



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Unidad Ticomán

“Geomorfología de tres relieves, y su relación en la interpretación de geoformas en información sísmica de tres Cuencas Petroleras”

TESIS

Para obtener el grado de

Maestra en Ciencias

Presenta

Gloria Susana Díaz Pérez

Asesoría

Asesor Externo: Dr. Juan José Valencia Islas

Asesor Interno: M en C. Eduardo Pérez Flores



MÉXICO, D.F., DICIEMBRE 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 14:30 horas del día 09 del mes de Noviembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIA. U. Ticomán para examinar la tesis titulada:

"Geomorfología de tres relieves, y su relación en la interpretación de Geoformas en información sísmica de tres cuencas petroleras"

Presentada por el alumno:

Díaz
Apellido paterno

Pérez
Apellido materno

Gloria Susana
Nombre(s)

Con registro:

B	0	7	1	5	5	6
---	---	---	---	---	---	---

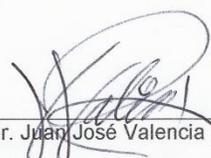
aspirante de:

MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

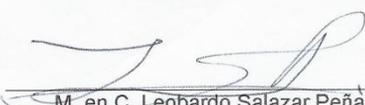
Directores de tesis


Dr. Juan José Valencia Islas

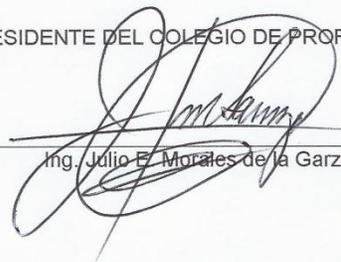

M. en C. Eduardo Pérez Flores


Dr. Luis Enrique Ortiz Hernández


M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán


M. en C. Leobardo Salazar Peña

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


Ing. Julio E. Morales de la Garza

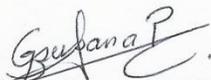


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 5 del mes Diciembre del año 2011, el (la) que suscribe C. Gloria Susana Díaz Pérez, alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Geología, con número de registro B071556, adscrita a SEPI ESIA, Ticomán, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del M. en C. Eduardo Pérez Flores, y el Dr. Juan José Valencia Islas, cede los derechos del trabajo intitulado “Geomorfología de tres relieves, y su relación en la interpretación de geoformas en información sísmica de tres cuencas petroleras”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: s_dipe@yahoo.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Geog. Gloria Susana Díaz Pérez

Nombre y firma

**DEDICO ESTE TRABAJO CON TODO MI AMOR, RESPETO Y PROFUNDA ADMIRACIÓN
A MIS MÁS GRANDES AMIGOS:**

Dios los bendiga a todos ustedes

A mis padres:

María Apolinar Luisa Pérez Sánchez e Isidoro Díaz Castillo

Gracias por su amor, paciencia, por sus sabios consejos, por ser un enorme ejemplo para mí en todos los aspectos de la vida, gracias por ser tan valientes. En verdad son un regalo de Dios, los amo, mis amados padres, los amo.

A mis hemanitos lindos:

Ely, Cristy y Cholis

Mis muy amados hemanitos, son una belleza, los amo profundamente, ¡gracias por toodo!, gracias por amarme, bendito regalo de Dios .

A mis sobrinas:

Aquetzalli y Karla Citlalli

Crias hermosas, gracias por hacerme crecer, por compartirme su vida, las amo.

AGRADECIMIENTOS

*Mi agradecimiento total al hombre que me ama por sobre todo, y en todo momento y lugar a **Dios**, sin él nada, con él el Cielo en la Tierra. También agradezco a toda la corte celestial, que siempre me han acompañado y sé que lo harán.*

Agradezco enormemente al Dr. Juan José Valencia Islas, y al Inq. Agustín Ruíz, del IMP, el apoyo que me brindaron en todo momento para la realización de esta tesis, la gestión que hicieron en el apoyo económico, en equipo, etc., no acabaría por nombrar. Gracias, por su valiosa asesoría y amistad, por los momentos gratos que pasamos en campo, en la oficina, por permitirme preguntar todas mis dudas con total confianza. Pero especialmente al Dr. Valencia, por preocuparse no solo por el trabajo que estábamos realizando, sino que también por mi persona, por haber sido más que un asesor. Gracias Dr. Valencia, muchas gracias.

Agradezco las facilidades prestadas para el trabajo de campo y por permitirme ocupar el equipo, al Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)

Agradezco a mi asesor interno el M. en C. Eduardo Pérez Flores, del IPN, por aceptar ser mi Director Interno, gracias por la confianza que me ha brindado desde que era alumna de esta gloriosa institución, gracias por sus valiosas observaciones en la tesis, por brindarme su amistad, gracias por todo, estimado Mtro. Pérez Flores.

Agradezco el que hayan aceptado ser parte de mi comité examinador, a mis sinodales del IPN: Dr. Luis Enrique Ortiz Hernández, al M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán, (le agradezco su amable confianza y apoyo que siempre me ha brindado en ésta institución) y al M. en C. Leobardo Salazar Peña. A todos ustedes gracias por sus valiosos comentarios en el trabajo de investigación.

Agradezco a una gran persona que desinteresadamente me brindó su amistad, asesoría de manera totalmente incondicional, a quien admiro y respeto por ser un gran hombre. Al Dr. Fernando Aceves Quezada, investigador de la UNAM. Gracias por todo estimado Dr. Aceves.

Agradezco a René Mandujano quien me auxilió en la primera etapa y a Gabriel Parada en la última etapa (gracias por todo mi muy estimado amigo, te quiero mucho). A los dos les agradezco por haberme ayudado en el manejo de los software, por ser mis ángeles y por los buenos momentos que pasamos entre risas, pláticas y trabajo.

Una vez más quiero agradecer a unas chicas maravillosas que me han brindado su amistad y han estado al pendiente de mí, gracias por sus oraciones, sin su ayuda la vida sería menos fácil, gracias Chicas Opus Dei.

Un especial agradecimiento a una persona extraordinaria en todos los sentidos, que me ha hecho madurar, ser valiente y ver que en mi debilidad esta mi fortaleza, por las lágrimas y risas compartidas en la maravillosa aventura de la vida, a Alejandro Hernández Navarrete, ¡ICH LIEBE DICH ¡

Gracias a todas las personas que han hecho posible ésta tesis ya sea de manera directa o indirecta, están en mi corazón aunque no las nombre, gracias a mis ex compañeros y amistades de la marina que me impulsaron en la búsqueda de una nueva etapa en mi vida. Muchos han colaborado para la realización de la maestría y me han aportado más de lo que imaginan.

INDICE

	Página
Resumen	
Summary	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
I.1- INTRODUCCIÓN	1
I.2- OBJETIVO	4
I.3- CAMPO DE APLICACIÓN Y ANTECEDENTES	5
I.3.1- Fundamentos Científicos de la Cartografía Geomorfológica	
I.3.2- Aplicación de la Geomorfología en Sísmica y en Riesgo Ambiental	
Interpretación de Geoformas en Información Sísmica	
Riesgo Ambiental	
I.3.3- Desarrollo general de los Sistemas de Información Geográfica	
Conclusiones del capítulo I	12
CAPÍTULO II. ETAPA DE ADMINISTRACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN (WORKFLOW)	13
II.1.- ETAPA DE ADMINISTRACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	13
Conclusiones del capítulo II	18
CAPÍTULO III METODOLOGÍAS EMPLEADAS	19
III.1.- METODOLOGÍAS EMPLEADAS EN GEOMORFOLOGÍA	19
III.1.1.- Actividades realizadas en las tres áreas de estudio para la elaboración de la Geomorfología	22
Revisión bibliográfica	
Delimitación del área de estudio y Fotointerpretación	
Transferir la fotointerpretación a cartas topográficas 1:50,000	

Clasificación detallada de las unidades morfogénicas	
Realización en el SIG de la morfometría	
Trabajo de campo	
III.2.- METODOLOGÍA EMPLEADA EN INTERPRETACIÓN DE GEOFORMAS EN INFORMACIÓN SÍSMICA	34
III.2.1.- Pasos realizados en la interpretación de geoformas en información sísmica	34
Información sísmica	
Manejo en el Software especializado	
Atributos sísmicos combinados con filtros	
Ejemplos de geoformas interpretadas	
Conclusiones del capítulo III	37
CAÍTULO IV. GEOMORFOLOGÍA	38
IV.1.- GEOMORFOLOGÍA	38
IV.1.1.- Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí	38
Generalidades fisiográficas	
Geología	
Geomorfología	
IV.1.2.- Región de la Formación El Doctor, San Joaquín, Querétaro	51
Generalidades fisiográficas	
Geología	
Geomorfología	
IV.1.3.- Región Cuenca de Toluca, Estado de México	63
Generalidades fisiográficas	
Geología	
Geomorfología	

Conclusiones del capítulo IV	76
CAPÍTULO V. INTERPRETACIÓN DE GEOMORFORMAS EN INFORMACIÓN SÍSMICA DE CUENCAS PETROLERAS, (GEOMORFOLOGÍA SÍSMICA)	77
V.1.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA GEOMORFOLOGÍA Y DE LA “GEOMORFOLOGÍA SÍSMICA”	77
V.2.- GEOMORFOLOGÍA SÍSMICA	79
V.3.- EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA GEOMORFOLOGÍA EN LA INFORMACIÓN SÍSMICA	80
V.4.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SOFTWARE EMPLEADOS EN INFORMACIÓN SÍSMICA	81
Atributos y Filtros en los software	
V.5.- EJEMPLOS DE IMÁGENES DE LAS CUENCAS PETROLERAS EN LOS SOFTWARE DE INFORMACIÓN SÍSMICA	88
Cuenca de Chicontepec	
Cuenca del Sur del Golfo de México	
Cuenca de Burgos	
Características del estudio geomorfológico en las tres regiones y su relación con la interpretación (<i>Geomorfología Sísmica</i>), de las tres cuencas petroleras	
Conclusiones del capítulo V	114
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
VI.1.- CONCLUSIONES	115
VI.2.- RECOMENDACIONES	121
ANEXO FOTOGRÁFICO DEL TRABAJO DE CAMPO	122
BIBLIOGRAFÍA	

RESUMEN

En éste trabajo de investigación se desarrolla una aplicación de la Geomorfología a los estudios sísmicos, que en la actualidad algunos geocientíficos la denominan “Geomorfología Sísmica”. Esta aplicación se da a través de la Geomorfología en las tres regiones de investigación con diferente origen geológico, y realizadas con diferente grado de detalle. En cada una de ellas se visualizan las unidades morfogenéticas que son llevadas de manera análoga a las geoformas interpretadas en los cubos con información sísmica. Cabe mencionar que también se incluyeron geoformas pertenecientes al relieve ígneo, representado por la Cuenca de Toluca, que aunque ciertamente la mayoría de los hidrocarburos presentes en las rocas volcánicas provienen de rocas generadoras sedimentarias, algunas rocas volcánicas también son generadoras como el caso de reciente descubrimiento en el Golfo Profundo de México, “Volcán Chapopote”, aspecto de interés por estar vinculado a nuevos depósitos de hidrocarburo. Para la realización de la Geomorfología en las tres regiones de investigación fue de gran utilidad el uso de la herramienta SIG *Sistemas de Información Geográfica*, en la cual se obtuvo la morfometría para cada una de las regiones estudiadas, haciendo hincapié que la morfometría es una parte de la geomorfología que estudia las características cuantitativas de las formas del relieve, valiéndose de una serie de técnicas efectivas para una mejor comprensión del mismo. De igual manera se destaca que para la interpretación de información sísmica, las herramientas utilizadas fueron OpendTect, Petrel, Landmark, y Geoprobe, que evidenciaron con claridad algunos rasgos del relieve, de acuerdo a la geología existente del área empleada, a la calidad de la imagen obtenida en el cubo sísmico y al software utilizado.

Las unidades morfogenéticas encontradas en el estudio geomorfológico de las tres regiones de investigación, fueron igualmente identificadas en la sísmica de algunas cuencas petroleras, como canales fluviales, meandros, deltas, talwegs, depresiones y cordilleras de sedimentos, etc. Se puede concluir que las geoformas del relieve terrestre en superficie son de cierta forma homogéneas a las que se encuentran sepultadas, lo que favorece efectivamente a la búsqueda de probables yacimientos de hidrocarburos y a su respectiva exploración.

SUMMARY

In this one work of investigation an application from Geomorphology is developed to the seismic studies that at present some geoscientists "Seismic Geomorphology". This application occurs through Geomorphology in the three regions of investigation with different geologic origin, and realised with different degree from detail. In each of them the morphogenetic units visualize that are taken of analogous way to geoforms interpreted in the buckets with seismic information. It is possible to mention that also they included geoforms pertaining to the igneous relief, represented by the Basin of Toluca, that although certainly the majority of present hydrocarbons on volcanic rocks comes from sedimentary generating rocks, some volcanic rocks also are generating as the case of recent discovery in the Deep Gulf of Mexico, "Chapopote Volcano", aspect of interest to be tie to new hydrocarbon deposits. For the accomplishment of Geomorphology in the three regions of investigation the use of tool GIS *Systems Information Geographic*, was very useful in which the morphometry for each one of the studied regions was obtained, making emphasis that the morphometry is a part of the geomorphology that studies the quantitative characteristics of the forms of the relief, being worth of a series of effective techniques for one better understanding of the same. Of equal way one stands out that for the seismic processing of information, the used tools were OpendTect, Petrel, Landmark, and Geoprobe, that some characteristics of the relief demonstrated with clarity, according to the existing geology of the used area, to the quality of the image obtained in the seismic bucket and to used software.

The found morphogenetic units in the geomorphological study of the three regions of investigation, also were identified in the seismic one of some oil river basins in some oil river basins, like fluvial channels, meanders, deltas, talwegs, depressions and slidings, mountain ranges of sediments, etc. can be concluded that geoforms of the terrestrial relief in surface is of certain form homogenous to which they are buried, which favors indeed to the search of probable deposits of hydrocarbons and to its respective exploration.

I.- INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

I.1- INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene su origen en la geomorfología superficial del relieve terrestre, hecha en tres regiones: Región Pozo Tolentino-1 (llamado así por Villaseñor, 1999) y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí, que componen una sola área de estudio en ésta investigación, localizada dentro de un *transecto geográfico de la hoja Santa Catarina en San Luis Potosí*. Región de la Formación El Doctor en Querétaro, la cual fue nombrada así en esta investigación por poseer una amplia extensión que incluye a dicha Formación, y por último, la Región Cuenca de Toluca en el Estado de México, que de igual manera incluye una extensa área que forma la cuenca señalada. Las tres regiones son un modelo análogo que servirá de apoyo para trabajos de geomorfología sísmica, objeto de interés en la industria petrolera.

La Geomorfología Sísmica como tal es un término realmente reciente y adoptado por algunos investigadores de la Tierra, cuyo aporte toma impulso a finales de los noventas y principios del dos mil, por varios trabajos entre ellos el estadounidense Posamentier quien ha empleado este término usando algunas técnicas de la Geomorfología, para la búsqueda de zonas de interés petrolero, esto se da de forma complementaria con otras herramientas propias de la rama petrolera como la estratigrafía. Al ser identificadas las geoformas de cursos antiguos de ríos, meandros, depresiones, y cordilleras de sedimentos que se encuentran sepultados en materiales sedimentarios, los intérpretes obtienen un mayor conocimiento del área tanto en la génesis, las dimensiones y la morfología que posee. Sin embargo, es importante mencionar que ésta clase de estudios orientados a la localización de hidrocarburos en realidad no es reciente, ya que han sido empleados por la ex Unión Soviética (Aristarjova, 1979 en Lugo 1988), campo estudiado dentro de la Geomorfología Estructural y la Paleogeomorfología. El conocimiento de estas investigaciones se traduce en un menor riesgo económico para la exploración petrolera, tales como gastos, tiempo, personal involucrado entre otros recursos empleados. Parte de las técnicas de la Geomorfología son aprovechadas, para interpretar lo que pudiera ser un

yacimiento petrolero y si éste es o no rentable por su área, así mismo, disminuye la incertidumbre exploratoria si ésta se llegara a presentar.

Los conocimientos de la ciencia geomorfológica hacen esto posible siempre y cuando se trate de escenarios sedimentarios con morfología de ríos y/o meandros, depresiones y deslizamientos, cordilleras de sedimentos principalmente, es decir, la “*Geomorfología Sísmica*” es empleada para ambientes lacustres y sedimentarios. Sin embargo, cabe recordar que para este estudio se incluyó la geomorfología de una región ígnea, para tener mayor heterogeneidad en el relieve y apreciar las diferencias entre un ambiente ígneo y uno sedimentario. Es posible que el término de geomorfología sísmica no sea aceptado por todos los científicos de escuelas tradicionales de esta ciencia, como la rusa y/o la europea que la estudian con mayor profundidad. La geomorfología sísmica es una técnica empleada por algunos geocientíficos como los estadounidenses, entre ellos Posamentier, y que de acuerdo a la visión rusa y/o europea pareciera un término muy restringido, usado como una herramienta para ambientes sedimentarios sepultados, basándose principalmente en la delimitación geométrica, en las geoformas específicas, sin profundizar en los principios básicos de la geomorfología como ciencia. Aspecto que no es de discusión en esta investigación aunque se hace una breve reseña histórica de la geomorfología para entender ambos puntos de vista.

Para éste estudio, la geomorfología se realizó haciendo un híbrido entre la escuela rusa y la escuela europea para los tres tipos de relieve, ya que ambas tienen mucho en común y facilitan con sus métodos un buen análisis geomorfológico logrando una pronta y clara exposición de geoformas, tomando en cuenta que cada uno de los relieves tiene características litológicas, ambientes geológicos y dimensiones diferentes. Las geoformas encontradas están presentes en las cuencas petroleras estudiadas con información sísmica, inclusive también algunas del relieve ígneo aunque de litología distinta. Cada uno de los relieves analizados van acompañados con su respectiva cartografía geomorfológica trabajada a escala 1:50,000 tanto para la Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, así como para la Región de la Formación El Doctor. Para la Región Cuenca

de Toluca la cartografía fue a escala 1:100,000 por ser la más extensa aunque para su representación se tuvo que reducir la escala.

Se tomaron estas tres regiones (Fig. I.1.1), debido a que se pretende mostrar diversidad en la geomorfología para una mejor aplicación análoga en el campo de geomorfología sísmica.

- ❖ Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí
(Zona de rocas calizas, evaporitas e ígneas)
- ❖ Región El Doctor, Querétaro
(Macizo calcáreo con estructura de cabalgadura)
- ❖ Región Cuenca de Toluca, Estado de México
(Zona de rocas ígneas extrusivas)

Es importante mencionar que la cartografía geomorfológica fue elaborada con diferente grado de detalle para cada región, de acuerdo a la extensión de la misma.

De manera complementaria, se hizo en los Sistemas de Información Geográfica, (SIG's), para las tres regiones, un análisis morfométrico que es una técnica fundamental en un estudio geomorfológico: Modelo Digital del Terreno del cual se sacó el mapa de relieve sombreado en tercera dimensión, mapa altimétrico, y mapa de pendientes. Los mapas morfométricos se consideran básicos para la clasificación del relieve ya que de manera indirecta consideran la génesis, estructura y dinámica.

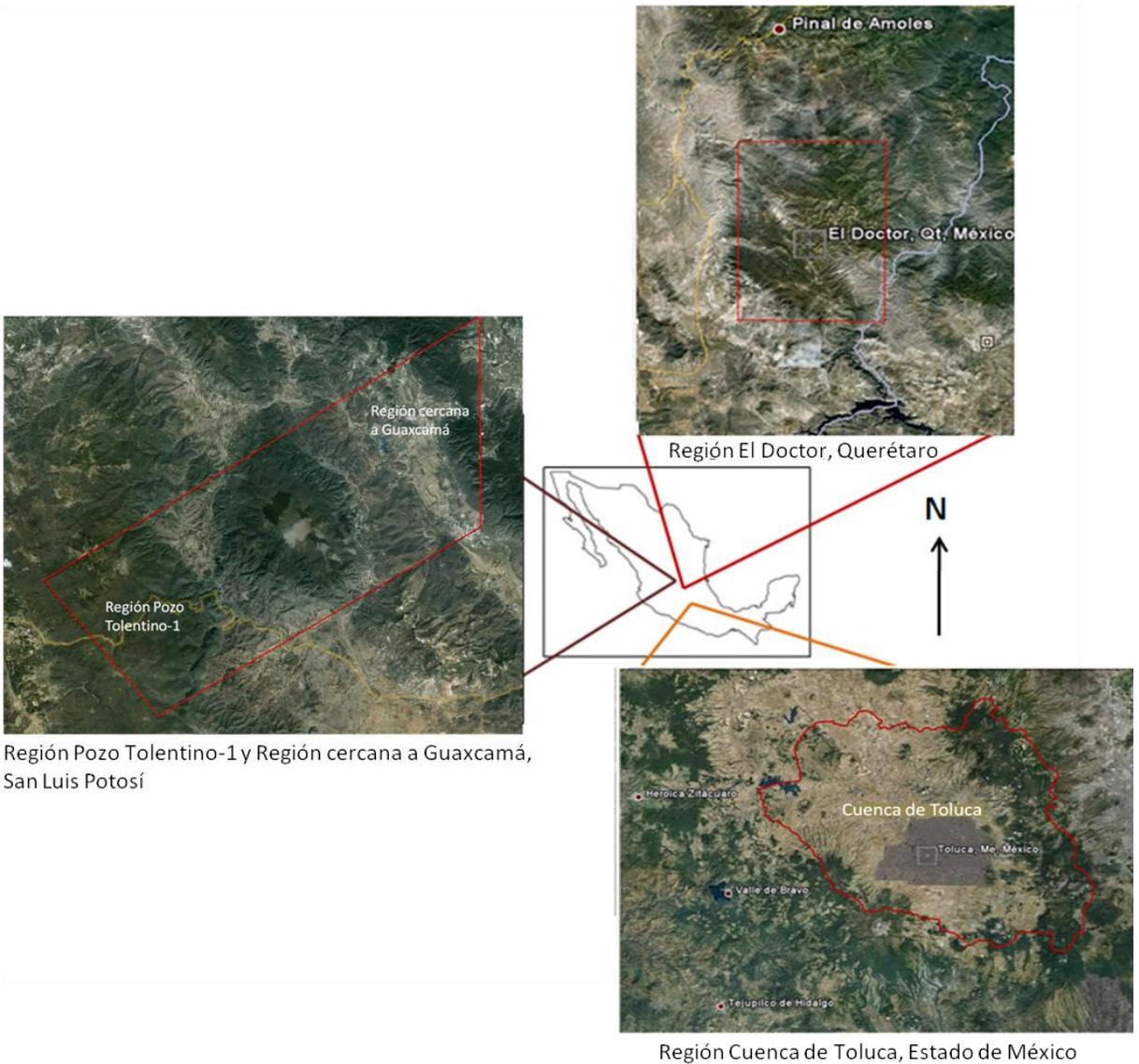


Fig. I.1.1. Localización geográfica en relieve de las tres regiones geomorfológicas estudiadas, (Google Earth, 2010).

I.2.- OBJETIVO

El objetivo central de éste trabajo es que a través de la Geomorfología en las tres regiones de investigación con diferente litología, ambiente geológico, y realizadas con diferente grado de detalle, puedan ser visualizadas las unidades morfogenéticas y

llevadas de manera análoga a las geoformas interpretadas en los cubos de información sísmica, de las Cuencas Petroleras, y así, poder valorar ampliamente las geoformas presentes en la “geomorfología sísmica” con la finalidad de tener un conocimiento mayor, un panorama más amplio del relieve sepultado con fines de exploración petrolera.

I.3.- CAMPO DE APLICACIÓN Y ANTECEDENTES

Esta investigación es de gran utilidad por ser un modelo análogo en trabajos de geomorfología sísmica, para lo cual la realización de una cartografía geomorfológica mostrará la relación existente entre los procesos exógenos con los procesos endógenos. El apoyo del modelo digital con los Sistemas de Información Geográfica, SIG, permiten una mejor visualización de la dinámica ocurrida. Asimismo el estudio de estos procesos permite un sondeo de los riesgos ambientales que se pudieran suscitar para la sociedad y/o de riesgo económico para exploraciones petroleras.

I.3.1- Fundamentos Científicos de la Cartografía Geomorfológica

La geomorfología es una ciencia joven (fines del siglo XIX y principios del siglo XX), su evolución ha sido significativa a partir de la Segunda Guerra Mundial; estos avances le permiten integrarse como ciencia al estudio del relieve terrestre. El objetivo principal de la geomorfología es conocer y clasificar el relieve en función de su origen, ya sea tectónico, volcánico, de erosión o acumulativo y determinar su edad absoluta o relativa, además, los mapas morfogenéticos son una combinación de geología y topografía; cuyo objetivo es dar a conocer de manera general el relieve del área de estudio. (Lugo, 1989).

Demek (1978), define a los mapas geomorfológicos como mapas temáticos que identifican, describen al relieve y a su vez sintetizan gran cantidad de información.

Respecto a los mapas morfogenéticos, Spiridonov (1981), menciona que un mapa geomorfológico general debe ser especialmente morfogenético y que puede ser subdividido en mapas analíticos donde el objetivo es, representar elementos genéticos

homogéneos, un origen único y los mapas sintéticos que tienen la finalidad de destacar formas semejantes. Referente a la escala, Spiridonov (1981.) indica que la más adecuada será según las características de los datos que se van a representar y del nivel de aplicación deseada.

Derruau (1983), considera a los mapas geomorfológicos como un fin de la investigación geomorfológica y representan gráficamente la interpretación del terreno hecha por el geomorfólogo.

Córdova (1988), clasifica a los mapas geomorfológicos en generales y en especiales, los primeros cubren las características básicas como son la morfología, génesis y edad del relieve; los segundos muestran pendientes, procesos fluviales, etc.

Verstappen *et. al.* (1991), explican tres tipos de levantamientos geomorfológicos (analíticos, sintéticos y pragmáticos), destinados a proporcionar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos y los fenómenos naturales conexos.

Pedraza (1996), divide a los mapas geomorfológicos en regionales, de detalle y planos; los primeros son a escalas entre 1:400,000 y 1:100,000, elaborados con procedimientos manuales o automáticos, apoyados con trabajo de campo. Los mapas de detalle son a escalas entre 1:50,000 y 1:25,000, realizados mediante trabajos de campo apoyados por fotointerpretación y utilizando técnicas manuales, aun cuando sean la base para otros trabajos que impliquen su digitalización; por último los planos son a escalas de mayor detalle entre 1:10,000 y 1:5,000 que normalmente representan un fenómeno específico estudiado.

I.3.2- Aplicación de la Geomorfología en Sísmica y en Riesgo Ambiental

La aplicación de la Geomorfología se ha visto favorecida al permitir que sus conocimientos ayuden a resolver problemas reales en varios campos de la ciencia, por lo que ésta ha evolucionado a lo largo de su historia satisfactoriamente.

La generación del relieve por procesos exógenos, provocan un modelado permanente en la superficie terrestre, nivelando las elevaciones y rellenando las depresiones, éstos actúan en estrecha relación con los procesos endógenos, generados por fuerzas internas de la Tierra, procesos geológicos estructurales tales como movimientos tectónicos, sismos, etc. Esta dinámica entre procesos exógenos y procesos endógenos tiene su manifestación en el medio ambiente, y de manera directa o indirecta en la sociedad, pues nada es aislado todo está asociado a algo, generando alteraciones manifestadas ya sea en riesgo a la población por procesos mecánicos que desestabilizan el terreno, en el aspecto económico como la exploración y explotación de yacimientos minerales, de hidrocarburos, en cuestiones ambientales, o simplemente cambiando el paisaje entre otros.

Interpretación de Geoformas en Información Sísmica

La interpretación de geoformas en la Información Sísmica se da a través de la “geomorfología sísmica”, que es un término reciente en donde se aplican algunas nociones de la geomorfología, que han tenido una participación oportuna en el área de la prospección petrolera, se interesa principalmente a estudios realizados en ambientes sedimentarios, en donde la información obtenida en estudios sísmicos como son en los perfiles sísmicos o “slices”, así como la información estratigráfica de este tipo de ambientes, junto con el uso de herramientas apropiadas como software especializado, permiten obtener la geometría de las unidades lo más exacta posible del yacimiento de interés, o sea una delimitación morfológica.

Es importante mencionar que las geoformas buscadas se enfocan a trampas petroleras ligadas a canales sepultados de antiguos ríos, a meandros, depresiones, y cordilleras de sedimentos, principalmente. Estas formas no siempre se van a encontrar en secciones sísmicas, no de una manera exacta y a primera vista, por lo que se requiere tener conocimiento del software indicado para jugar con las vistas que dan los diferentes atributos sísmicos en los “slices”, hasta encontrar las geoformas que se quieren. No obstante en la búsqueda intensa de encontrar lo que se quiere ver otorga el riesgo de forzar la interpretación de los slices y ver lo que en la realidad no es, así mismo, la interpretación está restringida a la resolución de la sísmica que es mínimo de 20 a 60 m.

Existen varios trabajos de información sísmica que han aplicado conocimientos de Geomorfología con el fin de obtener más datos y ampliar el panorama de las formas existentes en el área de interés, y así reducir el riesgo económico en el momento de explorar la zona requerida.

Entre los autores que se han enfocado a investigaciones sísmicas aplicando conocimientos de geomorfología, están los siguientes.

Sawyer *et. al.* (2007), realizaron un trabajo sobre geomorfología sísmica, litología, y evolución del Pleistoceno tardío en la región turbidítica de Mars-Ursa, en el área del Cañón del Misisipi, al norte del Golfo de México. Su estudio es sobre la sedimentación, erosión y depositación ocurrida en la profundidad del río Misisipi, para lo cual tomaron en cuenta la topografía como factor importante en la evolución y formación de los estratos, en especial de la unidad azul.

Zeng (2007), su investigación es sobre la imagen sísmica para una geomorfología mas allá del lecho marino: potencialidades y desafíos. En el cual indica que un estudio exitoso de geomorfología sísmica depende no solo del conocimiento de los principios geomorfológicos y de la geología local, sino que también de la calidad de imágenes sísmicas. Un entendimiento completo de cómo las ondas sísmicas responden a la geomorfología de secuencias deposicionales y facies es esencial para el desarrollo de estrategias y selección de herramientas para la interpretación de datos sísmicos.

Posamentier (2005), destaca la sísmica en 3D como una herramienta esencial para la interpretación de la subsuperficie estratigráfica y sistemas deposicionales. También resalta que la estratigrafía sísmica en unión con la geomorfología sísmica son datos importantes para la perforación petrolera, ya que permite a los intérpretes visualizar detalles de los sistemas deposicionales complejos, los cuales pueden ser incorporados en la planeación de perforación petrolera para la exploración tan bien como el desarrollo lo necesite y mejorar el manejo de riesgo significativamente.

Khaled Fouad, L. *et. al.* (2004), su artículo es un análisis genético de la facies, usando la geomorfología sísmica y cualidades sísmicas en la plataforma continental al este de México. Los resultados del método que emplearon son usados para definir sistemas de depósito, erosión, paleo topografía y una estimación litológica inferida. Con sus resultados dieron una aproximación de la génesis usando registros, núcleos y geomorfología sísmica para iluminar la distribución espacial de la facies en un área seleccionada y vista de manera tridimensional al sureste de la cuenca de Tuxpan.

Carter C. David (2003), la investigación que realizó es sobre la geomorfología sísmica: depositación y funcionamiento de las incursiones en el depósito fluvial, en el campo Widuri, en el mar de Java. Donde menciona que la geomorfología sísmica tridimensional, es un indicador de la arquitectura del depósito interno y externo. Lo que permite un mejor entendimiento de los procesos de depósito además de una predicción del flujo durante la producción de hidrocarbano.

Riesgo Ambiental

Para ésta investigación no se hizo un análisis de riesgo ambiental, por no ser parte del objetivo; sin embargo se mencionan ejemplos aislados en cada una de las regiones estudiadas en los que sería de interés hacer un estudio profundo, tomando en cuenta que el plan de estudios de la maestría hace mención del riesgo geológico y que para ésta investigación se tomará de manera muy superficial dentro del rubro de la Geomorfología.

Respecto a la Geomorfología aplicada al Riesgo Ambiental, ésta ha incursionado por medio de la “Geomorfología aplicada”, la cual estudia las complejas interrelaciones entre el relieve y el medio ambiente, para conservar y proteger los recursos naturales, pero además identifica los probables problemas que pudieran ser un riesgo para la sociedad.

Coates, en Machín (2004), acuña el término de Geomorfología Ambiental en 1972, y ya en los años 90, investigadores europeos como Panizza y Fabbri, la utilizaron con éxito para las Evaluaciones de Impacto Ambiental, adaptándola a los requerimientos de este instrumento de la Gestión Ambiental y conceptualizándola como una disciplina con un importante papel en el desarrollo de procesos que se verifican sobre la superficie terrestre

El riesgo ambiental es acentuado por un estudio insuficiente del relieve, así como la aplicación incompleta de los conocimientos científicos en función de la protección y el manejo sostenible de los recursos, lo que desencadena una aceleración o aparición de procesos exógenos de negativas consecuencias para el medio ambiente, que incluso han llegado a liberar grandes desastres, con riesgos para la vida de la población y notables pérdidas económicas, (Díaz, *et. al.* 2001).

El impacto ambiental y las pérdidas económicas ocasionadas por procesos geomorfológicos ya sean exógenos o endógenos han sido de los casos que más se han tenido que resolver. Por otra parte los estudios de geomorfología con enfoque ambiental son apoyados en la geología en cuestiones litológicas y estructurales, compartiendo conocimientos con el área de *riesgos geológicos*, donde utilizan conocimientos de los procesos de la naturaleza para la prevención de incidentes, además de compartir conceptos tales como: peligro, riesgo, amenaza, vulnerabilidad, entre otros.

I.3.3- Desarrollo general de los Sistemas de Información Geográfica

Los mapas a lo largo de la historia han ido evolucionando hasta llegar a su acepción más moderna que son la Cartografía Digital y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los mapas siempre contienen información geográfica, que se refiere a elementos

ubicados sobre la superficie terrestre, por su posición exacta o por referencias, puede ser espacial y descriptiva. La información espacial representa la posición y dimensiones del objeto en la superficie terrestre, también conocida como componente gráfico o cartográfico. La información descriptiva se refiere a los atributos que caracterizan a dicho elemento espacial, también pueden llamarse datos alfanuméricos.

Un Sistema de Información Geográfica es un conjunto de elementos interdependientes que contribuyen a obtener y gestionar información geográfica; éstos elementos combinados, están clasificados en factores humanos e institucionales, tecnológicos a un nivel físico (hardware) y a un nivel lógico (software), datos geoespaciales y descriptivos, además de los métodos de análisis de la información geográfica, (Fig. I.3.1.), (Totolhua, 2007).



Fig. I.3.1. Representación general de elementos que constituyen un SIG “Sistemas de Información Geográfica” (Geoinfo, 2011).

Los SIGs constituyen una forma más avanzada de la cartografía, como concepto de SIG no existe una definición exacta, no obstante la gran mayoría de los expertos en la materia lo ven como un sistema computacional diseñado para la captura, manipulación, análisis, modelado y visualización de datos georreferenciados para la ayuda en la toma de decisiones y solución de complejos problemas del manejo y planeamiento de los territorios (López, 2008).

- Un SIG es el manejo de datos para describir nuestro mundo en dos formas:
 - Datos de Localización – ¿Dónde está?

- Datos de Atributos – ¿Qué es?
- Un programa de SIG es un lazo de unión entre capas de información de localización y atributos.
 - Mediante esta unión es posible hacer preguntas sobre nuestro mundo.

Los roles de las personas relacionadas en un SIG varían de acuerdo a su nivel de participación (Zeiler, 1999, en Totolhua, 2007).

- * Usuario de mapa es el consumidor final de los mapas, es quien consulta los mapas generales o de uso específico.
- * Constructor de mapas crea estos, desde distintas fuentes y agrega datos para realizar un mapa personalizado.
- * Publicador de mapas es quien está dedicado a la publicación de mapas con alta calidad cartográfica.
- * El analista de datos geo espaciales resuelve problemas geográficos, por ejemplo en la búsqueda de rutas de evacuación en presencia de determinado fenómeno.
- * El creador de datos geo espaciales ingresa datos geográficos al SIG con distintas técnicas de edición, conversión y acceso de datos.

Conclusiones del capítulo I

La presente investigación es un modelo análogo que parte de la Geomorfología de tres regiones con diferente grado de detalle, en los (SIG's). Esto será de utilidad en trabajos de “geomorfología sísmica” para la localización y exploración petrolera. Cualquier investigación en la actualidad debe contar con la parte administrativa, para ello el siguiente capítulo es referente a la Administración de la Investigación y Metodologías empleadas, el “workflow”, que permite una visión general del desglose paso a paso que se llevó a cabo en la realización de éste estudio.

CAPÍTULO II. ETAPA DE ADMINISTRACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN (WORKFLOW)

II.1.- ETAPA DE ADMINISTRACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La forma de llevar a cabo coordinadamente la organización de un proyecto de investigación, es parte esencial para el término del mismo ya que permite disponer las actividades tanto en duración y el coste requerido en materiales necesarios, personal involucrado, trámites burocráticos, así como la planeación en las salidas de reconocimiento en campo, para que de esta manera se obtenga la calidad y el objetivo esperado.

Por otra parte, se incluyó este capítulo de carácter administrativo debido a que la maestría se compone de la parte geocientífica y administrativa, *Geociencias y Administración de Recursos Naturales*, de esta manera se emplean los conocimientos adquiridos para organizar, administrar un proyecto de investigación.

De acuerdo a Rodríguez (2004), se puede definir a la Administración como el proceso de organizar, planear, dirigir y controlar; actividades y recursos con el fin de lograr un objetivo. Además, la administración de un proyecto cualesquiera es la forma de planear, organizar, dirigir y controlar una serie de actividades realizadas por un grupo de personas que tienen un objetivo específico; el cual puede ser (crear, diseñar, elaborar, mejorar, analizar, etc.) un problema o cosa.

Los proyectos, ya sea en investigación o de cualquier otro rubro, tienen un ciclo de vida que implican un crecimiento gradual, conforme se establecen las necesidades y se desarrollan las características del trabajo, se desarrolla una completa implantación a medida que evoluciona el cometido y se van concluyendo las fases requeridas, hasta que el proyecto llega a su final. La administración de proyectos enseña que para alcanzar el objetivo deseado se debe seguir un proceso específico, no existe ninguna excepción a esta regla. El proceso se conoce como ciclo de vida, éste ciclo es invariable, aunque por

diferentes razones pueden brincar algunas etapas por creerlas no importantes y hacer modificaciones al ciclo de vida de acuerdo al tipo y tamaño de lo requerido, o por falta de conocimiento del ciclo de vida.

Ahora bien, para conseguir el objetivo deseado en cualquier proyecto de investigación es necesario trabajar por pasos, es decir a través de un sistema, que es un conjunto de cosas, objetos, conceptos y elementos conectados unos con otros que interactúan para lograr un objetivo en común. Según Rodríguez (2004), los elementos de un sistema son aquellas unidades que lo componen y si alguna de ellas faltara simplemente no existiría el sistema. Por tanto también se dice que un sistema es un agregado de entidades que están formadas por elementos.

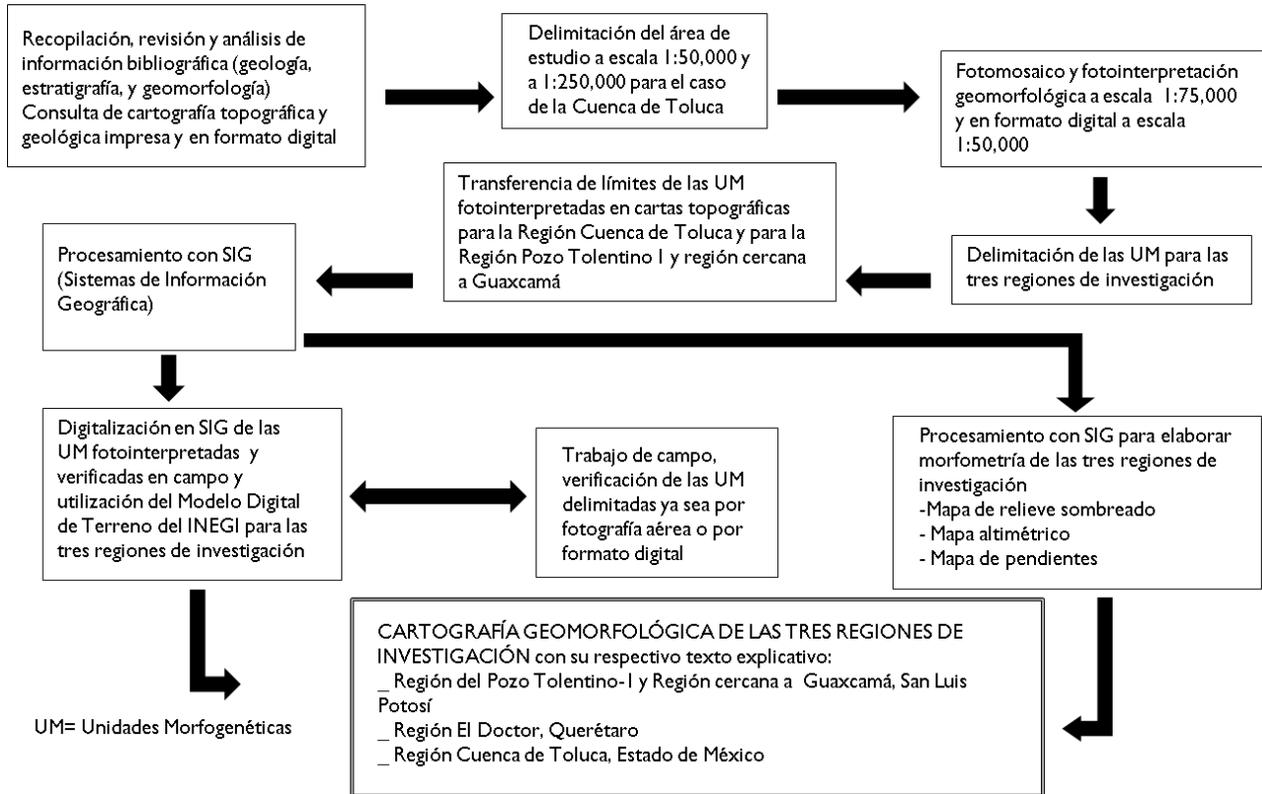
A continuación se muestran dos etapas representadas en cuadros metodológicos, y en un diagrama de Gantt, el cual es una herramienta que permite modelar la planificación de las tareas necesarias “hitos”, de manera temporal. Las dos etapas tuvieron su propia metodología creada y configurada, de acuerdo a las necesidades requeridas para éste proyecto de investigación, y se ejecutaron de manera simultánea tomando en cuenta la metodología de la escuela rusa y europea para trabajos de carácter geomorfológico. En el capítulo III, se aborda de manera amplia el proceso de ambas etapas y la metodología creada y empleada para lograr este trabajo de investigación.

