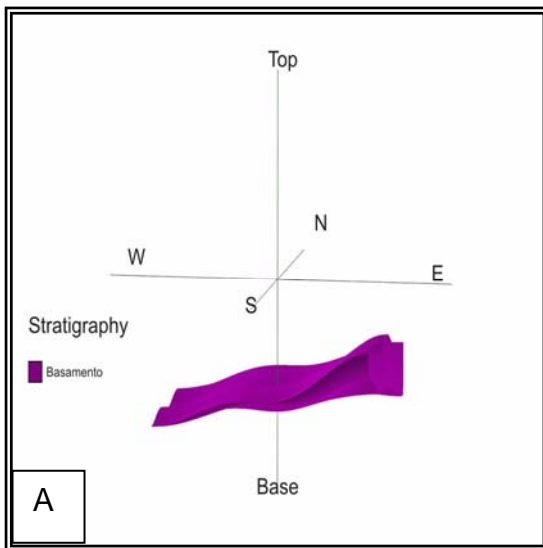
VI.1. Modelos 3D

En la figura 26 A se muestra la probable paleotopografía del basamento (unidades Cretácicas Marinas) antes del inicio de la sedimentación continental. En la figura 26 B la probable distribución de la formación Tiquicheo, cuyo espesor e el modelo es inferido. De la medición de columnas en diferentes puntos, su representación en el modelo 3D se infiere que el contacto entre la formación Tiquicheo y la Formación Tuzantla es discordante y erosivo como lo muestra la figura 26 C.

Posteriormente se depositan de manera discordante sobre la Formación Tuzantla, las formaciones Yerbabuena y Mexicana en este orden, aunque no se observaron las relaciones de contacto en campo, por su distribución geográfica y espesores se infieren las discordancias (Figura 26 D)

Alrededor de los 37-35 Ma aproximados, (Serrano-Durán, 2005) se formó la falla Tuzantla de la cual se desconoce su tipo y se emplazó en ella el dique Tuzantla poniendo en contacto estructural a las formaciones anteriores y desplazándolas de su posición original, posteriormente esta falla reactivó lateralmente (Figura 26 E)

Para terminar con esta secuencia, en el Eoceno hubo un evento volcánico que en la zona se registro como un depósito de La toba Tamarindo. Dicha unidad se depósito de manera irregular, siguiendo el paleocauce del Río Tuzantla, sin embargo en el programa RockWorks no fue posible modelarla con tal detalle, por eso se presenta como una capa continua en la figura 26 F. Posterior a este depósito el Río Tuzantla en su acción por retomar su curso ha dejado un depósito conglomerático hacia la cima de la toba y ha erosionado las capas de roca formando valles cerrados como se ve en el presente. Esta última etapa tampoco pudo modelarse en el programa RockWorks.



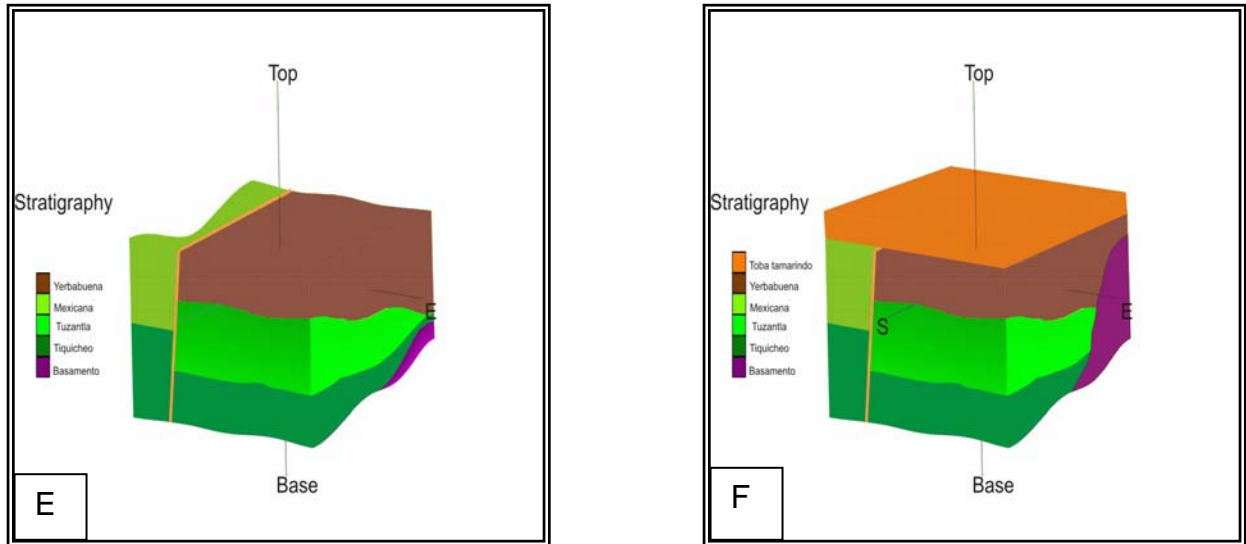


Figura 26. En esta figura se presenta la evolución estratigráfica modelada en RockWorks.

VI.2. Evolución estratigráfica

En este apartado y como parte final del modelado, se presenta una discusión sobre la evolución deposicional de la zona. Esta se presenta sin considerar las tasas de sedimentación y erosión, pero sintetiza los eventos de levantamiento y subsidencia que dieron lugar a la secuencia estratigráfica de la zona. Desafortunadamente no se cuenta con edades de las rocas, por lo cual solo se presenta la sucesión de los eventos.

Fase 1. Comenzando con el Cretácico Inferior, la unidad más antigua de la región, como se muestra en la figura 26A, esta unidad contiene amonitas lo que nos indica que se depositaron en un medio marino. Posterior al depósito de estas areniscas, se observa un

evento de deformación, el cual, como ya se mencionó puede estar asociado a la fase inicial de la orogenia Laramide, que afecta al sur de México.

Fase 2. A continuación las rocas marinas fueron exhumadas debido a un levantamiento que conlleva a una fase de erosión. Seguida a esta, existe una fase de subsidencia, que da lugar a la cuenca donde se presenta el inicio de la sedimentación continental, depositándose la formación Tiquicheo (Figura 26 B), que se ha interpretado como de ambiente fluvial.

