

00364
y
Lej

**CARTOGRAFÍA Y ESTRATIGRAFÍA MEDIANTE SENSORES
REMOTOS EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA:
ÁREA DE HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, MÉXICO.**

TESIS
Que para obtener el grado
Maestro en Ciencias (Geología)

Presenta:

Jesús Uribe Luna



CIUDAD UNIVERSITARIA

1999

1999

273130

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

PAG INACCION

DISCONTINUA.

INDICE

Resumen	5
CAPITULO I	
1.-Introducción	5
1.1.- Objetivos	6
1.2.- Alcance	7
1.3.- Area de estudio	7
1.4.- Metodología	8
1.5.- Fuentes de información utilizadas	8
1.6.- Equipos y programas de cómputo	9
1.7.- Antecedentes	9
1.8.- Marco geológico regional	11
CAPITULO II	
2.- Fotogeología	12
2.1.- Interpretación geológica de fotografías aéreas	13
2.2.- Unidades fotogeológicas	15
2.3.- Unidad 1, esquisto y filita.	15
2.4.- Unidad 2, esquisto blasto porfídico.	18
2.5.- Unidad 3, arenisca y conglomerado.	19
2.6.- Unidad 4, limolita y toba.	20
2.7.- Unidad 5, caliza oolítica.	21
2.8.- Unidad 6, caliza arcillosa.	21
2.9.- Unidad 7, caliza arcillosa.	22
2.10.- Unidad 8, caliza arcillosa.	22
2.11.- Unidad 9, caliza biomicrítica.	23
2.12.- Unidad 10, conglomerado polimictico.	24
2.13.- Unidad 11, arena, arcilla, arenisca, toba.	25
2.14.- Unidad 12, toba lítica andesítica.	26
2.15.- Unidad 13, andesita de hiperstena.	27
2.16.- Unidad 14, andesita de augita.	28
2.17.- Unidad 15, grava y arena.	28
2.18.- Unidad 16, arena y arcilla.	29
2.19.- Unidad 17, andesita.	29
2.20.- Unidad 18, diorita de hornblenda.	29
CAPITULO III	
3.- Estratigrafía espectral	30
3.1.- La percepción remota	31
3.2.- Clasificación de una imagen	31
3.3.- Clasificación geológica supervisada	32
3.4.- Selección de bandas de una imagen para la clasificación	32
3.5.- Imagen en el rojo del espectro visible.	33
3.6.- Imagen en el infrarojo cercano (banda 4)	35
3.7.- Imagen en el infrarojo medio (banda 5)	36
3.8.- Imagen en el infrarojo medio (banda 7)	37
3.9.- Imagen en el infrarojo medio, infrarojo cercano y rojo visible (5,4,3)	38
3.10.- Imagen en infrarojo medio, infrarojo cercano y rojo visible (7,4,3)	40
3.11.- Selección de 100 campos de entrenamiento y clasificación supervisada	41
3.12.- Algoritmo de la primera clasificación	43
3.13.- Selección de 32 campos de entrenamiento y clasificación supervisada	44
3.14.- Algoritmo de la segunda clasificación	46
3.15.- Algoritmo de la tercera clasificación	47
3.16.- Evaluación de la clasificación	48

3.17.- Análisis geológico en tres dimensiones	52
3.18.- Composición una imagen y modelo digital de elevación.	53
CAPITULO IV	
4.- Secciones geológicas y Sistema de Posicionamiento Global	56
4.1.- Descripción de las secciones geológicas	56
4.2.- Sección A-A'	57
4.3.- Sección B-B'	59
4.4.- Sección C-C'	62
4.5.- Sección D-D'	65
4.6.- Sección E-E'	66
4.7.- Sección F-F'	68
4.8.- Sección G-G'	69
4.9.- Sección H-H'	73
4.10.- Sección I-I'	75
4.11.- Estratigrafía	77
4.12- Geología estructural	81
4.13 Geología histórica y tectónica	86
CAPITULO V	
5.- Sistemas de Información Geográfica y su uso en geología	87
5.1.- Definición de una base de datos	88
5.2.- Diseño de una base de datos geológica	89
5.3.- Modelo de datos geológicos	89
5.4.- Productos de la definición de la base de datos	90
5.5.- Base de datos de litología	91
5.6.- Base de datos de litoestratigrafía	91
5.7.- Base de datos de cronoestratigrafía	92
5.8.- Integración de la información geológica en un SIG	92
CAPITULO VI	
6.- Discusión de resultados	94
6.1.- Conclusiones	97
6.2.- Recomendaciones	100
Anexo 1	
Sistemas de Información Geográfica	102
Anexo 2.	
Programa fuente de aplicación desarrollada.	108
Anexo 3.	
Ejemplos de mapas generados por el sistema GIS	116
Bibliografía.	117

DEDICATORIA

A mis padres

+Eustolia Luna Ramírez

+Jesús Uribe Ibarra

A mi hermana

+Clemencia Uribe Luna

A mis Hermanos

Virginia

Graciela

Gloria

Amparo

Armando Gumersindo

Susana

María Isabel.

A mi esposa

Irma Castro Ruíz

A mis hijas

Adriana Lizbeth

Katia Berenice

A la Facultad de Ingeniería.

A la Facultad de Ciencias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México. UNAM

AGRADECIMIENTOS.

En estas líneas agradezco a todos aquéllos que de alguna manera contribuyeron a la realización del presente trabajo y a mi formación profesional. Con su ayuda he llegado a comprender que el camino más largo puede convertirse en un paseo a través del tiempo geológico. A la Dr. Cecilia Caballero Miranda y al Ingeniero Enrique González Torres por su ayuda en la sección de la cañada Platanar. A los ingenieros Ana Mercedes Alvarez Aceves y Alvaro Luevano Orta por su ayuda en la sección del poblado de San Miguel Papalutla. Al M. en C. Gilberto Silva Romo y al Dr. Dante Morán Centeno por su ayuda en la sección San Jerónimo Silacayoapilla. A los ingenieros Aline Concha Dimas y Enrique González Torres por su ayuda en la sección de la cañada el Boquerón. Al pasante de Ingeniero Geólogo Víctor Sotelo Hernández por su ayuda en la sección de la cañada El Boquerón Chico. Al ingeniero Iván Alor Ortiz y a Gilberto Mosqueda por su ayuda en la sección San Jerónimo Silacayoapilla y Zapotitlán Palmas. A los ingenieros Claudia Mendoza Rosales y José Luis Navarro Reyna por su ayuda con el uso de receptores GPS y el estereoscopio de espejos. Al Físico Alfonso Gutiérrez y a la ingeniero Elizabeth Nava por su ayuda en el proceso de imagen de satélite en el sistema ERDAS. Al ingeniero Jaime Pinzón de Hajar por su ayuda con bibliografía del sistema global de posicionamiento. A los ingenieros Edgar Méndez, Alicia Villamil y Carmen Rodríguez por su ayuda con bibliografía de Sistemas de Información Geográfica y en el procesamiento de curvas de nivel a partir de un modelo digital de elevación. Al M. en C. Carlos Montaña Espinosa y a Mario Ledezma por su ayuda en el procesamiento de datos vectoriales en el sistema Arc/Info. Al Geógrafo Alejandro Díaz Ponce por su ayuda en el proceso de digitalización de datos vectoriales y fotografías aéreas. A los ingenieros Emiliano Campos Madrigal y Alfredo Victoria por su ayuda en la laminación y petrografía de muestras de roca. A Mauricio Méndez y Ernesto Gutiérrez por su ayuda en el uso del lenguaje de programación Map Basic y a Marco Antonio Pérez y Agustín Ortiz por su ayuda en el uso de Visual Basic. A José Luis Sánchez Zavala y Consuelo Macías por su ayuda en la microfotografía petrográfica. Al Dr. Enrique Cabral Cano, quien tuvo la amabilidad y la confianza para dirigir esta tesis. A los doctores Rosa María Prol Ledesma, Cecilia Caballero Miranda, Fernando Ortega Gutiérrez, Gustavo Tolson Jones, José Luis Palacios Prieto y Raymundo Martínez Serrano por la revisión crítica al documento y sus valiosos comentarios. A todos aquéllos que indirectamente me ayudaron e igualmente fueron importantes para llevar a cabo este trabajo.

RESUMEN

Se presenta la cartografía litoestratigráfica del área de Huajuapán de León, Oaxaca, obtenida de la interpretación geológica de fotografías aéreas y de imágenes de satélite y su integración en un Sistema de Información Geográfica. La estratigrafía del área de estudio comprende a las unidades Formación Cosoltepec y Granitoides Esperanza del Paleozoico; Tecomazúchil, Chimeco, Mapache, Limolita Chapultepec, Caliza Solano, Caliza Papalutla y Teposcolula del Mesozoico; Conglomerado Tamazulapan, Formación Huajuapán, Toba Llano de Lobos, Andesita Yucudaac y Andesita San Marcos del Cenozoico. Se observaron dos unidades ígneas intrusivas: la Diorita Chilixtlahuaca y la Andesita Suchixtlahuaca del intervalo Mesozoico-Cenozoico. Las visualizaciones oblicuas de las imágenes de satélite y las secciones medidas en campo y referidas con posiciones de coordenadas terrestres son elementos de apoyo para dar mejor precisión a la definición cartográfica y estratigráfica. Los fracturamientos de rocas paleozoicas y mesozoicas tienen orientación NE60°SW y en menor proporción de dirección NW30°SE y se relacionan con esfuerzos de compresión post-mesozoicos. Los planos de foliación muestran estructuras de planos axiales en dirección NW20°SE en el complejo Acatlán y los rumbos de capas de las rocas sedimentarias mesozoicas muestra patrones similares por lo que la deformación de rocas mesozoicas involucró superficialmente al basamento a lo largo de fallas inversas locales a nivel de la Formación Cosoltepec. Las rocas volcánicas cenozoicas presentan fracturamientos con orientación muy semejante a las de las rocas más antiguas así como direcciones NW35°SE que están relacionadas a fallamientos normales que definen fosas tectónicas locales norte-sur. En la interpretación de ambientes paleotectónicos, las formaciones detríticas jurásicas se originaron por la existencia de fosas tectónicas con orientación NE-SW, activas probablemente hasta el Calloviano y a partir del cual el régimen de transgresión marina dominó hasta el Cenomaniano. Las estructuras de paleofosas se reactivaron durante el Paleógeno para posicionar en su actual situación topográfica alta a las rocas paleozoicas y a la cobertura sedimentaria mesozoica con la formación de cuerpos gruesos de material piroclástico pseudo estratiforme en el Oligoceno y derrames andesíticos en el Mioceno-Plioceno.

CAPITULO I

1.- INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se utilizaron imágenes de sensores remotos analógicos y digitales para la extracción de información geológica y su integración en una base de datos para la construcción de cartografía geológica digital de la región comprendida dentro de la carta de INEGI, E-14-D-14, escala 1:50,000 "Huajuapán de León", en el estado de Oaxaca, México. Se seleccionó esta región porque se contó con diferentes fuentes de información previas para comprobar su utilidad en la

RESUMEN

Se presenta la cartografía litoestratigráfica del área de Huajuapán de León, Oaxaca, obtenida de la interpretación geológica de fotografías aéreas y de imágenes de satélite y su integración en un Sistema de Información Geográfica. La estratigrafía del área de estudio comprende a las unidades Formación Cosoltepec y Granitoides Esperanza del Paleozoico; Tecomazúchil, Chimeco, Mapache, Limolita Chapultepec, Caliza Solano, Caliza Papalutla y Teposcolula del Mesozoico; Conglomerado Tamazulapan, Formación Huajuapán, Toba Llano de Lobos, Andesita Yucudaac y Andesita San Marcos del Cenozoico. Se observaron dos unidades ígneas intrusivas: la Diorita Chilixtlahuaca y la Andesita Suchixtlahuaca del intervalo Mesozoico-Cenozoico. Las visualizaciones oblicuas de las imágenes de satélite y las secciones medidas en campo y referidas con posiciones de coordenadas terrestres son elementos de apoyo para dar mejor precisión a la definición cartográfica y estratigráfica. Los fracturamientos de rocas paleozoicas y mesozoicas tienen orientación NE60°SW y en menor proporción de dirección NW30°SE y se relacionan con esfuerzos de compresión post-mesozoicos. Los planos de foliación muestran estructuras de planos axiales en dirección NW20°SE en el complejo Acatlán y los rumbos de capas de las rocas sedimentarias mesozoicas muestra patrones similares por lo que la deformación de rocas mesozoicas involucró superficialmente al basamento a lo largo de fallas inversas locales a nivel de la Formación Cosoltepec. Las rocas volcánicas cenozoicas presentan fracturamientos con orientación muy semejante a las de las rocas más antiguas así como direcciones NW35°SE que están relacionadas a fallamientos normales que definen fosas tectónicas locales norte-sur. En la interpretación de ambientes paleotectónicos, las formaciones detríticas jurásicas se originaron por la existencia de fosas tectónicas con orientación NE-SW, activas probablemente hasta el Calloviano y a partir del cual el régimen de transgresión marina dominó hasta el Cenomaniano. Las estructuras de paleofosas se reactivaron durante el Paleógeno para posicionar en su actual situación topográfica alta a las rocas paleozoicas y a la cobertura sedimentaria mesozoica con la formación de cuerpos gruesos de material piroclástico pseudo estratiforme en el Oligoceno y derrames andesíticos en el Mioceno-Plioceno.

CAPITULO I

1.- INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se utilizaron imágenes de sensores remotos analógicos y digitales para la extracción de información geológica y su integración en una base de datos para la construcción de cartografía geológica digital de la región comprendida dentro de la carta de INEGI, E-14-D-14, escala 1:50,000 "Huajuapán de León", en el estado de Oaxaca, México. Se seleccionó esta región porque se contó con diferentes fuentes de información previas para comprobar su utilidad en la

extracción de información geológica de un amplio rango estratigráfico y variedad litológica. Las fuentes de información de los sensores remotos considerados en este trabajo son fotografías aéreas de vuelo alto, una imagen digital del sensor Thematic Mapper y verificación de campo con la ayuda de un receptor del Sistema de Posicionamiento Global (GPS); la información geológica obtenida se relacionó con información bibliográfica y otros trabajos de investigación disponibles para dar un soporte documental a la definición de una base de datos geológica dentro de un Sistema de Información Geográfica. Las fotografías aéreas y las imágenes de satélite se utilizaron como un medio cuantitativo y cualitativo para obtener información que constituyó la infraestructura básica en la construcción de cartografía geológica. El trabajo de campo proporcionó información de la distribución espacial de los cuerpos de roca y de sus relaciones estratigráficas. Tradicionalmente los trabajos de investigación utilizan los sensores remotos como herramientas para obtener información geológica; sin embargo, no integran las fotografías como parte importante del trabajo geológico para la consulta y análisis posterior de otros usuarios. También se han utilizado las imágenes de satélite pero no se han integrado para hacer una comparación con fotografías aéreas para el análisis geológico de la estratigrafía espectral y las estructuras de una región. El presente trabajo se basa en la documentación de la litoestratigrafía, la geología estructural y la evolución geológica de la región de Huajuapán de León pero también es un ejercicio para explorar la integración de esta información en un sistema más completo y accesible a futuros usuarios. Este tipo de enfoque es necesario en todo trabajo básico geológico como en la definición de unidades litoestratigráficas y su representación cartográfica; esta información dispuesta en un medio digital permite el acceso a la consulta de la información de una manera sencilla y de fácil uso para complementar otros trabajos multidisciplinarios de Ciencias de la Tierra.

1.1.- OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo son:

- a).**- Definir y ubicar con precisión la estratigrafía y las estructuras de la región comprendida en la carta E-14-D-14 escala 1:50,000 mediante fotografías aéreas, imágenes de satélite y verificación de campo.
- b).**- Comparar los resultados obtenidos del tratamiento de los sensores remotos mediante la integración de la información en un medio digital dentro de un Sistema de Información Geográfica y evaluar los resultados respecto a los obtenidos en trabajos previos del área.
- c).**- Desarrollar un programa para el despliegue y la consulta en una computadora personal de la cual se pueden generar productos cartográficos mediante la selección de capas de información geológica para esta región del sur de México.

1.2.- ALCANCE

El alcance para este proyecto es la definición la cartografía geológica y la construcción de una base de datos geológica de la región comprendida en la carta E-14-D-14, Huajuapán de León, escala 1:50,000. La variedad del registro geológico del área es adecuada para probar la generación de información geológica mediante sensores remotos, la factibilidad de la representación cartográfica en un sistema de información y la construcción de una base de datos geológica. Esta metodología es evaluada con la posibilidad de extenderla a otras áreas adyacentes del norte del estado de Oaxaca y para considerar la posibilidad de su aplicación en otras áreas del Sur de México para contribuir a la información disponible para el sur de México en formato digital.

1.3.- AREA DE ESTUDIO

El área de estudio queda comprendida en la carta topográfica E-14-D-14 "Huajuapán de León", Oaxaca, México (INEGI, 1986). Está delimitada por las coordenadas $97^{\circ} 40' 00''$ y $98^{\circ} 00' 00''$ de longitud oeste y $17^{\circ} 45' 00''$ y $18^{\circ} 00' 00''$ de latitud norte y cubre una área de 976 km² (Figura 1). Se seleccionó esta área de estudio porque presenta un amplio registro estratigráfico y una variedad litológica bien expuesta. Así, en una región de relativamente pocos kilómetros cuadrados se encuentran cuerpos de roca dentro de un rango de edad que va del Paleozoico al Reciente y de origen ígneo, metamórfico y sedimentario.

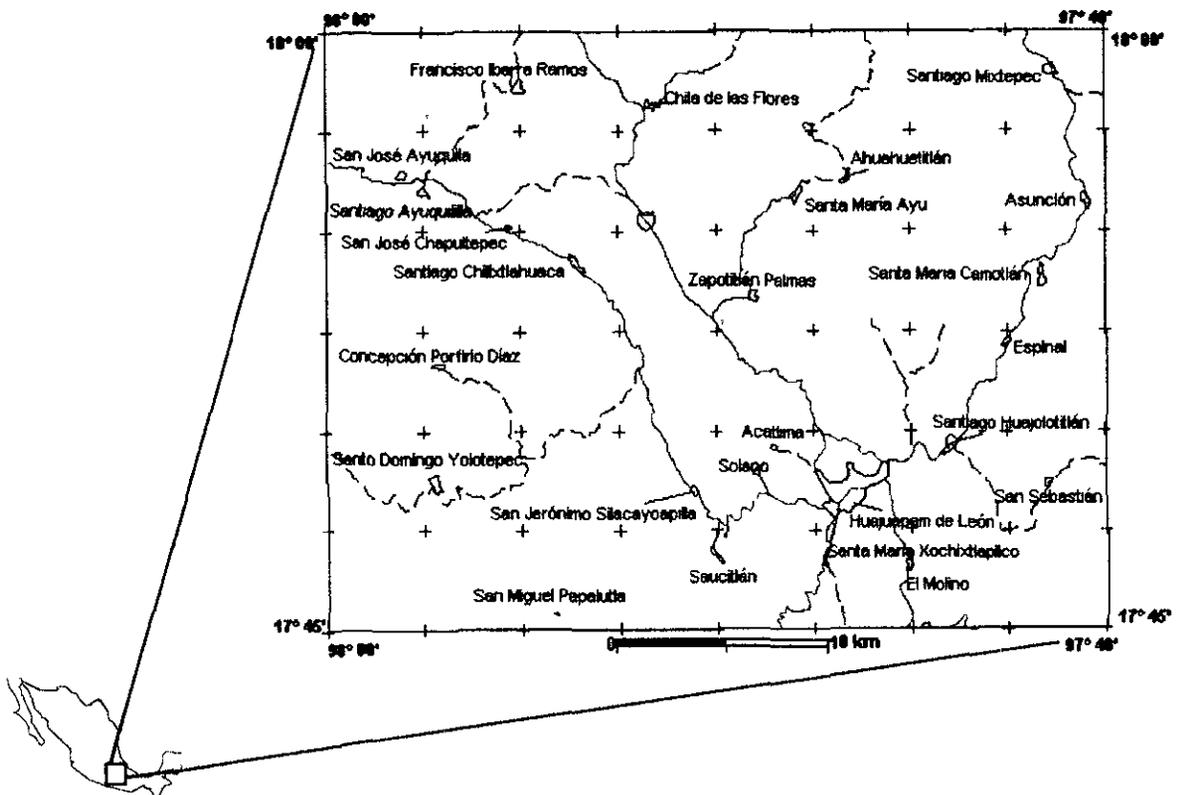


Figura 1.- Localización del área de estudio, carta E-14-D-14, "Huajuapán de León, Oaxaca México.

1.4.- METODOLOGÍA.

A partir del trabajo de campo de 4 temporadas realizadas en 1984, 1988, 1994 y 1998 se ha obtenido información básica para la interpretación geológica de las imágenes de sensores remotos, para delimitar cuerpos de roca, estructuras y puntos de interés de las secciones de campo. Con la interpretación geológica de las fuentes de sensores remotos y la georeferencia de una carta topográfica se obtuvo la información geológica en una estructura cartográfica; a partir de los datos de unidades litológicas, fallas, fracturas y puntos de verificación se construyeron mapas digitales mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG), mismos que se complementaron con la definición de datos descriptivos en tablas de atributos (Figura 2). Así quedaron integrados los temas geológicos en función de la definición de atributos propios para la construcción de mapas temáticos. Esta información se integró bajo un esquema conceptual que comprende dos tipos de datos que son: los elementos gráficos y los elementos alfanuméricos. Los primeros se refieren a los elementos de la superficie terrestre representados digitalmente como áreas o polígonos, líneas y puntos que son denominados entidades gráficas; los otros se refieren a datos descriptivos en tablas de atributos para cada entidad gráfica y son denominados entidades alfanuméricas que son útiles para desplegar, analizar y consultar la información mediante un sistema que permite producir mapas temáticos.

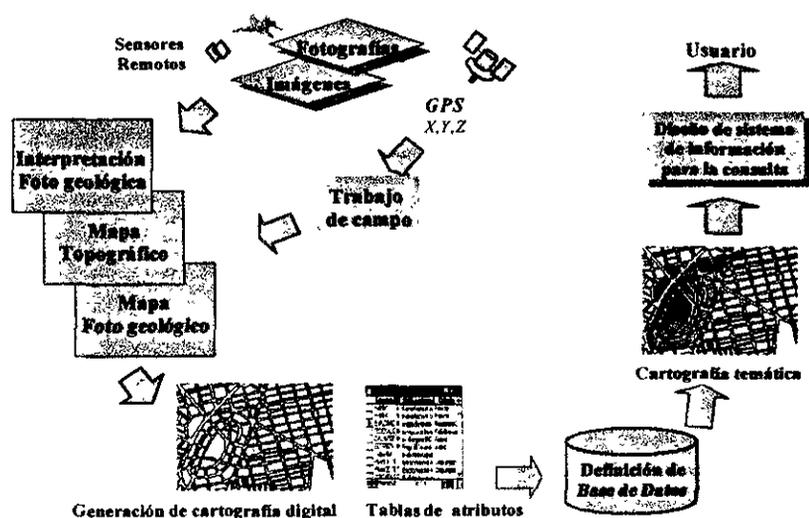


Figura 2. La metodología utilizada es un conjunto de procedimientos para obtener la cartografía geológica y su integración en un sistema de información geográfica.

1.5.- FUENTES DE INFORMACIÓN UTILIZADAS

Para la fotointerpretación se utilizaron fotografías aéreas (SINFA, 1995) en escala 1:75,000 disponibles en blanco y negro en papel de 23 x 23 cm. En los pares estereoscópicos se interpretaron los cuerpos de roca de diferente composición litológica, delimitados principalmente con base en sus características de tono y textura. También se interpretaron rasgos lineales que por lo general corresponden a fallas y fracturas así como la actitud estructural de los cuerpos de roca.

Esta información se utilizó en el trabajo de campo para comprobar su naturaleza mediante puntos de verificación y sitios de muestreo utilizando un receptor GPS para definir con precisión la posición de éstos. Por otra parte, se utilizó una imagen de satélite Landsat (path 25, row 48) del sensor Thematic Mapper (TM), obtenida el 19 de Marzo de 1993, con resolución espacial de 28 por 28 metros por pixel. La escena original de la imagen de satélite fue georegistrada y cortada al tamaño de la carta topográfica E-14-D-14.

1.6.- EQUIPO Y PROGRAMAS DE CÓMPUTO

Para el trabajo de fotointerpretación se utilizó un estereoscopio de espejos y para el trabajo de campo se utilizó un receptor GPS Garmin 45 XL de ocho canales. Tanto para el procesamiento de datos topográficos como para las curvas de nivel obtenidas de un modelo digital de elevación se utilizó una estación de trabajo Silicon Graphics Indigo con el sistema Arc/info v. 6.1 y para procesar imágenes de satélite se utilizó Erdas v. 8.1 en un equipo Sun Sparc10. Para integrar la información y crear la base de datos se utilizó Map Info Professional v. 4.5 y para crear un programa de despliegue y consulta de la información se utilizó Map Basic v. 4.5 y Visual Basic v. 4.0 para sistema operativo Windows 95 en un equipo de escritorio Hewlett Packard Vectra.

1.7.- ANTECEDENTES GEOLÓGICOS.

En la región de Huajuapán de León y de otras zonas del noroeste de Oaxaca existen trabajos geológicos previos como se muestran gráficamente en el mapa de referencia (Figura 3). Los trabajos de investigación de la estratigrafía en la región de la Mixteca Baja, en los límites de los estados de Puebla y Oaxaca, ha sido documentada por Ortega (1978a; 1978b; 1981) en donde se presentan las definiciones litoestratigráficas y estructurales de las rocas metamórficas del complejo Acatlán. El área de estudio está comprendida en la región donde se describieron y definieron las relaciones estratigráficas de la Formación Cosoltepec y de los Granitoides Esperanza. La cartografía regional de las unidades no se estableció con suficiente detalle por lo que aquí se considera su definición con mayor precisión. En un trabajo anterior (Ortega-Guerrero, 1989) se presentaron las características estratigráficas de rocas sedimentarias continentales jurásicas entre Totoltepec e Ixcaquixtla en los límites de Puebla y Oaxaca, al norte del área de estudio, y se obtuvo la descripción estratigráfica para proponer con suficiente detalle la definición de dos unidades detríticas de edad jurásica. Sin embargo, el enfoque paleomagnético de este trabajo llevó a la cartografía geológica a un nivel de semidetalle. En otro trabajo (Caballero, 1989) se presentó un mapeo geológico de semidetalle mediante el uso de fotografías aéreas de vuelo alto enfocado a determinar las características estratigráficas y paleomagnéticas de las rocas mesozoicas, en particular de las rocas de la formación Tecamazúchil en sus tres miembros; los dos más antiguos separados por una marcada discordancia angular y constituidos por arenisca y conglomerado polimíctico y otro de arenisca y limolita con conglomerados lenticulares. Sin embargo no se

cartografiaron los límites de dichos miembros porque las fuentes utilizadas no proporcionaron suficiente detalle. Otro estudio en la región de Tlaxiaco (Mosquera y Meléndez, 1984) describió las características de la emisión de partículas radioactivas de los sedimentos de rocas del grupo Tecocoyunca, observando que los sedimentos que presentan minerales pesados radioactivos provienen del Complejo Oaxaqueño. Posteriormente se estableció la magnetoestratigrafía (González, 1989) de rocas mesozoicas marinas y continentales en la región de Tezoatlán. En ese trabajo se reconocieron secuencias volcánicas piroclásticas sub aéreas dentro del registro de rocas carbonatadas del Cretácico Superior. Hacia el sur del área de trabajo se estudiaron la estratigrafía y paleontología de rocas sedimentarias marinas (González y Comas, 1981) que permitieron documentar el Cretácico Inferior. Al suroeste del área de estudio se definió con suficiente detalle de mapeo geológico un amplio registro estratigráfico en la región de San Jorge Nuchita, al Sur de Santo Domingo Tonalá (Luevano, 1988), en donde se delimitaron las rocas metamórficas paleozoicas y sedimentarias mesozoicas mediante el uso de fotografías aéreas de vuelo bajo.

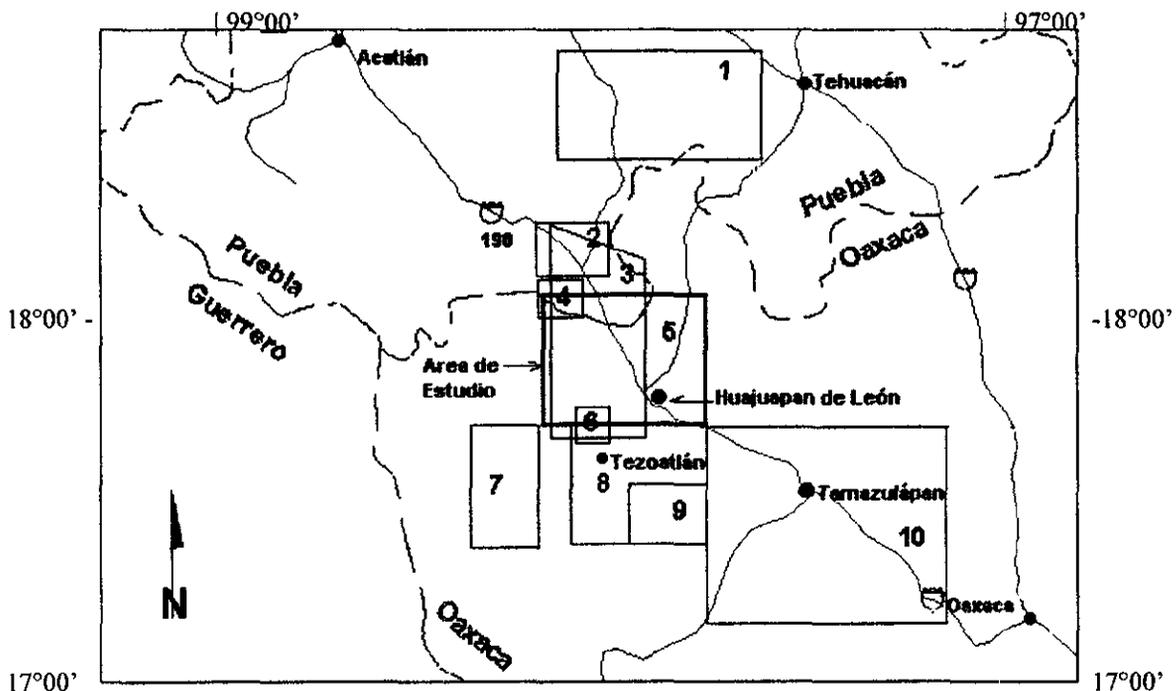


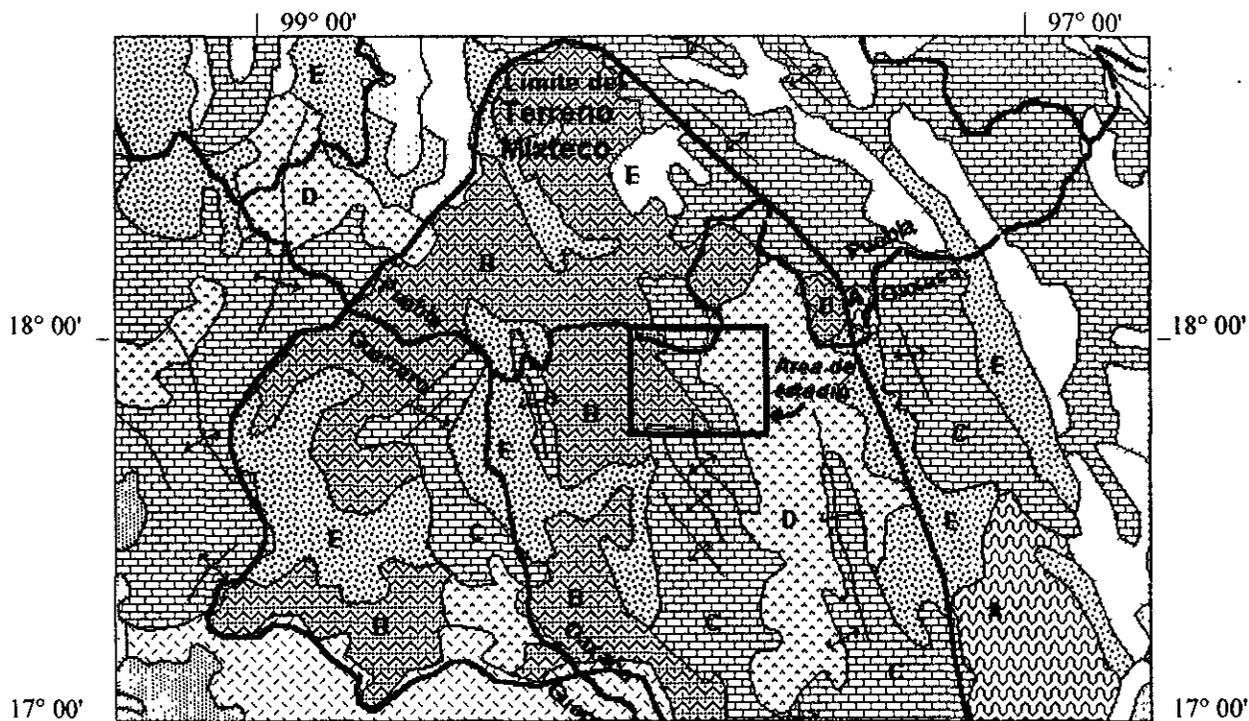
Figura 3. Mapa de antecedentes geológicos. El área del presente trabajo se encuentra en el recuadro marcado al centro. 1.-Ortega, G.B., 1989; 2.-Pérez, et al., 1965; 3.- Caballero, M.C., 1989; 4.- Ortega, G.F., 1978^a; 5.- Presente estudio; 6.-González C. y Comas F., 1981; 7.- Luevano, 1988; 8.- González, T.E., 1989; 9.- Mosquera y Meléndez, 1984; 10.- Ferrusquia V.I., 1976.

Otros estudios presentaron interpretaciones paleogeográficas y paleomagnéticas regionales del Terreno Mixteco (Morán, 1987) en donde la descripción de la estratigrafía jurásica continental llevó a la interpretación de paleoambientes de sistema fluvial, abanicos aluviales y planicies de inundación en cuencas tectónicas con pendiente general hacia el sur y limitadas por rocas

prejurásicas de relieve contrastado. Dichas cuencas prevalecieron al menos hasta el Jurásico Superior y posteriormente permitieron la transgresión de mares someros y favorecieron el depósito de sedimentos carbonatados durante el Cretácico Superior con algunos eventos volcánicos intercalados en el registro estratigráfico Mesozoico. Los trabajos de investigación hacia el suroeste del área describieron aspectos estratigráficos y estructurales de las regiones de Tamazulapan, Teposcolula y Yanhuatlán (Ferrusquía, 1970; Ferrusquía, 1976), y son importantes por su definición de unidades litoestratigráficas formales e informales que se utilizan para la descripción estratigráfica y paleontológica en dicha región de la Mixteca. Así mismo se tienen otros trabajos sobre las rocas volcánicas terciarias (Martiny, et al., 1999) y sus características de geoquímica y edad isotópica.

1.8.- MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.

El área de estudio se encuentra en el borde oriental de los afloramientos de rocas del Complejo Acatlán y en el extremo norte de los afloramientos de rocas sedimentarias mesozoicas y volcánicas cenozoicas de la región de la Mixteca Baja en los límites de los estados de Puebla y Oaxaca. El basamento conformado por rocas del Complejo Acatlán, resultó del metamorfismo premissipico de secuencias sedimentarias marinas y ofiolitas cuya deformación desarrollo cinturones plegados de orientación general norte- sur. Este patrón tectónico aparentemente controló las estructuras mesozoicas que también tienen una orientación burdamente norte-sur entre Acatlán y Tlaxiaco. Dicho patrón es claramente diferente al encontrado en los bordes del Terreno Mixteco como en las regiones del sur de Puebla y Tehuacán, en el estado de Puebla, al oriente de Tlaxiaco, en el estado de Oaxaca y al poniente de Olinalá en el estado de Guerrero (Corona, 1981, Morán, 1987) (Figura 4). En el área de estudio, el Complejo Acatlán quedó expuesto a la erosión a partir del Paleozoico Tardío por un levantamiento regional que favoreció el desarrollo de ambientes sedimentarios continentales, durante el Jurásico Medio, y marinos someros en el Jurásico Tardío (Carrasco, 1981). En el Cretácico Inferior las transgresiones marinas cubrieron a las rocas jurásicas con algunos eventos volcánicos intercalados en el registro estratigráfico en mares someros. Durante el resto del Mesozoico, los ambientes sedimentarios de plataformas favorecieron el desarrollo de sedimentos de carbonatos (Morán, et al., 1993). Durante el Cenozoico y especialmente en el Paleógeno estuvieron presentes los ambientes volcánicos extrusivos que generaron rocas piroclásticas que se encuentran sobrepuestos a los límites litológicos del registro geológico pre Cenozoico. Los sedimentos detríticos gruesos cenozoicos enmascaran también los límites tectónicos y/o litológicos del registro estratigráfico, por ejemplo las rocas de la Formación Huajuapán y el Conglomerado Tamazulapan (Ferrusquía, 1976).



Simbología

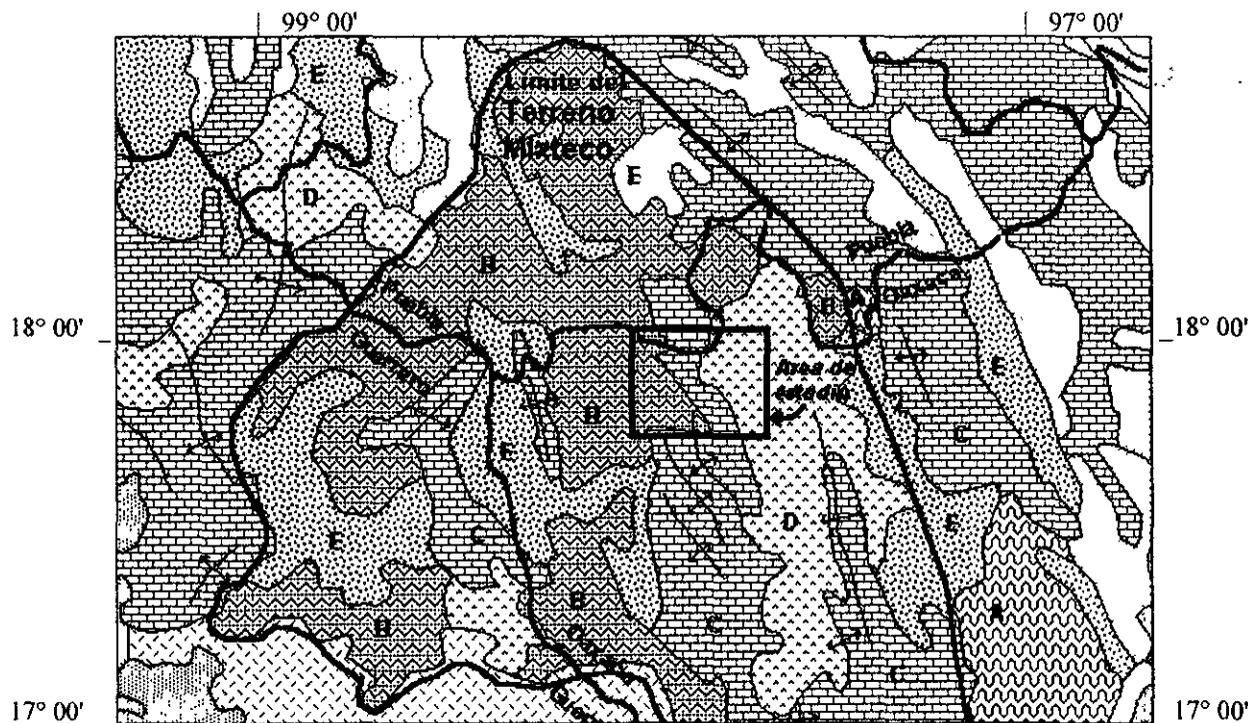
-  Complejo Oaxaca
-  Complejo Acatlán
-  Mesozoico sedimentario
-  Cenozoico volcánico
-  Cenozoico sedimentario
-  Estructuras anticlinales

Figura 4.- Marco geológico regional. El cuadro al centro es el área de estudio, en los límites de los estados de Puebla y Oaxaca. Nótese que se encuentra en la confluencia de ambientes metamórficos, sedimentarios y volcánicos dentro del Terreno Mixteco. Nótese también las estructuras de pliegues mayores en el borde del mismo. A.- Complejo Oaxaca, B.- Complejo Acatlán; C, Mesozoico sedimentario; D, Cenozoico volcánico; E, Cenozoico sedimentario. Escala aproximada 1:2,000,000.

CAPITULO 2

2.- FOTOGEOLOGÍA.

El término "sensores remotos" fue utilizado en los años 60's para referirse a la observación de la Tierra a distancia (Cracknell y Hayes, 1991) o bien para la obtención de información a distancia



Simbología

- Complejo Oaxaca
- Complejo Acatlán
- Mesozoico sedimentario
- Cenozoico volcánico
- Cenozoico sedimentario
- Estructuras anticlinales

Figura 4.- Marco geológico regional. El cuadro al centro es el área de estudio, en los límites de los estados de Puebla y Oaxaca. Nótese que se encuentra en la confluencia de ambientes metamórficos, sedimentarios y volcánicos dentro del Terreno Mixteco. Nótese también las estructuras de pliegues mayores en el borde del mismo. A.- Complejo Oaxaca, B.- Complejo Acatlán; C, Mesozoico sedimentario; D, Cenozoico volcánico; E, Cenozoico sedimentario. Escala aproximada 1:2,000,000.

CAPITULO 2

2.- FOTOGEOLOGÍA.

El término "sensores remotos" fue utilizado en los años 60's para referirse a la observación de la Tierra a distancia (Cracknell y Hayes, 1991) o bien para la obtención de información a distancia

(Stan, 1989) llamada también teledetección (Chuvieko, 1990). La teledetección puede ser definida como la ciencia de la observación a distancia que involucra el registro de la información electromagnética que proviene de la superficie de la Tierra (Barret y Curtis, 1992), ya sea en fotografías aéreas o en imágenes de satélite. Esta nació con el uso de fotografía aérea para reconocimiento estratégico militar durante la 1ª Guerra Mundial y se desarrolló con la toma de fotografías espaciales en los años 60's y más tarde evolucionó hasta llegar a la adquisición de imágenes de satélite desde plataformas orbitales en los años 70's. En términos generales los sensores remotos son definidos como los sistemas que permiten, mediante un medio físico o dispositivo electrónico, registrar información relativa a la energía electromagnética emitida o reflejada que proviene de la superficie de la Tierra y que son de gran utilidad en fotogeología.

2.1.- INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS.

Una fuente común de información en Ciencias de la Tierra son las fotografías aéreas que son un medio de registro de características de la superficie terrestre obtenida mediante sensores remotos como son las cámaras fotográficas en el espectro visible e infrarojo. Las fotografías aéreas utilizadas en este trabajo (Tabla 1) provienen de un vuelo fotográfico de INEGI del 30 de Marzo de 1995 del Sistema de Información Nacional de Fotografía Aérea (SINFA, 1995). Las líneas del vuelo tienen una orientación norte sur y una sobreposición de 30% entre fotografías y 60% entre líneas. La fotointerpretación es definida como el análisis de una área derivado del estudio de las fotografías aéreas (Miller, 1961) en pares estereoscópicos con el auxilio de herramientas como los estereoscopios de espejos con los que se delimita y separa espacialmente unidades de rocas y materiales para definir la estratigrafía fotogeológica e inferir las estructuras geológicas.

Número	Línea	Fotografía	Longitud Oeste	Latitud Norte	Altura (ft.)
1	175	1	97° 56.69'	18° 00.01'	43900
2	175	2	97° 56.69'	17° 56.27'	43800
3	175	3	97° 56.67'	17° 52.57'	43800
4	175	4	97° 56.66'	17° 48.78'	43700
5	175	5	97° 56.68'	17° 45.06'	43700
6	175	6	97° 56.68'	17° 41.29'	43600
7	176	1	Sin datos	Sin datos	Sin datos
8	176	2	Sin datos	Sin datos	Sin datos
9	176	3	97° 50.01'	17° 56.29'	43100
10	176	4	97° 50.01'	17° 48.81'	43300
11	176	5	97° 50.02'	17° 45.05'	43300
12	177	13	97° 43.33'	17° 45.05'	45100
13	177	14	Sin datos	Sin datos	Sin datos
14	177	15	97° 43.34'	17° 52.51'	44900
15	177	16	97° 43.34'	17° 56.28'	44800
16	177	17	Sin datos	Sin datos	Sin datos

Tabla 1.- Lista de las líneas y fotografías aéreas con sus valores de coordenadas y altitud para el centro geométrico de algunas de ellas.

La fotointerpretación geológica implica la diferenciación entre los elementos naturales y los antropogénicos, la identificación los tipos de roca, materiales recientes no consolidados y la inferencia de estructuras (estratificación, foliación, pliegues, fallas, fracturas, discordancias, intrusiones). La importancia de la fotointerpretación radica en proporcionar la definición espacial y la extensión superficial de las diferentes unidades litológicas de una región (Vergara, 1978) para contribuir en la definición formal de unidades litoestratigráficas. Se conocen dos tipos de interpretación fotogeológica: 1) fotointerpretación cualitativa.- se basa en la definición de las características de tono, textura, forma, tamaño, drenaje y relieve (Figura 5) como elementos de análisis para definir y delimitar cuerpos de roca, materiales, estructuras y puntos de interés particular. 2) fotointerpretación cuantitativa.- se basa en la determinación de la actitud estructural de cuerpos de roca como son los conceptos de rumbo, echado, espesor, patrones de drenaje y de fracturamiento (Guerra, 1980). Para el presente trabajo se realizó la interpretación fotogeológica de pares estereoscópicos para definir límites de unidades litológicas, líneas que representan fracturas y fallas, y puntos que representan sitios de verificación. Las fotografías fueron digitalizadas para su integración dentro de un Sistema de Información Geográfica (Figura 6).



Figura 5. Fotografía aérea 1, línea 175. Nótese en la esquina superior izquierda, los cambios de tono y textura de las rocas sedimentarias jurásicas; al centro las formas aisladas de rocas ígneas intrusivas. Se observan formas de sierras longitudinales (A) de parteaguas continuo que corresponde al flanco oriental de un pliegue monoclinial; las rocas de tonos oscuros son rocas sedimentarias jurásicas y las de tonos gris claro son rocas sedimentarias cretácicas. Se observa la textura fina y relieve de lomas bajas de pendiente suave de rocas metamórficas paleozoicas (B). Un centímetro = 2800 m.

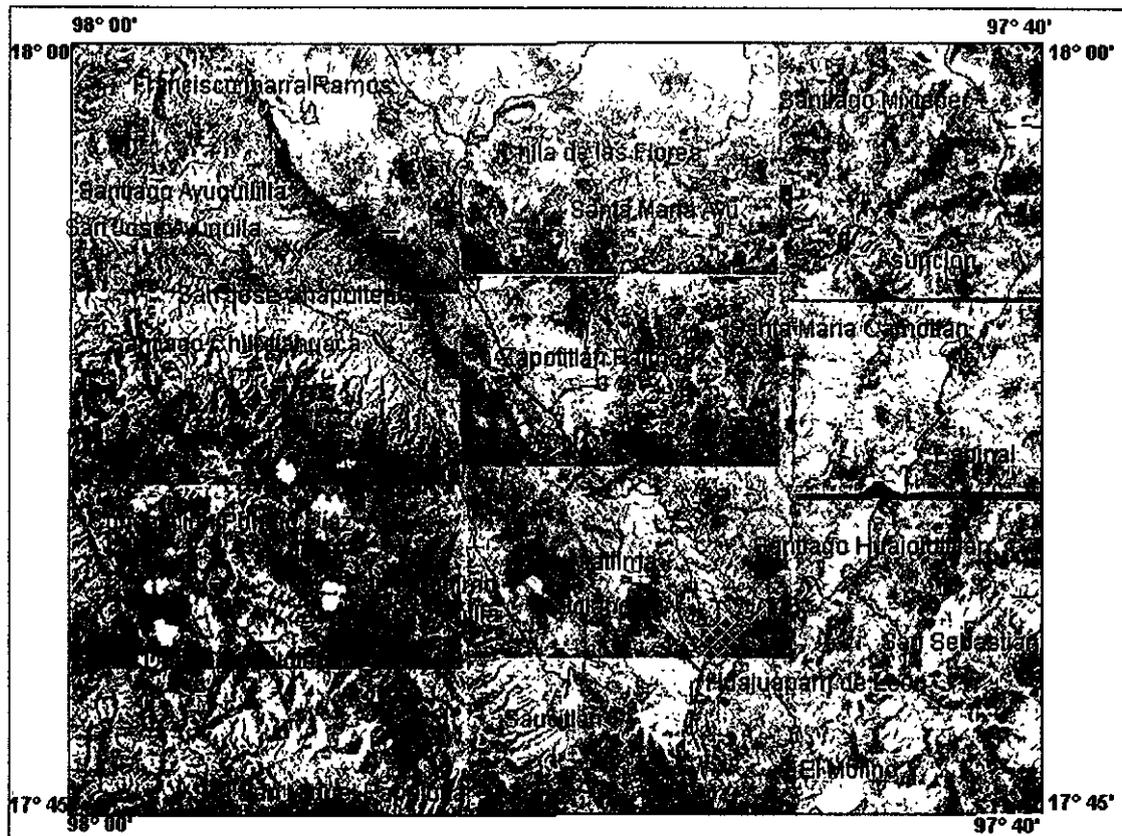


Figura 6. Mosaico de fotografías aéreas que cubren la carta E-14-D-14 escala 1:50,000. Se muestran las vías de comunicación y las poblaciones principales como elementos generales de referencia y ubicación. Escala 1:300,000

2.2.- UNIDADES FOTOGEOLÓGICAS.