Etapa I: Metodología creada para la elaboración de la carta geomorfológica de las tres regiones de investigación, cuyo proceso de manera general se hizo en nueve pasos con sus respectivas actividades.

Etapa II: Metodología creada para la obtención de geoformas, a través de cubos con información sísmica, realizada en cinco pasos y de igual manera con sus respectivas actividades.

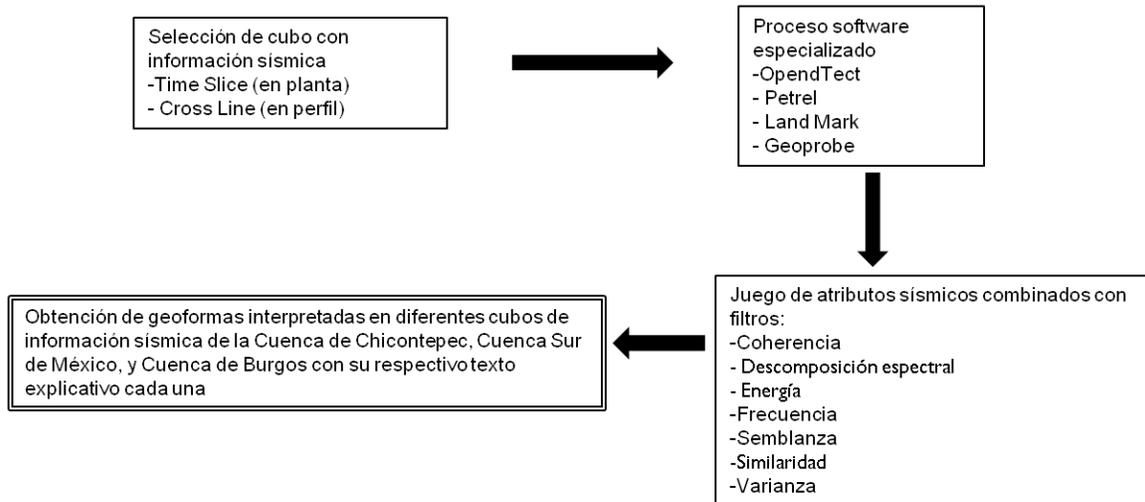
ETAPA I

METODOLOGÍA CREADA PARA LA ELABORACIÓN DE LA CARTA GEOMORFOLÓGICA DE LAS TRES REGIONES DE INVESTIGACIÓN

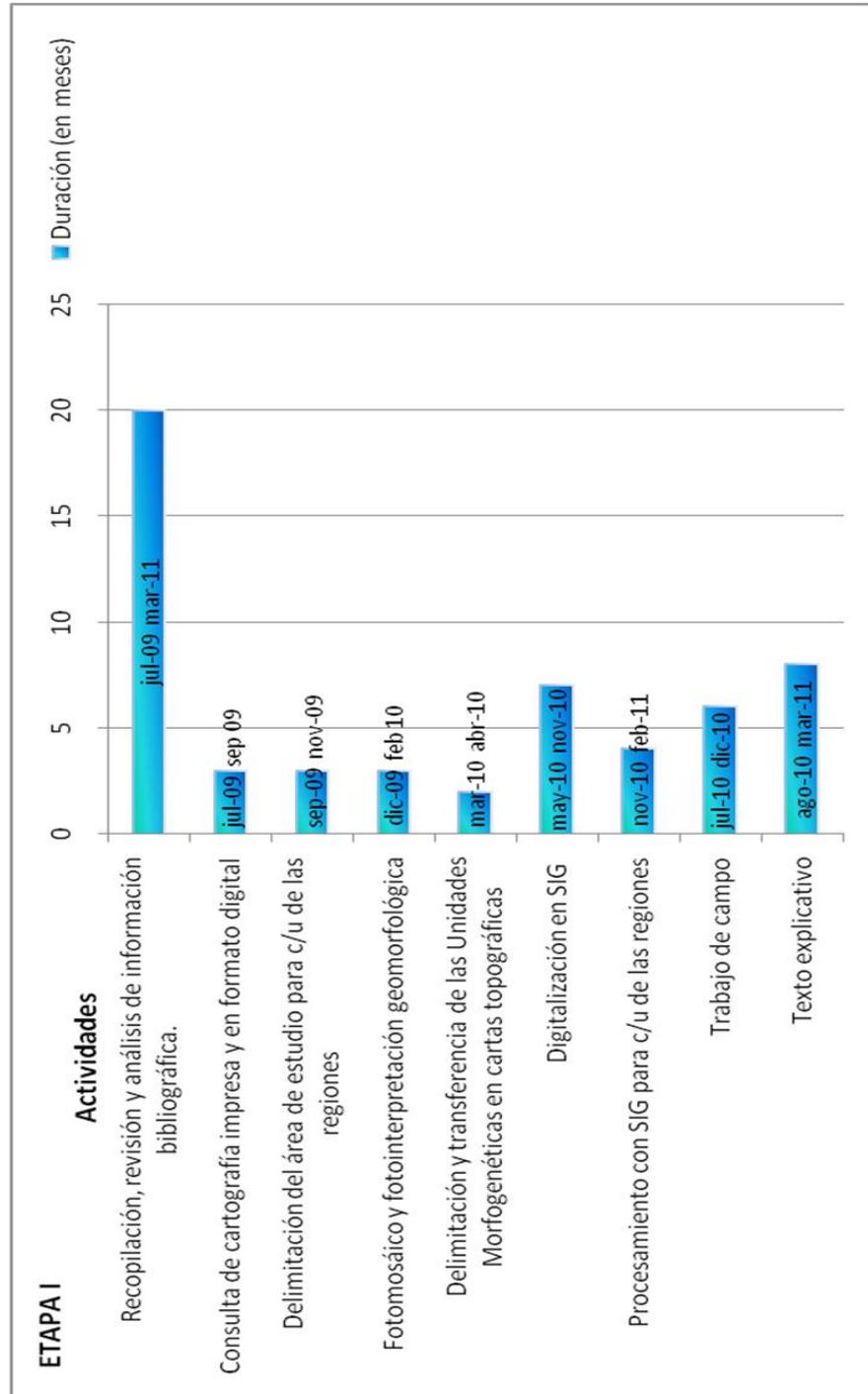


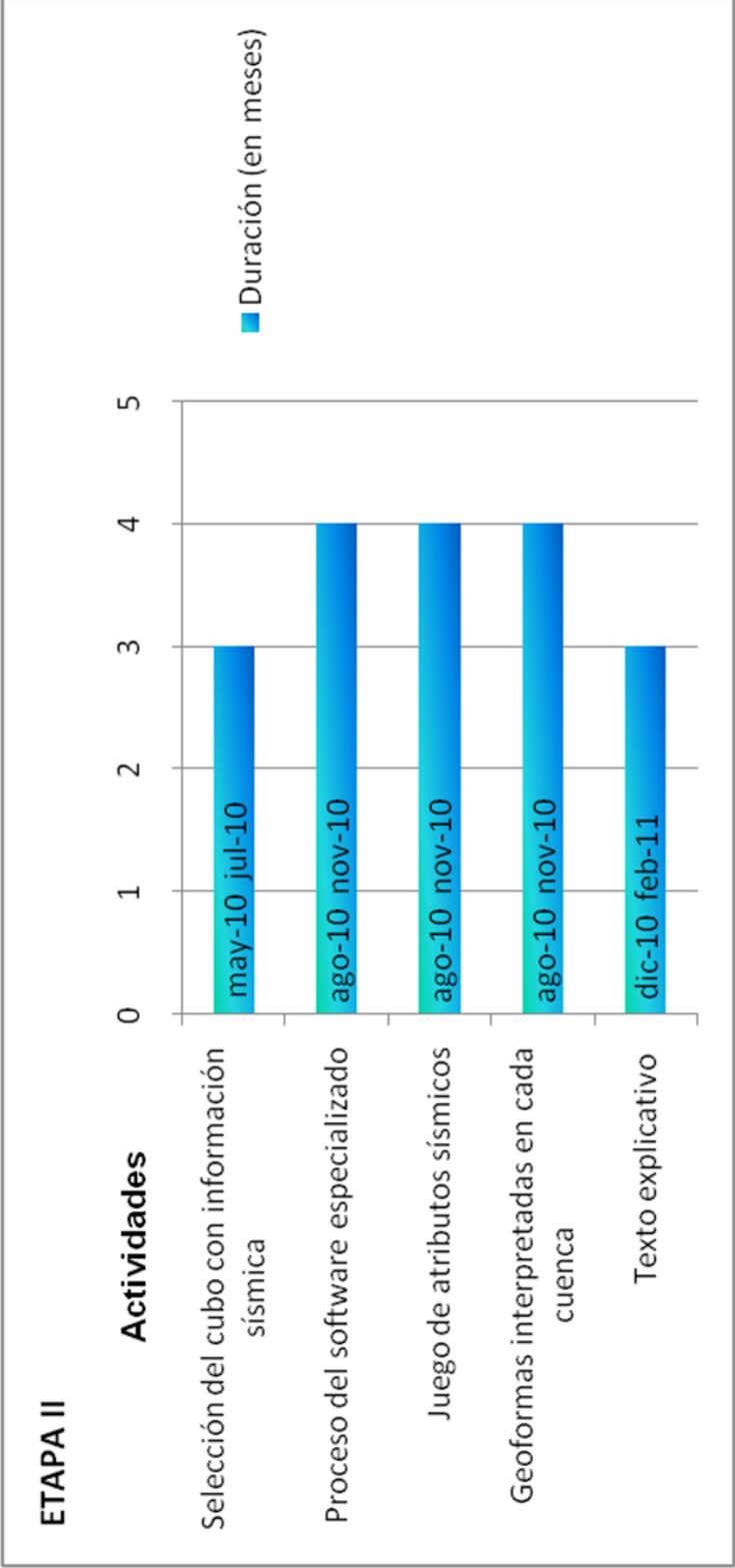
ETAPA II

METODOLOGÍA CREADA PARA LA OBTENCIÓN DE GEOFORMAS, A TRAVÉS DE CUBOS CON INFORMACIÓN SÍSMICA



Las siguientes gráficas muestran las dos etapas arriba mencionadas dentro de la temporalidad.





Conclusiones del capítulo II

La administración es una parte muy importante en la realización de un proyecto de investigación, la organización fue de manera metódica, y se hizo en dos etapas trabajando de manera simultánea, a partir de dos metodologías creadas. Sin embargo como en todo proyecto amplio de investigación, hubo ajustes y desajustes con el tiempo y con los pasos a seguir propuestos en el Workflow inicial, no obstante se logró cumplir con el objetivo del trabajo de investigación. En el capítulo III, se describen las metodologías empleada para las dos etapas, la elaboración de la cartografía geomorfológica y la interpretación de geoformas en información sísmica.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍAS EMPLEADAS

III.1.- METODOLOGÍAS EMPLEADAS EN GEOMORFOLOGÍA

La metodología empleada para la Geomorfología de las tres áreas de estudio fue de Guerasimov, (1986), y de Verstappen, (1991), en donde se tomó en cuenta la morfoestructura y morfoescultura propuesta por el primer autor y el mapeo geomorfológico analítico propuesto por el segundo. Esto fue principalmente para dos áreas: Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, y Región Cuenca de Toluca. En ésta última se obtuvo una mayor delimitación en las unidades geomorfológicas, un mucho mayor detalle en la fotointerpretación, independientemente que es la región más extensa de las otras dos, además es importante mencionar que el producto final de esta región fue una carta a escala 1:100,000 pero para fines de representación se muestra a menor escala debido a su gran amplitud. Por último, la Región de la Formación El Doctor, fue de las tres áreas la de menor detalle en la interpretación, debido a que no se hizo el proceso de fotointerpretación y se delimitaron las geoformas directamente sobre la base vectorial en formato digital, lo que da una delimitación más burda, no obstante también se le aplicó hasta donde fue posible las metodologías antes mencionadas.

En la primer metodología se partió del análisis geomorfológico de acuerdo a Guerasimov (*op. cit.*) en Hernández, *et. al.* (2005), donde los procesos exógenos son las morfoestructuras modeladas por procesos externos que ocurren en la superficie terrestre, las cuales son consideradas como la expresión de la estructura geológica en el relieve actual.

Según Hernández, *et. al.* (*op.cit.*), (metodología retomada de Guerasimov *op. cit.*), propone tres categorías del relieve de acuerdo a la escala empleada según sea el requerimiento: Geotextura, Morfoestructura, y Morfoescultura. Para éste estudio se utilizaron las dos últimas.

Morfoestructura: Es la expresión regional o local de la estructura geológica en el relieve. Pueden ser positivas y negativas, activas y pasivas, heredadas y no heredadas, lineales e

isométricas, reactivadas, enterradas y exhumadas, entre otras. Aquí se proponen métodos generales para la manifestación en la superficie por procesos exógenos tales como análisis de mapas topográficos, análisis de fotografías aéreas y/o de satélite, análisis de los elementos lineales del relieve y del paisaje, y finalmente métodos morfométricos.

Morfoesculturas: Son las formas de la superficie terrestre modeladas por los procesos exógenos (denudativos, erosivos, gravitacionales, fluviales, lacustres, palustres, marinos abrasivos y acumulativos, eólicos de deflación y acumulativos, glaciares, biogénicas, antrópicas, entre otros.

Uno de los pasos metodológicos más importantes en el campo de la geomorfología es la revelación de las relaciones entre la estructura geológica y el relieve de la superficie terrestre, mediante la interpretación, análisis, clasificación y representación cartográfica de los tipos de unidades morfoestructurales. Para la clasificación de las morfoestructuras, se parte de la teoría del análisis morfoestructural y de su clasificación tipológica (Hernández *et. al.*, 1995), adoptándose para las tres áreas de estudio las categorías morfoestructurales, grado de reelaboración morfoescultural o del modelado exógeno, como reflejo pasivo de la litología; categorías básicas del relieve y de sus pisos altitudinales (montañas, lomeríos, pie de monte y planicies). Estos análisis son verificados en un levantamiento en el terreno, visita a campo, el cual sirve para para dos propósitos; primero, el mapa provisional tiene que ser verificado y, segundo, la información que no fue obtenida mediante las imágenes aeroespaciales tiene que ser incorporada. Así, el mapa provisional y las imágenes deben ser llevados al campo y consultados cuando sea necesario. Al igual que en la interpretación de las imágenes, en el levantamiento de campo se procede de lo general a lo particular donde primero debe obtenerse una visión general, posteriormente se lleva a cabo la observación detallada y el mapeo, además de obtener fotografías tomadas en campo para su representación.

La segunda metodología empleada en este trabajo fue de acuerdo a Verstappen, (1991), en su método de levantamiento geomorfológico analítico propuesto en el ITC (Instituto Internacional para Levantamientos Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra), en

donde el propósito de un levantamiento geomorfológico es proporcionar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos y los fenómenos naturales conexos. La información reunida se presenta en forma de mapa y también puede ser almacenada en un banco de datos, ayudándose en un sistema de información geográfica.

Existen tres clases de levantamientos geomorfológicos que originan a su vez tres clases diferentes de mapas: mapas geomorfológicos analíticos, geomorfológicos sintéticos, y mapas geomorfológicos pragmáticos. Para esta investigación se empleó el mapeo geomorfológico analítico, que es el resultado de profundos estudios geomorfológicos monodisciplinarios y proporcionan información sobre las formas del relieve y sus procesos. El levantamiento analítico proporciona unidades de mapeo e información geomorfológica detallada, aplicada principalmente en la Región Cuenca de Toluca.

De acuerdo con Verstappen (1991), el primer objetivo en el procedimiento de un levantamiento geomorfológico es obtener una visión general de la geomorfología del área de estudio y la relación que guarda con las áreas adyacentes. Para ello se hace una rápida revisión de las imágenes de satélite y/o de fotografías aéreas, por ejemplo, usando un fotomosaico. A la vez se estudia otro tipo de información, como la literatura y los mapas temáticos, principalmente los geológicos y los topográficos a diversas escalas de representación. Posteriormente se delimitan las unidades geomorfológicas de manera provisional en las imágenes de satélite y/o en los mapas temáticos.

El propósito del levantamiento, los tipos de información requerida y su nivel de observación del detalle en las imágenes aeroespaciales, constituyen la base para la selección de la escala del mapeo y el tiempo asignado al levantamiento. La interpretación detallada de las imágenes de satélite y de las fotografías aéreas dará como resultado la delimitación de las unidades geomorfológicas mayores, de su subdivisión en subunidades y del trazado de formas del relieve individuales y sus procesos, usando símbolos lineales, Verstappen (*op. cit.*).

III.1.1.- Actividades realizadas en las tres áreas de estudio para la elaboración de la geomorfología

Revisión bibliográfica

Para la elaboración de la cartografía geomorfológica a escala 1:50,000, se hizo una recopilación, revisión y análisis de la información bibliográfica y cartográfica impresa y en digital, para las tres regiones de investigación y ésta etapa de búsqueda de información estuvo presente a lo largo del estudio, se consultaron diferentes publicaciones tales como: geología, estratigrafía, geomorfología, obtenidas de diferentes fuentes; de igual manera, a lo largo del análisis se consultó el material cartográfico topográfico y el geológico impreso que fue de gran ayuda en todo el proceso de la investigación para las tres regiones, así como en digital, en ambos tipos de información la escala fue 1:50,000 para las tres regiones de estudio. El apoyo de las fotografías aéreas 1:75,000 fueron para la Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, y la Región Cuenca de Toluca.

Delimitación del área de estudio y Fotointerpretación

Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá

Primeramente se hizo una delimitación del área de estudio en la carta topográfica F14A85, Santa Catarina a escala 1:50,000 editada por el INEGI, 2005; para tener conocimiento del número de fotografías aéreas y la escala que se requería para la fotointerpretación, obteniendo un *transecto geográfico de la hoja Santa Catarina en San Luis Potosí*. (Fig. III.1.1.).

El análisis para esta área se realiza con un criterio morfogenético, (Morfoestructura, Morfoescultura y Geomorfología Analítica) de esta manera se llega a una clasificación donde se pone de manifiesto la actividad endógena y exógena que juntas constituyen la dinámica en la formación de la superficie del relieve y que es de gran interés y aplicación en estudios de geomorfología sísmica.

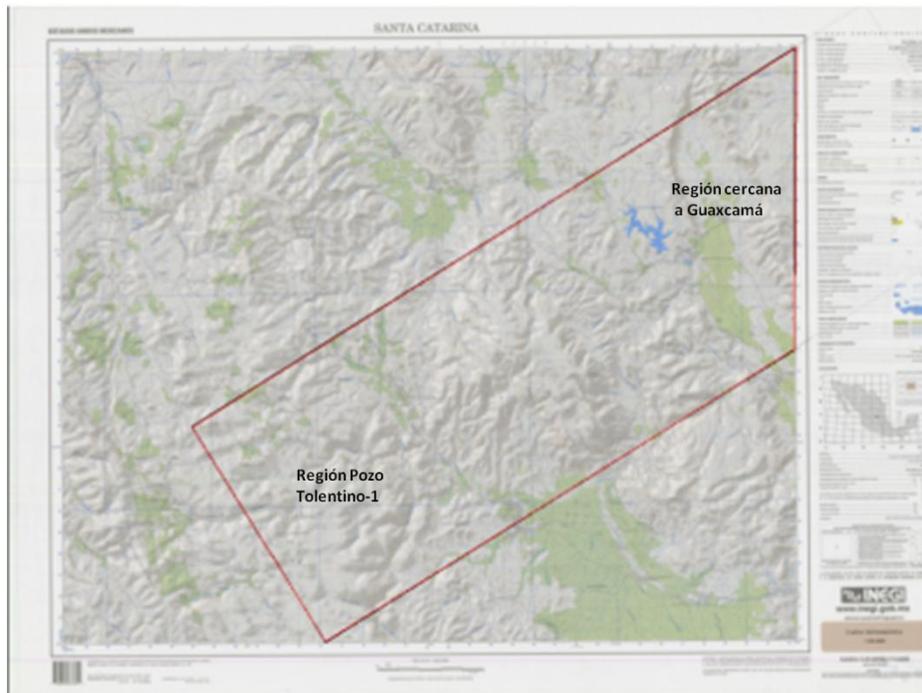


Fig. III.1.1. Límite del área de estudio de la Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí, en la carta topográfica Santa Catarina, San Luis Potosí, a escala 1:50, 000

Posteriormente para la fotointerpretación geomorfológica y la delimitación de las unidades morfológicas en el transecto geográfico de la región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, se emplearon diez fotografías aéreas pancromáticas a escala 1:75,000 del INEGI, con diferentes fechas (1983, 1984 y 1995), ya que no fue posible contar con fotografías recientes y de la misma fecha para toda el área de estudio. Posteriormente se hizo un fotomosaico de las fotografías aéreas para tener una referencia rápida del área a fotointerpretar en gabinete y sobre todo en campo, (Fig. III.1.2.), para lo cual se transfirió el número de línea y número de fotografía en la carta topográfica F14A85, Santa Catarina, del año 2005.

Después de estructurar el fotomosaico se prosiguió con la fotointerpretación geomorfológica de las fotografías aéreas a través de un estereoscopio de espejos (ver Fig. III.1.2.). En el trazado de las unidades morfológicas del relieve, se delimitaron los rasgos lineales que corresponden a los cuatro principales tipos morfogenéticos del relieve (Laderas de montaña, Lomeríos, Piedemontes y Planicies).

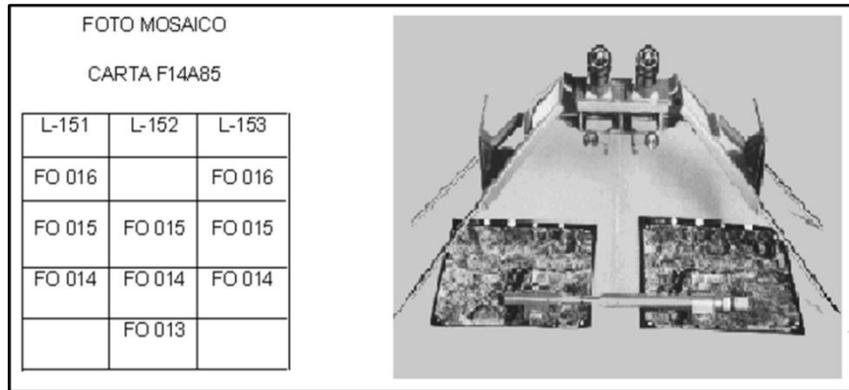


Fig. III.1.2. Foto índice de la Región Pozo Tolentino-1 y de la Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí, y estereoscopio de espejos para la fotointerpretación

El trazado de los cuatro tipos morfogenéticos del relieve fue con base en la clara visualización que presentaba el relieve según las características de las fotografías aéreas tales como: prominencia del relieve en el modelo tridimensional, diferentes tonos de gris, textura, cambio de uso de suelo, y diferencias altitudinales; también estas características permitieron identificar rasgos estructurales, como fallas geológicas, fracturas, y rasgos del relieve (dolinas, cuerpos de agua, y áreas de acumulación como planicies, piedemontes, y cambios de pendiente), ver Fig. III.1.3.

La delimitación pone de manifiesto los elementos geológicos, límites de estructuras por su geología, ambientes dominantes exógenos o endógeno, que fueron plasmadas en el mapa geomorfológico. El detalle obtenido en la fotointerpretación para la Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, fue de término medio en relación con las otras dos regiones estudiadas y la información fotointerpretada, primeramente fue plasmada sobre la carta topográfica 1:50,000 en papel, para posteriormente pasarla a formato digital.

El análisis para esta área se realizó con un criterio morfogenético (Morfoestructura, Morfoescultura y Geomorfología Analítica), de esta manera se llega a una clasificación donde se pone de manifiesto la actividad endógena y exógena que juntas constituyen la dinámica en la formación de la superficie del relieve y que es de gran interés y aplicación en estudios de geomorfología sísmica.



Fig. III.1.3. Fotointerpretación con estereoscopio de espejos y el límite de las unidades morfológicas de la Región Pozo Tolentino-1 y de la Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí

Región de la Formación El Doctor. San Joaquín, Querétaro

La región que comprende la Formación El Doctor se localiza en la hoja San Joaquín F14C58 en el estado de Querétaro, a escala 1:50,000, editada por el INEGI, 2000. El análisis de esta área de igual manera fue con un criterio morfogenético (Morfoestructura, Morfoescultura y Geomorfología Analítica), en donde se logra una interpretación entre la dinámica exógena y endógena, pero a diferencia de las otras dos regiones mencionadas, ésta no se hizo de la manera tradicional, es decir, no se emplearon fotografías aéreas para la delimitación de las geoformas, sino que se hizo a través de una visualización de imágenes digitales tales como MDT (Modelo Digital del Terreno), relieve sombreado, y mapas morfométricos como mapa altimétrico y mapa de pendientes, y por medio de ellos se trazaron los límites entre las unidades morfogenéticas; por lo que el grado de detalle en relación con las demás regiones fue mucho menor.

Región Cuenca de Toluca, Estado de México

La región de la Cuenca de Toluca, se localiza en 8 hojas del estado de México, a escala 1:50,000, editadas por el INEGI (Tabla III.1.1.): Ixtlahuaca de Rayón, Milpa Alta, Nevado de Toluca, San Miguel Zinacantepec, Tenango de Arista, Toluca de Lerdo, Villa de Allende, y Villa del Carbón. El mapa geomorfológico que se elaboró pertenece al tipo

de geomorfología analítica propuesto por Verstappen (1991), el cual da a conocer la distribución espacial morfogenética del relieve de la Cuenca de Toluca, se consideraron fidedignamente los pasos para una buena fotointerpretación, y es la que tiene mayor detalle en relación con las otras dos regiones.

Tabla III.1.1.

Nombre	Clave
Ixtlahuaca de Rayón	E14A27
Milpa Alta	E14A49
Nevado de Toluca	E14A47
San Miguel Zinacantan	E14A37
Tenango de Arista	E14A48
Toluca de Lerdo	E14A38
Villa de Allende	E14A36
Villa del Carbón	E14A28

Antes de la fotointerpretación se hizo un fotomosaico a partir de la selección de las fotografías aéreas del área de estudio a escala 1:75,000 del INEGI, con la finalidad de delimitar la Región de estudio, para ello fue necesaria la carta topográfica de la Ciudad de México a escala 1:250,000, en donde se transfirió el número de línea y número de fotografía, para las 100 fotografías aéreas pancromáticas usadas (Tabla III.1.2). El fotomosaico fue útil para obtener una referencia rápida del área fotointerpretada en cada fotograma tanto en gabinete y sobre todo en campo.

Tabla III.1.2.

Nombre	Tema	Fuente	Año	Escala	Clave
Ciudad de México	Espaciomapa	INEGI	1995	1:250,000	E14-2
Ciudad de México	Topografía	INEGI	1981	1:250,000	E14-2
Ciudad de México	Geología	INEGI	1983	1:250,000	E14-2
Cuencas de México, Toluca y Puebla	Geología	Mooser et al.	1996	1:100,000	-----

Después de estructurar el fotomosaico se prosiguió con la fotointerpretación geomorfológica de las 100 fotografías aéreas (Tabla III.1.3.), a través de un estereoscopio de espejos, y con trazos lineales se delimitaron primeramente las grandes unidades morfogénicas de acuerdo a los cuatro principales tipos morfogénicos del relieve (Laderas de montaña, Lomeríos, Piedemontes y Planicies). También se trazaron las superficies cumbrales que por su gran extensión eran perfectamente visibles en los tres primeros tipos.

Tabla III.1.3

Línea	Fotos	Fecha vuelo
157	7-17	Julio 1993
158	5-17	Febrero 1994
158	1-6	Julio 1993
159	3-17	Febrero 1994
160	2-17	Febrero 1994
160	1	Diciembre 1993
161	1-20	Febrero 1994
162	17-31	Febrero 1995
163	3-5	Abril 1999

El trazado de los cuatro tipos morfogénicos del relieve fue con base en la clara visualización que presentaba el relieve según las características de las fotografías aéreas, tales como prominencia del relieve en el modelo tridimensional, diferentes tonos de gris, textura, cambio de uso de suelo, y diferencias altitudinales. Los cambios de pendiente de acuerdo con su posición topográfica, facilitaron distinguir en la fotointerpretación a los pisos altitudinales en las Laderas de montaña y en los Piedemontes.

Transferir la fotointerpretación a cartas topográficas 1:50,000

Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá

La transferencia de la información fotointerpretada y plasmada en la carta topográfica 1:50,000 del INEGI, fue digitalizada de acuerdo a los límites de las unidades morfoestructurales (Fig. III.1.4). Se utilizó la base vectorial proporcionada por UNIGEO

(Unidad de Informática Geoespacial), proyecto del Instituto de Geografía de la UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México, información obtenida por convenio con el INEGI. Esta base vectorial, fue para tener una base topográfica digital completa de toda el área de estudio en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Se transfirieron todas las unidades morfoestructurales fotointerpretadas a la base digital, ésta etapa fue verificada con salida a campo para conocer el área de estudio y corroborar los límites de algunas unidades morfoestructurales.



Fig. III.1.4. Carta topográfica de la Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí, mostrando las curvas denivel de la base vectorial en formato digital

Región de la Formación El Doctor. San Joaquín, Querétaro

No hubo proceso de fotointerpretación.

Región Cuenca de Toluca, Estado de México

Se transfirieron todas las unidades morfogenéticas (UM), a las ocho cartas topográficas a escala 1:50,000 tomando en cuenta la unión o separación de las curvas de nivel, ésta etapa fue alternada por cuatro salidas a campo en las que además de reconocer el área de estudio se corroboraron los límites de algunas unidades morfogenéticas.

Posteriormente se digitalizó la delimitación definitiva de todas las UM en el Sistema de Información Geográfica, Integrated Land and Water Information System (ILWIS), las cuales fueron anteriormente corregidas en las observaciones obtenidas de campo. El número total de unidades morfogénicas resultantes fue de 1727. Se realizaron cuatro visitas a campo, en las cuales se escogieron áreas específicas donde se tenía duda para la delimitación de las UM, durante el proceso de fotointerpretación. De esta manera se pudieron verificar los límites para apoyar a la cartografía morfogénica de la Cuenca de Toluca

Clasificación detallada de las unidades morfogénicas

La clasificación detallada de las unidades morfogénicas se hizo tomando en cuenta el origen, litología-temporalidad, aquí fueron necesarias las cartas geológicas del INEGI a escala 1:50,000 esto fue para las tres regiones de estudio, se ocupó el mapa geológico de Garza (1978), para la Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, mapas geológicos de Mooser *et. al.* (1996), para la Región Cuenca de Toluca. De estos mapas se empleó su caracterización cronoestratigráfica, en la que se señala también la litología específica. Además se identificaron en los mapas los rasgos del relieve presentados en la fotointerpretación, esta información fue complementada con el trabajo sobre Toluca-Amealco de Sánchez (1984), igualmente para la Región Cuenca de Toluca. Por último para obtener los parámetros de la clase geométrica por unidad morfológica se empleó el SIG.

Se hizo la transferencia de los límites de las unidades morfogénicas trazadas en las fotografías aéreas, sobre las cartas topográficas para el caso de la Región Cuenca de Toluca y la Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, y para la Región El Doctor, los límites se transfirieron directamente en formato digital. Primero se confirmó el “tipo” a través de la altura relativa, dato obtenido de las cartas, para ello la medición fue desde el nivel de base local de la unidad morfogénica hasta su cima por medio de las curvas de nivel. Se obtuvieron por medio del cambio de pendiente y su posición

topográfica, los tres pisos topográficos: superior, medio, e inferior, además se tomaron en cuenta otros aspectos principalmente para la Región Cuenca de Toluca, como forma de la cima para las laderas superiores (superficie cumbral convexa, plana, o cimas cóncavas y agudas), y forma del dorso para todas las laderas (de morfología rectilínea, ligeramente cóncavas y/o onduladas), lo que derivó en una mayor cantidad de unidades morfogenéticas.

-Laderas de montaña se verificó que fueran superiores a los 200 m de altura relativa, y en el caso de los Lomeríos, a cual clase pertenecían (altos medios o bajos).

-Lomeríos que tuvieran menor altura relativa que las Laderas de montaña, para ello se midió desde el nivel de base local de la unidad morfogenética, hasta su cima, y si alcanzaba una altura relativa de 50 m o hasta 100 m, se le consideraba como Lomerío bajo, si sobrepasaban los 100 m y llegaban a medir hasta 150 m, se les nombró lomeríos medios, y las que lograban una altura relativa desde su base a la cima, de 150 m o hasta 200 m, se les denominó lomeríos altos.

- Piedemontes Para delimitarlos y obtener al mismo tiempo el “tipo” se tomaron en cuenta su posición topográfica y la ruptura de pendiente, lo que permitió no solo saber si era o no un piedemonte sino que además permitió distinguir tres pisos: superior medio e inferior, como fue el caso de la Cuenca de Toluca, y para las otras dos regiones únicamente fueron piedemontes.

-Planicies su delimitación se hizo en base a las áreas con pendientes nulas o muy bajas que se encontraron entre o en alguna parte de las Laderas de montaña, Lomeríos, Piedemontes o simplemente áreas aisladas.

Realización en el SIG de la morfometría

La creación de los mapas morfométricos se hizo como apoyo y complemento de los mapas geomorfológicos, para la elaboración de la morfometría en las tres regiones de estudio se empezó por tener primeramente la base vectorial topográfica, donde las curvas de nivel y la hidrología juegan un papel esencial para poder crear los mapas

morfométricos. La base vectorial se obtuvo a partir de la información proporcionada por UNIGEO tanto para la Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, así como para la Región de la Formación El Doctor. Para la Región Cuenca de Toluca se empleó información proporcionada por el Dr. Jorge López Blanco, investigador del Instituto de Geografía de la UNAM. También se contó con las imágenes escaneadas de las Cartas Geológicas de Santa Catarina y San Joaquin del INEGI a escala 1:50,000, en JPG, para tenerlas como guía en la fotointerpretación. En el estudio de la geomorfología, las características cuantitativas del relieve son de gran importancia debido a que contribuyen al análisis del relieve, facilitan la interpretación de los procesos endógenos y exógenos. Se pueden cuantificar los elementos del relieve como son la longitud, superficie, volumen, altura absoluta, altura relativa, pendiente, orientación, densidad, frecuencia y otros elementos numéricos (Lugo, 1989).

Para las tres regiones se elaboraron en el Sistema de Información Geográfica, el Modelo Digital del Terreno (MDT), mapa de relieve sombreado, y los siguientes mapas morfométricos: altimétrico, y mapa de pendientes (Fig. III.1.5.).

- Modelo Digital del Terreno y Mapa de relieve sombreado.- Se tomó en cuenta la delimitación del área para lograr únicamente el MDT del área de estudio en el SIG, para ello se empleó Arc GIS (Arc Map) que es uno de los programas de ESRI, esto fue para la Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá (en el *transecto geográfico de la hoja Santa Catarina en San Luis Potosí*), así como para la Región de la Formación El Doctor. Y para la Región Cuenca de Toluca se utilizó el programa Integrated Land and Water Information System (ILWIS). Se ocupó para las tres regiones la proyección Cónica de Lambert debido a que en ésta proyección se obtuvo la base vectorial y facilitó el manejo de los datos, el datum empleado fue WGS84 y se emplearon unidades lineales en metros. Los MDT son una representación digital de la superficie terrestre, es decir se trata de un conjunto de puntos de los cuales las coordenadas X, Y y Z son registradas en una base de datos (Palacio, 1996 y Weibel *et. al.*, 1991).

Con el MDT de las tres áreas de estudio, se obtuvo el modelo de relieve sombreado, el cual es la diferencia de luminosidad provocada por una luz virtual incidente, procedente

desde una dirección angular acimutal y con un ángulo vertical constante (Robinson *et. al.*, 1995). Para obtenerlo se aplicó un filtro llamado *Shadow* que simula una iluminación con orientación NW y con un ángulo vertical de 45°, logrando una aparente tercera dimensión definida por la distribución de tonos de gris que facilita la percepción visual de las características del terreno (Palacio, 1996).

- Mapa altimétrico.- Simplifica la información presentada en un mapa topográfico y permite la fragmentación visual de manera rápida del relieve. La elaboración de este mapa se hizo por medio del (MDT) aplicando el SIG. Se obtuvieron datos diferentes de rango y clasificación en cada una de las tres regiones, fue con la finalidad de abarcar el valor de las alturas máximas y mínimas y así expresar en forma clara el relieve de la zona estudiada.

- Mapa de pendientes.- Este tipo de mapa consiste en transformar las distancias entre curvas de nivel en valores de pendiente, los rangos establecidos que se representan en el mapa dependen de la escala utilizada, de la equidistancia entre curvas de nivel, de las condiciones fisiográficas y de los objetivos del trabajo, los valores de pendiente representados son promedio para una superficie inclinada proyectada en plano (Lugo, 1989). Para generar el mapa de pendientes del Terreno para las tres regiones se tomó como base el MDT. La estimación de la pendiente en formato de celdas (raster) requiere de conocer la distancia altitudinal entre dos pixeles consecutivos (50 m), esto a partir de aplicar filtros al MDT (DFDX y DFDY). Dado que la distancia entre los centros de las celdas es conocida (el tamaño de la celda), la aplicación de funciones trigonométricas permite conocer la inclinación del terreno (Palacio, 1993). Los intervalos del mapa de pendientes fueron establecidos con el fin de hacer una lectura simple del mapa.



Fig. III.1.5. Realización de la morfometría (mapa de relieve sombreado), a partir de la base vectorial en formato digital, para ser trabajado en SIG (Sistemas de Información Geográfica).

Trabajo de campo

En las visitas a campo que se hicieron a las tres regiones de estudio, se escogieron áreas específicas donde se tenía duda para la delimitación de las unidades morfogenéticas durante el proceso de fotointerpretación. De esta manera se pudieron verificar los límites para apoyar a la cartografía morfogenética de las tres áreas. Por otro lado se obtuvieron algunas fotografías del terreno para ejemplificar e ilustrar el texto en la parte correspondiente a la caracterización de los principales orígenes generales, así como los principales tipos de relieve. Se hicieron las siguientes salidas a campo:

Una visita a campo a la Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá en Santa Catarina, San Luis Potosí. Poniendo especial interés en la zona NE del área de estudio.

Dos visitas a campo a la Región del Área El Doctor, San Joaquín, Querétaro. Se hizo un recorrido general por toda el área de estudio. Cabe mencionar que en esta zona fue muy importante hacer la salida a campo para corroborar lo hecho en gabinete, debido a que no se contó con fotografías aéreas para la interpretación y delimitación exacta de unidades morfogenéticas, sino que se hizo a través de la imagen del relieve sombreado y de las curvas de nivel en formato digital.

Cuatro visitas a campo a la Región Cuenca de Toluca, Estado de México. Por ser un área mucho mayor se hizo un recorrido más amplio tratando de cubrir la mayor parte de la cuenca. Aquí se menciona que el trabajo de campo en la región Cuenca de Toluca, fue hecho en el año 2000, para la investigación de *Cartografía Morfogenética de la Cuenca de Toluca, a escala 1:100,000*, por Díaz (2001).

III.2.- METODOLOGÍA EMPLEADA EN INTERPRETACIÓN DE GEOFORMAS EN INFORMACIÓN SÍSMICA

III.2.1.- Pasos realizados en la interpretación de geoformas en información sísmica

Información sísmica

La información sísmica fue proporcionada por el Instituto Mexicano del Petroleo (IMP), para la Cuenca de Chicontepec, Cuenca Sur de México, y Cuenca de Burgos, de las cuales, por medio de los cubos sísmicos se hicieron varios ensayos jugando con diferentes capas ya sea en planta (Time Slice) o en perfil (Cross Line).

Manejo en el software especializado

Primeramente se seleccionaron los cubos con información sísmica probable a encontrar diferentes geoformas en los programas especializados en sísmica, los cuales presentaron heterogeneidad en la resolución y en general fue similar el manejo de cada uno de ellos. Los software utilizados fueron los siguientes, nombrados del mas sencillo al mas complejo y de menor a mayor resolución:

- OpendTect (sencillo en el manejo y resolución suficiente)
- Petrel
- Land Mark
- Geoprobe (mas complejo en el manejo y de resolución favorable)



Atributos sísmicos combinados con filtros

Una vez que se encontraron los posibles cubos con información sísmica útil a este fin, se procedió a las interpretaciones de la información recreando vistas con los filtros, y de allí se obtuvieron diferentes ejemplos de unidades morfológicas. Primero se checó la información en perfil (Cross Line) y posteriormente en planta (Time Slice), aquí siempre se buscaron morfológicas de canales con forma de meandros, depresiones, deslizamientos, y cordilleras de sedimentos principalmente. Posteriormente se hace un corte en el cubo, ya sea horizontal y/o vertical (Time Slice o Cross Line), y de acuerdo a la altura que se requiera, en la parte superior, media o inferior.