Fase 3. Posteriormente existen dos posibilidades, un cambio de energía (climático?) que generó depósitos progradantes, o bien la formación de un alto cercano al área, por esto tiene lugar los depósitos continentales del conglomerado de la Formación Tuzantla (Figura 26 C) que abarca una gran parte de la zona estudiada.

Fases 4. Se infiere que hubo erosión y probablemente fallamiento que dio lugar a una cuenca más pequeña en la cual se depositó la formación Yerbabuena, aparentemente de manera discordante, sobre la Formación Tuzantla, ya que contiene clastos de conglomerados derivados de ésta (Figura 26 D).

Fase 5. A la edad de 37-35 Ma aproximados, (Serrano-Durán, 2005) se emplazó el dique Tuzantla. Dicho dique se infiere que fue emplazado en una estructura preexistente, ya que se observa que están en contacto tectónico formaciones de diferentes edades y desplazándolas de su posición original. Posteriormente esta falla se reactivó lateralmente como una falla lateral derecha. Dicho dique es un marcador geocronológico, ya que fecha a las fases 1 a 4 como del pre-Eoceno.

Fase 6. Posterior a estos eventos y debido a un levantamiento en una zona alejada se forma una subcuenca, de la cual, en el área se observa el relleno constituido por la formación Mexicana, que se interpreta como una facies de un abanico aluvial.

Fases 7, 8 y 9. Es importante mencionar en este periodo, que posterior al depósito de las formaciones Yerbabuena y la Mexicana, hubo una fase de erosión, la cual originó el Río Tuzantla. Dicho río ha dejado vestigios de tener un paleocauce muy similar al presente, tanto en esta formación, como en algunas subsecuentes, ya que se encuentran restos de terrazas fluviales en diferentes niveles. Una de las etapas más antiguas de depósito que rellenaron probablemente todo su cauce, fue el evento volcánico que se registro en la zona como el depósito de la toba Tamarindo la cual presenta plantas fósiles en la base. Posterior a estos depósitos, el Río Tuzantla en su acción por retomar su curso ha dejado un depósito conglomerático hacia la cima de la toba. Esta toba y dichos depósitos fluviales a su vez fueron erosionados. En otras palabras, la fase 7 es erosión, la fase 8 depósito de la toba y la fase 9 erosión de la toba y generación de un nuevo cauce.

Fase 10 y consecutivas. Para terminar con esta secuencia de eventos, hubo un período de erosión importante que dio lugar al corte de las unidades más antiguas y ha erosionado las capas de roca formando valles cerrados como se ve en el presente. A lo largo de dicha evolución se preservan terrazas fluviales a distintos niveles.

VI.3 Discusión

Para la realización de este trabajo se utilizaron tres diferentes herramientas metodológicas que fueron integradas en un software de modelado 3D con el fin de facilitar la interpretación de la evolución geológica de la zona. El primer método consistió en la cartografía geológica tradicional y la descripción de la estratigrafía que nos ayudó a diferenciar las unidades litológicas y definir sus características principales. La segunda metodología consistió en un análisis de facies, esta técnica se utilizó para hacer una interpretación de los diferentes ambientes de depósito de cada unidad. La tercera metodología, fue el estudio magnético de la zona, con éste se pudieron definir algunas estructuras que no afloran y contactos litológicos que no se tenían identificados. Por último se realizó un modelado 3D de la evolución de la cuenca, que nos ayudó a tener una mejor visión de la distribución regional de las unidades litológicas en el área de estudio.

Se decidió utilizar la magnetometría, debido a que es un método accesible y la respuesta que se obtiene es relativamente confiable. Es un método indirecto particularmente útil en geología estructural puesto que registra los valores asociados con los cuerpos en el subsuelo y sus contrastes que pueden estar relacionados con discontinuidades (fallas, pliegues y contactos). La correlación de anomalías magnéticas y las observaciones de campo permiten realizar inferencias sobre estructuras geológicas con suficiente certeza.

Se decidió utilizar diferentes técnicas porque cada una de ellas nos proporciona información particular de alguna característica de los materiales geológicos o bien de la relación que guardan entre

sí, dicha información en su conjunto nos da una visión más amplia de la geología de un área. Entonces, en el presente trabajo el conjunto de los análisis realizados permitió plantear una evolución geológica para la zona. Con la aplicación combinada de estos métodos es posible además diferenciar nuevas unidades litológicas que de otra manera podrían pasar desapercibidas. Esta metodología podría utilizarse para diferentes estudios como, por ejemplo, un análisis hidrológico, exploración de yacimientos minerales o trabajos geotécnicos, la cartografía geológica resulta fundamental para plantear objetivos, zonas de estudio a detalle o áreas de muestreo.

Para ahondar en el presente trabajo sería recomendable realizar nuevas mediciones de columnas estratigráficas, aplicar procesos más avanzados a los datos magnéticos para obtener espesores relativos, realizar un estudio petrográfico para una interpretación de facies de mayor detalle y llevar a cabo análisis geoquímicos para conocer sus afinidades tectónicas. Sin embargo, el punto pendiente más importante, para realizar un mejor entendimiento de la evolución geológica de la zona es el conocer las edades de depósito de las unidades del área. Por tal razón se deben realizar fechamientos geocronológicos de todas las unidades. En cuanto al modelado, al contar con más datos, en consecuencia se tendría un mejor control de la estratigrafía general de la zona y podría afinarse el modelo.

Una estructura relevante en el área de estudio es el dique Tuzantla y aunque queda fuera del objetivo de este trabajo ahondar acerca de la génesis del dique, los datos de campo sugieren que este se encuentra emplazado a lo largo de una estructura previa como había sido sugerido anteriormente (Serrano-Duran, 2005).

Basada en las diferencias en la estratigrafía que encontré a ambos lados del dique propongo que la estructura previa es una falla normal. Es necesario realizar un análisis estructural detallado del dique y zonas adyacentes, así como obtener muestras para determinar su edad de emplazamiento.

VII. Conclusiones

Se proponen unidades litoestratigráficas porque no están definidas de acuerdo a sus características litológicas. Estas unidades son las formaciones: Tiquicheo, Tuzantla (Miembro Arroyo Seco y Cabildo), Mexicana y Yerbabuena (Miembro Gris, Tejones y Curindales). Además de la toba Tamarindo.

