

21



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

*"EVALUACIONES GEOLÓGICAS CON TÉCNICAS DE
PERCEPCIÓN REMOTA, CASO 1: CUENCA TAMPICO-
MISANTLA CASO 2: PICO DE ORIZABA."*

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO PETROLERO

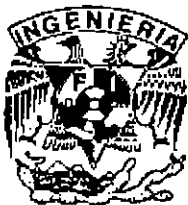
MIGUEL ANGEL MARURI CARBALLO

11.7.562

Director de tesis:

Dr. Raymundo Martínez Serrano

Dra. E. Leticia Flores Márquez



Ciudad Universitaria, Julio de 2001



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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-699

SR. MIGUEL ANGEL MARURI CARBALLO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Raymundo Martínez Serrano y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

**EVALUACIONES GEOLOGICAS CON TECNICAS DE PERCEPCION REMOTA, CASO 1:
CUENCA TAMPICO-MISANTLA CASO 2: PICO DE ORIZABA**

RESUMEN

- I INTRODUCCION**
- II PRINCIPIOS DE PERCEPCION REMOTA**
- III CASO 1: ANALISIS GEOLOGICO AL SUR DE LA
CUENCA TAMPICO-MISANTLA**
- IV CASO 2: EVALUACION GEOLOGICA DE LA ZONA
DEL PICO DE ORIZABA**
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- REFERENCIAS**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D. F., a 30 de mayo de 2001

EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Tesis:

*"EVALUACIONES GEOLÓGICAS CON TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA,
CASO 1: CUENCA TAMPICO-MISANTLA CASO 2: PICO DE ORIZABA"*

Presentada por:

MIGUEL ANGEL MARURI CARBALLO

Dirigida por:

DR. RAYMUNDO MARTÍNEZ SERRANO

DRA. E. LETICIA FLORES MÁRQUEZ

JURADO PARA EL EXÁMEN PROFESIONAL

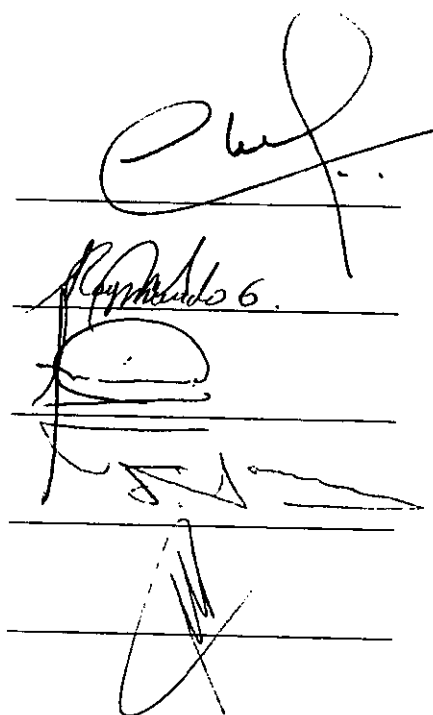
Presidente: M. I. Téodulo Gutiérrez Acosta

Vocal: Dr. Raymundo Martínez Serrano

Secretario: M. I. Néstor Martínez Romero

Primer Suplente: Dr. Fernando Samaniego Verduzco

Segundo Suplente: Dr. René Chávez Segura



The image shows five handwritten signatures, each written over a horizontal line. From top to bottom, the signatures correspond to the names listed in the adjacent text: M. I. Téodulo Gutiérrez Acosta, Dr. Raymundo Martínez Serrano, M. I. Néstor Martínez Romero, Dr. Fernando Samaniego Verduzco, and Dr. René Chávez Segura. The signatures are written in black ink and vary in style, with some being more cursive and others more blocky.