En estas imágenes (Fig. III.2.1.), se ve claramente como es el cruce del “Time Slice con el Cross Line”, y de ésta manera podemos observar que el relieve es visto de dos maneras, en planta y en perfil. Lo que normalmente se interpreta como “geomorfología sísmica” es la caracterización de las formas sepultadas a través de métodos geofísicos que se pueden deducir en planta “Time Slice”.

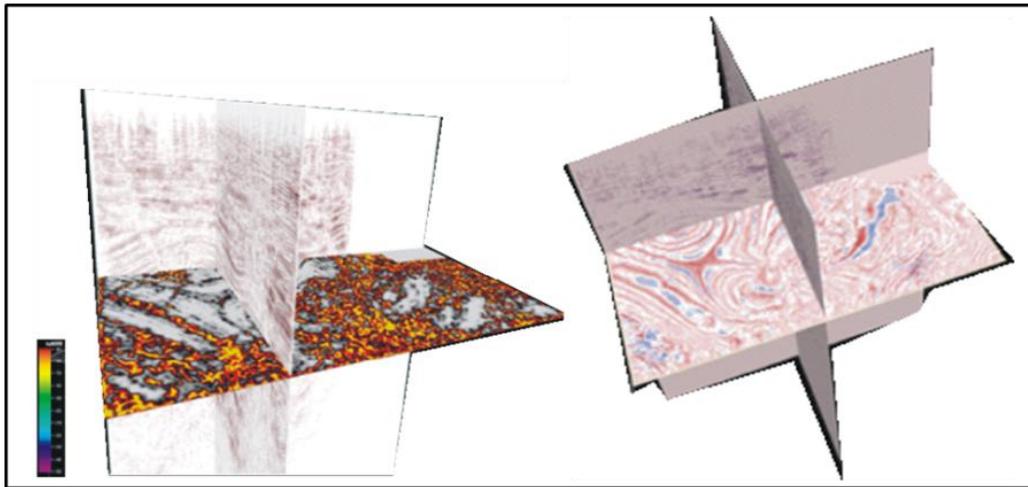


Fig. III.2.1. Imagen de la sísmica perteneciente a la Cuenca del Sur de México, mostrando un Time Slice y un Cross Line.

La información de la imagen que se muestra en la ventana donde está el cubo sísmico, va modificándose de acuerdo a los atributos y filtros sísmicos que se vayan empleando y a la altura del corte vertical y horizontal deseado, de ésta manera obtenemos imágenes de

acuerdo a los intereses esperados, por lo que no necesariamente en todos los casos, se puede inferir de manera casi exacta la morfología expuesta, ya que la combinación de atributos y filtros da una visión diferente resaltando algunas características sí y otras no, y si no hay suficiente conocimiento del área estudiada o de las geoformas puede existir el riesgo de interpretar lo que en realidad no es.

Los atributos sísmicos que permitieron visualizar y que favorecieron al realce de las formas buscadas en todos los software usados fueron los siguientes:

- Coherencia
- Descomposición espectral
- Energía
- Frecuencia
- Similaridad
- Semblanza
- Varianza

Ejemplos de geoformas interpretadas

Las geoformas que se buscaron y que fueron identificadas en los diferentes cubos de información sísmica fueron en orden de importancia canales, meandros, rastros de ríos, ojos de buey, depresiones y deslizamientos, cordilleras de sedimentos y planicies, (Fig. III.2.2.).

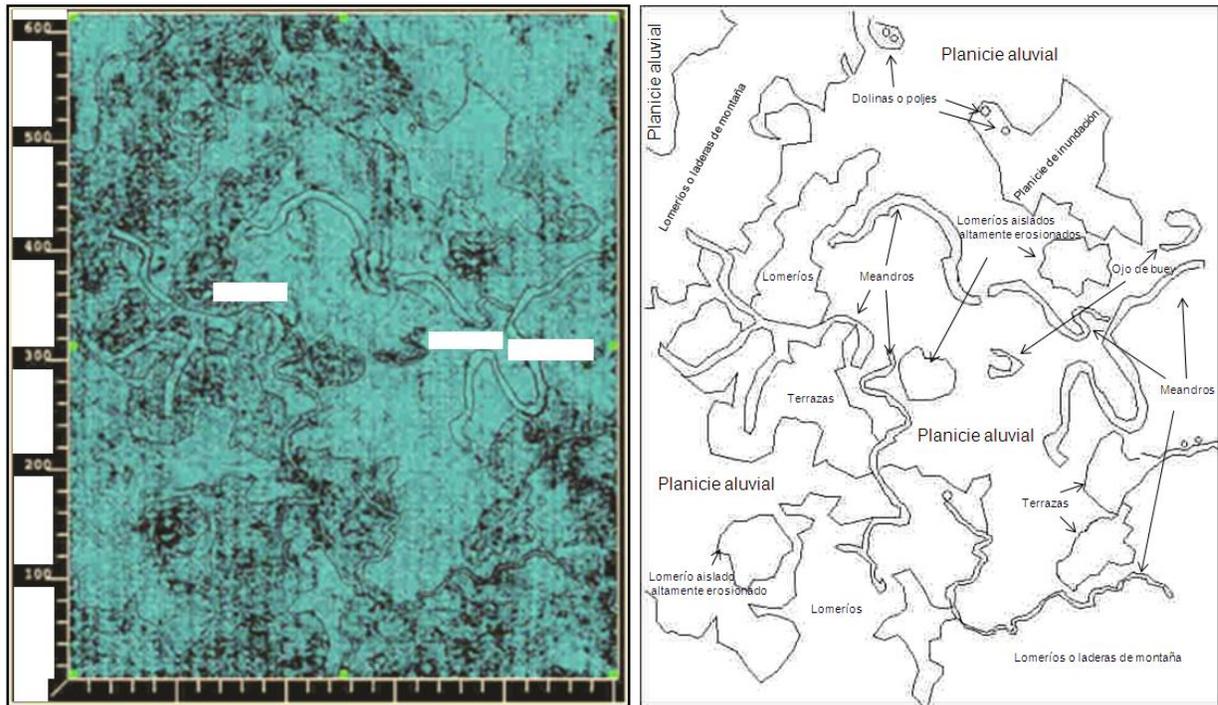


Fig. III.2.2. Muestra de la sísmica perteneciente a la Cuenca de Burgos, exponiendo las geoformas encontradas a través de los software Landmark y Geoprobe

Conclusiones del capítulo III

Éste capítulo expone la metodología de Guerasimov (1986), y de Verstappen (1991), empleadas para la geomorfología de las tres regiones, y la interpretación de geoformas en información sísmica. La morfometría se hizo en SIG a partir de la base vectorial topográfica. Toda la información fue corroborada en campo.

La interpretación de geoformas en la “información sísmica” fue hecha a partir de diversas pruebas en planta (Time Slice) y/o en perfil (Cross Line), en software especializados, donde la combinación de atributos y filtros sísmicos modificaron el contenido de la imagen seleccionada, Se puso especial atención en localizar canales, meandros, rastros de ríos, ojos de buey, depresiones, cordilleras de sedimentos y planicies principalmente.

En el siguiente capítulo, se desarrollará la geomorfología hecha para las tres regiones.

CAPÍTULO IV. GEOMORFOLOGÍA

IV.1 GEOMORFOLOGÍA

Este capítulo empieza describiendo las generalidades fisiográficas en donde también se comenta el por qué la elección de ese lugar y se hace un bosquejo de la geología del lugar, para pasar posteriormente a la geomorfología de cada una de las tres regiones de estudio, así como la clasificación de las geoformas obtenidas. Las tres regiones de investigación fueron escogidas por su heterogeneidad en la geología, lo que permite ampliar la visión en el conocimiento de la geometría de las geoformas del relieve y su relación con la “geomorfología sísmica”.

El estudio de la geomorfología se hizo en base a la metodología mencionada en el capítulo anterior para los tres tipos de relieve. En este apartado inicialmente veremos la morfometría para cada una de las áreas de investigación, recordando que la morfometría es muy importante porque es lo que primeramente nos habla de manera general cómo esta estructurado el relieve, como se conjugan diferentes elementos, litología, temporalidad, dinámica por procesos exógenos o endógenos en el tiempo y en el espacio. La morfometría permite una primera regionalización de las geoformas ayudando a tener el inicio para la delimitación a detalle y por último se mostrará el mapa geomorfológico con su respectivo análisis.

IV.1.1.- Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí

Generalidades fisiográficas

Ésta región fue seleccionada por la similitud de la geología del lugar con áreas de interés petrolero como es el campo de Cantarell. Las rocas calizas que se localizan al NE del lugar de investigación, por ser evaporitas tienen un comportamiento parecido al de la sal que se encuentra en la Cuenca del Golfo de México. Esto hace interesante la morfología de la zona de estudio, la cual pertenece a la Sub provincia Sierras y Llanuras

Occidentales y a la Sub provincia Carso Huasteco y éstas a su vez a la Provincia de la Sierra Madre Oriental (SMO). Se ubica al noreste de la capital de San Luis Potosí, entre las coordenadas geográficas 22° 15' N, 22° 00' S, y 100° 20' E, 100° 37' W (Fig.IV.1.1).

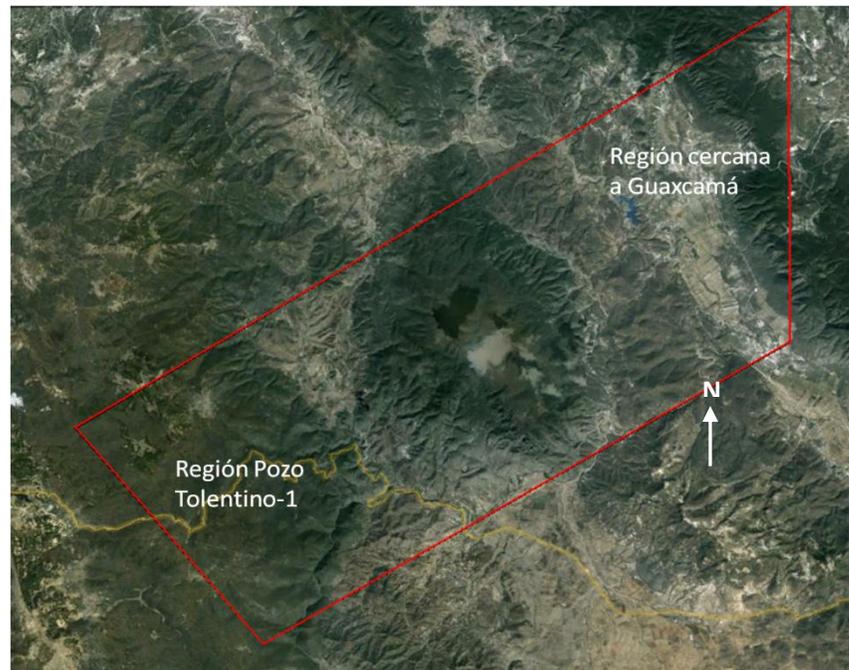


Fig. IV.1.1. Localización geográfica del relieve en la Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí. Esc 1:25.4 km, (Google Earth, 2010)

Climas.- Pertenecen al grupo de los climas secos, y su característica principal es que la evaporación excede a la precipitación, pero son los más húmedos de los secos y están considerados como de transición entre los secos y los sub húmedos, tanto del grupo de climas cálidos como del grupo de los templados. Se producen del centro del estado hacia el sur, sursureste, suroeste, y oeste, primordialmente; de acuerdo con su temperatura y el régimen de lluvias se presentan en territorio potosino: semi seco templado con lluvias en verano, semi seco semi cálido con lluvias en verano, semi seco templado con lluvias escasas todo el año y semi seco cálido con lluvias en verano. Estos climas tienen la característica que la evaporación excede a la precipitación. La aridez depende principalmente de la escasa precipitación y de la temperatura, pero también de la poca persistencia de la lluvia y lo torrencial de la misma, de la naturaleza del suelo y de la cubierta vegetal. (INEGI, 2008). La temperatura media anual del municipio Santa Catarina

es de 20 a 24 °C, y hacia el norte en el Municipio de San Nicolas Tolentino es de 18.8 C°, sin embargo la oscilación es muy extremosa.

Geología

Esta zona se encuentra dentro de la Plataforma Valles San Luis Potosí, del Mesozóico, Cretácico Medio (Fig. IV.1.2), el basamento está formado por material ígneo y metamórfico, representado por tres tipos principales de litología, gneises (Fries y Rincón, en Ortega, 1978), esquistos (Mugica, 1976) e intrusivos graníticos (Jacobo, 1986).

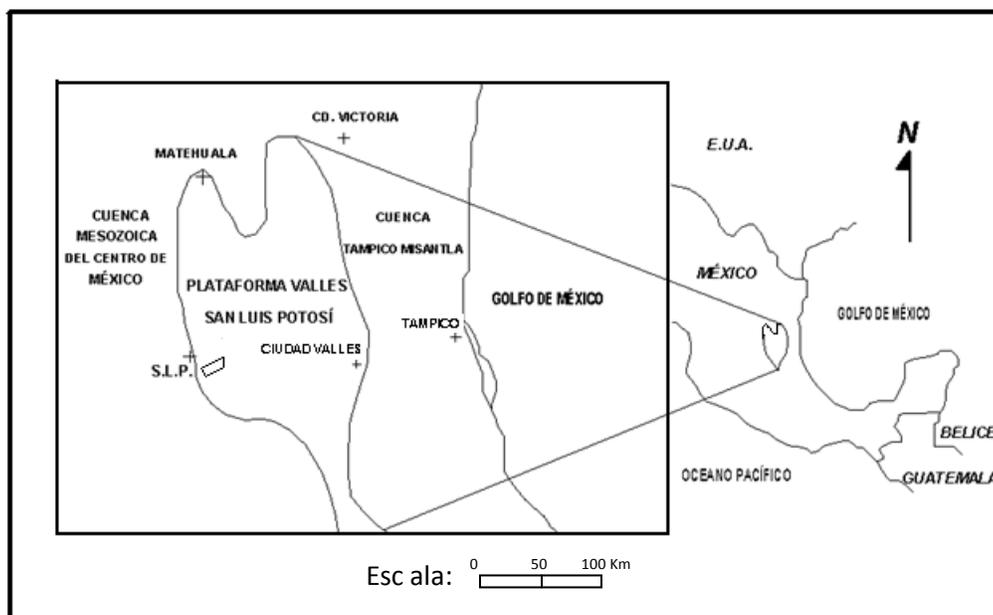


Fig. IV.1.2. Esquema modificado de la Zona de estudio de Villaseñor (1999), Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá dentro de la Plataforma Valles San Luis Potosí

En el subsuelo de la Plataforma Valles San Luis Potosí y aflorando en algunas localidades, se encuentra también una potente secuencia de sedimentos paleozoicos. Estos sedimentos son predominantemente marinos y sobrepasan los 1,500 m de espesor (Hernández, *et. al*; 1990). La sedimentación que ocurrió durante el Triásico Tardío es de origen continental (Formación Huizachal). El Jurásico Inferior está representado en la porción centro y sur de la Plataforma Valles San Luis Potosí por sedimentos de origen

marino continental (Formación Rosario), cambiando lateralmente hacia el E-SE de la plataforma Valles San Luis Potosí a depósitos típicamente marinos (Formación Huayacocotla, Rueda, *et. al*, 1982). El Jurásico Medio está representado también por una sedimentación predominantemente continental. Durante esta época tiene inicio la sedimentación marina (formaciones Tepexic y Mina Viejas) dentro de la plataforma. Para el Jurásico Superior la sedimentación en la Plataforma Valles San Luis Potosí fue predominantemente marina (Cantú, 1971). Villaseñor (1999), realizó investigaciones en los pozos Tolentino-1 y Guaxcamá, él menciona que ninguno de los dos pozos mencionados penetraron el basamento de la Plataforma Valles San Luis Potosí, y en superficie tampoco se tienen afloramientos del mismo, por lo que se considera que los sedimentos sobre los cuales descansan las evaporitas de la Formación Guaxcamá son la arenisca Alamitos de edad Berriasiano, (Celestino 1982, en Villaseñor 1999).

Por otra parte, Villaseñor (*op. cit.*), menciona una estructura importante en ésta área que es el anticlinal Trejo, la cual fue desarrollada por la presencia de una rampa generada dentro de la Formación Guaxcamá, ésta ocasiono levantamiento de material evaporítico, dando lugar a dicha estructura. De acuerdo a la interpretación de la sección realizada por él, debajo de este anticlinal se ubica parte de una zona de debilidad de dolomías. Así mismo, hace mención de que ésta estructura en estado deformado, tiene una longitud de 38 km. y en estado restaurado de 75 km. De aquí se obtiene acortamiento del 50%, lo que implica una longitud original de la sección que es dos veces de la sección deformada, e indica que si esto es así, los tres primeros bloques tectónicos, estarían originalmente fuera del borde occidente de la Plataforma Valles San Luis Potosí (Fig.IV.1.3.), indicando entonces que la litología de esos bloques debe estar más bien constituida por sedimentos de cuenca y no por carbonatos de plataforma.

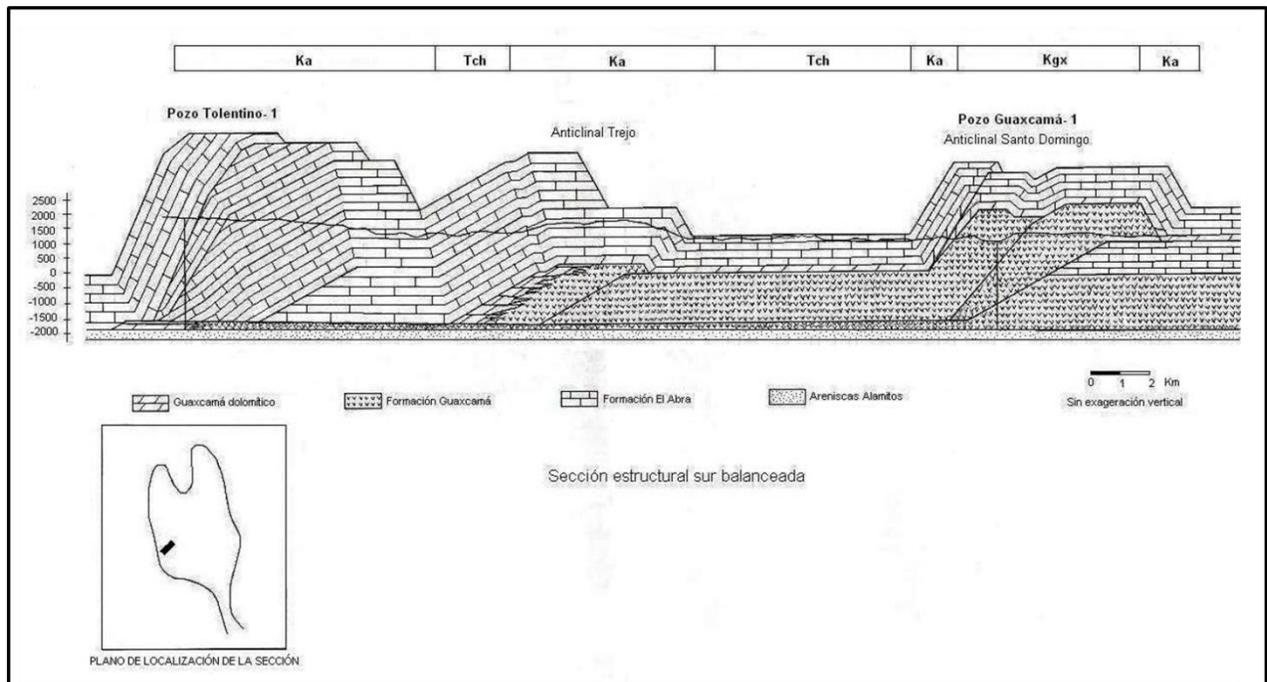


Fig. IV.1.3. Perfil de la sección estructural en estado deformado, de la Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, (Villaseñor, 1999).

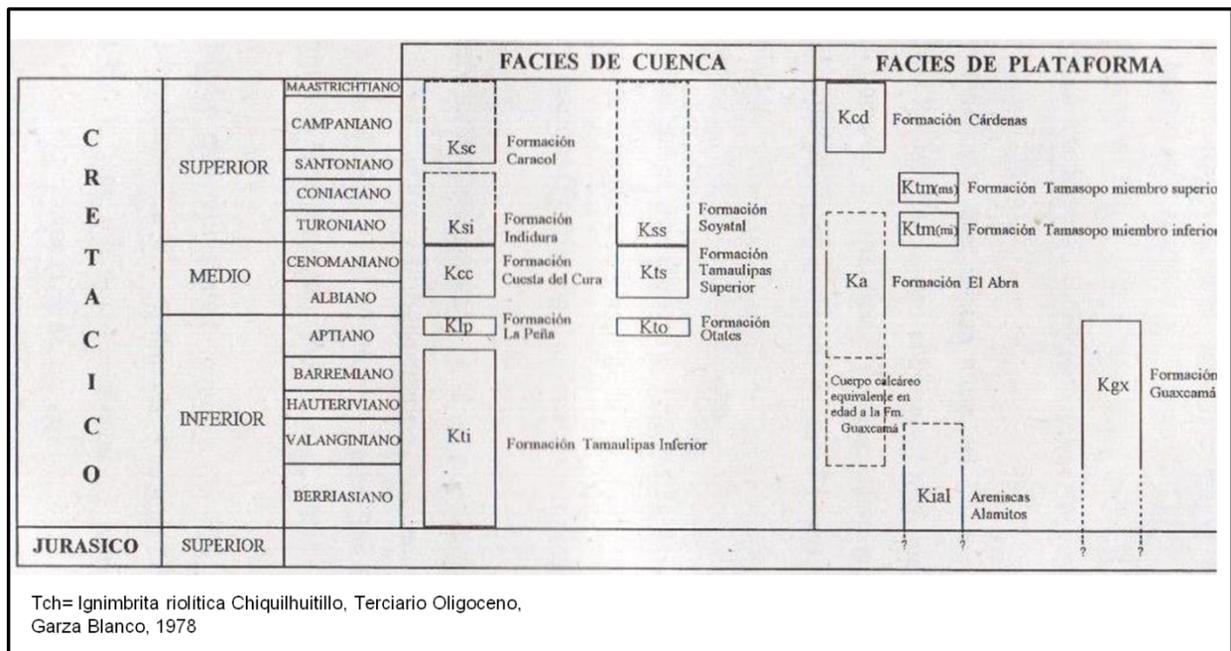


Fig. IV.1.4. Columna estratigráfica, de la Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, (Villaseñor, 1999).

Geomorfología

Morfometría

- Modelo Digital del Terreno y Mapa de relieve sombreado.-

A groso modo el MDT de ésta area nos refleja que se pueden destacar las cuatro formas principales: laderas de montaña se resaltan en la porcion centro hacia el SW de la zona de estudio, lomeríos del NE hacia el centro, piedemontes en las bases de las montañas, y planicies, destacando el área del NE, (Fig. IV.1.5.).

- Mapa altimétrico.-

El MDT fue reclasificado en 10 intervalos altitudinales (en metros sobre el nivel del mar), en donde el intervalo máximo fue de 2,100 a 2,320 m y el mínimo de 1,100 a 1,200 m. Acentuando las alturas máximas en la zona centro y SW, y las alturas mínimas en la zonas planas del NE, del área de investigación (IV.1.6.).

- Mapa de pendientes.-

Se obtuvo el mapa de pendientes con 8 intervalos en grados, donde las áreas con pendientes más abruptas fueron de más de 40° y hasta 82° en la zona centro y SW así como en las laderas del NE y las pendientes menores tienden a ser planas, estas fueron iguales o mayores a 0° y hasta 6°, predominando al NE, (Fig. IV.1.7.).

La valoración de la susceptibilidad a los movimientos en masa y el reconocimiento de las zonas potencialmente inestables se basa en la información obtenida a partir del análisis de la pendiente, la litología y los posibles antecedentes litológicos. Éste mapa de pendientes está intimamente ligado al altimétrico, pues vemos que las alturas máximas coinciden con las máximas pendientes, al igual que las bajas alturas con las mínimas pendientes. Esto permite ver zonas propensas a riesgos por factores diversos, ya sea con zonas erosionadas y que éstas a su vez pueden provocar en ciertas épocas del año derrumbes perjudicando por ejemplo las carreteras que se ubican precisamente en zonas de mayor pendiente con mayores alturas.

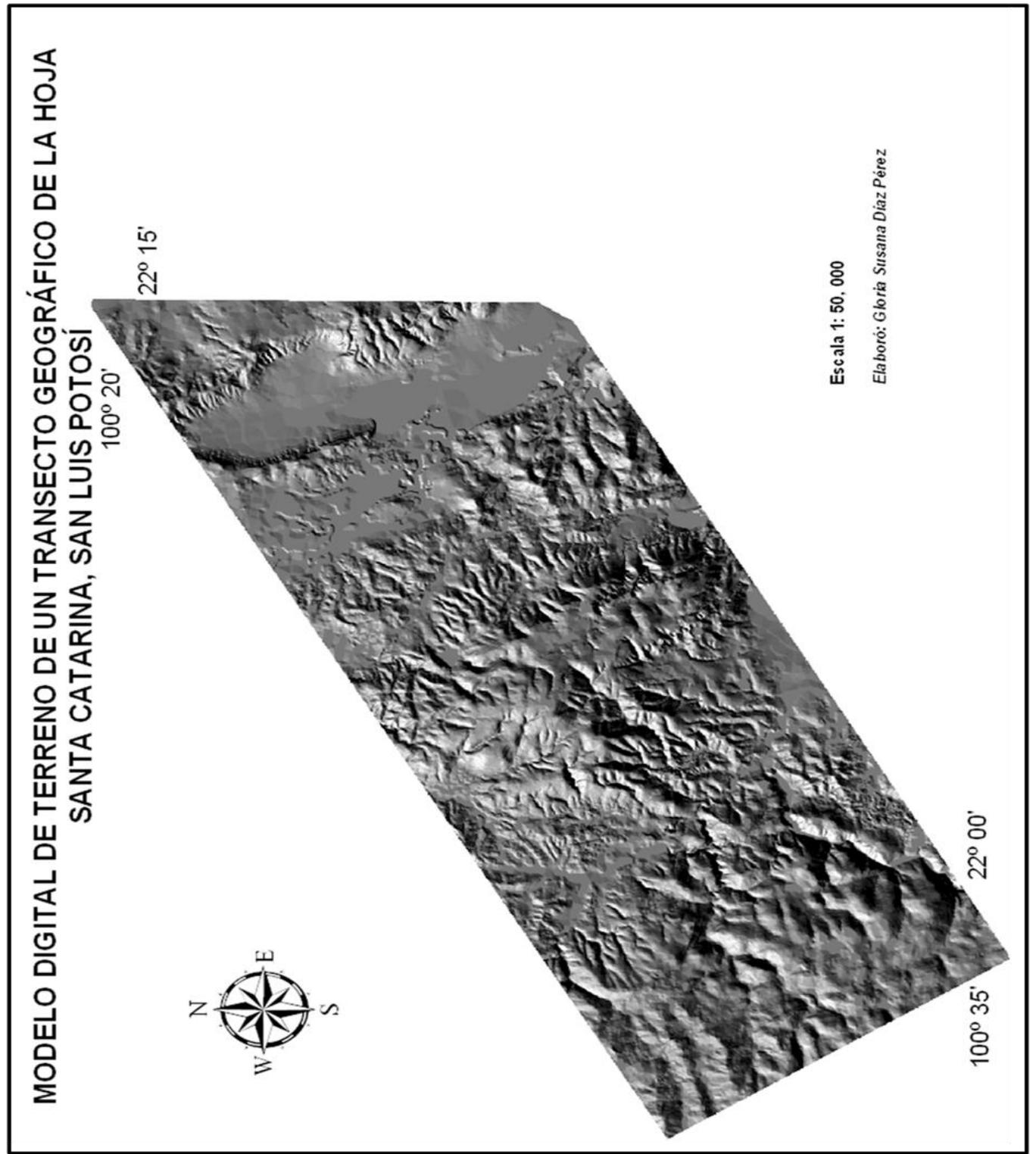


Fig. IV.1.5. Modelo Digital de Terreno en relieve sombreado de la Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, destacando las características del relieve

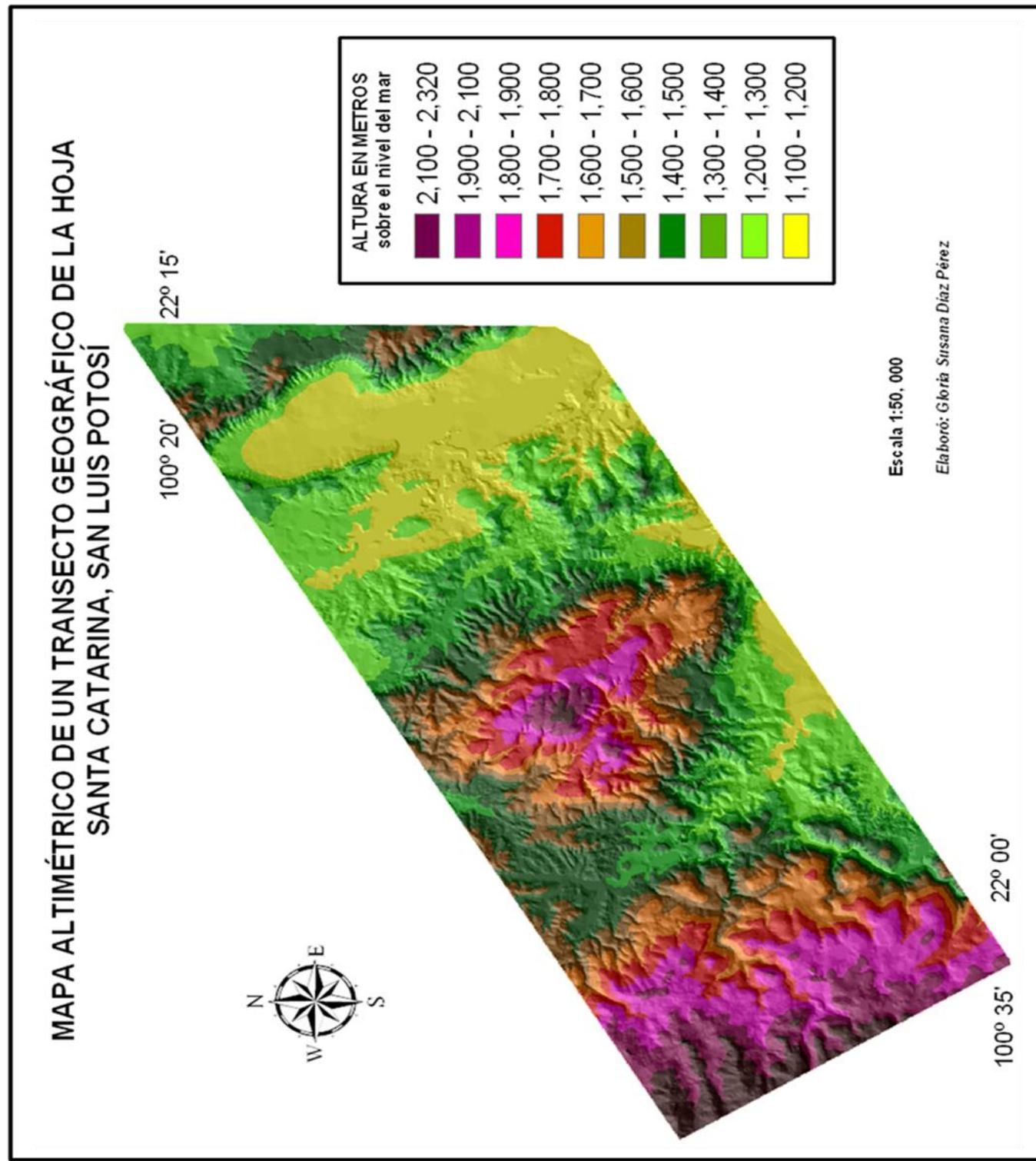


Fig. IV.1.6. Mapa altimétrico de la Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, mostrando diez pisos altitudinales, diferenciando las máximas y mínimas alturas

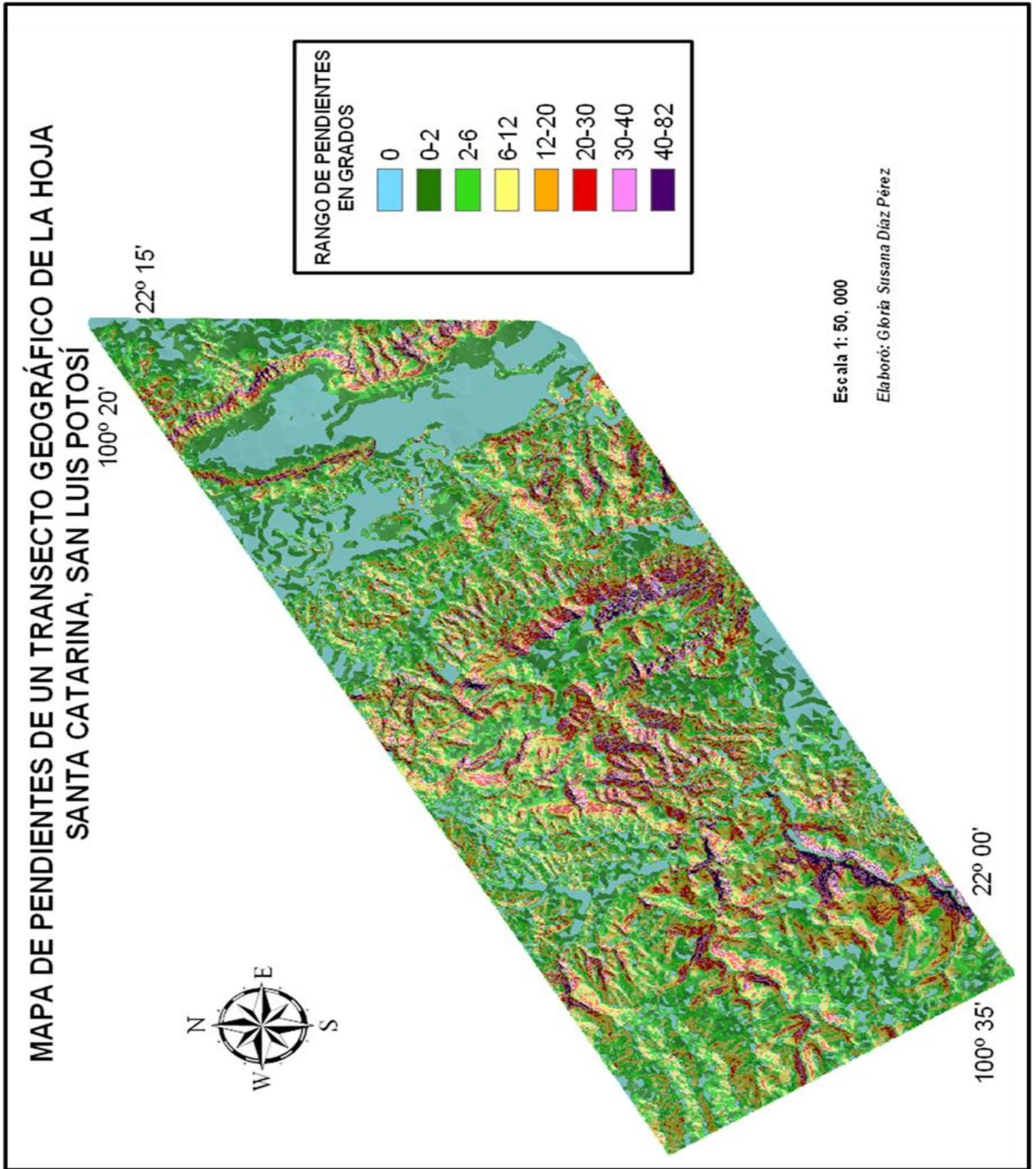


Fig. IV.1.7. Mapa de pendientes de la Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, mostrando ocho clases de pendientes, las máximas y mínimas.

MAPA GEOMORFOLÓGICO

La clasificación geomorfológica se hizo de acuerdo a la morfogénesis perteneciente al relieve. El término morfogénesis hace alusión al origen de las formas del relieve terrestre. Apoyado en el concepto de que el relieve es el resultado de la interacción de procesos endógenos y exógenos. De esta manera tenemos que los primeros son el resultado de la actividad tectónica y volcánica, es decir forman el relieve terrestre, y los exógenos son una manifestación del intemperismo, erosión y acumulación; sin embargo, las formas de origen endógeno son modeladas por los procesos exógenos y esto dependerá de la dinámica de las circunstancias que se presenten ya sea externas o internas.

En el área cartografiada están presentes dos grupos principales de relieve: relieve endógeno y exógeno. El primero se refiere al tipo tectónico y volcánico dividido en Ladera altas, Laderas bajas, Lomeríos y masas volcánicas de cimas planas, y por último en Lomeríos volcánicos. El relieve exógeno se refiere a aquellas formas originadas por la acción de la erosión y la acumulación, divididos en Abanicos, Piedemontes, Planicies y Terrazas fluviales (Fig.IV.1.8.). La siguiente tabla contiene las características geomorfológicas obtenidas en la Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí, mostrando diferentes tipos de geoformas, producto de diversos orígenes y litología.

En la siguiente tabla, IV.1.1., se ejemplifica de manera general una clasificación obtenida de las unidades morfogenéticas, tomando en cuenta su tipo, origen y litología.

Tabla IV.1.1.

CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LA REGIÓN POZO TOLENTINO-1 Y REGIÓN CERCANA A GUAXCAMÁ		
Tipo	Origen	Litología y Temporalidad
RELIEVE ENDÓGENO		
Laderas de montaña (altura relativa > 500 m)		
Laderas de montaña altas	Endógeno tectónico y Endógeno volcánico	Rocas sedimentarias: Yesos y Calizas. Al SW del transecto geográfico pertenecen a la Formación El Doctor del Cretácico Inferior y al NE pertenecen a la Formación Guaxcamá igualmente del Cretácico Inferior.
Laderas de montaña bajas		En la mayoría pertenecen Rocas ígneas: Andesitas del Terciario Oligoceno, Aglomerados del Terciario Oligoceno, en gran parte hay existencia de rocas Ígneas extrusivas ácidas. En menor cantidad hay Rocas sedimentarias: Calizas de la Formación El Doctor del Cretácico Inferior y Conglomerados del Cuaternario Pleistoceno.
Lomeríos (altura relativa < 500 m)		
Lomeríos y masas volcánicas de cimas planas	Endógeno volcánico y Endógeno karstico	Rocas ígneas: Andesitas del Terciario Oligoceno, algunos afloramientos de Ignimbritas riolíticas del Terciario Oligoceno, Aglomerados del Terciario Oligoceno, Ígneas extrusivas ácidas. En una pequeña cantidad Rocas sedimentarias: Conglomerados del Cuaternario Pleistoceno.
Lomeríos volcánicos		En su totalidad Rocas ígneas: Ignimbritas riolíticas del Terciario Oligoceno, Aglomerados del Terciario Oligoceno, Andesitas del Terciario Oligoceno, Ígneas extrusivas ácidas.
RELIEVE EXÓGENO		
Abanicos	Exógeno acumulativo	Rocas sedimentarias: Conglomerados del Cuaternario Pleistoceno. En pequeña proporción Rocas sedimentarias: Yesos y Calizas de la Formación Guaxcamá del Cretácico Inferior.
Material Coluvial	Exógeno acumulativo	Rocas sedimentarias: Conglomerados del Cuaternario Pleistoceno. En pequeña proporción Rocas sedimentarias: Yesos y Calizas de la Formación Guaxcamá del Cretácico Inferior.
Piedemonte	Exógeno acumulativo	Compuesto en su mayoría por Rocas sedimentarias: Conglomerados del Cuaternario Pleistoceno
Planicie	Exógeno acumulativo	Suelo aluvial del Cuaternario Pleistoceno
Terrazas fluviales	Exógeno erosivo acumulativo	Rocas sedimentarias: Conglomerados del Cuaternario Pleistoceno y Travertinos del Cuaternario Pleistoceno

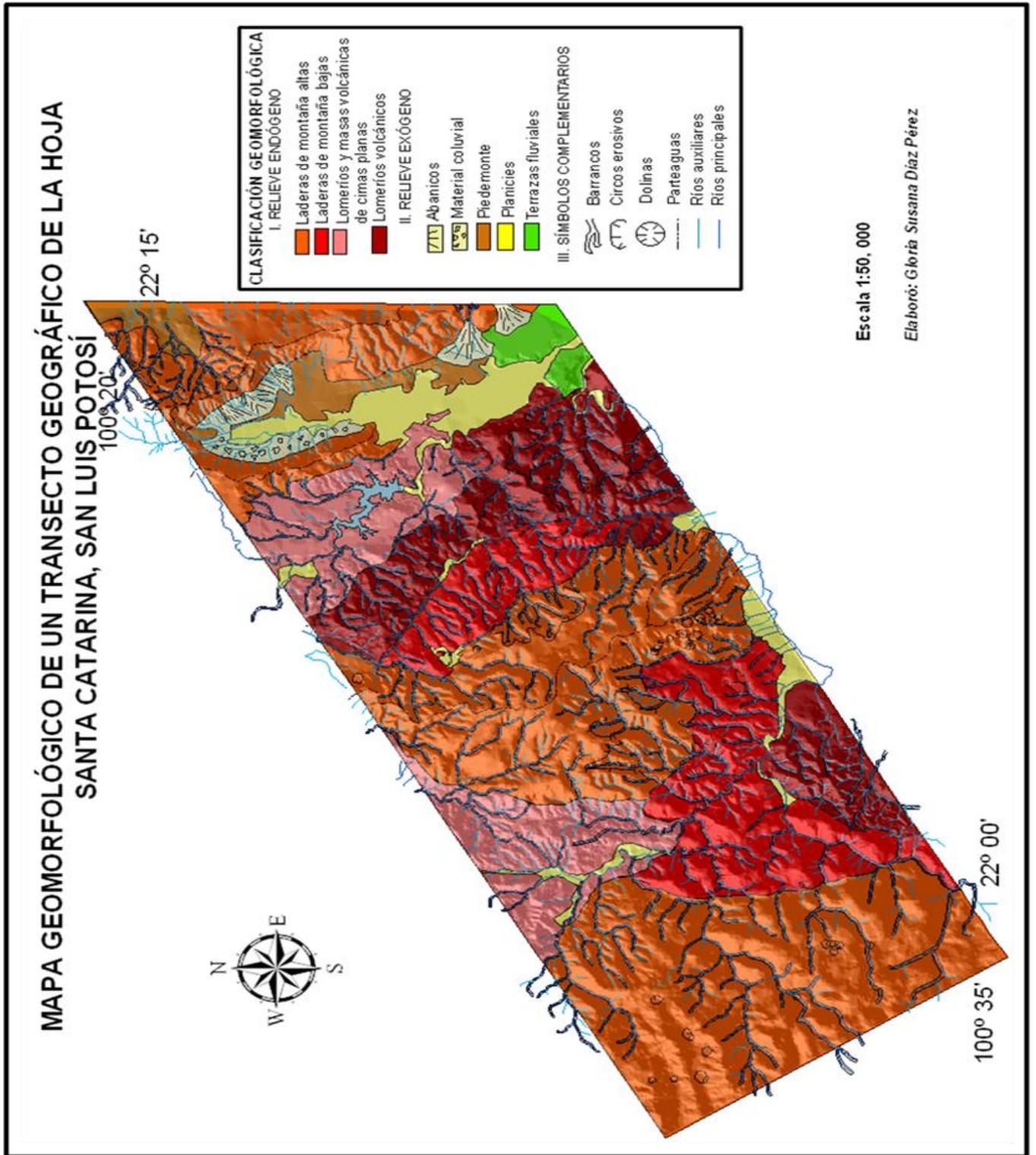


Fig. IV.1.8. Mapa Geomorfológico de la Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, mostrando las geoformas mas destacadas tanto del relieve endógeno como exógeno.