Se hizo un análisis de facies basado en la clasificación de Miall (1996) con la cual se dio una interpretación acerca del ambiente de depósito de cada una de las unidades: formación Tiquicheo tiene un ambiente de planicie de inundación con formación de paleosuelos; la Formación Tuzantla de ambientes fluviales; la formación la Mexicana como depósitos de abanico aluvial y la formación Yerbabuena como depósitos fluviales.

El estudio magnetométrico permitió inferir la morfología del basamento, los límites de la cuenca y las estructuras más importantes, entre ellas las fallas Tuzantla y Organista.

Se modeló la estratigrafía de la zona con el programa RockWorks, mediante el cual también se representó la evolución estratigráfica de la cuenca.

La reconstrucción de la arquitectura de la cuenca de Tuzantla nos ayuda a concluir que en el área de estudio hubo al menos cinco eventos de erosión-depósito. Con base en la cartografía regional, se identificó una paleotopografía irregular formada sobre rocas marinas previamente deformadas y sobreyaciendo a estas, gruesos paquetes de capas rojas, cuya edad se desconoce pero probablemente es Maastrichtiano. Estas fueron erosionadas lo que

dio lugar a una segunda paleotopografía que fue rellenada parcialmente por conglomerados que a su vez fueron erosionadas, dando lugar a una nueva paleotopografía, siendo rellenada parcialmente por terrazas fluviales y volcaniclásticas que se erosionaron dando lugar a la topografía actual.

Por la disposición en la que se encuentra la toba Tamarindo podemos inferir que el paleorío tenía un cauce muy cercano al actual, pero ha migrado hacia el oriente unos cuantos metros.

APÉNDICE 1

Clasificación de facies de Miall (1996)

Tabla I

Código	Litofacies	Estructuras sedimentarias	Interpretación y observaciones
Gmm	Grava masiva, matriz soportada	Gradación incipiente	Flujos de escombros plásticos
Gmg	Grava matriz soportada	Gradación inversa (i) a normal (n)	Flujos de escombros pseudo-plásticos (baja fuerza viscosa)
Gci	Grava clasto soportada	Gradación inversa	Flujos de escombros ricos en clastos (alta fuerza), o flujos de escombros pseudoplásticos (baja fuerza)
Gcm	Grava masiva clasto soportada		Flujos de escombros pseudoplásticos (carga de fondo inercial, flujo turbulento)
Gh	Grava burdamente estratificada y clasto soportada	Estratificación horizontal, imbricación	Estratoformas longitudinales, depósitos <i>lag</i> y <i>sieve</i>
Gt	Grava estratificada	Estratificación cruzada en canal	Relleno de canales menores
Gp	Grava estratificada	Estratificación cruzada planar	Estratoformas transversales, crecimientos deltáicos a partir de barras remanentes más viejas
St	Arena fina a muy gruesa, puede ser gravillenta	Estratificación cruzada en canal solitaria o agrupada	Dunas crestnadas-sinuosas y linguoides (migración 3D)
Sp	Arena fina a muy gruesa, puede ser gravillenta	Estratificación cruzada planar, solitaria o agrupada	Estratoformas transversales y linguoides (migración de dunas 2-D)
Sr	Arena muy fina a gruesa	Laminación cruzada. rizaduras	Rizaduras (régimen de flujo más bajo, velocidades < 1 m/s)
Sh	Arena fina a muy gruesa, puede ser gravillenta	Laminación horizontal, lineación por corriente	Flujo de estratificación plana (flujo crítico)
Sl	Arena fina a muy gruesa, puede ser gravillenta	Estratificación cruzada de bajo ángulo (< 15°)	Rellenos de surcos, cárcavas o dunas removidas, antidunas
Ss	Arena fina a muy gruesa, puede ser gravillenta	Surcos someros, amplios	Relleno de surcos
Sm	Arena fina a gruesa	Laminación incipiente o masiva	Depósitos de flujos de sedimentos por gravedad
Fl	Arena, limo y arcilla	Laminación fina, rizaduras muy pequeñas	Llanuras de inundación, canales abandonados o disminución de depósitos de flujo
Fsm	Limo y arcilla	Masiva	Pantanos o depósitos de

			canales abandonados
Fm	Limo y arcilla	Masiva, grietas de desecación	Llanuras de inundación, canales abandonados o depósitos de cobertura
Fr	Limo y arcilla	Masiva, raíces, bioturbación	Estrato con raíces, suelo incipiente
C	Carbón y arcilla carbonosa	Plantas, películas de lodo	Depósitos de pantano con vegetación
P	Paleosuelos carbonatados (calcita y siderita)	Rasgos pedogenéticos: nódulos, filamentos	Suelos con precipitación química.

Tabla II

Elemento	Símbolo	Principal asociación de facies	Geometría y relaciones
Canales	CH	Cualquier combinación	Lóbulos, lentes o capas con base erosional cóncava, escala y forma altamente variables
Estratos y barras de grava	GB	Gm, Gp, Gt	Lentes y capas; usualmente cuerpos tabulares, comúnmente interestratificados con SB
Estratos de arena	SB	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Lentes, capas, mantos y cuñas ocurren como relleno de canales o en hendiduras extensas, barras menores
Macroformas de acresión corriente abajo	DA	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Lentes descansando sobre planicies o en la base de canales con superficies de erosión interna convexas
Macroformas de acresión lateral	LA	St, Sp, Sh, Sl, Se, Ss, menos común Gm, Gt, Gp	Cuñas, capas y lóbulos caracterizados por acresión lateral interna
Flujo de sedimentos por gravedad	SG	Gmm, Gmg, Gci, Gcm	Lóbulos y capas típicamente interestratificadas con GB
Capas de arena laminadas	LS	Sh, Sl, menor cantidad de Sp, Sr	Capas y mantos
Llanuras de inundación finas	FF	Fm, Fl	Capas finas a densas, comúnmente interestratificadas con SB, pueden llenar canales abandonados

APÉNDICE 2

El geomagnetismo

El geomagnetismo comienza a ser estudiado desde hace miles de años con el propósito de orientación cuando se realizaban navegaciones, descubriendo así las propiedades de la magnetita y su uso práctico en la brújula. Años después el geomagnetismo fue tratado como una fuerza oculta inexplicable, descubriéndose así la variación de la declinación magnética, se dibujaron cartas isogónicas, pero solo con medidas de variación y declinación magnética.