A lo largo de estos años muchas personas e instituciones me apoyaron para lograr éste objetivo en mi vida, a todos ustedes les brindo mi más sincero agradecimiento porque con sus consejos he madurado como persona. Gracias por su dedicación, por su tiempo invertido, por su paciencia, por su esfuerzo, por entenderme, por estar conmigo y por permanecer siempre. Gracias por todo *Miguel y Lindelia* mi padre y madre, gracias a mis hermanos *Elmis, Raúl y Chavanel* que están siempre conmigo.

Quiero expresar mi agradecimiento al *CONACYT*(32330-T) por el apoyo económico para la realización de la presente tesis. También agradezco al *Instituto de Geofísica de la UNAM* por las facilidades de uso de infraestructura e instalaciones.

También quiero agradecer el apoyo que me brindaron la *Dra. Leticia Flores Márquez* y el *Dr. Raymundo Martínez* por preocuparse por mi, tanto en el ámbito académico como personal. Al *Dr. René Chávez* por sus consejos y ayuda en la realización de esta tesis.

Gracias al *M.I. Teódilo Gutiérrez*, *M.I. Néstor Martínez* y *Dr. Fernando Pamaniego* por compartir sus experiencias personales durante los cursos que me impartieron y por ser mis sinodales, también agradezco a todos los profesores de la *Facultad de Ingeniería* que me dieron clases durante la carrera.

A mis amigos que me apoyaron siempre *Delliany Castro*, *Blanca M. Arroyo*, *Yazmín G. García*, *Heidi Mejía*, *Miguel A. González*, *Octavio Velázquez*, *Edgar A. Meza*, *Hegel Rey*, *Javier Pineda*, *Julio H. Barrios*, *Sergio Morales*, *Samaliel Doroteo*, *Wilfredo Cuevas*, *Verónica Bolaños*, *Diana A. Guzmán*, *Esteban Vela*, *Rosario Camacho*, *Jorge Murrieta*, *Maribel Jaime*, *Josafat Meneses*, *Miguel A. García*, *Francisco Castellanos*, *Iván Arango* y *Denidey Nava* les agradezco compartir conmigo tantos momentos.

Un agradecimiento a mi familia, en especial a *Memo* y *Cheli* y gracias a todos los que me enseñaron a luchar y a enfrentarme a la vida.

CONTENIDO

	Página
Resumen	vi
<i>Capítulo 1 Introducción</i>	
1.1. Objetivo	2
1.2. Metodología	4
1.3. Áreas de estudio	6
<i>Capítulo 2 Principios de Percepción Remota</i>	
2.1. Definición de Percepción Remota	10
2.2. Principios físicos	11
2.3. Características del sistema Landsat TM y MSS	14
<i>Capítulo 3 Caso 1: Análisis geológico al sur de la Cuenca Tampico-Misantla</i>	
3.1. Generalidades	19
3.2. Marco geológico	22
3.2.1. Geología histórica y estratigrafía	23
3.3. Procesamiento digital de imágenes MSS	26
3.3.1. Análisis estadístico de la imagen	26
3.3.2. Interpretación geológica de las bandas MSS	28
3.3.3. Filtros direccionales	35
3.3.4. Interpretaciones de las bandas en falso color	39
3.4. Modelo tridimensional del sur de la cuenca	42
3.4.1. Pozos	43
3.4.2. Sísmica	46
3.4.3. Gravimetría y Magnetometría	47
3.4.4. Integración de la información	47
<i>Capítulo 4 Caso 2: Evaluación Geológica de la zona del Pico de Orizaba</i>	
4.1 Marco geológico	55
4.1.1 Geología regional	55
4.1.2 Geología histórica y estratigrafía	56
4.2 Procesamiento digital de imágenes TM	63
4.2.1 Fuentes de información, equipos y programas de cómputo	63
4.2.2 Correcciones geométricas y atmosféricas	64
4.2.3 Análisis estadístico de la imagen	69
4.2.4 Índice de vegetación	69
4.2.5 Interpretación geológica de las bandas 3, 4, 5 y 7 (TM)	72
4.2.6 Filtros direccionales	81
4.2.7 Composiciones en falso color	82
4.2.8 Clasificación no supervisada y supervisada y su evaluación	87
4.3 Sistema de Información Geográfica y su uso en la realización de mapas geológicos	95
4.3.1 Integración de la información geológica en un mapa	97
Conclusiones y recomendaciones	103
Referencias	106