- Riesgo ambiental

El siguiente ejemplo se tomó en cuenta debido a la similitud de la zona estudiada por López (2010), con los paleo cauces existentes en la Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá. De alguna manera hipotética este ejemplo pudiera presentarse en la Región de estudio y dañar a la población pero sobre todo a la infraestructura de carreteras, por lo que sería de interés un estudio profundo de ello.

De acuerdo a López (*op.cit.*), durante los últimos dos años 2008-2010, en la zona conurbada de las ciudades de Soledad de Graciano Sánchez se ha manifestado de manera muy rápida y principalmente de forma puntual un nuevo fenómeno de hundimiento y subsidencia, que ha causado serias afectaciones a la infraestructura municipal y particular.

En su estudio, López menciona que mapeos geológicos recientes a detalle del valle de San Luis Potosí, muestran que existe una serie de causes y arroyos que corren con un rumbo general NE-SW, éstos arroyos han sido localizados gracias a estudios litológicos en más de 100 pozos de agua, así como en una gran cantidad de obras civiles (cimientos, canteras, bancos de material, etc.), que han permitido hacer un catalogo amplio de la geología más superficial del valle y su relleno cuaternario. La ocurrencia de estos fenómenos está relacionada, de acuerdo a la interpretación geológica, a la presencia de los paleo-causes, ya que 90% de las zonas afectadas están sobre arroyos, presuntamente inactivos. El fenómeno de la reactivación de estos paleo-ríos es aún un tema en discusión; sin embargo una de las causas principales es sin duda el aumento en el caudal del acuífero más somero del valle, el cual durante décadas de sobre explotación y contaminación se hizo inservible para uso doméstico e industrial. Al no hacer uso de este acuífero y al aumento en la precipitación en los últimos años este nivel aumentó considerablemente, causando con esto el que se retomaran los antiguos sistemas de drenaje. La litología de los sedimentos que han sufrido poca consolidación ha permitido el fenómeno de arrastre granular y arrastre de material, causando la formación de huecos y cavidades que se expresan en la superficie en forma de hundimientos.

IV.1.2.- Región de la Formación El Doctor, San Joaquín, Querétaro

Generalidades fisiográficas

El interés por el cual se tomó esta región es porque en su totalidad está formada por un macizo calcáreo del Cretácico, perteneciente a la Provincia Sierra Madre Oriental, las rocas sedimentarias que caracterizan el lugar dan una morfología peculiar y de utilidad para construir un modelo análogo a la morfología de características petrolíferas de Cantarell, la zona de estudio se encuentra entre las coordenadas geográficas 21° 00' N, 20° 45' S, y 99° 29' 30" E, 99° 40' 00" W (Fig.IV.2.1.).

La región de estudio pertenece a la subprovincia del Carso Huasteco y a su vez a la Provincia Sierra Madre Oriental, con altitudes de más de 2,600 m. Constituida principalmente por rocas sedimentarias con fósiles incrustados de origen marino, en su mayoría marinas del Cretácico, que forman anticlinales y sinclinales cuyas deformaciones sufren rupturas regionales (cabalgaduras), como la que pasa por la localidad de El Doctor, (INEGI, 2008).

Climas.- En las laderas inferiores de la Sierra el Doctor es en su mayoría es Semiseco Templado, el más común, ya que cubre aproximadamente 35% de la superficie estatal, con temperaturas medias anuales que oscilan entre 16° y los 18°C y una precipitación total anual entre 450 y 630 mm. Sin embargo, en las zonas montañosas, específicamente en la Sierra del Doctor el clima es templado húmedo con verano fresco y una temperatura media anual de 14° C; siendo los meses de abril y mayo los más calurosos, llegando incluso a los 30°C, la precipitación pluvial anual promedio es de 1150 m. La estación invernal en la Sierra el Doctor se presenta en los meses de noviembre, diciembre y enero, al cambiar la dirección de los vientos del Norte que propician el descenso de la temperatura que, en algunos días, está por debajo de los -3° C.



Fig. IV.2.1. Localización geográfica del relieve en la Región Formación El Doctor, Querétaro, Esc 1:25.4 km. (Google Earth, 2010)

Geología

La formación El Doctor se localiza en la población del mismo nombre en la parte centro oriental del Estado de Querétaro, es una unidad carbonatada del Cretácico Inferior, entre las formaciones Las Trancas y Soyatal-Mendez, Carrillo (1981).

La disposición estructural del banco calcáreo El Doctor ha sido interpretada de diferentes maneras, Carrillo (*op. cit.*), la consideraron como una estructura plegada, mientras que geólogos de PEMEX como un pliegue fallado. Este macizo calcáreo presenta un contacto anormal sobre la Formación Soyatal observado en el corte del Río Moctezuma, inmediatamente al NE del anticlinal, visible también al sur del cerro El Angel, donde las facies de plataforma de la formación El Doctor están en contacto con la Formación Soyatal. Este contacto corresponde al plano de cabalgadura que, en esta localidad está inclinado hacia el SW, con un ángulo de 23° medido desde el lado hidalguense, en tanto que el traslape indica aquí un transporte mínimo de 3 km. Es de notarse también que el pliegue apretado localizado en la cobijadura es único en todo el banco y está asociado a la falla; es diferente de las ondulaciones de mayor radio de

curvatura que allí existen, lo cual puede observarse en el corte del Río Moctezuma o en algún recorrido a lo ancho de la plataforma, excepto en algunos afloramientos encima de ella de rocas correlacionables con las facies de cuenca de la Formación Soyatal, que sí muestran pliegues apretados, (Carrillo 1981).

La plataforma El Doctor también revela con claridad la presencia de lineamientos que en los alrededores del Cerro El Ángel, corresponden a fallas normales de desplazamiento provocando la inclinación de los estratos hacia el NE. En la vertiente oriental de este rasgo fisiográfico se observan bloques y estratos de caliza de plataforma como la que subyace el poblado de la cual toma nombre ésta formación, en contacto sub horizontal sobre la Formación Soyatal. Éste contacto, que suele estar tectonizado, representa probablemente una falla inversa menor que tiende a encontrarse hacia el SW con el plano más alto de la cabalgadura de El Doctor.

Las Formaciones Soyatal-Méndez cubren a la Formación del banco calcáreo en el flanco SW del anticlinal El Piñón con pliegues recostados en el sentido de la pendiente, observable sobre todo en el norte de la “Y” de Maconi. Esta geometría también está marcada por la inclinación hacia el NE de dicho contacto, y en lo alto de Maguey blanco se observa una pequeña cabalgadura dirigida hacia el SW de la Formación El Doctor sobre la Formación Soyatal. El banco calcáreo se presenta cabalgando hacia el NE sobre la Formación Soyatal, en tanto que esta formación y las facies hemipelágicas se presentan formando comúnmente el flanco plegado SW del anticlinal El Piñón. La región comprendida entre los alrededores de Vizarrón y San Joaquín permite armar desde la base a la cima, la siguiente sección estratigráfica, Carrillo (*op. cit.*).

Formación las Trancas.- Esta unidad litoestratigráfica definida por Segerstrom en Carrillo (*op. cit.*), en el Estado de Hidalgo, fue utilizada para designar a las rocas más antiguas del área que afloran al poniente del Banco El Doctor y ella consiste de una secuencia de rocas pelíticas, filitas, escasas calizas y rocas volcánicas principalmente piroclásticas. Al oriente del Banco El Doctor esta formación contiene principalmente calizas arcillosas y lutitas.

Formación El Doctor.- Gaytán en Carrillo (1981), diferenció cuatro subfacies de la Formación El Doctor observando que en esta área coexisten las facies de plataforma (Cerro Ladrón) con las facies de cuenca (San Joaquín y La Negra).

Formaciones Soyatal y Méndez.- A la Formación El Doctor le sobre yace la Formación Soyatal del Turoniano y a ésta la Formación Méndez del Coniaciano- Maestrichiano. La Formación Soyatal consiste principalmente de calizas, margas y lutitas de estratificación delgada y el contacto interior parece tanto concordante como discordante. La Formación Méndez es esencialmente terrígena de grano fino.

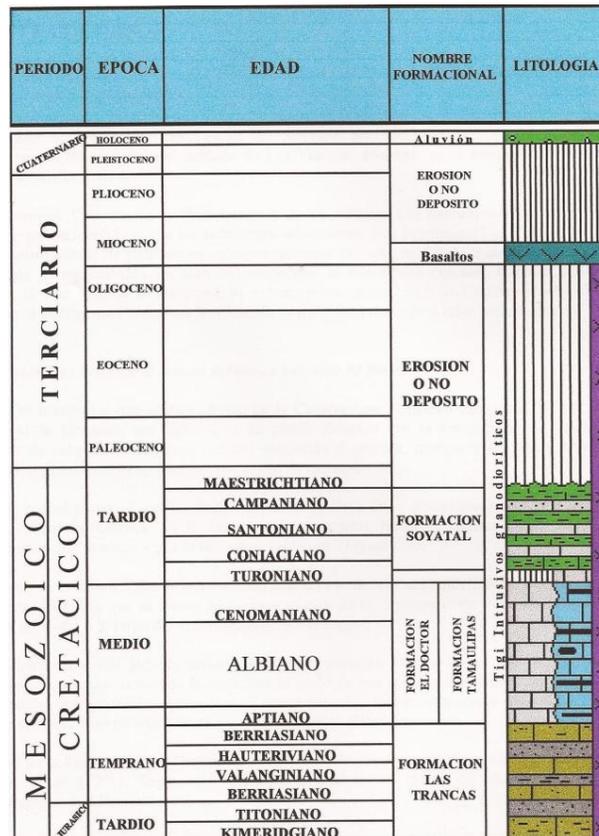


Fig. IV.2.2. Columna estratigráfica que muestra el orden en el que fueron originadas las diversas formaciones que se encuentran en el área de estudio. (Hernández, 1999).

Geomorfología

Morfometría

- Modelo Digital del Terreno y Mapa de relieve sombreado

El relieve que se observa a través de éste modelo sombreado es muy disectado, cuenta con gran cantidad de barrancos a lo largo de toda el área de estudio, sin embargo se aprecia mayor cantidad de red fluvial al E-NE y el macizo calcareo al SW del área, (Fig. IV.2.3.)

- Mapa altimétrico

El MDT fue reclasificado en 7 intervalos altitudinales (en metros), en donde el intervalo máximo fue de 2,922 a 3,246 m y el mínimo de 981 a 1,304 m. Las alturas máximas se observan al SW en el macizo calcáreo y gradualmente disminuye la altura al E y al NE de la región, (Fig. IV.2.4.).

- Mapa de pendientes

Se obtuvo el mapa de pendientes con 8 intervalos en grados, donde las áreas con pendientes más abruptas fueron de más de 52° y hasta 68° y las pendientes menores tienden a ser planas, estas fueron iguales o mayores a 0° y hasta 4°. Las zonas de mayores pendientes coinciden con las zonas de mayor disección y las de pendientes mínimas o nulas se presentan especialmente en el macizo calcáreo, (Fig. IV.2.5.).

En ésta región las máximas pendientes corresponden a las altitudes medias y bajas, poniendo de manifiesto una zona muy disectada, es decir, una gran formación de barrancos. Las pendientes mínimas se encuentran en el macizo calcáreo El Doctor, formando una especie de altiplano. Al ser una zona bastante disectada y con actividad minera, puede existir el riesgo de erosión acelerada en los flancos de las montañas ocasionando riesgos a las pequeñas poblaciones localizadas en el interior del área de estudio.

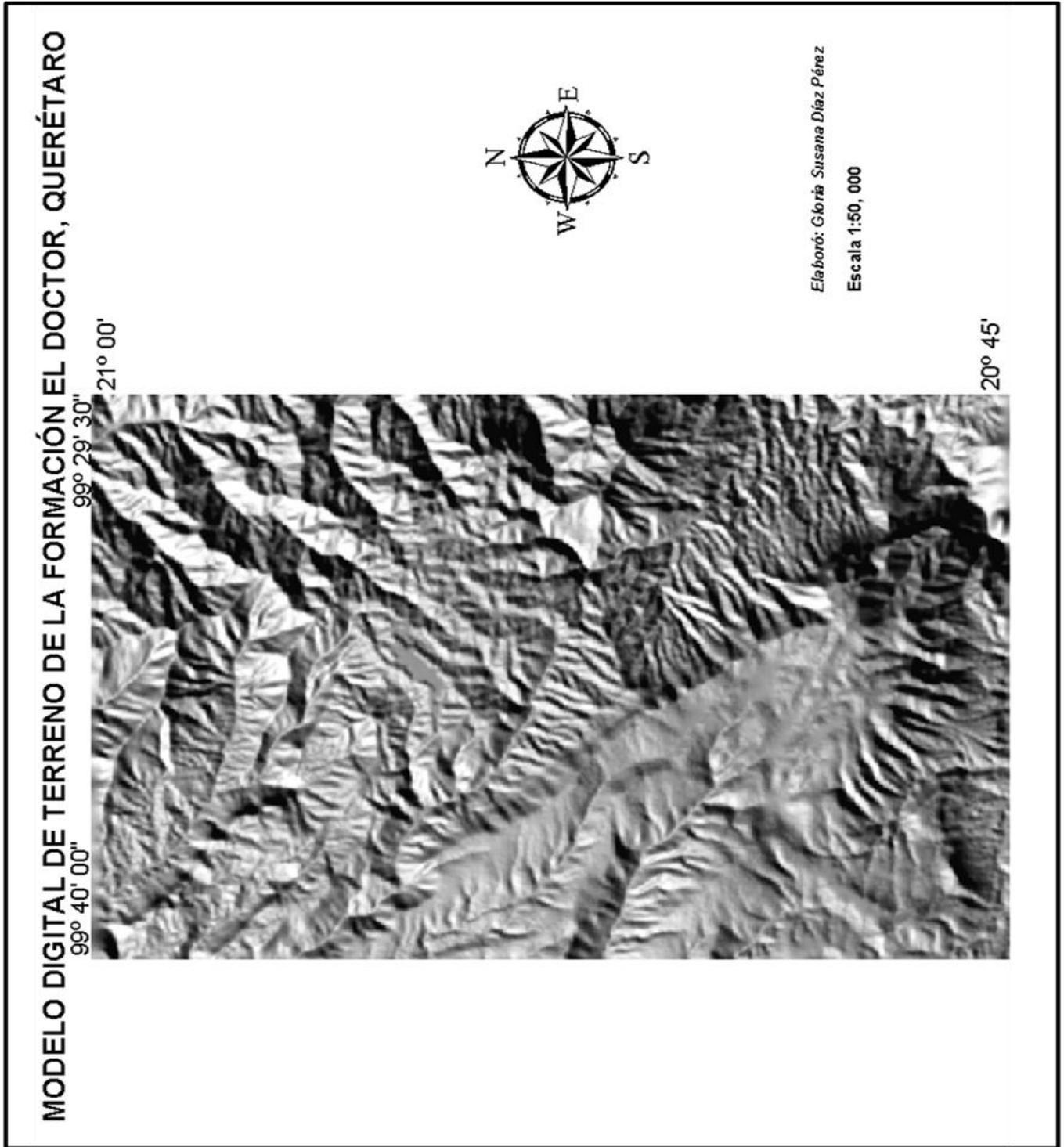


Fig. IV.2.3. Modelo Digital de Terreno en relieve sombreado de la Región El Doctor, Querétaro, destacando las características del relieve

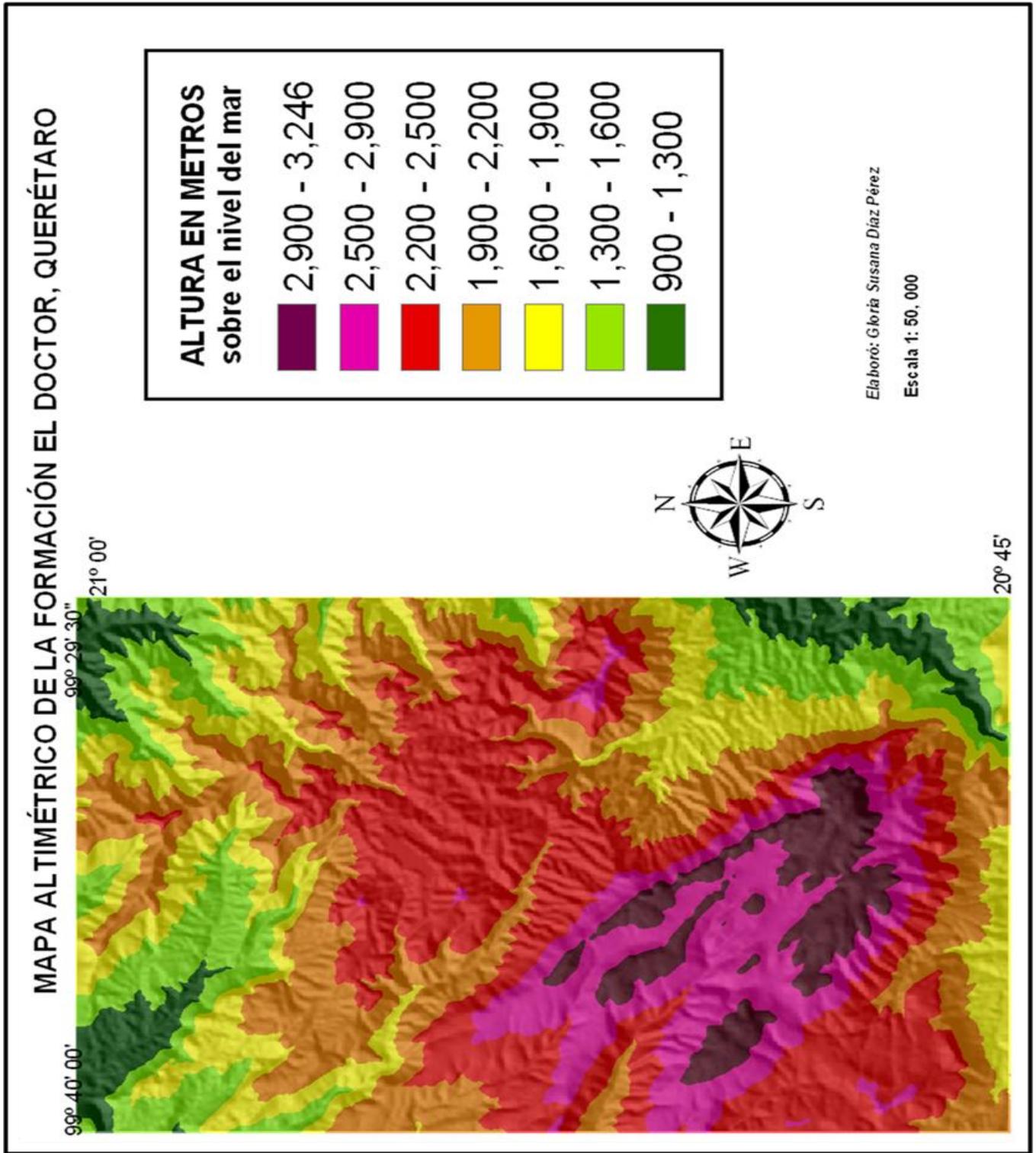


Fig. IV.2.4. Mapa altimétrico de la Región El Doctor, mostrando siete pisos altitudinales, diferenciando las máximas y mínimas alturas

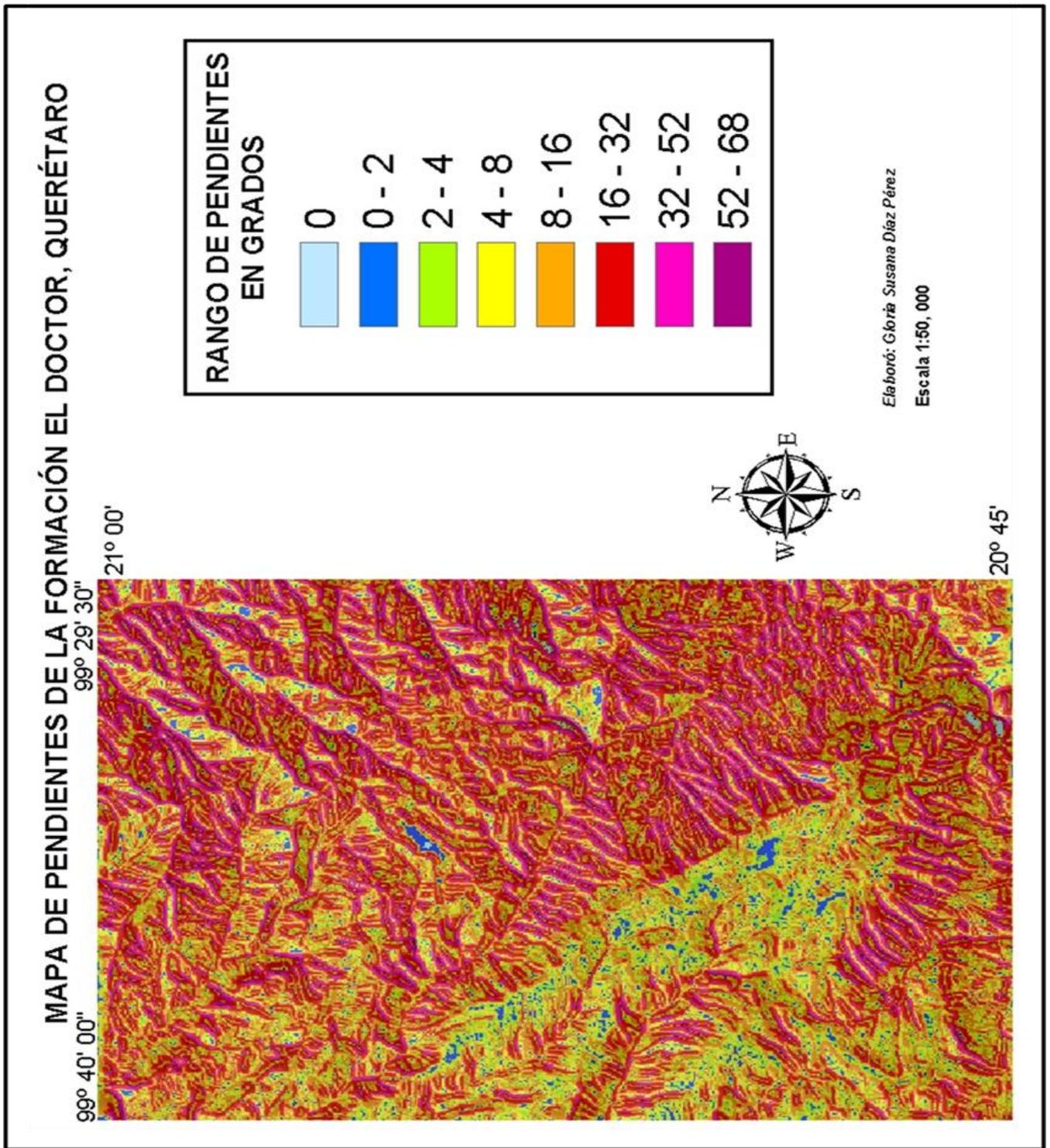


Fig. IV.2.5. Mapa de pendientes de la Región El Doctor, mostrando ocho clases de pendientes, que se distribuyen en toda el área de estudio.

MAPA GEOMORFOLÓGICO

En ésta región, la clasificación geomorfológica se hizo de manera burda, es decir sin un grado de detalle pulido, como ya se mencionó anteriormente; sin embargo se tomó en cuenta la morfogénesis del relieve para la tipificación de las geoformas.

La morfogénesis, recordando, se refiere al origen de las formas del relieve terrestre, como la interacción de procesos endógenos de origen y exógenos como modeladores del relieve, dependiendo de la dinámica de las circunstancias que se presenten ya sea externas o internas.

Aquí están presentes el relieve endógeno y exógeno. En el primero se encuentra el endógeno modelado estructural, endógeno modelado volcánico y endógeno modelado kárstico, y a su vez dividido en su totalidad en Ladera altas, Ladera medias, y Laderas bajas, y la existencia de una zona cumbral, claramente identificada. El relieve exógeno se refiere a aquellas formas originadas por la acción de la erosión y la acumulación, y se divide exógeno erosivo y exógeno erosivo acumulativo, en ambos, el relieve se divide en piedemontes y valles intermontanos. En la siguiente tabla se exponen las características geomorfológicas encontradas para esta región de estudio (Fig.IV.2.6.).

La tabla, IV.2.1., expone de manera general una clasificación obtenida de las unidades morfogenéticas, tomando en cuenta su tipo, origen y litología.

Tabla IV.2.1.

CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LA REGIÓN EL DOCTOR		
Tipo y altura en metros sobre el nivel del mar (msnm)	Origen	Litología y Temporalidad
RELIEVE ENDÓGENO		
Zona cumbral con erosión moderada Altura msnm (2500-2900)	Endógeno modelado estructural	Rocas sedimentarias: Lutitas, zonas cumbrales en bloques de calizas con pendientes moderadas pertenecientes a la Formación El Doctor del Cretácico Inferior.
Laderas de montaña altas Altura msnm (2200-2500)		Rocas sedimentarias: Calizas pertenecientes a la Formación El Doctor del Cretácico Inferior.
Laderas de montaña medias Altura msnm (1600-2200)		Rocas sedimentarias: Calizas pertenecientes a la Formación El Doctor del Cretácico Inferior.
Laderas montañosas medias Altura msnm (2200-2500)	Endógeno modelado volcánico	Rocas ígneas: Laderas coronadas por depósitos basálticos de origen fisural.
Laderas montañosas medias Altura msnm (1600-2200)		Rocas ígneas: Ígneas intrusivas ácidas, estructura volcánica con laderas muy erosionadas por levantamientos tectónicos, hay exposición de materiales intrusivos.
Laderas montañosas altas Altura msnm (2200-2500)	Endógeno modelado Karstico	Rocas sedimentarias: Calizas con intercalaciones de Lutitas pertenecientes a la Formación El Doctor del Cretácico Inferior.
Laderas montañosas medias Altura msnm (1600-2200)		Rocas sedimentarias: Calizas con intercalaciones de Lutitas pertenecientes a la Formación El Doctor del Cretácico Inferior.
Laderas montañosas bajas Altura msnm (900-1600)		Rocas sedimentarias: Calizas con intercalaciones de Lutitas pertenecientes a la Formación El Doctor del Cretácico Inferior.
RELIEVE EXÓGENO		
Piedemonte alto Altura msnm (1900-2500)	Exógeno erosivo	Rocas sedimentarias: Calizas y Lutitas de la Formación El Doctor del Cretácico Inferior.
Piedemonte bajo erosivo Altura msnm (900-1600)		Rocas sedimentarias: Calizas y Lutitas de la Formación El Doctor del Cretácico Inferior. Se resaltan rasgos erosivo-acumulativos.
Piedemonte bajo erosivo Altura msnm (1600-1900)		Compuesto por Rocas sedimentarias: Calizas y Lutitas de la Formación El Doctor. Se resaltan depósitos erosivo-acumulativos de Conglomerados del Cuaternario Pleistoceno
Valle intermontano erosivo Altura msnm (900-1300)	Exógeno erosivo acumulativo	Rocas sedimentarias: Calizas, y una mezcla de Calizas y Lutitas de la Formación El Doctor del Cretácico Inferior. La erosión es fuerte y controlada por fallamiento.
Valle erosivo Altura msnm (1900-2200)		Rocas sedimentarias: Calizas, de la Formación El Doctor del Cretácico Inferior.
Valle intermontano acumulativo de fondo plano Altura msnm (2200-2500)		Suelo aluvial del Cuaternario, se presenta acumulación de material de acarreo y por consiguiente forman un fondo plano.

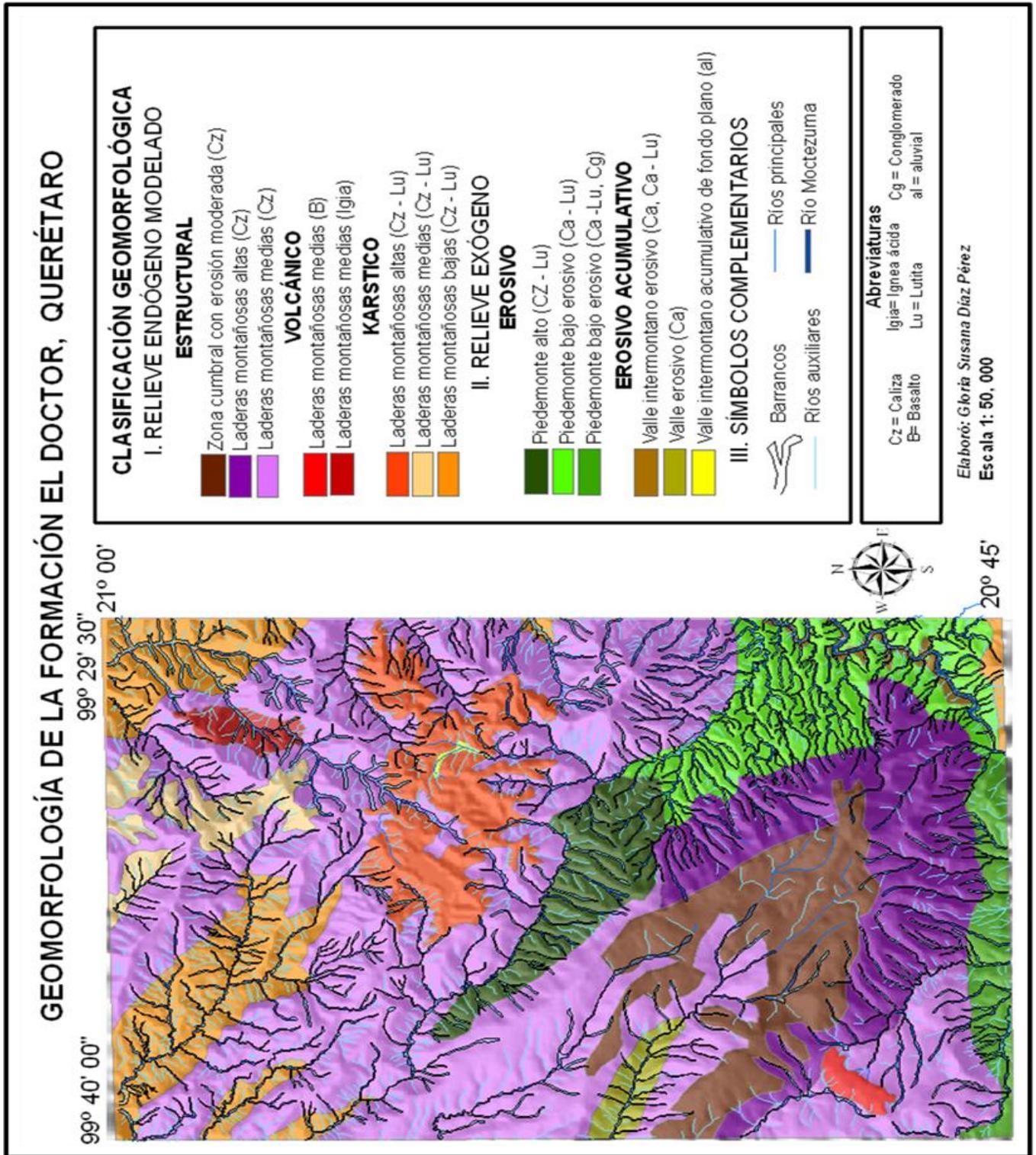


Fig. IV.2.6. Mapa Geomorfológico de la Región El Doctor, mostrando las geoformas mas destacadas tanto del relieve endógeno modelado como exógeno.

- Riesgo ambiental

Los siguientes artículos se tomaron como ejemplo debido a la cercanía y a la semejanza de las características ambientales afectadas por zonas mineras en San Joaquín, con el área de El Doctor. El artículo de García *et. al.* (2010), trata sobre riesgos por contaminación de metales pesados en la precipitación pluvial del Municipio San Joaquín, cerca del área El Doctor y el otro artículo es de Solís *et. al.* (2010), que es un estudio sobre el mercurio en cultivos agrícolas de temporal en San Joaquin.

De acuerdo a García *op. cit.*, la lluvia es una fuente importante de arrastre de contaminantes en donde se incorporan y acumulan continuamente contaminantes de origen antropogénico y natural, que pueden ser disueltos fácilmente. Por lo tanto, la composición química de la precipitación pluvial, depende también en gran medida, de las condiciones atmosféricas de los sitios en donde es colectada para su estudio. En el Centro de Geociencias de la UNAM, se han realizado estudios de metales pesados en muestras de lluvia colectadas en el periodo que comprende 2009 a 2010 en San Joaquín al Sur de la Sierra Gorda de Querétaro y en Centro de Geociencias en el Campus Juriquilla-UNAM. En este proyecto se cuantificaron los metales pesados tóxicos (MP) y los iones inorgánicos en la precipitación fluvial.

Solís *et. al.* (*op. cit.*), comenta, que la zona minera de San Joaquín, Querétaro, posee una rica historia minera, desde épocas prehispánicas hasta la actualidad, especialmente en lo que se refiere a la extracción de mercurio, esta actividad ha provocado la acumulación de desechos mineros expuestos al ambiente y de composición química variada. Sin embargo, no se conoce la concentración de mercurio en los distintos compartimentos del sistema terrestre de la zona, ni de los procesos bio geoquímicos que se llevan a cabo y que puedan influir en la salud pública. Asumiendo que el suelo de la región ha funcionado como sitio de almacenamiento y transferencia de mercurio hacia otros niveles del ecosistema, el autor cuantificó el contenido de mercurio en cultivos agrícolas de consumo humano como el maíz, para ello, tomó ejemplares completos de maíz que se

fraccionaron, atendiendo a su estructura (raíz, tallo, hoja, fruto) y encontró altos contenidos de mercurio total especialmente en raíces y granos, observó que los suelos de la zona presentan concentraciones variables de mercurio. En ausencia de exposiciones directas de metales pesados, los elementos tóxicos representan un peligro para la población humana debido a las conexiones de la cadena trófica como suelo y aire con los humanos. La acumulación de metales tóxicos en cultivos de cosecha representan la principal entrada de estos elementos para humanos y animales (Patra *et. al.*, 2004 en Solís, *et. al.*, 2010). El autor hace mención de la importancia de éstos estudios con el fin de establecer la relación entre el contenido de metales pesados tóxicos en el ambiente y su ingreso a la cadena alimenticia, así como su incorporación por esta vía a la población.

IV.1.3.- Región Cuenca de Toluca, Estado de México

Generalidades fisiográficas

Se considero pertinente incluir a la Cuenca de Toluca, debido a las geoformas de origen ígneo, ya que actualmente en la exploración petrolera se están realizando estudios en el Golfo Profundo de México y se han encontrado formas vinculadas al vulcanismo o magmatismo. Escobar (en Guerrero 2005), encontró una estructura volcánica de asfalto el “Volcán Chapopote”, al sur del Golfo de México, dentro del área de la Bahía de Campeche en el área conocida como Escarpas de Campeche, presentaba una asociación con hidrocarburos e hidratos de metano naturales y aún más asombroso daba sustento a toda una comunidad biológica en términos de ecosistema y formación geológica. Para Escobar (*op. cit.*), los volcanes de asfalto a grandes profundidades en el océano pueden contener grandes burbujas de gas en yacimientos que llevan millones de años bajo tierra, también en ocasiones se le observa al asfalto que forma láminas cerca de los depósitos subterráneos del petróleo crudo, por lo que su presencia se considera una evidencia manifiesta de petróleo en la zona. Por otra parte hay evidencias de que en las costas de Veracruz existen algunos pozos que han producido gas relacionados a material pirocástico. Debido a estos interesantes y resientes descubrimientos en la exploración petrolera, se consideró pertinente incluir a la Cuenca de Toluca.

El área de estudio se localiza en el sector oriental del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) entre las coordenadas 19° 00'- 19° 35' de latitud Norte y 100° 00'- 99° 20' de longitud Oeste; abarca una superficie de 3482.5 km². Tiene como límites al NW el Río Lerma, al NE Monte Alto, al Este la Sierra de las Cruces, al SE el Cerro la Corona o Cerro Tlalli (Mooser *et. al.*, 1996) y el Volcán Holotepec, al SW el Nevado de Toluca, y al W el Cerro San Antonio (Figura IV.3.1.).



Fig. IV.3.1. Localización geográfica de la Región Cuenca de Toluca, Estado de México, Esc 1:25.4 km. (Google Earth, 2010)

Fisiográficamente esta región constituye el extremo meridional de la llamada Altiplanicie Central. La Cuenca de Toluca es un área caracterizada por un importante conjunto de grandes volcanes relacionados con la composición de los magmas y sus diferentes edades del Terciario y Cuaternario (Sánchez, 1977) y se encuentra rellena por diferentes productos de origen volcánico a juzgar por su carácter epiclástico y estratificado, así como por los fósiles de plantas y mamíferos encontrados en ellos, indicando un ambiente lacustre. La parte superior de estos depósitos, está formada por aluvión, y parece haber cierto grado de interdigitación entre lahares y lavas hacia el pie de los distintos volcanes que rodean la cuenca (Bloomfield, 1974). La máxima altitud de los cuerpos montañosos está representada por la cima del Volcán Nevado de Toluca, con 4680 m.s.n.m. en gran contraste con la región Norte, a la salida del Río Lerma, que es de 2540 m.s.n.m.

Climas.- A pesar de que la región Toluca-Lerma se ubica en la zona tropical; cabe resaltar que las condiciones climáticas se ven afectadas por el relieve, ya que los sistemas montañosos circundantes actúan como barreras, impidiendo así, la entrada de aire húmedo proveniente de los océanos, es por ello que la precipitación anual disminuye de 1500 mm en la zona montañosa a 700 mm en la planicie (en promedio), y la temperatura media anual varía de 13.7°C en la planicie, a 5°C en la cima del Nevado de Toluca (Serrano, 1993).

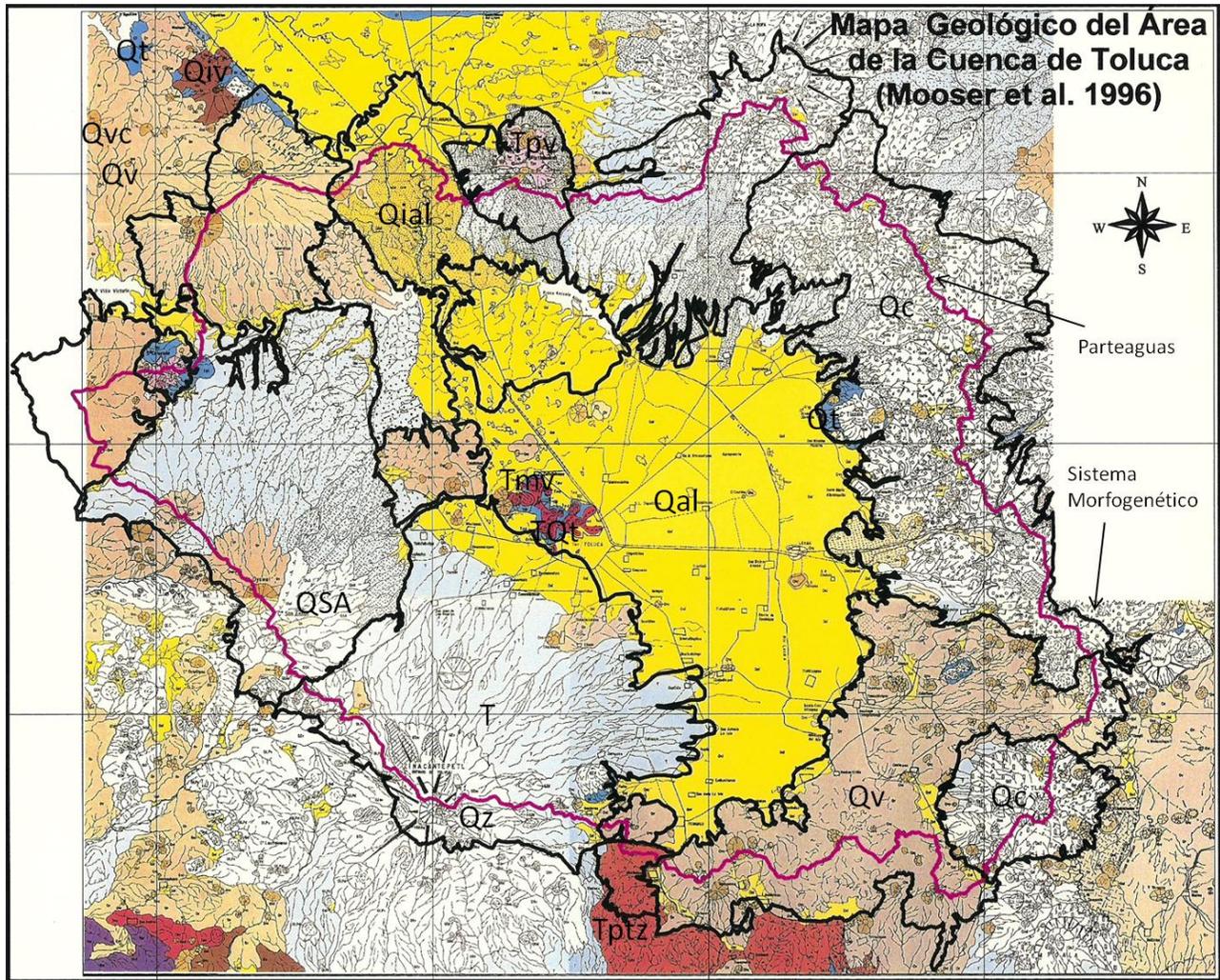
En general se puede hablar de dos tipos de clima principalmente, uno en la zona montañosa y el otro en la zona de planicie, aunque en el extremo SE en el Cerro Tlalli el clima es C(E)(m)(w), clima húmedo semifrío con lluvia invernal menor a 5 mm con respecto a la anual. El clima frío E(T)H, se localiza en la cima del volcán Nevado de Toluca, la temperatura media anual oscila entre los 0 y 4 °C y su precipitación queda comprendida entre 1,000 y 1,500 mm anuales (INEGI 1987). En la zona plana el clima es templado con lluvias en verano, es decir, el más húmedo de los templados y se identifica con las siglas C(W₂)(W), INEGI *op. cit.*, éste clima cubre una superficie aproximada de 66% de la región. La temperatura media anual, es de 13.7°C, oscilando en el invierno entre 11 y 12°C y para el mes cálido, entre 14° y 15°C (Serrano *op. cit.*). En el extremo SW fuera del área de estudio se localiza el clima semicálido subhúmedo con lluvia en verano (A)C(w₂)(w).