El vector de campo magnético B , se ha denominado intensidad total y puede ser descompuesto en siete elementos. F representa el vector de inducción magnética. El campo magnético observado en la superficie de la Tierra es originado en su interior aunque una pequeña parte tiene su origen en la superficie, lo que nos permite utilizarlo como una característica de las rocas para diferenciar algunos cuerpos rocosos dependiendo de su afinidad magnética.

La magnetometría es un método geofísico relativamente simple en su aplicación. Las rocas producen un campo magnético inducido, es decir su propio campo magnético. Un magnetómetro mide simplemente las anomalías magnéticas en la superficie terrestre.

La Tierra genera un campo magnético, Este campo se puede comparar con el campo correspondiente a un dipolo (como un imán de barra) situado en el centro de la Tierra, cuyo eje está inclinado con respecto al eje de rotación de la Tierra. El dipolo está dirigido

hacia el sur, de tal modo en el hemisferio norte cerca del polo norte geográfico se ubica un polo sur magnético y en el hemisferio sur cerca del polo sur geográfico se ubica un polo norte magnético. Por convención se denomina el polo magnético ubicado cerca del polo norte geográfico, polo norte magnético y el polo magnético situado cerca del polo sur geográfico, polo sur magnético. El campo geomagnético no es constante sino sufre variaciones con el tiempo y con respecto a su forma.

La imantación inducida depende de la susceptibilidad magnética k de una roca o de un mineral y del campo externo existente. La imantación remanente de una roca se refiere al magnetismo residual de la roca en ausencia de un campo magnético externo, la imantación remanente depende de la historia geológica de la roca.

Aplicando el método magnético en la prospección minera se quiere delinear variaciones del campo geomagnético o es decir anomalías magnéticas relacionadas con un depósito mineral con un cierto contenido en magnetita o pirrotina por ejemplo.

Generalmente las mediciones magnéticas se realizan a lo largo de perfiles en estaciones de observación en distancias regulares. Combinando perfiles paralelos se obtiene un mapa de observaciones magnéticas. La mayoría de los magnetómetros disponibles mide variaciones de la intensidad vertical (interpretación más clara en comparación a la medición de variaciones en las intensidades total y horizontal). Por lo tanto se trata de mediciones relativas, cuya precisión es más alta en comparación a las mediciones absolutas.

El campo geomagnético sufre variaciones con respecto al tiempo y a su forma como la variación diurna por ejemplo. Estas variaciones, que no están relacionadas con un depósito mineral con un cierto contenido en magnetita por ejemplo superponen los valores medidos. Por esto se debe corregir los valores medidos. La variación diurna se corrige repitiendo la medición de la variación de la intensidad vertical en una estación de base en intervalos de tiempo regulares desde el principio hasta el fin de la campaña de medición.

Los valores medidos en la estación de base se presentan en función del tiempo, que permite calcular el valor de corrección correspondiente a cada medición en una estación de observación. Los valores reducidos se presentan en perfiles y/o mapas

Aún no siempre con éxito se lo aplica en el levantamiento de la topografía del basamento, que puede influir la estructura de los sedimentos superpuestos.

Se emplea en la delineación de depósitos magnéticos intrasedimentarios como rocas subvolcánicas e intrusiones emplazadas en somera profundidad, que cortan la secuencia sedimentaria normal. Como las rocas sedimentarias generalmente ejercen un efecto magnético despreciado en comparación con el efecto magnético generado por las rocas ígneas la mayoría de las variaciones de la intensidad magnética medidas a la superficie terrestre resulta de cambios litológicos o topográficos asociados con rocas ígneas o con rocas del basamento. El desarrollo reciente de magnetómetros de alta precisión facilita la definición de pequeñas repuestas magnéticas de alta frecuencia y la detección de variaciones muy pequeñas de la intensidad magnética, que podrían

ser relacionadas con variaciones diminutas en el carácter magnético de rocas sedimentarias yacentes en profundidad somera con respecto a la superficie terrestre. Las variaciones magnéticas muy pequeñas en el contenido en minerales magnéticos se refieren a valores alrededor de 0,1 gamma.

A través del método magnético se puede levantar las discordancias y las superficies terrestres antiguas ahora cubiertas por rocas más jóvenes

Las anomalías magnéticas detectadas a través de estudios magnéticos en terreno se explican con variaciones en las propiedades físicas de las rocas como la susceptibilidad magnética y/o la imantación remanente de las rocas. Estas propiedades físicas solo existen a temperaturas debajo de la temperatura de Curie. En consecuencia los generadores de las anomalías magnéticas podemos hallar hasta una profundidad máxima de 30 a 40km.

APÉNDICE 3

Se listan los datos utilizados para los procesos; los valores de las columnas son: X: coordenada E-W en UTM, Y: coordenada N-S en UTM, t: tiempo en hhmss, F: valor de campo magnético, dF: valor de la anomalía magnética y #: número consecutivo de los datos. Los datos se dispusieron de esta manera para el proceso de los mismos en el programa MagneKit 1.0 (Lora y Hernández, 2003).

28 de febrero

X	Y	t	F	dF	#
335252	2123060	233837	41724	13.6	1
335223	2123078	234037	41728	16.8	2
335210	2123102	234237	41698	-14.4	3
335215	2123128	234437	41779	66.2	4
335225	2123157	234637	41728	13	5
335209	2123151	234837	41764	49	6
335190	2123200	235137	41961	246.2	7
335173	2123226	235337	41988	273	8
335164	2123242	235637	41609	-103.6	9
335160	2123277	235737	41447	-265	10
335152	2123304	235937	41537	-173.6	11
335145	2123334	37	41595	-118	12
335138	2123361	237	41607	-105.4	13
335117	2123359	437	41622	-90.2	14
335105	2123405	537	41553	-158.8	15
335115	2123440	637	41594	-117.6	16
335134	2123472	837	41656	-56.2	17
335131	2123500	1037	41678	-33.4	18
335121	2123556	1137	41661	-52.8	19
335112	2123554	1237	41699	-12.6	20
335115	2123582	1337	41685	-26.6	21
335119	2123611	1437	41680	-31.8	22
335125	2123640	1537	41704	-8.4	23
335142	2123668	1637	41740	26.6	24
335165	2123689	1737	41704	-9	25
335188	2123707	1837	41700	-15	26
335209	2123727	1937	41706	-9.2	27
335206	2123758	2137	41722	8.6	28
335199	2123788	2337	41723	9.4	29
335197	2123819	2437	41733	20.2	30
335194	2123852	2537	41719	6	31
335216	2123874	2737	41750	35.8	32