Una unidad fotogeológica es una unidad de roca o material que se delimita y se separa de otras por las características homogéneas que resultan de su naturaleza registrada en un medio como las fotografías aéreas. Con los datos aportados por la fotointerpretación cualitativa y cuantitativa de fotografías aéreas, se delimitan y separan espacialmente cuerpos de rocas y materiales con suficiente detalle para su representación cartográfica. En las secciones siguientes se describen 18 unidades con características definidas por sus atributos fotogeológicos como son: tono, textura, forma, vegetación, drenaje y relieve y se correlacionan con unidades litoestratigráficas para su integración en una columna estratigráfica, su representación en una carta geológica y su integración en una base de datos.

2.3.- UNIDAD 1. FILITA Y ESQUISTO.

La unidad 1 describe a aquellos cuerpos de roca metamórfica constituidos principalmente de filita y en menor proporción esquisto que se correlacionan con la Formación Cosoltepec (Figuras 7 y 8) y que a su vez forma parte importante del Complejo Acatlán de acuerdo a las definiciones hechas

por otros autores (Salas, 1949; Fries y Rincón, 1965; Fries, et al., 1965; Ruíz, 1970; Ortega, 1978a; Ortega, 1978b; Ortega, 1981; Corona, 1981) que afloran en la Sierra El Tigre y en la localidad de Concepción Porfirio Díaz, en la porción occidental del área de estudio, que se extiende por más de 20 Km desde San Jorge El Zapote, hasta San Miguel Papalutla, y desde San Jerónimo Silacayoapilla hasta San Antonio Zahuatlán. Se ha interpretado muy fracturada y afectada por fallas inversas y constituyen parte de una estructura regional antiformal que es notablemente buzante hacia el nor-noroeste en donde con base en la disposición del drenaje es posible interpretar planos de foliación en direcciones opuestas. Esta unidad muestra marcadamente dos características fotogeológicas que la caracterizan. Sus principales características se resumen en una tabla de atributos fotogeológicos (Tabla 2).

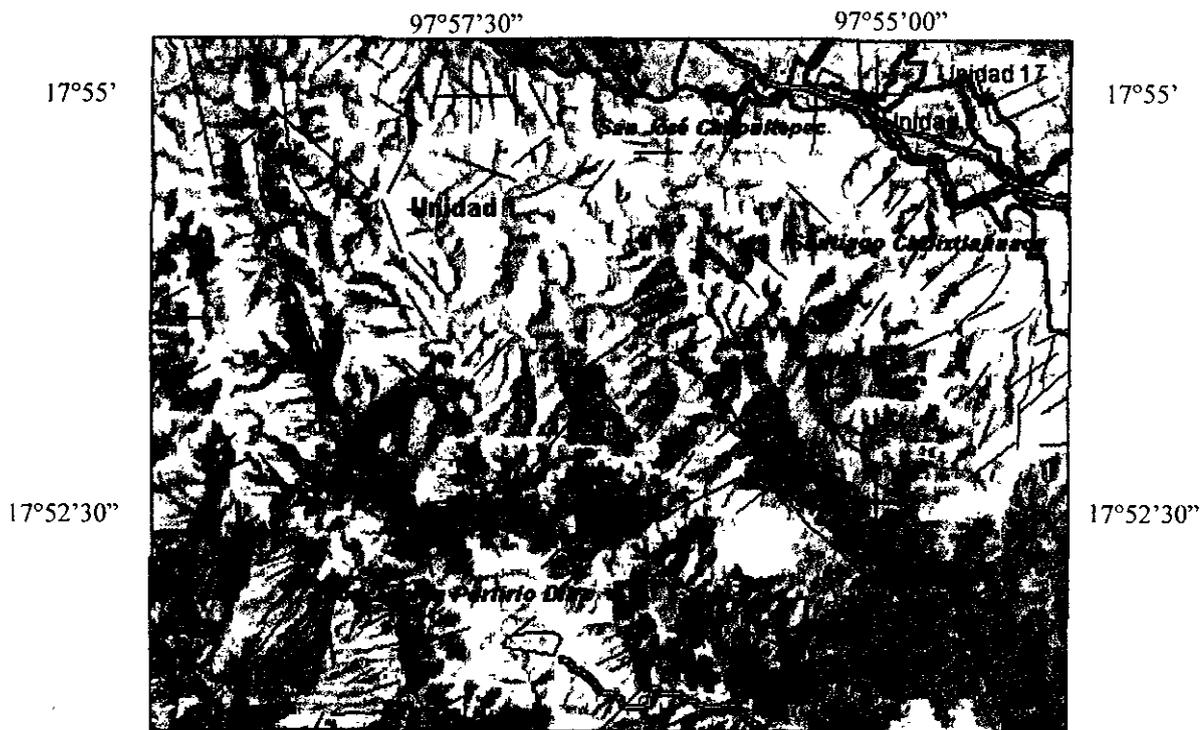


Figura 7 - Unidad fotogeológica 1, esquistos y filitas de la Formación Cosoltepec al norte de Concepción Porfirio Díaz. Nótese las variaciones de tono gris claro y textura fina dentro de la unidad al noroeste. Fotografía de 8 x 10 kilómetros.

Tono	Textura	Vegetación	Drenaje	Relieve	Litoestratigrafía
Gris claro	Fina	Sin vegetación	Dendrítico amplio	Lomas y cerros	Fm. Cosoitepec
Gris oscuro	Gruesa	Bosque denso	Dendrítico denso	Sierra baja	Fm. Cosoitepec
Café claro, amarillo	fina	Sin vegetación	Subparalelo	Sierra escarpada	Granitoides Esperanza
blanco	gruesa	Bosque denso	subparalelo	Sierra escarpada	Granitoides Esperanza
Gris claro	Fina y bandeada	Matorral escaso	Dendrítico amplio	Lomas suaves	Fm. Tecomazuchil
Gris oscuro	Gruesa y moteada	Arbustos escasos	Subdendrítico denso	Lomas bajas	Limolita Chapultepec
Gris oscuro	gruesa	Matorral y arbusto	Dendrítico escaso	Cerros de pendiente fuerte	Fm. Chimeco
Gris claro, blanco	fina	Arbustos y cactáceas	Subenrejado paralelo	Lomas de pendiente suave	Fm. Mapache
Gris oscuro	Fina y moteada	Arbustos y pastos	Dendrítico espaciado y escaso	Lomas y de pendiente fuerte	Caliza Solano
Gris oscuro	fina	Arbustos y cactáceas	Paralelo denso y profundo	Cerros de pendiente fuerte	Caliza Papalutla
Gris, oscuro claro	fina	Arbustos, cactáceas, pastos	Enrejado escaso y espaciado	Sierras longitudinales	Fm. Teposcolula
Gris claro, blanco	fina	Arbustos y pastos	Subdendrítico y subparalelo	Lomas con barrancos	Conglomerado Tamazulapan
Gris oscuro y claro	Fina y moteada	Arbustos y arboles	Subparalelo y dendrítico denso	Lomas suaves y barrancos	Fm. Huajuapán
Gris claro y oscuro	Fina y rugosa	Arbustos, crasicaules y cactáceas	Dendrítico amplio y subenrejado	Sierras, lomas y cerros	Toba Llano de Lobos
Gris oscuro y claro	fina	Arbustos densos, pastos, arboles	Subradial	Cerros y formas volcánicas erosionadas	Andesita Yucudaac
Gris claro y oscuro	fina	Arbustos	Subradial espaciado y escaso	Cerros de formas volcánicas erosionadas	Andesita San Marcos
Gris claro y oscuro	fina	Arbustos y arboles	Subdendrítico	Valles fluviales	Grava Camotlán
Gris oscuro	fina	Arbustos y arboles densos	Subdendrítico	Valles fluviales	Arena Xochitlapilco
Gris oscuro	fina	Arbustos crasicaules densos	Subdendrítico escaso	Lomas bajas	Andesita Suchixtlahuaca
Gris claro	fina	Arbustos y pastos escasos	Subdendrítico escaso	Lomeríos	Diorita Chixtlahuaca

Tabla 2. Principales atributos fotogeológicos de las unidades.

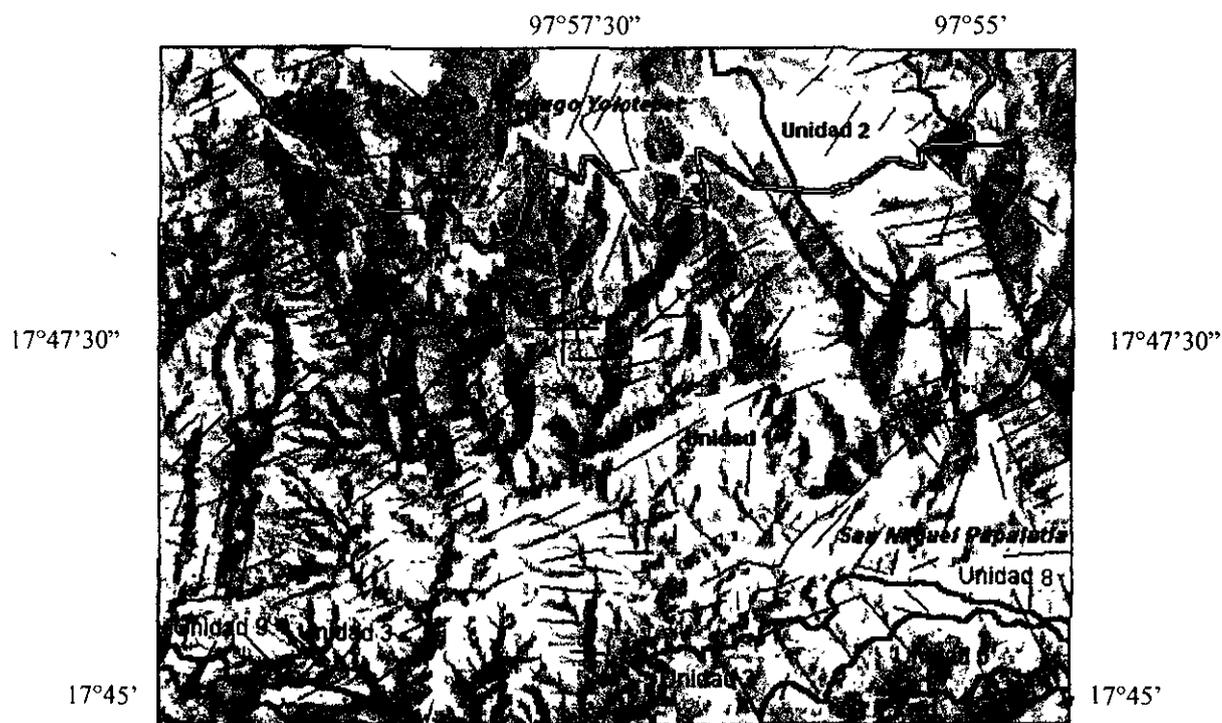


Figura 8.- Formación Cosoltepec al sur de Santo Domingo Yolotepec. Se observa en la parte inferior de la foto las variaciones de tono gris oscuro y textura gruesa dentro de la unidad al sur oeste del área. Fotografía de 8 x 10 kilómetros.

2.4.- UNIDAD 2, ESQUISTO BLASTO PORFÍDICO.

La unidad 2 ya había sido reconocida en las fotografías aéreas y verificada en campo pero su expresión cartográfica no pudo ser determinada con base en los cambios de tono y textura en las fotografías aéreas razón por la que se decidió utilizar las variaciones de color en compuestos de imágenes de satélite para definir su extensión superficial. En los compuestos de falso color de las bandas infrarrojo medio, infrarrojo cercano y rojo visible (5, 4, 3) es posible diferenciar rocas metamórficas con base en las variaciones de respuesta espectral de aquella interpretada como unidad 1 de esquisto y filita (Figura 9). Se extiende en la porción interior de la unidad 1 de esquisto y filita de la Formación Cosoltepec que se presentan en la Sierra *El Tigre*, reconocida en Concepción Porfirio Díaz, Guadalupe Llano Grande y entre Santo Domingo Yolotepec y San Jerónimo Silacayoapilla en la barranca *El Muerto*. Esta unidad muestra también dos características fotogeológicas muy marcadas. Sus principales características fotogeológicas se resumen en una tabla de atributos fotogeológicos (Tabla 2). Tiene relieve de sierra alargada de fuerte pendiente y escarpadas de parteaguas continuo, porque las rocas son resistentes a la erosión y se constituye de esquisto blasto porfídico (augen esquisto). Es parte del Complejo Acatlán que han sido descrita en otros trabajos como Granitoides Esperanza (Ortega, 1978b) y considerada como intrusiones graníticas del sub grupo Acateco (Ruíz, 1970). En Santo Domingo Yolotepec el augen esquisto

está en contacto con esquistos de mica a través de una filonita de textura sedosa, de grano muy fino que fue verificada en campo pero que no fue posible ubicar y separar ni en las fotografías aéreas ni en la imagen de satélite.

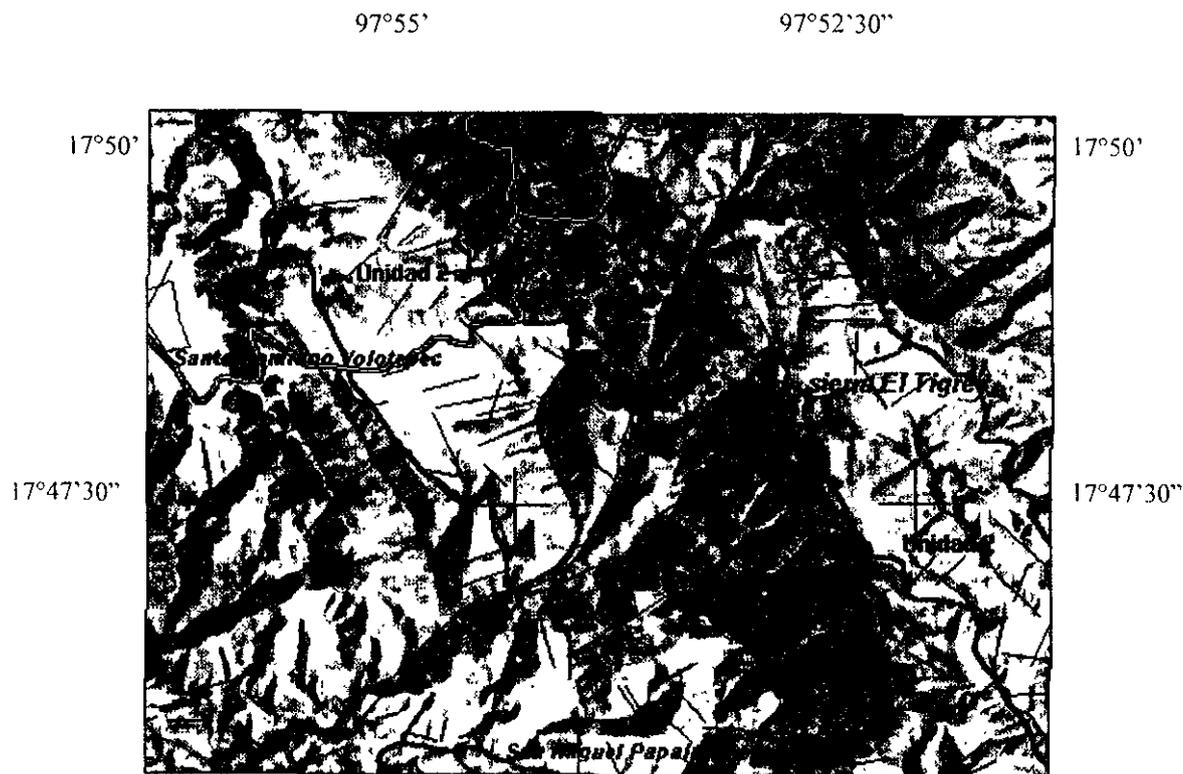


Figura 9.- Granitoides Esperanza, esquistos de textura blasto porfídica. Nótese un cambio de tono y textura respecto a la Formación Cosoltepec (oscuro). Imagen en el compuesto de infrarrojo medio, cercano y rojo visible. Imagen de 10 x 8 kilómetros

2.5.- UNIDAD 3. ARENISCA, CONGLOMERADO.

La unidad 3 está constituida principalmente por cuerpos de arenisca y en menor proporción de conglomerado que se encuentra en el valle del Río San Jerónimo y en la localidad de San Jerónimo Silacayoapilla así como en el Río Mixteco en Santiago Chilixtlahuaca y Río Seco en Santiago Ayuquillilla. Corresponde a la Formación Tecomazúchil (Pérez, et al., 1965) definida al norte del área de estudio en la localidad del río Tecomazúchil en la ranchería Santa Cruz- Texcalapa, al sur este de Acatlán, en el estado de Puebla y se correlaciona con el Grupo Tecocoyunca (Corona, 1985) y las formaciones Zorrillo y Taberna (González, 1989) así como la unidad Piedra Hueca del suroeste de Puebla (Ortega-Guerrero, 1989). Sus principales características se resumen en una tabla de atributos fotogeológicos (Tabla 2). La unidad contiene de cinco a ocho estratos gruesos de conglomerado, identificados en secciones de campo e identificados parcialmente en fotografías aéreas con espesores que van de 3 a 15 metros y de extensión lateral corta y acuñada. En los afloramientos de San José Chapultepec y Santiago

Chilixtlahuaca los estratos buzan hacia el noreste con inclinaciones que varían de 30 a 60 grados pero entre San José Ayuquila y Santiago Ayuquillilla los estratos buzan marcadamente hacia el noroeste lo que denota una estructura anticlinal cuyo plano axial parece encontrarse en San José Chapultepec; las relaciones con las unidades sedimentarias suprayacentes son discordantes (Figura 10).



Figura 10.- Formación Tecomazúchil entre las poblaciones de San José Ayuquila y San José Chapultepec. Nótese al centro las variaciones de tono gris claro y textura fina y bandeada de la unidad que se encuentra sobrepuesta y discordante a las rocas metamórficas de la Formación Cosoltepec (unidad 1). Fotografía de 8 x 10 kilómetros.

2.6.- UNIDAD 4, LIMOLITA.

Unidad fotogeológica sedimentaria detrítica que se encuentra en las zonas de la pendiente occidental de la sierras longitudinales en la porción central del área de estudio y que aflora principalmente entre San José Chapultepec y Santiago Chilixtlahuaca. En este trabajo se denomina como unidad informal *Limolita Chapultepec* para designar al conjunto de estratos de roca limolítica de color púrpura que aflora en su mejor expresión cerca de la población de San José Chapultepec. Sus principales características se resumen en una tabla de atributos fotogeológicos (Tabla 2). Hacia el norte se acuña en la región del arroyo Los Ahuehuetes y en el cerro El Alacrán, al oeste de Francisco Ibarra Ramos y se acuña también hacia el sur en el cañón Boquerón en donde desaparece (ver Figura 10). La unidad fue definida como parte de la Formación Tecomazúchil (Caballero, 1989) sin embargo sus características fotogeológicas permiten definirla y separarla como una unidad independiente. Su reconocimiento en campo permite afirmar que se

encuentra discordante con la Formación Tecomazúchil y hacia la cima es discordante con la Formación Chimeco. Por su posición estratigráfica entre dos unidades documentadas como jurásicas la unidad puede ser considerada como perteneciente al Jurásico medio, probablemente correspondiente al Calloviano. Hacia la cima contiene capas de toba de lapilli fino, de color verde claro se encuentra en el contacto con la unidad suprayacente. Los estratos buzcan hacia el noreste, con inclinaciones que van de 30 a 45 grados. Aún cuando no se tienen fósiles para determinar el ambiente de formación se supone que es de origen continental por la presencia de componentes volcánicos de textura piroclástica y además los sedimentos no están cementados con material calcáreo.

2.7.- UNIDAD 5, CALIZA ARENOSA.

Unidad sedimentaria del Jurásico Superior que se encuentra en las zonas de la pendiente occidental de las sierras longitudinales en la porción central del área de estudio y que aflora principalmente el Cerro Boludo, entre Santiago Chilixtlahuaca y San Jerónimo Silacayoapilla y en menor proporción al sur en San Miguel Papalutla. Sus principales características se resumen en una tabla de atributos fotogeológicos (Tabla 2). Aflora también en la pendiente occidental de las sierras alargadas entre el cañón *El Boquerón* y hasta la población de El Limón, así como en el cerro *Boludo*, en la terracería que conduce a Yucunduchi, y el *Boquerón Chico* (ver Figura 10) en donde se acuña. Corresponde a la denominada *Caliza con Cidaris* (Erben, 1956) que fue descrita como una unidad litoestratigráfica informal llamada Caliza Chimeco (Pérez, et. al., 1965) cerca de Petlalcingo, Puebla, asignada al Oxfordiano (Buitrón, 1970). Posteriormente fue denominada Formación Chimeco (Ortega, 1978a) aunque no se describió con mayor detalle. Los estratos de roca de la unidad afloran en el flanco estructural de un pliegue monoclinal, cuyas secciones muestran una unidad lateralmente discontinua ya que desaparece hacia el sur, en el cañón del arroyo *El Boquerón* y aflora parcialmente en San Miguel Papalutla al sur del área.

2.8.- UNIDAD 6, CALIZA ARCILLOSA.

Unidad sedimentaria que aflora en la parte norte del área, en San Francisco Ibarra Ramos, en el cerro El Alacrán y en la cañada Ojo de Agua y hacia el sur en San Miguel Papalutla. Sus principales características se resumen en una tabla de atributos fotogeológicos (Tabla 2). Se correlaciona con la Formación Mapache definida en la región de Santa Cruz, Puebla (Pérez, et al., 1965; de Cserna, 1970) que otros autores (Caballero, et al., 1989) han reconocido en afloramientos aislados al norte de Huajuapán de León. La parte inferior de la unidad es arenisca calcárea que varía verticalmente hacia la parte superior a caliza arcillosa. Aflora en una porción al norte del área en San Francisco Ibarra Ramos y al sur, en San Miguel Papalutla (ver Figura 10).

2.9.- UNIDAD 7, CALIZA ARCILLOSA.

Unidad sedimentaria que se encuentra en la porción sur de las sierras centrales del área de estudio, al poniente de la población de Huajuapán de León. Sus principales características se resumen en una tabla de atributos fotogeológicos (Tabla 2). Los estratos de las rocas tienen inclinación de echado hacia el noreste, en estructuras interpretadas como sinclinales. Tiene forma irregular discernible de la unidad suprayacente que la rodea en sus afloramientos pero sus características intrínsecas de continuidad vertical y horizontal no son del todo claras (Figura 11). Corresponde a la unidad Solano (Caballero, 1989), en el presente trabajo se denomina informalmente Caliza Solano para designar así a un conjunto de estratos de caliza arcillosa que afloran cerca del poblado Rancho Solano, pero con una mejor expresión superficial en el poblado de Acatlima.

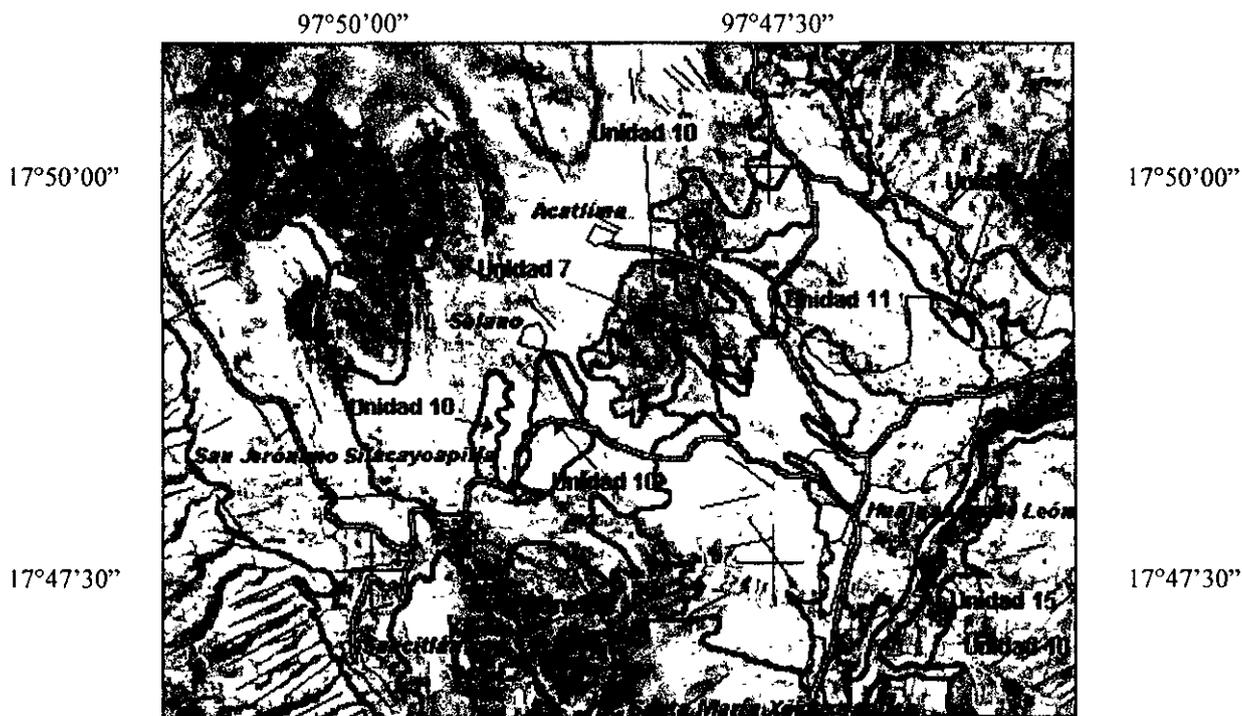


Figura 11 Unidad 7, Caliza arcillosa de la unidad informal Caliza Solano, al poniente de Huajuapán de León. Subyace a la formación Teposcolula, al norte y a la formación Tecomazúchil al oeste.

2.10.- UNIDAD 8, CALIZA ARCILLOSA.

Unidad sedimentaria que aflora en la cuesta norte de la sierra de San Miguel Papalutla, se extiende a lo largo de 5 Km en dirección este-oeste y se continúa hacia el sureste y fuera del área de estudio en la región norte de Tezoatlán. Sus principales características se resumen en una tabla de atributos fotogeológicos (Tabla 2). Corresponde a la unidad inicialmente definida como Unidad San Miguel Papalutla (Caballero, 1989) y que en este trabajo se denomina informalmente como Caliza

Papalutla de acuerdo al código de nomenclatura estratigráfica (Comisión Americana de Nomenclatura Estratigráfica, 1970). Se constituye de caliza arcillosa que contiene limolita y lutita calcárea en la base y arenisca, arenisca calcárea, marga y lutita en la cima. La fauna fósil encontrada en la porción superior de la unidad consiste de impresiones de amonitas del género *Olcostephanus* en limolita calcárea de estratos finos y laminares de una cantera en donde otros autores han encontrado la asociación de fauna de *Bochianites*, *Spiticeras*, *Olcostephanus*, *Kilianella*, *Distoloceras*, *Acantodiscus*, *Leopoldia*, *Pseudoostrella*, escamas y restos de vertebrados (González y Comas, 1981) que proporcionan un rango en edad del Berriasiano Tardío al Hauteriviano Temprano. Sin embargo, la base de la unidad podría extenderse hasta el Berriasiano Temprano como ya había sido reportada por otros autores (Mosquera y Meléndez, 1984) por la presencia de amonitas del género *Kilianella*. Otros autores (Morán, et al., 1993) sugieren una edad comprendida entre el Valanginiano y el Hauteriviano, del Cretácico Temprano. En la sierra de San Miguel Papalutla se presentan en forma tabular bien estratificada en el flanco norte de la sierra, en actitud estructural inclinada hacia el sureste con una escasa expresión superficial y lateralmente se acuña hacia el poniente (Figura 12).



Figura 12. Caliza arcillosa de la unidad informal Caliza Papalutla, al sur poniente de Huajuapán de León en donde sobreyace a la formación Mapache. Nótese el tono gris oscuro y la textura fina.

2.11.- UNIDAD 9, CALIZA BIOMICRÍTICA.

Unidad sedimentaria que se encuentra en la porción central del área, en una serie de sierras longitudinales bajas de pendiente suave y parteaguas continuo cuyos estratos afloran inclinados

hacia el noreste. Sus principales características se resumen en una tabla (Tabla 2). Constituye el flanco oriental erosionado de una estructura monoclinal debido a que los planos de estratos buzanan hacia el noreste y se extiende desde Huajuapán de León hasta la población de Chila de las Flores. La unidad forma el parteaguas principal de las sierras longitudinales que se extienden a lo largo de 22 Km, con una amplitud media de 3 Km, desde Huajuapán de León hasta la región de Petlalcingo, en el estado de Puebla, al norte y fuera del área de estudio (Figura 13) en donde sus principales características se observan en los cañones de *Boquerón* y *Boquerón Chico*. Se correlaciona con la Formación Teposcolula que fue descrita inicialmente como una unidad constituida por cuerpos de caliza de origen marino (Salas, 1949) y que se definió formalmente en la región de San Pedro Teposcolula, Oaxaca (Ferrusquía, 1970; Ferrusquía, 1976).

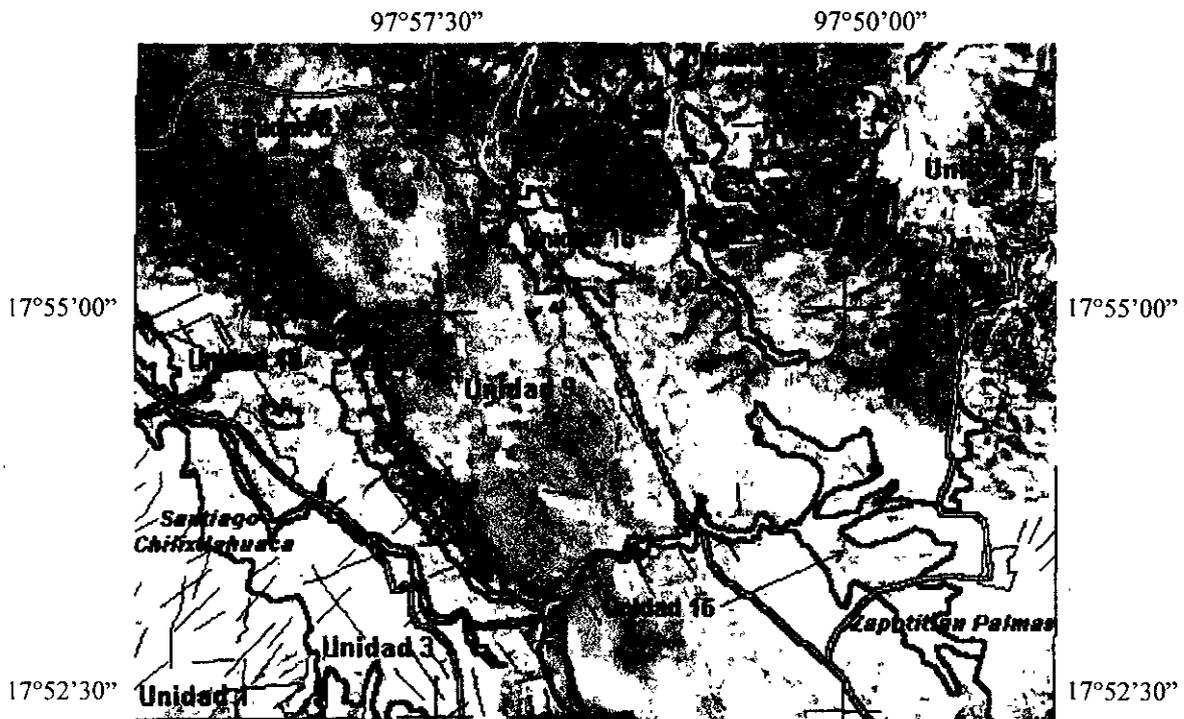


Figura 13. Formación Teposcolula, al norponiente de Zapotitlán Palmas, en la parte central del área de estudio. Nótese la textura fina ligeramente moteada y la forma de sierras alargadas así como la inclinación de los estratos hacia el noreste. Fotografía de 8 x10 kilómetros.

2.12.- UNIDAD 10, CONGLOMERADO POLIGMÍCTICO.

Unidad sedimentaria detrítica que se encuentra principalmente al suroeste de Huajuapán de León y que se observa siempre sobrepuesta a la unidad 8 de roca caliza del Cretácico Superior. Sus principales características se resumen en una tabla (Tabla 2). Se correlaciona con el Conglomerado Tamazulapan (Ferrusquía, 1976) que designa a un conjunto de cuerpos burdamente estratiformes de conglomerado y que en el área de estudio comprende cuerpos de

conglomerado poligmítico. Su estructura es subtabular, de bordes acuñados y forma irregular y en la zona de estudio sólo se encontraron espesores menores a 5 metros; sin embargo, en otros trabajos se han medido espesores de 40 metros (ver Figura 11).

2.13.- UNIDAD 11. ARENA, CONGLOMERADO, ARENISCA, TOBA.

Unidad constituida por cuerpos de conglomerado, arena, arcilla, arenisca y toba sin consolidación que se presentan en el valle de Huajuapán y hacia el norte en la región Zapotitlán Palmas y en Chila de las Flores. Sus principales características se resumen en una tabla (Tabla 2). Corresponde con la Formación Huajuapán que en su descripción inicial fue denominada como Capas Huajuapán (Salas, 1949) y posteriormente definida como unidad formal (Ferrusquía, 1976) que se correlaciona con la Formación Sosola (Schlaepfer, 1970) de la región de Yanhuatlán y Nochistlán. Su característica más notable es su expresión de relieve tipo malpais que es resultado de la erosión intensa y de su escasa consolidación (ver Figura 11).

2.14.- UNIDAD 12, TOBA LÍTICA ANDESÍTICA.

Unidad fotogeológica volcánica piroclástica que aflora extensamente al poniente del área de estudio en Huajuapán de León y entre Chila de las Flores y Santa María Camotlán. Los cambios de textura se deben a que la unidad está constituida por cuerpos tabulares de rocas con diferentes grados de litificación, que favorecen por un lado la erosión diferencial y por otra los cambios de relieve contrastante. Sus principales características se resumen en una tabla (Tabla 2). La presencia de toba piroconsolidada dispuesta en planos concordantes con las capas de material no piroconsolidado en la región de Santa María Camotlán es la característica más notable de esta unidad; fue posible observar tanto en campo como en fotografía aérea seis miembros de toba no piroconsolidada que contiene de manera alternada otros cinco cuerpos de toba piroconsolidada que sobresalen por su color oscuro, su mayor resistencia a la erosión y una pseudostratificación mejor definida (Figura 14). Aunque es posible identificar cuerpos individuales de toba piroconsolidada en la fotografía aérea, los pseudoestratos varían mucho lateralmente por lo que no es posible separarlos de los pseudoestratos de toba no piroconsolidada. Corresponde a las rocas volcánicas piroclásticas y de derrame del Terciario (Martini, et al., 1999) y se relacionan en su parte más antigua con la unidad Toba Llano de Lobos (Ferrusquía, 1970; Ferrusquía, 1976). En su conjunto son parte de un mismo evento volcánico expresado como una sola unidad propuesta en un trabajo anterior (Caballero, 1989) en una unidad denominada Ahuehuetitlán (Figura 15).

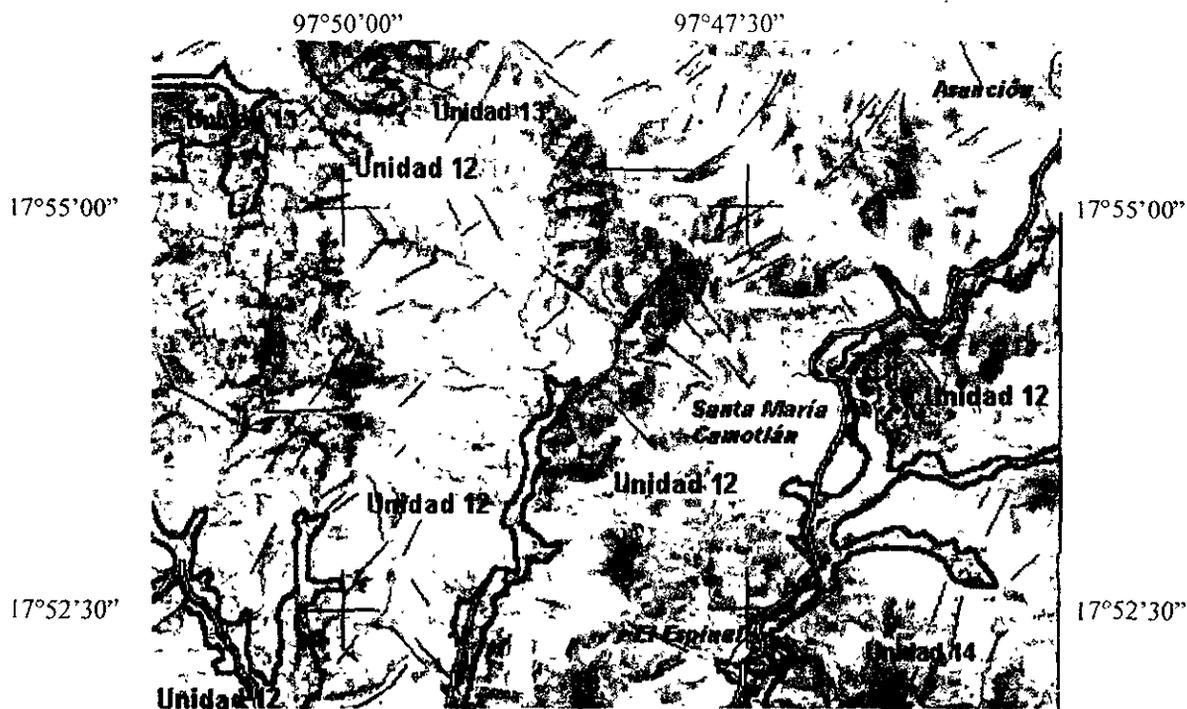


Figura 14. Unidad 12, toba Lítica andesítica, en Santa María Camotlán. Nótese un tono gris claro que contrasta ligeramente con el gris oscuro de rocas volcánicas andesíticas. Foto de 8x10 km.

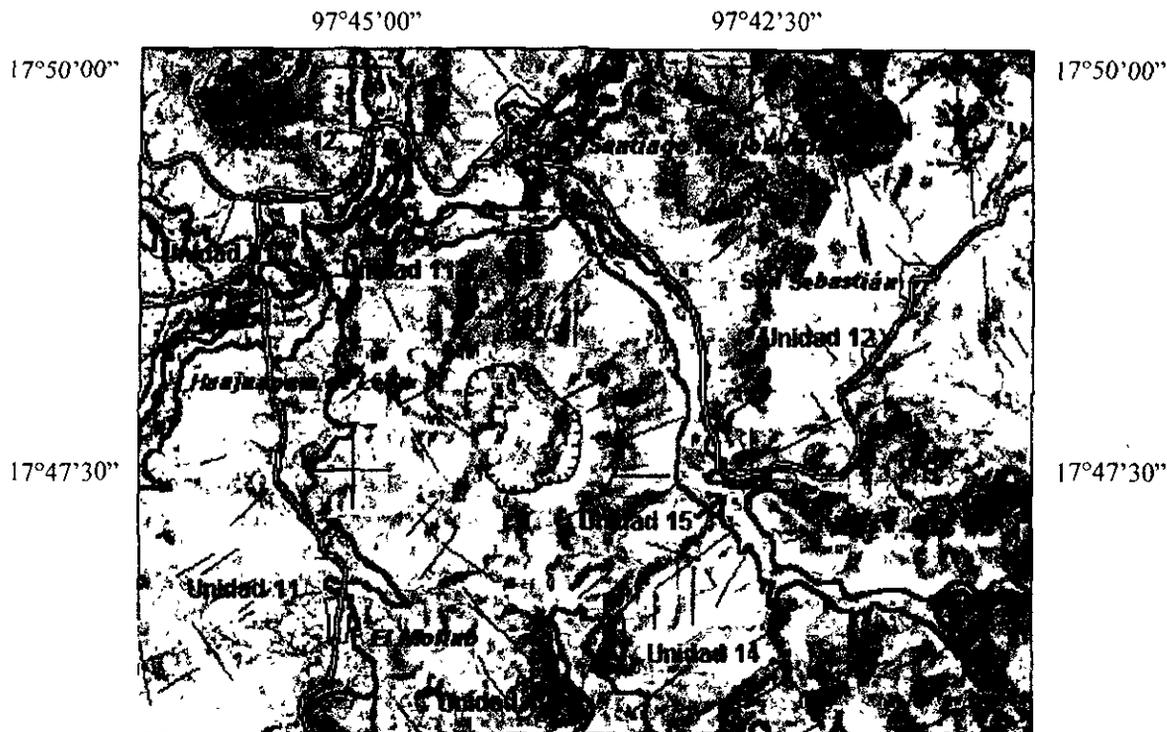


Figura 15 Unidad 12, Toba lítica andesítica al oriente de Huajuapán de León. Nótese el tono gris claro con variaciones de gris oscuro a lo largo de franjas poco definidas que representan líneas de contacto de capas pseudo estratiformes. Sobreyace a la formación Huajuapán y subyace a materiales sedimentarios inconsolidados del Pleistoceno y del Holoceno. Foto de 8x 10 km.

2.15.- UNIDAD 13, ANDESITA DE HIPERSTENA.

Esta unidad volcánica se encuentra al norte y poniente del área de estudio principalmente en la región de Chila de las Flores en afloramientos de corta extensión. Sus principales características se resumen en una tabla (Tabla 2). Se correlaciona con la Andesita Yucudaac (Ferrusquía, 1976) correspondientes al Mioceno que también ha sido reconocida en la región de Tlaxiaco (Carrasco, 1981) y por su posición estratigráfica probablemente se correlaciona con la Formación Suchilquitongo, en el valle de Etlá, Oaxaca (Wilson y Clabaugh, 1970). Ejemplos de sus estructuras volcánicas se tienen en los cerros La Peña, Yucuave, Loma El Conejo, La Tortuga, Yucuyoco, Yucumi, Yucundabi, San Juan y La Peña, al norte del área, así como en el cerro Peñón de Ayuquila (Figura 16). Los afloramientos de la unidad son encontrados siempre en partes topográficas bajas y es posible observar en las fotografías aéreas que sobreyacen a las rocas volcánicas piroclásticas de la unidad de toba lítica andesítica y a la Formación Huajuapán, por lo que su edad puede corresponder al Mioceno Medio (Figura 17).

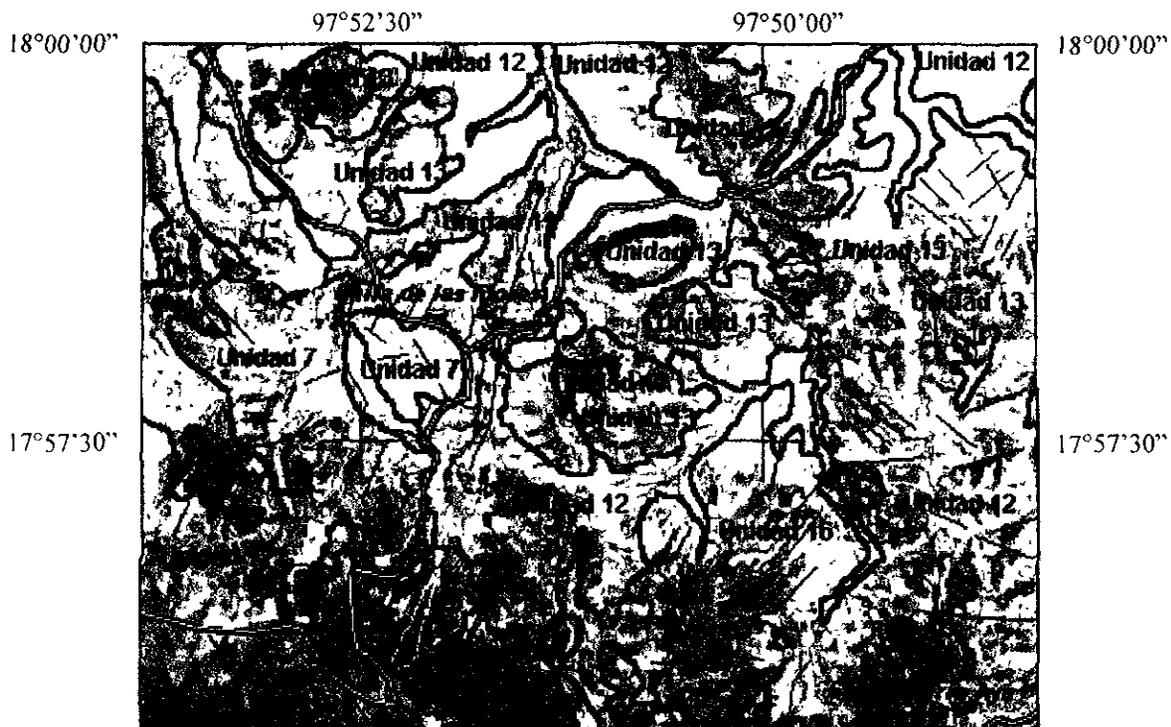


Figura 16. Andesita Yucudaac, en la región de la localidad de Chila de las Flores. Nótese el tono gris oscuro y las formas cónicas aisladas y bien definidas, marcadas con una flecha. Sobreyace a la unidad volcánica Llano de Lobos.



Figura 17. Andesita Yucudaac, entre San José Ayuquila y Francisco Ramos. Nótese la forma cónica aislada y bien definida del Peñón de Ayuquila. Sobreyace a la Formación Tecamazúchil.

2.16.- UNIDAD 14, ANDESITA DE AUGITA.

Unidad volcánica que se encuentra en la parte suroriental del área de estudio y tiene formas volcánicas erosionadas y de derrame aisladas. A diferencia de la andesita descrita en la unidad anterior se presenta siempre en las partes topográficas altas, coronando los depósitos de material volcánico de la unidad 12 como en los cerros *La Ventana* y *Pachón* y en la región del cerro *La Cumbre*. Sus principales características se resumen en una tabla (Tabla 2). Se correlaciona con la Andesita San Marcos (Ferrusquía, 1976) en la parte alta y montañosa de Tamazulapan y en el área de estudio es una unidad que se ha podido delimitar fotogeológicamente por sus características distintas, por lo que constituye una unidad diferente a aquella reconocida como Andesita Yucudaac (ver Figura 15).

2.17.- UNIDAD 15, GRAVA CAMOTLÁN

Unidad detrítica que se localiza principalmente en la parte baja del valle de Huajuapán de León y en Santa María Camotlán. La unidad no tiene una descripción previa por lo que aquí se le denomina informalmente Grava Camotlán para designar así a materiales detríticos no consolidados que se encuentran en los valles fluviales que van de Huajuapán de León a Santa María Camotlán. Sus principales características se resumen en una tabla (Tabla 2). Se constituye de grava poligmítica, escasamente consolidada, con matriz arenosa, de constituyentes principalmente

volcánicos y de granulometría que varía de grava a arena gruesa. La unidad se localiza sobrepuesta principalmente a las unidades 11 y 12 con un espesor estimado de 5 metros. En campo no se encontraron fósiles que permitieran determinar la edad pero las características fotogeológicas de sobreposición sugieren una edad pleistocénica (ver figura 15).

2.18.- UNIDAD 16, ARENA XOCHITLAPILCO.