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

- Figura 1.1 Mapa de localización de las zonas de estudio comprendidas principalmente en el estado de Veracruz 3
- Figura 1.2 Localización de las principales fuentes de información para la región sur de la Cuenca Tampico-Misantla 7
- Figura 1.3 Área de estudio de la zona del Pico de Orizaba 9

Capítulo 2

- Figura 2.1 Espectro Electromagnético, A. La radiación electromagnética (EMR) es representada por ondas en los campos eléctrico y magnético. B. Diferentes nominaciones que se les ha dado convencionalmente a regiones del espectro 12
- Figura 2.2 Firmas espectrales junto al rango de las bandas TM y MSS de algunas rocas y de la vegetación 14
- Figura 2.3 Características de la forma de adquisición de la información del satélite Landsat 5 17

Capítulo 3

- Figura 3.1 Papel de la Percepción Remota en el proceso de la Administración de yacimientos 19
- Figura 3.2 Evolución de la Cuenca Tampico-Misantla (Tomado de Moreno-López, 2000) 25
- Figura 3.3 Histogramas de las bandas MSS 28
- Figura 3.4 Bandas MSS del sur de la Cuenca Tampico-Misantla 30
- Figura 3.5 Banda 2 MSS del sur de la cuenca Tampico-Misantla 32
- Figura 3.6 Banda 4 MSS del sur de la cuenca Tampico-Misantla 34
- Figura 3.7 Imagen de la banda 4 MSS a la que se le aplico el filtro direccional NO 38
- Figura 3.8 Composición en falso color RGB 432 de la imagen MSS 41

Figura 3.9 Campos y objetivos de exploración en la cuenca Tampico-Misantla (Tomado de PEMEX, 1999)	43
Figura 3.10 Perfiles realizados con información de pozos de la Cuenca Tampico- Misantla (Tomado de Moreno-López, 2000)	45
Figura 3.11 Línea sísmica Reg-2 (Tomado de Díaz-Navarro, 1977)	46
Figura 3.12 Línea sísmica interpretada Reg-3 (Tomado de Díaz-Navarro, 1977)	47
Figura 3.13 Basamento modelado por inversión de datos de gravimetría y magnetometría (Tomado de Moreno-López, 2000)	48
Figura 3.14 Modelo tridimensional del sur de la cuenca Tampico-Misantla	50
Figura 3.15 Modelo tridimensional del sur de la cuenca Tampico-Misantla con la imagen MSS	52
 Capítulo 4	
Figura 4.1 Mapa de la tectónica regional del Pico de Orizaba (Tomado de Serna, 1990)	57
Figura 4.2 Evolución del Pico de Orizaba que comprende tres grandes períodos (Tomada de Robin y Cantagrel, 1982)	58
Figura 4.3 Columna estratigráfica del Pico de Orizaba, construida a partir de los estudios de Carrasco-Núñez y Masao-Ban, (1994) y Carrasco-Núñez (2000)	59
Figura 4.4 Columna estratigráfica del Centro Volcánico Las Cumbres (Tomado de Rodríguez-Elizarraras, 1998)	61
Figura 4.5 Las seis bandas TM con sus histogramas	67
Figura 4.6 Ejemplo de histogramas a los que se les aplicó un método de corrección atmosférica	68
Figura 4.7 Imagen que muestra de manera cualitativa la vegetación en diferentes tonos de verdes y las zonas descubiertas o con vegetación pobre en amarillo	71
Figura 4.8 Transformación de una banda con un contraste con ensanchamiento lineal (linear contrast stretch)	73
Figura 4.9 Imagen en tono de grises de la banda 3 TM	74
Figura 4. 10 Imagen en tono de grises de la banda 4 TM	76