Geología

En el Cinturón Volcánico Mexicano se encuentra un gran número de altiplanicies y cuencas que cruzan el centro de México alrededor de los 19° de latitud Norte, uno de los rasgos geológicos más importantes de México es el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), el cual constituye uno de los arcos volcánicos continentales más complejos y variados de la región Circum-Pacífica. Hay principalmente dos tipos de conos producidos por actividad monogenética en la Cuenca de Toluca, la mayor parte son conos cineríticos compuestos de escoria y finos fragmentos de tefra con algunos conos compuestos de escoria y los

otros conos son de bloques de lava subangular (Bloomfield, 1975). Una de las cuencas más importantes en el sector oriental del CVM es la Cuenca de Toluca, donde se origina el río Lerma el cual drena hacia el Norte, fluye al Oeste del Lago de Chapala y desemboca después como río Santiago en el Océano Pacífico.

La Cuenca de Toluca es una depresión tectónica con dirección W-E, originada por esfuerzos distensivos (Newton, *et. al.* 1999). La historia volcánica de Toluca está ligada a la evolución del Cinturón Volcánico Mexicano y puede dividirse en dos etapas. La primera alcanza su máximo de movimiento en el Mioceno Temprano, en que se formaron los fracturamientos SE-NW característicos del Eje Neovolcánico (Yamamoto 1988), desarrollando entonces una serie de fallas “en echelon”, con dirección E-W que originan desde el Norte una serie de escalonamientos, mencionados por Mooser, *et. al.* (1961), así como las fosas de Acambay, Ixtlahuaca y Toluca limitados por las fallas Perales-Ixtlahuaca, Pastores-Toxi y Acambay. La segunda etapa se inicia en el Plioceno Superior, en donde los procesos tectónicos originan un fracturamiento secundario con dirección W-E y desplazamientos verticales individuales del orden de 100 a 300 m, produciendo una moderna zona de bloques escalonados (Mooser 1975), al cual le ha denominado “fracturamiento de los grandes volcanes”, porque dichos bloques controlan en gran parte las chimeneas del Nevado de Toluca, Popocatepetl, Malinche y Pico de Orizaba. El origen de la Sierra Chichinautzin, límite Sur de las cuencas de México y Toluca, obedece a este sistema de fracturamientos. Newton, *et. al.* (1999), dividieron la historia volcánica de la Cuenca de Toluca del Pleistoceno-Holoceno Tardío en dos tipos de actividad: para el Sureste consiste en volcanes monogenéticos asociados a conos de ceniza y flujos de lava. El Sur está dominada por el estrato-volcán andesítico-dacítico Nevado de Toluca (Xinantécatl), el cuarto volcán en altura del centro de México, con 4,690 m.



CLAVE	LITOLOGÍA Y FORMACIÓN	TEMPORALIDAD
T	Formación Tarango: abanicos volcánicos, lahares, flujos piroclásticos, ignimbritas, tobas, pómez, depósitos fluviales.	PLIO-CUATERNARIO
QZ y QSA	Formación Nevado y Cerro San Antonio.	CUATERNARIO
Qc	Sierra de las Cruces.	
Qv	Vulcanitas básicas e intermedias del tipo fenobasalto. Algunos domos ácidos.	
Qig	Ignimbritas.	
Qal	Depósitos aluviales.	
Qial	Depósitos aluviales antiguos.	
Qel Qt TQt	Tobas en depósitos de flancos.	
Tptz	Lahares: Formación Tepozteco.	PLIOCENO
Tpv	Vulcanitas ácidas e intermedias en estratovolcanes menores. Algunas lavas básicas: Tpb	
Tmv	Vulcanitas principalmente ácidas.	MIOCENO

Fig. IV.3.2. Mapa Geológico de la Cuenca de Toluca, modificado de Mooser, *et. al.* (1996), y leyenda del mismo, mostrando la delimitación del área de estudio, al igual que la delimitación de los Sistemas Morfogenético y el parteaguas de toda la Región Cuenca de Toluca.

Geomorfología

Morfometría

Se elaboraron en el Sistema de Información Geográfica, Integrated Land and Water Information System (ILWIS), el Modelo Digital del Terreno (MDT), mapa de relieve sombreado, y los siguientes mapas morfométricos: altimétrico, y de pendientes.

- Modelo Digital del Terreno y Mapa de relieve sombreado.- Se ve claramente la Cuenca de Toluca destacando las zonas más altas en la circunferencia y las zonas planas al centro. El relieve más disectado esta al E y S del área, y las zonas de menor red fluvial se encuentran al W del área de investigación, (Fig. IV.3.3.).

- Mapa altimétrico.- el MDT fue reclasificado en 10 intervalos altitudinales (en metros), en donde el intervalo máximo fue de 4,600 a 4,680 m y el mínimo de 2,450 a 2,600 m. Los intervalos se hicieron con la finalidad de abarcar el valor de estas dos alturas y así expresar en forma clara el relieve de la Cuenca de Toluca (Fig. IV.3.4.). Se destacan las alturas máximas al E de la Cuenca de Toluca.

- Mapa de pendientes.- Se obtuvo el mapa de pendientes con 8 intervalos en grados, donde las áreas con pendientes más abruptas fueron de más de 40° y hasta 86° en las zonas montañosas y las pendientes menores tienden a ser planas, estas fueron iguales o mayores a 0° y hasta 6° al centro de la Cuenca de Toluca, (Fig. IV.3.5.). Este mapa muestra de alguna manera la relación entre la actividad endógena y la exógena, teniendo mayor energía del relieve en las zonas pertenecientes a las mayores pendientes, lo que indican un mayor potencial erosivo fluvial, propiciando un riesgo mayor de remoción en masa, principalmente en época de lluvias.

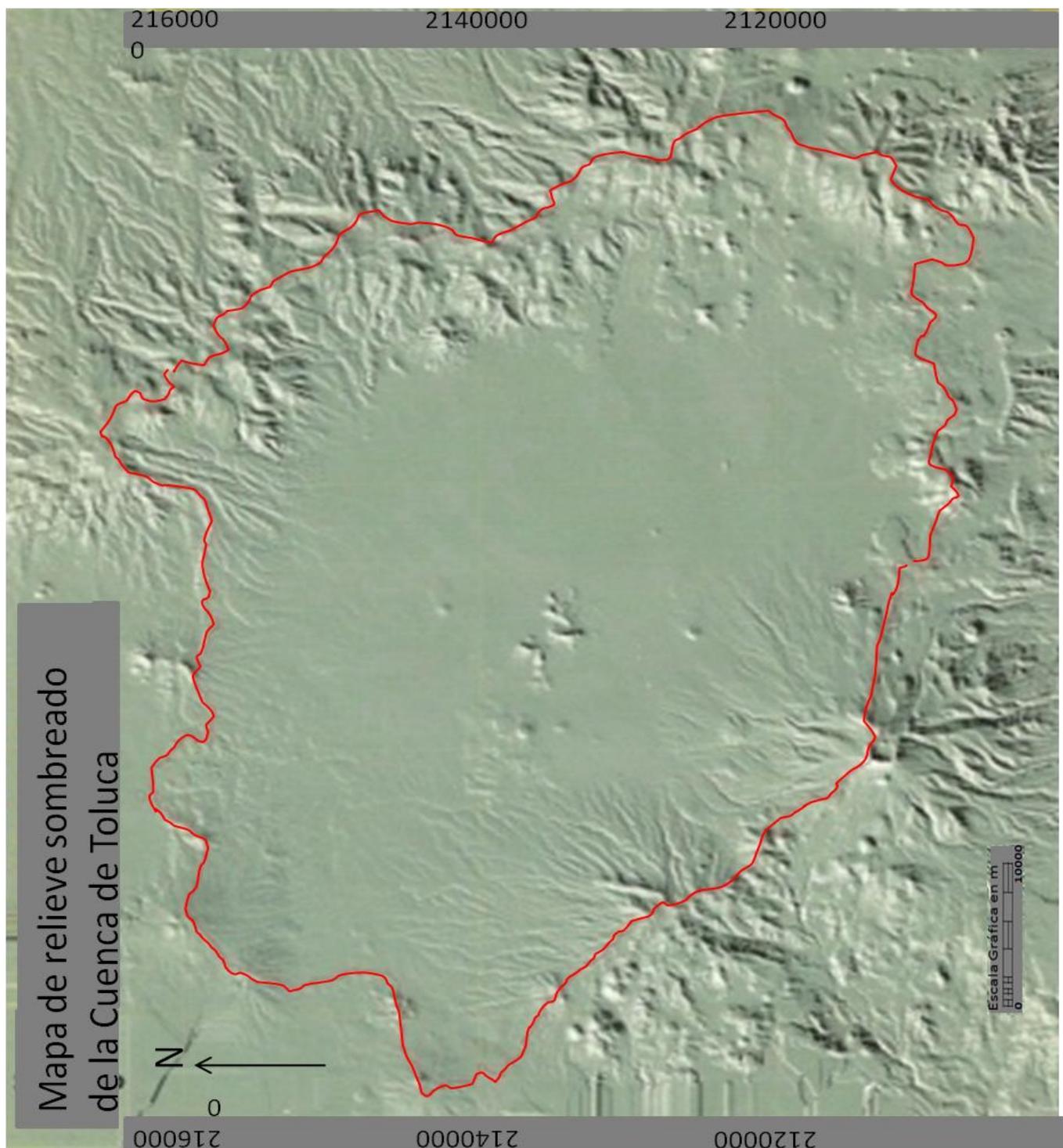


Fig. IV.3.3. Modelo Digital de Terreno en relieve sombreado de la Región Cuenca de Toluca, Estado de México, destacando las características del relieve, así como el partaguas de la Cuenca, Esc 1:50,000 (Díaz, 2001).

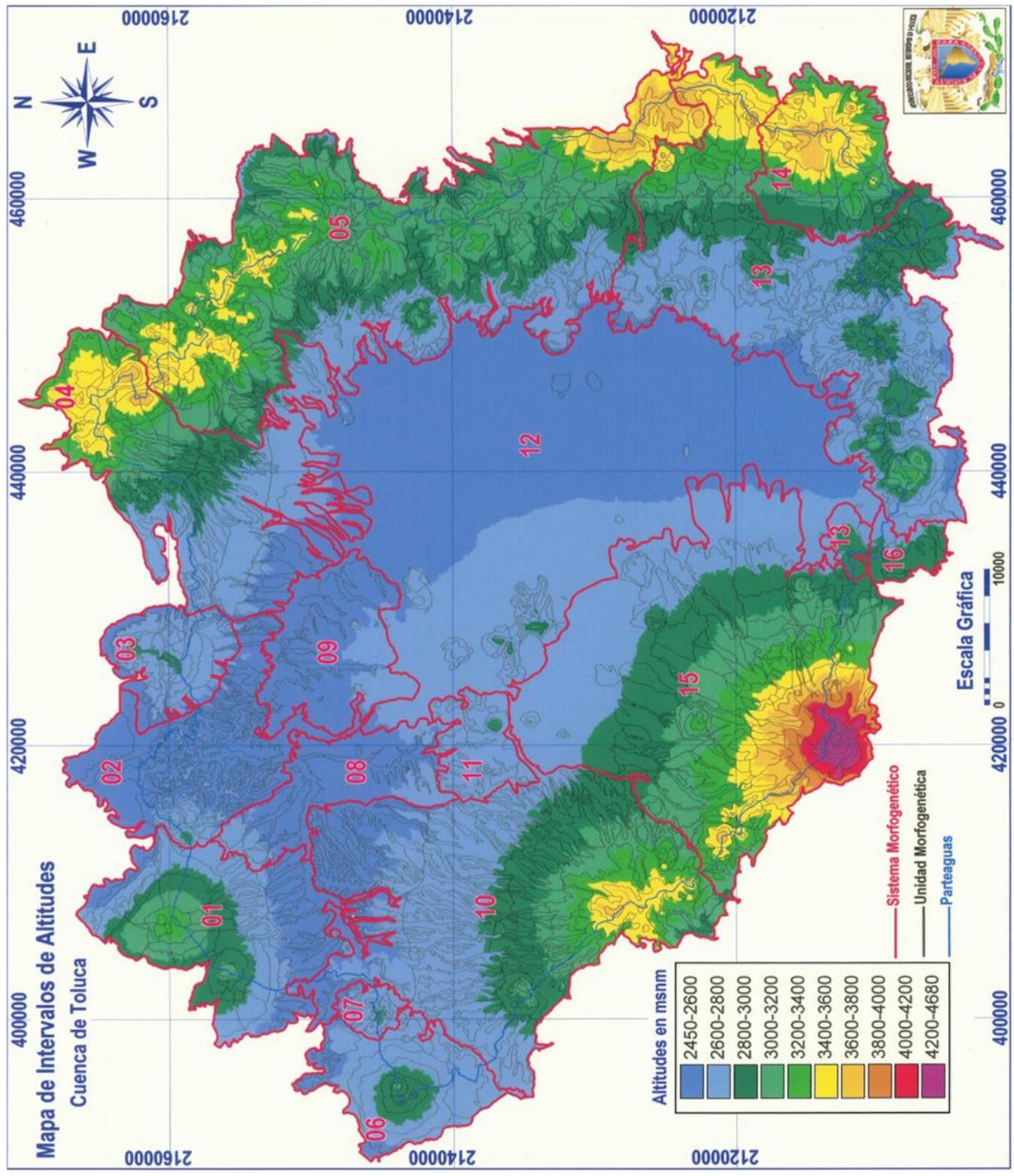


Fig. IV.3.4. Mapa altimétrico de la Región Cuenca de Toluca, mostrando dieciséis pisos altitudinales, diferenciando las máximas y mínimas alturas en dieciseis Sistemas Morfogénéticos (Díaz, 2001).

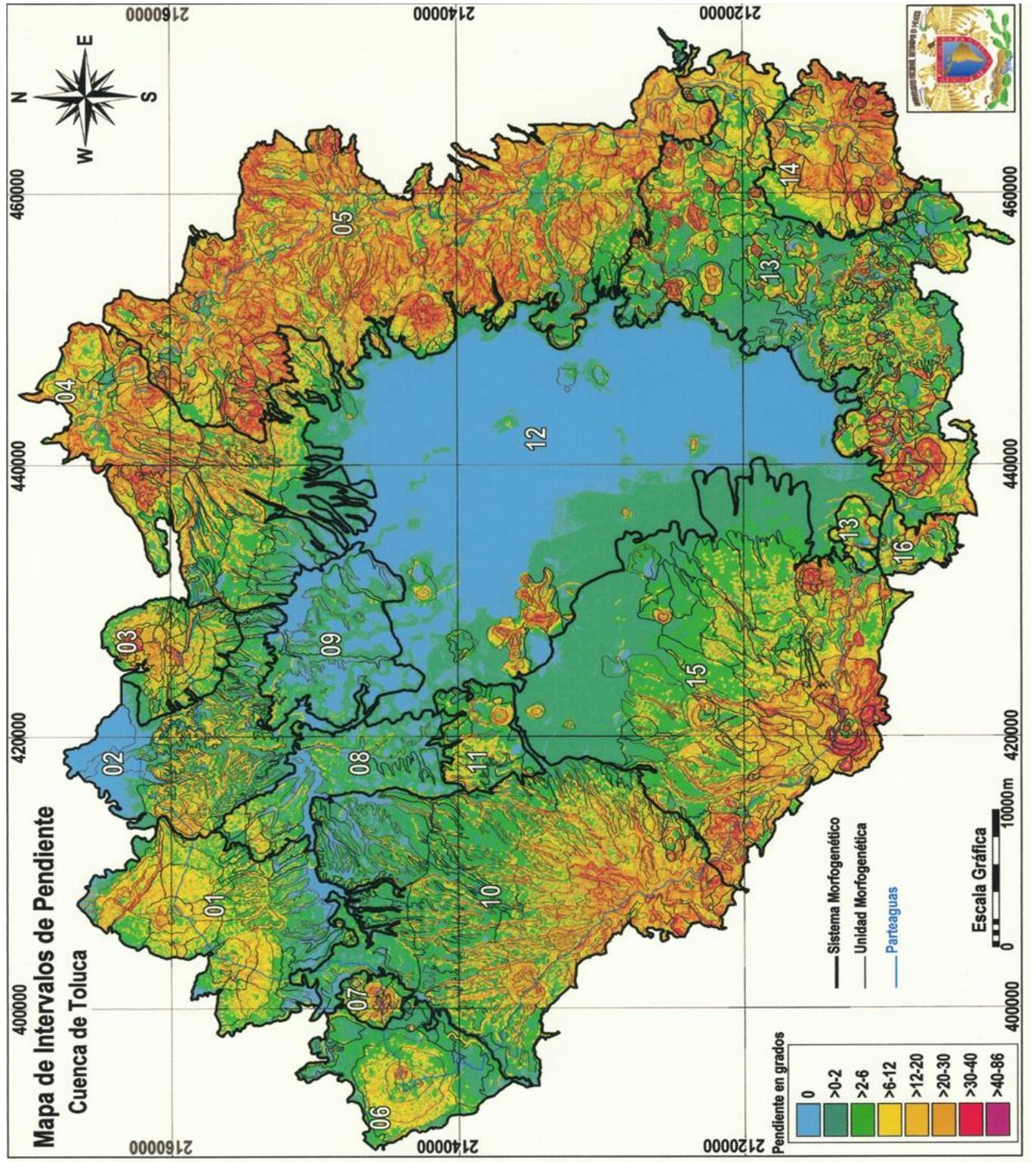


Fig. IV.3.5. Mapa de pendientes de la Región Cuenca de Toluca, mostrando ocho clases de pendientes, y los dieciseis Sistemas Morfogenéticos que se distribuyen en toda el área de estudio (Díaz, 2001).

MAPA GEOMORFOLÓGICO

Cabe recordar que éste mapa se hizo principalmente con la metodología de Verstappen (1991), para una mejor estructuración de toda la información bibliográfica y cartográfica obtenida en toda el área de estudio, así como para una mejor comprensión del relieve de la cuenca, y teniendo en cuenta que fueron 1727 las unidades morfogenéticas delimitadas, en ocho cartas topográficas 1:50,000, una extensión del área de estudio de 3,482.5 km², hubo una gran cantidad de información de geometría del relieve, por lo que fue necesario reagrupar el área de estudio en dieciséis Sistemas Morfogenéticos (Tabla IV.3.1.). Aquí se entiende como sistema morfogenético al conjunto de unidades morfogenéticas que pueden poseer distintos tipos de relieve, que tienen elementos litológicos diferenciados, que comparten una dimensión temporal semejante, y que tienen una estrecha relación y semejanza entre sí, y que además pertenecen a una unidad de relieve mayor (Morfoestructura), como volcanes poligenéticos, sierras, planicies, área de lomeríos, formaciones constituidas por flujos lávicos, y depósitos piroclásticos. La Cuenca de Toluca presenta una marcada heterogeneidad en el origen, tipos, geología, y geometría del relieve, esto como resultado de una sucesión de eventos volcánicos y actividades tectónicas estrechamente ligadas a la evolución estructural del CVM, durante el Terciario y el Cuaternario. Esta diversidad de relieve se manifiesta en las 1727 unidades morfogenéticas (UM) delimitadas en toda la cuenca.

SM (sistema morfogenético)	
1 Sierra Mazahua	9 Antonio Alzate
2 Río Lerma	10 San Antonio
3 Sierra Ixtlahuaca	11 Molcajete
4 Cerro el Rehilete	12 Planicie de Toluca
5 Sierra de las Cruces	13 Tenango-Xalatlaco
6 San Agustín	14 Cerro Tlalli
7 Sierra Colorada	15 Nevado de Toluca
8 Ignacio Ramírez	16 Atlatlahuaca

Tabla IV.3.1. Dieciséis Sistemas Morfogenéticos pertenecientes a la Cuenca de Toluca

Laderas de montaña.- Se les considera como una porción inclinada de la superficie terrestre de origen endógeno que delimita formas positivas y negativas. En este estudio

para determinar si eran o no Laderas de montaña, se utilizó el límite de la altura relativa visto en el capítulo III.

Lomeríos.- Son elevaciones del terreno con menor altura relativa que las Laderas de montaña, y delimitan formas positivas y negativas. Se delimitaron las unidades morfológicas, solamente por su altura relativa menor a 200 m.

Piedemontes.- Son las superficies marginales a las montañas de las que se distinguen por tener una pendiente y altura considerablemente menor, la forma y origen no siempre son iguales, ya que algunos pueden tener dorsos rectilíneos u ondulados y el origen puede ser exógeno acuamulativo o endógeno acumulativo.

Planicies.- Es una parte de la superficie terrestre parecida a un plano horizontal y de escasa inclinación, sus dimensiones son variadas y son de “origen” exógeno acumulativo.

En la siguiente tabla, IV.3.2., se muestra una clasificación obtenida de las unidades morfogenéticas, tomando en cuenta su tipo, origen y litología.

Tabla IV.3.2.
CLASIFICACIÓN DE UNIDADES MORFOGENÉTICAS

Tipo	Origen	Litología y Temporalidad
Laderas de montaña		
<p>(altura relativa <200 m)</p> <p>LMs (Laderas de montaña superiores).</p> <p>LMm (Laderas de montaña medias).</p> <p>LMi (Laderas de montaña inferiores).</p> <p>LM (Laderas de montaña no diferenciadas).</p>	<p>Endógeno volcánico y Endógeno volcano-tectónico.</p>	Flujos lávicos y depósitos piroclásticos compuestos por vulcanitas básicas e intermedias del tipo fenobasalto del Cuaternario.
		Abanicos volcánicos, lahares, flujos piroclásticos, ignimbritas, tobas, pómez y depósitos fluviales de la Formación Tarango del Plio-Cuaternario.
		Vulcanitas ácidas e intermedias en estratovolcanes menores con algunas lavas básicas del Plioceno.
Lomeríos		
<p>(altura relativa >200 m)</p> <p>La (Lomeríos altos: 150-200 m).</p> <p>Lm (Lomeríos medios: 100-150 m).</p> <p>Lb (Lomeríos bajos: 50-100 m).</p>	<p>Endógeno volcánico y Endógeno volcano-tectónico.</p>	Flujos Lávicos y depósitos piroclásticos compuestos por vulcanitas básicas e intermedias del tipo fenobasalto del Cuaternario.
		Abanicos volcánicos, lahares, flujos piroclásticos, ignimbritas, tobas, pómez, y depósitos fluviales de la Formación Tarango del Plio-Cuaternario.
		Tobas en depósitos de flancos del Pleistoceno.
		Lahares de la Formación Tepozteco.
		Vulcanitas ácidas e intermedias en estratovolcanes menores con algunas lavas básicas del Plioceno.
	Vulcanitas ácidas del Mioceno.	
	<p>Endógeno tectónico (Lomeríos bajos).</p>	Aluvial fluvio-lacustre de depósitos recientes y antiguos del Cuaternario.
Piedemontes		
<p>PMs (Piedemontes superiores).</p> <p>PMm (Piedemontes medios).</p> <p>PMi (Piedemontes inferiores).</p> <p>PM (Piedemontes no diferenciados).</p>	<p>Exógeno acumulativo y Endógeno volcánico acumulativo.</p>	Material aluvial del Cuaternario.
		Flujos lávicos y depósitos piroclásticos de vulcanitas básicas e intermedias del tipo fenobasalto del Cuaternario.
		Abanicos volcánicos, lahares, flujos piroclásticos, ignimbritas, tobas, pómez y depósitos fluviales de la Formación Tarango del Plio-Cuaternario.
		Tobas en depósitos de flancos del Pleistoceno.
		Lahares de la Formación Tepozteco.
		Vulcanitas ácidas e intermedias en estratovolcanes menores con algunas lavas básicas del Plioceno.
Vulcanitas ácidas del Mioceno.		
Planicies aluviales		
<p>PA (Planicie aluvial).</p> <p>PAI (Planicie aluvial inclinada).</p> <p>PAO (Planicie aluvial ondulada).</p>	<p>Exógeno acumulativo</p>	<p>Depósitos lacustres y aluviales jóvenes y antiguos formados por fragmentos de roca volcánica del tamaño de grava, arena, limo y arcilla del Cuaternario.</p>

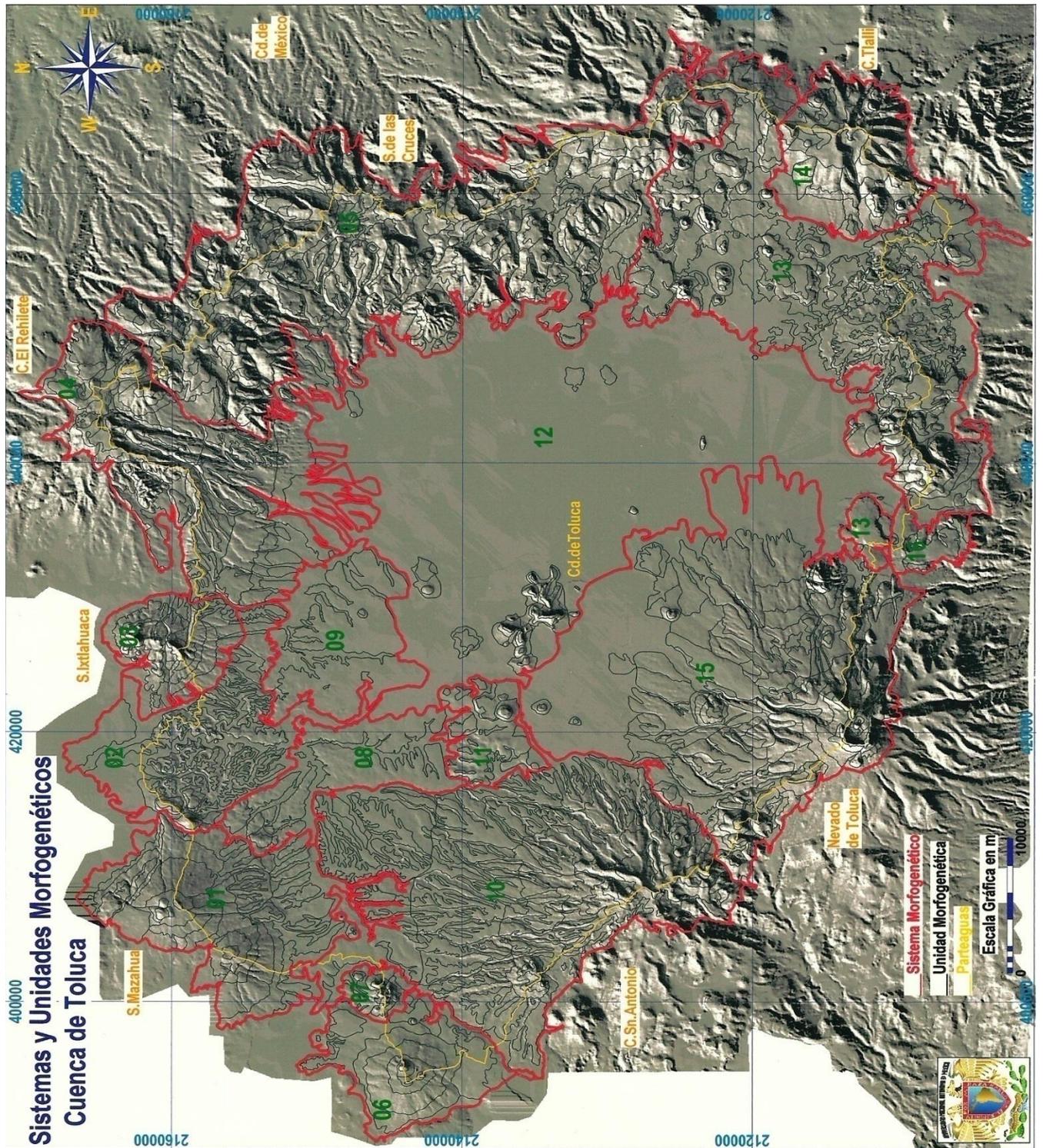


Fig. IV.1.5. Mapa Geomorfológico de la Región Cuenca de Toluca, mostrando las 1727 Unidades Morfogenéticas tanto del relieve endógeno modelado como exógeno dentro de los dieciseis Sistemas Morfogenéticos (Díaz, 2001).

- Riesgo ambiental

Castellanos *et. al.* (2010), hace un estudio del riesgo al que se encuentra expuesto el Valle de Toluca por una intensa explotación del acuífero como fuente de agua potable tanto para la Cd. De Toluca como para la Zona Metropolitana e incluso aunque con bajo porcentaje actualmente, para la Ciudad de México.

El acuífero del Valle de Toluca, se localiza en la Cuenca Alta del Río Lerma, localizada en la porción central del Estado de México, y de acuerdo a Castellanos *et. al. (op. cit.)*, se encuentra sometido a una intensa explotación debido a que es fuente de agua potable, la red de pozos del Sistema Lerma, fue diseñada y construida con la finalidad de abastecer de agua a una importante porción de la población, lo que ha traído como consecuencia descensos en los niveles piezométricos y, la desaparición o disminución de los caudales de manantiales. El objetivo principal del autor de éste artículo es establecer la hidrodinámica de las cargas hidráulicas y la hidrogeoquímica del acuífero del Valle de Toluca en su porción oriente, con el fin de establecer un modelo de funcionamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico del agua subterránea para conocer, identificar y distinguir los procesos que en ella participan.

Conclusiones del capítulo IV

Las geoformas encontradas en las tres regiones estudiadas, con apoyo de la Geomorfología expuesta en este capítulo, muestran analogía con las geoformas interpretadas en base a la Información Sísmica de las Cuencas Petroleras, principalmente las dos primeras regiones, la última región tiene cierta semejanza con algunas geoformas presentes en las cuencas aunque sean de origen litológico diferente. En el siguiente capítulo relativo a la “Geomorfología Sísmica”, se estudia a detalle la analogía encontrada entre las geoformas de las tres regiones y las tres cuencas petroleras.

CAPÍTULO V. INTERPRETACIÓN DE GEOMORFORMAS EN INFORMACIÓN SÍSMICA DE CUENCAS PETROLERAS, (GEOMORFOLOGÍA SÍSMICA)

V.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA GEOMORFOLOGÍA Y DE LA “GEOMORFOLOGÍA SÍSMICA”

Esta es una pequeña reseña histórica de la concepción de Geomorfología para la escuela estadounidense y para la escuela alemana como propiciadoras de los pensamientos de ésta disciplina, y que a su vez favorecieron a la evolución de la misma, esto permitirá saber el por qué es considerada la “Geomorfología Sísmica” por algunos geocientíficos como un concepto y no como una rama de la Geomorfología, ya que en dado caso pertenece a la Geomorfología Aplicada, en donde éstos estudios de exploración petrolera ya se habían empleado a través de métodos geomorfológicos estructurales y paleogeomorfológicos desde el siglo pasado en la ex Unión Soviética (Aristarjova 1979, en Lugo 1988). La importancia de exponer estos antecedentes facilitaran entender el por qué de algunas probables diferencias de la escuela estadounidense con la escuela rusa y europea, de donde se basó la interpretación geomorfológica de ésta investigación para las tres Regiones antes mencionadas; no obstante, en ningún momento se pretende con esto erradicar el término de *Geomorfología Sísmica*, término que ha sido favorecido y empleado por algunos geocientíficos y que seguirá en uso.

El geógrafo estadounidense William Morris Davis (1850-1934), hizo la primer organización de un sistema coherente con conceptos aplicables al estudio del relieve, desde éste punto de vista, ha de ser considerado como el fundador de la Geomorfología; sin embargo, el innegable éxito de sus concepciones iniciales no debe hacer olvidar las importantes objeciones que desde un principio éstas plantearon (Coque, 1984). Sus investigaciones fueron eminentemente teóricas, enfatiza con fuerza su método deductivo, se enfocó en los ciclos de erosión en la “Teoría del ciclo”, de donde deduce que hay tres

etapas: juventud, madurez y senectud. Para lo cual él sugirió que la erosión se da de arriba abajo (Muñoz, 1995).

Esta teoría fue esencialmente criticada por Albrecht Penck y Walter Penck; éste último criticó severamente el ciclo de la erosión que proponía Davis, a lo cual él argumentó que la erosión en la naturaleza no se daba de manera homogénea, sino que era fuertemente influenciada por el clima y el tectonismo, dando así mayor aporte a la naciente ciencia de la Geomorfología. Por lo que Davis se vio presionado a cambiar algunos argumentos dado a la veracidad de las críticas, pero quienes hicieron los más grandes cambios fueron sus discípulos.

Por otra parte, el geógrafo alemán Albrecht Penck (1858-1945), perteneciente a la corriente naturalista germana con influencia evolucionista sostiene, que el método geomorfológico consiste también en describir, clasificar e interpretar el origen y la evolución, de las formas que presenta la superficie terrestre, *(éste aspecto en lo personal, lo considero no solo como un gran aporte a la ciencia geomorfológica, sino el establecimiento de las bases para cualquier trabajo de geomorfología)*, además considera que para ello, es preciso el establecimiento previo de una taxonomía lo más completa posible de esas formas, la elaboración de clasificaciones basadas en su configuración fisonómica y la consideración de factores no estrictamente geomorfológicos, como el clima y su evolución o la vegetación pasada y actual (Penck, A. 1894 en Muñoz, *op.cit.*). El planteamiento de Penck es más bien un riguroso sistema de trabajo que un método y con sus resultados se podría formular un paradigma teórico general a largo plazo. Por el contrario, la metodología de Davis es cerrada, completa y afirmativa. En consecuencia, la geografía física germana se centró en la delimitación de unidades fisonómicas, en clasificaciones detalladas y en explicaciones conectivas del relieve con los demás elementos o fenómenos de la superficie del planeta (Gómez, 1982 en Muñoz, *op.cit.*).

De ésta manera se consolida como tal la Geomorfología con Davis y el hijo Walter Penck. La primera representa a la escuela estadounidense y la posterior a la escuela alemana, representada por Albrecht y Walter Penck. Entre ambas se desata a comienzos del siglo

XX, una viva, activa y brillante polémica que llevo al desarrollo, consolidación y la creación de renovados horizontes epistemológicos de la geografía a nivel mundial (Muñoz, 1995.).

Gracias a W. Penck, se origina la corriente Geomorfología Climática creada en la escuela alemana, y posteriormente la Geomorfología Estructural fuertemente impulsada por la escuela rusa, con exponentes de la talla de Natalia Kostenko, Spiridonov, entre otros.

Finalmente se destaca de todo esto, que la influencia de Penck, padre e hijo, se dio en gran parte en Europa y Rusia, en donde lo básico para cualquier estudio geomorfológico es tomar en cuenta el origen, tipo, dinámica, evolución, y temporalidad.

Aunque para algunos Geocientíficos, la *Geomorfología Sísmica* es tomada como una rama de la Geomorfología, viéndolo desde el punto de vista Geomorfológico tomando en cuenta la escuela rusa y europea en realidad como tal no lo es; ya que no se logra ver el análisis de completo de las geofomas obtenidas y queda simplemente en una descripción, una caracterización geométrica de las formas sobre paleorrelieves sedimentarios.

V.2. GEOMORFOLOGÍA SÍSMICA

Como ya se mencionó desde el primer capítulo, la Geomorfología Sísmica es un concepto joven y su aporte es valioso en ambientes sedimentarios con morfologías ya sea de barrancos, deltas, meandros, entre otros, que son de interés petrolero. El riesgo económico en la exploración petrolera ha sido una constante inquietud ya que puede llegar a ser fatal en algunos casos debido a que se pone en juego capital humano, financiero, tiempo, entre otros recursos. Para ampliar la seguridad en la exploración de yacimientos de hidrocarburo, en especial los geofísicos, han visto a la geomorfología sísmica como una valiosa herramienta con la que pueden lograr con mayor facilidad una exploración acertada y por consiguiente una explotación del hidrocarburo apto, por lo que es una técnica que complementa muy bien a los estudios de prospección petrolera, para disminuir el riesgo económico.

Son necesarias las herramientas de software para la interpretación de geoformas de un cubo sísmico, que con atributos combinados con filtros en una sección, se puede obtener un “Time Slice” que son los datos en planta o bien ver los datos en perfil en el caso de un “Cross Line”. Los atributos junto con los filtros permiten obtener una mejor imagen y por ende una mejor interpretación. El Time Slice es la fracción de tiempo, un intervalo fijo de tiempo que se asigna a cada usuario o programa en un **sistema** multitarea o de tiempo compartido.

Para Posamentier en Geological Society (2007), la Geomorfología Sísmica puede ser definida como la aplicación de técnicas analíticas pertenecientes al estudio de las formas de la Tierra y al análisis de antiguas superficies geomorfológicas sepultadas, reflejadas por datos sísmicos en 3D, además es importante tener conocimiento de la estratigrafía sísmica, ya que juntas representan el estado del arte, dentro de los datos sísmicos en 3D. La llave para cada uno de estos análisis es buscar y reconocer geológica o geomorfológicamente patrones significativos en el plano de vista o en una sección, tales patrones pueden tomar la forma de un río o canales de agua profunda, depresiones y deslizamientos, cordilleras de sedimentos de arrecife, y parches de escolleras carbonatadas por mencionar algunos (Geological Society, *op. cit.*).

En geomorfología sísmica, la interpretación de geoformas se hace predominantemente a través de datos sísmicos tridimensionales, es una disciplina en rápido desarrollo que facilita el estudio de la superficie del subsuelo usando imágenes. Una variedad de técnicas analíticas es empleada para imaginar y visualizar elementos depositados y otras características geológicamente significativas, (Geological Society, *op. cit.*).

V.3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA GEOMORFOLOGÍA EN LA INFORMACIÓN SÍSMICA

Generalmente el estudio del subsuelo para la exploración de hidrocarburos se hace a través de la exploración sísmica, que consiste en la generación de ondas sísmicas en superficie por medio de una fuente vibratoria que se propaga hacia el interior y en su viaje se encuentra con estructuras de características acústicas diferentes, generando

reflexiones que se registran en la superficie mediante geófonos, almacenando información del subsuelo. Posteriormente estos datos se procesan para generar el modelo, el cual se visualiza en un software, la información debe ser analizada por uno o varios expertos para determinar la existencia de estructuras y/o formas geológicas asociadas a la presencia de hidrocarburos, siendo uno de los principales procedimientos, la inspección visual.

Sin embargo, no todos los rasgos geomorfológicos se van a encontrar en información sísmica como ya se mencionó anteriormente, la geomorfología sísmica está enfocada a ver canales fluviales, meandros, deltas, talwegs, depresiones, cordilleras de sedimentos etc, principalmente, por ser formas que mejor reflejan las condiciones necesarias para fines de exploración petrolera. Son formas sepultadas por material sedimentario que pertenecen normalmente a un paleo ambiente lacustre o a un ambiente deposicional, y sobre todo que se encuentren a una escala relativamente menor, en la que abarque una amplia área para poder apreciar las geoformas existentes. Es decir, que para lograr identificar y delimitar las geoformas con la información sísmica, es necesario trabajar con escalas menores que permitan ver una extensa área y buscar detalladamente las zonas útiles en las que sea posible encontrar éste tipo de ambientes. Estos estudios de geomorfología sísmica en realidad pueden estar más cerca de la geomorfología regional, en donde se estudian amplios territorios, generalmente cartografiables en escalas medias o pequeñas (1:250,000, 1: 2,000,000).

V.4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SOFTWARE EMPLEADOS EN INFORMACIÓN SÍSMICA

Para esta investigación fueron utilizados los siguientes software: OpendTect, Petrel, Landmark, y Geoprobe. En realidad todos ellos tienen la misma lógica en la manipulación del programa, y cuentan con los mismos atributos cuyas características generales también son similares.

A continuación se dan los rasgos sobresalientes de cada uno de los software usados.

OpendTect

Es un sistema de software de interpretación sísmica para el procesamiento, visualización e interpretación de varios volúmenes de datos sísmicos, y una herramienta para el desarrollo de la interpretación. El procesamiento de datos y la visualización son rigurosamente integrados en el sistema OpendTect, en este último se pueden mover libremente los elementos para analizar los datos de forma interactiva ya sean datos de volúmenes almacenados o los datos que se van calculando sobre la marcha, (dGB, Beheer, B.V. 2002-2009).