Unidad detrítica reciente que se localiza principalmente a lo largo del cauce del Río Mixteco y comprende suelos arcillo arenosos. Sus principales características se resumen en una tabla (Tabla 2). No tiene una descripción previa por lo que aquí se le denomina informalmente Arena Xochixtlapilco para designar a los materiales de arena y arcilla que se encuentran en el valle del río Mixteco. Se extiende por más de 10 Km, cerca de la población Santa María Xochixtlapilco, al sur de Huajuapán de León. Fotogeológicamente es una unidad detrítica fácilmente discriminable de otras unidades por su disposición a lo largo de causes fluviales y por su tono y textura determinados tanto por la vegetación como por la humedad y la presencia de agua. Se constituye principalmente de arena, limo y arcilla que soportan vida vegetal y constituyen horizontes de suelos por lo que se le asigna una edad Holocénica (ver Figura 13).

2.19.- UNIDAD 17, ANDESITA SUCHIXTLAHUACA.

Unidad ígnea hipabisal que aflora de manera aislada y de poca extensión en la porción norte del área. Fotogeológicamente es una unidad de difícil de definir y separar dada su escasa extensión superficial; solo se ha podido definir con claridad en la porción sur de Chila de las Flores, en la base del cerro *La Tortuga* en afloramientos de 200 por 700 metros de extensión, aún cuando en el campo se ha reconocido en otros lugares sobre la carretera 190, cerca de la localidad Yucunduchi. Sus principales características se resumen en una tabla (Tabla 2). Rocas similares a esta unidad fueron documentadas y definidas como Andesita Intrusiva Suchixtlahuaca (Ferrusquía, 1976) en la región de Tamazulapán (ver Figura 16).

2.20.- UNIDAD 18, DIORITA DE HORNBLENDA.

Unidad ígnea intrusiva que aflora de manera aislada en la porción centro occidental del área, entre San Jerónimo Silacayoapilla y San José Chapultepec. Sus principales características se resumen en una tabla (Tabla 2). La unidad es denominada en este trabajo informalmente como Diorita Chilixtlahuaca por su afloramiento cercano a la localidad de Santiago Chilixtlahuaca. Fotogeológicamente es una unidad muy difícil de definir dada la corta extensión superficial de sus afloramientos y en tono y textura se confunde con las formaciones Cosoltepec y Tecomazuchil, unidades a las que afecta en forma intrusiva por lo que su edad relativa es Jurásico Tardío. Se constituye de diorita de textura porfirítica de color gris claro y café amarillento al intemperismo.

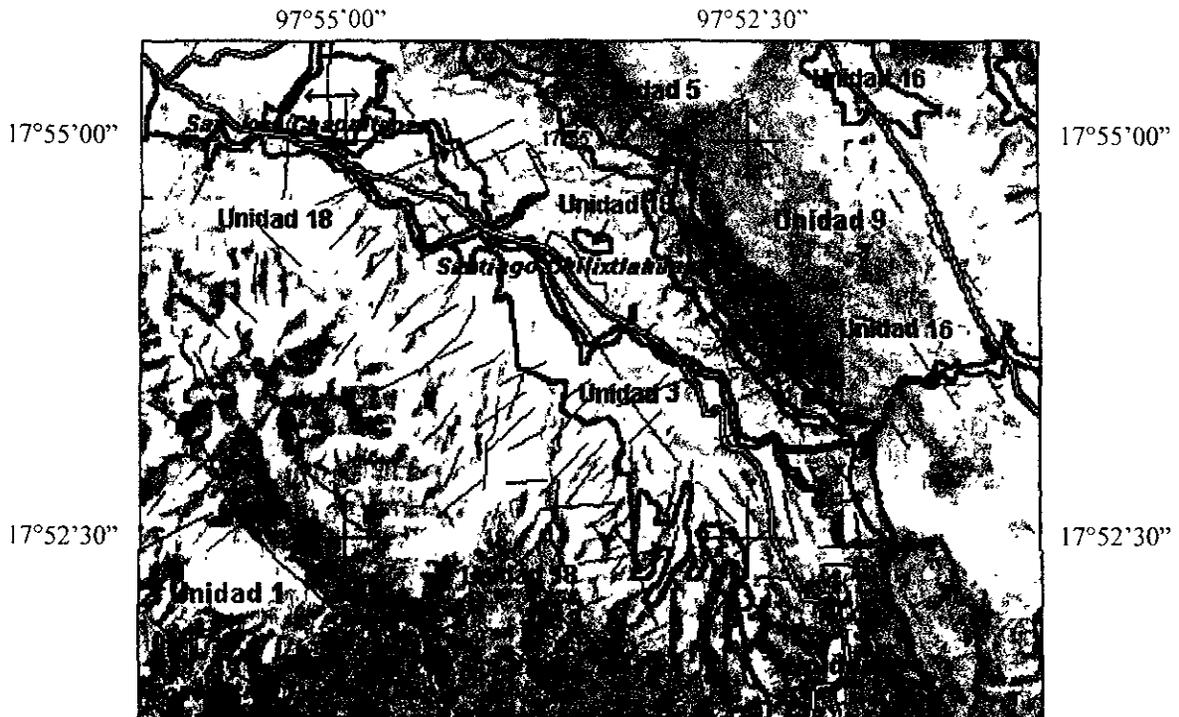


Figura 18. Diorita Chilixtlahuaca, en la localidad de Santiago Chilixtlahuaca, señalada con flechas. Afecta a las formaciones Cosoltepec, izquierda y Tecomazúchil, centro. Nótese su escasa distribución y forma alargada así como su emplazamiento en la zona de contacto de las unidades a las que intrusión.

CAPITULO 3

3.- ESTRATIGRAFÍA ESPECTRAL.

La tecnología espacial desarrollada a finales de la década de los 60's favoreció la transmisión de datos adquiridos por medio de satélites artificiales. En los años 70's esta tecnología espacial evolucionó hacia el desarrollo de sensores electromagnéticos para registrar las características de la superficie terrestre. La instalación de sensores en satélites artificiales dió inicio a la percepción remota de la Tierra desde el espacio contribuyendo así a la evaluación de la distribución de sus recursos naturales (Shelton y Estes, 1981). Aunque tuvo un auge durante la década de los 80's no fue sino hasta la década de los 90's cuando las imágenes de satélite llegaron a ser usadas comúnmente. La disponibilidad de imágenes de satélite en formato digital facilita el estudio de la respuesta espectral de las rocas y materiales de la superficie terrestre. Mediante la interpretación geológica las unidades litológicas pueden ser separadas espacialmente y ordenadas en la escala de tiempo geológico por lo que constituyen una herramienta útil en estudios estratigráficos y estructurales. Al utilizar la imagen de satélite en la interpretación de unidades litológicas se observaron variaciones de color y tono que no se pueden observar en las fotografías aéreas. Con

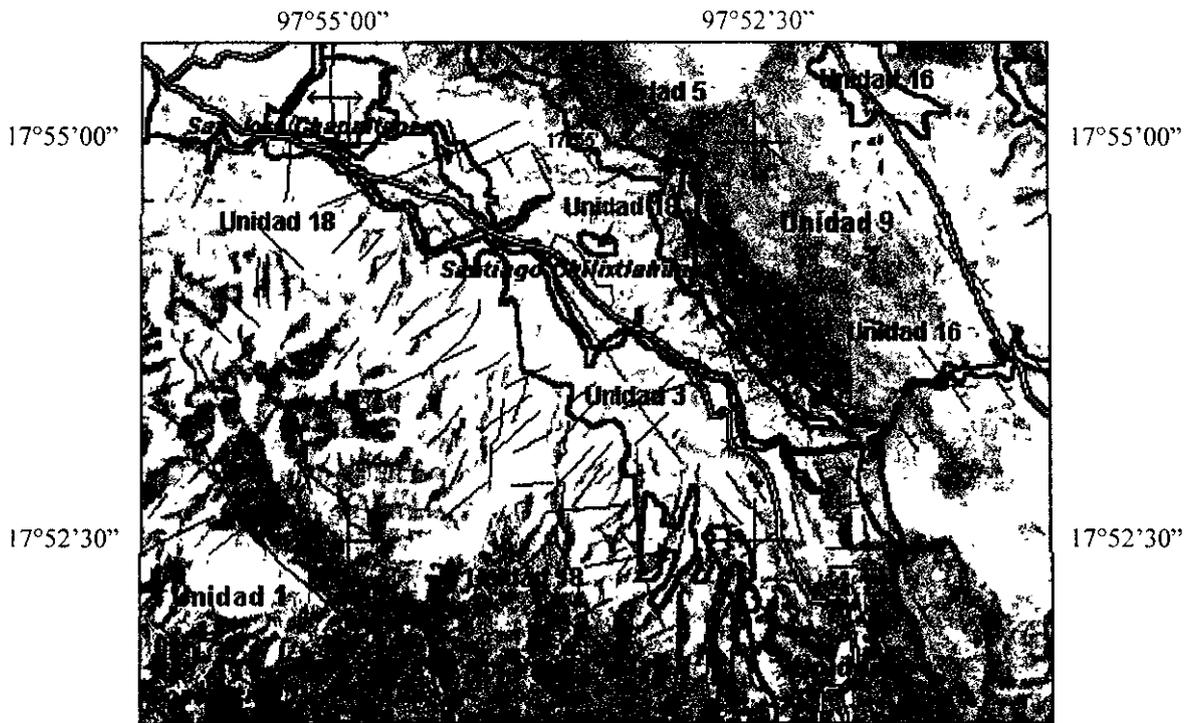


Figura 18. Dionta Chilixtlahuaca, en la localidad de Santiago Chilixtlahuaca, señalada con flechas. Afecta a las formaciones Cosoltepec, izquierda y Tecamazúchil, centro. Nótese su escasa distribución y forma alargada así como su emplazamiento en la zona de contacto de las unidades a las que intrusión.

CAPITULO 3

3.- ESTRATIGRAFÍA ESPECTRAL.

La tecnología espacial desarrollada a finales de la década de los 60's favoreció la transmisión de datos adquiridos por medio de satélites artificiales. En los años 70's esta tecnología espacial evolucionó hacia el desarrollo de sensores electromagnéticos para registrar las características de la superficie terrestre. La instalación de sensores en satélites artificiales dió inicio a la percepción remota de la Tierra desde el espacio contribuyendo así a la evaluación de la distribución de sus recursos naturales (Shelton y Estes, 1981). Aunque tuvo un auge durante la década de los 80's no fue sino hasta la década de los 90's cuando las imagenes de satélite llegaron a ser usadas comunmente. La disponibilidad de imagenes de satélite en formato digital facilita el estudio de la respuesta espectral de las rocas y materiales de la superficie terrestre. Mediante la interpretación geológica las unidades litológicas pueden ser separadas espacialmente y ordenadas en la escala de tiempo geológico por lo que constituyen una herramienta útil en estudios estratigráficos y estructurales. Al utilizar la imágen de satélite en la interpretación de unidades litológicas se observaron variaciones de color y tono que no se pueden observar en las fotografías aéreas. Con

el fin de comprobar que las unidades interpretadas realmente corresponden a cambios litológicos se llevó a cabo un proceso de clasificación supervisada para obtener una imagen temática con la definición y separación de clases de litología en función de su respuesta espectral. Tal es el caso de la definición y separación de la formación Cosoltepec y los Granitoides Esperanza por ejemplo.

3.1.- LA PERCEPCIÓN REMOTA

La percepción remota se refiere a la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre y registrada en dispositivos montados en vehículos a gran altura o plataformas satelitales. La información de la percepción remota comprende los datos de radiación electromagnética cuyas longitudes de ondas pueden o no ser perceptibles por el ojo humano, por ejemplo el rango infrarrojo del espectro electromagnético registrado en una imagen de satélite como resultado de la respuesta espectral de los objetos de la superficie terrestre (Richards, 1986). Se denomina espectro electromagnético a una serie continua de longitudes de onda de la energía que se organiza en regiones o bandas (Figura 19).

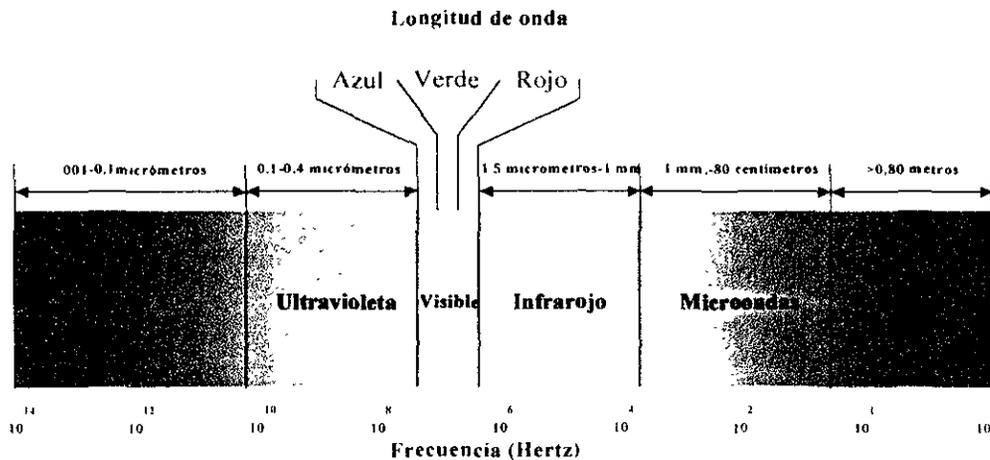


Figura 19 - Espectro electromagnético en el que se muestra la división de regiones de longitudes de onda.

3.2.- CLASIFICACIÓN DE UNA IMAGEN.

Existen tres tipos de procedimientos que se realizan en el proceso de imágenes digitales de satélite:

- a.- Corrección geométrica y radiométrica
- b.- Realce espacial y espectral
- c.- Clasificación supervisada y no supervisada

Con el fin de tener una fuente de información adicional acerca de la distribución espacial de las unidades litológicas determinadas por fotointerpretación (capítulo 2) se realizó un proceso de clasificación supervisada de una imagen de satélite. Esto se basa en la selección de ciertas áreas en donde se conoce el tipo de roca o material que existe en la superficie terrestre. Con base en

este conocimiento geológico se hace el proceso de clasificación supervisada que es el proceso de *organizar píxeles dentro de un número finito de clases o categorías con características distintivas*. Se requieren criterios de selección para determinar a que clase debe pertenecer un píxel candidato en función de su respuesta espectral para asociarlo con características previamente definidas o bien para separarlo estadísticamente de otros. En algunos casos es posible reconocer visualmente ciertos patrones comunes entre grupos de píxeles para agruparlos en clases que pueden tener un significado real (Wadge y Cross, 1991). Con la determinación de patrones conocidos para ciertos grupos de píxeles contiguos, se construyen "campos de entrenamiento" para obtener de manera automática aquellas clases que contienen patrones similares a los píxeles de dichos campos. La selección de muestras o campos de entrenamiento, se utiliza en los algoritmos de clasificación para búsqueda de los píxeles con la misma o semejante respuesta espectral y su agrupación dentro de clases. Los algoritmos de clasificación supervisada son:

- Máxima verosimilitud.
- Mínimas distancias.

Se utilizaron estos dos algoritmos para el proceso de clasificación para evaluar los resultados y también compararlos con aquellos obtenidos de la fotogeología.

3.3.- LA CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA SUPERVISADA.

En la clasificación geológica, uno de los criterios más importantes es la experiencia del trabajo de campo que se reflejará en la adecuada selección de muestras. Cuando se tiene un conocimiento previo de la distribución espacial de diferentes tipos de rocas, se pueden seleccionar grupos de píxeles de características similares agrupados dentro de áreas o campos de entrenamiento que se reflejará en la precisión de la clasificación. Sin embargo aún con una adecuada selección de clases, la clasificación supervisada trae errores de clasificación de píxeles porque la selección de campos de entrenamiento es discreta, es decir los campos no necesariamente contienen píxeles contiguos o adyacentes sino más bien son grupos aislados con una respuesta espectral semejante. En la clasificación se obtienen datos de valor cuantitativo con relación a los píxeles que han sido agrupados en determinadas clases, pero no se puede conocer la composición litológica de una clase sino que esta es un atributo de la clase asignada por el especialista para poder tener una categoría. así el conjunto de categorías dan como resultado una imagen temática. Con el propósito de probar la utilidad y la certeza de la clasificación geológica de una imagen se seleccionaron las bandas apropiadas para hacer tres procesos de clasificación.

3.4.- SELECCIÓN DE BANDAS DE LA IMAGEN PARA LA CLASIFICACIÓN.

De las siete bandas que proporciona el sensor Thematic Mapper (TM) se seleccionaron únicamente cuatro para utilizar el registro electromagnético de la energía reflejada por las rocas de la superficie terrestre en la región del infrarojo del espectro electromagnético. Estas bandas son:

banda 3 en el rojo visible (0.63-0.69 μm) que es sensible para registrar la absorción de la clorofila (Lillesand y Kiefer, 1994); banda 4 del infrarrojo cercano (0.76-0.90 μm) que es sensible para registrar los tipos de vegetación; banda 5 del infrarrojo medio (1.55-1.75 μm) que es sensible al contenido de humedad en suelo y vegetación; y banda 7 del infrarrojo medio (2.08-2.35 μm) que se utiliza para discriminar tipos de rocas y minerales. Se discriminaron dos bandas visibles y el infrarrojo térmico con el fin de aprovechar la reflectancia espectral en el infrarrojo; las mejores visualizaciones se obtuvieron al utilizar compuestos con dos bandas de infrarrojo y un visible. Por otro lado analizando los perfiles espectrales se observó que las rocas son más reflectivas en el infrarrojo medio y decrece en el infrarrojo lejano. Por ejemplo la respuesta espectral de roca de tipo augen esquisto es mayor en el infrarrojo medio y decrece en el infrarrojo lejano (Figura 20); la respuesta de un esquisto de mica es muy similar en el infrarrojo; la respuesta de una filita es ligeramente mayor en el infrarrojo cercano.

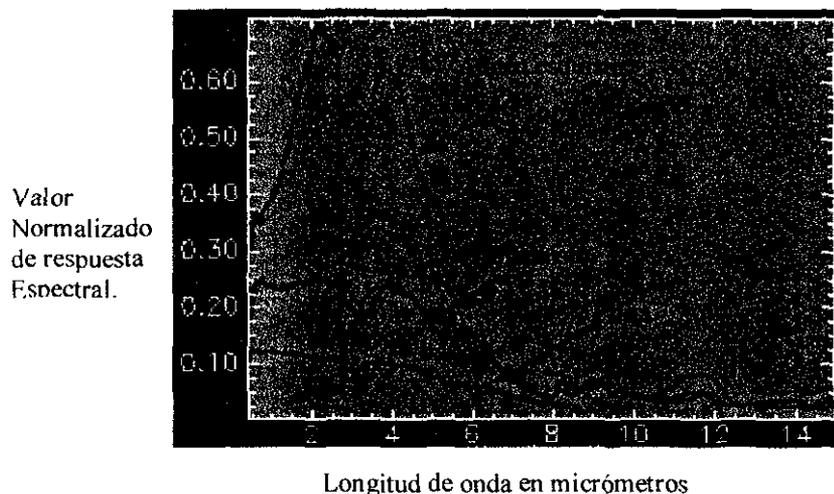


Figura 20. Diagrama de respuesta espectral de tres tipos de roca metamórfica con base en la respuesta espectral de los mismos en el espectro electromagnético.

3.5.- IMAGEN EN EL ROJO DEL ESPECTRO VISIBLE.

En la imagen de la banda 3 se observan cambios significativos de tono entre los diferentes tipos de roca (Figura 21); las rocas metamórficas muestran tono gris claro en regiones donde se encuentra la litología de esquisto y filita y se tienen tonos gris oscuro en donde la litología es esquisto de la Formación Cosoltepec, un gris menos oscuro se tiene en las regiones donde se encuentra augen esquisto, litología propia de los Granitoides Esperanza. No hay una marcada diferencia en la respuesta espectral entre la litología de esquisto y filita y el conglomerado de la Formación Tecomazúchil. En cambio hay una ligera variación de tonos de gris oscuro entre rocas sedimentarias jurásicas y cretácicas de las formaciones Chimeco y Mapache que resalta en una morfología de sierra alargada bastante notoria. El drenaje en las rocas metamórficas es más denso y de corta extensión mientras que en las rocas detríticas mesozoicas es espaciado y de mayor

extensión. En las regiones en donde se encuentran las rocas volcánicas cenozoicas se observa una tonalidad gris homogénea pero se puede apreciar un mejor contraste por su forma y tamaño como son sierras altas de parteaguas discontinuo y valles intermontanos de fuerte disección y drenaje dendrítico amplio y espaciado. Analizando el histograma de los valores de respuesta espectral de la imagen en la banda rojo visible (Figura 22) se observa una distribución marcadamente gaussiana bien definida que muestran una variación alta de los valores de respuesta espectral de los objetos de la imagen. Los histogramas indican las distribuciones que corresponden a objetos diferentes con valores de reflectancia particulares.

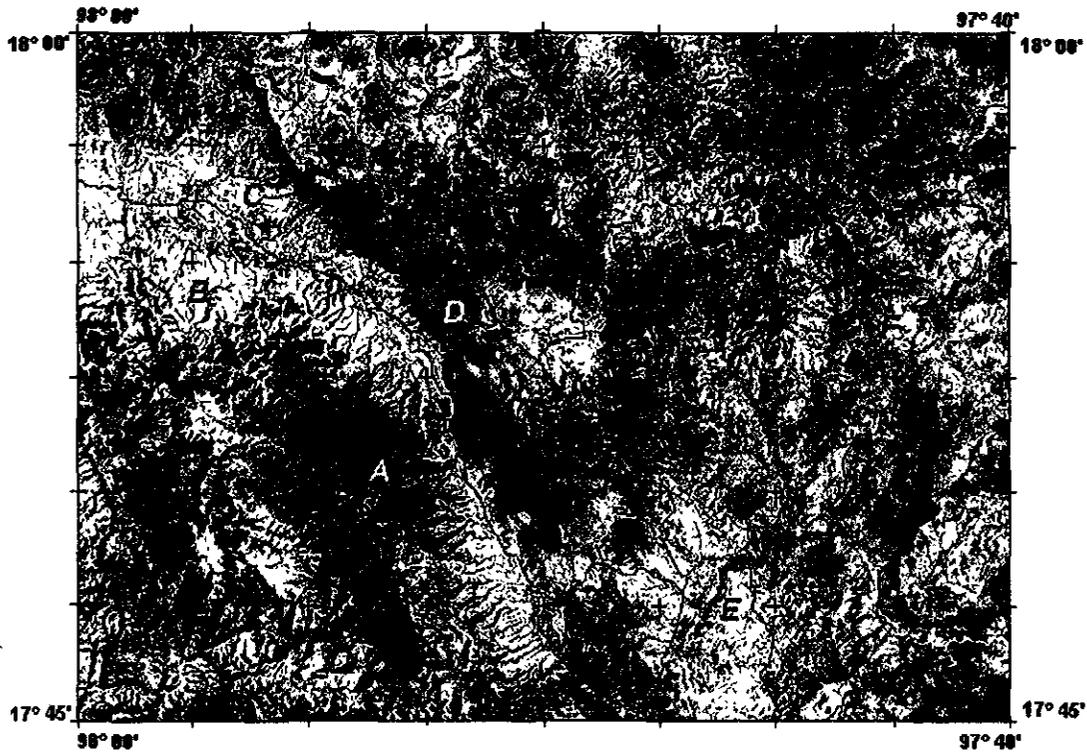


Figura 21.- Imagen de satélite Landsat, banda 3. Nótese los cambios de tono entre las rocas de esquisto (A) y de esquisto y filita (B) de la Formación Cosoltepec del Paleozoico. Las rocas sedimentarias detríticas jurásicas (C) tienen un tono gris claro mientras que las rocas químicas sedimentarias del Jurásico y Cretácico (D) tiene un tono más oscuro y textura más fina. En morfología y tono hay una marcada diferencia entre las rocas volcánicas cenozoicas (F) y rocas y materiales sedimentarios también cenozoicas (E).

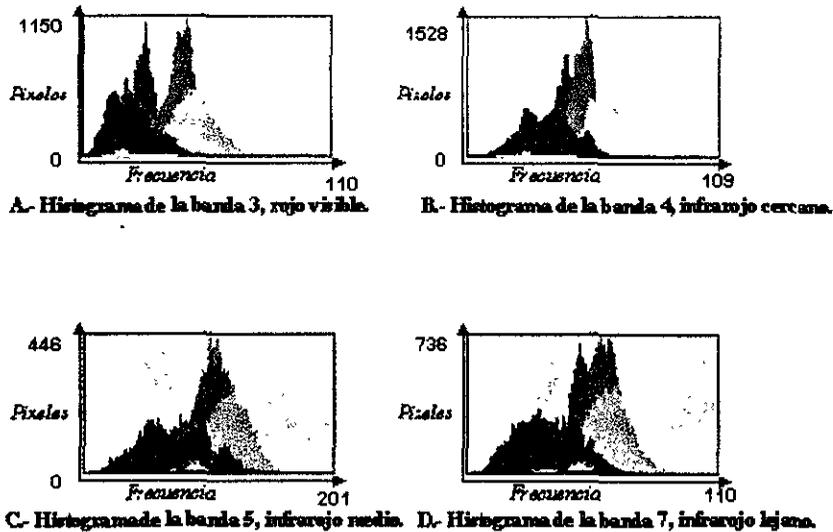


Figura 22. Histogramas de las bandas de la imagen de satélite de Huajuapán de León. Nótese la marcada distribución bimodal de los valores de respuesta espectral del histograma en el rojo visible (A). En el histograma del infra rojo cercano (B) y medio (C) se observa una distribución unimodal o normal y en el infra rojo lejano (D) es casi bimodal.

3.6.- IMAGEN EN EL INFRAROJO CERCANO (BANDA 4).

En la imagen de la banda 4 se define claramente el relieve por efecto de los cambios de tonos de gris a negro de zonas de sombra en barrancas y cañadas (Figura 23). En las rocas metamórficas paleozoicas de la Formación Cosoltepec se define muy bien la red de drenaje fluvial denso y de corta extensión y no hay una diferencia significativa en tonos de gris con respecto a las rocas sedimentarias detríticas jurásicas de la Formación Tecomazúchil. Las rocas metamórficas presentan en su conjunto un mismo tono pero resaltan las líneas de drenaje fluvial que siguen patrones estructurales como fallas y fracturas. Los cambios de tono y textura son significativos en las rocas sedimentarias jurásicas y cretácicas y puede notarse un ligero cambio de tono entre las rocas metamórficas paleozoicas y las rocas detríticas jurásicas. Es marcado el cambio de tono gris obscuro, casi negro en formas volcánicas cenozoicas de la Toba Llano de Lobos. Las rocas y materiales que se encuentran cerca de cauces fluviales no pueden ser definidos o separados debido a que en esta banda se pierde la respuesta espectral de zonas húmedas. Tampoco es posible observar un cambio de tono entre las rocas volcánicas aunque el tono es un poco más obscuro y no se define bien el drenaje y el relieve montañoso.

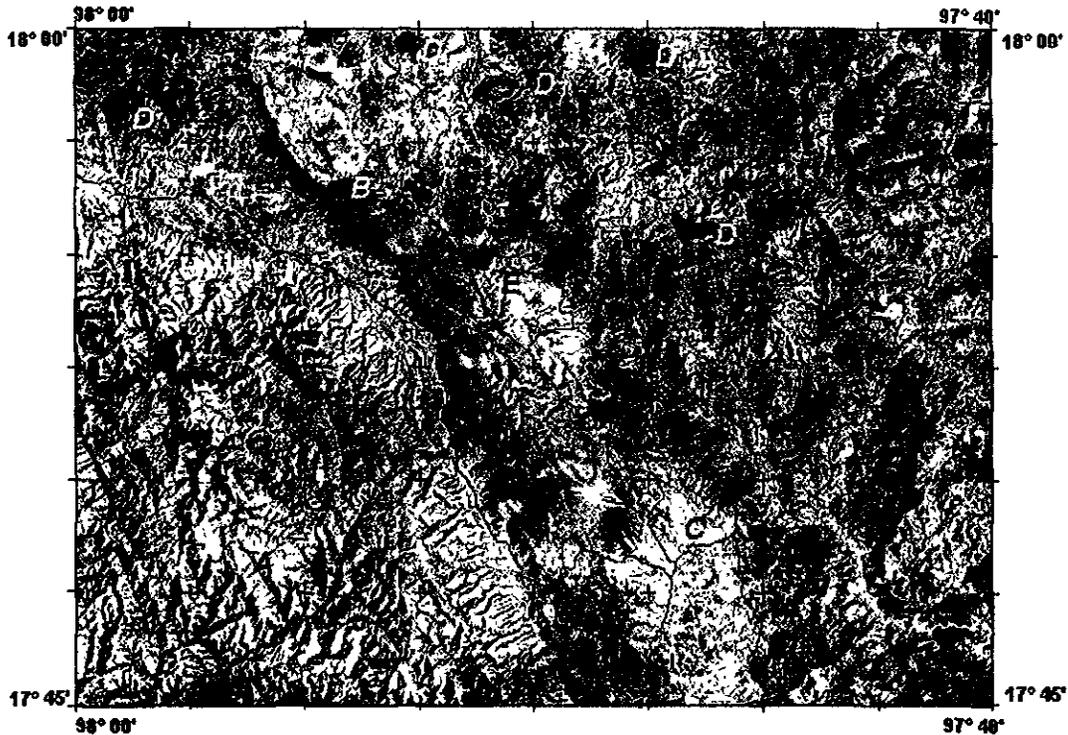


Figura 23.- Imagen de satélite Landsat, banda 4, del área de Huajuapán de León. Nótese el drenaje fluvial bien marcado en las rocas de la Formación Cosoltepec (A) y los cambios bien definidos de tono y textura de las formaciones sedimentarias jurásicas y cretácicas (B). Se tiene una buena definición de tonos gris claro en las rocas sedimentarias cenozoicas de la Formación Huajuapán y tonos gris oscuro en las rocas volcánicas de la Toba Llano de Lobos (C). Se observan también tonos gris oscuro, casi negro de formas aisladas de las rocas volcánicas de la unidad Andesita Yucudaac (D) excepto en algunas zonas (E) en donde se tienen pastos quemados para prácticas agrícolas.

3.7.- IMAGEN EN EL INFRAROJO MEDIO (BANDA 5).

En la imagen de la banda 5 el drenaje y las zonas de humedad se acentúan y se tiene una ligera diferencia de tono y textura entre las rocas sedimentarias de la Formación Tecomazúchil y las rocas metamórficas paleozoicas de la Formación Cosoltepec (Figura 24). Se observa una variación muy significativa de tonos de grises dentro de la unidad de rocas metamórficas paleozoicas lo cual es un reflejo de los cambios de litología entre rocas de esquisto y filita rocas de augen esquisto de los Granitoides Esperanza. También es posible observar la estructura antiforme en las rocas metamórficas y estructuras de fallas y fracturas. En esta banda no hay fuertes diferencias de tono y textura entre las rocas sedimentarias jurásicas mientras que las cretácicas están mejor definidas. En las rocas volcánicas cenozoicas se tiene una mejor definición de drenaje fluvial y se observan cambios de tono gris oscuros en zonas de cauces de ríos y arroyos y en general de zonas con humedad.

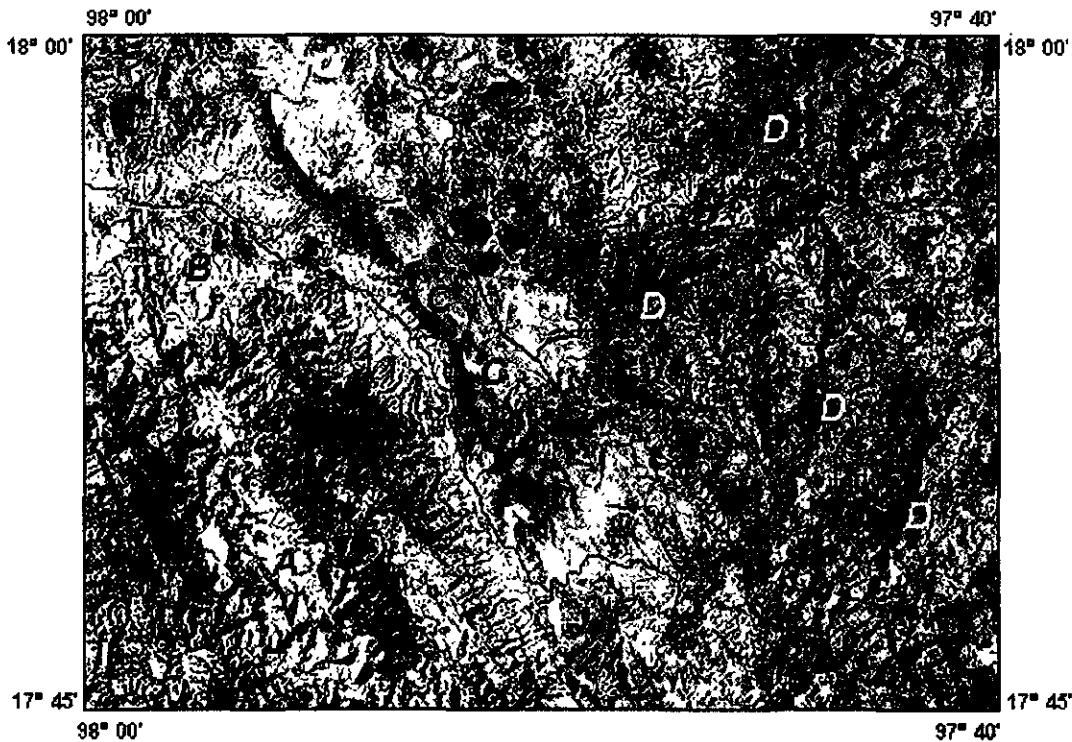


Figura 24.- Imagen de satélite Landsat, banda 5, de Huajuapán de León. Nótese las variaciones de tonos de gris que se presentan en las rocas metamórficas de la Formación Cosoltepec por efecto de los cambios de composición litológica de esquistos (A) y esquistos-filita y augen esquistos de la unidad Granitoides Esperanza. Son importantes los cambios de tono entre las rocas de esquistos y filitas y las rocas de arenisca y conglomerado de la Formación Tecamazúchil (B). Se observa una definición bastante homogénea de tono y textura en las rocas sedimentarias cretácicas (C). Por otra parte es muy marcado el drenaje fluvial en las rocas volcánicas de la unidad Llano de Lobos (D).

3.8.- IMAGEN DEL INFRAROJO MEDIO (BANDA 7).

En la imagen de la banda 7 del infrarrojo medio no hay variaciones significativas en cuanto a tono y textura entre las rocas metamórficas paleozoicas, sin embargo se define muy bien el drenaje fluvial por variaciones de tonos de gris oscuro en zonas de sombra (Figura 25). Se observa una muy buena definición de tono y textura entre las rocas sedimentarias jurásicas de las formaciones Tecamazúchil y Chimeco así como entre las formaciones Chimeco y Teposcolula. Se tiene una buena definición de tonos de gris que permiten identificar y separar las rocas de la unidad Caliza Solano del Jurásico Superior. En las rocas volcánicas es posible observar cambios significativos de tono y textura; las rocas piroclásticas de la unidad Llano de Lobos tienen un tono gris claro o gris oscuro debido a la mejor definición del drenaje y de zonas húmedas; las rocas volcánicas de la unidad Andesita Yucudaac tienen tonos gris oscuro, casi negro, con textura más fina debido a drenaje escaso y espaciado mientras que la unidad Llano de Lobos tiene una mejor definición del drenaje fluvial y un marcado relieve montañoso. Se tiene una pobre definición entre las rocas

volcánico – sedimentarias de la Formación Huajuapán y las rocas volcánicas de la unidad Llano de Lobos.

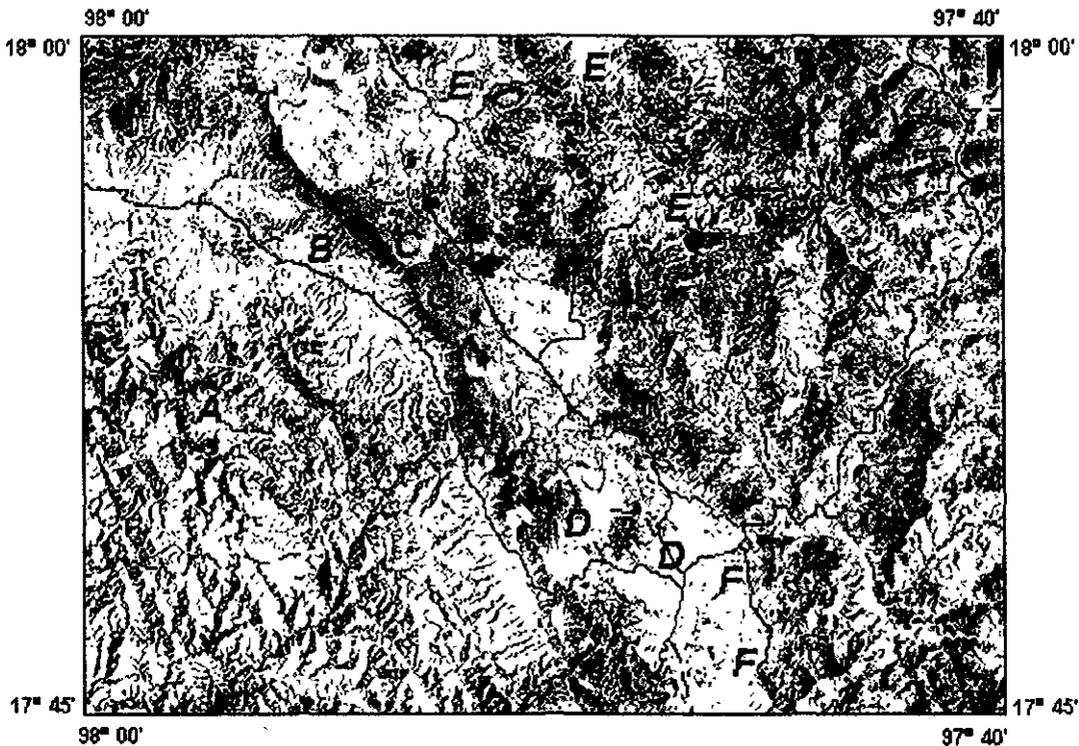


Figura 25.- Imagen de satélite Landsat, banda 7. Nótese que las rocas metamórficas paleozoicas tienen un tono y textura bastante homogéneos (A). Se observa una buena definición de tono y textura que permite distinguir entre las rocas de las formaciones Tecomazúchil y Chimeco (B) así como entre las formaciones Chimeco y Teposcolula (C). Así mismo es posible identificar las rocas de la unidad Caliza Solano por su tono gris oscuro (D). Las rocas volcánicas de la unidad Andesita Yucudaac pueden ser identificadas por su tono y sus formas aisladas (E). No se observa un cambio significativo entre las rocas volcánico - sedimentarias de la Formación Huajuapán y las rocas volcánicas de la unidad Toba Llano de Lobos (F).

3.9.- IMAGEN COMPUESTA EN INFRAROJO MEDIO, INFRAROJO CERCANO, Y ROJO VISIBLE (5, 4, 3).

La percepción del ojo humano es estrecha y se reduce a tres colores primarios que son el rojo, el verde y el azul, los que tienen propiedades aditivas y pueden producir una amplia gama de colores secundarios. Una composición en falso color es la selección de bandas para su despliegue en un cañón de color primario; si se utiliza una imagen con tres bandas como el infrarojo medio en un cañón rojo (R), infrarojo cercano en un cañón verde (G) y visible en un cañón azul (B) se tendrá una imagen en compuesto RGB (Red, Green, Blue) de una combinación de bandas (5, 4, 3). Se han seleccionado los rangos infrarojos medio y cercano para aprovechar la respuesta espectral de las rocas intemperizadas (Amos y Greenbaum, 1987) con contenidos de carbonato de calcio y rocas detríticas (Eberhardt, 1987) para obtener el mejor resultado en la clasificación litológica al reducir el efecto de la respuesta espectral de la vegetación. En la interpretación geológica de una

imagen de satélite la cubierta vegetal obstaculiza la clasificación de los tipos de roca cuando se utilizan datos con respuesta espectral dentro del rango del infrarrojo lejano, por lo que se han utilizado los datos en el rango comprendido entre el infrarrojo medio e infrarrojo cercano tomando como base que en regiones áridas (Amos y Greenbaum, op. cit.) o semi-áridas (Eberhardt, op. cit.; Drury y Hunt, 1989) han dado buenos resultados en clasificaciones litológicas. La banda 5 ha sido utilizada para obtener la máxima reflectancia de rocas en zonas áridas (Crosta y Moore, 1989) ya que la mejor respuesta espectral de rocas con contenidos de carbonatos y arcillas se ha observado en las bandas 5 (infrarrojo medio) y 6 (infrarrojo térmico o emisor). Con el compuesto de infrarrojo medio, cercano y rojo visible (Figura 26) se obtiene una imagen con una variación grande de tonos de color en donde resaltan las diferencias por variaciones de colores claros y oscuros entre las rocas de esquisto y filita de la Formación Cosoltepec y las rocas de augen esquisto de los Granitoides Esperanza. También resaltan las diferencias de tonos de color claro de las rocas de arenisca y conglomerado de la Formación Tecamazúchil con respecto a los colores ligeramente más oscuros de las formaciones Chimeco, Mapache y Teposcolula. Así mismo se tiene una variación baja de tonos de colores oscuros que no permiten identificar y separar las rocas de las unidades cenozoicas y las rocas volcánico - sedimentarias de la Formación Huajuapán.

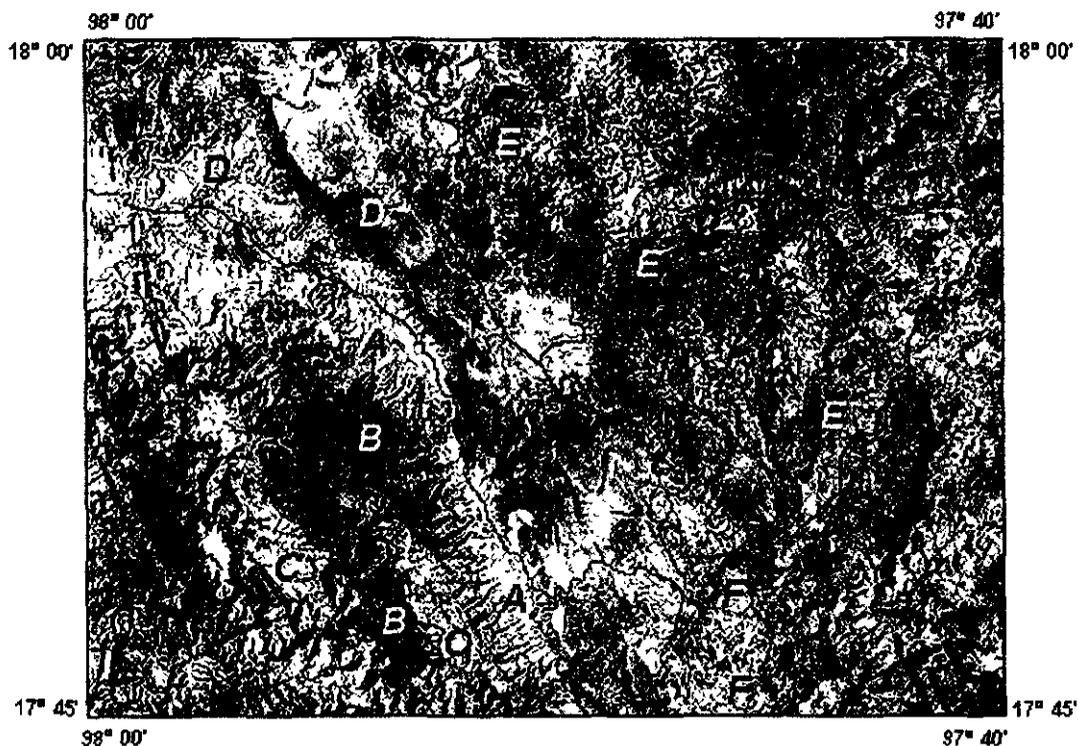


Figura 26.- Imagen en el compuesto R,G,B de las bandas 5,4,3. Nótese las variaciones de tonalidades en las rocas metamórficas de esquisto - filita (A), esquisto (B) de la Formación Cosoltepec y augen esquisto (C) de los Granitoides Esperanza. Se observan variaciones claras de tonos entre las rocas de arenisca y conglomerado de las formaciones Tecamazúchil (D) y las rocas de caliza de las formaciones Chimeco, Mapache y Teposcolula. No se observan variaciones

importantes de tonos que permiten identificar las características y los límites entre las unidades volcánicas cenozoicas (E) y las rocas volcánico sedimentarias de la Formación Huajuapán(F).

3.10.- IMAGEN COMPUESTA EN INFRAROJO MEDIO, INFRAROJO CERCANO, Y ROJO VISIBLE (7, 4, 3).

En este trabajo se ha seleccionado la combinación de bandas de infrarojo medio (7), infrarojo cercano (4) y rojo visible (3) para obtener la respuesta espectral máxima de la vegetación que es más reflectiva en las porciones del infrarojo cercano del espectro electromagnético. Con la combinación de estas bandas se obtiene un compuesto RGB que se ha utilizado para el mapeo litológico (Bennet, 1993; Wahl, et al, 1995) con algunas aplicaciones particulares en la prospección minera (Coller, et. al., 1994). El compuesto en infrarojo lejano e infrarojo cercano resalta la vegetación arbórea que se muestra con colores verdes claros y brillantes y la vegetación arbustiva que tiene colores verde oscuro y ocre. En la imagen resalta la zona con vegetación boscosa de pino-encino en las partes topográficas altas, entre los 1900 y 2500 m.s.n.m. en donde afloran las rocas metamórficas de la Formación Cosoltepec (Figura 27). Así mismo resalta las zonas de vegetación arbustiva con agricultura de temporal a lo largo de los valles fluviales de las partes topográficas más bajas como en el río Mixteco. La vegetación matorral de tipo crasicaule, palmas y cactáceas tienen una tonalidad homogénea de colores claros y se presenta en las rocas de las formaciones Tecamazúchil, Chimeco, Mapache y Teposcolula, en partes topográficas entre 1900 y 1500 m.s.n.m. En las rocas volcánicas de las unidades Toba Llano de Lobos, Andesita Yucudaac y Andesita San Marcos se presenta la vegetación de tipo crasicaule y pastos con colores de tonalidades oscuras bastante homogéneas. Las zonas desprovistas de vegetación y roca desnuda tienen tonos oscuros como en las rocas de las unidades Andesita Yucudaac y Caliza Solano que pueden ser reconocidas por esta característica. En este compuesto también se observa una marcada definición del drenaje fluvial que resalta la erosión diferencial de las rocas y los patrones de fracturas. En la Sierra *El Tigre* se presentan en la parte interior de una estructura antiformal angosta y extensa en la Barranca *El Muerto* y una estructura sinforme similar se encuentra al poniente de dicha barranca. Ambas estructuras pueden ser reconocidas únicamente en el compuesto de la imagen de satélite en las bandas infrarojo medio, cercano y rojo visible (compuesto 7,4,3). En ese mismo compuesto se observa una probable falla lateral derecha a lo largo de la barranca *El Naranja* que se extiende 3 Km al noroeste de San Miguel Papalutla; tomando los extremos de los afloramientos de los cuerpos de esquisto a lo largo de la estructura de falla pueden medirse 5 Km de desplazamiento dextral relativo.