29 de febrero

X	Y	t	F	dF	#
339723	2127429	160437	42172	446.6	1
339675	2127464	160737	42263	537.2	2
339590	2127497	160937	42303	578	3
339510	2127496	161137	42363	637.6	4
339438	2127467	161337	42420	693.4	5
339363	2127432	161437	42574	847.8	6
339289	2127401	161637	42774	1047.8	7
339216	2127372	161837	42859	1134.6	8
339137	2127365	161937	42722	996.4	9
339056	2127373	162137	42502	778	10
338975	2127385	162237	42462	737.6	11
338899	2127395	162437	42390	664.6	12
338827	2127424	162637	42360	634.4	13
338764	2127456	162737	42375	649.6	14
338690	2127502	162837	42395	670.4	15
338626	2127543	163037	42372	645.6	16
338550	2127583	163137	42547	820.6	17
338490	2127634	163337	42454	726.6	18
338438	2127696	163437	42314	586.6	19
338364	2127731	163637	42543	814.2	20
338284	2127752	163737	42622	893.4	21
338207	2127768	163937	42625	896.6	22
338140	2127818	164037	42460	731.8	23
338082	2127870	164337	41428	-300.8	24
338008	2127896	164537	42486	759.2	25
337934	2127922	164737	42310	582.8	26
337812	2127940	165237	42446	720.6	27
337735	2127915	165337	42422	696.4	28
337668	2127890	165537	42448	723.4	29
337587	2127882	165637	42370	644.8	30
337546	2127826	165837	42339	615	31
337519	2127754	166037	42241	517	32
337444	2127723	170137	42515	791.2	33
337378	2127692	170337	42204	480.8	34
337307	2127649	170537	42298	574.4	35
337251	2127595	170637	42388	665.2	36
337193	2127537	170837	42158	432.8	37
337144	2127481	171137	42162	438.2	38
337092	2127428	171237	42383	658.4	39
337035	2127376	171437	42312	588.2	40
336975	2127343	171537	42325	600.4	41
336900	2127295	171737	42293	569.8	42
336837	2127260	171937	42208	483.6	43

6 de abril

X	Y	t	F	dF	#
334620	2124881	161000	41656	-42.2	1
334627	2124803	161100	41645	-49.8	2
334634	2124928	161200	41661	-34	3
334642	2124951	161300	41627	-68	4
334648	2124976	161400	41739	42.8	5
334656	2124997	161500	41772	74.6	6
334664	2125020	161600	41652	-45.6	7
334670	2125040	161700	41677	-19.6	8
334676	2125063	161800	41660	-37.2	9
334683	2125085	161900	41690	-4	10
334691	2125109	162000	41689	-8.4	11
334698	2125133	162100	41722	25.2	12
334704	2125155	162200	41759	62.8	13
334711	2125178	162300	41661	-35.8	14
334718	2125202	162400	41700	6.6	15
334724	2125226	162600	41702	8	16
334730	2125248	162700	41738	44.2	17
334738	2125271	162800	41698	1.8	18
334736	2125295	162900	41729	33	19
334734	2125321	163200	41637	-59.6	20
334726	2125342	163300	41696	1	21
334719	2125366	163400	41794	96.4	22
334705	2125386	163500	41765	67	23
334695	2125408	163600	41702	4.4	24
334698	2125430	163700	41697	1.2	25
334714	2125454	163900	41692	-5.8	26
334722	2125477	164000	41925	228.8	27
334731	2125501	164100	41722	26.2	28
333446	2124107	135100	41396	-315	29
333502	2124190	135400	41434	-276.6	30
333543	2124310	135700	41554	-155.8	31
333484	2124408	140000	41365	-344.8	32
333418	2124498	140300	41559	-152.2	33
333328	2124569	140600	41610	-100.2	34
333233	2124636	140900	41563	-145.8	35
333134	2124692	141100	41587	-122.2	36
333026	2124723	141400	41570	-137.4	37
332920	2124699	141700	41529	-179	38
332831	2124775	142000	41521	-188.4	39
332750	2124876	142200	41627	-82.8	40
332674	2124950	142500	41597	-112.4	41
332601	2125042	142700	41528	-179.8	42
332500	2125108	143000	41450	-258.4	43
332402	2125152	143300	41599	-109.2	44
336325	2127101	112700	42208	502	45
336217	2127050	113000	42144	437.4	46
336145	2126952	113200	42072	365.4	47

336078	2126863	113500	42050	343.2	48
336005	2126772	113700	41963	256.6	49
335941	2126677	113900	42114	406.6	50
335904	2126564	114100	42082	374.2	51
335873	2126453	114400	42036	327.6	52
335804	2126361	114800	42011	303.4	53
335731	2126284	115100	41964	256.4	54
335679	2126186	115300	41925	217.4	55
335622	2126083	115600	41885	177.2	56
335558	2125990	115900	41927	219	57
335496	2125893	120200	42021	311.6	58
335439	2125802	120400	41899	190.2	59
335344	2125746	120700	41700	-8.8	60
335137	2125698	121200	41814	105.8	61
335019	2125668	121600	41743	33.8	62
334922	2125629	121900	41788	78.4	63
334864	2125550	122200	41677	-32.2	64
334886	2125433	122700	41512	-196.8	65
334960	2125345	123100	41699	-9	66
335033	2125272	123800	41813	105	67
335108	2125188	124300	41753	44.6	68
335141	2125081	124600	41709	0.2	69
335127	2124964	124900	41732	23.4	70

7 de abril

X	Y	t	F	dF	#
334510	2127290	173300	41842	129.2	1
334577	2127307	173500	41889	176	2
334634	2127330	173700	41856	144.8	3
334711	2127327	174000	41983	273.4	4
334774	2127298	174300	41848	137.8	5
334833	2127248	174600	41884	172.2	6
334887	2127210	174800	41884	174.4	7
334944	2127163	175000	41913	201.6	8
335002	2127117	175300	41947	237	9
335054	2127079	175600	41929	219.4	10
335111	2127034	175800	41887	176.8	11
335162	2126994	180000	41920	212.4	12
335216	2126957	180200	41938	231	13
335273	2126911	180500	41944	237	14
335306	2126899	181100	41900	194	15
335387	2126818	181400	41906	201.2	16
335442	2126779	181600	41948	241.6	17
335500	2126733	181800	41916	210	18
335560	2126680	182000	41979	273.6	19
335617	2126639	182200	41942	236.2	20
335669	2126597	182400	41954	250.2	21
335720	2126550	182600	41988	282.8	22