Figura 4. 11 Imagen en tono de grises de la banda 5 TM	77
Figura 4.12 Tipos de patrones de flujo o drenaje característicos de las diferentes litologías, tomados de la imagen en tono de grises de la banda 5 TM	79
Figura 4.13 Imagen en tono de grises de la banda 7 TM	81
Figura 4. 14 Resalte de bordes utilizando filtros direccionales	82
Figura 4. 15 Composición en falso color de las bandas 7, 4, 3	84
Figura 4. 16 Corte de la imagen en falso color 743 de la zona de roca desnuda del Pico de Orizaba	86
Figura 4. 17 Histogramas de las dos clasificaciones no supervisadas y en el que se observa la agrupación de clases en el segundo	88
Figura 4. 18 Clasificación no supervisada con el mayor número de clases posibles	89
Figura 4. 19 Clasificación no supervisada con 12 clases y en la cual existe una mejor definición de contactos litológicos	90
Figura 4. 20 Clasificación supervisada con 25 clases en la que se muestra también los campos de entrenamiento de los que se obtuvieron las firmas espectrales de estas clases	92
Figura 4. 21 Clasificación supervisada con 12 clases en las que se reagruparon algunas de las clases de la primera clasificación	96
Figura 4. 22 Elementos de la definición de la base de datos geológica (BDG)	97
Figura 4. 23 Mapa geológico creado con las definiciones de una BDG	101

LISTA DE TABLAS

Capítulo 2

Tabla 2.1 Especificaciones de los sensores Landsat TM y MSS que muestra el rango espectral y resolución de sus bandas	15
---	----

Capítulo 3

Tabla 3.1 Columna estratigráfica de la cuenca Tampico-Misantla (Tomado de López-Ramos 1982 y Santiago et al., 1984)	24
Tabla 3.2 Análisis univariado y multivariado de la imagen MSS	27

Capítulo 4

Tabla 4.1 Características de la imagen Landsat TM para la región del Pico de Orizaba	64
Tabla 4.2 Estadística univariada y multivariada de la imagen TM para el Pico de Orizaba	70
Tabla 4.3 Matriz de error para una clasificación con 25 clases. Los píxeles correctamente clasificados dentro de cada clase se encuentran en la diagonal	94
Tabla 4.4 Características de las principales unidades litológicas de la zona diferenciadas con el análisis de imágenes	98

RESUMEN

Se utilizaron los principios de Percepción Remota y las técnicas de tratamiento digital de imágenes para la caracterización geológica de la parte sur de la cuenca Tampico-Misantla y de la región del Pico de Orizaba. Composiciones en color y la aplicación de filtros direccionales permitieron distinguir diferentes tipos de rocas sedimentarias e ígneas por medio de sus patrones de drenaje, textura, tono y respuestas espectrales. La información de las imágenes de satélite estudiadas junto con datos geológicos, geofísicos y petroleros ayudaron en la proposición de un modelo geológico tridimensional para la cuenca Tampico-Misantla y de un sistema de información geográfico (SIG) para la región del Pico de Orizaba.

El análisis de la imagen de la cuenca Tampico-Misantla permitió distinguir lutitas y areniscas de tobas y sedimentos por medio de sus valores de reflectancia característicos. También, se identificaron fracturas y alineaciones estructurales importantes relacionadas con la falla Brinco Escobal. El modelo tridimensional integrado permitió ubicar la distribución de rocas del basamento, rocas calcáreas cretácicas y depósitos sedimentarios del Terciario. Se asociaron las características geológicas de la parte sur de la cuenca con los campos petroleros y los diferentes plays de producción. Se distinguieron cuatro zonas que presentan las mismas características espectrales en la imagen de satélite que las zonas en las cuales existen actualmente campos petroleros. Así, el modelo tridimensional permitió relacionar anomalías características de las rocas en la imagen con los altos estructurales de las formaciones Tamabra y Abra y del basamento.