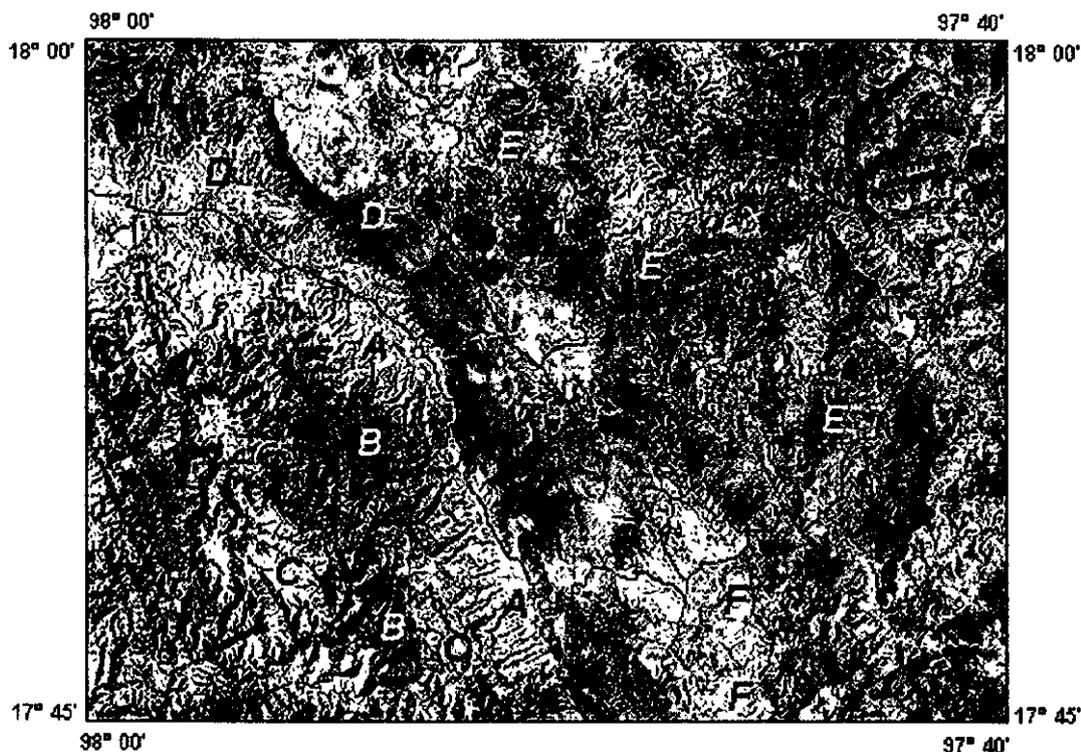


Figura 27.- Imagen en compuesto R,G,B de las bandas 7,4,3. Nótese los tonos oscuros en las zonas de montaña en donde se encuentran las rocas metamórficas de la Formación Cosoltepec (A). En las zonas en donde se tiene una vegetación de tipo arbustivo crasicaule, palmas y cactáceas se tienen tonos más claros en donde se encuentran las rocas de las formaciones Tecomazúchil, Chimeco, Mapache y Teposcolula (B). La Caliza Solano (C) tiene colores de tonos más oscuros mientras que las rocas con vegetación arbustiva y pastos de las rocas de la unidad Toba Llano de Lobos tienen tonos oscuros (D). Las zonas desprovistas de vegetación y la roca desnuda de la unidad Andesita Yucudaac (E) tienen tonos oscuros también.

3.11.- SELECCIÓN DE 100 CAMPOS DE ENTRENAMIENTO Y PRIMERA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.

En la imagen de la composición 5,4,3 se seleccionaron elementos puntuales dentro de la imagen en donde se reconoce el tipo o clase de litología con base al trabajo de campo geológico (Drury, 1987). Para el proceso de una primera clasificación supervisada se seleccionaron 100 áreas o polígonos cuyos píxeles son utilizados como muestras por su valor espectral. A partir de dichos elementos de referencia se construyeron polígonos a partir de un radio de búsqueda de 250 metros. De esta manera quedaron definidos campos de entrenamiento (Stan, 1989) que se usaron en el algoritmo de clasificación. De los campos de entrenamiento (Tabla 3), 20 fueron seleccionados sobre rocas de esquisto del complejo Acatlán (del 1 al 20), los siguientes, (21 al 28) están dentro de arenisca calcárea de la Formación Chimeco; del 29 al 40 son píxeles dentro de la unidad de arenisca-conglomerado de la Formación Tecomazúchil, del 41 al 46 y del 64 al 65 están dentro de caliza arcillosa de la Fm. Mapache; del 47 al 50 están dentro de caliza de la unidad Caliza Solano; del 51 al 52 se encuentran dentro de caliza arcillosa de la unidad Caliza Papalutla;

del 53 al 63 se encuentran dentro de caliza de la Fm. Teposcolula; el 66 está dentro de la unidad Conglomerado Tamazulapan; del 67 al 72 se encuentran en arenisca, conglomerado, arcilla, arena y toba de la Formación Huajuapán; del 73 al 83 se encuentran dentro de toba de la unidad Toba Llano de Lobos; del 84 al 94 están en andesita de la unidad Andesita Yucudaac; del 95 al 96 están en andesita de la unidad Andesita San Marcos; del 97 al 100 se encuentran en grava, arena, arcilla de suelos recientes. Los 100 campos de entrenamiento (Figura 28) se han agrupado dentro de 32 grandes clases que son utilizados para la búsqueda de píxeles de respuesta espectral igual o semejante en todos los píxeles de muestreo o semillas respecto a los píxeles de los datos crudos de la imagen original.

Número de clase	Clase	Semilla	Campos de entrenamiento
1	Esquisto	Complejo Acatlán	1-20
2	Caliza arenosa	Fm. Chimeco	21-28
3	Arenisca y conglomerado	Fm. Tecomazúchil	29-40
4	Caliza arcillosa	Fm. Mapache	41-46 y 64-65
5	caliza	Caliza Solano	47-50
6	Caliza arcillosa	Caliza Papalutla	51-52
7	caliza	Fm Teposcolula	53-63
8	Conglomerado	Conglomerado Tamazulapan	66
9	Arena, conglomerado	Fm. Huajuapán	67-72
10	Toba andesítica	Toba Llano de Lobos	73-83
11	Andesita	Andesita Yucudaac	84-94
12	Andesita	Andesita San Marcos	95-96
13	Grava y arena	Grava Camotlán	97-98
14	Arena y arcilla	Arena Xochitlápilco	99-100

Tabla 3. Semillas y campos de entrenamiento para la clasificación geológica supervisada de una imagen de satélite en compuesto RGB, bandas 5, 4, 3.

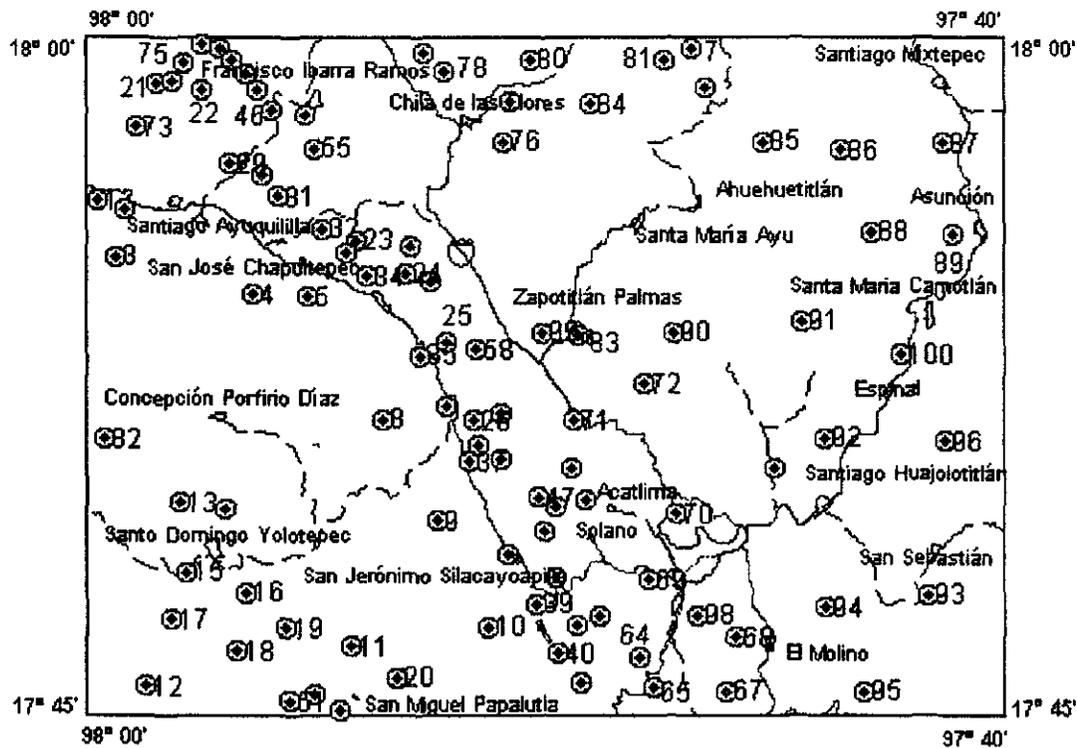


Figura 28.- Cien muestras de campos de entrenamiento para la definición de clases en el proceso de clasificación. Se muestran las poblaciones principales y las vías de comunicación.

3.12.- ALGORITMO DE LA PRIMERA CLASIFICACIÓN.

En el procedimiento de clasificación supervisada se decidió utilizar el algoritmo de discriminación paramétrica (Barret y Curtis, 1992) llamado máxima verosimilitud (bayesian maximum likelihood), el cual asume que los datos de respuesta espectral de la imagen tienen una distribución gaussiana y se basa en la regla bayesiana en donde la probabilidad de que un píxel candidato pertenezca a una clase es estadísticamente adecuada si la probabilidad es máxima para el conjunto de píxeles en la muestra. Al seleccionar campos de entrenamiento con conocimiento *a priori* de que pertenecen a una clase de roca o material se asume que los píxeles candidatos están estadísticamente dentro de los valores más altos de un histograma (Niblack, 1985). De esta forma son consideradas las clases que tienen un conjunto de píxeles de distribución gaussiana como las más representativas de clases verdaderas o más aproximadas a la realidad geológica. El resultado de la clasificación es una imagen temática con 32 clases que representan unidades litológicas. Con la selección de 100 campos de entrenamiento se buscó no limitar la clasificación a 18 clases posibles sino obtener como máximo el doble de clases para después agrupar dos o más clases similares en una sola equivalente. La imagen clasificada (Figura 29) muestra que las 32 clases agrupadas en 14 de las unidades esperadas son representativas de las unidades litológicas obtenidas de la fotogeología; al comparar las unidades fotogeológicas con las obtenidas por la clasificación se observa que poco menos de la mitad se definieron adecuadamente. Esta selección

de campos de entrenamiento trajo como consecuencia un exceso de clasificación de píxeles que se refleja como errores de clasificación.

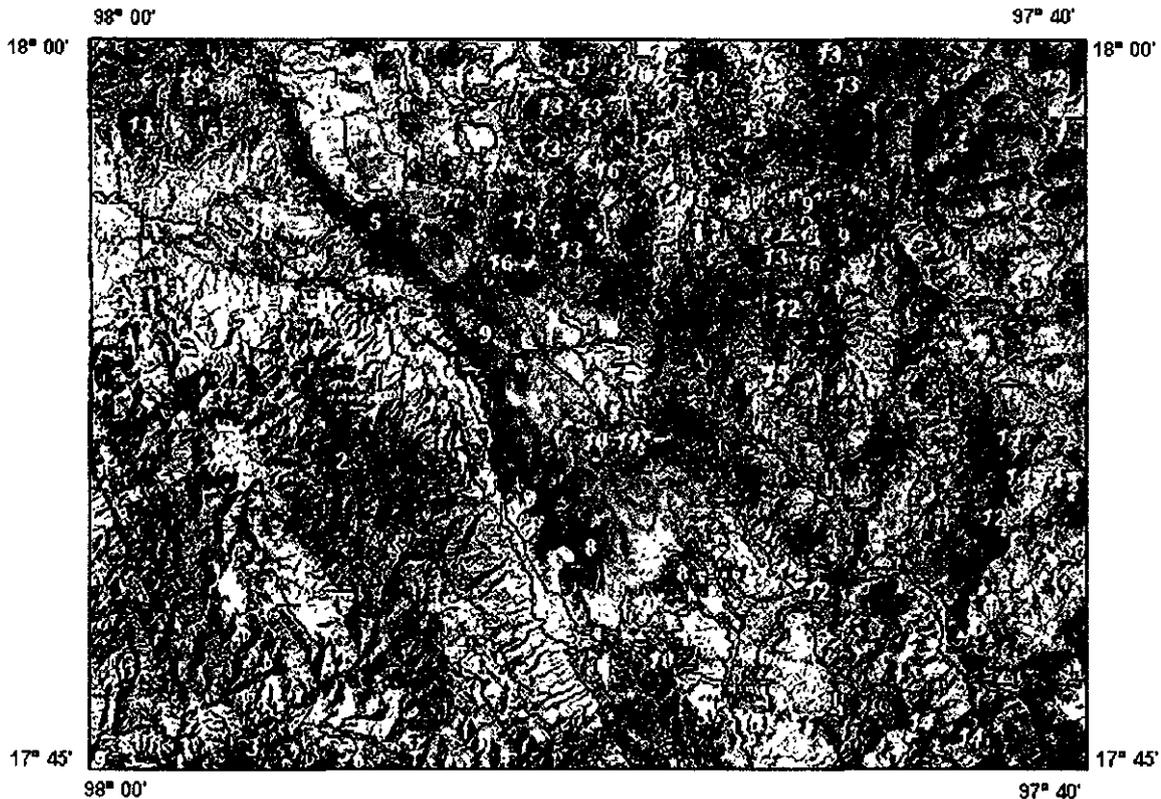


Figura 29.- Imagen clasificada (primera clasificación), con el algoritmo de máxima verosimilitud y el método bayesiano. Se muestran los límites o líneas de contacto litológico del área en donde los números representan una unidad litológica. Nótese la adecuada clasificación de las rocas metamórficas de la Formación Cosoltepec (2), de las formaciones jurásicas(3) y cretácicas(9) así como la formación Huajuapán(11) y las unidades Andesita Yucudaac(13) y Toba Llano de Lobos(12).

3.13.- SELECCIÓN DE 32 CAMPOS DE ENTRENAMIENTO Y SEGUNDA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.

Con el propósito de reducir el número de píxeles mal clasificados en el proceso anterior se consideró la selección de un número menor de semillas. Se seleccionaron menos de 7 semillas por cada uno de los 32 campos de entrenamiento para obtener al menos 9 campos de entrenamiento por unidad litológica a clasificar (Tabla 4); las muestras fueron regionalizadas dentro de polígonos tomando como radio de búsqueda 500 metros. Al utilizar un radio de búsqueda mayor se decidió utilizar un número menor de semillas para obtener 9 campos de entrenamiento en la generación de 18 clases. El resultado de esta clasificación muestra una imagen en la que hay una mejor separación de las clases pero estas son más generalizadas en sus límites, al menos para la representación en la escala 1:50,000 se tiene un menor detalle de las clases (Figura 48). Así se obtuvo una separación importante entre las rocas metamórficas del complejo Acatlán y las rocas de

la Formación Tecmazúchil (Figura 30). También se obtuvo una buena separación entre las rocas de las formaciones Tecmazúchil, Chimeco y la Limolita Chapultepec. Hay una ligera diferencia de separación de las clases que corresponde a las formaciones Mapache y Teposcolula y hay cierta confusión entre las formaciones Tecmazúchil y Teposcolula porque en esta última hay tonos muy semejantes a los que se tienen en la Formación Tecmazúchil. Se observa una buena definición de separación entre las Formaciones Huajuapán y Llano de Lobos y Andesita Yucudaac.

Número de clases	Clase	Semilla	Campos de entrenamiento
1	Esquisto	Complejo Acatlán	1-5
2	Caliza arenosa	Fm. Chimeco	6-7
3	Arenisca y conglomerado	Fm. Tecmazúchil	9-12
4	Caliza arcillosa	Caliza Solano	13-14
5	Caliza	Fm. Teposcolula	15-18
6	Arena y conglomerado	Fm. Huajuapán	19-20
7	Andesita	Andesita Yucudaac	22-24
8	Toba andesítica	Toba Llano de Lobos	21, 25-29, 32
9	Andesita	Andesita San Marcos	30-31

Tabla 4.- Tabla de semillas de los 32 campos de entrenamiento para la definición de 9 clases en la clasificación supervisada de la imagen en compuesto R, G, B de bandas 7,5,3.

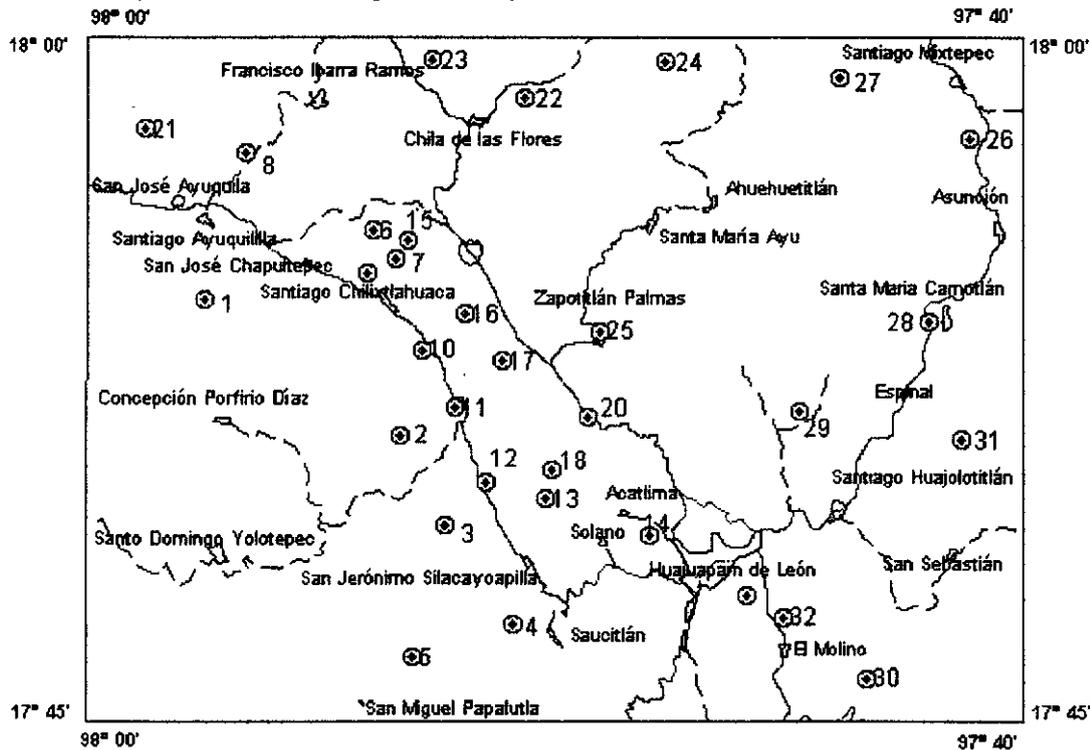


Figura 30.- Mapa con las treinta y dos semillas de 9 clases para el proceso de clasificación supervisada. Se muestran las poblaciones principales así como las vías de comunicación.

3.14.- ALGORITMO DE LA SEGUNDA CLASIFICACIÓN

Con la selección de semillas en 32 de campos de entrenamiento dentro de 9 clases se llevó a cabo una segunda clasificación con el método de máxima verosimilitud. La vegetación tiene su mejor respuesta espectral en el infrarojo cercano en donde es altamente reflectiva debido a la actividad fotosintética. Aunque es un obstáculo para la interpretación y clasificación litológica, se utilizó dicho rango del espectro electromagnético en el proceso de clasificación para evaluar el resultado respecto al compuesto que contiene infrarojo medio. El resultado de la clasificación es una imagen en donde se observa una buena separación de la clase de las rocas metamórficas de la Formación Cosoltepec, al igual que en la segunda clasificación, pero no se obtuvo una adecuada separación en las rocas de la Formación Tecmazúchil (Figura 31). Se tiene una buena separación entre las formaciones Chimeco, Teposcolula y la Limolita Chapultepec. Existe también una buena separación de las clases de la Caliza Solano, respecto a la Formación Teposcolula. No hay una diferencia importante entre las clases que corresponden a las formaciones Mapache y Teposcolula pero sí entre las formaciones Teposcolula y Tecmazúchil; se observa una separación poco marcada entre las clases de la Formación Huajuapán y la Grava Xochixtlapilco. También hay diferencias significativas con respecto a la Toba Llano de Lobos pero se observa una confusión de separación entre la Andesita Yucudaac, Andesita San Marcos y la Toba Llano de Lobos.

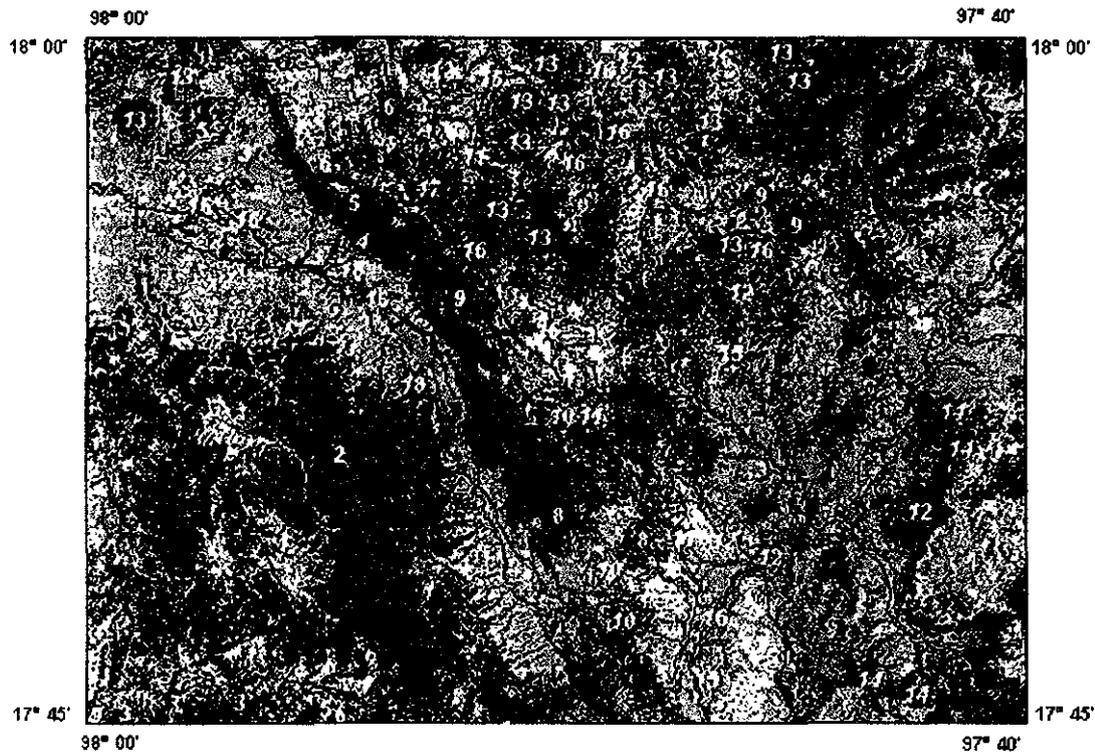


Figura 31- Imagen clasificada (Segunda clasificación) por el método de máxima verosimilitud con la definición de 9 clases. Se tiene sobrepuesto el límite o las líneas de contacto de las unidades litológicas del área. Nótese una buena definición de separación en las formaciones Cosoltepec (2), Chimeco (5), Teposcolula (9) y Huajuapán (11) y en las unidades Caliza Solano (8), Llano de Lobos (12) y Andesita Yucudaac (13).

3.15.- ALGORITMO DE LA TERCERA CLASIFICACIÓN

A partir de los mismos campos de entrenamiento de la primera clasificación se realizó un tercer proceso de clasificación aprovechando las características espectrales de 100 semillas de la primera clasificación usando el método de mínimas distancias con el propósito de evaluar el algoritmo de clasificación y comparar el resultado con aquellos obtenidos por el algoritmo de máxima verosimilitud. El método de mínimas distancias espectrales es un método basado en la distancia euclidiana que existe entre un pixel candidato a ser clasificado y la media espectral de un conjunto de pixeles muestra dentro de un campo de entrenamiento. El resultado de esta clasificación es una imagen (Figura 32) en la que se observa una separación poco definida en la Formación Cosoltepec porque se tiene una confusión con la Formación Tecomazúchil. Se obtuvo una buena definición en la separación de las clases de las formaciones Chimeco y Teposcolula así como entre las unidad de la Caliza Solano y la Formación Teposcolula. En las unidades Andesita Yucudaac y la Toba Llano de Lobos se tiene también una buena separación de clases aunque en esta última hay muchas variaciones de tonos sin que se tenga una diferencia significativa para separar a la unidad Andesita San Marcos, y finalmente, se obtuvo también una buena separación de las clases de la Formación Huajuapán y la Grava Camotlán. El algoritmo de mínimas distancias espectrales resalta el drenaje fluvial y los patrones lineales de estructuras como fallas y fracturas y es significativamente más útil para definir estructuras que las imágenes que resultaron del algoritmo de máxima verosimilitud.

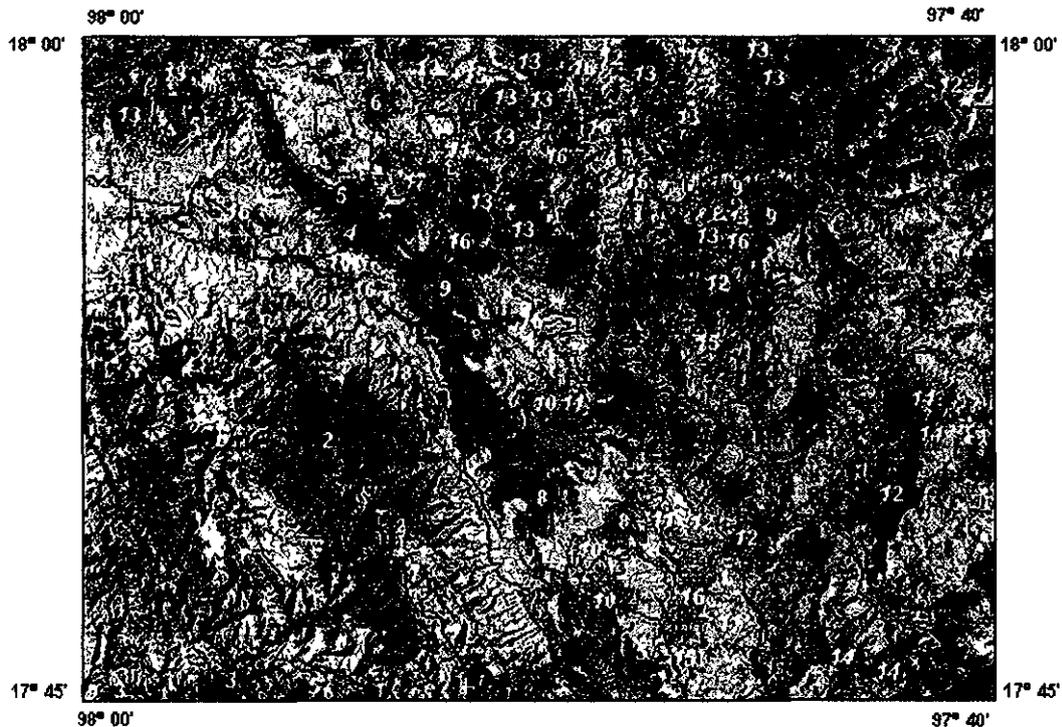


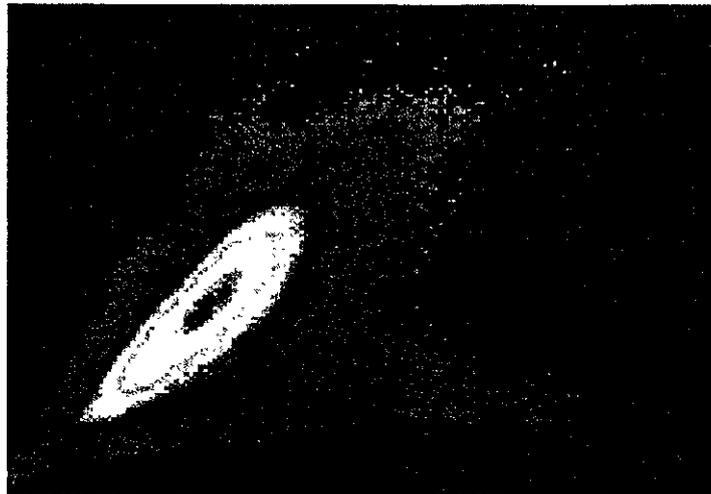
Figura 32.- Imagen clasificada (tercera clasificación) por el método de mínimas distancias (mínima distancia espectral). Se muestran sobrepuestos los límites o líneas de contacto litológico del área.

Nótese la definición de separación de clases en la Formación Cosoltepec (2) con cierta confusión respecto a la separación con la Formación Tecomazúchil(3), sin embargo se tiene una buena separación entre las formaciones Chimeco (5) y Teposcolula(9). Así mismo se tiene una buena separación en la Formación Huajuapán (11) y entre las unidades Andésita Yucudaac (13) y la Toba Llano de Lobos (12).

3.16.- EVALUACIÓN DE LAS CLASIFICACIONES.

Una manera sencilla de visualizar la respuesta espectral de los objetos registrados en la imagen de satélite es observar también las relaciones de las firmas espectrales entre las bandas utilizadas. Si se considera la relación de la distribución de los valores espectrales de dos bandas en una gráfica (scatter plot), por ejemplo entre las bandas 4 y 5 (Figura 33) se observa una dispersión significativa de los valores, pero observando la gráfica de la relación de la distribución espectral entre las bandas 5 y 7 (Figura 34) se tiene una distribución muy correlacionada de los componentes de dichas bandas. El análisis de los diagramas de distribución espectral es un criterio para argumentar que las bandas 5 y 7 del infrarojo son las bandas con mejores valores de respuesta espectral de los objetos de la imagen utilizada como se discutió anteriormente mediante el análisis de los histogramas y de las gráficas de respuesta espectral. Por otra parte los compuestos RGB que se utilizaron tomando como base el uso de las bandas en el cañón rojo proporcionó la mejor visualización para la selección de las semillas y los campos de entrenamiento, contribuyendo en la definición de la separación de clases y por lo tanto influyeron en la precisión de la clasificación. En el análisis de la clasificación también se evaluó la matriz de error que relaciona los valores espectrales de las semillas de los campos de entrenamiento con los valores de los píxeles del resto de la imagen. En dicho análisis se utiliza una matriz de error (Congalton y Green, 1993) obtenida con los valores espectrales de las muestras en relación con la respuesta espectral del resto de la imagen (Tabla 5). La matriz de error de la primera clasificación muestra las columnas con los números máximos de píxeles procesados agrupados correctamente dentro de una clase. Dividiendo el número total de píxeles analizados entre el total de píxeles agrupados por clase y multiplicados por cien se tiene el porcentaje de probabilidad de que los píxeles de la imagen fueron correctamente clasificados; la matriz muestra que para las clases 11 y 15 correspondientes a las formaciones Tecomazúchil y Teposcolula respectivamente se han obtenido valores mayores de 80 % de probabilidad de correcta agrupación de píxeles de la imagen en base a la respuesta espectral de las muestras seleccionadas. Así también para las clases 29, 30 y 31 se obtuvieron valores altos de probabilidad correspondiente a la formación Huajuapán y a las unidades de la Grava Camotlán y Arena Xochitlapilco.

Banda 4



Banda 5

Figura 33.- Distribución puntual (scatter plot) de los valores espectrales de los píxeles de las bandas 4 y 5 del compuesto RGB en las bandas 5, 4, 3. Nótese la dispersión de los valores de respuesta espectral de los píxeles en la combinación rojo - infrarrojo que indican diferencias significativas de respuesta espectral.

Banda 5



Banda 7

Figura 34.- Distribución puntual (scatter plot) de los valores espectrales de los píxeles de las bandas 5 y 7 de la imagen en compuesto RGB de las bandas 7, 5, 3. Nótese que el agrupamiento de los valores espectrales indica que los componentes de las regiones del infrarrojo medio están muy correlacionados e indican una similitud de la respuesta espectral.

clase	A	A	A	A	B	B	C	C	D	E	E	F	F	G	G	H
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	573	1028	56	200	0	0	0	0	10	1	6	15	112	0	0	0
2	823	2667	119	62	0	2	0	0	13	38	0	28	87	0	0	2
3	21	46	496	413	19	2	0	0	1	0	0	7	23	1	1	0
4	50	33	145	565	34	1	0	0	9	0	0	8	34	3	1	2
5	0	10	36	55	376	99	31	0	31	8	0	0	0	44	0	7
6	0	24	46	48	747	707	75	0	0	16	0	48	0	16	0	0
7	0	2	0	10	95	52	1079	4	6	59	1	45	0	26	0	8
8	26	2	8	13	0	1	125	306	5	57	6	47	0	0	0	42
9	45	99	49	70	17	7	5	6	484	342	21	65	7	5	0	18
10	13	140	24	71	5	9	25	8	380	1581	3	110	0	0	0	1
11	122	7	0	23	0	0	2	14	112	36	483	0	2	0	0	9
12	14	9	54	46	2	36	20	1	11	32	0	336	3	4	0	1
13	326	431	293	362	0	0	0	0	0	0	0	25	406	4	0	0
14	0	0	1	3	147	9	44	0	7	0	0	0	1	294	13	4
15	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	5	0	77	384	0
16	4	1	5	25	3	0	4	7	9	2	1	1	0	2	0	111
17	1	0	42	18	0	8	0	0	0	0	0	2	0	1	1	24
18	10	0	3	14	0	0	43	30	0	0	0	68	0	0	0	79
19	80	1	7	20	0	0	0	5	0	1	10	2	1	0	0	78
20	0	0	51	18	14	1	0	0	0	0	0	0	0	51	35	0
21	0	0	14	20	99	34	17	0	4	0	0	1	1	109	14	3
22	2	1	53	65	8	2	0	0	0	0	0	11	0	3	2	0
23	0	1	55	44	39	37	4	2	2	0	0	9	0	33	2	6
24	0	2	244	52	35	52	0	0	2	0	0	1	0	1	1	0
25	43	0	1	4	0	0	3	0	0	0	13	0	0	0	0	28
26	6	12	25	84	53	6	11	2	25	6	0	8	2	12	0	12
27	239	203	203	218	1	1	3	4	18	12	2	67	12	0	0	9
28	12	0	21	70	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	162
29	0	0	0	1	0	0	2	2	0	0	0	1	0	0	0	3
30	11	5	1	9	1	0	0	0	0	0	0	31	5	9	18	0
31	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	4	0	0	5	0
32	0	17	74	111	27	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Total	2421	4741	2127	2715	1723	1096	1493	391	1129	2191	546	951	696	695	477	611
%	24	56	23	21	22	65	72	78	43	72	88	35	58	42	81	18
	I	J	J	J	J	K	K	K	K	K	L	L	M	M	N	N
1	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
2	0	0	0	0	0	0	0	0	8	13	55	0	0	0	0	0
3	0	2	0	2	2	27	5	91	0	33	10	1	0	0	0	1
4	0	0	0	1	7	17	4	12	0	34	4	0	1	1	0	2
5	0	0	0	0	26	9	1	32	0	129	1	0	0	0	0	3
6	0	2	0	0	24	9	17	21	0	51	0	0	0	0	0	0
7	0	19	0	0	25	2	2	5	14	43	0	0	0	0	0	0
8	0	95	23	0	0	0	4	0	18	34	11	8	7	0	0	0
9	0	0	2	0	0	1	0	1	6	119	33	10	10	0	0	0
10	0	0	1	0	0	0	0	0	8	29	16	0	0	0	0	0
11	0	1	2	0	0	0	0	0	19	29	2	0	3	0	0	0
12	0	5	1	0	0	0	4	2	1	14	17	2	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	3	3	5	2	10	14	0	0	1	0	0
14	0	0	0	6	33	9	1	6	0	28	0	0	0	1	0	0
15	1	0	0	35	19	5	6	16	0	5	0	0	0	9	0	0
16	2	24	11	0	0	1	13	0	56	163	14	22	0	0	0	0
17	93	8	5	13	4	87	18	67	6	22	0	28	0	0	0	0
18	1	437	21	0	0	2	8	1	35	79	28	22	2	0	0	0
19	6	22	50	0	0	1	1	0	165	124	39	27	3	0	0	0
20	12	0	0	502	38	145	102	152	0	0	0	0	0	1	0	1
21	7	0	0	58	358	49	83	86	0	29	0	0	0	1	0	0
22	8	0	0	8	5	115	2	48	0	10	1	0	0	0	0	1
23	62	4	0	39	104	39	444	184	8	90	5	1	0	0	0	0
24	18	7	0	24	30	87	49	375	0	25	0	2	0	0	0	1
25	0	12	27	0	0	1	2	0	143	41	2	5	1	0	0	0
26	4	0	2	0	0	10	14	8	13	184	23	1	4	0	0	0
27	0	9	6	0	0	1	4	2	29	158	408	34	4	0	0	0
28	59	56	13	0	0	21	4	0	57	118	92	212	0	0	0	0
29	0	3	0	0	0	0	1	0	23	17	0	0	440	0	0	0
30	0	0	0	0	19	2	4	8	0	5	0	0	0	61	5	0
31	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	13	42	0
32	0	0	0	8	0	2	0	7	0	18	0	0	0	0	0	79
Total	273	696	187	696	696	645	796	1129	611	1663	796	375	478	88	47	88
%	34	83	30	72	51	18	56	33	23	11	51	57	92	69	89	90

Tabla 5. Tabla de la matriz de error que resultó de la primera clasificación de 32 clases. Nótese que los pixeles correctamente clasificados dentro de cada grupo se encuentran en una línea diagonal y el último renglón muestra el porcentaje de certidumbre para las unidades clasificadas. A.-Complejo Acatlán; B.- Fm. Tecomazúchil; C.- Fm. Chimeco; D.- Caliza Papalutla; E.- Fm. Teposcolula; F.- Fm. Mapache; G.- Caliza Solano; H.- Conglomerado Tamazulapan; I.- Fm. Huajuapán; J.- Toba Llano de Lobos; K.- Andesita Yucudaac; L.- Andesita San Marcos; M.- Grava Camotlán; N.- Arena Xochitlapilco.

Para la evaluación de la segunda clasificación obtenida se analizó también la matriz de error (Tabla 6); en la tabla se observa que para cada clase de cada renglón en su correspondiente columna existe un número de píxeles que fueron agrupados correctamente como se muestra en los valores remarcados en diagonal. Al final de cada columna también se muestra el porcentaje de certidumbre de cada clase; por ejemplo que la clase 1 de esquisto de la Formación Cosoltepec se obtuvo un 82.7 % de certeza en la clasificación de toda la imagen. La evaluación muestra un promedio de 60% de precisión en donde algunas clases difícilmente sobrepasaron el 50 % y casi la mitad no llegó al 50%. Del análisis de la evaluación de la clasificación se concluye que la segunda imagen clasificada es visualmente adecuada pero estadísticamente no es aceptable debido al bajo valor de precisión. Esto no es un reflejo de la selección de bandas o de los campos de entrenamiento seleccionados, sino que se debe probablemente a factores como la humedad, la vegetación o la roca desprovista de vegetación, que determinan variaciones muy importantes en la respuesta espectral de las unidades litológicas en radios de búsqueda menores de 500 metros. Sin embargo, la clasificación de unidades que tienen un valor cercano o mayor a 80% son buenos ejemplos de separación de clases. Para la tercera clasificación no se obtuvo una matriz de error ya que sólo se buscó comparar el resultado con aquellos obtenidos por el método de máxima verosimilitud. Al analizar el resultado se observó que se tuvo una mejor separación entre las rocas que contienen caliza como aquellas de las formaciones Chimeco y Teposcolula así como aquellos materiales que tienen más humedad como los depósitos en ríos y arroyos y también en cuanto a la definición de los bordes de objetos con sombras y principalmente en cañadas y barrancos lo que realzó por un lado la continuidad de patrones de sombras en rasgos lineales y por otro las zonas con humedad más probables de corresponder con estructuras como fallas y fracturas. Si bien su resultado sólo se utilizó como medio comparativo con respecto a las otras clasificaciones, finalmente se consideró conveniente mostrarla como parte de los resultados.

	A	A	A	B	B	D	E	F	G	G
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7141	28	148	4	1	310	6	3	0	30
2	9	1261	481	1	0	0	0	30	195	965
3	88	173	852	1	0	4	0	38	9	654
4	28	40	9	3192	4	210	0	201	11	98
5	123	4	5	13	634	472	187	0	0	4
6	577	15	7	98	70	7754	40	64	0	10
7	73	0	2	0	189	514	719	0	0	0
8	42	120	116	46	8	121	0	1443	108	713
9	1	745	165	3	0	2	0	109	930	1898
10	4	109	91	2	0	2	0	7	21	1641
11	0	28	17	63	0	0	0	167	125	982
12	2	380	481	1	0	0	0	255	155	1255
13	194	90	152	71	3	359	0	2	18	221
14	196	154	230	12	5	17	0	27	47	707
15	133	20	61	8	32	57	33	0	0	209
16	11	9	31	18	7	19	2	3	5	149
17	0	150	49	0	0	0	0	8	187	1641
18	10	19	38	14	35	17	2	29	4	167
19	3	57	14	77	62	4	25	0	8	113
Total	8635	3402	2949	3624	1050	9862	1014	2386	1823	11457
%	83	37	29	88	60	79	71	60	51	14
Cont.	G	G	H	I	I	I	J	J	K	K
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	total
1	64	1	128	195	487	21	0	2	0	8569
2	269	1543	2	72	17	8	4	0	0	4857
3	178	850	41	130	81	11	0	1	0	3111
4	1191	57	132	98	71	85	0	3	7	5437
5	2	0	51	97	1043	511	4	50	28	3228
6	3	1	344	94	362	307	0	13	0	9759
7	0	0	3	12	519	102	0	1	0	2134
8	1001	1324	19	151	71	95	0	33	0	5411
9	3337	1708	27	169	50	72	96	0	14	9326
10	197	335	10	51	25	70	33	2	1	2601
11	7127	637	24	39	19	61	58	12	0	9359
12	390	3522	7	84	8	17	10	1	0	6568
13	151	98	1334	343	317	167	1	4	2	3527
14	76	305	53	1939	756	486	7	14	9	5040
15	10	13	27	375	3077	856	42	17	1	4971
16	38	13	17	218	1042	928	35	31	0	2576
17	943	201	3	197	447	432	354	36	3	4651
18	152	9	11	956	1592	1557	133	473	35	5253
19	145	21	123	168	382	409	6	131	295	2043
Total	15274	10638	2356	5388	10366	6195	783	824	395	98421
%	47	33	57	36	30	15	45	57	75	

Tabla 6. Matriz de error de la segunda imagen clasificada. Nótese que los pixeles correctamente clasificados dentro de cada grupo se encuentran en una línea diagonal y el último renglón muestra el porcentaje de certidumbre para una unidad bien clasificada. A.-Complejo Acatlán; B.- Fm. Tecomazúchil; C.- Fm. Teposcolula; D.- Caliza Solano; E.- Fm. Huajuapán; F.-Toba Llano de Lobos; G.- Caliza Chimeco; H.- Toba Llano de Lobos; I.- Andesita Yucudaac; J.- Andesita San Marcos; K.- Arena Xochitlapilco.

3.17.- ANÁLISIS GEOLÓGICO EN TRES DIMENSIONES.

El proceso de visualización de una imagen de satélite en una vista en donde es posible percibir volumen y profundidad requiere de un modelo de elevación digital (en inglés digital elevation model ó DEM) en el que cada pixel tiene un valor de altimetría y que puede ser obtenido mediante

restitución fotogramétrica o bien puede ser generado a partir de un modelo digital topográfico (Tudor y Sugarbaker, 1993). Para el análisis geológico en tres dimensiones se utilizó el DEM que distribuye el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 1994). Las imágenes que muestran una perspectiva de tres dimensiones son llamadas vistas y resultan útiles en el análisis geológico para apoyar la interpretación de la estratigrafía y de las estructuras, así como para visualizar el relieve y las geoformas que producen. El modelo DEM se muestra en tonos de gris claro para las partes topográficas altas y en gris oscuro para las partes topográficas bajas (Figura 35). Cuando el DEM se sobrepone con una imagen de satélite se obtienen vistas en perspectiva (Uribe, 1997) que se consideraron en este trabajo como un medio para apoyar indirectamente la interpretación estratigráfica y estructural de la zona.

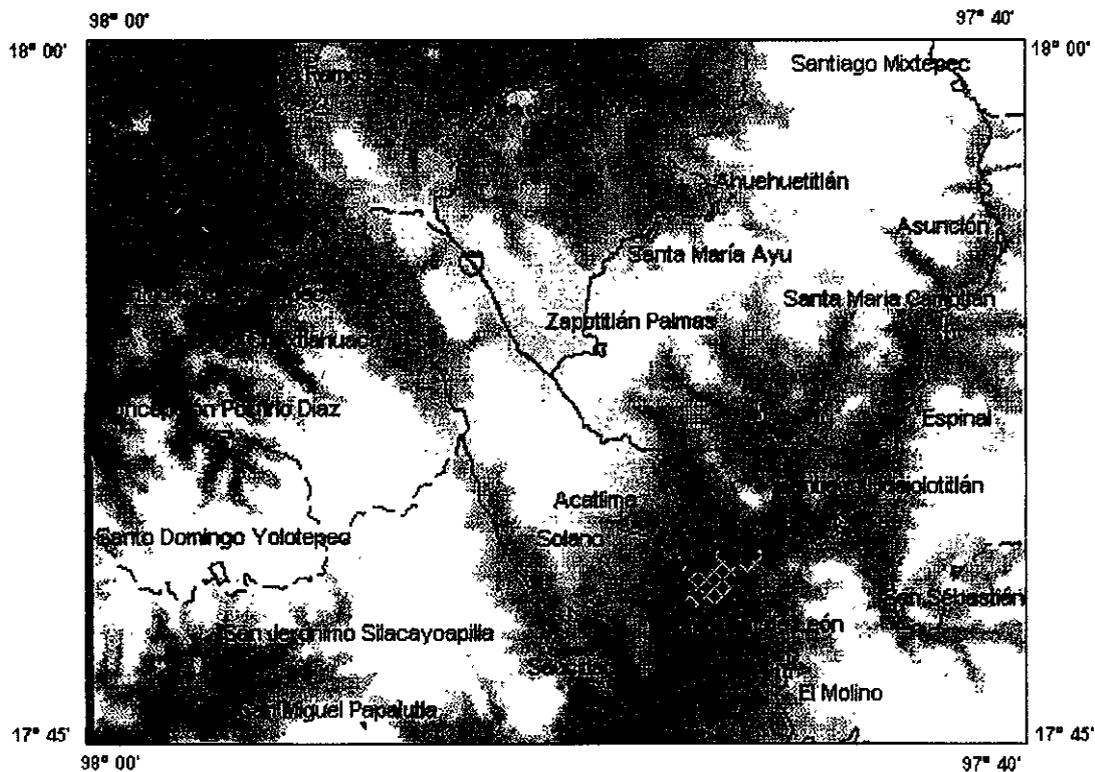


Figura 35.- Modelo digital de elevación DEM de la carta E-14-D-14 escala 1:50,000. Las zonas de tonos gris claro representan las partes topográficas altas y las zonas de tonos oscuros son las partes topográficas bajas. Se presentan superpuestas las vías de comunicación y las poblaciones principales.

3.18.- COMPOSICIÓN DE UNA IMAGEN DE SATÉLITE Y DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.

De la superposición de una imagen de satélite y un modelo DEM se obtuvieron vistas oblicuas para tener una perspectiva del terreno y de las unidades litológicas presentes en el área. En una vista hacia el este (Figura 36) se tiene una perspectiva desde las rocas metamórficas de la Formación Cosoltepec del complejo Acatlán y puede ser analizado el flanco de un pliegue anticlinal

erosionado en una topografía de sierra baja, alargada y de parteaguas continuo en donde afloran las rocas sedimentarias jurásicas y cretácicas. Se observa también que están sobreyacidas por rocas volcánicas cenozoicas. Con esta vista se puede comprobar la posición espacial y estratigráfica de las unidades litoestratigráficas y apoyan la interpretación de la columna estratigráfica elaborada para el área de estudio. En una vista hacia el norte (Figura 37) se puede interpretar a las rocas metamórficas de la Formación Cosoltepec sobreyacidas por las rocas estratificadas y erosionadas de las formaciones Tecamazúchil, Chimeco y Teposcolula claramente inclinadas hacia el noreste, y a su vez sobreyacidas por algunas estructuras volcánicas erosionadas y aisladas de rocas volcánicas cenozoicas como la Andesita Yucudaac. En una vista hacia el oeste (Figura 38) se observa a las rocas de caliza de la Formación Teposcolula inclinadas hacia el noreste sobrepuestas a las rocas de las formaciones Tecamazúchil y Cosoltepec. Este tipo de imágenes por si solas constituyen una alternativa para tener una perspectiva diferente tanto de interpretación de litología como estructuras de la geología de una región y son consideradas en éste trabajo como una forma de visualizar las interpretaciones hechas con sensores remotos.