335703	2126497	182800	41976	271.4	23
335643	2126464	183100	41942	237.8	24
335626	2126392	183300	41953	250	25
335634	2126336	183500	41899	196	26
335671	2126371	182800	41929	224.4	27
335729	2126422	184000	41933	228.6	28
335801	2126453	184200	42085	380.4	29
335861	2126490	184400	41928	224	30
333834	2128086	165600	41687	-20.2	31
333867	2128026	165700	41766	56.8	32
333893	2127959	170000	41679	-32.6	33
333918	2127885	170100	41614	-98.2	34
333943	2127811	170300	41637	-73.8	35
333966	2127738	170500	41653	-58.6	36
333990	2127670	170900	41727	15.6	37
334017	2127590	191100	41718	6.6	38
332549	2125116	103700	41622	-90.6	39
332590	2125211	104500	41487	-224.6	40
332650	2125253	104700	41583	-127.6	41
332695	2125306	104900	41549	-160.4	42
332726	2125382	105100	41531	-178.6	43
332734	2125459	105300	41516	-194.4	44
332741	2125534	105500	41578	-132	45
332775	2125603	105700	41616	-93.8	46
332831	2125647	105900	41642	-67.8	47
332885	2125702	110100	41647	-62	48
332929	2125772	110300	41568	-141.6	49
332960	2125832	110500	41579	-129.8	50
332996	2125902	110700	41579	-129.8	51
333010	2125980	111000	41530	-177	52
333051	2126045	111300	41724	17.2	53
333092	2126095	111500	41662	-47.6	54
333139	2126159	111800	41721	13.4	55
333166	2126223	112500	41657	-51.2	56
333218	2126276	112800	41703	-5.6	57
333240	2126353	113100	41694	-15.4	58
333265	2126403	113400	41699	-9.6	59
333294	2126463	113700	41730	21.6	60
333351	2126513	114000	41747	36.6	61
333348	2126583	114400	41726	15.4	62
333370	2126630	114800	41720	9.2	63
333352	2126668	120400	41753	41	64
333361	2126711	122400	41572	-140.2	65
333370	2126756	125800	41543	-171.2	66
333411	2126800	131800	41789	74.4	67
333474	2126832	132800	41784	70.6	68
333532	2126813	133100	41774	60.4	69
333599	2126843	133500	41802	88.2	70
333658	2126868	133700	41768	52.8	71
333722	2126900	134000	41780	63.6	72

333773	2126934	134500	41680	-35.6	73
333806	2126941	134800	41770	54.6	74
333836	2126955	135200	41711	-3.2	75
333921	2126946	140100	41687	-25.2	76
333956	2126888	140400	41774	61.2	77
334007	2126839	140600	41746	34.8	78
334057	2126783	140800	41701	-11.2	79
334100	2126733	141100	41645	-64.4	80
334124	2126704	142300	41643	-68	81
334179	2126690	142500	41697	-13.8	82
334199	2126663	142800	41737	27.8	83
334149	2126588	143100	41775	67.8	84
334101	2126530	143300	41726	19.6	85
334143	2126513	143600	41744	37	86
334209	2126549	143900	41695	-11.2	87
334310	2126560	144200	41738	32.4	88
334370	2126521	144400	41742	36.4	89
334388	2126445	145000	41735	28.6	90
334431	2126529	145300	41790	83	91
334430	2126368	145600	41719	12	92
334471	2126302	145800	41774	66.4	93
334491	2126213	150000	41760	53	94
334485	2126136	150300	41780	71	95

8 de abril

X	Y	t	F	dF	#
336011	2125923	181300	42031	309.6	1
336001	2125936	181500	42028	307.6	2
335986	2125948	181800	41983	261.4	3
335964	2125957	182200	41935	215.8	4
335949	2125960	182600	41916	196.4	5
335937	2125969	182800	41956	238.4	6
335903	2125968	182900	41954	235.6	7
335883	2125952	183100	41948	227.2	8
335859	2125930	183200	41993	273.8	9
335837	2125922	183400	41977	258	10
335810	2125913	183900	41895	177.8	11
335782	2125911	184000	41954	236.8	12
335758	2125905	184300	41946	229	13
335749	2125880	184500	41965	248.6	14
335733	2125855	184700	41916	199.8	15
335702	2125773	184900	41944	228.2	16
335712	2125799	185100	41959	241.4	17
335703	2125778	185200	41907	189.2	18
335690	2125755	185400	41912	194.4	19
335673	2125734	185600	41889	171.6	20
335630	2125710	185800	41904	187.6	21
333652	2122989	152100	41455	-250.6	22

333667	2123004	152200	41462	-243.2	23
333677	2123033	152300	41489	-215.2	24
333681	2123069	152400	41494	-211.6	25
333672	2123098	152500	41514	-192.2	26
333661	2123126	152600	41526	-178.8	27
333647	2123156	152700	41529	-177.4	28
333625	2123182	152800	41519	-188	29
333602	2123199	152900	41538	-169.8	30
333581	2123219	153000	41532	-172.8	31
333591	2123252	153100	41512	-195	32
333595	2123285	153200	41500	-207.2	33
333592	2123310	153400	41529	-178.2	34
333570	2123432	153700	41588	-119.4	35
333548	2123443	153800	41591	-117.6	36
333525	2123459	153900	41600	-107.4	37

5 de agosto

X	Y	t	F	dF	#
336350	2127390	204453	42222	534.2	1
336284	2127527	205925	42258	569.4	2
336336	2127700	211615	42247	559.4	3
336145	2128007	212759	42313	628.4	4
336082	2128188	213505	42299	615.4	5
335979	2128303	214424	42356	672.2	6
335883	2128285	222325	42262	579.8	7