La caracterización litológica de la región del Pico de Orizaba permitió identificar las unidades volcánicas pertenecientes a diferentes centros volcánicos como son: Las Cumbres, Sierra Negra y cráteres de explosión o maars. Secuencias sedimentarias de la cuenca Serdán Oriental y de la Sierra Madre Oriental también pudieron identificarse por medio de la imagen TM. Los grupos litológicos pertenecientes a las diferentes etapas eruptivas del Pico de Orizaba como son: Torrecillas, Espolón de Oro y Citlaltépetl, se pudieron distinguir por sus valores espectrales en la composición 4, 3, 2 de la imagen TM. Se utilizaron las técnicas de clasificación supervisada con base en interpretaciones y estudios previos para delimitar contactos de las diferentes unidades litológicas y construir un mapa geológico. Toda la información obtenida fue integrada en un sistema de información geográfico (SIG), el cual permite disponer de datos geológicos, estratigráficos y estructurales entre otros, de manera instantánea para la región del Pico de Orizaba.

Estudios multidisciplinarios de percepción remota, geología, estratigrafía, geofísica y modelación permiten construir una base de datos que es de gran utilidad y aplicación en diferentes áreas como son la exploración y explotación de yacimientos petroleros o la designación de zonas de alto riesgo si ocurrieran avalanchas o erupciones volcánicas hacia centros poblacionales importantes.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Con el auge de los satélites artificiales la Percepción Remota tuvo un gran impulso. Incluso, puede decirse que en 1957 nació una nueva ciencia con el lanzamiento del primer satélite artificial (*Lambech, 1988*). Sus mayores contribuciones han sido la determinación del campo gravimétrico de la Tierra, el posicionamiento global con el uso extensivo de los GPS's (Geographic Positional System) y el análisis de imágenes satelitales.

Siendo esta última la que nos ocupa y una de las más importantes, puesto que ha servido de base al desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Pero hay mas aplicaciones de esta ciencia. Recientemente ha dado importantes contribuciones al conocimiento de la cinemática de la corteza terrestre con la inclusión de altímetros satelitales (satélite-borne altimeters). Una aplicación más, han sido los modelos digitales de topografía que han revolucionado el conocimiento de la morfología terrestre y marina.

Podemos decir que aun no se ha explotado razonablemente la información proveniente de los satélites artificiales. También nos permite conocer la forma en detalle de la Tierra (geodesia), la posición relativa de objetos en su superficie y su evolución en el tiempo, nos permite conocer los movimientos de ciertos puntos o estaciones (por observaciones repetitivas).

Otra aplicación de los satélites, es el uso del movimiento propio del satélite para medir las fuerzas que actúan en él, predominantemente la gravedad. La orbita del satélite también es usada como parámetro para conocer los movimientos de la Tierra o fluctuaciones de estos por ejemplo, se utiliza como sistema de referencia respecto al cuál la Tierra se mueve (*Kaula, 1966* y *Gaposchkin, 1973*).

Con esta reseña sobre las posibilidades de la información satelital se muestra el papel de la Percepción Remota. La contribución de esta tesis, es utilizar estas herramientas en la caracterización geológico-geofísica o bien para determinaciones litológicas en cualquier zona. Por lo que la tesis está dividida en dos partes.

La primera, enfocada en una zona de interés petrolero y la segunda parte netamente geológico-litológica en una región volcánica, debido a la importancia que éstas zonas tienen para el centro de nuestro país en donde se concentra gran parte de la población.

1.1. Objetivo

El objetivo general de la presente tesis es mostrar la utilidad que la Percepción Remota tiene en el análisis preliminar de la información de superficie; con la finalidad de realizar una caracterización geológica de bajo costo, gran versatilidad y confiabilidad, además de ser más rápida que las herramientas tradicionales.