Figura 36.- Imagen en perspectiva viendo hacia el este. En primer plano se encuentra la formación Cosoltepec (A), del complejo Acatlán. Se observa el contacto con la Formación Tecamazúchil (B) y parte de su estructura anticlinal y buzante hacia el norte (C). Se identifica a la Diorita Chilixtlahuaca (D), parte de la Limolita Chapultepec (E) y a las rocas de las formaciones Chimeco (F) y Teposcolula (G). Al fondo se observa parte de la Formación Huajuapán (H) y las formas volcánicas de la unidades Toba Llano de Lobos (I) y Andesita Yucudaac (J).

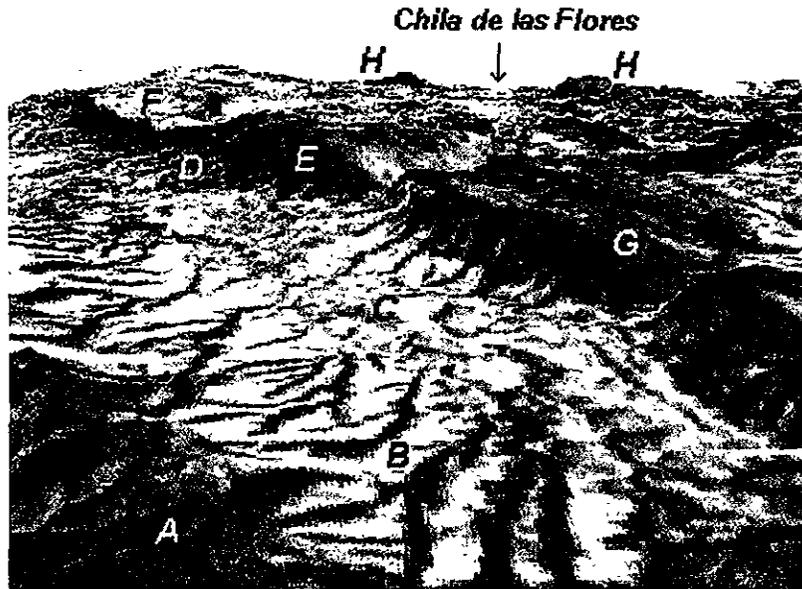


Figura 37.- Imagen en perspectiva norte. Se observa el esquistos de la Formación Cosoltepec (A), y de esquistos – filitas (B) por su tono, textura, densidad de drenaje y relieve. Se observan las rocas de la Formación Tecomazúchil (C). Se identifica a la Limolita Chapultepec (D) y a las rocas de las formaciones Chimeco (E), Mapache (F) y Teposcolula (G) como parte de una estructura monoclinada hacia el noreste. Al fondo se observan las formas volcánicas de la Andesita Yucudaac (H).

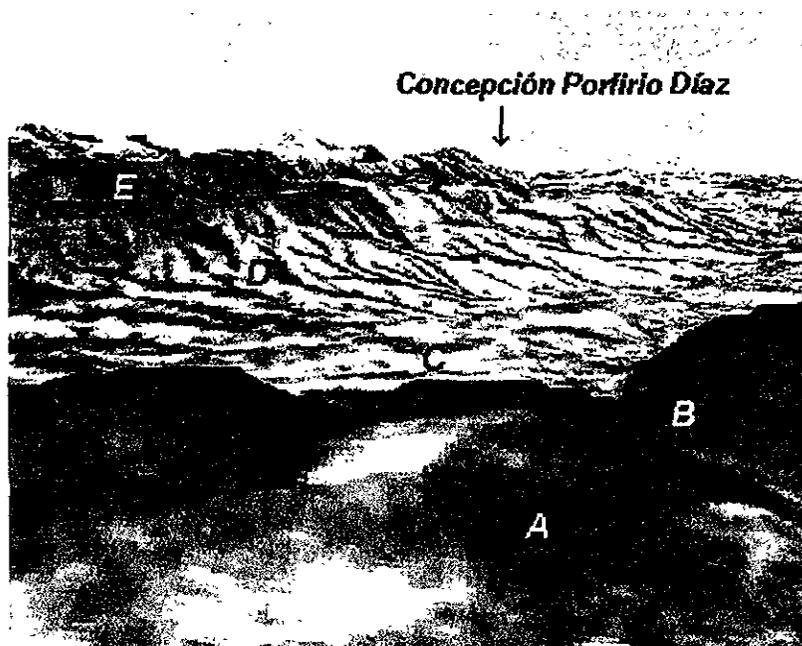


Figura 38.- Imagen en perspectiva viendo hacia oeste. Se observa la roca de caliza de la Formación Teposcolula (A) inclinadas hacia el noreste y erosionadas por drenaje escaso y espaciado como en el cañón El Boquerón (B), que sobreyacen a las rocas de la Formación Tecomazúchil (C). Al fondo se interpreta a las rocas de esquistos – filitas (D) por su forma de lomas bajas de pendiente suave y esquistos (E) con relieve de lomas altas de pendiente fuerte de la Formación Cosoltepec.

CAPITULO 4

4.- SECCIONES GEOLOGICAS Y SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.

El Sistema de Posicionamiento Global, (GPS por sus siglas en inglés: Global Positioning System) es un sistema diseñado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para conocer la posición en la superficie y espacio terrestre y es usado ampliamente en navegación marítima y aérea. Hasta hace dos décadas la determinación de puntos geodésicos sobre la superficie de la Tierra se realizaba mediante una combinación de mediciones de distancias y observaciones astronómicas. Con el sistema GPS iniciado en 1978, se tiene la capacidad de un posicionamiento de alta precisión (Valbuena, et al., 1992; Sinckle, 1996).

4.1.- DESCRIPCIÓN DE LAS SECCIONES GEOLÓGICAS.

Con el propósito de obtener información en campo de la ubicación de puntos de verificación de unidades litológicas con una alta precisión que permitiera integrarlas a un mapa geológico se recurrió al uso de la tecnología GPS (Kennedy, 1996; Sickle, op. cit.). En el trabajo de campo se realizaron secciones geológicas para obtener información sobre las relaciones espaciales y temporales de los cuerpos de roca. Sin embargo el reconocimiento de un estrato o conjunto de estratos no constituyen un criterio sustantivo para la definición de una unidad litoestratigráfica. Incluso el reconocimiento de rocas en afloramientos no es suficiente para tipificar un cuerpo de roca que tridimensionalmente es una unidad jerárquica mayor (Ferrusquía, 1978). Aquí se describen algunas secciones realizadas en campo, con su referencia de coordenadas de puntos de observación. Las secciones descritas a continuación tienen el propósito de documentar parte del trabajo de campo, por ejemplo los rumbos, echados, inclinaciones de foliación y se resumen en una tabla y una sección esquemática de las mismas (Figura 39).

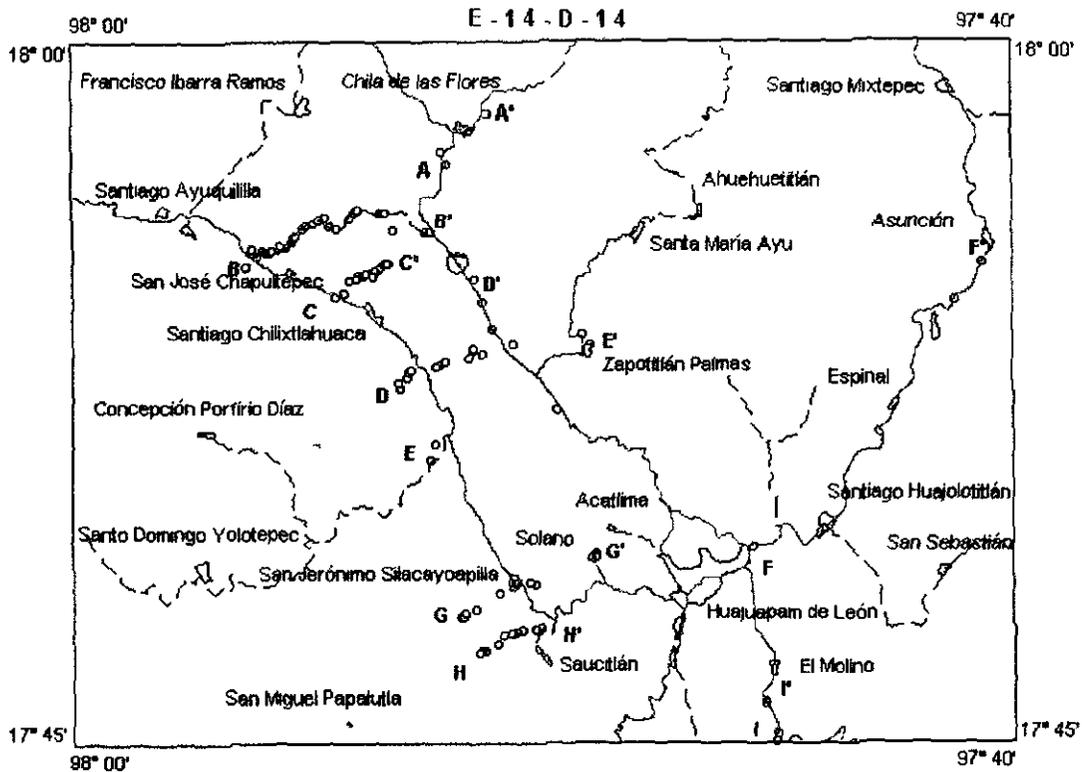


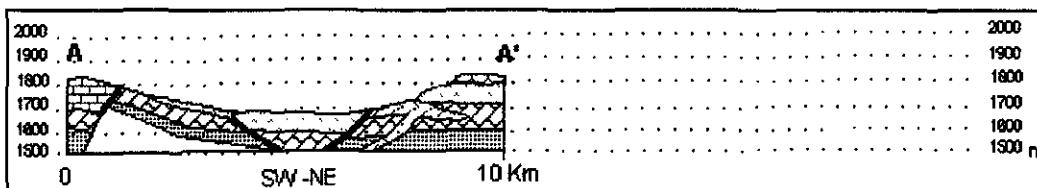
Figura 39.- Mapa de ubicación de secciones geológicas. Nótese que se ubican transversalmente a la distribución de rocas y estructuras paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas del área de estudio.

4.2.- SECCION A-A'.

La sección se localiza en Chila de las Flores, al norte del área de estudio y comprende puntos de verificación de cuerpos aislados de toba andesítica piroconsolidada de color verde claro, muy fracturada, con dos sistemas de fracturas ($N1^{\circ}E, 65^{\circ}$ y $S43^{\circ}E, 76^{\circ}$), correspondientes a la unidad Toba Llano de Lobos (Figura 40). Sobreyacen cuerpos de roca andesítica de textura afanítica, de color verde oscuro con alteración de clorita e intemperismo con fragmentación subconcéntrica como se observó en pequeños afloramientos en Chila de la Flores y en cortes aislados en la carretera 190, al norte de la localidad de Yucunduchi, que corresponden a la unidad Andesita intrusiva Suchixtlahuaca. Su estructura es intrusiva hipabisal, de actitud cortante a la estratificación de rocas sedimentarias. La petrografía muestra una andesita de hiperstena y augita de textura pilotaxítica así como de textura afanítica microporfídica y traquítica, de clínopiroxeno. Así mismo se encuentran sobreyaciendo a rocas sedimentarias como se observa en los cortes de la carretera 190 en Chila de la Flores, en donde se encuentran estratos de caliza gris oscuro de estratos delgados y muy fracturados ($N73^{\circ}E, 53^{\circ}$) que corresponden a la Formación Mapache. La fauna fósil encontrada (Buitrón, 1970) en otras regiones del noroeste de Oaxaca define una edad Kimmeridgiano aunque pudiera extenderse al Tithoniano (Alencaster y Buitrón, 1965). Su estructura es de estratos finos que en su conjunto se acuñan lateralmente. El análisis petrográfico muestra una caliza de textura microespática arcillosa sin microfósiles (Figura 41). La tabla muestra

los datos geocodificados de la sección para su uso dentro de un sistema de información geográfica.

Nº	Longitud	Latitud	coord. X	coord Y	Z	inclin.	Angulo	Roca	Observaciones	Unidad
1	97° 51' 10"	17° 58' 30"	621503 870	1987596 620	1620	sin dato	sin dato	Toba	andesítica, plano de fractura N1°E, 65°	Llano de lobos
2	97° 51' 12"	17° 58' 29"	621445 030	1987567 520	1636	sin dato	sin dato	Toba	andesítica, espesor de 192 metros, fracturas verticales	Llano de lobos
3	97° 13' 07"	17° 59' 01"	620650 000	1986970 000	1699	sin dato	sin dato	Andesita	derrame, intemperismo esférico	Suchitlahuaca
4	97° 52' 02"	17° 57' 28"	619906 090	1985622 070	1850	S42°E	76°	Toba	andesítica, plano de fractura S43°E, 76°	Llano de lobos
5	97° 52' 04"	17° 57' 34"	619925 760	1985967 610	1726	N77°E	53°	Caliza	arcillosa, gns calro, estratos delgados, muy fracturada	Mapache



SIMBOLOGÍA

	Granitoides Esperanza		Conglomerado Tamazulepan
	Formación Cosoltepec		Formación Huajuapán
	Formación Tecomazúchil		Toba Llano de Lobos
	Limolita Chapultepec		Andesita Yucudac
	Formación Chímeco		Andesita San Marcos
	Formación Mapache		Grava Cemotlán
	Caliza Solano		Arena Xochitlapiaco
	Caliza Papalutla		Andesita Suchitlahuaca
	Formación Teposcolula		Diorita Chilitlahuaca

Figura 40. Tabla de geocodificación de datos de la sección A-A', Sección geológica y simbología de los patrones utilizados en la representación de las secciones.

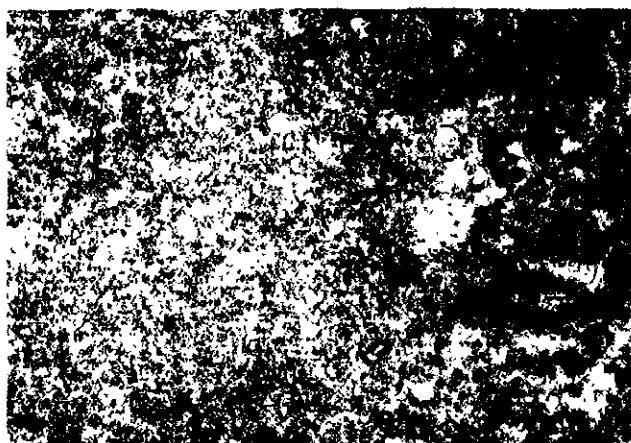


Figura 41. Caliza microespática de la Formación Mapache vista en microscopio petrográfico con luz paralela. Nótese la matriz fina de micrita y arcilla en las partes oscuras.

4.3.- SECCIÓN B-B'.

Esta sección se localiza al norte de San José Chapultepec y llega hasta la localidad de Yucunduchi, en la carretera federal 190 (Figura 42). Comprende estratos delgados de arenisca de color púrpura, sobreyacida por estratos de arenisca de cuarzo y mica, arenisca, lutita, arenisca conglomerática, conglomerado y arenisca limolítica que corresponde a las variaciones de la base a la cima de la Formación Tecamazúchil. La mayor parte de la unidad se constituye de arenisca cuya petrografía es de una arenisca con cuarzo, feldespatos, fragmentos líticos y mica clasificada como arcosa lítica (Figura 43). Se encuentra discordante un conjunto de estratos delgados de limolita de color púrpura (S85°E, 32°), con menor proporción arenisca, conglomerado y en la parte superior toba de lapilli (Figura 44). Sobreyacen estratos delgados de caliza arenosa (N75°E, 40°) que corresponden a la Formación Chimeco y presentan fósiles de pelecípodos, espinas de equinodermo y fragmentos de gasterópodos. En la cañada *El Boquerón Chico* muestra 100 metros de espesor. El análisis petrográfico muestra que los núcleos de las oolitas son de fragmentos de cuarzo metamórfico, mica y plagioclasa (Figura 45). Sobreyacen discordantemente estratos de caliza de textura micrítica con nódulos de sílice, caliza espática con nódulos de dolomita (Figura 46), caliza micrítica fosilífera (Figura 47), caliza laminada, caliza micrítica, conglomerado calcáreo y caliza bioclástica con nódulos de sílice que corresponden a la Formación Teposcolula.

No	Longitud	Latitud	coord. X	coord. Y	Z	Inclin.	Angulo	Roca	Observaciones	Unidad
1	97° 56' 18"	17° 55' 14"	612478.360	1981520.430	1880	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos finos	Tecamazuchi
2	97° 56' 06"	17° 55' 29"	612628.800	1981983.490	1896	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos medios	Tecamazuchi
3	97° 56' 04"	17° 55' 29"	612687.650	1981983.630	1731	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos medios	Tecamazuchi
4	97° 55' 57"	17° 55' 36"	613092.370	1982200.160	1828	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos medios	Tecamazuchi
5	97° 55' 53"	17° 55' 33"	613210.590	1982108.630	1703	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos medios	Tecamazuchi
6	97° 55' 51"	17° 55' 33"	613298.440	1982108.970	1704	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos medios	Tecamazuchi
7	97° 55' 49"	17° 55' 34"	613328.100	1982140.040	1721	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos medios	Tecamazuchi
8	97° 55' 47"	17° 55' 35"	613386.770	1982171.110	1704	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos medios	Tecamazuchi
9	97° 55' 27"	17° 55' 41"	613974.160	1982358.920	1758	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos medios	Tecamazuchi
10	97° 55' 34"	17° 55' 43"	613767.850	1982419.210	1827	sin dato	sin dato	Conglomerado	estratos medios	Tecamazuchi
11	97° 55' 19"	17° 55' 48"	614208.290	1982575.440	1664	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos medios	Tecamazuchi
12	97° 55' 15"	17° 55' 51"	614325.440	1982688.330	1873	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos medios	Tecamazuchi
13	97° 55' 13"	17° 55' 53"	614383.930	1982730.140	1898	sin dato	sin dato	Arenisca	limolítica, color púrpura	Tecamazuchi
14	97° 55' 05"	17° 55' 03"	614617.510	1983038.870	1848	sin dato	sin dato	Arenisca	y conglomerado	Tecamazuchi
15	97° 54' 59"	17° 55' 08"	614793.140	1983193.580	1721	sin dato	sin dato	Arenisca	limolítica, color púrpura	Tecamazuchi
16	97° 54' 51"	17° 55' 11"	615027.970	1983287.180	1715	sin dato	sin dato	Conglomerado	poligoniático	Tecamazuchi
17	97° 54' 43"	17° 55' 15"	615262.620	1983411.480	1765	N68°E	32°	Limolita	color púrpura	Limolita Chapultepec
18	97° 54' 38"	17° 55' 18"	615409.190	1983504.550	1743	S85°E	32°	Limolita	color púrpura	Limolita Chapultepec
19	97° 54' 30"	17° 55' 08"	615848.360	1983198.570	1753	sin dato	sin dato	Arenisca	calcárea	Chimeco
20	97° 54' 22"	17° 55' 03"	615882.630	1983046.270	1798	N75°E	40°	Arenisca	calcárea	Chimeco
21	97° 54' 05"	17° 55' 18"	616380.430	1983448.790	1850	sin dato	sin dato	Toba	lapilli rojo obscuro, concreciones Fe	Llano de lobos
22	97° 54' 01"	17° 55' 23"	616496.840	1983864.640	1901	sin dato	sin dato	Caliza	estratos medios	Teposcolula
23	97° 53' 55"	17° 55' 26"	616672.620	1983757.900	1908	N84°E	15°	Caliza	con nódulos de dolomita	Teposcolula
24	97° 53' 55"	17° 55' 29"	616672.270	1983850.110	1865	sin dato	sin dato	Caliza	estratos medios	Teposcolula
25	97° 53' 29"	17° 55' 23"	617438.300	1983670.230	1890	sin dato	sin dato	Caliza	micrítica bioclástica	Teposcolula
26	97° 53' 22"	17° 55' 23"	617644.240	1983671.480	1930	sin dato	sin dato	Caliza	micrítica laminada	Teposcolula
27	97° 53' 10"	17° 55' 59"	618001.710	1982935.890	1917	sin dato	sin dato	Caliza	micrítica	Teposcolula
28	97° 52' 24"	17° 55' 57"	618355.480	1982882.570	1800	sin dato	sin dato	Conglomerado	calcáreo	Teposcolula
29	97° 52' 23"	17° 55' 57"	618384.900	1982882.750	1898	sin dato	sin dato	Caliza	bioclástica (merneesa)	Teposcolula

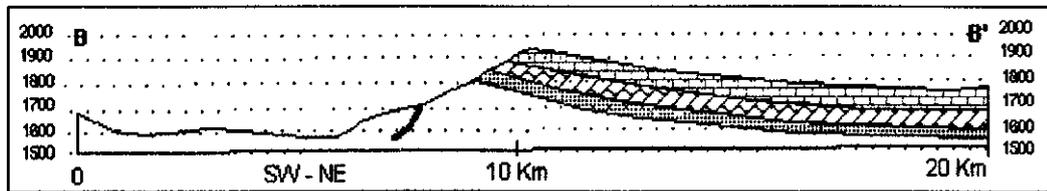


Figura 42. Sección B-B' y tabla de datos de la sección. Para la simbología ver la figura 40.

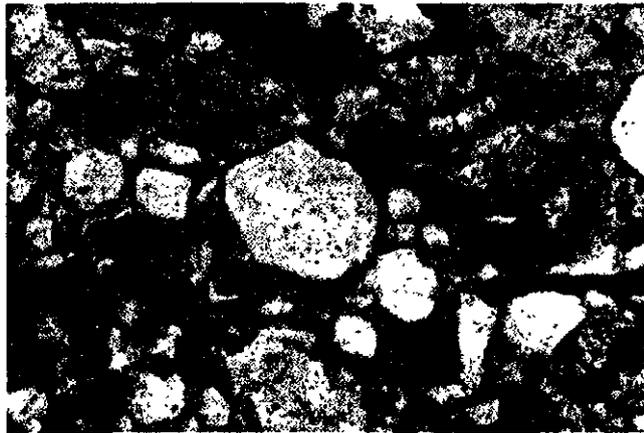


Figura 43. Arenisca arcósica de la Formación Tecamazúchil vista en microscopio petrográfico en luz paralela. Nótese los granos de cuarzo redondos y minerales opacos en una matriz escasa. El grano de cuarzo al centro de la fotomicrografía mide 1 mm de largo.



Figura 44. Contacto discordante entre la unidad Limolita Chapultepec y Formación Chimeco. Nótese en la línea de límite una capa fina de toba andesítica de color verde claro, localidad sobre la terracería que conduce de San José Chapultepec a Yucunduchi.

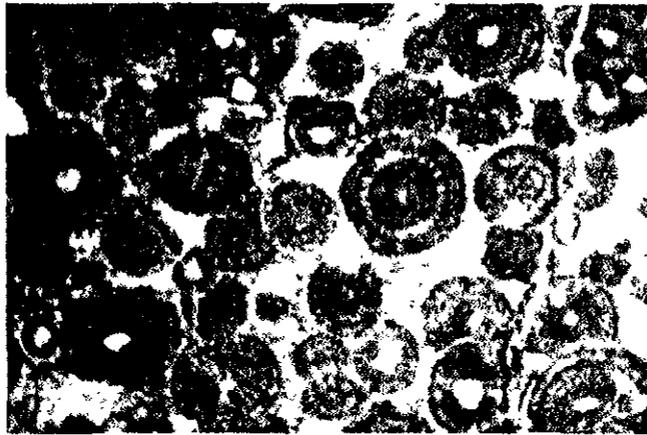


Figura 45. Caliza de la Formación Chimeco vista en microscopio petrográfico en luz paralela. Nótese las oolitas cuyos centros son fragmentos de cuarzo dentro de una matriz micro espática.



Figura 46. Caliza micrítica con nódulos de dolomita de la Formación Teposcolula.



Figura 47. Caliza microespática de la Formación Teposcolula vista en microscopio petrográfico con luz polarizada. Nótese los micro fósiles de *Nummoloculina heimi*.

4.4.- SECCION C-C'.

La sección se encuentra al norte de la localidad de Santiago Chilixtlahuaca y comprende la zona de contacto entre las rocas metamórficas del complejo Acatlán y las rocas sedimentarias detríticas jurásicas de la Formación Tecomazúchil (Figura 48). En la base de esta última se observaron estratos de arenisca conglomerática de color púrpura y verde claro (N56°E, 49°), estratos de conglomerado de grano fino (N55°E, 43° y N65°E, 27°), arenisca de color café rojizo clasificada como grauvaca (Figura 49), estratos gruesos de conglomerado, arenisca conglomerática (Figura 50) con inclinación (N87°E, 36°), arenisca (N82°E, 30°), arenisca conglomerática (N78°E, 27°), arenisca y lutita, (N87°E, 26° y N89°E, 37°), arenisca (N34°E, 16°, N76°E, 25°) y limolita (Figura 51) correspondientes a la formación Tecomazúchil. La base de la secuencia sedimentaria se encuentra intrusionada por un cuerpo de diorita de textura porfírica de fenocristales de plagioclasa y piroxeno alterado por clorita que da a la roca una coloración verde claro que se denomina aquí informalmente Diorita Chilixtlahuaca (Figura 52). La petrografía muestra fenocristales de plagioclasa y hornblenda y minerales accesorios como clorita, biotita, opacos y cuarzo. Sobreyacen estratos delgados de caliza arenosa de color verde claro (N47°E, 45°, N55°, 23°, N61°E, 30°), que contienen gran cantidad de fósiles de espinas de equinodermo que corresponde a la Formación Chimeco (Figura 53). Sobreyacen estratos delgados y gruesos de caliza de color gris claro con nódulos de sílice (N76°E, 38° Y N81°E, 19°), correspondientes con la Formación Teposcolula. El análisis de la petrografía muestra una asociación de microfauna como *Nummuloculina heimi* y *Dicyclina schlumbergeri* (Bonet, 1956) que sugiere la edad Cenomaniano (Figura 54) para las rocas de caliza.

No	Longitud	Latitud	coord. X	coord. Y	Z	Inclin	Angulo	Roca	Observaciones	Unidad
1	97° 50' 13"	17° 47' 55"	623302.030	1968009.160	1708	N55°E	49°	Arenisca	color verde, con conglomerado	Tecomasuchi
2	97° 50' 13"	17° 47' 56"	623301.840	1968121.900	1704	N55°E	43°	Conglomerado		Tecomasuchi
3	97° 50' 08"	17° 47' 57"	623448.870	1968153.550	1749	N65°E	27°	Conglomerado		Tecomasuchi
4	97° 54' 18"	17° 54' 41"	615342.490	1979815.690	1751	sin dato	sin dato	Arenisca	de color café rojizo, de grano fino	Tecomasuchi
5	97° 54' 14"	17° 54' 44"	615254.930	1979692.220	1725	sin dato	sin dato	Diorita	porfírica de color verde claro	Diorita Chilixtlahuaca
6	97° 54' 05"	17° 54' 56"	616394.940	1960969.880	1702	sin dato	sin dato	Conglomerado	conglomerática	Tecomasuchi
7	97° 53' 56"	17° 55' 01"	616658.860	1981145.130	1790	N87°E	36°	Arenisca	conglomerática	Tecomasuchi
8	97° 53' 56"	17° 55' 02"	616658.670	1981175.860	1672	N82°E	30°	Arenisca		Tecomasuchi
9	97° 53' 47"	17° 55' 03"	616923.310	1981208.170	1800	N78°E	27°	Arenisca	de color verde	Tecomasuchi
10	97° 53' 45"	17° 55' 05"	616981.790	1981269.990	1670	N87°E	26°	Arenisca	en contacto con lutita	Tecomasuchi
11	97° 53' 36"	17° 55' 06"	617246.060	1981363.770	1716	N34°E	16°	Arenisca	de grano fino	Tecomasuchi
12	97° 53' 33"	17° 55' 09"	617334.150	1981395.030	1670	N47°E	45°	Arenisca	calcareas de color verde claro	Chimeco
13	97° 53' 30"	17° 55' 10"	617422.240	1981426.290	1752	N55°E	23°	Arenisca	calcareas de grano fino	Chimeco
14	97° 53' 26"	17° 55' 14"	617539.200	1981549.940	1870	N61°E	30°	Arenisca	calcareas de color amarillo verdoso	Chimeco
15	97° 53' 21"	17° 55' 19"	617885.400	1981704.500	1690	sin dato	sin dato	Arenisca	calcareas, espinas de equinodermo fósil	Chimeco
16	97° 53' 17"	17° 55' 19"	617803.100	1981705.200	1910	N76°E	38°	Caliza	textura micítica, gris claro, nódulos de sílice	Teposcolula
17	97° 53' 19"	17° 55' 19"	617744.250	1981704.850	1950	N81°E	19°	Caliza	de textura micítica	Teposcolula
18	97° 53' 33"	17° 55' 09"	617334.150	1981395.030	1900	sin dato	sin dato	Limolita	físil color púrpura y verde claro	Limolita Chapultepec
19	97° 53' 35"	17° 55' 03"	617276.400	1981210.260	1834	sin dato	sin dato	Conglomerado	fragmentos de cuarzo	Tecomasuchi
20	97° 56' 13"	17° 55' 34"	612621.970	1982135.990	1685	N89°E	37°	Lutita	arenosa	Tecomasuchi
21	97° 56' 10"	17° 55' 38"	612709.530	1982258.440	1653	N76°E	25°	Arenisca	contacto con conglomerado poligométrico	Tecomasuchi

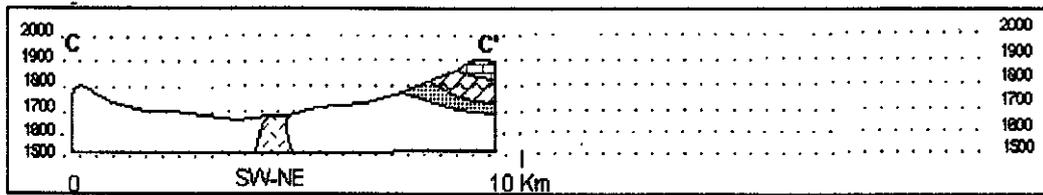


Figura 48. Sección C-C' y geocodificación de datos. Para la simbología ver la figura 40.

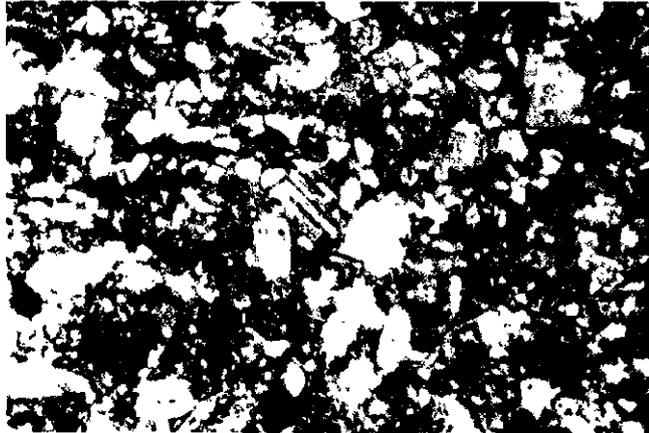


Figura 49. Arenisca grauvaca de la Formación Tecomazúchil ($17^{\circ} 55' 03''N$, $97^{\circ} 53' 47''W$) vista en microscopio petrográfico en luz polarizada. Nótese al centro granos de plagioclasa así como granos de micas, cuarzo y minerales opacos en una matriz fina de cuarzo.



Figura 50. Conglomerado poligmítico de la parte inferior de la Formación Tecomazúchil. Nótese los fragmentos gruesos y redondos sin clasificación. Localidad de Santiago Chilixtlahuaca.

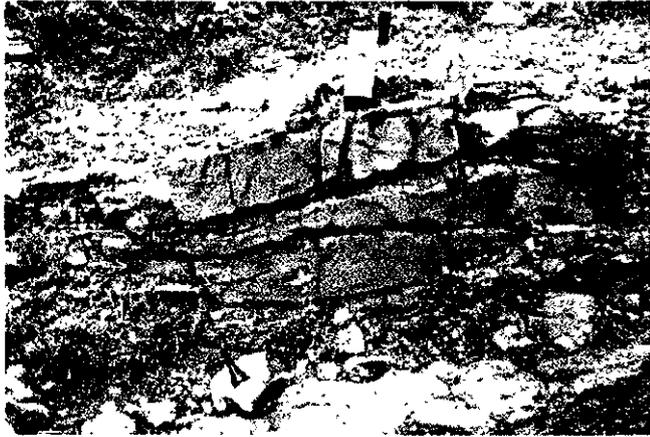


Figura 51. Arenisca – lutita que sobreyace a Conglomerado poligmítico de la parte inferior de la Formación Tecomazúchil. Nótese los estratos delgados y finos.



Figura 52. Diorita Chilixtlahuaca vista en microscopio petrográfico con nicoles cruzados. Nótese los Fenocristales de plagioclasa dentro de una matriz fina de plagioclasa y piroxenos. El cristal de plagioclasa de la fotomicrografía mide 5 mm de largo.



Figura 53. Caliza arenosa de la Formación Chimeco, Localidad al poniente de Santiago Chilixtlahuaca. Nótese los estratos delgados e inclinados, en este caso al noreste.

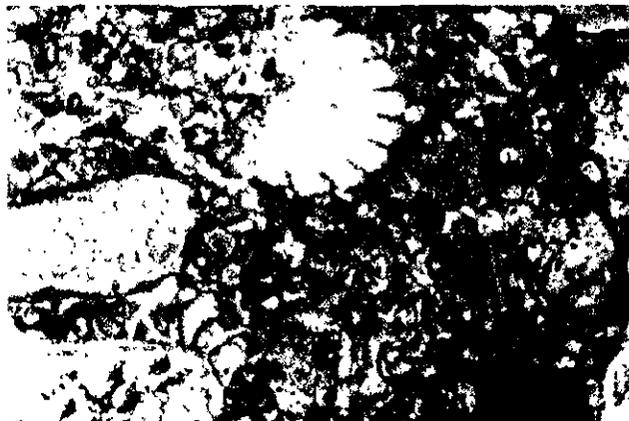


Figura 54. Caliza de la Formación Teposcolula vista en microscopio petrográfico con nicoles cruzados. Nótese los micro fósiles de *Nummuloculina heimi* y probable materia orgánica en las partes negras.

4.5.- SECCIÓN D-D'.

Esta sección se localiza al sur de Santiago Chilixtlahuaca, en el cañón *El Boquerón* (Figura 55) y en una pequeña parte sobre la carretera 190, en la zona de contacto entre las rocas paleozoicas del complejo Acatlán y las rocas sedimentarias mesozoicas del norte de Huajuapán de León. La Formación Cosoltepec está constituida de esquisto pelítico con lentes de cuarzo de foliación bien marcada (N81°W, 20°) está sobreyacido por arenisca conglomerática (N38°E, 30°) y arenisca de grano fino en estratos delgados (N78°E, 20°) de la Formación Tecomazúchil (Figura 56). Sobreyacen discordantes estratos de limolita de color púrpura de la Limolita Chapultepec (N41°E, 30°). La zona de contacto entre las formaciones Cosoltepec y Tecomazúchil está afectada por un cuerpo intrusivo de composición diorítica. Sobreyacen discordantemente estratos de caliza de textura micrítica, de color gris claro; los estratos de la parte inferior son delgados (N74°, 30°), presentan pliegues y tienen una textura micrítica según se observó en la zona de contacto con los estratos de limolita, en el arroyo *El Boquerón*. La parte media y superior (N88°E, 20°, N40°E, 30°) es también de textura micrítica y tiene importantes elementos fósiles, de los cuales pueden observarse fragmentos de nerineas, pelecípodos y algunos conodontos bien formados como en los afloramientos observados a lo largo de la carretera 190. Los estratos son delgados y gruesos, tienen direcciones de rumbo de echado hacia el noreste, con inclinaciones que varían de 15 a 70 grados. El espesor medido con báculo y brújula, en la sección de San Jerónimo Silacayoapilla a Zapotitlán Palmas es de 100 metros, pudiéndose extender por más de 200 metros. La siguiente tabla muestra los datos geocodificados de esta sección.

No.	Longitud	Latitud	coord X	coord Y	Z	Inclin	Angulo	Roca	Observaciones	Unidad
1	97° 53' 01"	17° 52' 41"	618302 960	1976851 660	1774	N81°W	sin dato	Esquisto	cuarzo feldespático	Acahán
2	97° 53' 02"	17° 52' 42"	618273 350	1976882 220	1755	sin dato	sin dato	Diorita	intrusivo	Chilixtlahuaca
3	97° 52' 53"	17° 52' 50"	618536 750	1977129 890	1711	sin dato	sin dato	Diorita	intrusivo	Chilixtlahuaca
4	97° 52' 51"	17° 52' 57"	618594 320	1977345 200	1771	sin dato	sin dato	Andesita	dique	Suchistlahuaca
5	97° 52' 49"	17° 52' 59"	618652 810	1977407 030	1736	N38°E	30°	Arenisca	conglomerática	Tecomazuchil
6	97° 52' 20"	17° 53' 06"	619504 980	1977627 320	1598	sin dato	sin dato	Arenisca	estratos delgados	Tecomazuchil
7	97° 52' 17"	17° 53' 05"	619593 460	1977597 120	1603	N78°E	20°	Arenisca	grano fino	Tecomazuchil
8	97° 52' 17"	17° 53' 04"	619593 640	1977566 390	1603	N41°E	30°	Limolita	estratos delgados	Chapultepec
9	97° 52' 15"	17° 53' 57"	620900 110	1977800 210	1806	N47°E	30°	Caliza	estratos delgados	Teposcolula
10	97° 51' 25"	17° 53' 19"	619355 420	1978026 010	1606	sin dato	sin dato	Caliza	estratos delgados	Teposcolula
11	97° 51' 25"	17° 53' 20"	619355 230	1978056 750	1615	N88°E	20°	Caliza	micrítica fosilífera	Teposcolula
12	97° 51' 17"	17° 53' 19"	621356 600	1978038 200	1615	N40°E	30°	Caliza	limolítica	Teposcolula
13	97° 50' 40"	17° 53' 34"	622442 630	1978505 970	1615	sin dato	sin dato	Caliza	micrítica fosilífera	Teposcolula
14	97° 51' 18"	17° 54' 26"	621314 530	1980097 380	1888	sin dato	sin dato	Caliza	estratos delgados	Teposcolula
15	97° 51' 05"	17° 53' 53"	621703 320	1979085 420	1855	sin dato	sin dato	Caliza	laminaciones	Teposcolula
16	97° 51' 27"	17° 54' 57"	621043 850	1981048 590	1900	sin dato	sin dato	Caliza	bioclástica, nódulos de sílice	Teposcolula

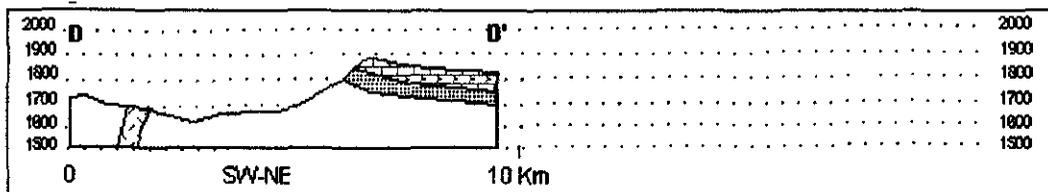


Figura 55. Sección geológica D-D' y geocodificación de datos. Para la simbología ver la figura 40.

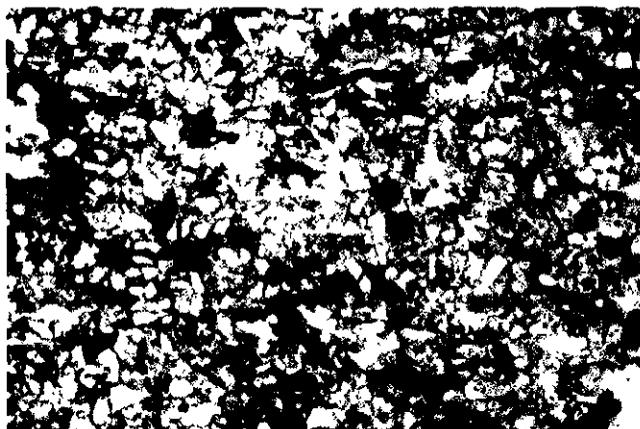


Figura 56. Arenisca arcósica de la Formación Tecomazúchil vista en microscopio petrográfico con luz paralela. Nótese los granos de cuarzo redondos, minerales opacos en una matriz escasa.

4.6.- SECCIÓN E-E'.

Esta sección se ubica al norte de San Jerónimo Silacayoapilla y va desde la terracería que lleva a Santo Domingo Yolotepec hasta Zapotitlán Palmas (Figura 57). Comprende puntos de verificación del contacto entre las rocas metamórficas paleozoicas de la Formación Cosoltepec y las rocas sedimentarias detríticas de la Formación Tecomazúchil (Figura 58); las rocas metamórficas son

esquistos de cuarzo y mica con foliación bien definida (N12°E, 3°) y las rocas sedimentarias son estratos delgados de arenisca (N43°E, 3°). Sobreyacen discordantemente rocas de caliza de la Formación Teposcolula las que a su vez están sobreyacidas por arenas, grava, toba, arenisca y yeso de la Formación Huajuapán (Figura 59). Sobreyacen a estas dos últimas cuerpos de toba andesítica pseudoestratificada de la unidad Toba Llano de Lobos, en Zapotitlán Palmas.

No	Longitud	Latitud	coord X	coord Y	Z	Inclin	Angulo	Roca	Observaciones	Unidad
1	97° 52' 24"	17° 51' 05"	619409 700	1973907 500	1813	N12°E	3°	Esquisto	con foliacion	Cosoltepec
2	97° 52' 18"	17° 51' 07"	619585 940	1973970 040	1812	N43°E	33°	Arenisca	de mica y feldespato	Tecomazúchil
3	97° 49' 13"	17° 51' 37"	625025 670	1974925 770	1744	sin dato	sin dato	Arena, grava, yeso, toba	fragmento de cuarzo y caliza	Huajuapán
4	97° 49' 11"	17° 53' 48"	625059 480	1978891 210	1988	sin dato	sin dato	Toba	lapilli	Llano de lobos

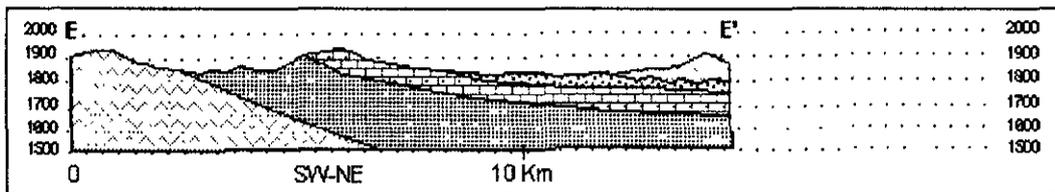


Figura 57. Sección E-E' y geocodificación de datos. Para la simbología ver la figura 40.



Figura 58. Contacto entre esquisto de la Formación Cosoltepec (derecha) y arenisca de la Formación Tecomazúchil (izquierda), en la terracería que conduce de San Jerónimo Silacayoapilla a Santo Domingo Yolotepec (sección E-E').



Figura 59. Arena, conglomerado, arenisca, yeso, de la Formación Huajuapán. Carretera 190 al norte de Huajuapán de León.

4.7.- SECCION F-F'

La sección se localiza al norte de Santa María Camotlán, en donde están expuestos pseudoestratos de toba andesítica no consolidada de color verde claro y café claro. Presenta plagioclasa y augita como minerales esenciales y alterna con toba lítica piroconsolidada de la misma composición, de color rojo oscuro y andesita vesicular, con amígdalas de cuarzo y sulfato de cobre (Figuras 60 y 61). Hacia el sur, en Santiago Huajolotitlán, se presenta una alternancia de rocas piroconsolidadas y no piroconsolidadas con cinco pseudoestratos de toba lítica piroconsolidada, de espesores de 20 metros alternados entre seis pseudoestratos de toba de lapilli no piroconsolidada, con espesores de 40 metros. Su actitud estructural casi horizontal (Figura 62) con inclinación de (N6°E), permite calcular con base en un mapa topográfico, un espesor total de casi 500 metros.

No.	Longitud	Latitud	coord. X	coord. Y	Z	Inclin.	Angulo	Roca	Observaciones	Unidad
1	97° 49' 11"	17° 53' 46"	625059 460	1978891 210	1988	sin dato	sin dato	Toba	lapilli	Llano de lobos
2	97° 40' 38"	17° 55' 19"	640136 220	1981851 240	1929	sin dato	sin dato	Andesita	derrame y dique	Yucudaac
3	97° 41' 14"	17° 54' 31"	639087 310	1980368 300	1784	sin dato	sin dato	Toba	lítica piroconsolidada en capa masiva	Llano de lobos
4	97° 42' 51"	17° 51' 39"	638289 300	1975061 460	1700	sin dato	sin dato	Toba	lapilli sin piroconsolidación	Llano de lobos
5	97° 45' 32"	17° 49' 14"	631559 870	1970572 480	1605	sin dato	sin dato	Toba	andesítica	Llano de lobos

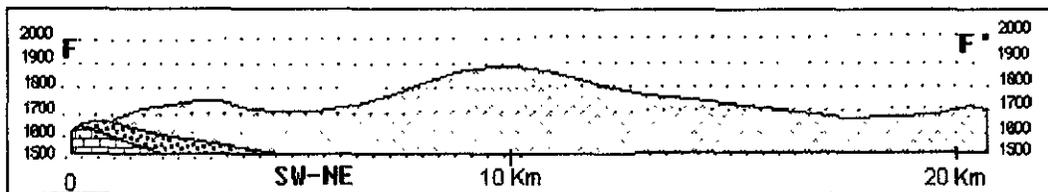


Figura 60. Sección F-F' y geocodificación de datos. Para la simbología ver la figura 40.



Figura 61. Toba lítica andesítica de la Toba Llano de Lobos. Seudoestratos de toba piroconsolidada y toba sin piroconsolidar, en Huajuapán de León.



Figura 62. Toba andesítica pobremente piroconsolidada de la unidad Toba Llano de Lobos, al norte de Zapotitlán Palmas. Nótese la ligera inclinación que tienen hacia el este, así como la coloración de los seudoestratos.

4.8.- SECCION G-G'.

La sección se localiza al sur de San Jerónimo Silacayoapilla, 8 Km al poniente de Huajuapán de León (Figura 63). Comprende puntos de verificación de roca de esquisto de mica y cuarzo (Figura 64) y filita negra de superficie sedosa (N10°E, 20°, N55°E, 31°) y sobreyacen rocas de meta andesita (Figura 65) de foliación incipiente (N82°E, 20°) correspondientes con la Formación Cosoltepec (Figura 66). Sobreyacen discordantes estratos de conglomerado oligomíctico (Figura 67) de fragmentos de cuarzo blanco lechoso de origen metamórfico (N71°E, 45°), estratos de arenisca conglomerática y lutita (N30°E, 50°), y arenisca (S24°E, 52°), correspondientes a la Formación Tecomazúchil. Hacia en noreste, al sur de las localidades Rancho Jesús, Solano y Acatlima, 4 Km al poniente de Huajuapán, se reconocieron estratos de caliza negra (Figura 68) de textura micrítica (N41°E, 48°), muy fracturada (N40°E, 37°) con la característica significativa de su fuerte olor fétido al golpe de martillo y que corresponde con la Caliza Solano (Figura 69) del Tithoniano (López, 1985; Morán, et al., 1993). Su petrografía muestra textura micrítica y espática.

Sobreyace discordantemente estratos gruesos de 10 a 15 metros de espesor de conglomerado poligmítico (Figura 70) de fragmentos de caliza y esquisto (Mosquera y Meléndez, 1984) y corresponden al Conglomerado Tamazulapan. La composición poligmítica constituye una variación local que además contiene fragmentos derivados de rocas ígneas del Paleógeno no reportados en otros trabajos lo que constituye una variación importante de la composición litológica de unidad.