6 de agosto

X	Y	t	F	dF	#
334276	2128519	160459	41819	136.2	1
334146	2128807	164806	41795	107.4	2
334279	2129046	165549	41865	178.2	3
334399	2128362	172105	41784	97.4	4
334519	2128217	172415	41711	24.8	5
334506	2127876	172840	41819	134.4	6
334437	2127717	173402	41891	206.2	7
334162	2127717	173402	41891	206.2	8
334162	2127424	174905	41919	233.4	9
335107	2127448	184135	41954	265.8	10
336440	2127031	192323	42017	325.4	11
335953	2126587	200430	42065	373.2	12
335081	2126425	203810	41831	144.4	13
335083	2126424	204108	41889	203.6	14
335192	2126140	204606	41919	234.8	15
335204	2126031	204916	41910	225.8	16
332353	2128686	211415	41788	103	17

332412	2128295	212329	41630	-54.4	18
332594	2127870	212720	41851	166.6	19
332998	2127632	213115	41714	27.8	20
333721	2127388	213656	41821	133.4	21

7 de agosto

X	Y	t	F	dF	#
333600	2122791	165045	41607	-74.2	1
333674	2122786	165355	41608	-73.2	2
333963	2122221	170843	41549	-132.2	3
333819	2122166	171103	41529	-152.2	4
333731	2122220	171324	41701	19.8	5
332907	2122793	173657	41581	-100.2	6
332998	2122725	174648	41559	-122.2	7
333055	2122725	174843	41593	-88.2	8
333107	2122658	175044	41581	-100.2	9
333176	2122592	175250	41574	-107.2	10
333256	2122562	175445	41566	-115.2	11
333331	2122517	175655	41588	-93.2	12
333397	2122459	175858	41579	-102.2	13
333409	2122383	180057	41555	-126.4	14
333467	2122332	180235	41547	-135	15
333529	2122293	180425	41552	-129.4	16
333625	2122190	180854	41511	-167.8	17
333642	2122108	181057	41552	-128	18
333639	2122004	181256	41524	-156.8	19
333579	2121929	181532	41497	-182	20
333377	2121348	183838	41450	-226	21
333123	2120664	185430	41446	-229.6	22
333136	2120665	185511	41380	-295.6	23
333156	2120664	185547	41401	-271	24
333171	2120658	185626	41644	-28	25
333188	2120641	185706	41635	-39.8	26
333204	2120641	185741	41803	128.6	27
333214	2120625	185819	41614	-60.4	28
332985	2120647	191016	41445	-225	29
333078	2120749	191338	41456	-213.2	30
332005	2121595	192640	41489	-178.4	31
332214	2121530	192950	41468	-196.4	32
332357	2121487	193218	41442	-224.6	33
332526	2121430	193502	41391	-275.4	34
332667	2121273	193740	41485	-181	35
332791	2121273	193740	41485	-181	36
332791	2121273	193740	41485	-181	37
332791	2121112	193950	41505	-159	38
333372	2121433	194425	41385	-278.4	39
333263	2121870	194903	41559	-103	40
333391	2122063	195145	41517	-144	41

333642	2122255	195440	41572	-88.6	42
333705	2122494	195845	41580	-81.6	43
333248	2123047	201207	41567	-88.2	44
333351	2123025	201658	41594	-61.6	45
333365	2122993	201944	41582	-70.2	46
332764	2125078	200545	41589	-71.2	47
334968	2124287	212525	41729	69.8	48
334898	2124200	212736	41469	-190.8	49
334266	2124144	213937	41794	133	50

27 de diciembre

X	Y	t	F	dF	#
343428	2126400	205815	41302.1	-314.4	1
343355	2126151	210329	41404.6	-212.4	2
343253	2125957	210347	41421.8	-195	3
343205	2125711	210924	41250	-367.8	4
343136	2125491	211703	41183.8	-434	5
342542	2125054	212044	41210.7	-404.8	6
342558	2125056	212356	41212.4	-403.4	7
342414	2125038	212701	41206.5	-409.6	8
342276	2124380	212951	41048.5	-567.6	9
342100	2124238	213259	41240.7	-376.4	10
341782	2124070	213632	41261.6	-356	11
341903	2124077	214652	41321.5	-299.8	12
341845	2123809	215101	41347.8	-273.8	13
341451	2123665	215543	41245.5	-377.5	14
341680	2122921	215955	41263	-360.5	15
341683	2122918	220324	41285.8	-337.7	16
341878	2122615	220647	41417.6	-206.4	17
342046	2122258	220944	41340.3	-284	18
344244	2121773	221304	41378.3	-246.2	19
342458	2121769	221635	41444.8	-180.3	20
342950	2121207	222406	41357.6	-267.5	21
342942	2121203	222809	41313.1	-313	22
342761	2120459	223145	41363.5	-263.1	23
342857	2120001	223452	41269.5	-357.1	24
342908	2119467	224216	41298.6	-327.9	25
342837	2119066	224504	41441.6	-185	26
343006	2118623	224931	41347.3	-278.3	27
343137	2118184	225344	41250	-375.3	28
341218	2123357	235453	41349.3	-277.3	29
341223	2122340	2	41328.4	-298.6	30
341300	2122098	258	41352.6	-274.2	31
341488	2121954	536	41329.5	-297.1	32
341680	2121729	916	41362.2	-263.9	33
341807	2121361	1229	41403.6	-222.7	34
341524	2120960	1439	41413.9	-212.7	35
341099	2120608	1653	41342.3	-284.3	36

340660	2120560	1937	41357.3	-269	37
340186	2120327	2251	41429.5	-197	38
339770	2120075	2558	41387	-239.1	39
339337	2120202	2909	41386.4	-238.4	40