Es de fácil acceso, además de que se contó con él y se tuvo la oportunidad de manipularlo en el Instituto Mexicano del Petróleo más tiempo que los otros programas para datos de información sísmica, se hicieron algunas pruebas en la búsqueda de imágenes favorables para la interpretación geomorfológica y éstas fueron obtenidas a través de la combinación de atributos y filtros este último es un método para atenuar el ruido en datos sísmicos.

Un atributo es una cantidad derivada de una entrada sísmica, los atributos son definidos en OpendTect por un nombre, valor y posición en el espacio 3D, en la línea, cruzando la línea y Z (2WT o profundo). Los atributos pueden ser calculados desde un trazo simple, multi trazo, y entrada de multi volumen, Ellos pueden ser dirigidos y/o encadenados. Las cualidades dirigidas son atributos multi trazos en el cual los segmentos del trazo son encontrados por lo siguiente un pre azimuth profundo calculado. Atributos encadenados son atributos derivados de otros atributos, por ejemplo, la Similaridad y la Energía que son atributos separados y que pueden ser encadenados para calcular la similaridad de la energía usando “el atributo de Posición”.

Hay algunos atributos que su proceso de cálculo es tardado, esto depende sobre todo del tipo de atributo, de cuantas fases se consideren, un ejemplo de ello es el multi trazo (coherencia), atributo que normalmente toma más pasos que un trazo simple (instantáneo). Similarmente los atributos con dirección tardan más tiempo en el tratamiento, así que cada vez que la valoración sea exhibida en la escena, ésta es

calculada previamente. Si el usuario está de acuerdo con el resultado de los atributos esto puede dar por hecho la salida de la creación sísmica. La cualidad se puede crear a lo largo del horizonte, siguiendo los mismos pasos descritos arriba, para insertar y desplegar los atributos (como se muestra en la Fig. V.4.1.). El ejemplo de coherencia se procesa a lo largo de un horizonte. Este atributo normalmente tarda tiempo (dependiendo de la cantidad de rastros implicados). Así que el usuario se puede beneficiar en la marcha, de guardar los resultados que después pueden ser retirados, (dGB, Beheer, B.V. 2002-2009).

La imagen muestra el resultado del atributo de coherencia calculada, salvando el atributo del horizonte como superficie de datos.

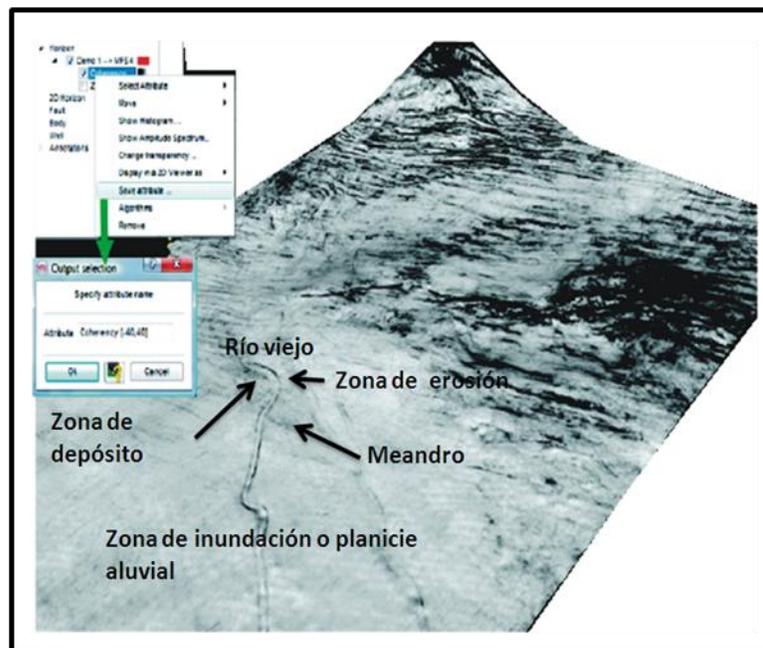


Fig. V.4.1. Atributo de Coherencia calculada, (dGB, Beheer, B.V. 2002-2009)

Petrel

Petrel es un software de la compañía Schlumberger que se encarga, entre otras cosas, de representar la estructura geológica del yacimiento. Permite que el usuario interprete datos sísmicos, construya los modelos del yacimiento, visualiza los resultados de una posible estimulación y diseña estrategias de explotación para maximizar la

producción del yacimiento. En realidad Petrel fue diseñado para ser más que un constructor de modelos geológicos, su verdadera intención es eliminar la necesidad de utilizar muchas herramientas y ser un software que conduzca la información sísmica hasta los resultados de una simulación. La interpretación precisa de fallas, horizontes y geo cuerpos constituyen una parte crucial del flujo de trabajo de la interpretación sísmica, por lo cual Petrel continúa ofreciendo ventajas a los usuarios al incluir rastreo de volúmenes múltiples, opciones de rastreos doble, rastreo interactivo en 3D y las proyecciones mejoradas de fallas.

Una vinculación precisa entre la información sísmica y los datos de pozos es crucial para las operaciones de exploración y caracterización de yacimientos. Petrel incluye funcionalidades de calibración interactiva del registro sísmico, entre otras ventajas que simplifican el flujo de trabajo de apilamiento de velocidades y posibilita un mayor control de la calidad de los datos y la capacidad de edición para lograr un mejoramiento de la precisión y producir una imagen precisa del subsuelo. Con respecto a la sísmica, Petrel 2009 ofrece nuevas mejoras del algoritmo de inversión genética completamente integrado, permitiendo que geólogos y geofísicos generen volúmenes de impedancia en forma directa dentro de la aplicación Petrel y, con las opciones de auto rastreo de horizontes, mejorar el proceso de aislamiento y extracción de geo cuerpos, a fin de lograr una mejor caracterización de yacimientos (Schlumberger, 2011).

Landmark

El software y los servicios integrados de Landmark, producto de Halliburton, ayudan a la industria del aceite y gas, información de suma importancia dentro del conocimiento en la búsqueda de hidrocarburos, de ésta manera los usuarios pueden hacer una visualización del futuro, de lo que requieren, pueden ver a mayor profundidad, a mayor seguridad, y comprender mucho mejor. Por lo que ellos pueden tomar mejores decisiones con menor riesgo (Halliburton, 2010).

Este software combina una forma sencilla de uso, herramientas que son efectivas en el análisis, algoritmos flexibles, infraestructura y herramientas de producción. Además se usa para múltiples aplicaciones desde el procesamiento de Campo y Control de Calidad en los proyectos de reprocesamiento, orientados en la Interpretación para compañías petroleras y compañías de servicios de procesamiento sísmico (Dataseismic, 2010).

Geoprobe

GeoProbe acelerará los flujos de trabajo desde la exploración a nivel de la cuenca, a través de análisis más detallados de prospectos y del yacimiento. Los algoritmos de procesamiento paralelo del software GeoProbe proporcionan la posibilidad de efectuar cálculos de alto desempeño en múltiples áreas tales como seguimiento (tracking) cálculos de atributos y visualización interactiva de volumen. El ambiente dinámico de visualización de volúmenes en 3D permite a los geocientíficos ver sus datos en formas que simplemente no eran posibles en el pasado. El resultado es un tiempo de interpretación más rápido comparado con las metodologías de “línea por línea” tradicionales.

Esta tecnología revolucionaria mejora la representación en imágenes estratigráficas y de fallas. Las poderosas técnicas de visualización de volúmenes mejoran el reconocimiento visual de patrones, haciendo que la identificación de las estructuras geológicas y del potencial de hidrocarburos sea mucho más obvia e intuitiva. Los seguidores automáticos interactivos permiten la construcción de marcos estructurales precisos dando como resultado objetivos de perforación definidos rápidamente, exactos y optimizados, (Landmark Graphics Corporation, 2007).

Análisis de atributos.- El software GeoProbe ha sido diseñado desde el principio como un sistema de interpretación de múltiples volúmenes, permitiendo a los intérpretes maximizar el valor de los datos sísmicos, (Landmark Graphics Corporation, *op. cit.*).

Las funciones clave incluyen:

- Un conjunto de cálculos de atributos de volumen.
- Cálculos de volumen utilizando múltiples cpu.
- Cálculos en tiempo real y despliegue de atributos

- Filtro y fusión de horizontes.
- Estrechos enlaces con herramientas de terceras partes generadoras de atributos para cálculos avanzados.
- Computación de multitareas de 26 atributos sísmicos de volumen.
- Los atributos incluyen volúmenes de: Fase, frecuencia, amplitud, atributos combinados y muchos más.

A continuación se muestran los conceptos de cada uno de los atributos que se emplean en los software para la interpretación de la información sísmica. Es conveniente comentar que los atributos empleados permitieron en algunos casos ver con claridad estructuras sepultadas como fallas, canales de ríos, deltas, depresiones, deslizamientos, cordilleras de sedimentos, ojos de buey, talwegs principalmente, esto depende en gran medida de la calidad de la información sísmica, pues hubieron imágenes en las que fue necesario manipular en repetidas veces con diferentes atributos y filtros; y no siempre se consiguió el detalle deseado.

Atributos y Filtros en los software

En realidad los filtros son un método para disminuir el ruido que pudiera existir en los datos sísmicos.

Coherencia.- Atributo Multi-trazos atributo que enfatiza las áreas de la más alta discontinuidad. Facilita observar lineamientos estructurales como fallas, fracturas, etc., además de ver probables intrusiones de cuerpos con diferente litología.

Convolve.- Atributo que regresa un filtro de respuesta

Delta Resample.- Atributo que permite un alineamiento residual de volúmenes sísmicos

Energía.- Respuesta de un atributo que regresa la energía de un segment de trazo. Permitted visualizar la heterogeneidad en el material sedimentario sepultado.

Evento.- Atributo que cuantifica una forma de evento o distancia relativa a un próximo evento

Fingerprint.- Atributo que calcula la similaridad entre un vector de usuario definido de atributos y el equivalente al vector tomado de cada posición en un cubo

Frecuencia.- Respuesta de un atributo que regresa a las propiedades de frecuencia. Al igual que la Energía, éste permitió ver la heterogeneidad de material sedimentario.

Filtro de frecuencia.- Atributo que regresa datos de filtro usando FFT o tipos de filtro Butterworth

GapDecon.- Atributo que apunta a repeticiones atenuadas de reflexiones primarias (múltiples)

Horizonte.- Atributo que permite cálculos avanzados sobre horizontes

Instantaneo.- Atributo que regresa un atributo instantáneo

Match Delta.- Atributo que extrae a la vez cambios entre eventos similares dentro de diferentes volúmenes sísmicos.

Mathematicas.- Atributo que regresa el resultado de un usuario definido en expresión matemática

Posición.- Atributo que regresa algún atributo calculado en el lugar donde otro atributo ha sido mínimo, máximo o mediano dentro de un volumen pequeño

Prestack.- El atributo pre-stack puede ser usado para cualquier extracto estadístico sobre el gathers y su amplitud, o para extraer atributos AVO

Referencia.- Atributo que regresa las definiciones de la posición extraída

Cambio de la referencia.- Atributo que mueve la posición extraída en el espacio 3D

Escalamiento.- Atributo usado para scalar la amplitud

Similaridad.- El atributo Multi-trace regresa trazo por trazo a propiedades similares. Deja ver particularidades del material sedimentario, la forma de acomodamiento, como deltas, etc.

Descomposición espectral.- El atributo de Frecuencia regresa a la amplitud espectral (FFT) o waveletcoefficients (CWT). Posibilita visualizar las capas de sedimentos sepultados, principalmente en el Time Slice, así como inferir la incursión de estructuras diferentes a los sedimentos sepultados.

Filtro del ventilador de la velocidad.- Atributo que regresa energía con aparentes velocidades dentro de un rango Min/Max especificado.

Estadísticas de volumen.- Atributo que regresa las propiedades estadísticas

V.5. EJEMPLOS DE IMÁGENES DE LAS CUENCAS PETROLERAS EN LOS SOFTWARE DE INFORMACIÓN SÍSMICA

Como se menciona anteriormente en el capítulo III, se utilizaron los siguientes atributos sísmicos para cada una de las zonas con información sísmica: Coherencia, Descomposición espectral, Energía, Frecuencia, Semblanza, Similaridad y Varianza. En realidad no hay atributos que destaquen de manera única en la interpretación de geoformas, pues todos ellos de alguna manera permiten la visualización en mayor o menor grado. Es importante mencionar que en general, para obtener una mejor interpretación geomorfológica son de gran utilidad las imágenes pancromáticas blanco y negro; sin embargo, en estas imágenes sísmicas existieron algunos ejemplos en los que fue posible interpretar la morfología aún en diferentes colores.

La interpretación geomorfológica se hizo de manera intuitiva en cada uno de los Time Slices y Cross Line que se muestran en las siguientes figuras, esto fue de acuerdo a la geología de cada cuenca y a lo que se percibía según la geometría de las formas proporcionada por la información sísmica. Por otra parte cabe destacar que aunque se procuró ejemplificar las imágenes sísmicas lo más cercano posible a una interpretación geomorfológica, no siempre fue esto posible. Pues hay algunas imágenes que aunque se probó con diferentes atributos y colores para lograr una mejor deducción en la geomorfología no en todos los casos resultó así, es decir, no se logró tener en todas las imágenes rasgos morfológicos. En parte es posible que esto sea por la deficiente calidad de información sísmica, así como a las características geológicas propias de cada una de las diferentes zonas petroleras interpretadas, (Cuenca de Chicontepec, Cuenca de Burgos y Cuenca de Sur de México), y no solo por el juego de atributos sísmicos y colores empleados.

Cuenca de Chicontepec

En ésta zona vimos la sísmica en el software OpendTect con los atributos mencionados anteriormente, cabe destacar que en la Cuenca de Chicontepec, de manera general, fue menos fácil realizar la interpretación de las imágenes, ya que no en todos los casos resaltaron de manera clara las formas de relieve, pese a las bondades que presenta este software y posiblemente por la baja calidad de la información sísmica. Es por ello que la interpretación en algunos casos es de una manera escasa o forzada.

Coherencia

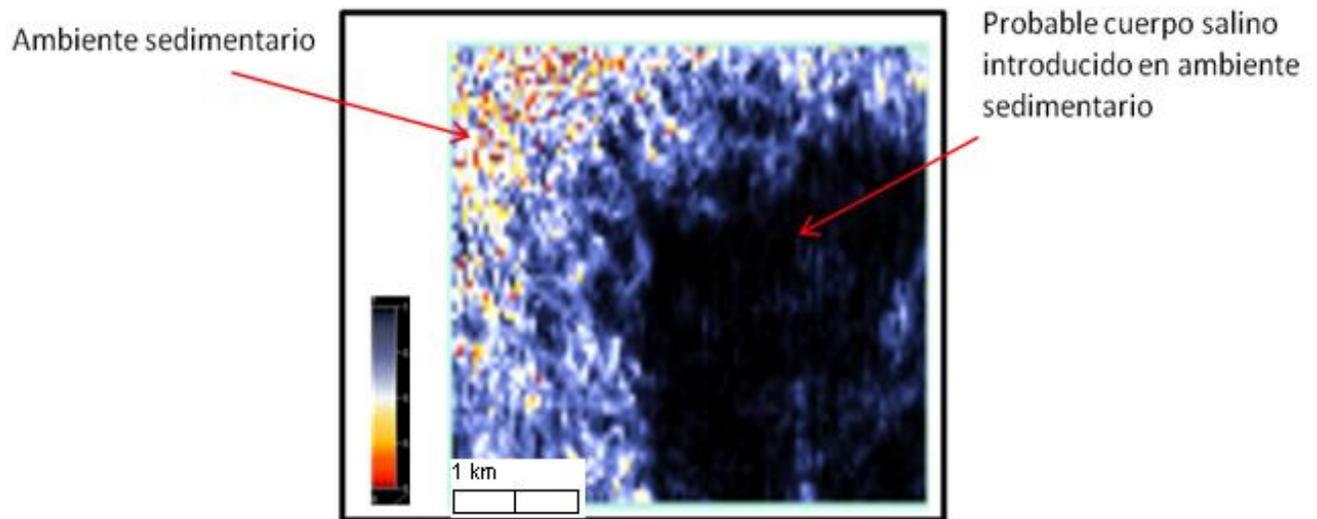


Fig. V.5.1. Imagen con atributo de coherencia mostrando probable intrusión de cuerpo salino en ambiente sedimentario

En esta imagen (Fig. V.5.1.), con el atributo de coherencia, muestra los colores cálidos dispersos en la esquina superior izquierda, haciéndose más densa la información con colores fríos al centro de la imagen, cubriendo casi en su totalidad la mitad derecha de la ventana. Aquí no es posible ver con claridad la probable geometría del relieve a interpretar morfológicamente hablando, quizá lo que aquí se encuentra es un cuerpo de diferente composición geológica como sal, introducido en el ambiente sedimentario.

Descomposición Espectral

Al igual que en la imagen anterior no se aprecia de manera clara una probable morfología en la imagen Fig. (V.5.1.), sin embargo se percibe una diferencia de datos manifestados por la diversidad de colores donde se presentan dos clases de colores homogéneos. A la izquierda de la imagen los colores fríos se muestran concentrados del centro disminuyendo hacia la porción inferior de la ventana, y los colores cálidos se ubican en la mayor parte de la imagen, a la periferia de los colores fríos.

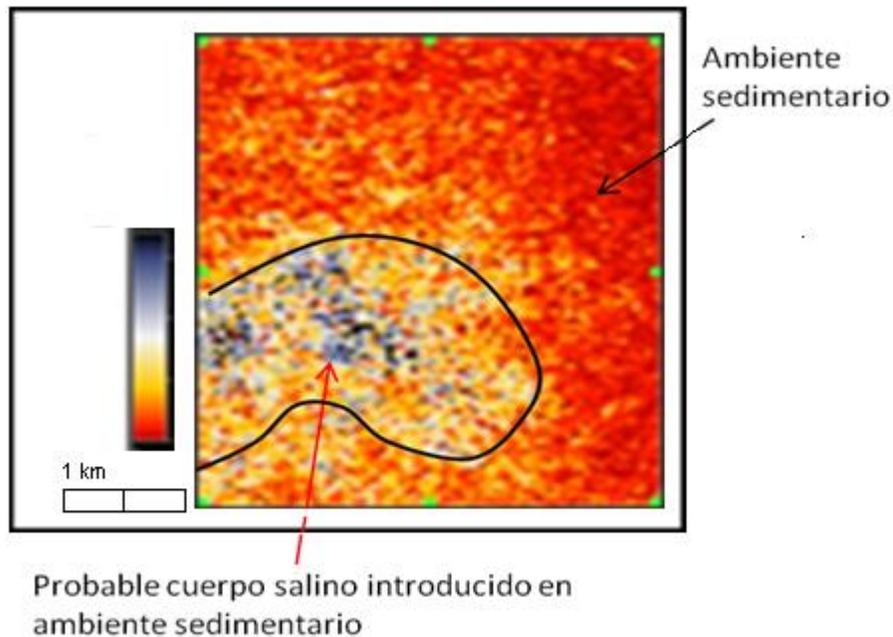


Fig. V.5.2. Imagen con atributo de coherencia mostrando probable intrusión de cuerpo salino en ambiente sedimentario

Energía

La imagen Fig. V.5.3. que se presenta aquí en blanco y negro, muestra lo que pudiera ser una incipiente interpretación morfológica, de donde se puede deducir de manera deliberada que hay dos tipos de morfología, en la parte superior centro de la imagen se observa cierta rugosidad y en la porción inferior la morfología es completamente diferente mostrando una zona plana, lo que pudiera ser por falta de información sísmica.

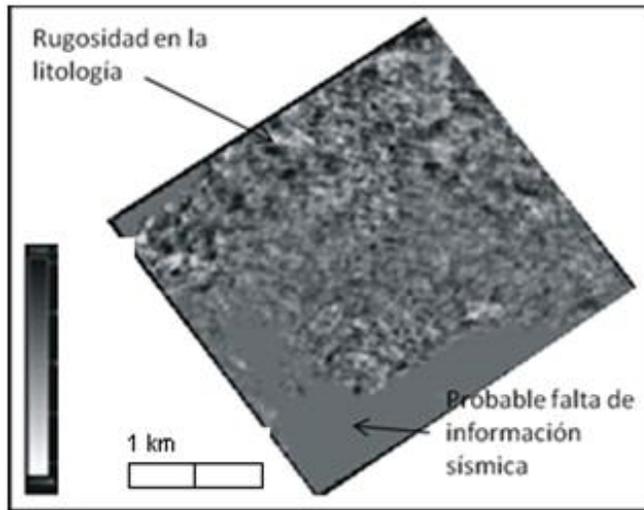


Fig. V.5.3. Imagen que muestra dos tipos de morfología resultado de una probable falta de información sísmica

Frecuencia

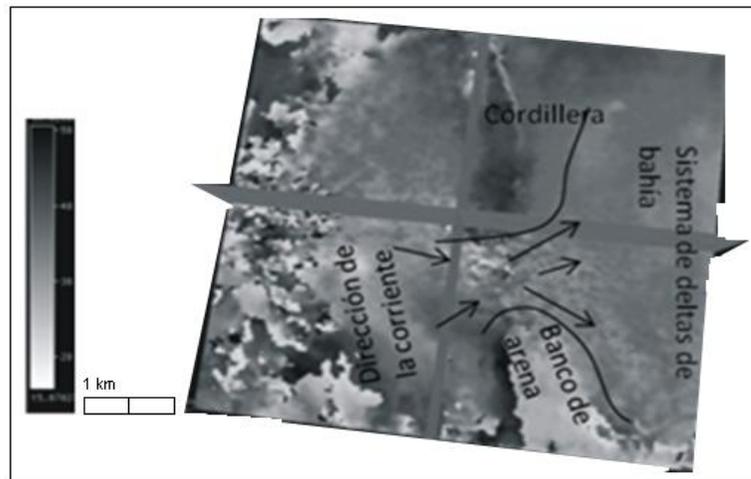


Fig. V.5.4. Morfología resaltando una especie de cordillera fragmentada por un probable sistema de deltas de bahía

En la figura Fig. V.5.4. en blanco y negro, se aprecian en la morfología dos clases de formas aunque muy burdas, de manera general, se puede decir que se divide a lo largo en dos partes iguales por una especie de una pequeña cordillera y un banco de arena, entre estas dos formas hay un sistema de deltas de bahía. En la porción superior de la imagen, la morfología de la porción derecha es más homogénea, aparentemente plana y

hacia la izquierda las formas son mas heterogéneas mostrando una mezcla de colores blanco y negro que interpretan mayor diversidad de datos en la imagen.

Normal

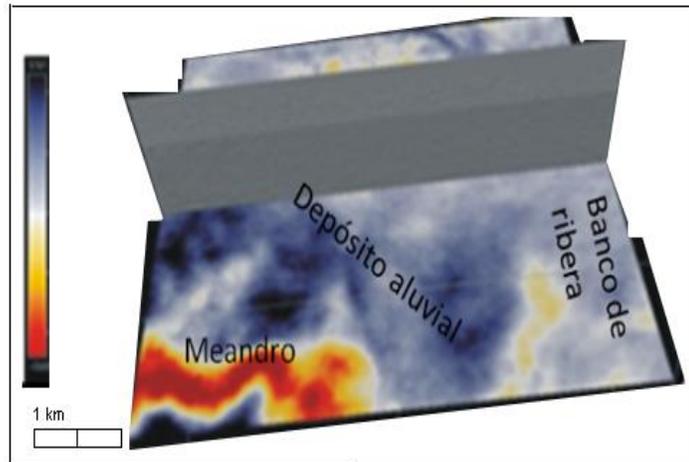


Fig. V.5.6. Morfología mostrando un ambiente lacustre, resaltando geoformas representativas al medio

En ésta imagen a color Fig. V.5.6., se aprecia una morfología más clara a diferencia de las imágenes anteriores, donde se observa un ambiente lacustre. La forma de un meandro en la porción inferior del lado izquierdo, y una cierta homogeneidad en la mayoría de la imagen caracterizada por colores fríos, en estos hay un depósito aluvial o llanura aluvial originado por la acción de corrientes fluviales, y un incipiente banco de ribera formado al inundarse la llanura aluvial.

Similaridad

La última imagen a blanco y negro Fig. V.5.7., de la Cuenca de Chicontepec, destaca al margen izquierdo colores más claros infiriendo un depósito de material sedimentario, por la forma podría tratarse de un delta y del centro hacia la derecha colores más oscuros sería una llanura aluvial, mostrando casi a la mitad del cuadrante un pequeño banco de arena entre una barra litoral en desarrollo, esto a su vez puede ser un ambiente lacustre o una interacción de lacustre y marino.

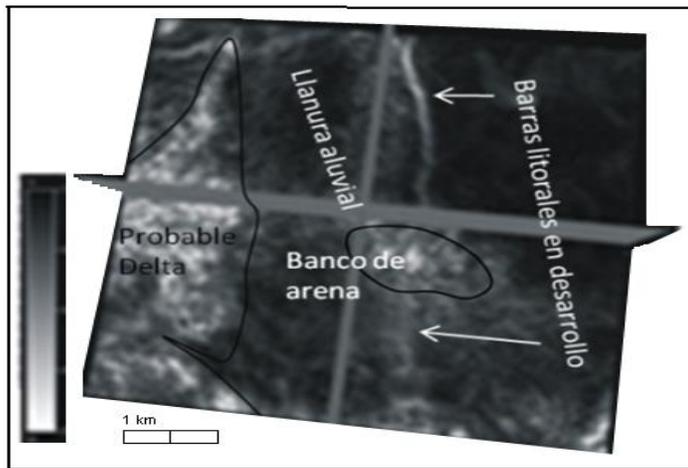


Fig. V.5.7. Geformas de depósito sedimentario en un ambiente lacustre o marino

Cuenca del Sur del Golfo de México

En ésta zona vimos la sísmica en el software Petrel y con menos atributos de los arriba mencionados; sin embargo, a diferencia de la Zona anterior aquí se logra en la mayoría de los casos una mejor interpretación geomorfológica de las imágenes presentadas, así como una mayor semejanza con lo visto en campo en la Geomorfología de la Región “Formación El Doctor” en Querétaro. Posiblemente además de los atributos empleados en Petrel, también influyeron las características geológicas propias de la zona así como una mejor calidad de la información sísmica. Lo más importante que se observó en la Cuenca del Sur del Golfo de México es que se encontraron imágenes con una clara similitud a lo que se vio respecto a la cabalgadura presente en la Formación El Doctor, estado de Querétaro.

Descomposición espectral

En las imágenes Fig. V.5.8. a blanco y negro, tiene una cierta similitud con las imágenes anteriores de la Cuenca de Chicontepec, en las que solamente se aprecian ligeros rasgos, manchas que indican una probable concentración de información pero que en realidad son deficientes para lograr una interpretación morfológica adecuada; sin embargo pudiera interpretarse un ambiente lacustre quizá con alta turbulencia donde las

probables corrientes de agua tuvieron una dirección y velocidad variada en cada punto, aunque ciertamente no se aprecian con claridad formación de remolinos característicos de ésta actividad, hay probable evidencia de depósito sedimentario.

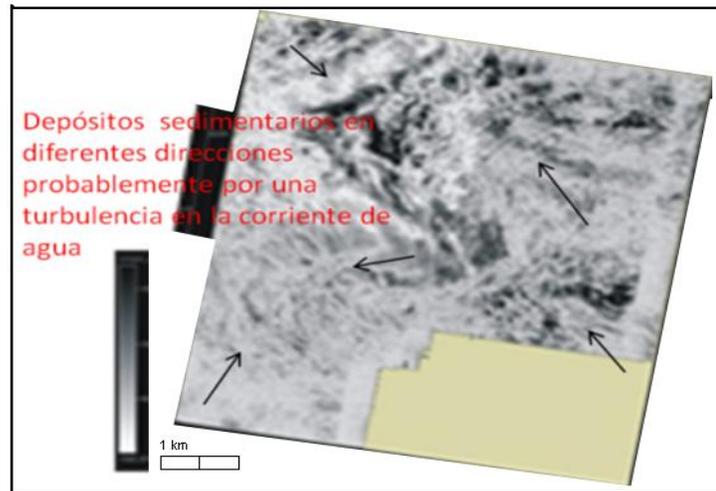


Fig. V.5.8. Imagen con escasa información sísmica adecuada para interpretar, mostrando un probable ambiente lacustre con diferentes direcciones de corrientes

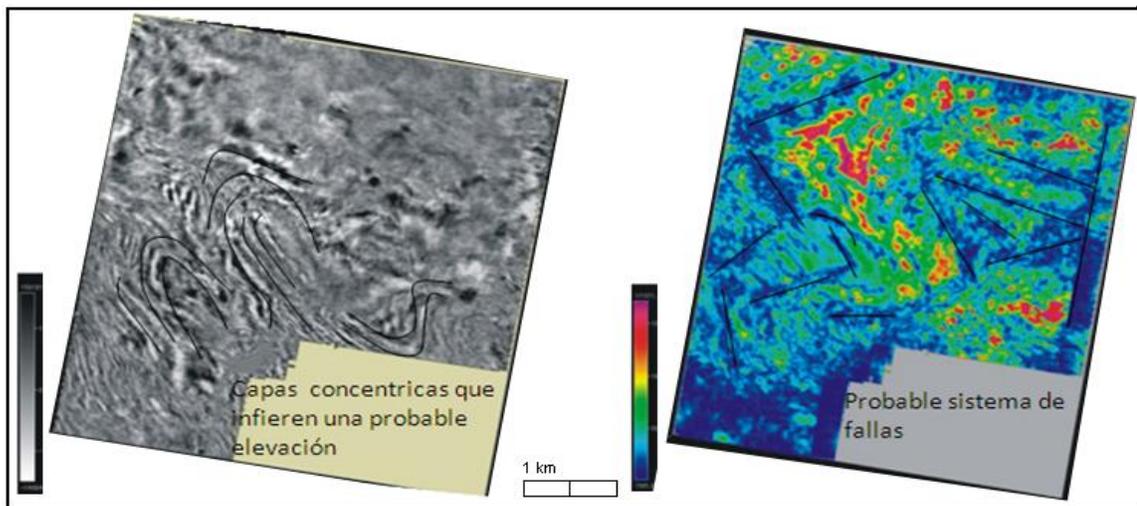


Fig. V.5.9. Imagen con el mismo atributo a blanco y negro, y a colores, mostrando diferente información sísmica. Probable elevación en pliegues en la imagen izquierda, y sistema de fallas en la imagen derecha.

Aquí se presentan dos imágenes de la misma zona a blanco y negro y a color, con el mismo atributo de descomposición espectral, la información que proporcionan es diferente, sin embargo, no hay rasgos claros de formas de un relieve en particular; pese a

ello en la imagen de la izquierda se observan rasgos de capas a través de un corte en el que se infiere una elevación de pliegues sobre material sedimentario, y la ventana de la derecha a colores dificulta una clara interpretación geomorfológica, pues únicamente se visualizan manchones de colores que se concentran en la porción superior izquierda; no obstante, se visualiza en los rasgos azules un probable sistema de fallas. Fig. V.5.9.

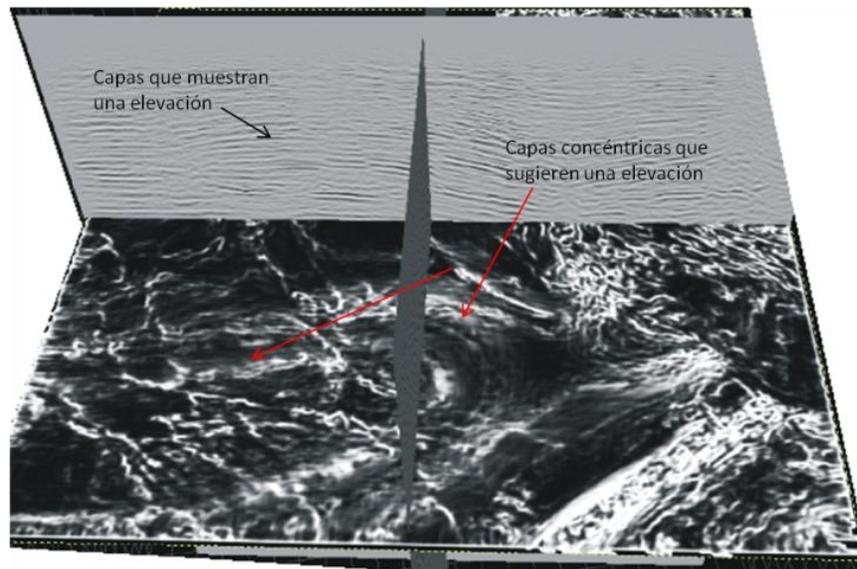


Fig. V.5.10. Corte vertical y horizontal que infieren una elevación del relieve compuesta por capas concéntricas sobre material sedimentario con rasgos de probable turbulencia en el margen derecho.

En ésta imagen Fig. V.5.10., se observa con mayor claridad en un corte horizontal “Time Slice”, lo que serían las huellas, la base del relieve visto en perfil en el “Cross Line”. La imagen que se aprecia sugiere una especie de montículo al centro debido a la apariencia de un anillo concéntrico en medio de una planicie con pequeñas elevaciones sobre material sedimentario, y a su vez hay rasgos de probable turbulencia en el margen derecho de la imagen.

En la imagen siguiente Fig. V.5.11., se aprecia lo que sería la base del relieve en planta “Time Slice” y a la vertical “Cross Line”, a donde los estratos muestran una elevación del relieve en perfil cortando exactamente las capas a lo largo del eje horizontal, que forman a su vez una especie de loma con pendiente muy suave, además se aprecia un sistema de fallas o fracturas.

Parte de lo más interesante de las imágenes de la Cuenca Sur del Golfo de México y de todo el capítulo V son las imágenes Fig. V.5.12. y Fig. V.5.13., que junto con la Fig. V.5.11., tienen una gran similitud con lo que se encontró en el trabajo de campo en la Región del Doctor en Querétaro, como ya se menciona anteriormente.

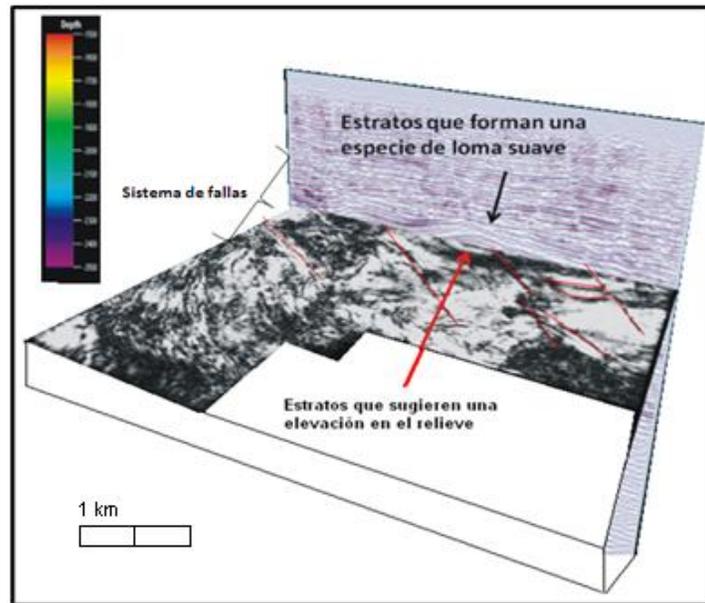


Fig. V.5.11. Elevación de los estratos que infieren una elevación en el relieve tanto en perfil como en planta

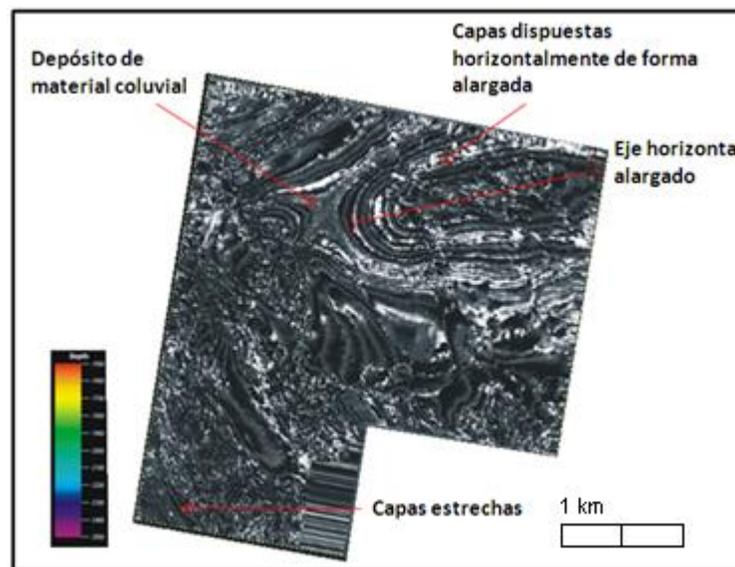


Fig. V.5.12. Corte de capas en un Time Slice que infieren una elevación, de forma alargada, en contacto con un depósito de material coluvial semejante a la Región de la Formación El Doctor

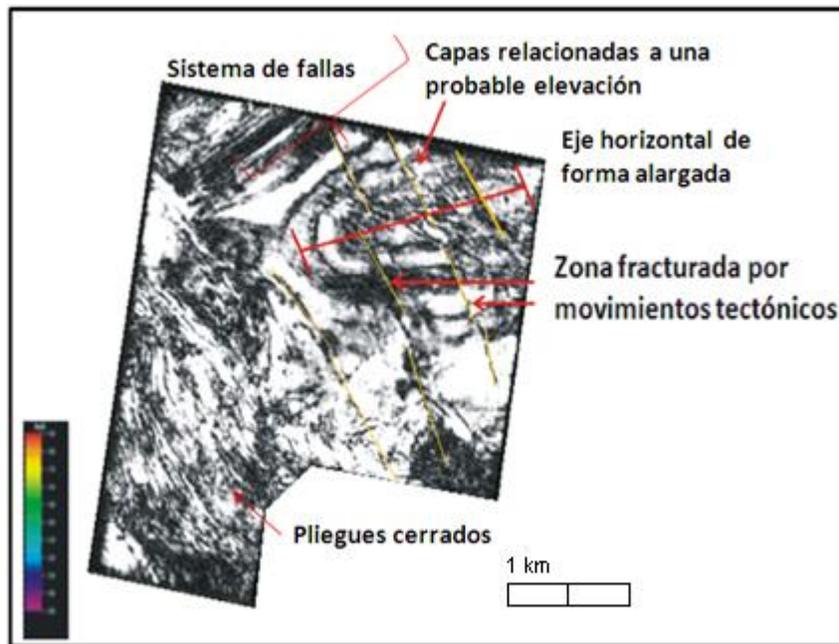
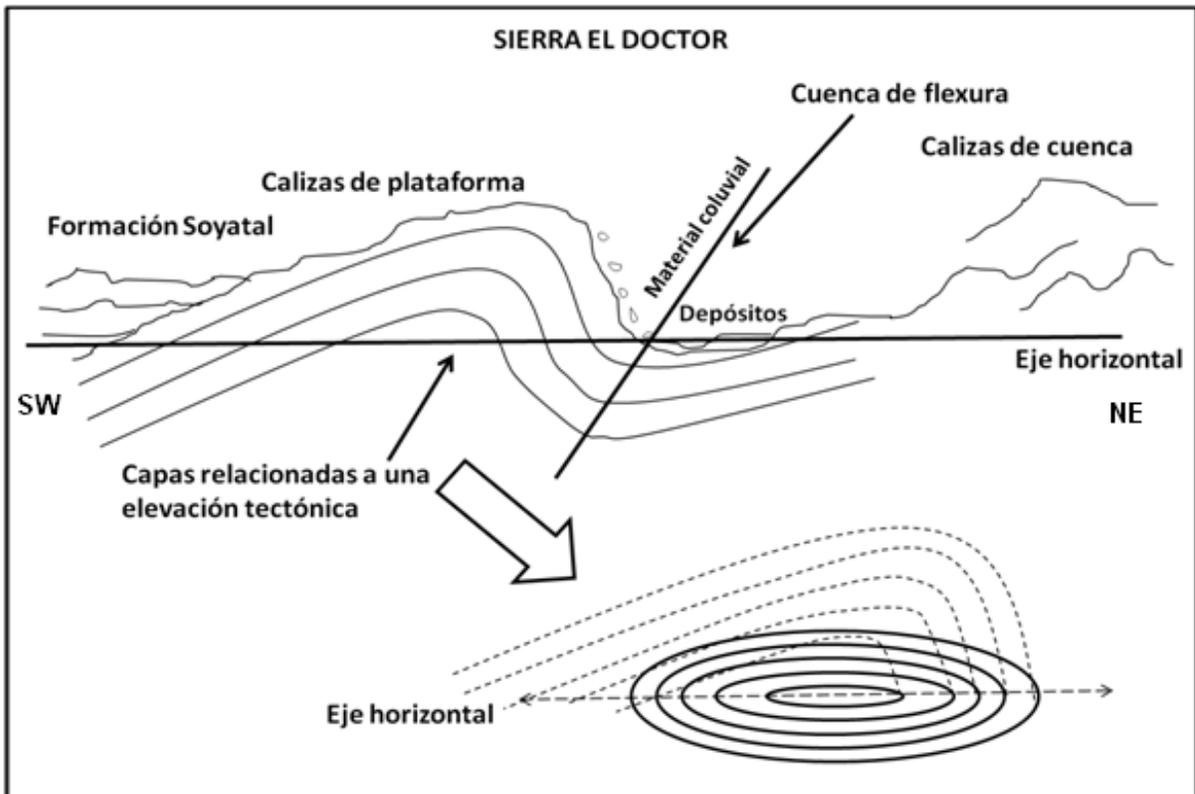


Fig. V.5.13. Corte de capas que infieren una elevación alargada y altamente fracturada o afallada

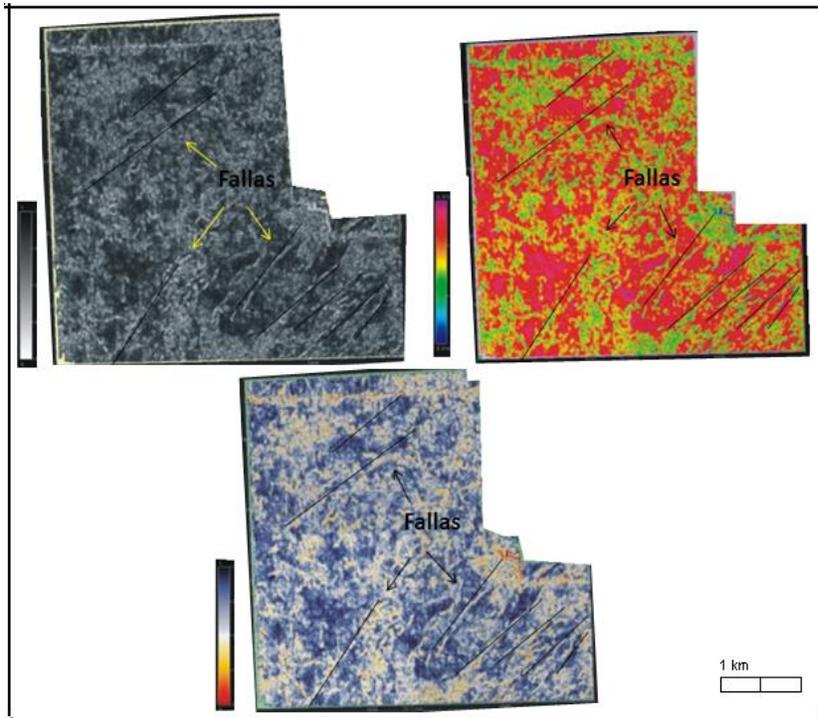
Lo que se aprecia claramente entre las figuras anteriores, tomando en cuenta el Time Slice o sea una capa horizontal, y lo apreciado en campo, es un corte a lo largo del eje horizontal, que muestran lo que serían las capas de la cabalgadura, formadas por las calizas de plataforma en la Sierra el Doctor, y que estas a su vez se encuentran de frente a una cuenca de flexura cuyos depósitos son coluviales de origen terrígeno muy disectado. Hacia el frente de éstas calizas de plataforma se localizan las calizas de cuenca que son de espesor más profundo, (Fig. V.5.14.).