No.	Longitud	Latitud	coord. X	coord. Y	Z	Inclin	Angulo	Roca	Observaciones	Unidad
1	97° 51' 22"	17° 47' 15"	621277 890	1968849 200	1826	N10°E	20°	Filita	lentes de cuarzo	Cosoltepec
2	97° 51' 19"	17° 47' 17"	621365 850	1968911 210	1895	sin dato	sin dato	Filita		Cosoltepec
3	97° 51' 17"	17° 47' 21"	621423 990	1967034 520	1947	N55°E	31°	Filita		Cosoltepec
4	97° 51' 04"	17° 47' 25"	621806 030	1967159 800	1886	N82°E	20°	Meta andesta		Cosoltepec
5	97° 50' 02"	17° 47' 33"	623630 120	1967416 970	1866	N71°E	45°	Conglomerado	frag. Finos de gravas de cuarzo	Tecomazuchil
6	97° 49' 47"	17° 47' 56"	624067 390	1968126 860	1720	sin dato	sin dato	Arenisca	coglomeratica	Tecomazuchil
7	97° 49' 47"	17° 47' 58"	624067 010	1968188 130	1741	N30°E	50°	Lutita		Tecomazuchil
8	97° 49' 54"	17° 47' 59"	623860 710	1968217 590	1882	S24°E	52°	Arenisca	En contacto con lutita	Tecomazuchil
9	97° 48' 09"	17° 48' 40"	626944 290	1969497 310	1718	N41°E	48°	Caliza	de color negro, laminada, muy fracturada	Caliza Solano
10	97° 48' 08"	17° 48' 38"	626974 130	1969496 030	1773	N40°E	37°	Caliza	de color negro, laminada, muy fracturada	Caliza Solano
11	97° 48' 08"	17° 48' 36"	626974 520	1969374 550	1780	sin dato	sin dato	Conglomerado	gris claro, frag. de caliza, cuarzo, andesta	Tamazulapan

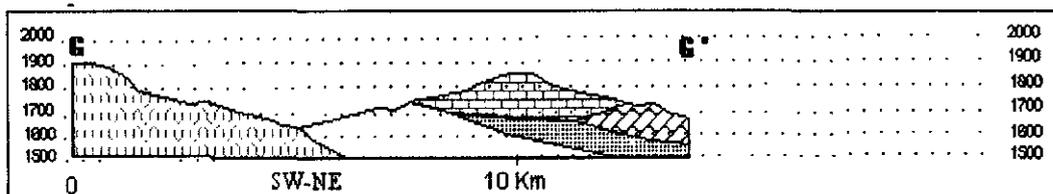


Figura 63. Sección geológica G-G' y geocodificación de datos. Para la simbología ver la figura 40.

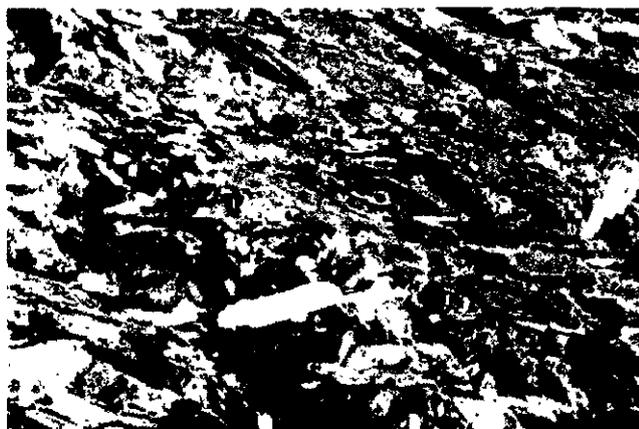


Figura 64. Esquisto de la Formación Cosoltepec visto al microscopio petrográfico con nicoles cruzados. Nótese los cristales de mica y cuarzo orientados paralelamente.



Figura 65. Metandesita de la Formación Cosoltepec. Nótese la foliación incipiente y el fracturamiento casi perpendicular. Localidad al sureste de San Jerónimo Silacayoapilla.

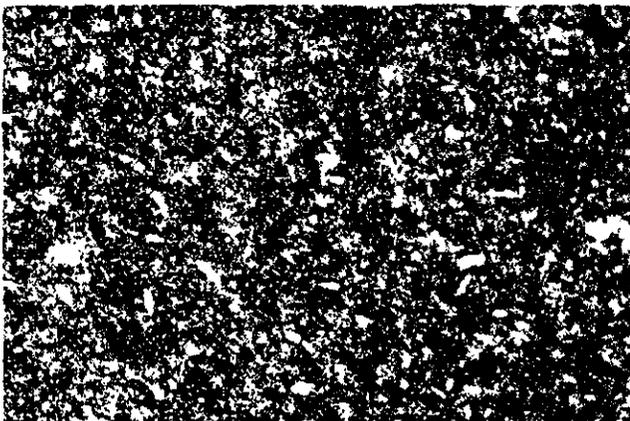


Figura 66. Metandesita de la Formación Cosoltepec vista en microscopio petrográfico con luz paralela. Nótese los cristales muy pequeños de plagioclasa y ferromagnesianos en una matriz afanítica. Localidad al sureste de San Jerónimo Silacayoapilla.



Figura 67. Conglomerado de la Formación Tecamazúchil. Nótese los fragmentos de cuarzo blanco y la estratificación gruesa e inclinada. Localidad de Saucitlán de Morelos, al poniente de Huajuapán de León.



Figura 68. Caliza negra micrítica de la unidad Caliza Solano, Nótese el intenso fracturamiento de la roca perpendicularmente a los planos de estratificación, con rellenos de calcita. Localidad Rancho Solano, al poniente de Huajuapán de León.

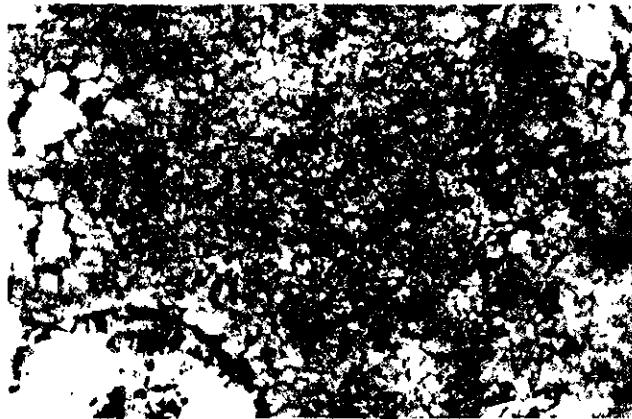


Figura 69. Caliza micrítica de la unidad Caliza Solano vista en microscopio petrográfico en luz paralela. Nótese la micrita y la materia orgánica que se observa en las partes negras.



Figura 70. Conglomerado poligmítico del Conglomerado Tamazulapan. Los fragmentos son de caliza, cuarzo y andesita. Localidad de Rancho Solano, al poniente de Huajuapán de León.

4.9.- SECCION H-H'.

La sección se ubica al norte de Saucitlán de Morelos, al sur del área, y comprende a las rocas metamórficas del complejo Acatlán, rocas sedimentarias de la Formación Tecomazúchil y a rocas sedimentarias del Jurásico Superior (Figura 71). En la barranca *Granadas*, 2 Km al poniente de Saucitlán, se encuentran rocas de esquisto de textura blasto porfídica o augen esquisto. Sobreyacen rocas de filita, con lentes de cuarzo, hornblendita y serpentinita, esquisto pelítico (S85°E, 32°), filita negra de superficie micacea y sedosa (N76°E, 38°), esquisto pelítico (N34°E, 17°), filita (N40°E, 28°) y esquisto samítico (N70°E, 36° y N15°E, 26°) correspondientes a la Formación Cosoltepec (Figura 72, 73 y 74). Sobreyacen discordantemente rocas sedimentarias detríticas de arenisca y conglomerado en estratos delgados, con fragmentos de cuarzo (N66°W, 14°), arenisca de grano fino (N69°E, 40°), arenisca conglomerática (S83°E, 49°) y conglomerado de grano grueso de cuarzo metamórfico correspondientes a la Formación Tecomazúchil.

No	Longitud	Latitud	coord. X	coord. Y	Z	Inclin.	Angulo	Roca	Observaciones	Unidad
1	97° 50' 7"	17° 47' 32"	623483 090	1967385.320	1880	S83°E	49°	Arenisca	grano fino, frag. cuarzo metamórfico	Tecomazuchil
2	97° 50' 16"	17° 47' 31"	623218 270	1967352 930	1497	N69°E	40°	Arenisca	grano fino, frag. cuarzo metamórfico	Tecomazuchil
3	97° 50' 34"	17° 47' 30"	622888 450	1967318 920	1832	N66°W	14°	Conglomerado	grano fino, frag. cuarzo metamórfico	Tecomazuchil
4	97° 50' 38"	17° 47' 30"	622570 870	1967318 190	1850	N15°E	26°	Esquisto	Pelítico	Cosoltepec
5	97° 50' 45"	17° 47' 31"	622384 360	1967347.660	1892	N70°E	36°	Esquisto	Pelítico	Cosoltepec
6	97° 50' 54"	17° 47' 24"	622100 870	1967130.870	1967	N40°E	28°	Filita	micacea	Cosoltepec
7	97° 50' 59"	17° 47' 21"	621954 010	1967037 760	1970	N34°E	17°	Esquisto	Pelítico	Cosoltepec
8	97° 51' 4"	17° 47' 9"	621809.040	1966668 020	1980	N78°E	38°	Filita	color negro, sup. Brillante y sedosa	Cosoltepec
9	97° 51' 21"	17° 47' 8"	621309 020	1966572 750	2015	S85°E	32°	Esquisto	Pelítico	Cosoltepec
10	97° 51' 29"	17° 47' 7"	621073 260	1966602.050	2040	sin dato	sin dato	Filita	lentes de serpentinita	Cosoltepec
11	97° 51' 31"	17° 47' 9"	621014 000	1966683 170	2044	sin dato	sin dato	Filita	lentes de cuarzo	Cosoltepec

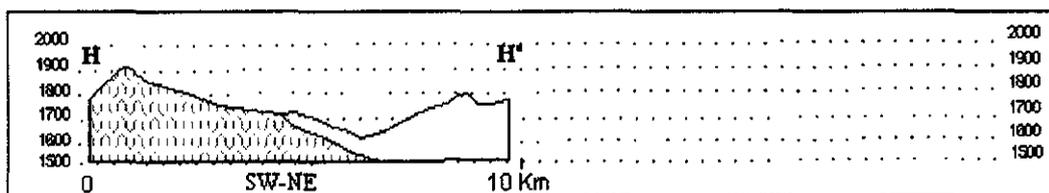


Figura 71. Sección geológica H-H' y geocodificación de datos. Para la simbología ver la figura 40.

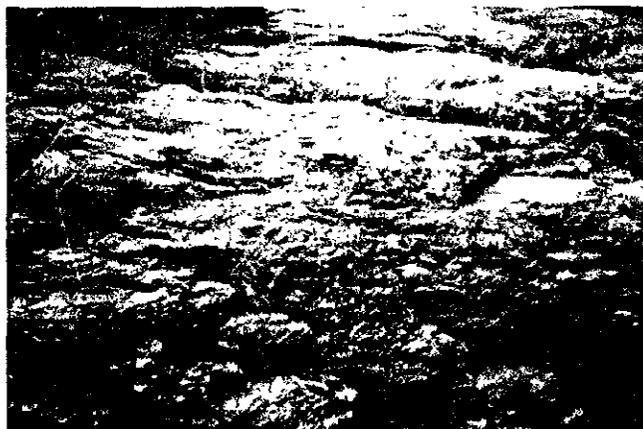


Figura 72. Esquisto samítico de la Formación Cosoltepec. Nótese fragmentos de cuarzo de bordes redondos y orientados paralelamente en dirección de la foliación.



Figura 73. Esquisto pelítico de la Formación Cosoltepec. Nótese la foliación bien definida y fracturas perpendiculares a la misma.



Figura 74. Esquisto de hornblenda de la Formación Cosoltepec visto en microscopio petrográfico en luz paralela. Nótese al centro cristales de hornblenda y micas, cuarzo y minerales opacos.

4.10.- SECCION I - I'

La sección 9 se localiza 5 Km al sureste de Huajuapán, sobre la carretera 190 que conduce a Tezoatlán (Figura 75). Comprende rocas volcánicas piroclásticas sin piroconsolidar (Figura 76), en pseudoestratos gruesos, de color verde claro, café claro y verde oscuro correspondientes a la unidad Toba Llano de Lobos. Se constituye de pseudo estratos de toba andesítica (N80°E, 17° y N74°E, 12°) que contienen fragmentos de cuarzo metamórfico, blanco y lechoso, fragmentos de esquisto y de caliza gris micrítica (Figura 77) que sugiere la presencia de estas rocas como parte de las paredes de conductos o chimeneas volcánicas (Figura 78). Localmente se encuentra afectadas por fallas normales de planos bien definidos (N45°E, 65°) y se encuentran sobreyacidas por roca andesítica de color rojo oscuro, de textura afanítica (Figura 79), vesicular y en parte amigdaloides con rellenos de cuarzo y carbonato de calcio de la unidad Andesita San Marcos.

Nº	Longitud	Latitud	coord. X	coord. Y	Z	Inclin.	Angulo	Roca	Observaciones	Unidad
1	97° 45' 18"	17° 45' 55"	632012 660	1964458 490	1698	N80°E	17°	Toba	lapilli andesítica, verde claro	Cerro verde
2	97° 45' 17"	17° 45' 53"	632042 520	1964387 210	1740	sin dato	sin dato	Toba	lapilli andesítica, frag. cuarzo metamórfico, esquisto	Cerro verde
3	97° 45' 02"	17° 45' 14"	632482 250	1963201 390	1745	NE45°	65°	Andesita	roj obscuro, vesicular, amigdaloides	San Marcos
4	97° 45' 04"	17° 44' 53"	632437 640	1962555 520	1745	N74°E	12°	Toba	lapilli, verde claro y café claro	Llano de Lobos

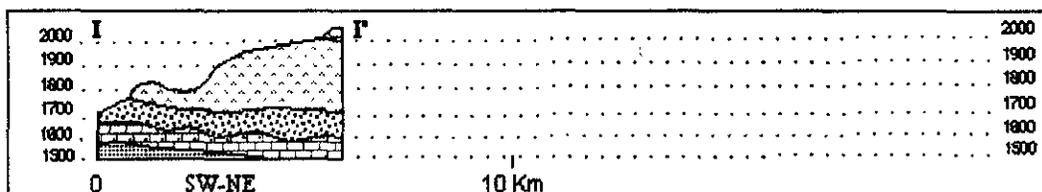


Figura 75. Sección geológica I - I' y geocodificación de datos. Para la simbología ver la figura 40.



Figura 76. Toba andesítica sin piroconsolidar y en pseudoestratos, de actitud estructural casi horizontal. Localidad El Molino, al sureste de Huajuapán de León.

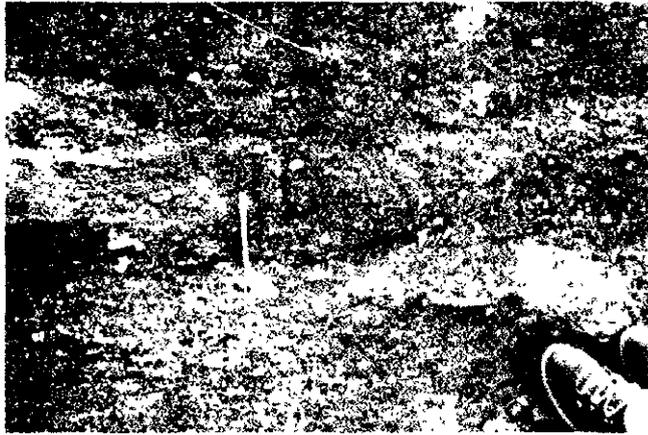


Figura 77. Toba lítica andesítica. Nótese los fragmentos blancos que son de cuarzo y caliza así como algunos fragmentos oscuros de esquisto. Localidad El Molino, al sureste de Huajuapán de León.

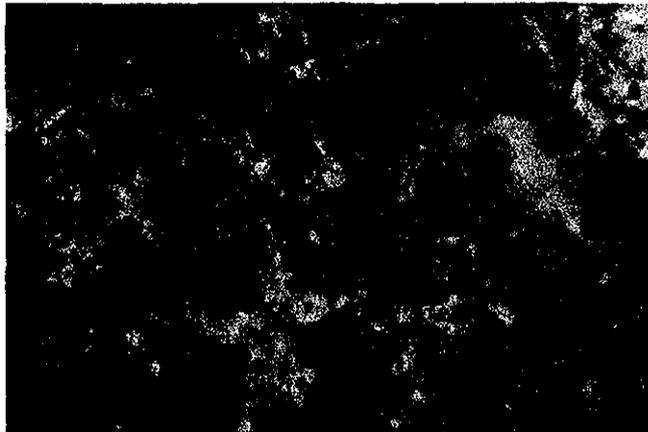


Figura 78. Toba lítica andesítica vista en microscopio petrográfico con nicoles cruzados. Nótese la matriz fina de plagioclasa y piroxeno, minerales opacos y cuarzo. Las parte blancas son fragmentos de cuarzo de extinción ondulante y de micrita.



Figura 79. Andesita San Marcos vista en microscopio petrográfico con nicoles cruzados. Nótese los cristales de plagioclasa en una matriz fina de plagioclasa y piroxenos.

En la tabla 7 se muestra un resumen de los estudios petrográficos que se tienen del área de estudio y sus coordenadas geográficas, mismas que se utilizaron para construir un mapa de puntos.

No	Long.	Lat.	Alt.	Mín. Primarios	Mín. Secundarios	Textura	Clasificación	formación
1	97° 53' 47"	17° 55' 03"	1800	cuarzo, feldespato	biotita, piroxenos	sarítica	grauveca	Fm. Tecomazúchil
2	97° 45' 17"	17° 45' 53"		plagioclasa, augita	vidrio	pliotaxítica	andesita	Andesita San Marcos
3	97° 51' 29"	17° 47' 07"		hornblenda	cuarzo, opacos	grandoblástica	hornblendita	Fm. Cosoltepec
4	97° 53' 19"	17° 55' 19"	1950	micrita	materia orgánica, cuarzo autige	micrítica	caliza	Fm. Teposcolula
5	97° 50' 33"	17° 07' 50"		cuarzo	opacos, hematita, arcilla	sarítica	conglomerado	Fm. Tecomazúchil
6	97° 52' 04"	17° 57' 34"	1726	micrita	arcilla	micrítica	caliza	Fm. Mapache
7	97° 51' 04"	17° 47' 25"		plagioclasa, piroxeno	vidrio, clorita	sub traquítica	meta andesita	Fm. Cosoltepec
8	97° 53' 26"	17° 55' 14"	1870	oolitas, espatita	micrita, plagioclasa, biotita, cuarzo	oolítica	caliza	Fm. Chimeco
9	97° 54' 14"	17° 54' 44"		plagioclasa	hornblenda, cuarzo, opacos	hipidiomórfica	diorita	Diorita, Chixtlahuaca
10	97° 53' 21"	17° 55' 19"	1880	oolitas, espatita	feldespato, microfósiles	oolítica	caliza	Fm. Chimeco
11	97° 45' 18"	17° 45' 55"	1688	plagioclasa, biotita, cuarzo	hematita, zeolita, vidrio	riolítica	toba riolítica	Toba Llano de Lobos
12	97° 54' 18"	17° 54' 41"		feldespato, opacos	materia orgánica, cuarzo autige	sarítica	grauveca	Fm. Tecomazúchil
13	97° 51' 21"	17° 47' 06"		mica, cuarzo	opacos, clorita	nematoblástica	filita	Fm. Cosoltepec
14	97° 48' 08"	17° 48' 38"	1718	micrita	arcilla, opacos, micas	micrítica	caliza	Caliza Solano
15	97° 42' 00"	17° 53' 00"	1700	plagioclasa, olivino	opacos, vidrio	sub ofítica	Basalto andesítico	Andesita Yucudaac
16	97° 54' 18"	17° 54' 41"	1704	cuarzo, feldespato	arcilla, biotita	sarítica	grauveca	Fm. Tecomazúchil
17	97° 13' 07"	17° 59' 59"	1699	plagioclasa, piroxeno	olivino, opacos, clorita	vitrolítica	andesita	Andesita Suchitlahuaca
18	97° 40' 38"	17° 55' 19"	1929	plagioclasa, clinopiroxeno	vidrio, clorita, cuarzo	microfítica	Basalto	Toba Llano de Lobos
19	97° 33' 47"	17° 53' 14"	1603	mica, cuarzo	arcilla, opacos	sarítica	arcosa	Fm. Tecomazúchil
20	97° 50' 13"	17° 47' 55"	1708	cuarzo, feldespato	muscovita, zircon, arcilla	sarítica	grauveca	Fm. Tecomazúchil
21	97° 51' 27"	17° 54' 57"	1900	micrita, cuarzo	opacos, fósiles de corales	pelítica	caliculita	Fm. Teposcolula
22	97° 54' 14"	17° 54' 44"	1725	plagioclasa, hornblenda	biotita, cuarzo, clorita	porfirítica	diorita	Diorita, Chixtlahuaca
23	97° 43' 00"	17° 51' 30"	1700	sanidina, cuarzo, hornblenda	biotita, cuarzo, clorita	ofítica	toba riolítica	Toba Llano de Lobos
24	97° 51' 29"	17° 56' 27"	1960	micrita	bioclastos	biomicrítica	caliza bioclástica	Fm. Teposcolula
25	97° 52' 30"	17° 53' 30"	1800	muscovita	cuarzo	lepidoblástica	filita	Fm. Cosoltepec
26	97° 54' 00"	17° 53' 30"	1720	muscovita	cuarzo	lepidoblástica	esquistoso	Fm. Cosoltepec

Tabla 7. Muestras de roca con estudio petrográfico y sus atributos.

4.11.- ESTRATIGRAFÍA

Con base en la interpretación fotogeológica, la clasificación geológica supervisada de las imágenes de satélite, las secciones de campo y la información bibliográfica se ha integrado la columna estratigráfica (Figura 80) y la estratigrafía se resume como sigue.

Paleozoico

El registro geológico dentro del área de estudio comprende un amplio rango en edad que va del Paleozoico al Reciente. Las rocas más antiguas corresponden al Complejo Acatlán y principalmente son parte de la Formación Cosoltepec y los Granitoides Esperanza (Ortega, 1978b) las que se originaron por metamorfismo durante el Cámbrico-Devónico con al menos dos isocronas en el Ordovícico (Ruíz, 1970). Las observaciones en campo permitieron tener una apreciación de 500 metros expuestos de esquistoso y filita dispuestos en alternancia y aparentemente sobrepuestas por tectonismo a cuerpos de esquistoso blasto porfídico (augen esquistoso) en la porción interna de una estructura antiformal sin observarse la base. Se considera al Complejo Acatlán subdividido en dos grupos (Ortega, 1978b) que son:

Subgrupo Acateco.

- Formación Tecomate.- metagrauvaca, metaarcosa, pelita, metaconglomerado, metacaliza.
- Formación. Xayacatlán.- Esquisto de serpentina, metagabro, anfibolita, eclogita, esquisto de clorita (esquisto verde).

Subgrupo Petlalcingo.

- Formación Cosoltepec.- anfibolita, metapelita, cuarcita, filita.
- Migmatita Magdalena.- Tonalita, diorita, anfibolita, piroxenita, mármol, gneis.
- Formación Chazumba.- Esquisto de mica, esquisto de biotita, filita, cuarcita, esquisto calcáreo.

Las diferencias encontradas mediante los sensores remotos indican que están presentes las rocas de la formación Cosoltepec y probablemente de la formación Tecomatlán pero dadas las condiciones de deformación en las que se encuentran, no ha sido posible separarlas.

Mesozoico

Un período intenso de erosión dió origen a la ausencia de registro estratigráfico entre el Complejo Acatlán y las rocas sedimentarias detríticas del Jurásico que le sobreyacen discordantes. Las rocas sedimentarias suprayacentes son parte de la Formación Tecomazúchil, definida en la región de Petlalcingo, Puebla (Pérez, et al., 1965) y que se caracteriza por estar constituida principalmente de una secuencia de estratos delgados de arenisca que contienen estratos gruesos de conglomerado poligmítico. En San Jerónimo Silacayoapilla se han encontrado fósiles de plantas que comprenden *Otozomites hespera* y *Ptillophylum acutifolium* y madera fósil que corresponden al Jurásico medio que es la edad documentada para las rocas detríticas jurásicas (Silva, 1969; 1970; 1978; López, 1981; Corona, 1985 Carrasco, 1981 de Cserna, 1970 Morán, et. al, 1993) e indican un ambiente continental de tipo fluvial y planicies de inundación en el intervalo Bathoniense-Calloviense. La parte inferior está constituida por arcosa de color púrpura y verde claro, mientras que la parte superior se constituye por arenisca grauvaca verde claro y café; dentro de las secuencias de arenisca se encuentran al menos cinco estratos gruesos de conglomerado de 3 a 10 metros de espesor hacia la porción central del área y de 10 a 20 metros en la porción sur, los cuales se expresan claramente en fotografías aéreas como elementos lineales discontinuos. Un cuerpo intrusivo de composición diorítica afecta tanto a las rocas metamórficas como a la Formación Tecomazúchil en su parte inferior. En la porción central del área, se observaron cuerpos de andesita que intrusionan a las rocas detríticas jurásicas y a las rocas cretácicas. Sobreyace discordante a la Formación Tecomazúchil, una unidad de limolita llamada informalmente Limolita Chapultepec sin planos definidos de estratificación y de 199 metros de espesor medidos en campo en este trabajo, con límites bien expuestos, que en su base contiene estratos delgados de conglomerado poligmítico y que hacia la cima tiene componentes volcánicos piroclásticos con algunos estratos bien definidos observados en la porción superior. La posición estratigráfica de la Limolita Chapultepec con las unidades supra e infrayacentes sugiere una edad Calloviense. Sobreyacen discordantes las rocas de la Formación Chimeco (Ortega, 1978a), constituida por

estratos delgados de caliza arenosa y arenisca calcárea, con restos fósiles de espinas de equinodermos que han sido documentados como Oxfordiense (Pérez, et al., op. cit.). En la porción central del área se observaron estratos delgados de caliza bien definidos, de 5 a 50 cm. que en su conjunto tienen al menos 150 metros de espesor. Dichos estratos están sobreyacidos discordantemente por rocas de la Formación Mapache que se constituye de caliza negra arcillosa en estratos delgados muy fracturados, con componentes menores de lutita y limolita, de edad Kimmeridgiense según fue documentada en la región de Petlalcingo (Pérez, et al., ibid). En su conjunto podrían tener 400 metros de espesor. La formación Mapache se acuña en la porción norte del área y vuelve a ser expuesta en la porción suroccidental. En la región sur afloran cuerpos de caliza negra arcillosa que por sus relaciones con rocas cretácicas suprayacentes observadas en fotografías aéreas y en las imágenes de satélite aparentemente corresponden a una unidad litológicamente semejante a la Formación Mapache y que bien podría tener relación con la Formación Sabinal en las localidades del Río Sabinal, Tlaxiaco (López, 1985) del Tithoniense del Jurásico Superior. El Cretácico está representado por 140 metros de caliza arcillosa, arenisca, limolita y en menor proporción lutita, que están expuestas en la porción sur occidental del área, en la región de San Miguel Papalutla y que por la fauna fósil encontrada ha sido documentada con una edad Hauteriviense-Valanginiense (González y Comas, 1981; Caballero, 1989). El Cretácico Superior está representado por al menos 100 metros de estratos delgados y gruesos de caliza, en pliegues suaves y muy abiertos que en conjunto son parte de una estructura anticlinal muy amplia que se extiende 40 Km hacia el oeste, al sur de Tecomatlán; corresponden al intervalo Albiense-Coniaciense y son parte de la Formación Teposcolula (Ferrusquía, 1976). Un cuerpo intrusivo de composición andesítica fue observado al norte del área de estudio en dos localidades en donde afecta a las rocas sedimentarias jurásicas y a la Formación Teposcolula.

Cenozoico

En la porción sur del área sobreyace en discordancia a las rocas cretácicas una unidad de cuerpos aislados de conglomerado, de 5 a 10 metros de espesor correspondiente al Conglomerado Tamazulapan (Ferrusquía, op. cit.). Con base en su posición discordante con la Formación Teposcolula y el criterio de otros autores (Ferrusquía, ibid) de su relación con la unidad suprayacente de la Formación Huajuapán, la edad de esta unidad comprende un amplio rango que va del Maestrichtiano al Eoceno Tardío. Contiene fragmentos de caliza de la formación Teposcolula y además contiene fragmentos de rocas metamórficas y volcánicas que en conjunto representan al Paleoceno o al menos el Eoceno Inferior. En la porción central y norte del área se observaron cuerpos aislados de arena gruesa con fragmentos de cuarzo metamórfico y caliza, arcilla, yeso, toba y arenisca de la Formación Huajuapán que sobreyace discordante al Conglomerado Tamazulapan y que por su posición representa al Eoceno, con un espesor de 20 metros, aunque en su conjunto podría tener 100 metros. En la porción oriental del área se encuentran cuerpos pseudoestratiformes de rocas volcánicas piroclásticas que representan al

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Oligoceno discordantemente sobrepuestas a las formaciones Huajuapán y Teposcolula. En su conjunto tienen 500 metros de espesor, ligeramente inclinadas hacia el nororiente y que comprenden al menos 5 cuerpos de toba andesítica piroconsolidada y seis cuerpos de toba andesita lítica no piroconsolidada en una alternancia clara y bien marcada. Estos horizontes pueden ser interpretados en fotografías aéreas. Sobreyacen discordantes cuerpos aislados de andesita de piroxeno que por sus toposformas cónicas aisladas en la porción norte de área es posible delimitar y separar mediante la interpretación de imágenes que en su conjunto tienen 200 metros de espesor. Representan al Mioceno y corresponden a la Andesita Yucudaac (Ferrusquía, 1976). En la porción suroriental del área se interpretaron y delimitaron cuerpos aislados de rocas volcánicas correspondientes a la Andesita San Marcos (Ferrusquía, op. cit.) que se ubican en partes topográficas altas, con un espesor máximo de 100 metros y sobreyaciendo discordante a la unidad Llano de Lobos (Ferrusquía, ibid) que representan el registro geológico de eventos volcánicos del Mioceno o bien una extensión hacia el Plioceno.

Pleistoceno y Reciente

El Pleistoceno está representado por materiales sedimentarios no consolidados de gravas y arenas gruesas que en las partes topográficas bajas llegan a tener hasta 5 metros de espesor, y el Holoceno por arenas y arcillas en los lechos de las corrientes fluviales actuales.

Pleistoceno	Unidad litoestratigráfica vs. geofomas		Unidad cron-estratigráfica	Unidad litológica	Espesor (m)	
	Holoceno	Neoceno				
	Arena Xochitlapilco		Holoceno	-Arena, arcilla	1	
	Grava Camotlán		Pleistoceno	-Grava, arena	5	
Cenozoico	Neoceno	Andesita San Marcos	Plioceno	-Andesita vesicular	100	
		Andesita Yucudaac	Mioceno	-Andesita afanítica	200	
	Paleoceno	Toba Llano de lobos	Oligoceno	-Toba andesítica piroconsolidada y sin piroconsolidar	500	
		Fm. Huajuapán	Eoceno	-Arena, arcilla, yeso..	20	
		Conglomerado Tamazulapán	Paleoceno	-Conglomerado	5	
Mesozoico	Cretácico	Fm. Teposcolula	Albiense / Coniaciense	-Caliza bio micrítica.	100	
		Caliza Papakuta	Hauteriviense / Berriasiense	-Caliza arcillosa	140	
		Caliza Solano	Tithoniense	-Caliza arcillosa	400	
	Jurásico	Fm. Mappahe	Kimmeridgiense	-Caliza arcillosa	150	
		Andesita Suchixtlahuaca		Oxfordiense	-Caliza oolítica	150
		Fm. Chimeco	Caloviense	-Limolita	200	
		Limolita Chapultepec	Caloviense - Bathoniense ?	-Arenisca, conglomerado	600	
	Triásico	Fm. Tecamazúchil				
		(Diorita Chilixtlahuaca)				
Paleozoico	Infrior	Fm Cosotepec	Ordoviciense ?	-Esquisto, filita	500	
		Granitoides Esperanza	Ordoviciense ?	-Esquisto (augen)	?	

Figura 80. Columna estratigráfica del área de estudio que comprende parte del Paleozoico, Mesozoico, Cenozoico y hasta el Reciente. En ella se observan las unidades litoestratigráficas que son motivo de estudio de este trabajo.

4.12.- GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En el área de estudio se han interpretado estructuras geológicas mediante la interpretación de fotografía aérea e imágenes de satélite y las observaciones de algunas de ellas en campo da un soporte para la interpretación. Sobre la base de la interpretación de fotografías aéreas, imágenes de satélite y de los datos estructurales obtenidos en campo y mostrados en las secciones, se construyó un mapa estructural (Figura 81). Para mayor detalle ver los mapas del anexo 2. De la interpretación cuantitativa se obtuvieron datos que permitieron calcular las direcciones de fracturamiento y son representadas por rosetas de fracturas. Esto se hizo agrupando todas las estructuras de una misma unidad alrededor de un solo punto y luego se sobrepuso una red de conteo o roseta, así todas las fracturas del Paleozoico pudieron ser contadas agrupándose en porcentajes.

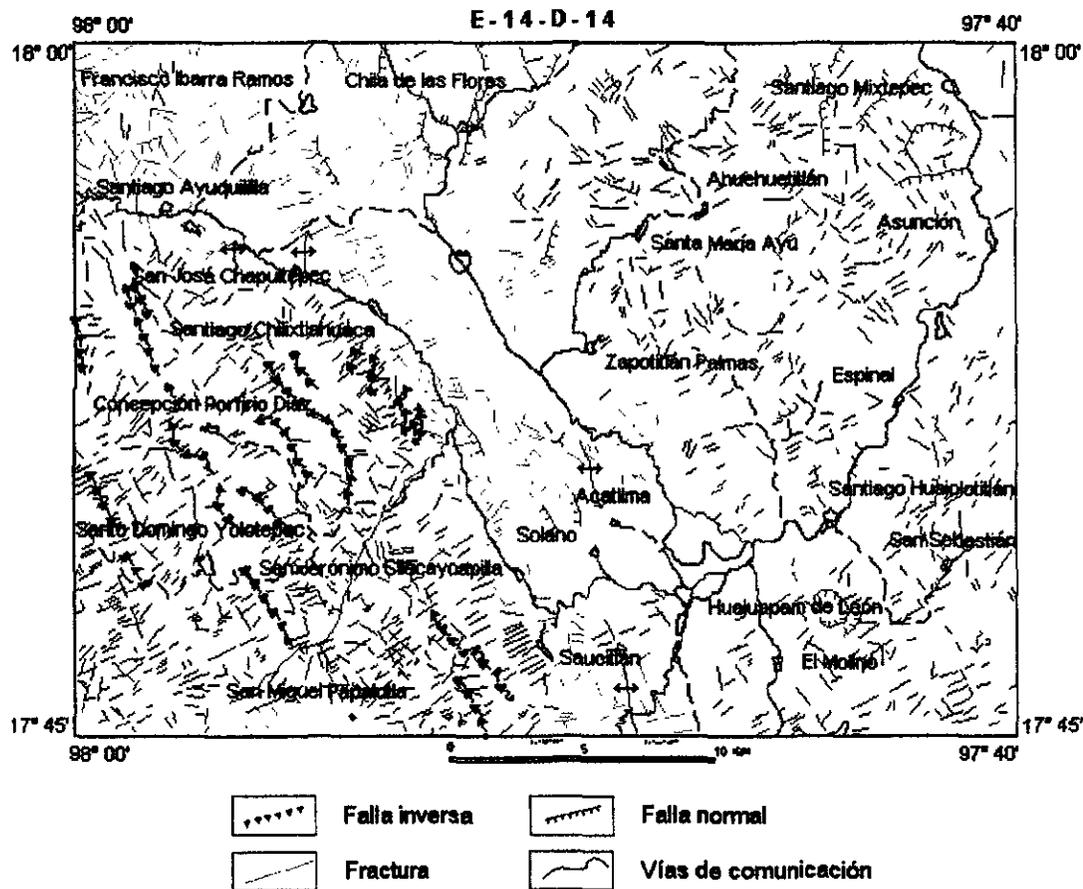


Figura 81. Estructuras geológicas del área de estudio. Nótese la distribución de fallas inversas interpretadas en las rocas metamórficas paleozoicas y que hacia el norte parecen controlar las estructuras de rocas plegadas en rocas sedimentarias jurásicas. Las estructuras anticlinales locales son claras en las rocas de caliza cretácicas. El fracturamiento es intenso y en todas direcciones mientras que fallas normales están presentes localmente al norte del área en rocas volcánicas cenozoicas principalmente.

En las rocas metamórficas se interpretaron fallas inversas locales delimitadas por escarpes tectónicos interpretados en los compuestos de falso color de las imágenes de satélite tanto por las formas de sierras en escalones como por la topografía abrupta en niveles altimétricos entre 2400 y 2500 m.s.n.m. El conteo de 350 fracturas (Figura 82) en rocas paleozoicas muestra que el 70 % de las fracturas tiene una dirección NE60°SW, en un porcentaje menor se observa otra dirección preferencial de NW40°SE y el resto no tiene una dirección preferencial; el conteo de 298 fracturas en las rocas mesozoicas (Figura 83) muestra que se fracturaron en direcciones NW30°SE y en direcciones comprendidas entre NE20°SW y NE70°SW; en el conteo de 517 fracturas (Figura 84) en las rocas volcánicas cenozoicas estadísticamente es aceptable y muestra que el fracturamiento preferencial tiene dos direcciones; el 55% tiene la dirección NE 60° SW, el 30 % en dirección NW 30° SE y el resto en dirección NE-SW.

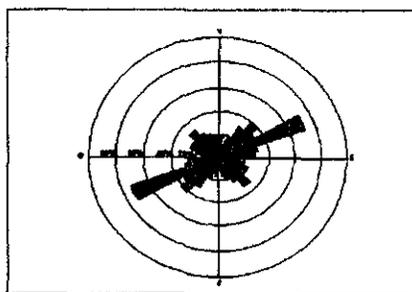


Figura 82. Roseta de 350 fracturas en rocas metamórficas paleozoicas. Nótese una dirección preferencial en dirección NE60°SW.

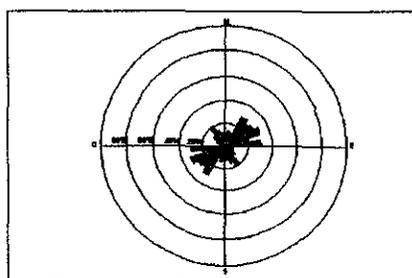


Figura 83. Roseta de 298 fracturas en rocas sedimentarias mesozoicas. Nótese que hay una dirección preferencial amplia comprendida entre NE20°SW y NE70°SW.

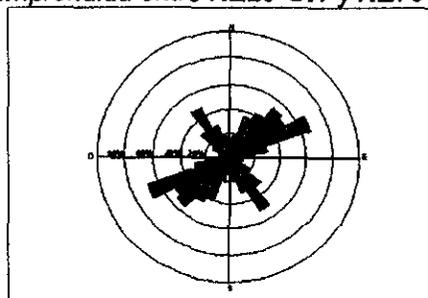


Figura 84. Roseta de 517 fracturas de las rocas volcánicas cenozoicas. Nótese dos direcciones preferenciales NE60°SW y NW30°SE.

Para la representación de la estadística de rumbos y echados medidos en campo se utilizaron las redes estereográficas de Schmidt y Kalsbeek. El conteo estadístico de 33 planos de foliación en rocas metamórficas (Figura 85) muestra curvas de concentración de polos en una dirección preferencial hacia el NE62° con 25° de inclinación que es significativamente muy semejante a la dirección de fracturamiento principal de la Formación Cosoltepec. Los patrones estructurales de las fracturas en rocas paleozoicas (N62°E) son perpendiculares a las fallas inversas interpretadas (N30°W) lo que sugiere que las fracturas están en la dirección de máximo esfuerzo. El conteo estadístico de 82 datos en estratos de arenisca y conglomerado de la Formación Tecomazúchil tiene tres áreas de concentración (Figura 86); dos de ellas representan los flancos de una estructura anticlinal que se encuentra al noroeste de Santiago Chilixtlahuaca y determinan que el plano axial tiene una orientación N10°E, con un buzamiento de 13° que es congruente con las interpretaciones de las estructuras en la formación. Las curvas de concentración de polos de 30 datos tomados de estratos de la Formación Chimeco (Figura 87) al noreste de Santiago Chilixtlahuaca muestran que se tiene la medida estructural de un flanco de anticlinal amplio que se interpreta en la zona de estudio y muestran una inclinación preferencial de N62°E con 25° de inclinación. Para el conteo de 11 datos de estratos medidos en los afloramientos de Chila de las Flores (Figura 88) en la Formación Mapache las curvas muestran una inclinación de echados N78°E con 50° de inclinación. El conteo de 14 datos en la Caliza Solano (Figura 89) muestra una dirección preferencial N40°E con 42° de inclinación. Finalmente para la Formación Teposcolula (Figura 90) se tienen curvas de concentración de 22 polos que muestran una dirección de inclinación de echados N82°E con 25° de inclinación que también muestran ser parte de un flanco de una estructura anticlinal.

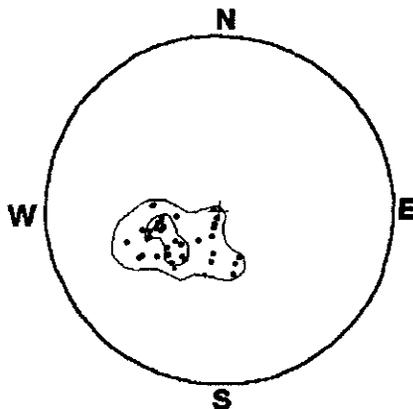


Figura 85. Curvas de concentración de 33 polos de planos de foliación de la Formación Cosoltepec. Nótese la mayor curva de concentración de 43%.

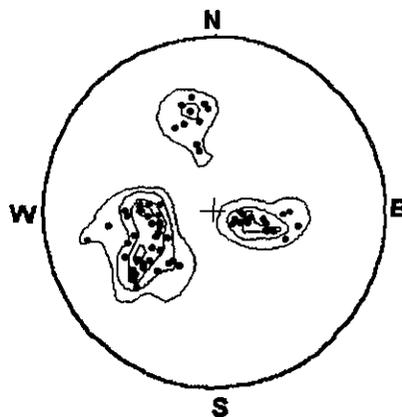


Figura 86. Curvas de concentración de 82 polos de estratificación de la Formación Tecomazúchil. Nótese que las curvas con valores de 15 valores de la parte inferior representan un flanco de una estructura anticlinal mientras que las curvas de la parte superior son parte de un flanco también de un anticlinal mayor.

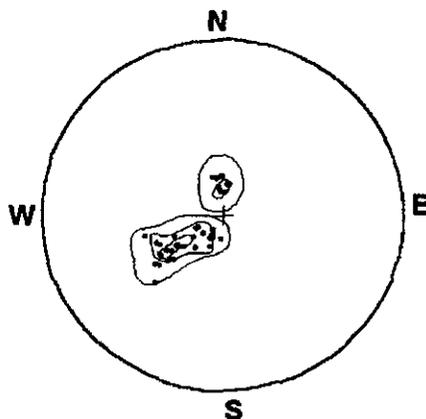


Figura 87. Curvas de concentración de 30 polos de estratificación de la Formación Chimeco. Nótese que las curvas con valores de 15 valores de la parte inferior representan un flanco de una estructura anticlinal. La estadística muestra una dirección preferencial $N60^{\circ}E$, con 25° de inclinación. El eje del plano estructural tiene una dirección de $S40^{\circ}E$.

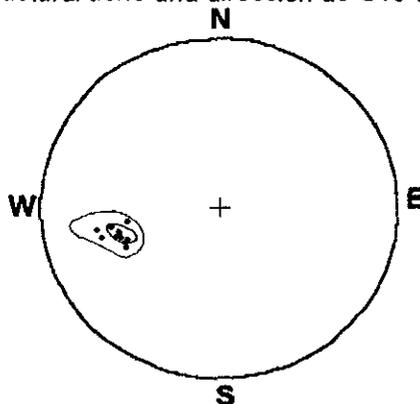


Figura 88. Curvas de concentración de 11 polos de estratificación de la Formación Mapache. Nótese que las curvas con valores de 15 valores de la parte inferior representan un flanco de una estructura anticlinal. La estadística muestra una dirección $N78^{\circ}E$ con 50° para la inclinación de la estratificación.

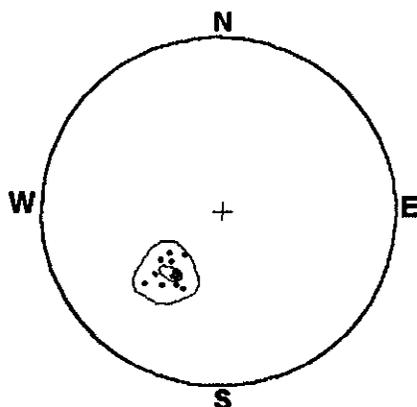


Figura 89. Curvas de concentración de 14 polos de estratificación de la Caliza Solano. Nótese que las curvas con valores de 15 datos de la parte inferior representan un flanco de una estructura anticlinal. La estadística muestra una dirección N40°E con 42° para la inclinación de la estratificación.

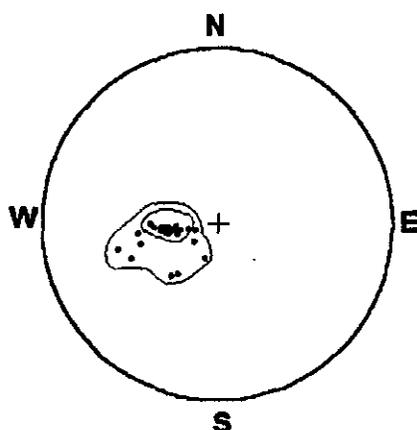
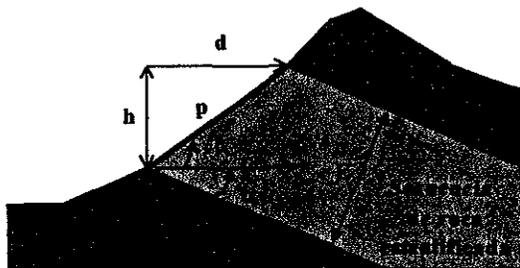


Figura 90. Curvas de concentración de 22 polos de estratos de la Formación Teposcolula. Nótese que las curvas con valores de 15 datos de la parte inferior representan un flanco de una estructura anticlinal. La estadística muestra una dirección N82°E con 25° para la inclinación de la estratificación.

Con base en el mapa de altimetría de las curvas de nivel cada 20 metros y los contactos litológicos, así como los datos estructurales de rumbos y echados de rocas sedimentarias se determinaron espesores que tienen una buena similitud con respecto a los medidos en campo así como aquellos reportados previamente. Para el cálculo de espesores se utilizó el siguiente algoritmo; para una secuencia estratigráfica inclinada moderadamente y que es cortada paralelamente a la inclinación de la estratificación la línea de la pendiente depende de la diferencia de altura medida entre dos puntos de límites inferior y superior de un conjunto de estratos y de la distancia horizontal que los separa medidas en un plano. A su vez el espesor buscado resulta de la función seno del ángulo de inclinación del echado y del ángulo de la pendiente ambos medidos en el campo (Figura 91). Así el espesor calculado es proporcional a la distancia de la línea de pendiente por el seno del ángulo de inclinación α más el ángulo de la pendiente β : $P = \sqrt{H^2 + D^2}$, donde H es la diferencia de alturas y

D la distancia horizontal, entonces: $E(\text{espesor}) = \sqrt{((H^2 + D^2) * \text{seno}(\alpha + \beta))}$. En la tabla (Tabla 8) se muestran los valores de espesores calculados para algunas de las formaciones sedimentarias mesozoicas del área de estudio.



$$E = (\sqrt{h^2 + d^2}) * (\text{sen}(\alpha + \beta))$$

Figura 91. Elementos considerados para el cálculo de espesores en una serie de estratos moderadamente inclinada vistos en una sección paralela a la dirección de la inclinación de las capas.

Unidad litoestratigráfica	Altura (m)	distancia (m)	pendiente	inclinación	Espesor calculado (m)	Localidad
Fm. Cosoltepec	220	2090	21	30	2075	San Jerónimo Silacayoapilla
Fm. Tecomazúchil	80	1800	20	17	1084	Santiago Chilixtlahuaca
Fm. Tecomazúchil	80	1810	27	31	1535	Cañon El Boquerón
Fm. Tecomazúchil	80	1770	25	25	1138.8	San Jerónimo Silacayoapilla
Limolita Chapultepec	80	390	30	32	348.8	Cañon El Boquerón
Limolita Chapultepec	100	390	30	32	355.5	Santiago Chilixtlahuaca
Limolita Chapultepec	50	314	30	16	228.7	Cañon El Boquerón Chico
Fm. Chimeco	80	697	30	40	657.4	Cañon El Boquerón
Fm. Chimeco	140	543	30	23	447.8	Cañon El Boquerón Chico
Fm. Mapache	100	319	40	20	289.5	San Miguel Papalutla
Fm. Mapache	20	270	10	53	241.2	San Miguel Papalutla
Fm. Tepescotula	80	358	15	30	255.28	Cañon El Boquerón
Fm. Tepescotula	80	340	15	30	244.12	Cañon El Boquerón
Fm. Tepescotula	80	340	10	38	259.56	Cañon El Boquerón

Tabla 8. Se muestran los datos de espesores calculados para diferentes unidades sedimentarias mesozoicas del área de estudio.