28 de diciembre

X	Y	t	F	dF	#
338713	2120116	183046	41399	-223.5	1
338271	2120023	183514	41392.1	-223.9	2
337745	2120102	183810	41344.3	-256.5	3
337458	2119798	184035	41327.1	-293.7	4
337044	2119472	184259	41295.3	-327.5	5
336765	2119064	184524	41277	-345.1	6
336353	2118950	185017	41323.3	-298	7
335929	2119090	185626	41386.1	-232.5	8
335933	2119086	191543	41348.9	-263.7	9
335260	2119355	192248	41325.4	-288.1	10
334820	2119355	192938	41334.1	-277.2	11
334457	2119439	193600	41310.1	-301	12
334239	2119652	194142	41315	-294.3	13
334178	2119832	194607	41315.1	-292	14
334343	2119978	195028	41317.8	-289	15
334336	2119977	195531	41314.5	-293	16
334318	2120366	200000	41316.9	-290.6	17
334243	2120581	200412	41325.8	-280.3	18
334006	2120717	200932	41322.9	-283.9	19
333955	2121024	201556	41323.1	-282.7	20
334191	2121095	202056	41366.7	-237.6	21
334220	2121273	202642	41298.5	-307.1	22
334081	2121476	203351	41380.7	-224.6	23
333884	2121480	203724	41430.8	-171.3	24
340352	2123311	230359	41409.7	-193.9	25
340513	2127600	234921	41826.3	221.8	26
340882	2127599	235552	41502.5	-101	27
341196	2127467	235850	41434.5	-168.1	28
341554	2127513	221	41391.4	-210.9	29
342371	2127324	527	41453.5	-147.1	30
342664	2127284	758	41389.8	-209.8	31
343234	2126957	1131	41318.1	-280.2	32
343626	2126616	1637	41220.3	-378	33
343662	2127374	2104	41223.2	-375.9	34

29 de diciembre

X	Y	t	F	dF	#
335773	2123206	193008	41525.3	-114.5	1
335885	2123339	194205	41565.8	-73	2
336132	2123242	195402	41539.3	-99.8	3
336269	2123364	200304	41550.2	-87.1	4
336371	2123043	201000	41525.6	-109.9	5
336530	2122904	201818	41512.1	-123.4	6
335202	2123086	205947	41556.3	-74.3	7
340306	2123372	221502	41389.7	-234.6	8
340189	2123541	222133	41362.4	-260.7	9
339839	2123640	223537	41434.3	-188.8	10
339560	2123638	225442	41483.1	-141.2	11

Referencias

Altamira-Areyán, A, 2002, Las Litofacies y sus Implicaciones de la Cuenca Sedimentaria Cutzamala-Tiquicheo, Estados de Guerrero y Michoacán, México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de geología. Tesis de Maestría, 79 p. Inédita.

Bennami, M. *et al.* 2005. Presencia de dinosaurios en la Barranca Los Bonetes en el sur de México (Región de Tiquicheo, Estado de Michoacán) y sus implicaciones cronoestratigráficas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 22, núm. 3, 429-435

Buitrón-Sánchez, B.E. y Pantoja-Alor, J, 1994; Esponjas perforantes de moluscos del cretácico Temprano en la región centro occidental de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 11. No. 2, p 222-231.

Buitrón-Sánchez, B.E. y Pantoja-Alor, J, 1998. Albian gastropods of the rudist-bearing Mal Paso Formation, Chumbítaro region, Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol.15, No.1, p 14-20.

Campa-Uranga, M.F. y Ramírez-Espinosa, J., 1979, La evolución geológica y la metalogénesis de Guerrero: Universidad Autónoma de Guerrero, Serie Técnico-Científica, 1, 84 p.

Campa-Uranga, M.F. y Coney, P.J, 1983, Tectono-stratigraphic Terranes and Mineral Resource Distributions in México. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1040-1051.

Centeno-García E., Corona-Chávez P., Talavera-Mendoza O., Iriando A., 2003, Geology and tectonic evolution of the Western Guerrero terrane; a transect from Puerto Vallarta to Zihuatanejo, México, en Geologic Transects across Cordilleran México, guidebook for field trips of the 99th GSA Cordilleran Section Meeting: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Publicación Especial, 201-228.

Consejo de Recursos Minerales, 1999. Informe de la carta geológico-minera y geoquímica. Tuzantla E14-A45, escala 1:50,000. Estado de Michoacán. 77 p.

Guerrero-Suástegui, M. 1997, Depositional history and sedimentary petrology of the Huetamo sequence, Southwestern México: The University of Texas at El Paso, Department of Geological Sciences, Tesis de Maestría, 120 p.

INEGI 1993 Carta Geológica Tuzantla, escala 1:50,000

Lora de la Fuente, C. y Hernández-Ordóñez R. 2003. Instalación de un Observatorio Magnético Estándar de última generación: estudio geofísico, emplazamiento y operación. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. Inédito.

Mauvois R, 1977. Cabalgamiento miocénico (?) en la parte centromeridional de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Revista del Instituto de Geología. Vol. 1, No. 1. P 48-63.

Menella, L.; Garduño y V. H. Bonási O. 2000, Fault-Slip análisis in the basal units of the Mexican volcanic belt on the eastern of the

Tzitzio Anticline, Michoacán, México. Special paper. Geological Society of America.

Miall, A. D. 1996. The Geology of Fluvial Deposits. Springer, Printed in Germany, 583 p.

Morales-Gómez, M. 2005. Geología estructural del sistema de fallas transcurrentes pos-cretácico de la región sur de Tiquicheo, Michoacán, sur de México. Tesis de maestría en ciencias. Instituto de Geología. UNAM. Inédita

Muñiz-Barreto, L. 1007. El geomagnetismo. Cuadernos del Instituto de Geofísica, UNAM.

Omaña-Pulido, L. y Pantoja-Alor, J. 1998; Early aptian benthic foraminifera from El Cajón Formation of the San Lucas region. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 15, 1, pp 64-72. 1998.

Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V.H., Tibaldi, A., Vezzoli, L., 1991, Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán: Boulder, Co., Geological Society of America, Map and Chart series, MCH072, 1 mapa, 22 p

Serrano Durán, L., 2005, Estudio de los enjambres de diques y el fallamiento terciario en la región de Tuzantla-Tiquicheo-Nanchititla, estados de Michoacán, México y Guerrero, República Mexicana. Tesis. Universidad EAFIT, Departamento de Geología, Medellín, Colombia. Inedita.

Talavera Mendoza, O., Guerrero-Suastegui, M., 2000. Geochemistry and isotopic composition of the Guerrero Terrane (western Mexico) and coeval arc terranes (Greater Antilles and Western Cordillera of Colombia). A late Mesozoic intra-oceanic arc accreted to cratonic America during the Cretaceous. *Tectonophysics*, V. 230. p. 49-73

Williams-Howel, J. Turner-Francis, M. Gilbert-Charles., 1968, *Petrografía; Introducción al estudio de las rocas en secciones delgadas*. México, Editorial Compañía Editorial Continental.

www.inegi.gob.mx

www.coremisgm.gob.mx