Las zonas petroleras del país como la región sur de la Cuenca Tampico-Misantla (*Figura 1.1*), son de gran importancia para la vida económica del país. Los beneficios que se puedan obtener de estas áreas dependen del buen conocimiento y caracterización que se tenga de ellas. Los estudios que se hacen para caracterizar una región incluyen la recopilación de la información de tipo geológica, geofísica y petrológica.

Para la región sur de la Cuenca Tampico-Misantla, es necesario contar con la geología superficial de la zona desde un punto de vista más regional. El objetivo particular en esta parte de la tesis, es hacer una integración de la información de geología superficial obtenida de la interpretación de imágenes de satélite. También hacer una recopilación de datos de pozos perforados y estudios geofísicos que aporten información geológica y geofísica de la zona de estudio. Al final se hará una correlación entre la información obtenida de este trabajo y la información existente. Todo esto servirá para contar con una mejor caracterización geológica y estratigráfica. El contar con información superficial confiable ayuda a explotar más eficientemente los yacimientos al instalar el equipo superficial en las mejores localidades.

Dentro de la información geológica superficial que se puede obtener del tratamiento digital de una imagen satelital se encuentra la información de tipo estructural como fallas, fracturas o contactos geológicos. Esta se obtiene con la utilización de filtros direccionales e interpretación de unidades litológicas en composiciones de falso color. La geología del subsuelo se obtiene de estudios previos.

Existe la información de gravimetría y magnetimetría con la que se modeló el basamento de la región. Se cuenta además, con dos perfiles sísmicos ya interpretados y la columnas estratigráficas de 45 pozos en siete perfiles (*Moreno-López, 2000*). Esta información apoya las interpretaciones que aquí se realizaron de la geología superficial, mostrando las bondades de las técnicas remotas.