4.13.- GEOLOGÍA HISTÓRICA Y TECTÓNICA

La formación Cosoltepec del complejo Acatlán representa una fase de metamorfismo Paleozoico de sedimentos pelíticos, samíticos y algunos componentes volcánicos de derrames andesíticos. La visualización de un modelo digital de elevación permite interpretar un levantamiento regional de las rocas metamórficas que las expuso a la erosión desde el Paleozoico Tardío y hasta el Jurásico Medio. Por otro lado los estudios de petrografía muestran que los minerales de micas de las rocas de esquistos y filitas indican una segunda fase de deformación probablemente ocurrida en el Jurásico. Las rocas paleozoicas sufrieron fracturamiento intenso y se desarrollaron fallas inversas locales sintectónicas respecto al levantamiento regional. Cuando las rocas metamórficas son levantadas y expuestas a la erosión en el Mesozoico fueron la principal fuente de sedimentos que derivó en la formación de rocas sedimentarias detríticas en paleoambientes continentales principalmente fluviales en el intervalo Bathoniano- Calloviano. La presencia de otros conjuntos de rocas detríticas sugieren un levantamiento continuo durante el Jurásico que culminó con un periodo de actividad volcánica representada por rocas volcánicas piroclásticas del Calloviano Tardío. Las

fallas inversas se reactivaron y contribuyeron al plegamiento de las rocas sedimentarias del Jurásico Medio. Las rocas de caliza oolítica formadas en el Oxfordiano se constituyen de oolitas cuyos núcleos son de plagioclasa, mica y cuarzo derivados de la erosión de las rocas volcánicas del Calloviano y que se depositaron en un ambiente de plataforma como atestiguan la presencia de fósiles de espinas de erizos, pelecípodos y corales. En el Kimmeridgiano se depositaron sedimentos arcillosos en dichos ambientes de plataforma para dar lugar a la formación de rocas de caliza arcillosa y discordantemente sobrepuestas a las rocas oxfordianas. Este ambiente de depósito prevaleció durante la transición del Jurásico al Cretácico. En el Cretácico Temprano el ambiente de sedimentación marina cambió a una plataforma más profunda para dar lugar a la formación de rocas de caliza arcillosa, caliza arenosa, arenisca y limolita. Este ambiente terminó con la instauración de un ambiente de plataforma que favoreció la formación de rocas de caliza bioclástica durante el intervalo Valanginiano-Hauteriviano dentro de los límites del terreno Mixteco. El ambiente sedimentario culminó en el Cretácico y en el Paleoceno se inició una fase de deformación compresiva que plegó a las rocas y un levantamiento regional propició la erosión de las rocas hasta entonces formadas. En el Eoceno se formaron rocas sedimentarias detríticas alternadas con rocas volcánico-sedimentarias. La actividad volcánica se intensificó durante el Oligoceno formando rocas volcánicas piroclásticas pseudoestratificadas y subhorizontales que contienen rocas volcánicas de derrame. Dicha actividad terminó y se presentaron movimientos regionales que inclinaron a las rocas volcánicas ligeramente hacia el noreste y se desarrollaron fallas normales con orientaciones irregulares predominantemente norte-sur. La actividad volcánica se restauró en el Mioceno representada por estructuras de estratovolcanes y estructuras volcánicas aisladas y prevaleció hasta el Plioceno terminando con la formación de rocas andesíticas de derrame. Finalmente desde el Pleistoceno ha prevalecido el proceso de erosión de todas las rocas del registro estratigráfico con el depósito de materiales sedimentarios en el Holoceno.

CAPITULO 5

5.- SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SU USO EN GEOLOGÍA

La cartografía geológica tradicional comúnmente se desarrolla a partir del uso de los sensores remotos y su verificación en campo. Una herramienta adicional de trabajo puede ser un sistema de información geográfica (SIG) que se propone aquí como un medio para integrar información geológica de una forma relativamente sencilla y accesible. Esto permite por un lado la consulta de la información en una computadora personal y por otro la actualización y la edición de la misma de una forma rápida y eficiente. El uso de este tipo de herramientas constituye una nueva perspectiva de trabajo geológico porque permite analizar y consultar información geológica digital de múltiples

fallas inversas se reactivaron y contribuyeron al plegamiento de las rocas sedimentarias del Jurásico Medio. Las rocas de caliza oolítica formadas en el Oxfordiano se constituyen de oolitas cuyos núcleos son de plagioclasa, mica y cuarzo derivados de la erosión de las rocas volcánicas del Calloviano y que se depositaron en un ambiente de plataforma como atestigua la presencia de fósiles de espinas de erizos, pelecípodos y corales. En el Kimmeridgiano se depositaron sedimentos arcillosos en dichos ambientes de plataforma para dar lugar a la formación de rocas de caliza arcillosa y discordantemente sobrepuestas a las rocas oxfordianas. Este ambiente de depósito prevaleció durante la transición del Jurásico al Cretácico. En el Cretácico Temprano el ambiente de sedimentación marina cambió a una plataforma más profunda para dar lugar a la formación de rocas de caliza arcillosa, caliza arenosa, arenisca y limolita. Este ambiente terminó con la instauración de un ambiente de plataforma que favoreció la formación de rocas de caliza bioclástica durante el intervalo Valanginiano-Hauteriviano dentro de los límites del terreno Mixteco. El ambiente sedimentario culminó en el Cretácico y en el Paleoceno se inició una fase de deformación compresiva que plegó a las rocas y un levantamiento regional propició la erosión de las rocas hasta entonces formadas. En el Eoceno se formaron rocas sedimentarias detríticas alternadas con rocas volcánico-sedimentarias. La actividad volcánica se intensificó durante el Oligoceno formando rocas volcánicas piroclásticas pseudoestratificadas y subhorizontales que contienen rocas volcánicas de derrame. Dicha actividad terminó y se presentaron movimientos regionales que inclinaron a las rocas volcánicas ligeramente hacia el noreste y se desarrollaron fallas normales con orientaciones irregulares predominantemente norte-sur. La actividad volcánica se restauró en el Mioceno representada por estructuras de estratovolcanes y estructuras volcánicas aisladas y prevaleció hasta el Plioceno terminando con la formación de rocas andesíticas de derrame. Finalmente desde el Pleistoceno ha prevalecido el proceso de erosión de todas las rocas del registro estratigráfico con el depósito de materiales sedimentarios en el Holoceno.

CAPITULO 5

5.- SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SU USO EN GEOLOGÍA

La cartografía geológica tradicional comúnmente se desarrolla a partir del uso de los sensores remotos y su verificación en campo. Una herramienta adicional de trabajo puede ser un sistema de información geográfica (SIG) que se propone aquí como un medio para integrar información geológica de una forma relativamente sencilla y accesible. Esto permite por un lado la consulta de la información en una computadora personal y por otro la actualización y la edición de la misma de una forma rápida y eficiente. El uso de este tipo de herramientas constituye una nueva perspectiva de trabajo geológico porque permite analizar y consultar información geológica digital de múltiples

formas. En este trabajo se utilizó un SIG como herramienta para construir una base de datos geológica y desarrollar un programa de aplicación geológica.

5.1.- DEFINICIÓN DE UNA BASE DE DATOS.

Una base de datos geológica es una colección de datos relativos a temas de geología que se constituye de datos espaciales y sus atributos alfanuméricos; los primeros comprenden elementos gráficos como puntos, líneas y polígonos que son la representación digital de elementos de la superficie terrestre y los segundos son una colección de datos de textos y números, por ejemplo aquellos datos que describen una unidad litoestratigráfica. Dentro de un sistema de información estos dos conceptos se estructuran en un formato (un solo archivo digital) para definir capas de información y que constituyen un mapa geológico de un solo tema. Cada capa o mapa comprende un conjunto de elementos del mismo tipo representados digitalmente con un solo tipo de elemento gráfico, con características comunes determinadas por sus atributos. La definición de una base de datos comprende los siguientes conceptos.

- **Campo**

Es el arreglo de un mismo concepto, por ejemplo un campo que contiene la unidad litológica a la que pertenece un elemento poligonal.

Campo (Litología)
<i>Arenisca</i>
<i>Caliza</i>

- **Registro**

Es la unidad básica de información que puede ser almacenada en un sistema informático, por ejemplo la unidad litológica para el polígono número 1.

Registro # 1	<i>Arenisca</i>
--------------	-----------------

- **Tabla**

Es el conjunto de dos o más registros y campos ordenados con relación a un tema específico. Por ejemplo una tabla que contiene las unidades litoestratigráficas representados en un mapa geológico digital de polígonos.

Polígonos	Campo # 1 (Litología)	Campo # 2 (Formación)
Registro # 1	<i>Arenisca</i>	<i>Tecomazúchil</i>
Registro # 2	<i>Esquisto</i>	<i>Cosoltepec</i>
Registro # 3	<i>Caliza</i>	<i>Chimeco</i>
Registro # 4	---	---
---	---	---

- **Base de datos**

Una base de datos es un conjunto de dos o más tablas de atributos relacionadas a un tema específico. En geología una base de datos se puede definir tanto por los elementos gráficos o espaciales como por los atributos alfanuméricos que describen una parte de la superficie terrestre. La dificultad para hacer una base de datos geológica radica en representar adecuadamente los elementos que afloran en la superficie terrestre, los cuales tienen sus características propias. Para evitar la tarea de ingresar tantos datos se utilizan tablas simplificadas y se relacionan entre sí dos o más tablas en la definición de una base de datos relacional. La importancia del diseño de una base de datos radica en la reducción de la redundancia de la información y evitar la inconsistencia (Rodríguez, 1998) y permite una administración de la información mediante procedimientos de seguridad, respaldo y acceso controlado.

5.2.- DISEÑO DE UNA BASE DE DATOS GEOLÓGICA

El diseño de un sistema es el arreglo ordenado de información geológica para el despliegue y la consulta, de fácil uso que permite generar productos cartográficos como gráficas, reportes y mapas temáticos. Si los temas geológicos tienen atributos que describen cada una de los elementos representados y dichos atributos están almacenados dentro de una estructura ordenada, entonces se le puede llamar base de datos geológica. Para llegar a definir un sistema de información geológica se requiere:

- *Generación de información digital*
- *Diseño de una base de datos descriptiva y de atributos*
- *Edición y manipulación de la información.*
- *Crear de un programa para la consulta y despliegue de la información.*

5.3.- MODELO DE DATOS GEOLÓGICOS.

La cartografía es una disciplina que ha estado sujeta a una serie de cambios e innovación tecnológica (Clarke, 1990) y puede ser entendida como un medio para expresar y comunicar gráficamente un conocimiento de un tema en particular. Un modelo de datos geológicos en una estructura cartográfica permite representar elementos de la superficie terrestre (Tomlin, 1990) de una forma precisa y automática (Figura 92). Gran parte del trabajo geológico es expresado y comunicado a través de cartas geológicas, en donde por lo general la cantidad y calidad de información es directamente proporcional al trabajo realizado en campo, por lo que es un esfuerzo comúnmente muy grande e irrepetible o de difícil reproducción. Por esta razón una carta geológica, dentro de un sistema de información geográfica, contribuye no solo en poner a disposición la información para otros usuarios en cuanto a consulta y duplicación, sino también para el análisis y el modelado de la información.

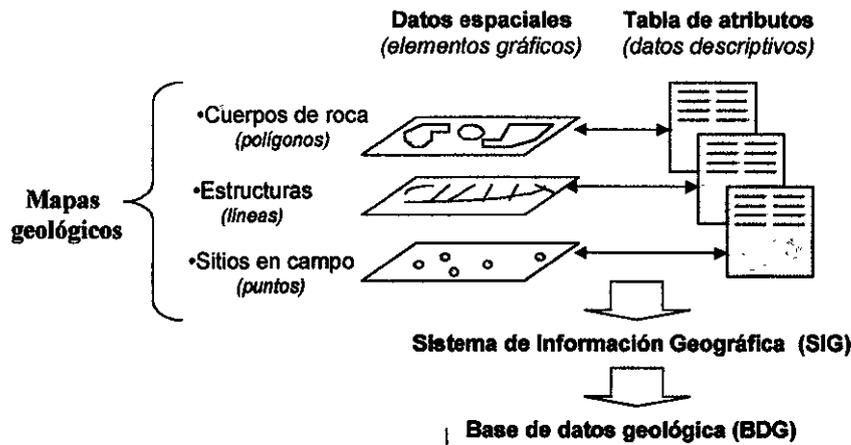


Figura 92.- Elementos de la definición de la base de datos geológica. Nótese la integración de los conceptos de datos espaciales y tablas de atributos para la creación de un mapa geológico digital.

5.4.- PRODUCTOS DE LA DEFINICIÓN DE LA BASE DE DATOS.

Con la integración de la información obtenida mediante sensores remotos así como de los datos de campo y de gabinete se construyen las capas de información con sus atributos propios que en su conjunto constituyen una base de datos geológica. Aquí se muestran las capas de información que se requieren como parte importante para sintetizar los resultados del trabajo geológico de una región. Con esta información disponible se tienen los elementos para analizar con más detalle la geología de la zona de trabajo. Para que otras personas tengan a su alcance la capacidad de analizar la información en un medio informático se ha desarrollado un sistema para el despliegue y la consulta de la información geológica del área de estudio en un lenguaje de programación que permite su fácil uso y manipulación y que se describe en los anexos 1 y 2. En el Anexo 3 se presentan algunos mapas generados en dicho sistema. Como resultado de la definición y construcción de una base de datos geológica se obtuvieron los siguientes temas:

- Canevá (formato de 15 minutos de latitud por 20 minutos de longitud)
- Cuadrícula (equidistancia de un Kilómetro)
- Gradícula (en intervalos de 2.5 minutos)
- Modelo digital topográfico (curvas de nivel cada 20 metros)
- Modelo digital de elevación (superficie que representa a la superficie terrestre)
- Modelo digital de relieve (superficie que representa al relieve)
- Ríos y arroyos (red hidrográfica)
- Poblaciones (poblados y localidades principales)
- Vías (principales vías de comunicación)
- Fotografías aéreas (imágenes de fotografías aéreas)
- Fotointerpretación (imágenes de fotografías aéreas con la fotogeología)
- Imágenes de satélite (en sus bandas, compuestos e imágenes clasificadas)
- Secciones geológicas (puntos y tablas de datos)
- Litología (contactos litológicos)
- Litoestratigrafía (atributos de unidades litoestratigráficas)
- Petrografía (sitios de verificación en campo con estudio petrográfico)

Para integrar la información se ha considerado el formato de la escala 1:50,000 en la proyección UTM (Caire, 1986) para su correcta representación en un mapa geológico de formato digital (Martínez, 1985).

5.5.- BASE DE DATOS DE LITOLOGÍA

Para integrar un mapa de contactos litológicos se generó un mapa de líneas mediante una tableta digitalizadora. Su trazo y definición se revisaron con la georeferencia de las fotografías aéreas fotointerpretadas geológicamente así como las curvas de nivel y con la referencia del modelo digital del relieve. Para la carta litológica se han considerado los conceptos de número de unidad, roca, tipo, espesor y en la construcción de la tabla de atributos se consideró la siguiente estructura:

	Campo	Tipo de dato	Tamaño en byte
1	Unidad-número	Entero	2
2	Roca	Carácter	35
3	Tipo	Carácter	30
4	Origen	Carácter	30
5	Espesor	Entero	4

5.6.- BASE DE DATOS DE LITOESTRATIGRAFÍA

A partir del mapa de litología se construyó un mapa de polígonos topológicos que contienen la relación interna de vecindad y adyacencia de áreas, así cada elemento poligonal tiene atributos como área, perímetro, forma y tamaño. Aprovechando dicha topología se adicionaron campos en la tabla de atributos para definir conceptos de litoestratigrafía como: Formación, Miembro y Capa. Con ello se es congruente con los conceptos establecidos por el Código de Nomenclatura Estratigráfica y el Código Estratigráfico Norteamericano (Corrales et al., 1977; Hedberg, 1980). Así los datos almacenados para cada polígono que representa una unidad estratigráfica considera el nombre de una formación como un atributo que caracteriza una unidad con homogeneidad litológica y se usan las definiciones de unidades formales e informales con el fin de simplificar el manejo de la información estratigráfica. Si bien no se tienen miembros o capas, la definición de estos campos dejaría la posibilidad de actualizar datos en otro momento para incrementar el conocimiento acerca de características de clasificaciones jerárquicas menores. El espesor es un atributo propio de los cuerpos de roca, como un dato obtenido en campo pero que también puede almacenar datos de estimaciones o documentaciones de otros trabajos. La definición de los campos de la base de datos del mapa de litoestratigrafía es:

	campo	Tipo de dato	Tamaño en byte	decimales
1	Formación	Carácter	35	
2	Miembro	Carácter	30	
3	Capa	Carácter	30	
4	Geocódigo	Entero	2	
5	Área_km2	Decimal	8	2
6	Perímetro_km	Decimal	8	2
7	espesor	Decimal	5	1

5.7.- BASE DE DATOS DE CRONOESTRATIGRAFÍA

El mapa de cronoestratigrafía utiliza la misma definición de límites litológicos pero considera los atributos que se refieren a unidades de rocas formadas durante un tiempo geológico. Comprende la definición de los campos de eratema, sistema, serie y piso así como claves que los identifican numéricamente según la siguiente definición.

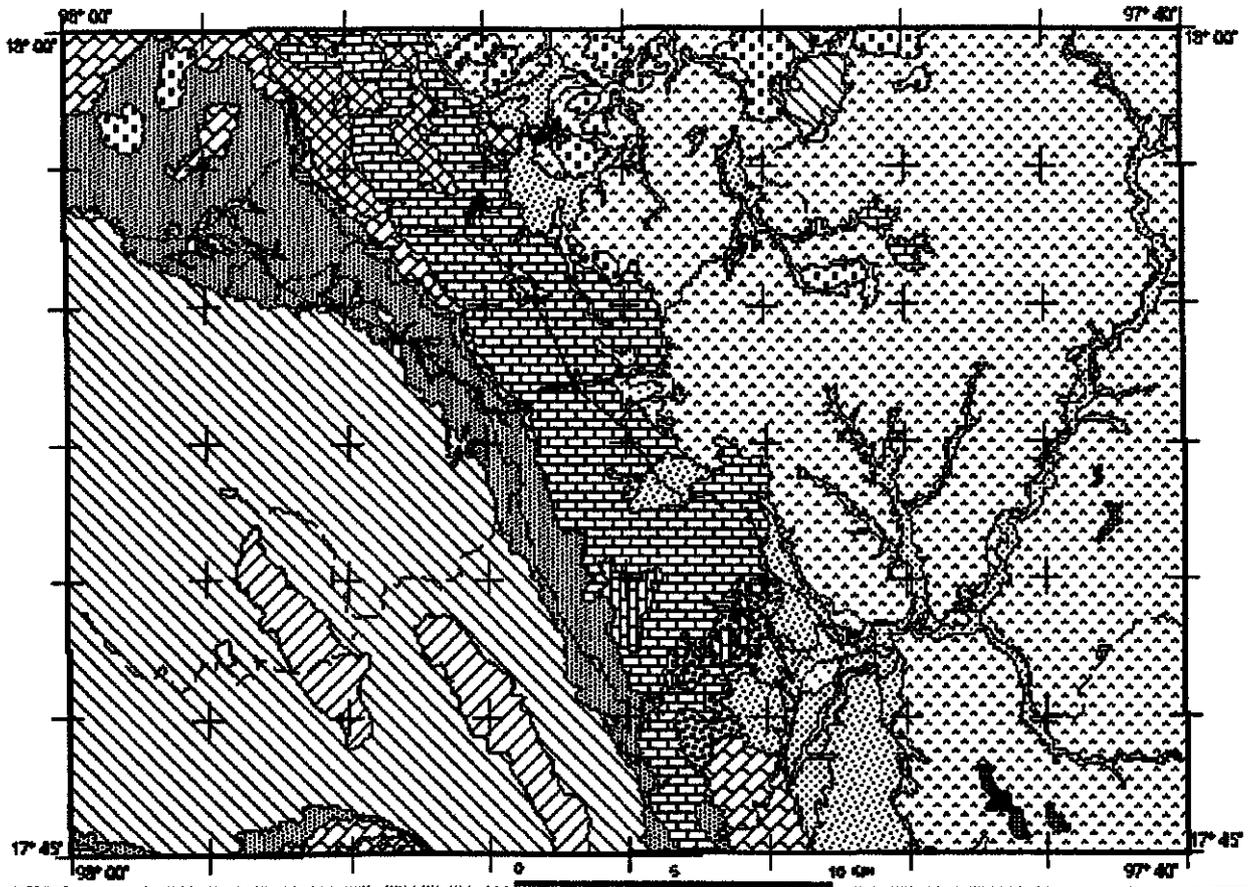
	campo	Tipo de dato	Tamaño en byte
1	Eratema	Carácter	15
2	Sistema	Carácter	24
3	serie	Carácter	3
4	Piso	Carácter	20
5	Clave	Entero	3

5.8.- INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOLÓGICA EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Mediante el uso de un sistema de información geográfica se ha integrado la información obtenida directamente en campo, la información que resultó de la fotointerpretación de fotografías aéreas adquiridas a una altura de 13 km y los productos de la clasificación geológica supervisada de imágenes de satélite. Una vez determinados los límites espaciales de la expresión superficial de los cuerpos de roca y del reconocimiento de patrones fotogeológicos así como las características documentadas, las unidades fotogeológicas se integraron dentro de un solo mapa de tema litológico en la proyección UTM. Las unidades cartografiadas en la escala 1:50,000 tienen suficiente detalle porque se representan unidades menores a 1 km² (Tabla 26). Con el resultado de la integración se obtuvo un mapa litológico (Figura 93) que muestra a las unidades fotogeológicas interpretadas y definidas por su referencia litoestratigráfica.

Número	Unidad	Superficie en km ²
1y 2	Fm. Cosotepec y Granitoides Esperanza	271.29
3	Fm. Tecmazúchil	82.29
4	Limolita Chapultepec	3.67
5	Fm. Chimeco	27.33
6	Fm. Mapache	16.84
7	Caliza Solano	4.69
8	Caliza Papalutla	1.45
9	Fm. Teposcolula	99.98
10	Conglomerado Tamazulapan	6.92
11	Fm. Huajuapán	37.15
12	Toba Llano de Lobos	359.85
13	Andesita Yucudaac	21.61
14	Andesita San Marcos	2.02
15	Grava Camotlán	31.47
16	Arena Xochixtlapilco	8.92
17	Andesita Suchixtlahuaca	0.53
18	Diorita Chilixtlahuaca	0.83

Tabla 26. Tabla de superficie (extensión en kilómetros cuadrados) de las unidades fotointerpretadas.



SIMBOLOGÍA

	Granitoides Esperanza		Conglomerado Temazulapan
	Formación Cosoltepec		Formación Huajuapén
	Formación Tecomsúchil		Tobe Llano de Lobos
	Limolite Chapultepec		Andesita Yucudac
	Formación Chimeco		Andesita San Marcos
	Formación Mepecho		Grese Camotlán
	Caliza Solano		Arene Xochistlahuico
	Caliza Papalutla		Andesita Suchistlahuaca
	Formación Teposcolula		Diorite Chilistlahuaca

Figura 93. Mapa que define la expresión cartográfica de las unidades litoestratigráficas y simbología de los patrones de sombreado. Para mayor detalle ver los mapas del anexo 2

CAPITULO 6

6.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

La definición de unidades determinadas con sensores remotos usando la combinación de fotografía aérea e imágenes de satélite resultó básica para la definición cartográfica de las unidades en la escala 1:50,000. La definición de unidades en trabajos anteriores (Figura 3); esto ha permitido que en el área de estudio se obtuviera la cartografía de unidades del complejo Acatlán y otras unidades mesozoicas con mayor detalle. De las 18 unidades obtenidas en la cartografía geológica, 14 fueron delimitadas por interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite, 2 se delimitaron únicamente gracias al reconocimiento del trabajo como son la Diorita Chilixtlahuaca y la Andesita Suchixtlahuaca, y otras 2 unidades se delimitaron gracias a las variaciones de tono de la respuesta espectral observadas en las imágenes en compuestos del infrarojo medio de la banda 5 (Figura 27) y cercano de la banda 4 (Figura 26) como son las unidades Granitoides Esperanza y Limolita Chapultepec. Con el propósito de evaluar la definición de los límites litológicos obtenidos con la fotointerpretación se llevó a cabo la clasificación supervisada de la imagen de satélite tanto para la verificación de la precisión de los límites como de la obtención de la delimitación de unidades no interpretadas directamente de las fotografías aéreas. Se utilizaron los algoritmos de máxima verosimilitud y mínimas distancias espectrales para obtener resultados que pudieran ser comparados y también evaluados. El análisis de la evaluación de los dos resultados mostró que la selección de compuestos en el espectro infrarojo medio fue adecuada para obtener la mejor separación de clases litológicas. El análisis visual de las imágenes de satélite, en especial el compuesto en los rangos infrarojo medio (banda 5), cercano (banda 4) y rojo visible (3) proporcionaron los mejores resultados de las variaciones de respuesta espectral de las rocas (Figura 26). En el análisis de la clasificación supervisada el compuesto en infrarojo medio (7), cercano (4) y rojo visible (3) proporcionó los mejores resultados de separación de clases (Figura 29); se obtuvo una imagen con una mejor definición visualmente de clases cuando se consideraron 100 campos de entrenamiento. Cuando se utilizaron 30 campos de entrenamiento no se observó una mejor definición de detalles de separación entre las clases pero estadísticamente dió los mejores resultados. El compuesto RGB de las bandas 7,4,3 realzó la respuesta espectral alta de la vegetación densa que contrastó con las zonas desprovistas de vegetación, mientras que el compuesto 5,4,3 resaltó la respuesta espectralmente baja de la humedad de los suelos mostrando a las zonas con mayor humedad como objetos oscuros de baja reflectancia y a los de menor humedad como objetos de tonos claros con mayor reflectancia. La imagen clasificada obtenida con el algoritmo de máxima verosimilitud mostró una mejor separación visual de clases en las rocas sedimentarias detríticas mesozoicas. En la interpretación de la imagen y la clasificación supervisada se obtuvo la definición de dos miembros para la formación Tecomazúchil separados por una discordancia erosional que es una característica que sólo se observó mediante las

imágenes de satélite. La imagen clasificada obtenida con el algoritmo de mínimas distancias espectrales muestra una mejor definición de la separación de las unidades Formación Cosoltepec y Granitoides Esperanza y de los dos miembros de la Formación Tecomazúchil. De esta última, el miembro inferior se constituye principalmente de arenisca arcósica con una extensión superficial restringida a cuerpos aislados en contacto con las rocas de la formación Cosoltepec; comprende en la base arenisca con fragmentos de vidrio y andesita y en la parte intermedia y superior intercalaciones menores de andesita. La respuesta espectral de este miembro es de un cuerpo oscuro de baja reflectancia que se muestra en tonos púrpura azulado. El miembro superior se constituye principalmente de arenisca grauvaca y conglomerado polimíctico; tiene dos variaciones importantes. Hacia el norte se interpretaron tres cuerpos de conglomerados que tienen entre sus elementos fragmentos de arenisca mientras que hacia el sur se interpretaron al menos cinco cuerpos que tienen una mayor proporción de fragmentos de cuarzo y esquisto. La composición de sedimentos indica que hacia el norte fueron erosionadas las rocas del miembro inferior de la formación para ser parte de los sedimentos del miembro superior y hacia el sur la fuente de los sedimentos fueron las rocas de la formación Cosoltepec. Así mismo la flora fósil recolectada predomina en el miembro superior hacia el norte y desaparece hacia el sur. En esta región del complejo Acatlán se habían cartografiado de manera muy general plegamientos que definen ejes de orientación norte-sur. Los resultados obtenidos de la fotointerpretación cualitativa muestran rumbos de foliación de orientación norte-sur, mientras que en la imagen de satélite en el compuesto de infrarojo medio y cercano (Figura 42) se interpretó una antiformal y parte de una sinforma con planos axiales norte-sur. De la fotointerpretación cuantitativa se obtuvieron los rasgos lineales de fracturas con orientación casi perpendicular a los planos antes mencionados; las estructuras se encuentran en la misma dirección tanto en las rocas paleozoicas como en las rocas mesozoicas por lo que se ha interpretado un evento de deformación post mesozoica que fue responsable de dichos patrones de fracturas. Los patrones de fracturamiento en dirección $NE60^{\circ}SW$ son estadísticamente más importantes en las rocas metamórficas paleozoicas que en las rocas mesozoicas. Los arreglos de direcciones $NW50^{\circ}SE$ y $NE45^{\circ}SW$ podrían estar relacionados a eventos de deformación pre mesozoicos. El mayor número de fracturas en rocas sedimentarias tiene una orientación promedio de $NE55^{\circ}SW$ interpretadas como fracturas de compresión y otras en orientación perpendicular pero menos importante de $NW35^{\circ}SE$ interpretada como fracturas de tensión. Las curvas de concentración de polos de estratos de las unidades Chimeco, Mapache, Solano y Teposcolula indican que los planos axiales de las estructuras tienen una orientación comprendida entre $NW40^{\circ}SE$ y $NW25^{\circ}SE$ que es congruente con el conteo estadístico de fracturas. Los esfuerzos que formaron las estructuras anticlinales tuvieron orientación $NW30^{\circ}SE$. En el conteo estadístico de polos de estratos de la formación Tecomazúchil, la dispersión observada se debe a la presencia de una estructura anticlinal relacionada a un evento de deformación pre Oxfordiense y dicha estructura no fue interpretada en las fotografías aéreas

pero fue reconocida en campo entre Santiago Chilixtlahuaca y San José Ayuquila. La estadística de las fracturas de las rocas de la Toba Llano de Lobos muestra patrones muy semejantes a las rocas mesozoicas en la dirección comprendida entre NE20°SW y NE70°SW; las rocas de la unidad se comportaron de manera más frágil y en un mayor número de datos se obtuvo una orientación muy marcada en dirección NW35°SE. Los patrones de fracturas y su presencia en la unidad Toba Llano de Lobos sugiere que probablemente el fracturamiento es oligocénico ya que no se encuentra en la Andesita Yucudaac y la Andesita San Marcos. Las secciones geológicas con posicionamiento GPS resultaron de gran ayuda para la definición de la fotointerpretación y de la clasificación geológica supervisada; su integración mediante un Sistema de Información Geográfica mostró una utilidad muy práctica en la definición y en la comprobación de los límites litológicos obtenidos con sensores remotos. Los espesores calculados son congruentes con los obtenidos en campo y con los reportados en trabajos anteriores (Ortega-Guerrero, 1989; Caballero, 1989) para las rocas sedimentarias mesozoicas. Se ha interpretado para el Jurásico Medio un paleo ambiente de fosa tectónica elongada en la dirección NE-SW afectada localmente por fallas menores en orientación NW30°SE que favoreció el depósito de sedimentos detríticos continentales con fracciones finas en ambientes de llanuras aluviales en la parte norte y fracciones gruesas de ambientes de abanicos aluviales en la parte sur. Al menos dos lineamientos tectónicos pudieron ser interpretados en la imagen de satélite que se expresan de manera irregular y discontinua en la dirección NE-SW en las rocas del complejo Acatlán (Figura 81) y no se extienden en las rocas mesozoicas. Los ambientes y las estructuras interpretadas sugieren un evento de deformación de distensión pre Oxfordiano en la dirección NE-SW. La estructura de fosa fue aprovechada durante el Oxfordiano para el depósito de calizas de ambientes cercanos a costa y las estructuras de los sedimentos (oolitas con núcleos líticos) sugiere la presencia de un relieve alto en los bordes de la fosa en donde se erosionaban las rocas del Complejo Acatlán. Las relaciones estratigráficas reconocidas para la Limolita Chapultepec y la presencia de componentes volcánicos sugiere que dicha unidad no es un miembro de la Formación Tecomazúchil y que representa un ambiente volcánico-sedimentario para el Calloviano. A finales del Oxfordiano probablemente se presentó un retiro de aguas marinas para dar lugar a un ambiente de costero para la Formación Chimeco. Durante el Kimmeridgiano (Formación Mapache) ocurrió una transgresión marina somera que prevaleció en el Tithoniano (Caliza Solano) y que se extendió hasta el Hauteriviano representada por la Caliza Papalutla. Entre el Albiano y el Coniaciano, principalmente durante el Cenomaniano se estableció el ambiente de plataforma para el depósito de las rocas de la Formación Teposcolula. Durante el Paleógeno las unidades mesozoicas y paleozoicas fueron levantadas gradualmente hasta su posición actual. Las estructuras de fallas fueron aprovechadas para el emplazamiento de rocas ígneas intrusivas y la formación de rocas volcánicas piroclásticas en el Paleógeno. En el Neógeno las rocas volcánicas de derrame se formaron sobre ambientes volcánicos preexistentes ya que no se encontraron sobreyaciendo a las rocas metamórficas paleozoicas.

6.1.- CONCLUSIONES

1.- Para la definición cartográfica de las rocas metamórficas de esquisto, esquisto-filita de la Formación Cosoltepec fueron de gran utilidad las imágenes de satélite en compuestos que consideran la porción del infrarojo del espectro electromagnético; la unidad de Granitoides Esperanza pudo ser delimitada con base a la diferencia de respuesta espectral en un compuesto de imagen de satélite en la combinación de bandas del infrarojo medio, cercano y visible.

2.- En el trabajo de campo se observó que la Formación Tecamazúchil tiene al menos dos miembros; uno de ellos, el más antiguo, es de arenisca arcósica que se encuentra deformado en pliegues de poca extensión y el más joven, de arenisca grauvaca, lo sobreyace discordante. Ambos elementos a su vez están inclinados por una deformación postcretácica. En las fotografías no fue posible diferenciar entre ellas pero en los compuestos de infrarojo en las imágenes de satélite, se observó una diferencia significativa de respuesta espectral.

3.- Si bien la unidad Tecamazúchil está constituida de una variedad de rocas detríticas, la abundancia de la arenisca y de conglomerado en menor proporción son la parte sustantiva de la formación. En fotografías aéreas se identificaron al menos 5 cuerpos de conglomerado (probablemente sean 8) en la región de San Jerónimo Silacayoapilla y únicamente 3 (probablemente sean 5) en la región de Santiago Chilixtlahuaca sin que se hayan separado por su falta de continuidad lateral; la interpretación paleogeográfica de éstos cuerpos es la distribución de abanicos aluviales dentro del registro estratigráfico de la formación.

4.- En la fotografía aérea se identificó una unidad de limolita aquí llamada informalmente Limolita Chapultepec que separa de manera discordante a las formaciones Tecamazúchil y Chimeco; la presencia de esta unidad es significativa porque marca un límite espacial y temporal en el Calloviano para la formación Tecamazúchil y no debe ser considerada parte de la misma.

5.- La presencia de elementos volcánicos dentro de la Limolita Chapultepec y particularmente en la cima de la misma sugiere un evento volcánico asociado a la erosión de las rocas de la formación Tecamazúchil lo que aporta una interpretación tectónica para finales del Jurásico Medio.

6.- Las rocas de la formación Chimeco tienen una textura oolítica en donde los núcleos de las oolitas son de cuarzo, biotita, feldespato y minerales opacos que sugieren la influencia de material detrítico que provino del complejo Acatlán, el cual estuvo expuesto a la erosión y generó sedimentos durante el Oxfordiano. Aunque aún no se tiene soporte paleontológico se observaron en la cima de la formación posibles icnitas que sugieren la exposición aérea antes de ser cubierta por las rocas suprayacentes de la Formación Mapache.

7.- Las rocas de la Formación Mapache se localizan en la porción central del área y al sur, lo que sugiere una cuenca continua de sedimentación de carbonatos y sedimentos detríticos finos durante el Jurásico Superior, durante el Kimmeridgiano y probablemente hasta el Tithoniano. Entre Huajuapán y San Jerónimo Silacayoapilla se interpretó una unidad de caliza definida aquí como Caliza Solano que por su posición estratigráfica y sus características litológicas parece ser parte de

la Formación Mapache aunque su limitada expresión superficial no permite identificar una continuidad lateral con la misma.

8.- Al sur del área se identificó de manera muy reducida a las rocas de la unidad denominada Caliza Papalutla, misma que tiene variaciones de arenisca calcárea en la base y limolita calcárea en la cima; la unidad predominante es caliza arcillosa depositada en una cuenca que se extendió hacia el sur, en la región de Tezoatlán y Tonalá en donde forma parte del anticlinorio de Diquiyú; la presencia de fósiles indica una edad Berriasiano Temprano al Hauteriviano Temprano.

9.- La expresión superficial de las rocas de la Formación Teposcolula sugiere el flanco de una estructura anticlinal mayor que se extendió hasta el sur de Tecamatlán en donde se encuentra la contraparte de la estructura. La unidad consiste principalmente de caliza micrítica y presenta variaciones importantes en composición y textura que muestran diferencias respecto a la formación Morelos. La edad documentada de la microfauna fósil dentro del área de estudio es el Cenomaniano.

10.- No se determinó con sensores remotos la presencia de rocas jurásicas o cretácicas sobre las rocas metamórficas paleozoicas para apoyar la interpretación de una estructura de anticlinorio; se interpreta un levantamiento regional con la presencia de fallamiento inverso local y cabalgante hacia el poniente en las rocas paleozoicas que aparentemente determina la dirección de planos axiales de pliegues orientados norte-sur en las rocas mesozoicas. De ser así el basamento parece estar involucrado en la deformación del Mesozoico durante el Paleógeno.

11.- Las rocas de las unidades Diorita Chilixtlahuaca y la Andesita Suchixtlahuaca solo pudieron ser definidas apropiadamente con el trabajo de campo en donde se determinaron las relaciones cortantes por intrusión con las rocas mesozoicas. La primera está relacionada a la deformación de rocas del Jurásico medio y la segunda a la deformación de rocas cretácicas al menos a finales del Mesozoico.

12.- La presencia de fragmentos de andesita junto con caliza, cuarzo y esquistos del Conglomerado Tamazulapan apoyan la interpretación de volcanismo Mesozoico y su exposición a la erosión durante el Eoceno.

13.- Las rocas de la unidad Toba Llano de Lobos con diferentes grados de piroconsolidación son esencialmente tobas líticas andesíticas; la delimitación de las mismas con sensores remotos determinó al menos 5 cuerpos de toba no piroconsolidada y otros de toba piroconsolidada, andesita y basalto sin que se pudiera definir su continuidad lateral para ser descritos como miembros o capas. A través de la interpretación de una imagen de satélite no se pudo determinar la separación de dichas capas ni tampoco con el proceso de clasificación supervisada porque la respuesta espectral no muestra características contrastantes. Las características fotogeológicas y la respuesta espectral de las tobas sin consolidación sugieren que la Toba Cerro Verde podría ser parte de la Toba Llano de Lobos lo que determinaría un evento volcánico único y extenso durante el Oligoceno.

14.- La interpretación geológica de los sensores remotos muestra que la Andesita Yucudaac se encuentra en las partes topográficas bajas, en estructuras cónicas aisladas y sobrepuesta a la Toba Llano de Lobos y a las rocas sedimentarias detríticas jurásicas; la andesita San Marcos solo pudo ser reconocida de manera aislada en las partes topográficas altas sobrepuesta a la Toba Llano de Lobos con lo que se interpretan dos eventos volcánicos, el primero definido para el Mioceno y el segundo para el Plioceno.

15.- La clasificación supervisada de la imagen de satélite solo permitió definir con suficiente detalle a 14 de las 18 unidades litológicas; la selección de semillas para la definición de campos de entrenamiento dió mejor resultado con el conocimiento previo de la distribución espacial de las unidades litológicas; sin embargo, aún con la cuidadosa selección de semillas y campos de entrenamiento la clasificación no llegó a tener una precisión mayor al 80%. Sin embargo este porcentaje de precisión, la clasificación constituye un valioso medio de extracción de información cuantitativa de diferencias litológicas que sirven para apoyar la fotointerpretación geológica y podría dar mejores resultados en otras escalas cartográficas o bien con el uso de imágenes de mayor resolución espacial y espectral.

16.- El uso de algoritmos de clasificación de máxima verosimilitud definió con mejor detalle la separación de clases correspondientes a las rocas paleozoicas y mesozoicas; el algoritmo de mínimas distancias espectrales permitió separar clases correspondientes entre las rocas volcánicas piroconsolidadas y las rocas detríticas y materiales sin consolidar del Cenozoico. Los algoritmos utilizados de la clasificación supervisada fueron evaluados como prácticos y útiles para la clasificación cuantitativa al obtener las clases o jerarquías de la mayor parte de las unidades estratigráficas.

17.- La definición de secciones del trabajo campo apoyadas con el posicionamiento GPS dan gran precisión en la ubicación espacial de las mismas y apoyan la interpretación de las imágenes clasificadas así como las vistas en perspectiva obtenidas. La ubicación espacial de las secciones permitió apoyar en gran medida la interpretación con sensores remotos y la delimitación de las unidades litoestratigráficas.

18.- La fotogeología cuantitativa y el trabajo de campo proporcionaron los medios para definir las direcciones de fracturamiento y la estadísticas de rumbos y echados de rocas sedimentarias así como el cálculo de espesores de algunas unidades que es muy semejante a los reportados en otros trabajos. La dirección principal de fracturamiento es NE60°SW y está relacionado a esfuerzos de compresión al menos hasta el Oligoceno porque se encuentra principalmente en las rocas volcánicas de la Toba Llano de Lobos. La estadística de las curvas de concentración de polos al menos para rocas de unidades precenozoicas muestra planos de estructuras orientadas principalmente en la dirección NW30°SE que apoya la interpretación de estructuras con sensores remotos en esa orientación.

19.- El uso de las herramientas de un sistema de información geográfica permitió integrar digitalmente toda la información geológica en forma de diferentes capas que proporcionan una visión práctica para analizar y comparar con las fuentes de sensores remotos. La generación de información a partir de fotografías aéreas y de imágenes de satélite ha favorecido su integración dentro de un formato cartográfico lo que ha permitido validar y evaluar la fuentes de información y la calidad de la información obtenida mediante sensores remotos.

20.- Los atributos litológicos, litoestratigráficos y cronoestratigráficos mediante la definición de campos de una base de datos ha permitido tener una mejor descripción de cada una de las unidades interpretadas con los sensores remotos considerados. La extensión superficial de las rocas volcánicas cenozoicas (40%) es mayor que la extensión de las rocas metamórficas paleozoicas en su conjunto (28%) y que la extensión de las rocas sedimentarias mesozoicas (24%).

21.- Con la disponibilidad de información digital en un sistema que permite la edición y actualización de los mismos así como la generación de cartas temáticas a partir de los atributos será parte importante del trabajo geológico en un futuro cercano.

22.- Los resultados de la construcción de la cartografía geológica muestran que la metodológica de un Sistema de Información Geográfica utilizada es viable para otras áreas y proyectos de cartografía geológica.

23.- El diseño y la construcción de una base de datos geológica son componentes importantes para la construcción de un sistema de consulta mediante un lenguaje de programación que permite desplegar la información espacial y la consulta de los atributos de los elementos geológicos; la aplicación desarrollada en este trabajo tiene esa funcionalidad.

6.2.- RECOMENDACIONES

El conocimiento geológico de una región se basa en gran parte de las secciones estructurales obtenidas en campo las que son parte importante en la definición de unidades formales litoestratigráficas. Gran parte de ellas carecen de un atributo de posicionamiento que permita ubicarlas de manera práctica en un mapa por lo que no son fácilmente susceptibles de verificación o replicación. Las herramientas de un Sistema de Información Geográfica enfocadas hacia su uso en geología son un camino práctico para la construcción de cartografía geológica con la precisión de la escala 1:50,000. Es recomendable llevar las actividades geológicas a la actitud y la disciplina de registrar los atributos espaciales que permiten documentar la información cartográficamente a fin de simplificar las descripciones de datos y resultados y permita a otros usuarios la consulta y la actualización de la información. Esta actividad no debe ser dependiente de una tecnología sino de una metodología clara y sencilla que pueda ser usada y replicada por otros. La tecnología de sistemas de información en ambientes de cómputo está evolucionando rápidamente y en algún momento los datos disponible podrán ser utilizados en dichos sistemas solo si poseen un atributo

espacial que permita ubicar a los rasgos y objetos geológicos en la superficie terrestre. La base de datos que resultó de este trabajo puede ser solicitada por escrito directamente al autor a la dirección de correo electrónico juribe@telmex.com.mx o bien al teléfono 56-57-83-32. Los archivos digitales pueden ser entregados en formato estándar de intercambio DXF o bien en formatos de sistemas GIS comerciales, en disco compacto o bien en discos flexibles. La información digital es obra intelectual del autor y no debe ser comercializada o redistribuida ya que será entregada para uso exclusivo en investigación y docencia. De igual manera el documento de esta tesis puede ser solicitado en formato digital para procesador de palabras Word 6.0 en sistema operativo Windows 95 o mayor; tiene un tamaño de 8 Mb e incluye las figuras en blanco y negro y en color.

ANEXO 1

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los Sistemas de Información Geográfica son conocidos en la literatura técnica como **GIS** (acrónimo de las palabras en Inglés *Geographic Information System*) y es encontrado en la literatura castellana también con el acrónimo **SIG** (*Sistemas de Información Geográfica*). Desde el punto de vista conceptual tuvieron su origen en Canadá en la década de los años '60 para la evaluación de recursos naturales. En México se introdujeron en 1985 con aplicaciones catastrales y posteriormente se usaron para la integración de información digital en la evaluación y conservación de recursos naturales. Desde principios de los 90's el diseño conceptual de un Sistema de Información Geográfica Integrado (SIGI) que comprende la tecnología, información y métodos de trabajo con sensores remotos, base de datos geográfica (Bocco, et al., 1991) y datos del Sistema de Posicionamiento Global (Carturla, 1987) fue establecido como una contribución importante para proyectos multidisciplinarios en Ciencias de la Tierra.

BREVE HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

El primer sistema de información geográfica fue desarrollado en 1964 en el proyecto "Canada Land Inventory" denominado Canadian Geographic Information System (CGIS) que fue diseñado para almacenar mapas digitales y atributos terrestres de fácil acceso (ERDAS, 1993) y para analizar muchos niveles de datos a través de sobreposiciones y producir nuevas capas de información. Otro sistema similar fue desarrollado en 1967 para planeación de desarrollo urbano y fue llamado "The New York Land Use and Natural Resources Information System" (Smith, et. al, 1987). Los SIG tuvieron un mayor auge en la década de los '70 en Estados Unidos de Norteamérica (Coppock y Rhind, 1991) en ciertas organizaciones gubernamentales como son la oficina de censos (United States Bureau of Census), el servicio geológico (United States of Geological Survey) en unidades de cartografía experimental (p. ej. Harvard Laboratory for Computer Graphics) y en empresas privadas como es el caso del Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales (ESRI, 1992). Con el desarrollo de las tecnologías de cómputo los SIG evolucionaron para ser una técnica viable en la evaluación de ambientes complejos y multidisciplinarios para la producción de datos a nivel nacional y global (Duane, 1990, Star y Estes, 1994).

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA DE HUAJUAPAN DE LEÓN.

Un sistema de información geológica es una aplicación desarrollada con un programa de cómputo para desplegar y consultar información geológica de un área en particular. Este sistema es el medio a través del cual la información geológica generada con sensores remotos integrada bajo una estructura cartográfica y con atributos propios para cada tema pueden ser visualizados interactivamente como capas de información y se tiene la posibilidad de ver más detalle según se

requiera (Walker y Miller, 1990). Este tipo de enfoques es útil para consultar información geológica de un área en particular, no con la intención de sustituir la información disponible en mapas editados o publicados sino contribuir a la disponibilidad de información en un medio informático para usuarios de Ciencias de la Tierra. Si bien la información aquí presentada es del área de una carta escala 1:50,000, la definición de un diseño permite que pueda ser extendido a otras áreas adyacentes para tener una visión regional de la distribución espacial de unidades litológicas, litoestratigráficas, de las estructuras y los recursos geológicos del sur de México.

DISEÑO

El diseño considera la manera en que se presenta la información de una forma sencilla y práctica, así el sistema tiene una barra principal con menús de opciones para abrir un archivo, desplegar la información topográfica, las fotografías aéreas, las imágenes de satélite, la información geológica y menús de herramientas y ayuda. La información espacial de la base de datos geológica (Figura 94) son desplegados en una ventana llamada de despliegue gráfico que es donde la información puede ser desplegada y consultada en cuanto a sus atributos.