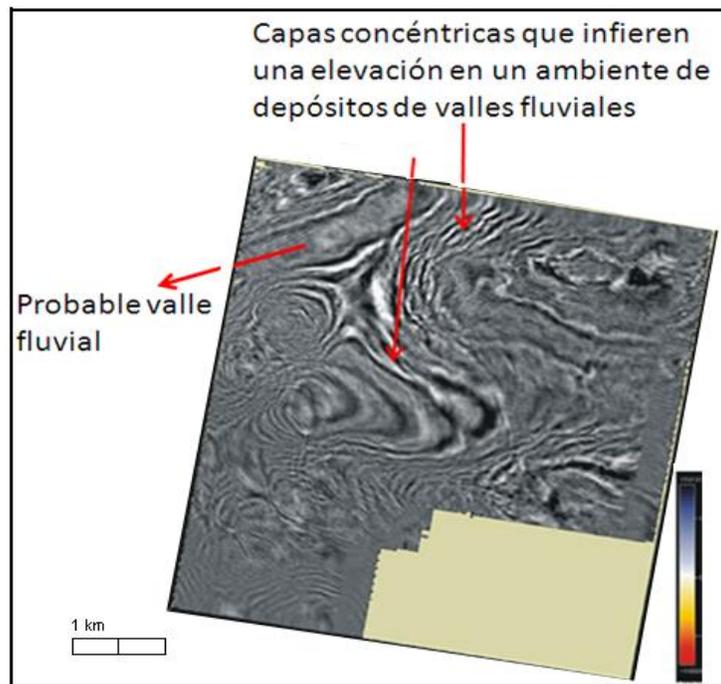
(Fig. V.5.14.) Esquema de la estructura Sierra El Doctor, mostrando la estrecha analogía con las figuras V.5.12. y V.5.13., donde las capas horizontales están relacionadas a una elevación

Similitud

Estas tres imágenes de la Figura V.5.15., muestran la misma área pero con diferentes filtros de colores en el atributo de similitud, pese a los diferentes tonos, las características de ellas son realmente las mismas. Se aprecia que es una zona altamente afallada, puede decirse que no siempre el cambio de colores favorece para resaltar algunas geformas; aunque sí algunos rasgos físicos como en este caso. La información obtenida en gran medida depende de las formas que realmente existan en el relieve, al igual que de la calidad de la información sísmica.



(Fig. V.5.15.) Imagen con diferentes filtros de colores y con el mismo atributo de similitud, mostrando las mismas características, en este caso un sistema de fallas

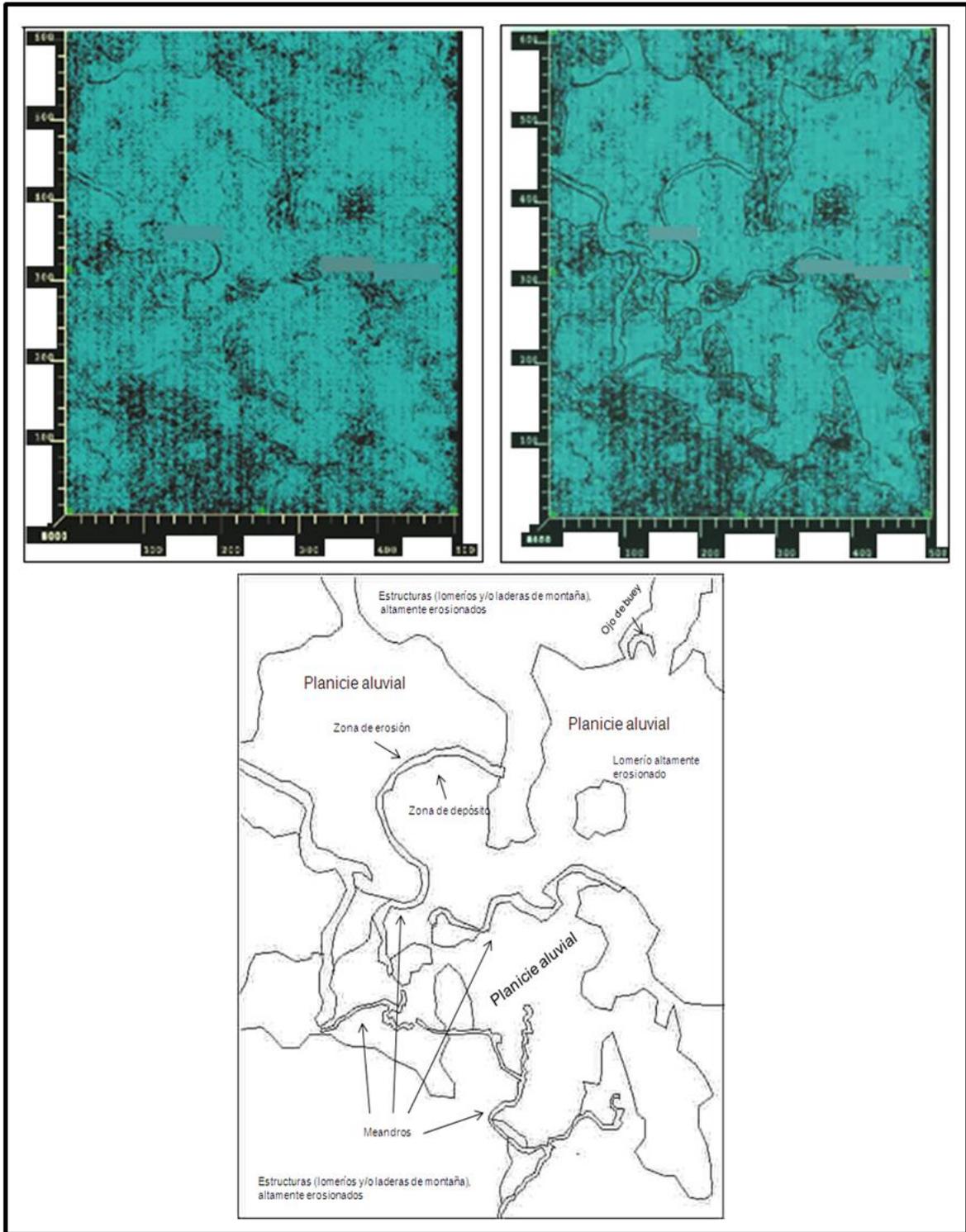


(Fig. V.5.16.) Imagen mostrando diferentes geformas sepultadas, tales como elevaciones y un valle fluvial

En esta imagen (Fig. V.5.16.), se pueden observar algunos rasgos de relieve. En la margen superior derecha se ve una especie de capas concéntricas alargadas, lo que pudiera ser una elevación probablemente de rocas sedimentarias, también se observa en la esquina izquierda superior una especie de valle fluvial, debido al cambio de litología por la presencia de sedimentos. Por último hacia la mitad en especial del margen izquierdo, la imagen va perdiendo forma; no obstante aún se aprecian las líneas que dan una apariencia de capas infiriendo igualmente una elevación.

Cuenca de Burgos

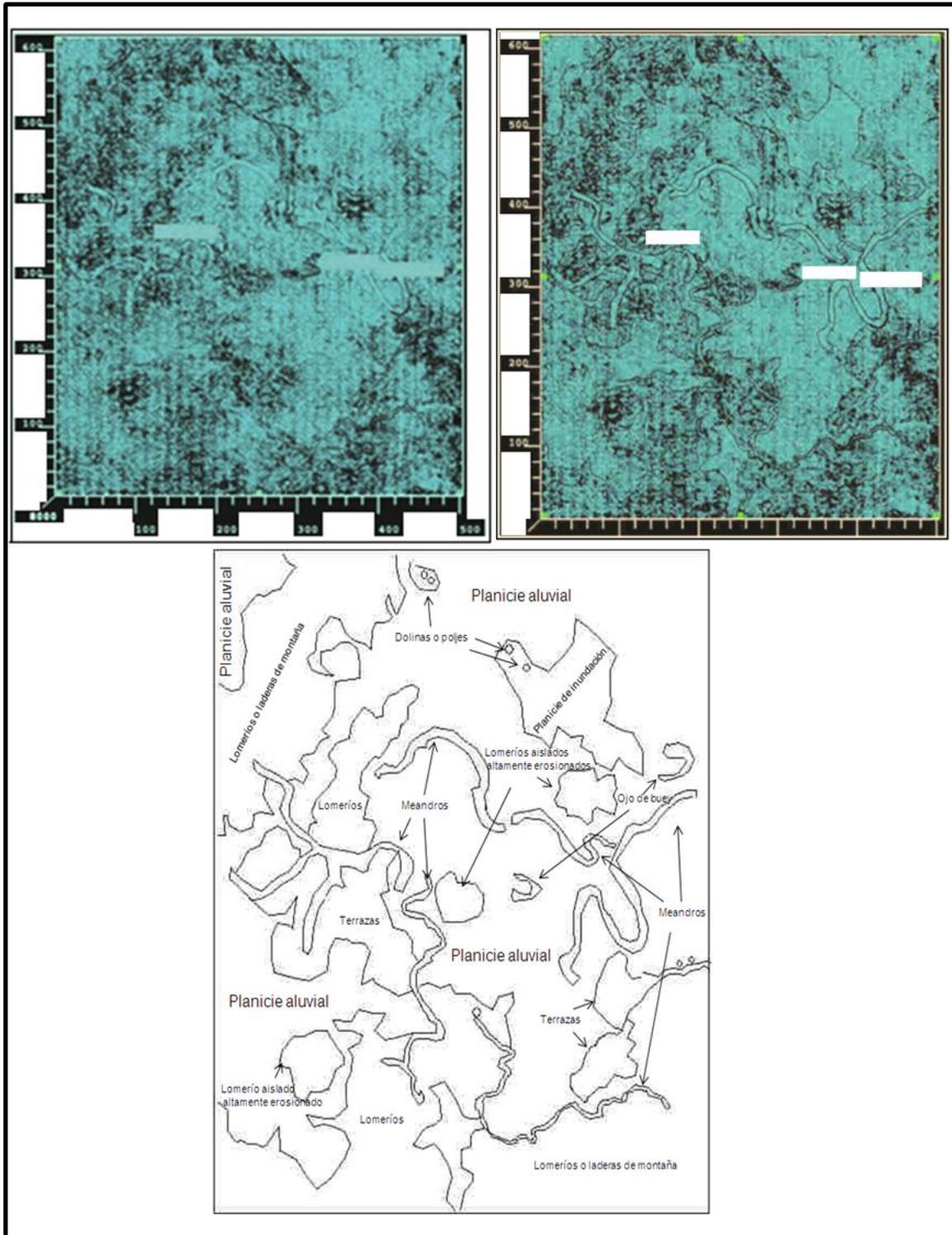
Aquí vimos la sísmica en el software Landmark y Geoprobe con un menor juego de atributos y menor combinación de colores, debido a la excelente calidad de información obtenida por este software, a la geología del lugar que fue favorable, y a la calidad de información sísmica. Las condiciones sedimentarias aquí dieron como resultado algunas semejanzas con las geoformas en las zonas cársticas de las Regiones “Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, y la Región El Doctor”. Algo que ciertamente resalta en la interpretación de las imágenes de la Cuenca de Burgos es que tuvieron un alto grado de nitidez, lo que favoreció a la delimitación de las geoformas presentes en el relieve, constituido a lo largo de la historia geológica de la Cuenca localizada entre Tamaulipas y Nuevo León.



(Fig. V.5.17.) Se ven con claridad las geformas delimitadas en la Cuenca de Burgos, encontrándose una morfología propia de ambientes lacustres sedimentarios, manifestando la red fluvial representada por meandros

En esta figura (Fig. V.5.17.), perteneciente a la Cuenca de Burgos se ve con claridad la red fluvial presente en toda la imagen, la cual por sí sola muestra una zona plana inferida por el drenaje en forma de meandros, los cuales toman esa forma ondulante debido a la falta de pendiente muy característicos en paleo relieves de inundación, así como el ojo de buey al NE de la figura que es un cauce abandonado y pronto a desaparecer. Éstas características indican una región inundada y muy erosionada lo que ha favorecido a la creación de grandes extensiones de valles, o llanuras de inundación. Por otra parte también se observan estructuras que pueden ser laderas de montaña o lomeríos, éstos últimos se localizan cerca de los cauces y probablemente son de arenas y guijarros debido al medio fluvial en el que se encuentran.

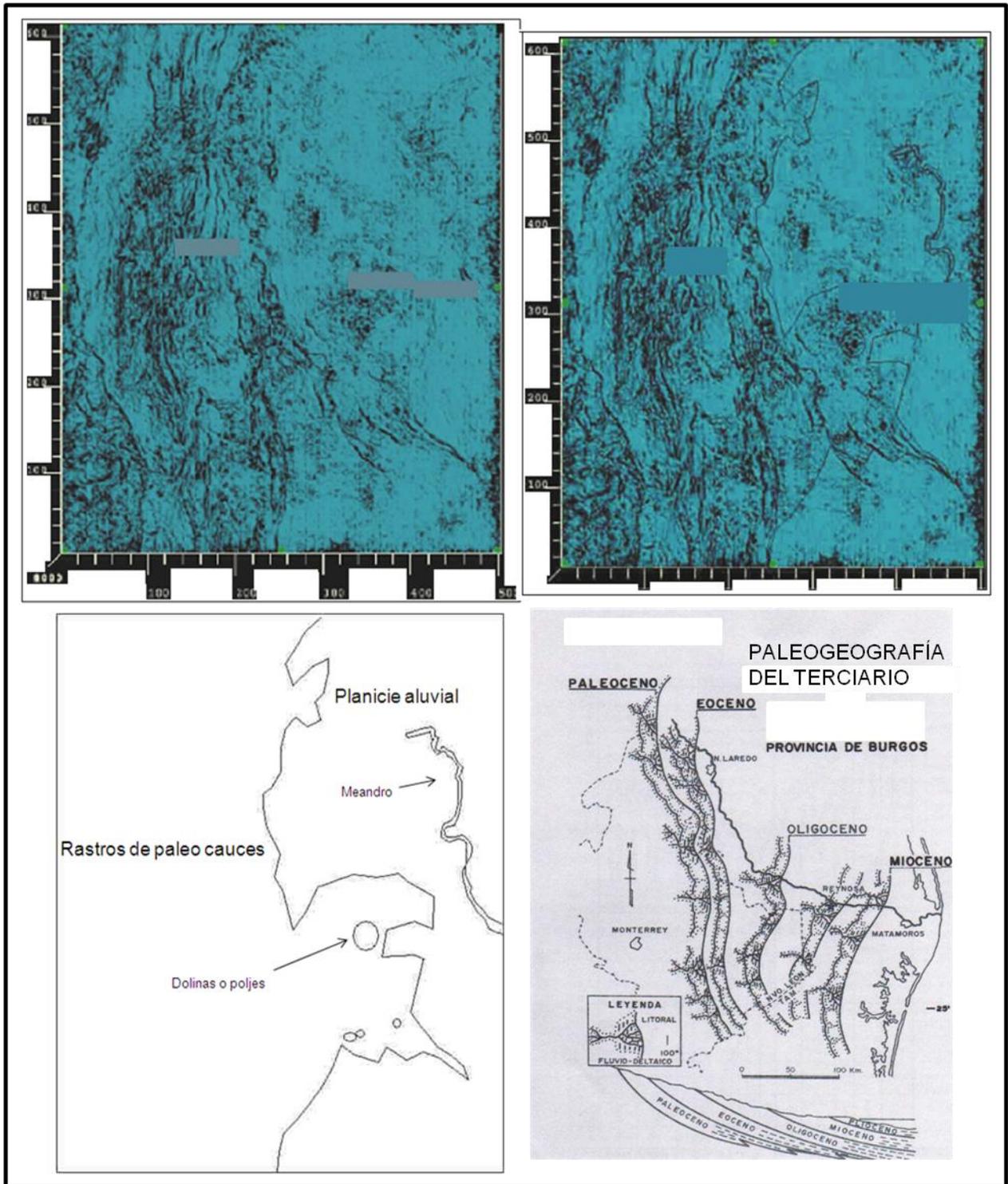
En la siguiente figura (Fig. V.5.18.), como la red fluvial se extiende a lo largo de toda la imagen, y al igual que la figura anterior, muestra una zona plana inferida por el drenaje en forma de meandros característicos en paleo relieves de inundación, a diferencia de la imagen anterior el ojo de buey es más común así como meandros abandonados. Las características de esta área son: un área inundada localizándose grandes extensiones de valles, o llanuras de inundación además de ser muy erosionada, esto último se percibe a través de las laderas de montaña y/o los lomeríos que probablemente son arenas y guijarros, por el medio fluvial en el que se encuentran. Por otra parte, algo interesante es que están presentes terrazas que son originadas por la acción del agua de un río que provocan un modelado, quedando aisladas del nivel de base por cambios en el régimen hidrológico o por movimientos tectónicos.



(Fig. V.5.18.) Aquí se ven con claridad una mayor variedad de geoformas representativas de un ambiente lacustre sedimentario que estuvo en algún tiempo inundado, dando como resultado formas erosivas y acumulativas dentro de una litología sedimentaria

Lo más sobresaliente de la siguiente figura (Fig. V.5.19.), son los rasgos de la red fluvial, los paleo cauces que se extienden a lo largo del margen izquierdo de N a S de la imagen. Se aprecia una zona plana, sin embargo aquí los meandros ya no son característicos como en las figuras anteriores, pese a que es un paleo relieve de inundación, ni tampoco los ojos de buey o meandros abandonados. De igual manera existen grandes extensiones de planicies aluviales formadas por valles, o llanuras de inundación, es una zona donde ya no se aprecian laderas de montaña ni lomeríos, lo que sí se puede observar son probables dolinas o poljes.

Lo más característico de esta figura son los paleo cauces que dan un relieve suave y moderado, se deduce que son formados por la presencia del Río Bravo presente al norte de la Cuenca de Burgos. Se pueden apreciar una especie de franjas ligeramente alargadas y paralelas entre sí, morfología producto de un ambiente lacustre o marino como lo es en este caso. Además se infiere en la figura, que hubo una secuencia de depósitos sedimentarios como lo muestra el trabajo de Echanove (1986), lo que da origen a la formación de deltas que son formas acumulativas producidas en la zona de desembocadura de un río, en un mar o lago, principalmente por la acción fluvial y en menor grado por el oleaje y las mareas. En la figura de Echanove (*op. cit.*), "Paleogeografía del terciario", se visualizan claramente las etapas en las que ocurrieron los depósitos sedimentarios que se encontraban sumergidos a lo largo de su historia geológica.

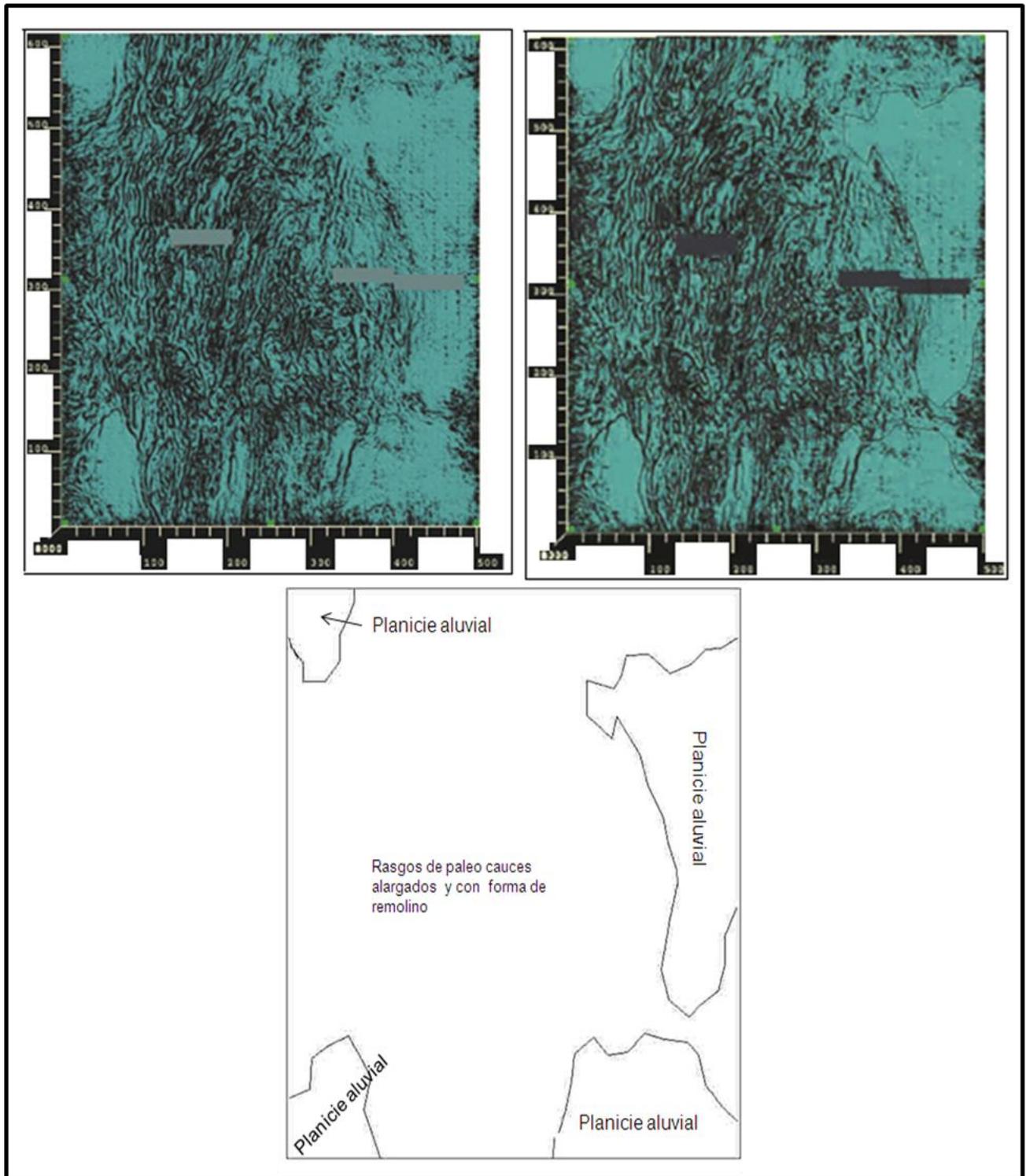


(Fig. V.5.19.) Se aprecian paleo cauces extendidos a lo largo de N a S, hay grandes extensiones de planicies aluviales y en menor grado diversidad de geformas en un ambiente lacustre o marino con secuencia de depósitos sedimentarios originando una serie de deltas.

En la figura (Fig. V.5.20), se resaltan los rasgos de la red fluvial, en paleo cauces que se extienden casi por completo en la imagen de N a S. Las planicies aluviales se localizan en los márgenes de la imagen aunque son de menor extensión formadas por valles, o llanuras de inundación, aquí ni los “ojos de buey” ni los meandros son resaltados como anteriormente se observó, tampoco ya no se aprecian laderas de montaña y/o lomeríos.

En esta figura se resaltan los paleo cauces que al igual que en la figura V.5.19., es un relieve suave y moderado, originados por el Río Bravo presente en la Cuenca de Burgos. La diferencia es que aquí hay una mayor cantidad de franjas decididamente alargadas y paralelas entre sí, morfología muy probablemente producida por una secuencia de depósitos sedimentarios, formando deltas que son formas acumulativas causadas en la zona de desembocadura, pero también se aprecian al centro de la imagen una especie de franjas alargadas que dan una apariencia de querer arremolinearse.

En la figura V.5.21., de Echanove (1986), se ve la formación de deltas y el desarrollo de abanicos aluviales favorecidos por las corrientes fluviales, además de un desarrollo complejo fluvio deltáico y la formación de barras que son bancos de arena de grandes dimensiones formados por transporte transversal de sedimentos del fondo marino hacia la costa (Lugo, 1989). Finalmente se distinguen las etapas en las que se originaron los depósitos sedimentarios sumergidos a lo largo de su historia geológica.



(Fig. V.5.20.) Franjas alargadas, estrechas y paralelas entre sí, que infieren una serie de paleo cauces con algunos remolinos producto de una secuencia de depósitos formando una serie de deltas y planicies aluviales en las márgenes de la imagen

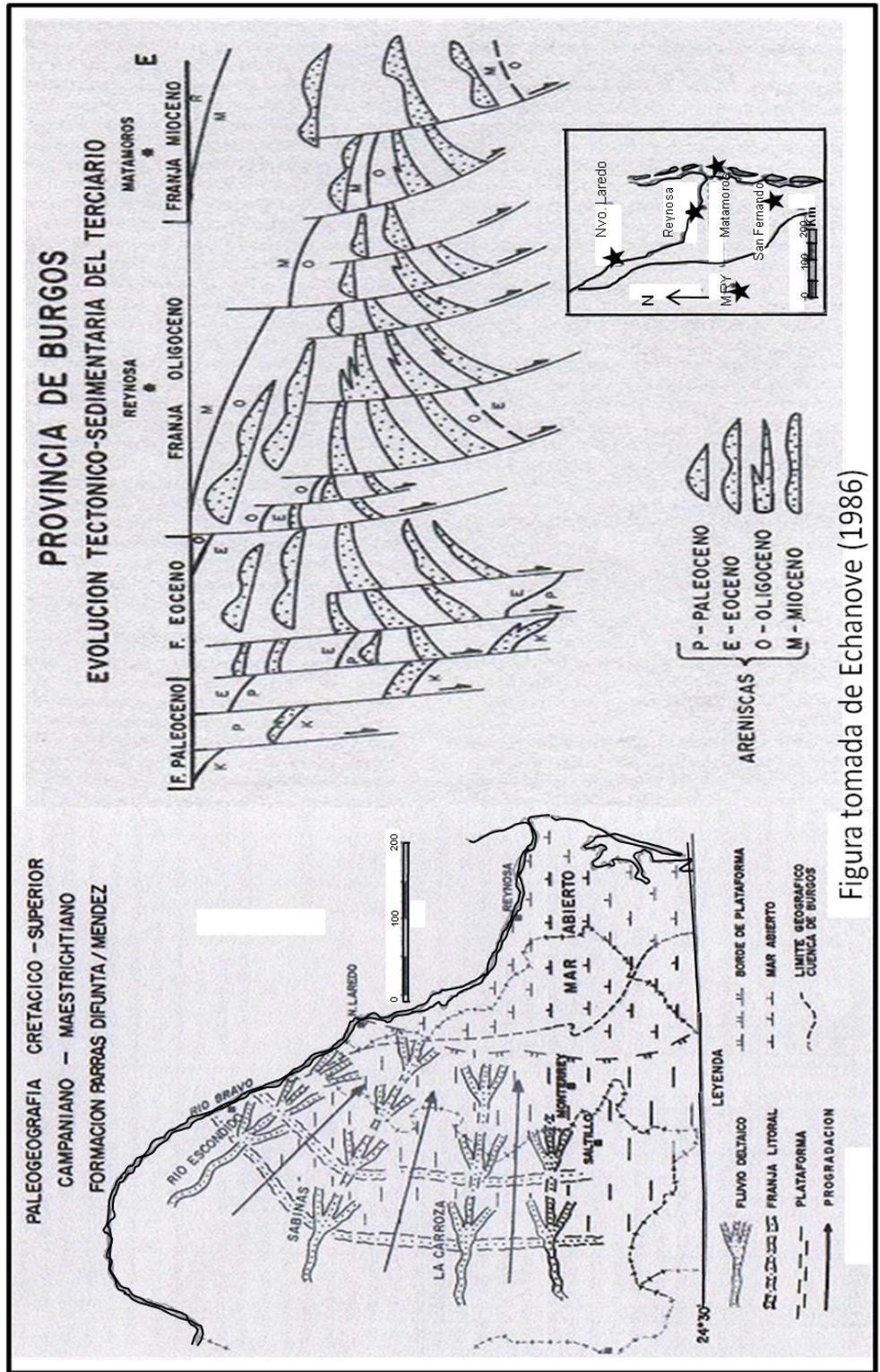


Figura tomada de Echanove (1986)

(Fig. V.5.21.) Etapas en las que se originó el desarrollo complejo de deltas, abanicos y formación de barras aluviales alimentados por las corrientes fluviales

Características del estudio geomorfológico en las tres regiones y su relación con la interpretación (Geomorfología Sísmica), de las tres cuencas petroleras

Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí (Zona de rocas calizas, evaporitas e ígneas)

Esta región se define de manera general como un área formada por dos tipos de relieve: endógeno y exógeno, en los cuales la litología está compuesta de rocas sedimentarias (yesos, calizas, evaporitas, conglomerados, travertino), y rocas ígneas (extrusivas ácidas, riolitas, andesitas, Ignimbritas). El relieve endógeno se distribuye de manera homogénea al igual que el relieve exógeno, aunque en algunos lugares uno de los dos tipos de relieve resalta más. De ésta manera vemos que las geoformas como laderas de montaña y lomeríos, se encuentran intercalados por planices, barrancos, circos erosivos, dolinas, y terrazas fluviales.

Muchas de las particularidades de ésta región, en especial las que se localizan al NE, tienen gran semejanza con la Cuenca de Burgos y en menor grado con la Cuenca Sur del Golfo de México, (Fig. V.5.22), esto se pudo inferir gracias a la litología compartida, y a la calidad de la información sísmica que permitió realizar una interpretación adecuada. Las geoformas que comparten estas dos cuencas por la semejanza en litología y principalmente en las formas exógeno erosivas, kársticas, son: dolinas, terrazas, cursos de ríos con forma de meandros, planicies aluviales, laderas de montaña, y lomeríos con material sedimentario. El tipo de morfología que tienen en común las dos cuencas antes mencionadas con ésta región, es el que se encuentra al NE de la Región de Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, que debido a la cabalgadura erosionada cerca de Guaxcamá, ha favorecido a la formación de una extensa planicie ondulada modelada por una variación de elevaciones suaves y depresiones de poca inclinación, ocupadas por barrancos o canales de poca profundidad, en este caso con una formación de meandro. De igual manera se localizan “ojos de buey” que son formas de ríos abandonados y en proceso de extinción, propios de valles de inundación.

Las otras formas erosivas que comparten especialmente con la Cuenca de Burgos, y la región interpretada son las dolinas, que son propias del relieve kárstico, de forma circular o elíptica, más amplias que profundas, sus dimensiones son variadas. Las terrazas que también se encuentran en las dos áreas son superficies planas o ligeramente inclinadas, generalmente estrechas y alargadas, delimitadas por cambios bruscos de pendiente, y deben su origen a la acción del agua de un río. La siguiente figura (V.5.22.), muestra la relación de geoformas entre la Región y ambas cuencas.

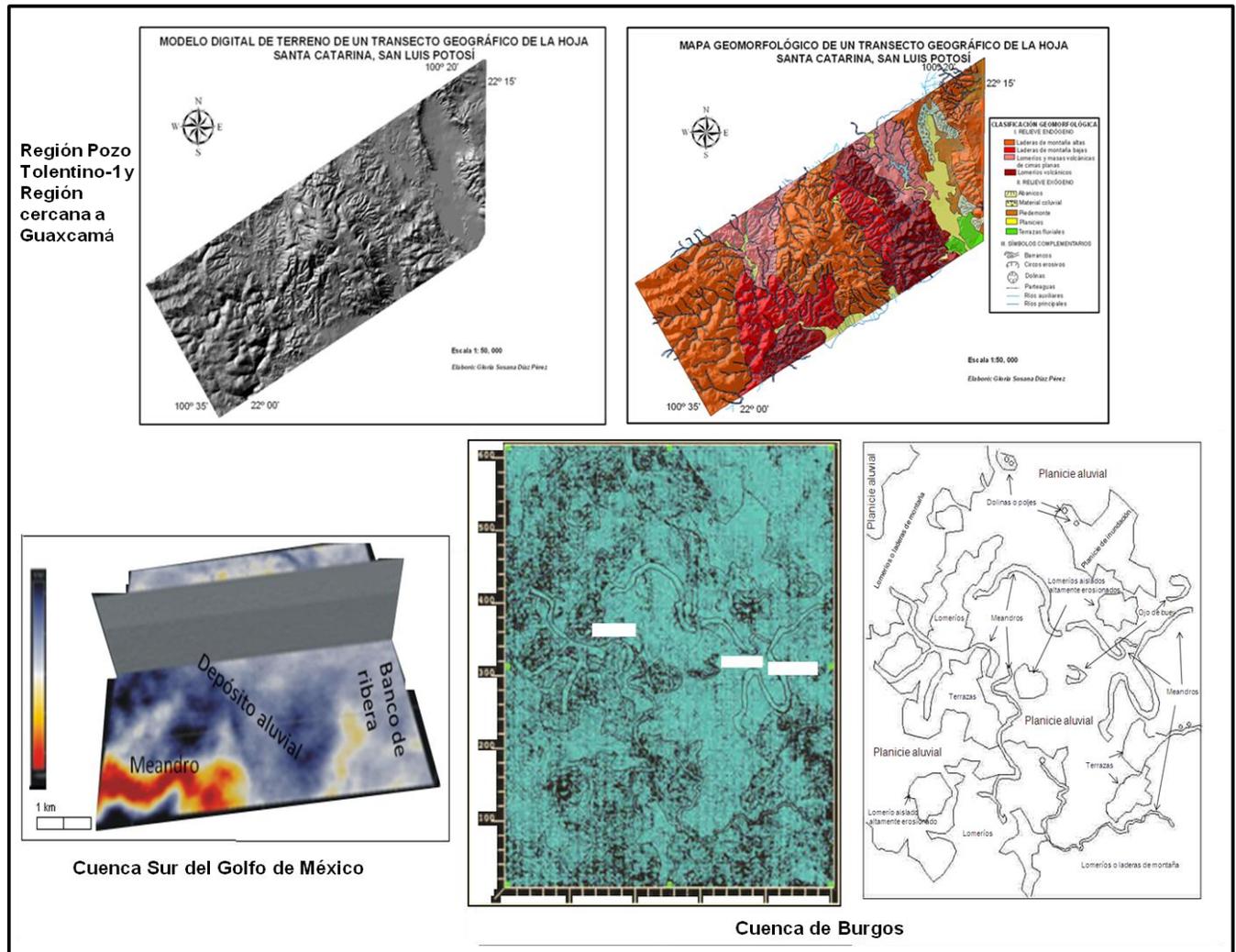


Fig. V.5.22. Semejanza en las características geomorfológicas interpretadas entre la Región Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí, y la información sísmica interpretada en la Cuenca Sur del Golfo de México (inferior izquierda) y Cuenca de Burgos (inferior media y derecha).

Región del Área El Doctor, Querétaro (Macizo calcáreo con estructura de cabalgadura)

El relieve de esta región es de origen exógeno y endógeno, compuesto por rocas sedimentarias calizas y lutitas principalmente con pequeños manchones de material ígneo que en realidad solo coronan una fracción pequeña de las laderas de montaña, al norte y sur del área estudiada. Resalta notoriamente el endógeno modelado estructural en donde las rocas sedimentarias sufrieron un plegamiento formando una estructura de cabalgadura, éstas se aprecian perfectamente delineadas al centro sur del área estudiada, atravesando de NW a SE. Es una región montañosa con valles angostos y pequeñas áreas aisladas de planicies aluviales, por lo que la especial semejanza que tiene ésta región respecto a la geomorfología de las cuencas, es con la Cuenca Sur del Golfo de México, en donde la principal estructura en ambas es la morfología de plegamiento propia de rocas sedimentarias (Fig. V.5.23.).

La analogía entre la Región El Doctor y la interpretación morfológica sísmica de la Cuenca Sur del Golfo de México, fue realmente estrecha, y se puede decir que es la región que tuvo mayores semejanzas con las formas interpretadas en la información sísmica y sobre todo en campo, esto se puede constatar con la semejanza en el corte de planta de las capas mostradas en las figuras III.2.11. a la III.2.14., con el anticlinal en forma de cabalgadura de la Formación el Doctor. En las otras dos Cuencas: Chicontepec, y Burgos, hubieron en menor medida semejanzas tales como laderas de montaña y/o lomeríos sedimentarios, y drenaje fluviales con meandros.

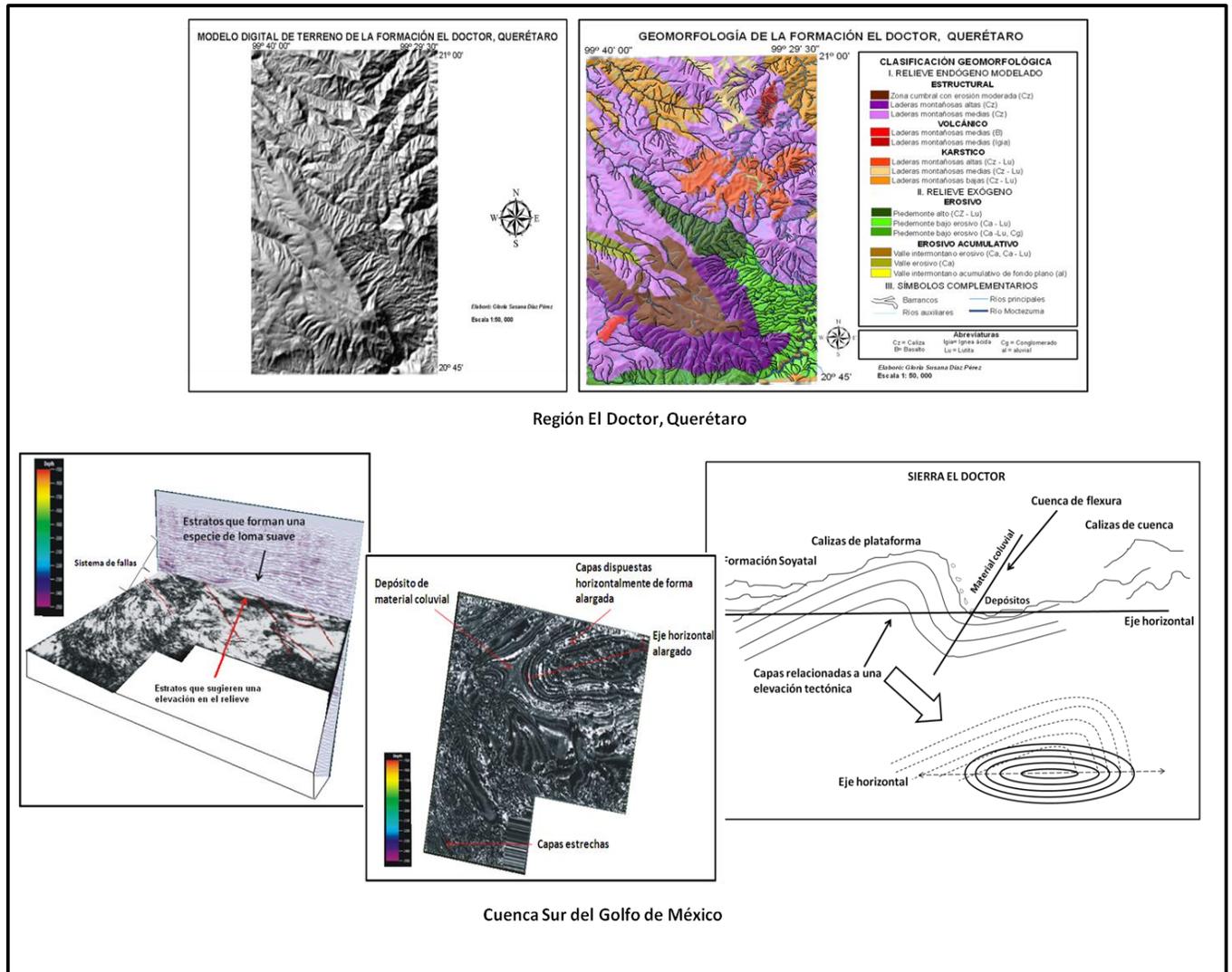


Fig. V.5.23. Semejanza en las características interpretadas entre la Región El Doctor, Querétaro, y la información sísmica interpretada de la Cuenca Sur del Golfo de México principalmente.