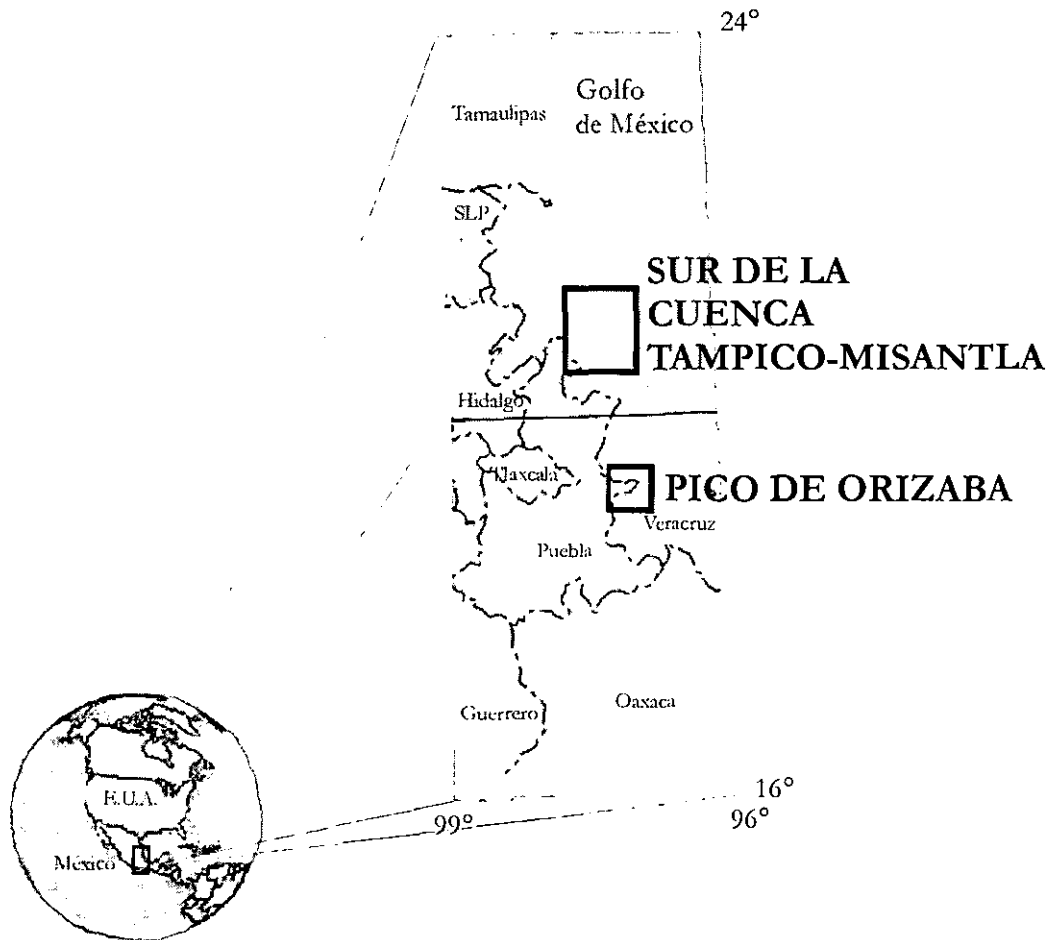


Figura 1.1 Mapa de localización de las zonas de estudio comprendidas principalmente en el estado de Veracruz

La importancia de este tipo de estudios radica, en la difusión que se le da a éstas técnicas en la etapa de exploración y de explotación de yacimientos para la toma de decisiones. Éstas técnicas han sido eficientes en otras regiones petroleras del mundo (*Sabins, 1991*). Solo por mencionar dentro de la Percepción Remota existen otras fuentes de información como son las imágenes de radar, que podrían utilizarse en la zona centro del Golfo de México en aguas profundas.

Con el análisis de éstas imágenes se podrían efectuar evaluaciones del posible potencial petrolero con que cuenta nuestro país. En la costa del Golfo de México se encuentran las principales cuencas petroleras. Como son la Cuenca Tampico-Misantla que colinda al occidente con la Sierra Madre Oriental, la Cuenca de Veracruz y la Plataforma de Córdoba al sur de la Cuenca Tampico-Misantla. Al occidente de estas cuencas se sitúa una región volcánica importante como lo es la Faja Volcánica Transmexicana. Uno de los estratovolcanes más importantes de esta región es el Pico de Orizaba

Un análisis detallado de la geología superficial que rodea al cono del Pico de Orizaba, ayudaría a limitar la zona volcánica en la que no habría la posibilidad de explotar hidrocarburos y al mismo tiempo se obtendrían áreas potenciales bien delimitadas, en la periferia oriental del volcán, hacia la costa. En la región del Pico de Orizaba se tienen diferentes rocas, no solo volcánicas, por lo que el estudio de esta zona aportaría datos espectrales de materiales más antiguos que posiblemente formen parte del basamento de algunas de las cuencas petroleras.

Para la región del Pico de Orizaba, el objetivo es realizar un mapeo litológico y describir aspectos geológicos de las diferentes unidades litológicas del estratovolcán y sus alrededores. La base son las técnicas de análisis digital de imágenes utilizadas en la Percepción Remota. Otro de los objetivos, es evaluar los alcances y limitaciones en la determinación de las características litológicas utilizando diferentes técnicas de análisis y comparar los resultados obtenidos con estudios previos de la zona.

El incluir una zona de tipo volcánica ayuda a cubrir en mayor medida las diferentes técnicas de análisis digital de imágenes de satélite. Algunas de la técnicas que no se van a utilizar para la imagen de la Cuenca Tampico-Misantla, se incluirán en la del Pico de Orizaba. Esto permitirá tener una visión más amplia de las relaciones geológicas de diferentes regiones del país que son cercanas.

1.2. Metodología

En el caso de imágenes satelitales, se cuentan con dos tipos las TM y MSS, abreviaciones del inglés Thematic Mapper y Multi-Spectral Scanner.