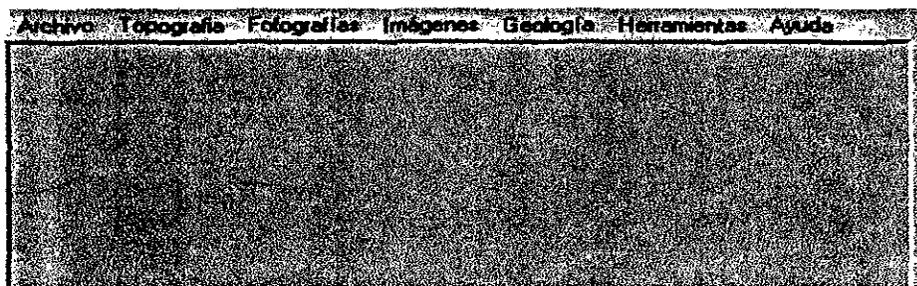


Figura 94. Diseño de sistema de información geológica que muestra en la parte superior la barra principal y en la parte inferior la ventana de despliegue gráfico.

MENÚ DE OPCIONES

En el menú de archivo (Figura 95) se tienen diferentes opciones para abrir o cerrar individualmente un archivo como son:

- Abrir un mapa
- Cerrar un mapa
- Salvar la ventana como mapa de bits
- Imprimir el mapa de la ventana
- Salir del sistema

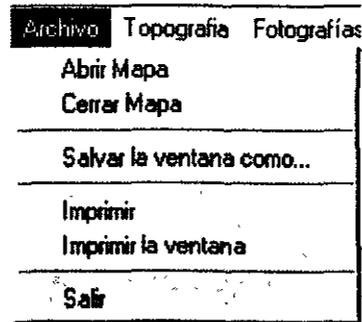


Figura 95. Opciones del menú de archivo que es el primer menú de la barra principal.

En el menú de topografía (Figura 96) se puede desplegar la estructura cartográfica como es:

- Canevá
- Cuadrícula
- Gradícula

La información de altimetría como es:

- Curvas de nivel
- Modelo digital topográfico DTM
- Modelo digital de elevación DEM
- Modelo digital de relieve

La información de planimetría como es:

- Poblaciones
- Drenaje fluvial
- Ríos y arroyos
- Vías de comunicación
- Toponimia

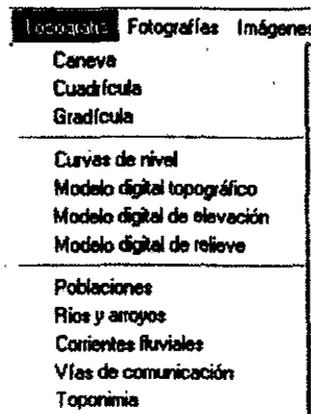


Figura 96. Opciones del menú de topografía en donde se selecciona la estructura cartográfica, la altimetría y la planimetría.

En el menú de fotografía (Figura 97) se tienen las opciones para desplegar cada una de las fotografías aéreas, así como las fotografías geológicamente interpretadas como son:

- Línea 1
- Línea 2
- Línea 3

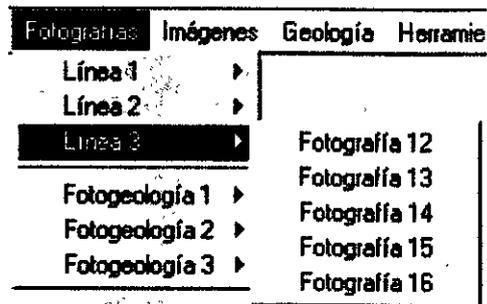


Figura 97. Opciones del menú de fotografías donde se tiene la posibilidad de ver una fotografía aérea o un mosaico de fotografías; puede también desplegarse las fotointerpretaciones geológicas.

En el menú de imágenes (Figura 98) se tienen opciones para desplegar las imágenes de satélite por bandas, en compuesto, clasificadas o bien las vistas en perspectivas como son:

- Imagen de satélite en banda 3
- Imagen de satélite en banda 4
- Imagen de satélite en banda 5
- Imagen de satélite en banda 7
- Imagen de satélite en compuesto 5,4,3
- Imagen de satélite en compuesto 7,4,3
- Imagen de clasificada
- Imágenes en perspectiva

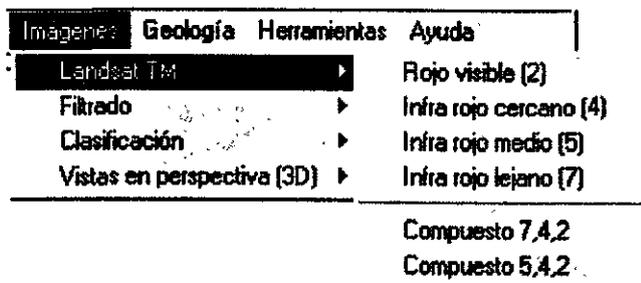


Figura 98. Opciones del menú de imágenes en donde es posible seleccionar una banda de una imagen, un compuesto de bandas predefinido, una imagen clasificada o bien una imagen es perspectiva.

En el menú de geología (Figura 99) se tienen opciones para desplegar la información geológica con sus atributos como son:

- Litología
- Litoestratigrafía
- Cronoestratigrafía
- Secciones geológicas
- Columna estratigráfica

- Petrografía
- Rumbos y echados
- Fallas y fracturas
- Estadística de estructuras

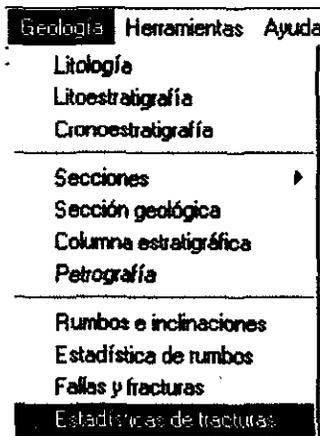


Figura 99. Opciones del menú de geología en donde se puede seleccionar la litología, la litoestratigrafía, las secciones geológicas, las estructuras y su análisis estadístico así como elementos de referencia geológica como la columna estratigráfica y la sección geológica

El menú de herramientas (Figura 100) permite tener control de la información dentro de la ventana de despliegue gráfico y diferentes opciones para la consulta de atributos como:

- Acercar
- Alejar
- Desplazar
- Cursor
- Control de mapas
- Consulta SQL
- Consulta gráfica por selección de un punto

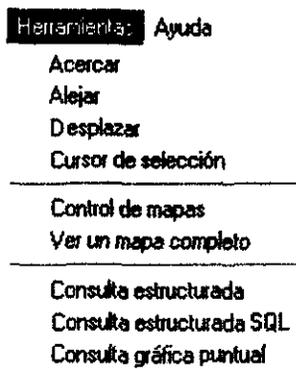


Figura 100. Opciones del menú de herramientas que permiten tener mayor o menor detalle, activar o desactivar una capa de información y definir la sintaxis de una consulta de los atributos o bien consultar gráficamente en la ventana de despliegue unos elementos geológicos.

Por último el menú de ayuda tiene las opciones para describir de manera muy sencilla en que consiste el sistema y la descripción genérica de los menús.

FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA.

El sistema se desarrolló en el lenguaje de programación Visual Basic y utiliza las funciones de un sistema de información geográfica GIS (MapInfo) de tal manera que es sencillo de utilizar y solo se requiere seleccionar una opción de un menú para visualizar en la ventana de despliegue un mapa temático. También se puede seleccionar del menú de herramientas la opción de consulta puntual para tener una ventana que muestra los atributos de un elemento seleccionado con el cursor (Figura 101).

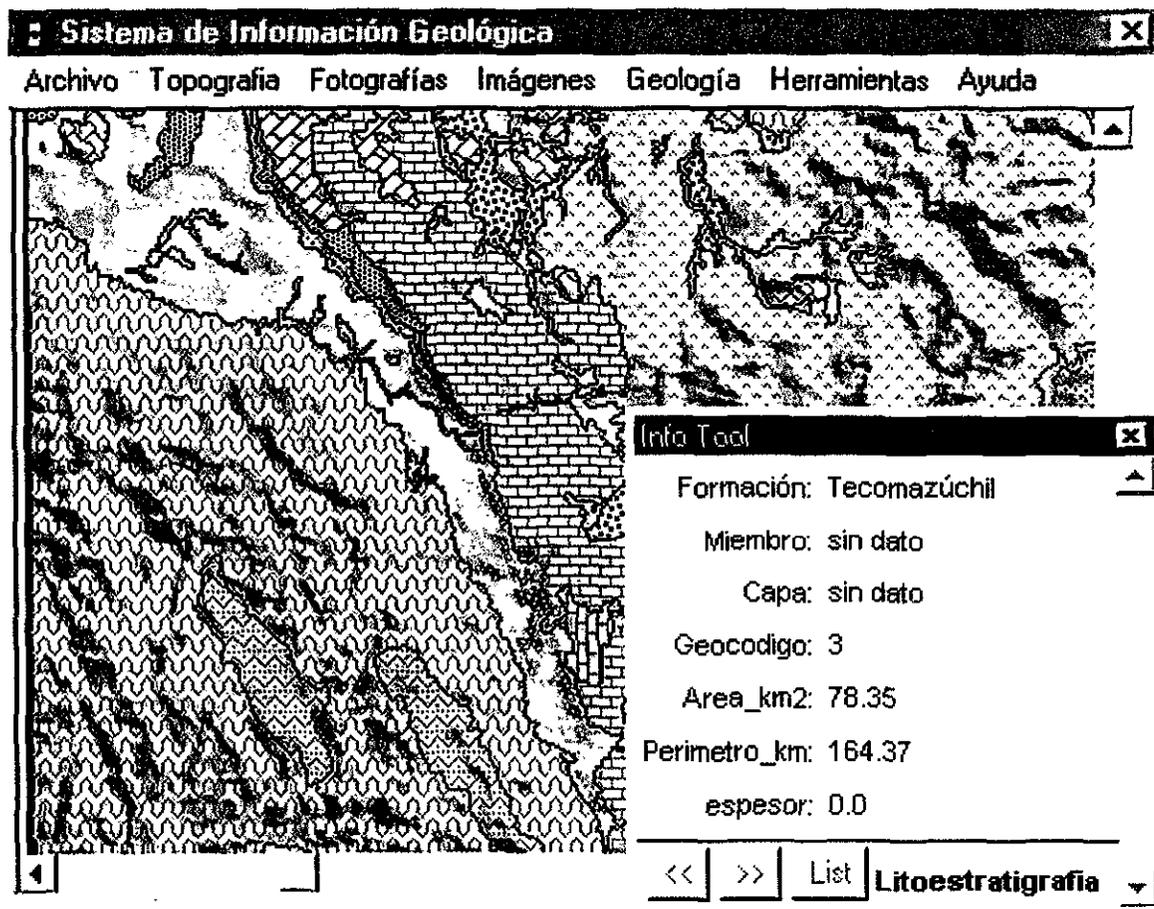


Figura101. Ventana del Sistema de Información Geológica. Nótese la barra principal de menús en la parte superior, una ventana de despliegue en donde se muestra un modelo en relieve, la carta litoestratigráfica y una ventana de información de los atributos de una unidad consultada

ANEXO 2

Programa fuente de aplicación desarrollada en Visual Basic.

Ventana principal

```
Dim MAPA As Object
Private Sub Command1_Click()
End
End Sub

Private Sub Form_Load()
Set MAPA = CreateObject("MapInfo.application")
' configurando la liga ole de Visual basic con Map Info (Sistema GIS)
MAPA.do "Set application window " & Form1.hWnd
MAPA.do "Set window Info Parent " & Form1.hWnd
' definición del a ventana de información
MAPA.do "Set window Info ReadOnly"
MAPA.do "set next document parent " & Picture1.hWnd & " Style 1"
MAPA.do "Dim win_id As Integer"
MAPA.do "win_id = frontwindow()"
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Hoja.tab"" interactive "
MAPA.do "Map from hoja"
End Sub
```

Menu "Archivo"

```
Private Sub Abrir_mapa_Click()
MAPA.do "Run menu command 102"
End Sub
```

```
Private Sub Cerrar_mapa_Click()
MAPA.do "Run menu command 103"
End Sub
```

```
Private Sub salvaventana_Click()
MAPA.do "Run menu command 609"
End Sub
```

```
Private Sub Imprimir_Click()
MAPA.do "Run menu command 112"
End Sub
```

```
Private Sub printwin_Click()
MAPA.do "printWin"
End Sub
```

```
Private Sub salir_Click(Index As Integer)
End
End Sub
```

Menu "Topografía"

```
Private Sub mapa1_Click()
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Caneva.tab"" interactive "
MAPA.do "Map from caneva"
```

End Sub

```
Private Sub mapa2_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Cuadrícula.tab"" interactive "  
MAPA.do "Add Map auto layer cuadrícula"  
End Sub
```

```
Private Sub mapa3_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Gradícula"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer gradícula"  
End Sub
```

```
Private Sub cur_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\Curvas"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer curvas"  
End Sub
```

```
Private Sub mdt_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Altimetría"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer altimetría"  
End Sub
```

```
Private Sub dem_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\Dem"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer dem"  
End Sub
```

```
Private Sub mdr_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Relieve"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer relieve"  
End Sub
```

```
Private Sub corr_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Corrientes"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer corrientes"  
End Sub
```

```
Private Sub rio_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Ríos"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer ríos"  
End Sub
```

```
Private Sub pob_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Poblaciones"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer poblaciones"  
End Sub
```

```
Private Sub via_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Vías"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Vías"  
End Sub
```

Menu de fotografías

```
Private Sub foto1_Click()
```

```
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\1"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f1"  
End Sub
```

```
Private Sub foto2_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\2"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f2"  
End Sub
```

```
Private Sub foto3_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\3"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f3"  
End Sub
```

```
Private Sub foto4_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\4"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f4"  
End Sub
```

```
Private Sub foto5_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\5"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f5"  
End Sub
```

```
Private Sub foto6_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\6"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f6"  
End Sub
```

```
Private Sub foto7_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\7"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f7"  
End Sub
```

```
Private Sub foto8_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\8"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f8"  
End Sub
```

```
Private Sub foto9_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\9"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f9"  
End Sub
```

```
Private Sub foto10_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\10"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f10"  
End Sub
```

```
Private Sub foto11_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\11"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f11"  
End Sub
```

```
Private Sub foto12_Click()
```

```
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxacalf12"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f12"  
End Sub
```

```
Private Sub foto13_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxacalf13"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f13"  
End Sub
```

```
Private Sub foto14_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxacalf14"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f14"  
End Sub
```

```
Private Sub foto15_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxacalf15"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f15"  
End Sub
```

```
Private Sub foto16_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxacalf16"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer f16"  
End Sub
```

```
Private Sub fotoint1_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxacalfgeo1"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer fgeo1"  
End Sub
```

```
Private Sub fotoint2_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxacalfgeo2"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer fgeo2"  
End Sub
```

```
Private Sub fotoint3_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxacalfgeo3"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer fgeo3"  
End Sub
```

```
Private Sub fotoint4_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxacalfgeo4"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer fgeo4"  
End Sub
```

```
Private Sub fotoint5_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxacalfgeo5"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer fgeo5"  
End Sub
```

```
Private Sub fotoint6_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxacalfgeo6"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer fgeo6"  
End Sub
```

```
Private Sub fotoint7_Click()
```

```
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\fgeo7"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer fgeo7"  
End Sub
```

```
Private Sub fotoint8_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\fgeo8"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer fgeo8"  
End Sub
```

```
Private Sub fotoint9_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\fgeo9"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer fgeo9"  
End Sub
```

Menu de imagenes

```
Private Sub img1_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\banda3"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer banda3"  
End Sub
```

```
Private Sub img2_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\banda4"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer banda4"  
End Sub
```

```
Private Sub img3_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\banda5"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer banda5"  
End Sub
```

```
Private Sub img4_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\banda7"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer banda7"  
End Sub
```

```
Private Sub img5_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Landsat_7_4_3"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Landsat_7_4_3"  
End Sub
```

```
Private Sub img6_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Landsat_5_4_3"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Landsat_5_4_3"  
End Sub
```

```
Private Sub clas1_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\Clasmax1"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer clasmax1"  
End Sub
```

```
Private Sub clas2_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\Clasmind"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Clasmind"  
End Sub
```

```
Private Sub filtro1_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\filtroTM.tab"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer filtroTM"  
End Sub
```

```
Private Sub vista1_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Vista1"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Vista1"  
End Sub
```

```
Private Sub vista2_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\Vista2"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Vista2"  
End Sub
```

```
Private Sub vista3_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\Vista3"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Vista3"  
End Sub
```

```
Private Sub vista4_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\Vista4"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Vista4"  
End Sub
```

```
Private Sub vista5_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\Vista5"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Vista5"  
End Sub
```

```
Private Sub vista6_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\Vista6"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Vista6"  
End Sub
```

```
Private Sub vista7_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\Vista7"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Vista7"  
End Sub
```

Menu de Geología

```
Private Sub geo1_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Litologia"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Litologia"  
End Sub
```

```
Private Sub geo2_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Litoestratigrafia"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Litoestratigrafia"  
End Sub
```

```
Private Sub geo3_Click()  
MAPA.do "Open table ""c:proyectogis\oaxaca\Cronoestratigrafia"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer cronoestratigrafia"  
End Sub
```

```
Private Sub geo4_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Rumbos"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer rumbos"  
End Sub
```

```
Private Sub colgeo_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Columna"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer columna"  
End Sub
```

```
Private Sub geo5_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Estructuras"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer estructuras"  
End Sub
```

```
Private Sub geosec1_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Seccion1"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer seccion1"  
End Sub
```

```
Private Sub geosec2_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Seccion2"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer seccion2"  
End Sub
```

```
Private Sub geosec3_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Seccion3"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer seccion3"  
End Sub
```

```
Private Sub geosec4_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Seccion4"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer seccion4"  
End Sub
```

```
Private Sub geosec5_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Seccion5"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer seccion5"  
End Sub
```

```
Private Sub geosec6_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Seccion6"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer seccion6"  
End Sub
```

```
Private Sub geosec7_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Seccion7"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer seccion7"  
End Sub
```

```
Private Sub geosec8_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:proyectogis\oaxaca\Seccion8"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer seccion8"  
End Sub
```

```
Private Sub geosec9_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:\proyectogis\oaxaca\Seccion9"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer seccion9"  
End Sub
```

```
Private Sub secgeo_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:\proyectogis\oaxaca\Seccion"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer seccion"  
End Sub
```

```
Private Sub menurum_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:\proyectogis\oaxaca\Estadistica1"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer estadistica1"  
End Sub
```

```
Private Sub secgeo_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:\proyectogis\oaxaca\Columna"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer columna"  
End Sub
```

```
Private Sub menufrac_Click()  
MAPA.do "Open table ""E:\proyectogis\oaxaca\Estadistica2"" interactive "  
MAPA.do "Add map auto layer Estadistica2"  
End Sub
```

Menu de herramientas

```
Private Sub ZoomIn_Click()  
MAPA.do "Run menu command 1705"  
End Sub
```

```
Private Sub ZoomOut_Click()  
MAPA.do "Run menu command 1706"  
End Sub
```

```
Private Sub Seleccion_Click()  
MAPA.do "Run menu command 1701"  
End Sub
```

```
Private Sub Graber_Click()  
MAPA.do "Run menu command 1702"  
End Sub
```

```
Private Sub vermapa_Click()  
MAPA.do "Run menu command 802"  
End Sub
```

```
Private Sub vertodo_Click()  
MAPA.do "Run menu command 807"  
End Sub
```

```
Private Sub capas_Click()  
MAPA do "Run menu command 801"  
End Sub
```

```
Private Sub consulta1_Click()  
MAPA.do "Run menu command 301"  
End Sub
```

```
Private Sub consulta2_Click()  
MAPA.do "Run menu command 302"  
End Sub
```

```
Private Sub consulta3_Click()  
MAPA.do "Run menu command 1703"  
End Sub
```

```
Private Sub consulta4_Click()  
MAPA.do "Run menu command 1707"  
End Sub
```

Menu de ayuda

```
Private Sub ayuda1_Click()  
Dim ayuda As New Form4  
'Abre la ventana de ayuda  
ayuda.Show  
End Sub
```

```
Private Sub ayuda2_Click()  
Dim derechos As New Form3  
'Abre la ventana de derechos  
derechos.Show  
End Sub
```

ANEXO 3

Ejemplos de mapas generados con el sistema GIS.

1. Carta de altimetría y planimetría
2. Carta de relieve, altimetría y planimetría
3. Relieve y unidades de litología
4. Mosaico de fotografías aéreas y unidades litológicas
5. Relieve y unidades litoestratigráficas
6. Unidades litoestratigráficas e imagen de satélite landsat
7. Unidades litológicas y estructuras geológicas.
8. Unidades litoestratigráficas, sección geológica y columna estratigráfica

```
Private Sub consulta1_Click()  
MAPA.do "Run menu command 301"  
End Sub
```

```
Private Sub consulta2_Click()  
MAPA.do "Run menu command 302"  
End Sub
```

```
Private Sub consulta3_Click()  
MAPA.do "Run menu command 1703"  
End Sub
```

```
Private Sub consulta4_Click()  
MAPA.do "Run menu command 1707"  
End Sub
```

Menu de ayuda

```
Private Sub ayuda1_Click()  
Dim ayuda As New Form4  
'Abre la ventana de ayuda  
ayuda.Show  
End Sub
```

```
Private Sub ayuda2_Click()  
Dim derechos As New Form3  
'Abre la ventana de derechos  
derechos.Show  
End Sub
```

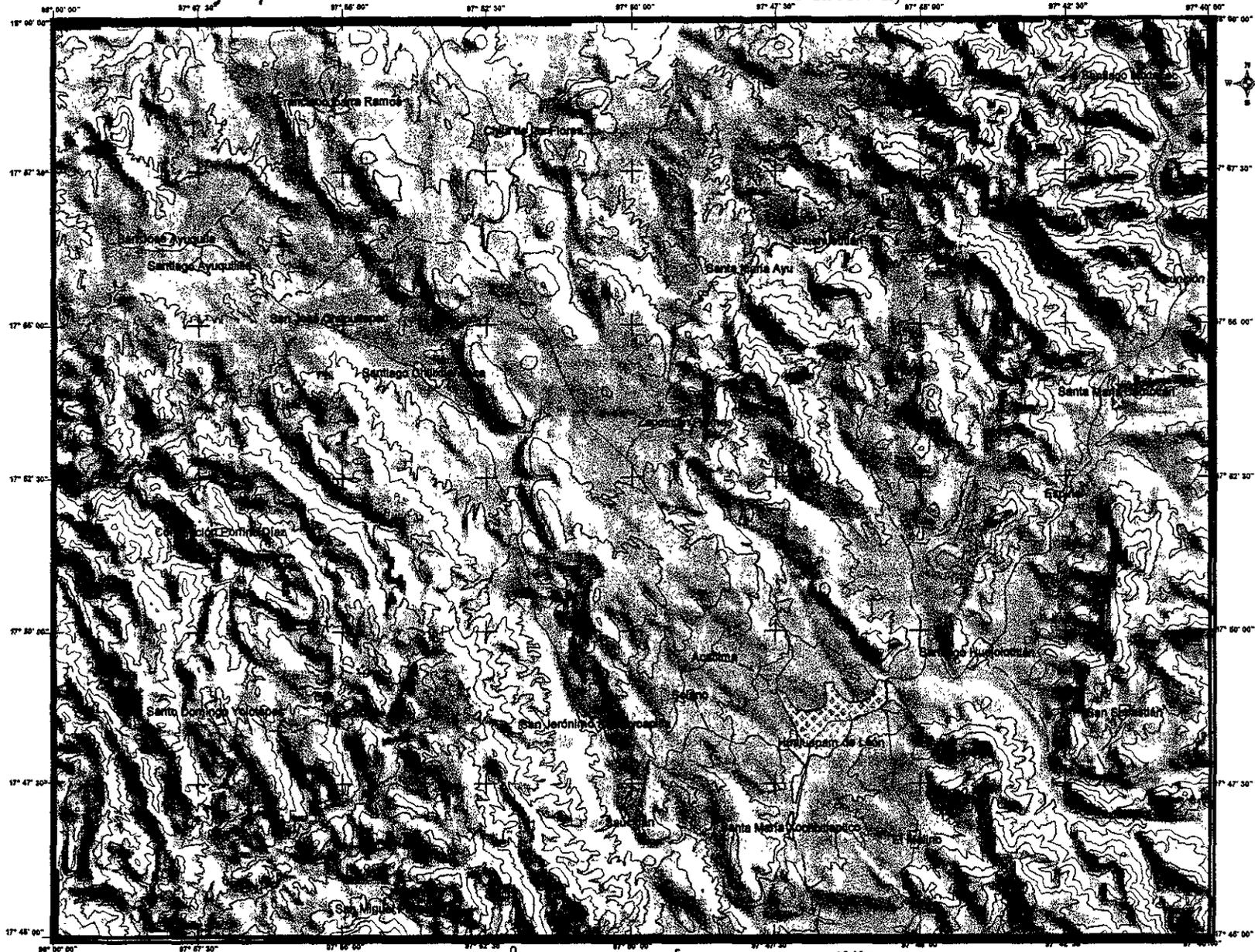
ANEXO 3

Ejemplos de mapas generados con el sistema GIS.

1. Carta de altimetría y planimetría
2. Carta de relieve, altimetría y planimetría
3. Relieve y unidades de litología
4. Mosaico de fotografías aéreas y unidades litológicas
5. Relieve y unidades litoestratigráficas
6. Unidades litoestratigráficas e imagen de satélite landsat
7. Unidades litológicas y estructuras geológicas.
8. Unidades litoestratigráficas, sección geológica y columna estratigráfica

Huajuapam de León

Relieve, altimetría y planimetría E - 14 - D - 14 Oaxaca, México.



SIMBOLOGÍA

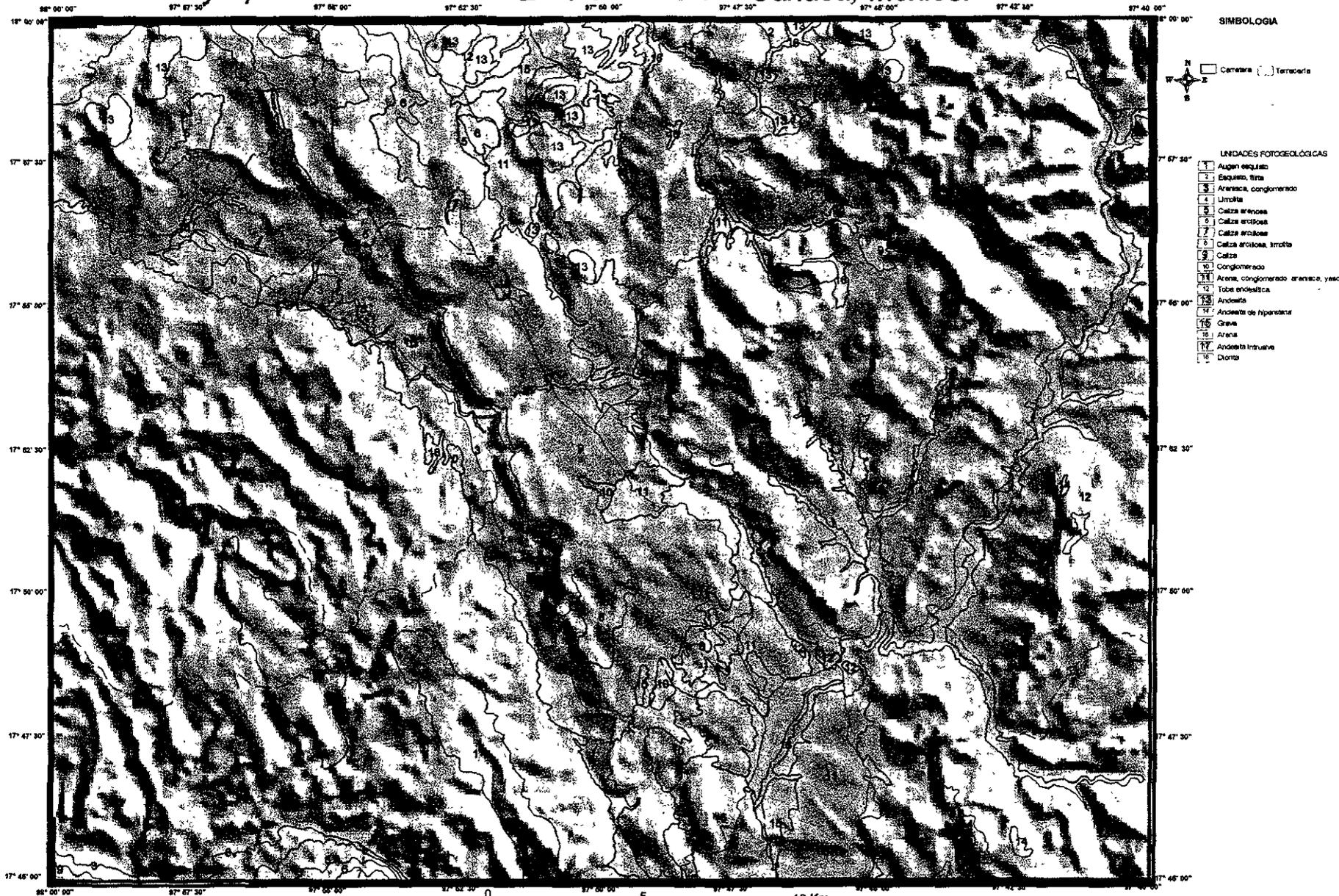
- Carretera
- Terracería
- Curvas de nivel cada 100 metros

Carta E-14-D-14, Escala 1:50,000

Huajuapam de León

Relieve y unidades de litología

E - 14 - D - 14 Oaxaca, México.

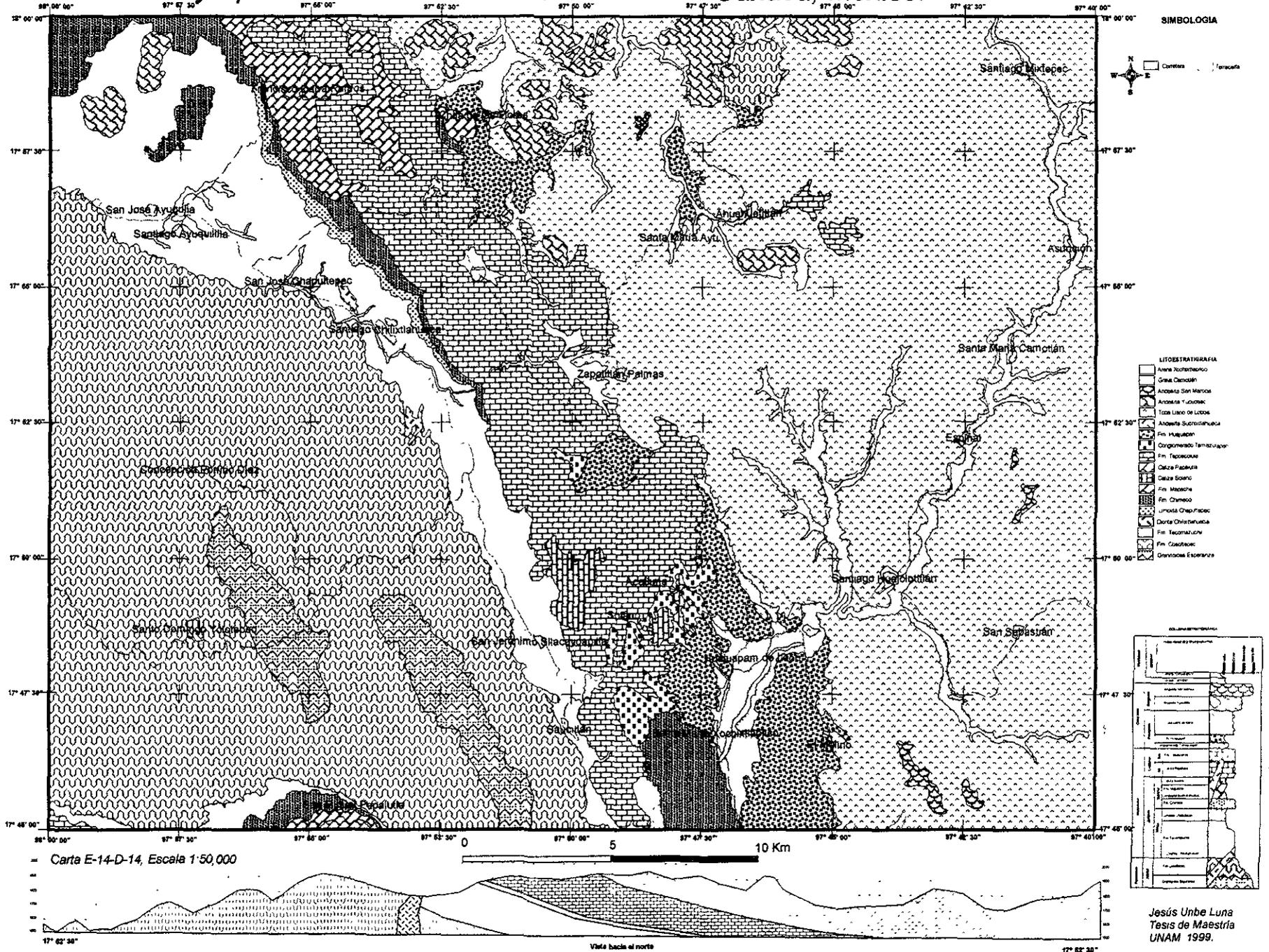


Carta E-14-D-14, Escala 1:50,000

Jesús Uribe Luna.
Tesis de Maestría.

Unidades litoestratigráficas, sección y columna geológica

Huajuapam de León E-14-D-14 Oaxaca, México.



Jesús Unbe Luna
Tesis de Maestría
UNAM 1999.

BIBLIOGRAFÍA

- Alencaster, G. y Buitrón, B. E., 1965.** Fauna del Jurásico superior de la región de Petlalcingo Estado de Puebla. *Inst. Geol. UNAM. Paleontología Mexicana*, núm. 21, 53p.
- Amos, B.J y Greenbaum, D., 1987.** Alteration detection using TM imagery. The effects of supergene weathering in an arid climate. *Int. J. Remote Sensing*, vol.8, núm. 3, pp.515-527.
- Barret, E.C y Curtis, L.F., 1992.** Introduction to environmental remote sensing. Ed. Chapman & Hall, pp. 159-161.
- Bennet, S.A., 1993.** Integration of thematic mapper data, field mapping, and arc/info to delineate sediment hosted disseminated gold projects in the Santa Teresa district, Sonora, Mexico. Ninth thematic conference on geologic remote sensing, February, 1993. pp. 779-789.
- Bocco, V.G, Palacio, P.J.L. y Valenzuela, R.C., 1991.** Integración de la percepción remota y de los sistemas de información geográfica. *Rev. Ciencia y Desarrollo*, vol. XVII, núm. 97, pp. 9-25.
- Bonet, F., 1956.** Zonificación microfauística de las calizas cretácicas del este de México., XX Congreso Geológico Internacional. 102 p.
- Buitrón, B.E., 1970.** Equinoides del Jurásico Superior y del Cretácico Inferior de Tlaxiaco, Oaxaca. *Excursión México Oaxaca. Soc. Geol. Mexicana*. pp. 154-155.
- Caballero M.,C., 1989.** Geología y anisotropía magnética del Jurásico continental del área de Huajuapán de León-Petalcingo, estados de Oaxaca y Puebla. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Caballero, M., C., Silva, R.G., Campos, M.,E.,1989.** Los afloramientos jurásicos del trayecto Chila - Huajuapán de León. *Rev. Litosfera*, vol.2, núm.1, pp.11-15.
- Caire, L. J., 1986.** La proyección cartográfica para la República Mexicana. *Univ. Nat. Autón. México*. 155p.
- Carrasco, R. S., 1981.** Geología Jurásica del área de Tlaxiaco, Mixteca Alta, Oaxaca. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Carturla, S. N. J. L., 1987.** Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. *Inst. Geog. Nat. España*. pp 9-20.
- Chuvieko, E., 1990.** Fundamentos de teledetección. Ed. Rialp, Madrid, España. 453p.
- Clarke, K. C., 1990.** Analytical and computer cartography. Englewood clieff. N J. Prentice Hall, 290p.
- Coller, D., Millar, G., Frank., M., Crithley, M., Alvarez, A., 1994.** Integrated remote sensing and structural analysis for mineral exploration in Mexico. *Resúmenes, XII Convención Geol. Nat. Soc. Geol. Mex.*, pp. 49.
- Congalton. R.G. y Green, K., 1993.** A practical look at the sources of confusion in error matrix generation. *Rev. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. núm.5, 641-645.
- Comisión Americana de Nomenclatura Estratigráfica, 1970.** Código de Nomenclatura Estratigráfica. *Inst. Geol. UNAM, Soc. Geol. Mexicana, Asoc. Mex. Geol. Petrol.* pp2-7.
- Comisión Norteamericana de Nomenclatura Estratigráfica, 1983.** Código Estratigráfico Norteamericano. *Inst. Geol. UNAM, Soc. Geol. Mexicana, Asoc. Mex. Geol. Petrol.* pp. 36-37.
- Coppock, J.T. y Rhind, D.W.,1991.** Geographical Information Systems, Principles and applications. Ed. Longman scientific and technical, pp. 20-25.
- Corona, S. E., 1981.** Estratigrafía de la región de Olinalá-Tecocoyunca noreste del Estado. de Guerrero, *Rev. Inst. Geol.* núm. 5, UNAM.
- Corona, S. E., 1985.** Geología de la región comprendida entre Olinalá y Huamixtitlán. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Corrales, Z.I., Rosell, S.J., Sánchez, T.L., Vera, T.J.A. y Vilas, M.L., 1977.** Estratigrafía, Ed. Rueda, Madrid, pp.59-61.
- Cracknell, A, y Hayes, L., 1991.** Introduction to remote sensing. Ed. Taylor & Francis, Univ. Dundee, pp. 173-176.
- Crosta, P.A. y Mac Moore, M.J., 1989.** Geological mapping using Landsat thematic mapper imagery in Almería province, south-east, Spain. *Int. J. Remote Sensing*, vol.10, núm.3, pp. 505-514.
- De Cserna, Z., 1970.** Reflexiones sobre algunos de los problemas de la geología de la parte centro meridional de México. *Excursión México-Oaxaca, Soc. Geol. Mexicana*. pp 37-50.

- De Cserna, Z., Ortega, G.F, Palacios, N.M., 1980.** Reconocimiento geológico de la parte central de la cuenca del Alto Río Balsas, Estados de Guerrero y Puebla. Excursión geológica México y Puebla. Soc. Geol. Mexicana. pp.1-33.
- Duane, F.M.,1990.** Introductory readings in Geographic Information Systems. Ed. Taylor and Francis.
- Drury, S.A., 1987.** Image interpretation in Geology. Ed. Allen and Unwin, pp. 142-143.
- Drury, S.A. y Hunt, 1989.** Geological uses of remotely sensed reflected and emitted data of lateritized Archaean terrain in Western Australia. Int. J. Remote Sensing. vol.10, núm. 3, pp. 475-497.
- Eberhardt, J.E., 1987.** Mid-infrared remote sensing systems and their application to lithologic mapping. Transactions of Geoscience and Remote Sensing. vol.25, núm.4.
- Erben, H.K., 1956.** El Jurásico Medio y el Calloviano de México. XX congreso Geol. Int., México. 139p.
- ERDAS, 1993.** Erdas field guide, Erdas Imagine. Earth Resources Data Application System, Inc. 628 p.
- ESRI, 1992.** Understanding GIS, the arc/info method. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Ferrusquía, V. I., 1970.** Geología del área Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca. Excursión México-Oaxaca, Soc. Geol. Mexicana, pp. 97-119.
- Ferrusquía, V. I. , 1976.** Estudios geológico-paleontológicos en la región Mixteca. Parte 1: Geología del área de Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuitlán, Mixteca alta, Estado de Oaxaca. Boletín Inst. Geología, UNAM. Núm. 97, 160 p.
- Ferrusquía V. I., 1978.** Estratotipos o secciones tipo. Univ. Nal. Autón, México. Rev. Inst. Geología, vol. 2, núm. 2 , pp.105-111.
- Fries, C. y Rincón, O. C., 1965.** Nuevas aportaciones geocronológicas y técnicas empleadas en el laboratorio de geocronología del Instituto de Geología. Univ. Nal. Auton. México., Inst. Geol. UNAM, Bol. 73, pp. 57-133.
- Fries, C. J., Schlaepfer, C. J. y Rincón, O. C., 1965.** Nuevos datos geocronológicos del complejo Oaxaqueño. Excursión México-Oaxaca, Soc. Geol. Mexicana, pp. 55-66.
- González, T. E., 1989.** Geología y paleomagnetismo del área de Tezoatlán, Oaxaca. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- González, A.C. y Comas, R.O., 1981.** Una nueva localidad del Cretácico Inferior (Neocomiano) en el Estado de Oaxaca. Bol. Soc. Geol. Mexicana, Tomo 17, num. 1-2, pp. 69-80.
- Guerra, P.F., 1980.** Fotogeología. Univ. Nal. Auton. México. 250p.
- Hedberg, H.D., 1980.** Guía estratigráfica internacional. Ed. Reverté, pp.83-86.
- INEGI, 1986.** Carta topográfica "Huajuapán de León, Oaxaca". Escala 1:50,000.
- INEGI, 1994.** Modelo digital de elevación E14-9a. Escala 1:250,000.
- Kennedy, M, 1996.** Global positioning system and GIS: An introduction. Ed. Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan, pp. 58-67.
- Lillesand, T. M. y Kiefer R. W., 1994.** Remote sensing and image interpretation. Ed. John Wiley and Sons, Inc., pp. 148-600.
- López, R. E., 1981.** Paleogeografía y tectónica del Mesozoico en México, Rev. Inst. Geología, Vol. 5, Núm. 2, pp. 164-169.
- López, T. D., 1985.** Revisión de la estratigrafía y potencial petrolero de la cuenca de Tlaxiaco. Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol. vol. 37, núm. 1, pp. 49-56.
- Luevano, O. A., 1988.** Geología del área San Jorge Nuchita-Villa Silacayoapan, Oaxaca. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Martínez, A. J .A., 1985.** Mapas geológicos, explicación e interpretación. Ed. Paraninfo, Madrid. pp. 272-273.
- Martiniy B, Martínez Serrano, R., Morán Zenteno, D., Macías Romo, C., Ayuso, A.R., 1999.** Stratigraphy, geochemistry and tectonic significance of thw oligocene magmatic rocks of western Oaxaca, Souther Mexico. En prensa.
- Miller, V. C., 1961.** Photogeology. N.Y., Mc. Graw Hill, 248p.
- Morán, Z. D. J., 1987.** Paleogeografía y paleomagnetismo del terreno Mixteco. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.

- Morán, Z. D. J., Caballero, M.C., Silva, R.G, Ortega, G.B. y González, T.E., 1993.** Jurassic-Cretaceous paleogeographic evolution of the northern Mixteca terrane, southern Mexico. *Rev. Geofísica Internacional, Inst. Geofísica*, vol. 32, Núm. 3, pp. 453-473.
- Mosquera, M. M.A. y Meléndez, P. E., 1984.** Exploración geológica por uranio, distrito de Huajuapán de León, Oaxaca. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. 162p.
- Niblack, W., 1985.** An introduction to digital image processing. Ed. Prentice-hall international, pp. 168-180.
- Ortega, G. F., 1978a.** Notas sobre la geología del área entre Santa Cruz y Ayuquila, estados de Puebla y Oaxaca. *Paleontología Mexicana. Inst. Geología*, num. 44, pp 17-26.
- Ortega, G. F., 1978b.** Estratigrafía del complejo Acatlán en la Mixteca Baja, estados del Puebla y Oaxaca. *Rev. Inst. Geología*, vol. 2, núm. 2, pp 112-131.
- Ortega, G., F., 1981.** Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance. *Rev. Geofísica Internacional, Inst. Geofísica*. vol. 20, núm. 3, pp. 177-204.
- Ortega-Guerrero B., 1989.** Paleomagnetismo y geología de las unidades clásticas mesozoicas de Totoltepec-Ixcaquixtla, Puebla y Oaxaca. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Pérez, I.J.M., Hokuto, C.A. y Cserna, Z. De , 1965.** Reconocimiento geológico del área de Petlalcingo-Santa Cruz, Mpio. de Acatlán, Edo. De Puebla. *Inst. Geol. UNAM, Paleontología Mexicana*, núm. 21, 22p.
- Richards, J.A., 1986.** *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. Ed. Springer & verlag.
- Rodríguez C.A., 1998.** Desarrollo de una base de datos geográfica y estadística de la República Mexicana de utilidad en aplicaciones de un sistema de información geográfica. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. pp. 40-41
- Ruiz, C.M., 1970.** Reconocimiento Geológico en el área de Mariscala-Amatitlán, Estado de Oaxaca. *Excursión México-Oaxaca, Soc. Geol. Mexicana*, pp. 55-66.
- Salas, G.P., 1949.** Bosquejo geológico de la cuenca sedimentaria de Oaxaca. *Bol. Soc. Mex. Geol. Petrol.* vol. 1, núm. 4., pp. 79-156.
- Schlaepfer, C.J., 1970.** Geología Terciaria del área de Yanhuatlán-Nochixtlán, Oaxaca. *Excursión México-Oaxaca, Soc. Geol. Mexicana*, pp. 85-96.
- Shelton, R.L. y Estes, J.E., 1981.** Remote sensing and geographic information systems: an unrealized potential. *Rev. Geo-processing*, vol. 1, núm. 4, pp. 395-420.
- Sickle, V.A, 1996.** GPS for land surveyors. Ed. Ann Arbor Inc. 209 p.
- Silva, P.A., 1969.** Plantas del Jurásico Medio de Tecomatlán, Puebla. *Inst. Geol., Paleontología Mexicana*, Núm. 27, 109p.
- Silva, P.A., 1970.** Plantas fósiles del Jurásico Medio de la región de Tezoatlán, Oaxaca. *Libro-guía. Excursión México Oaxaca. Soc. Geol. Mexicana*, pp 129-243.
- Silva, P.A., 1978.** Plantas del Jurásico Medio del sur de Puebla y noroeste de Oaxaca. *Inst. Geol. Paleontología Mexicana*, núm. 44. pp. 27-57.
- SINFA, 1995.** Vuelo fotográfico, E-14-9, B/N, escala 1:75,000.
- Smith, T.R, Menon, S., Star, J.L, Estes, J.E., 1987.** Requirements and principles for the implementation and construction of large scale geographic information systems. *Int. journal of Geographic Information Systems*. Ed. Taylor & Francis. vol. 1, núm. 1, pp. 13-31.
- Star J., Estes, J., 1994.** *Geographic information systems, an introduction*. Ed. Prentice Hall. pp. 24-31.
- Stan, A., 1989.** *Geographic Information Systems: A management perspective*. WDL Publications. 294 p.
- Tomlin, C.D., 1990.** *Geographic Information system and cartographic modelling*. Englewood Cliff. N.J. Prentice Hall. 249p.
- Tudor, G.S. y Sugarbaker, J.L., 1993.** *Gis orthographic digitizing of aerial Photographs by terrain modelling*. *Rev. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. núm. 4, pp. 499-503.
- Uribe, L. J., 1997.** Modelo digital de elevación a partir de una carta topográfica y su uso en geología. *Bol. Selper*, núm. 33, pp. 21-33.
- Valbuena, D.L., Núñez, G.P.A. y Velasco, G.J., 1992.** GPS la nueva era de la topografía. Instituto Geográfico de España. 236p.
- Vergara, L. M. L., 1978.** *Manual de fotogeología*. Ed. Jen, Madrid, España. 309p.

- Wadge, G. y Cross, A. M., 1991.** Identification and analysis of the alignments of point-like features in remote-sensed imagery. Volcanic cones in The Pinacate Volcanic Field, México. *Int. J. of Remote Sensing*, vol.10, núm.3,pp.455.
- Wahl, T.E., Miller, J.D., Bauer, E.J., 1995.** Bedrock geologic mapping using arc/info. Abstracts. Arc/Info user conference.
- Walker, T. C. y Miller, R. K., 1990.** Geographic Information System: an assesment of technology, applications and products. Technical Publications, Madison, Ga.
- Wilson, J. A., Clabaugh, S. E., 1970.** A new Miocene formation and a description of volcanic rocks, northern Valley of Oaxaca, state of Oaxaca. *Excursión México-Oaxaca, Soc. Geol. Mexicana*, pp. 120-124.