Región Cuenca de Toluca, Estado de México (Zona de rocas ígneas extrusivas)

La presencia de rocas volcánicas en las provincias petrolíferas es común porque la actividad volcánica tuvo lugar en el interior o cerca de muchas cuencas sedimentarias, en una etapa o en otra. Si bien la mayoría de los hidrocarburos presentes en las rocas volcánicas provienen de rocas generadoras sedimentarias, algunas rocas volcánicas también son rocas generadoras como es el caso de Campo Hora de Japón en el año

1900, Texas en 1915 y en el Campo Jatibarang en Java Occidental en el año 1996 (Schutter, 2003).

La importancia de la existencia de *volcanes de asfalto*, y emanaciones de gases incluyendo hidratos de metano en aguas mucho más profundas en el fondo marino del Golfo de México a tres mil metros, sugieren que el potencial que tiene el país en recursos energéticos es aún mayor de lo que se pensaba y que pueden aprovecharse fuentes alternas de energía como los hidratos de metano. Éstas observaciones tienen repercusiones que a largo plazo podrían ser prácticas y redituables. Escobar (en Caso *et. al.* 2004)

Es aquí a donde se encuentra la utilidad de las geoformas de la Cuenca de Toluca, y que de manera general ésta región está formada principalmente por relieve endógeno en donde el vulcanismo del Plio-Cuaternario domina totalmente, con material compuesto por flujos lávicos, depósitos piroclásticos, abanicos volcánicos, lahares, ignimbritas, tobas, pómez. También hay presencia de material exógeno acumulativo presente en los depósitos lacustres intermontanos y en las planicies aluviales, compuesto de rocas volcánicas del tamaño de grava, arena, limo y arcilla del Cuaternario.

La analogía existente en algunas formas del relieve de la Cuenca de Toluca se da principalmente en la Cuenca de Burgos, con el centro de la Región Cuenca de Toluca, que aunque no comparten la misma litología, sí algunas geoformas por procesos exógenos, como extensas planicies aluviales y llanuras de inundación debido a la constante precipitación, también a la existencia de lomeríos parecidos en la forma con un origen litológico diferente. En la imagen inferior izquierda se muestra un relieve volcánico marino, el cual es semejante al relieve expuesto en la Cuenca de Toluca, donde lo sobresaliente son los volcanes que como ya se mencionó anteriormente se eligió a la Cuenca de Toluca para ampliar la diversidad de geoformas homogéneas existentes en el relieve marino, además de la importancia que hay de los *volcanes de asfalto* en las exploraciones de Golfo Profundo, de donde se han obtenido hallazgos de gas relacionados a estructuras volcánicas. (5.V.24.).

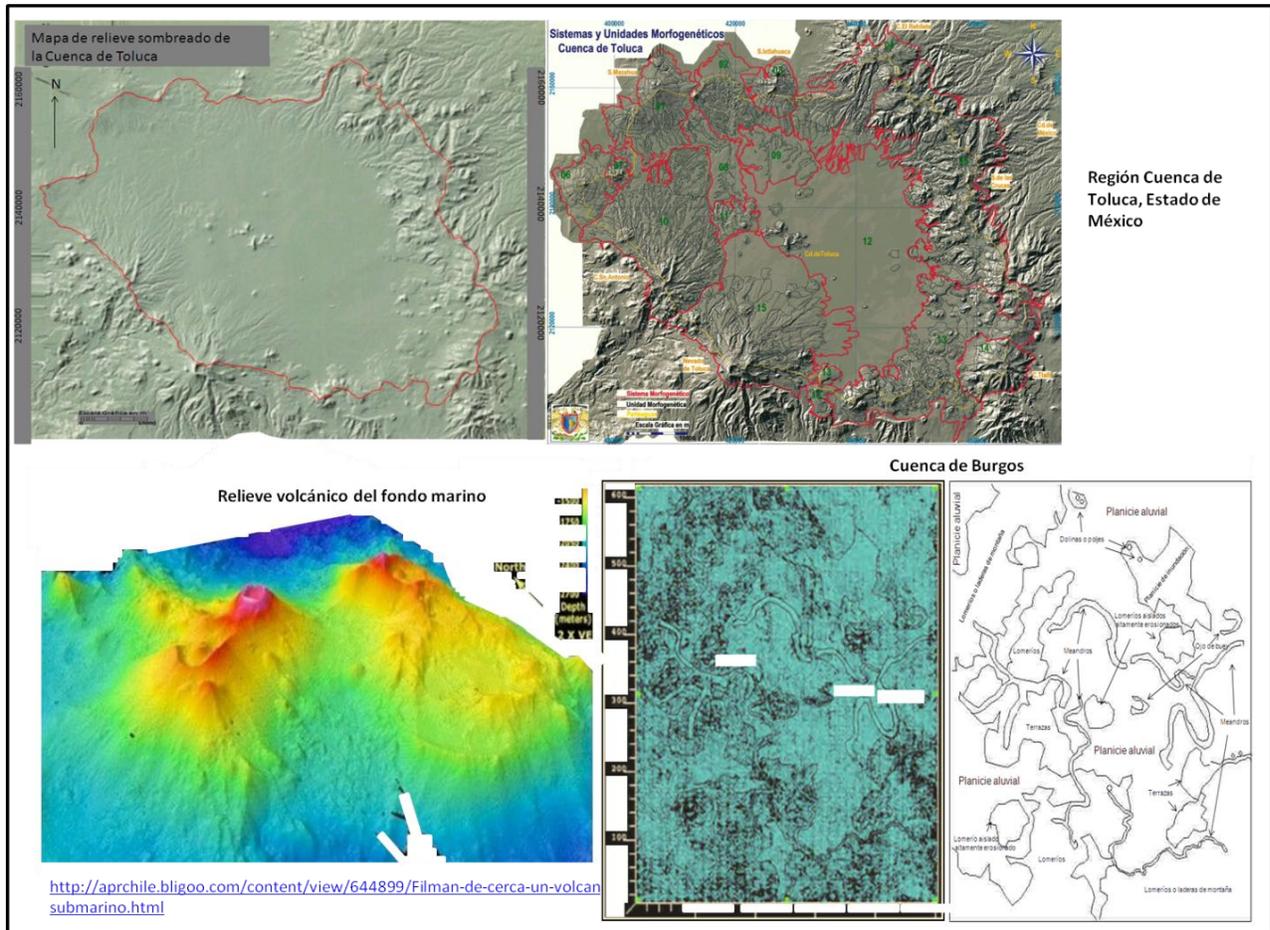


Fig. V.5.24. Semejanza en las características interpretadas entre la Región Cuenca de Toluca, Estado de México, y la información sísmica interpretada de la Cuenca de Burgos, además de la similitud con el relieve volcánico del fondo marino.

Conclusiones del capítulo V

En muchos casos la deficiente calidad de imagen en la información sísmica, no permitió hacer una buena interpretación de geofomas; sin embargo en algunas cuencas existió buena visualización de las formas del relieve sepultado, como en la Cuenca del Sur del Golfo de México y mejor aún en la Cuenca de Burgos, permitiendo encontrar similitud con las geofomas de las tres regiones en donde se apreció semejanza en diversas formas de origen endógeno y exógeno.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI.1.- CONCLUSIONES

La superficie del relieve terrestre de las tres áreas escogidas, tiene características geológicas diversas, además de que fueron trabajadas a diferente detalle para su interpretación morfológica. La Geomorfología fue apoyada por mapas morfométricos en tercera dimensión obtenidos a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG's), las geoformas logradas permitieron identificar en la información sísmica (*Geomorfología Sísmica*) de las tres cuencas petroleras, formas semejantes. Ésta analogía permite un mejor conocimiento del relieve sepultado y ampliar la información útil en la exploración petrolera, de ésta manera se cumple con el objetivo central de éste trabajo. Además de que será de gran valor para otro tipo de investigaciones como es en el rubro de riesgos ambientales.

Un buen aporte de este trabajo es que, con él, se han generado nuevos conocimientos geomorfológicos en el área de "*Geomorfología Sísmica*", expresados de manera cartográfica con escala media 1:50,000, a través del estudio de las tres regiones y trabajada en parte con la ayuda de fotografías aéreas para obtener detalle del relieve y dar una mejor interpretación en las geoformas. A continuación se mencionan los puntos más representativos de cada capítulo.

Conclusiones del capítulo I

En este capítulo se resalta la importancia de un modelo análogo que se inicia a partir de la Geomorfología de tres áreas, las cuales serán útiles en trabajos de "geomorfología sísmica", aspecto importante para la industria petrolera; sin embargo, éste término es realmente reciente y acogido por algunos investigadores de la Tierra. Algunas técnicas de la Geomorfología son empleadas en sísmica, en ambientes sedimentarios, con fines de localización y exploración petrolera, así como evaluar la rentabilidad y la disminución del riesgo económico. La geomorfología utilizada fue un híbrido entre la escuela rusa y la

europea para los tres tipos de relieve, que son similares entre sí, y que debido a que cada una de las regiones cuenta con características geológicas y extensiones diferentes, se puede lograr un buen análisis geomorfológico logrando una pronta y clara exposición de geoformas para una mayor aplicación en sísmica. La cartografía realizada es a diferente grado de detalle con diferentes técnicas para cada región, para ello fue de gran utilidad los Sistemas de Información Geográfica, (SIG's), éstos ayudaron al análisis morfométrico considerado básico para la clasificación del relieve.

Conclusiones del capítulo II

La administración es una parte muy importante en la realización de un proyecto de investigación porque permite programar las actividades en tiempo y costo, logrando así calidad en el producto deseado. La organización fue de manera metódica, y se hizo en dos etapas de manera simultánea, la primera etapa corresponde a la elaboración de la carta geomorfológica de las tres regiones de investigación cuyo proceso de manera general se hizo en nueve pasos con sus respectivas actividades y la segunda etapa fue la metodología empleada para obtener geoformas en información sísmica realizada en cinco pasos y de igual manera con sus respectivas actividades.

En la administración de proyectos para adquirir la meta aspirada hay que trabajar en un proceso específico, y no existe ninguna excepción a esta regla. Sin embargo como en todo proyecto amplio de investigación, hubo ajustes y desajustes con el tiempo y con los pasos a seguir propuestos en el Workflow inicial, no obstante se logró cumplir con el objetivo del trabajo de investigación.

Conclusiones del capítulo III

En éste capítulo se expone paso a paso la metodología empleada en el estudio geomorfológico de las tres áreas así como en la interpretación de geoformas en información sísmica. La metodología empleada para la Geomorfología de las tres áreas de estudio fue de Guerasimov, (1986), y de Verstappen, (1991), en donde se tomó en cuenta la morfoestructura y morfoescultura propuesta por el primer autor y el mapeo geomorfológico analítico propuesto por el segundo.

Para la Geomorfología de las tres áreas de estudio se hizo una “Revisión Bibliográfica”, en la “Delimitación del área de estudio y Fotointerpretación” no se realizó para la región El Doctor debido a que no hubo proceso de fotointerpretación. Para las tres regiones se elaboró una “Clasificación detallada de las unidades morfogénicas”, siendo a menor grado de detalle de las tres, la Región El Doctor. La “morfometría en SIG” fue para las tres regiones porque facilitan la interpretación de los procesos endógenos y exógenos, toda la información obtenida se corroboró en el “Trabajo de campo” de donde se tomaron fotografías del terreno para ejemplificar e ilustrar el texto.

Por último, cabe señalar que la accesibilidad en el trabajo de campo fue realmente casi igual de factible para la región de Pozo Tolentino 1 y región Guaxcamá, San Luis Potosí y la región de El Doctor, Querétaro; aunque hubieron lugares donde pese a las largas caminatas no fue posible llegar a ellas. Es importante mencionar que para la región de El Doctor fue de vital importancia el recorrido a campo debido a que no se contó con fotografías aéreas para la interpretación y delimitación de unidades morfogénicas.

Conclusiones del capítulo IV

En este capítulo se describe la geomorfología para cada área de estudio, iniciando por las generalidades fisiográficas, el por qué de la elección de ese lugar, geología del lugar, y finalmente la geomorfología de cada una de las tres áreas de estudio que a continuación se expresan.

Para la Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí, se encontró que la geología del lugar tiene similitud con áreas de interés petrolero como es el campo de Cantarell, debido a que las características de las evaporitas existentes tienen parecido con la sal que se encuentra en la Cuenca del Golfo de México. En el *Modelo Digital del Terreno* y *Mapa de relieve sombreado*, se observa un relieve con diversas geoformas claramente definidas, que permitieron una buena interpretación geomorfológica. El *Mapa altimétrico*, muestra 10 pisos altitudinales, en metros sobre el nivel del mar, coincidiendo con la diversidad de relieve expuesto en el mapa anterior. En el *Mapa de pendientes* se construyeron 8 intervalos en grados, desde zonas realmente

planas, abarcando la mayoría del área con pendientes suaves, hasta extremadamente abruptas en las cimas de las montañas. Finalmente el *Mapa Geomorfológico* refleja en su mayoría la existencia de laderas de montaña altas y bajas a lo largo de todo el transecto geográfico, con intercalación de lomeríos de origen volcánico y planicies intermontanas de material aluvial, piedemontes principalmente al NE, abanicos aluviales al SE, gran cantidad de barrancos largos y pequeños, pocos circos erosivos sobre las laderas de montaña altas.

En cuanto a la Región de El Doctor, en San Joaquín Querétaro, está formada en su totalidad por un macizo calcáreo del Cretácico pertenece a la Provincia Sierra Madre Oriental, las rocas sedimentarias permiten construir un modelo análogo a la morfología de características petrolíferas de Cantarell, marcando un dominio de anticlinales y sinclinales. El *Modelo Digital del Terreno y Mapa de relieve sombreado*, muestran un relieve muy disectado, gran cantidad de barrancos a lo largo de toda el área de estudio. El *Mapa altimétrico*, muestra 7 intervalos altitudinales en metros sobre el nivel del mar, alturas máximas al SW en el macizo calcáreo y disminuyen al E y al NE de la región. Heterogeneidad en el *Mapa de pendientes*, siendo evidentes las pendientes abruptas al NE en la mayor parte del área de estudio, las pendientes suaves coinciden con el macizo calcáreo, se construyeron 8 intervalos de pendientes en grados. En la última etapa está el *Mapa Geomorfológico*, se distribuyen de manera homogénea las laderas de montaña de origen estructural, volcánico y kárstico, aquí no hay existencia de lomeríos y los piedemonte se encuentran principalmente al S y SE del área extendiéndose hacia el centro, pequeños valles intermontanos erosivos con pequeñísimas zonas planas, la mayoría de barrancos se localizan al SE de la región.

Por último la Región Cuenca de Toluca, Estado de México, tiene diferente origen y composición que las regiones anteriores, forma parte del Cinturón Volcánico Mexicano, es volcánica en su totalidad y de geomorfología diversa, abarca una edad del Terciario al Cuaternario. La Morfometría se elaboró en un diferente SIG, en este caso fue en ILWIS, el *Modelo Digital del Terreno y Mapa de relieve sombreado*, muestran las zonas altas rodeando a la gran planicie al centro, al igual que heterogeneidad en la cantidad de

barrancos. El *Mapa altimétrico*, tiene lógicamente las alturas máximas en los volanes que rodean a la planicie de Toluca, se clasificaron 10 intervalos altitudinales en metros sobre el nivel del mar. El *Mapa de pendientes*, muestra 8 intervalos en grados, donde las áreas con pendientes más abruptas fueron de más de 40° y hasta 86° en las zonas montañosas, las pendientes menores tienden a ser planas, En cuanto al *Mapa geomorfológico*, se hizo principalmente, con el método de Verstappen (1991), se tuvieron 1727 unidades morfogénicas delimitadas, en donde fue necesario reagrupar el área de estudio en dieciséis Sistemas Morfogénicos, debido a la gran extensión. Existe una marcada heterogeneidad en el origen, tipos, geología, y geometría del relieve, como resultado de una sucesión de eventos volcánicos y actividades tectónicas ligadas a la evolución estructural del CVM, durante el Terciario y el Cuaternario.

Las geoformas encontradas en las tres regiones estudiadas muestran analogía con las geoformas interpretadas en la Información Sísmica de las Cuencas Petroleras, principalmente las dos primeras regiones, la última región tiene cierta semejanza con algunas geoformas presentes en la Cuenca de Burgos, principalmente en la planicie de Toluca aunque claro, de origen litológico diferente.

Conclusiones del capítulo V

En este capítulo se hace una reseña histórica de la Geomorfología, la cual tiene su origen con el geógrafo estadounidense William Morris Davis a quien se le considera el fundador de la Geomorfología, con su “Teoría del ciclo”, fuertemente criticada por los geógrafos alemanes Albrecht Penck y Walter Penck, quienes tomaban en cuenta el clima y el tectonismo como influencia en el modelado terrestre, aportando la descripción, clasificación e interpretación del origen y de la evolución, y precisamente esto es lo que actualmente se toma en cuenta para cualquier trabajo de geomorfología, por lo que algunos geocientíficos toman a la *Geomorfología Sísmica* como parte de la Geomorfología Aplicada y no como una geomorfología independiente, concepto que no se pretende cambiar en este trabajo de investigación. La *Geomorfología Sísmica* es una valiosa técnica de interés petrolero, ayuda a una acertada exploración y disminuye el riesgo en diversos aspectos, se apoya de herramientas de softwares especializados, en

donde se obtienen imágenes en planta y/o perfil, la información adquirida debe ser analizada para visualizar las formas idóneas en la exploración petrolera. Los softwares empleados fueron: OpendTect, Petrel, Landmark, y Geoprobe, todos ellos trabajan con la misma lógica, atributos y filtros, que permitieron ver formas sepultadas, los atributos trabajados fueron: Coherencia, Descomposición espectral, Energía, Frecuencia, Semblanza, Similitud y Varianza, aunque ninguno de ellos se destacó de manera tangible para la interpretación. Cabe destacar que una buena interpretación geomorfológica no solo depende del software utilizado, sino de la información geológica del área estudiada y de la calidad de imagen en la información sísmica.

La Cuenca de Chicontepec se trabajó en el software OpendTect, aquí las formas de relieve no resaltaron posiblemente por la deficiente calidad de información sísmica pese a que se jugó con atributos y diversos colores sin lograr mayor éxito, por lo que la interpretación fue quizá escasa y forzada. Respecto a la Cuenca del Sur del Golfo de México, se utilizó el software Petrel, en ésta hay mejor interpretación en las imágenes y sobre todo una gran semejanza con lo visto en campo, en especial en la Región “El Doctor”. Por último, la Cuenca de Burgos fue realizada en el software Landmark y Geoprobe, existió una elevada nitidez que ayudó en la delimitación de las geoformas presentes, permitiendo encontrar cierta similitud con las geoformas cársticas de las regiones, en gran parte favorecido por el ambiente sedimentario, de la cuenca.

La Región del Pozo Tolentino-1 y Región cercana a Guaxcamá, San Luis Potosí, compuesta por rocas calizas, evaporitas, e ígneas, tiene semejanza en las geoformas con la Cuenca de Burgos, gracias a la litología compartida, así como a la cabalgadura erosionada que permitió la formación de planicies, y a la calidad de la información sísmica que permitió realizar una interpretación adecuada. En cuanto a la Región El Doctor, Querétaro, tuvo una relación apremiante con la Cuenca Sur del Golfo de México en las formas interpretadas y sobre todo en campo respecto al anticlinal en forma de cabalgadura de la Formación el Doctor. Y tocante la Región Cuenca de Toluca, Estado de México, aunque es totalmente ígneo existen formas similares a las de la Cuenca de Burgos, especialmente en la planicie de Toluca, cabe mencionar la gran importancia por

la que se incluyó a esta región, que es simplemente el reciente descubrimiento del “Volcán Chapopote” y su relación con la localización de hidrocarburos en el Golfo Profundo de México, aspecto que ya no solo es de interés el relieve sedimentario, sino también lo es actualmente el relieve ígneo.

VI.2.- RECOMENDACIONES

Para elevar la confiabilidad en una interpretación sísmica, creo que favorecería conocer la visión de un geomorfólogo, sería importante crear lazos de un estudio interdisciplinario para una adecuada y óptima interpretación geomorfológica, más que nada por el riesgo de caer en una inadecuada o peor aún llegar a forzar la interpretación y ver lo que se quiere ver más no lo que en verdad pudiera existir, por el manejo de escalas en el que se trabaja. En geomorfología corresponde a estudio regionales, donde se estudian amplios territorios, cartografiados a mediana o pequeña escala (1:250,000 a 2,000,000), para establecer la historia del relieve (paleogeomorfología), esto permite ampliar la visión y tener un conocimiento atinado de manera global del área de interés y poder hacer una interpretación acertada en aspectos puntuales.

También se recomienda trabajar con una adecuada información sísmica, ya que en gran medida la calidad de la interpretación depende de ello. Así como crear un catálogo de geoformas en ambientes sedimentarios, propios de cuencas petroleras, esto facilitaría a las investigaciones una adecuada identificación de lo interpretado, así como saber las características individuales de cada una de las geoformas de interés.

ANEXO FOTOGRÁFICO DEL TRABAJO DE CAMPO

REGIÓN POZO TOLENTINO-1 Y REGIÓN CERCANA A GUAXCAMÁ, SAN LUIS POTOSÍ



Laderas de montaña altas al NE de la Región, al sur del Potrero de Santa Gertrudis, mostrando al interior una zona bastante erosionada constituida por una gran planicie aluvial, (diciembre, 2010).



Flanco izquierdo de las laderas de montaña altas, al NE de la Región, constituida por material coluvial, y vista de la gran planicie aluvial interna, (diciembre, 2010).



Flanco derecho de laderas de montaña altas, al NE de la Región, constituida por abanicos aluviales y vista de la gran planicie aluvial interna, (diciembre, 2010).



Laderas de montaña altas al NE de la Región, con un extenso piedemonte y en el interior parte de una gran planicie aprovechada en agricultura, (diciembre, 2010).



Lomeríos y masas volcánicas de cimas planas rodeando la laguna “Las Golondrinas”, al NE de la Región, (diciembre, 2010).



Vista de las Laderas de montaña altas de origen sedimentario, Lomeríos y masas volcánicas de cimas planas rodeando la laguna “Las Golondrinas” al NE de la Región, (diciembre, 2010).



Vista de un flanco del río en estado seco, Santa Catarina, mostrando laderas de montaña bajas, de material volcánico, cerca de la localidad Potrerito de los Castillos, (diciembre, 2010).



Zona de laderas de montaña altas, de origen sedimentario, cerca de una mina y cerca del Valle de los Fantasma, al SW, de la Región, (diciembre, 2010).

REGIÓN FORMACIÓN EL DOCTOR, QUERÉTARO



Formas suaves de calizas redondeadas, mostrando piedemonte erosivos intercalados con laderas de montaña, al Sur de la Región, (agosto, 2010).



Laderas de montaña altas, con pendientes suaves y erosionados, al Sur de la Región, (agosto, 2010).



Corte al pie de carretera, mostrando a la caliza triturada (a la izquierda), por el esfuerzo de la cabalgadura al centro Sur de la Región, (agosto, 2010).



Vista sobre la carretera de un anticlinal en perfil, que comparte las mismas características fisiográficas de la Sierra el Doctor, al SW, de la Región, (agosto, 2010).



Ladera montañosa de cima plana, mostrando valles intermontanos erosivos, con pequeñas planicies intercaladas, (agosto, 2010)



Vista tomada sobre el margen del anticlinal constituido por calizas de plataforma, hacia las laderas de montaña formadas por calizas de cuenca, entre la población El Doctor y Los Hernández, (diciembre, 2010).

REGIÓN CUENCA DE TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO



Zona de lomeríos y piedemontes al SW de Zacángo en Calimaya. Al fondo a la izquierda se observan las laderas de montaña del Nevado de Toluca, (febrero, 2000).



Vista de la estructura volcánica Nevado de Toluca, mostrando laderas de montaña y piedemontes, y vista de la planicie lacustre aluvial. Sur de la Cuenca de Toluca cerca de Almoloya del Río, (febrero, 2000).



Vista Este del Cerro Putla, mostrando laderas de montaña superior e inferior, con sus respectivos piedemontes, y vista de la planicie aluvial. SE del Nevado de Toluca, (febrero, 2000).



Vista del lomerío medio con superficie cumbral plana, y una planicie aluvial al SW de Tenango de Arista, (febrero, 2000).

BIBLIOGRAFÍA

- Aristarjova L.B. (1979). Geomorfologicheskie issledovania pri poiskaj nefti y gaza. Universidad de Moscú
- Bloomfield, Keith (1974). Reconocimiento geológico en el Nevado de Toluca, México. Instituto de Geología, UNAM, Serie Divulgación. N° 2, 38-42 pp.
- Bloomfield, Keith (1975). A Late-Quaternary monogenetic volcano field in Central México. Geologische Rundschau, Stuttgart, Núm. 64, 476-597 pp.
- Cantú, Ch. A. (1971). La serie Huasteca (Jurásico-Medio-Superior), del centro este de México, Rev. Inst. Mex. Petrol. Vol. III, N° 2 17-40 pp.
- Carter, David, C. (2003). 3-D seismic geomorphology: Insights into fluvial reservoir deposition and performance, Widuri field, Java Sea. AAPG, Bulletin, vol. 87, núm. 6, 909-934 pp.
- Carrillo, Martínez, M. (1981). Contribución al estudio geológico del macizo calcáreo, El Doctor, Querétaro. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, Vol. 5, Núm. 1, 25-29 pp.
- Caso, M., Pisanty, I., Ezcurra, E. (2004). Estado del conocimiento de las comunidades bénticas en el Golfo de México, Diagnóstico ambiental del Golfo de México, compiladores, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Vol. 1, 225-226 pp.
<http://books.google.com.mx/books?id=GsqU9iMrFOgC&pg=PA226&lpg=PA226&dq=vulcanismo+de+asfalto+en+>
- Castellanos, Nava, P., Domínguez, Mariani, E., Esteller, Alberich, M. V., Expósito, Castillo, J. L. (2010). Unión Geofísica Mexicana, A.C. Reunión Anual. GEOH-18, 732
- Coque, R. (1984). Geomorfología. Alianza Editorial. Madrid, 475 págs.
<http://www.ugm.org.mx/pub/revisor.php?idioma=Eng&modulo=resumen&op=pPelResumen&idPaper=732>
- Córdova, C. (1988). Cartografía geomorfológica en escala pequeña del Occidente de la República Mexicana, Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, UNAM, México. 7-21 pp.
- dGB, Beheer, B.V. (2002-2009). OpendTect User Documentation Version 4.0, dGB Earth Sciences,
- Demek, Embleton, (1978). Guide to Medium-Scale Geomorphological Mapping. International Geographical Union Commission on Geomorphological Survey and Mapping. E. Schweizerbatsche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller) Stuttgart. 348 pp.
- Derrau, Max (1983). Geomorfología, Ed. Ariel Geografía, Barcelona, 517 pp.
- Díaz, J.L., Hernández, J. R. y Reyes, R. (2001). El análisis geomórfico-ambiental en territorios montañosos. Mapping Interactivo, Revista Internacional de Ciencias de la Tierra, España; N° 69, 94-98 pp.

- Díaz, Pérez, G. S. (2001), Cartografía Morfogenética de la Cuenca de Toluca a Escala 1:100, 000, Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 147 pp.
- Echanove, E; O. (1986). Geología Petrolera de la Cuenca de Burgos (Parte I), consideraciones geológico petroleras. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Vol. 38, Núm. 1, 3-39 pp.
- García, Martínez, R., Solís, Valdez, S. (2010). Cuantificación de metales pesados y iones inorgánicos en la precipitación pluvial en San Joaquín una zona minera semi-rural y Juriquilla una zona localizada al noroeste de la Ciudad de Querétaro. Unión Geofísica Mexicana, A.C. Reunión Anual. CCA-28, 781 pp.

<http://www.ugm.org.mx/pub/revisor.php?idioma=Eng&modulo=resumen&op=pPeIResumen&idPaper=781>

- Garza, Blanco S. (1978). Plano Geológico de la Hoja Santa Catarina. Instituto de Geología y Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Geoinfo, S.A., Proveedores de Soluciones e Inteligencia de Negocios, (2011).

<http://www.geoinfo-int.com/htmls/sig.html>

- Geological Society, (2007). Seismic Geomorphology, Applications to Hydrocarbon Exploration and Production. Edited by R.J. Davies, H.W. Posamentier, L.J. Wood and J.A. Cartwright, Special Publication 277 London , 1-14 pp.
- Google Earth, (2010). Europa Technologies US Dept of State Geographer, Map Link/Tele Atlas.
- Guerasimov, I. P. (1986). Problemas de geomorfología global: geomorfología actual y teoría del moviismo en la historia geológica de la Tierra (traducido del ruso), Ed. Nauka, Moscú.
- Guerrero, Mothelet, V. (2005). El Chapopote, un nuevo tipo de volcán, Revista Mensual ¿Cómo ves?, Divulgación de la Ciencia de la UNAM, N° 77, pág. 16

http://www.comoves.unam.mx/archivo/geofisica/77_volcanes.html

- Hernández, Jáuregui, R. (1999). Sedimentación Sintectónica de la Formación Soyatal (Turoniano Medio-Campaniano) y modelado cinemático progresivo de la Cuenca de flexura de Maconi, Querétaro, Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 94 pp.
- Hernández, M. J., Eguizabal, M.F.J., Valencia, I.J.J. (1990). Evolución estructural y tectónica de la Plataforma Valles San Luis Potosí, C-4028, Inst. Mex. del Petrol. México, Informe inédito.
- Hernández, Santana, J. R., Magaz, García, A. R., Ortiz, Pérez, M. A., y Zamorano, Orozco J. J. (1995). Clasificación morfoestructural (tipológica) y morfotectónica (regional) del relieve oriental cubano: modelo insular de transición interplacas”, *Investigaciones Geográficas*, núm. especial 3, Instituto de Geografía, UNAM, México, 13-35 pp.

- Hernández, Santana, J. R. y Ortiz, Pérez M. A. (2005). Análisis morfoestructural de las cuencas hidrográficas de los ríos Sabana y Papagayo (tercio medio-inferior), estado de Guerrero, México, Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, Núm. 56, 7-25 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Geografía e Informática), 1987. Síntesis Geográfica, Nomenclator y Anexo Cartográfico del Estado de México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. INEGI-SPP México. 223 pp.
- Jacobo, Albarrán, J. (1986). El basamento del Distrito de Poza Rica y su implicación en la generación de hidrocarburos. Rev. Inst. Mex. del Petrol. México, Vol. XVIII, N° 1, 5-24 pp.
- Khaled, Fouad, L., Brown, F., Ambrose, A. W., Dunlap, Dallas; García, Aranda, M., Hernández, Romano, U. (2004). Genetic Facies Analysis Using Seismic Geomorphology and Seismic Attributes in the Continental Shelf of Eastern Mexico. AAPG International Conference, October 24-27, Cancún Mexico, 1-6 pp.
- López, Doncel R., Mata Segura J.L. (2010). Unión Geofísica Mexicana, A.C. Reunión Anual. SE04-11, 824.
<http://www.ugm.org.mx/pub/revisor.php?idioma=Eng&modulo=resumen&op=pPelResumen&idPaper=824>
- López, Quintero, J. A. (2008). Apuntes de Sistemas de Información Geográfica, para la IV edición del Diplomado en Geomática, Instituto de Geografía, UNAM.
- Lugo, Hubp, J. (1988). Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos), Instituto de Geografía, UNAM. 109 pp.
- Lugo, Hubp, J. (1989). Diccionario Geomorfológico, Instituto de Geografía, UNAM. 337 pp.
- Machín, J. A. L. (2004). Estudio del relieve para la Gestión Ambiental, con el uso de Sistemas de Información Geográficos (SIG). Mapping Interactivo, Revista Internacional de Ciencias de la Tierra, España; N° 98, 24-30 pp.
- Mooser, F., Montiel, Arturo y Zúñiga, Angel (1996). Nuevo Atlas Geológico de las Cuencas de Toluca, México y Puebla. Estratigrafía, Tectónica Regional y Aspectos Geotérmicos (1937-1996). Comisión Federal de Electricidad. 1ª. Ed. 1996, México, D.F.
- Mooser, F. and Maldonado Koerdell, M. (1961). Pene-contemporaneous tectonics along the Mexican Pacific Coast, Revista Geofísica Internacional, Núm. 1, 1-20 pp.
- Mooser, F. (1975). La Cuenca del Valle de México. Memorias de las obras del drenaje profundo del Distrito Federal. D.D.F, 1: 8-38 pp.
- Mugica, M. R. (1976). Estudio petrográfico del basamento en el área de Miquihuana, Tamaulipas, C-1013, Inst. Mex. del Petrol. México, Informe Inédito.
- Muñoz, Luza, M. (1995). El pensamiento norteamericano de fines del XIX, El significado de la Geomorfología Davisiana y sus aplicaciones actuales en Isla de Juan Fernández. Revista Estudios Norteamericanos, Vol. 1, N° 1, www.estudiosnorteamericanos.cl/revista-6.htm

- Newton, A. J. and Metcalfe, S. E. (1999). Tephrochronology of the Toluca Basin, Central México, Quaternary Science Reviews, Núm. 18, 1039-1059 pp.
- Ortega, G. F. (1978). El Gneis novillo y rocas metamórficas asociadas en los cañones del Novillo y la Peregrina, área de Ciudad Victoria, Rev. Inst. Geol. UNAM, Vol. 2, N°.1, México.
- Palacio, P, J. L. y Luna, González, L. (1993). Sistemas de Información Geográfica, Introducción al manejo del ILWIS (Integrated Land and water Management Information System). Versión 1.3. Instituto de Geografía, UNAM, 65 pp.
- Palacio, Prieto, J. L. (1996). Apuntes sobre Percepción Remota y Videografía. Escrito para la materia de Laboratorio de Cartografía 2. Geografía. F.F. y L, UNAM. México 20 pp.
- Pedraza, Gilzans, J. (1996). Geomorfología, Principios, Métodos y Aplicaciones. Editorial Rueda; Madrid 414 pp.
- Posamentier, H.W. (2005). Application of 3D seismic visualization techniques for seismic stratigraphy, seismic geomorphology, and depositional systems analysis. Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives-Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference Geological Society, London, 1565-1576 pp.
- Rodríguez, Vela, J. J. (2004). Administración de proyectos de desarrollo de sistemas de información. GestioPolis.com
<http://www.gestiopolis.com/recursos2/documentos/fulldocs/ger/adproysisinf.htm>
- Robinson, H., Arthur, Morrison, L., Joel, Muehrcke, C., Phillip, Kimerling, Jon, A., y Guptill, C. Stephen (1995). Elements of Cartography. Sexta Edición. Editada por John Wiley y Sons, Inc. USA. 674 pp.
- Rueda, G. J., Morales, J., Dueñas, M. A., Salas, E., Rodriguez, J. L., Gutierrez, L., López, E., Trinidad, R., León, C., y Zepeda, M. (1982). Evaluación geológica-petrolera de las rocas del Jurásico Medio de La Cuenca de la Formación Rosario, con base en estudios palinoestratigráficos, de rayos x y de geoquímica. C-1115, Inst. Mex. del Petrol. México, Informe Inédito.
- Sánchez, Rubio, G. (1977). Los dendogramas y su uso en la petrografía, UNAM, Instituto de Geología, Revista, vol. 1, 174-176 pp.
- Sánchez, Rubio, G. (1984). Notas sobre la Vulcanología Cenozoica de la Región entre Temascaltepec y la Marquesa, Estado de México. Libro Guía de la Excursión a Tierra Caliente, Estados de Guerrero y México, IV Congreso Geológico Nacional. Sociedad Geológica Mexicana. 26-32 pp.
- Sawyer, Derek, E., Flemings, Peter, E., Shipp, Craig, R., Winker, Charles, D. (2007). Seismic geomorphology, lithology, and evolution of the late Pleistocene Mars-Ursa turbidite region, Misisipi Canyon area, northern Gulf of Mexico. AAPG, Bulletin, vol. 91, núm. 2, 215-234 pp.
- Serrano, Barquín, R. (1993). Una propuesta de evaluación de recurso suelo con fines de planeación territorial el caso de la región del Valle de Toluca. Tesis de Maestría, UAEM Facultad de Arquitectura y Arte. 210 pp.
- Schutter, S.R. (2003), Occurrences of Hydrocarbons in and Around Igneous Rocks, Hydrocarbons in Crystalline Rocks. Petford N y Mc Caffrey, KJW, Geological Society Special Publication 214, London, 35-68.

http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors09/spr09/evaluating_volcanic_reservoirs.ashx

- Solís, Valdez, S., Hernández, Silva, G., Pérez, Arvizu, O. (2010). Mercurio total en cultivos agrícolas de temporal en San Joaquín, Qro. Unión Geofísica Mexicana, A.C. Reunión Anual. SE10-16, 649.
<http://www.ugm.org.mx/pub/revisor.php?idioma=Eng&modulo=resumen&op=pPelResumen&idPaper=649>
- Spiridonov, A. I. (1981). Principios de la metodología de las investigaciones de campo y el mapeo geomorfológico. Tomo I. capítulo 7 El análisis geomorfológico estructural, Facultad de Geografía, Universidad de la Habana. p.p. 155-217
- Totolhua, R. V. (2007). Implementación de un portal geoespacial con una perspectiva de infraestructura de datos espaciales. Trabajo de titulación de licenciatura, desarrollo de un caso práctico, México, UNAM., 39 pp.
- Verstappen, H. Th. and Van Zuidam, R. A. (1991). The System of Geomorphologic Survey, A basis for the evaluation of natural resources and hazards, ITC Publication Number 10, Enschede. The Netherlands. Editorial Elsevier. 437 pp.
- Villaseñor, P. E. (1999). Modelado Cinemático Estructural del mecanismo de emplazamiento de la formación al Sureste de México e Implicaciones petroleras, Tesis de Maestría en Ingeniería, (Exploración de recursos energéticos del subsuelo), UNAM.
- Weilbel, R. y M. Séller. (1991). Digital Terrain Modelling in Maguire, D. J., M. F. Goodchild y D. W. Rhind (eds), Geographical Information. Systems: Principles and Applications. Vol. 1, longman, U. K; 269-279 pp.
- Yamamoto, J. y Mota, R. (1988). La secuencia de temblores del Valle de Toluca, México. Revista Geofísica Internacional, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Núm. 27 (2), 279-298 pp.
- Zeng, H. (2007), Seismic imaging for seismic geomorphology beyond the seabed: potentials and challenges. Geological Society, London, Special Publications, Vol. 277, 15-28 pp.

CARTOGRAFÍA EMPLEADA

- INEGI, 2005. Carta Topográfica, Hoja Santa Catarina, Clave: F14A85, Esc. 1:50,000
- INEGI, 1974. Carta Geológica, Hoja Santa Catarina, Clave: F14A85, Esc. 1:50, 000
- INEGI, 2000. Carta Topográfica, Hoja San Joaquín, Clave: F14C58, Esc. 1:50,000
- INEGI, 1979. Carta Geológica, Hoja San Joaquín, Clave: F14C58, Esc. 1:50, 000
- INEGI, Carta Topográfica, Hoja Ixtlahuaca de Rayón, Clave: E14A27, Esc. 1:50, 000
- INEGI, Carta Topográfica, Hoja Milpa Alta, Clave: E14A49, Esc. 1:50, 000
- INEGI, Carta Topográfica, Hoja Nevado de Toluca, Clave: E14A47, Esc. 1:50, 000
- INEGI, Carta Topográfica, Hoja San Miguel Zinacantan, Clave: E14A37, Esc. 1:50, 000
- INEGI, Carta Topográfica, Hoja Tenango de Arista, Clave: E14A48, Esc. 1:50, 000

- INEGI, Carta Topográfica, Hoja Toluca de Lerdo, Clave: E14A38, Esc. 1:50, 000
- INEGI, Carta Topográfica, Hoja Villa de Allende, Clave: E14A36, Esc. 1:50, 000
- INEGI, Carta Topográfica, Hoja Villa del Carbón, Clave: E14A28, Esc. 1:50, 000
- INEGI, 1995. Espaciomapa, Hoja Ciudad de México, Clave: E14-2, Esc. 1:250, 000
- INEGI, 1981. Carta Topográfica, Hoja Ciudad de México, Clave: E14-2, Esc. 1:250, 000
- INEGI, 1983. Carta Geológica, Hoja Ciudad de México, Clave: E14-2, Esc. 1:250, 000
- Garza, Blanco, Sergio. (1978). Plano Geológico de la Hoja Santa Catarina, Esc. 1:50,000. Universidad Autónoma de San Luis Potosí,

PÁGINAS DE INTERNET

- Dataseismic, (2010), http://dataseismic.com/index.php?ru=software_a&lg=esp
- Landmark Graphics Corporation (2007), Software Geoprobe
http://www.halliburton.com/public/landmark/contents/Data_Sheets/web/H05561S.pdf
- Halliburton , (2010) Landmark.
<http://www.halliburton.com/ps/default.aspx?navid=913&pageid=1072&prodgrp=MSE%3a%3aQTVH8E8Z>
<https://landmarklearning.halliburton.com/>
http://www.halliburton.com/public/landmark/contents/Data_Sheets/web/H05561S.pdf
- INEGI (Instituto Nacional de Geografía e Informática), 2008. Mapa de Fisiografía de San Luis Potosí
<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/slp/fisio.cfm?c=444&e=19>
- INEGI (Instituto Nacional de Geografía e Informática), 2008. Mapa de Fisiografía de Querétaro
<http://www.inegi.org.mx/default.aspx>
- Schlumberger, (2011). Petrel. <http://www.slb.com/petrel.aspx>
<http://simulacion-de-yacimientos.blogspot.com/2009/03/nuevas-funcionalidades-de-petrel-2009.html>
http://www.slb.com/services/software/geo/petrel/seismic/seismic_sampling.aspx