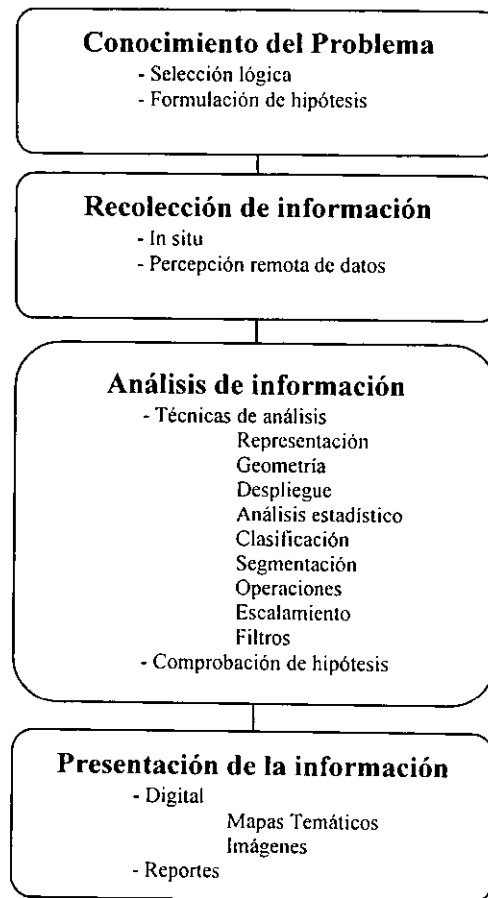
Éstas son obtenidas en forma digital por sensores remotos en los satélites. Se puede extraer información de tipo geológica de estas imágenes por medio de una modificación del método espectral utilizado por *Lang et al.*, (1987), el cual es aplicado a este trabajo desarrollando los siguientes puntos.

1. Procesamiento de imágenes digitales cubriendo las áreas de interés.
2. Interpretación de imágenes utilizando varias técnicas, para identificar unidades estratigráficas regionales, posibles horizontes de referencia y elementos estructurales.
3. Interpretación geológica detallada de imágenes cubriendo localidades tipo o de referencia para determinar sus características geomorfológicas, actitud estructural, secuencias, estructura y características espectrales de las unidades estratigráficas o de los elementos estructurales.
4. Correlación de los resultados obtenidos con áreas de estudios adyacentes. Permitiendo asignar nombres formales e inclusive edades a las unidades estratigráficas informales obtenidas a partir de los datos multispectrales. Correlación con unidades o elementos geológicos de tipo estructural.

Las técnicas de procesamiento de imágenes permiten crear productos cartográficos que son de gran utilidad durante el proceso interpretativo de la geología (*Cabral, 1993*). Teniendo en cuenta las diferentes respuestas espectrales de las rocas, estas se pueden utilizar para discriminar o correlacionar entre sí a las diferentes unidades, pero no para inferir su naturaleza o composición. Por lo que en el caso de las imágenes satelitales, éste método sólo se puede utilizar en forma cualitativa. Es decir, una limitación de éstas técnicas es que no se puede conocer la mineralogía del material expuesto en superficie, pero si se puede distinguir por otros tipos de rasgos. En cambio, una bondad del método, es que se puede realizar con éxito un mapeo confiable de los alcances superficiales de estos elementos. Pero no se puede conocer su rumbo y echado a menos que se correlacione con datos de campo o modelos de elevación digital.

Para el primer punto de la metodología, *Jensel, (1986)* propone un procedimiento estándar para el procesamiento de imágenes digitales.

Aquí utilizamos una modificación de éste para extraer información útil de los datos percibidos remotamente, en el procesamiento digital de las imágenes:



Las interpretaciones geológicas que se hacen de las imágenes dependen de cada una de las técnicas que se realicen. Además en cada técnica se determina o corrobora algún evento o ente geológico. Por lo que dependiendo de cada área de estudio es como se desarrollan las diferentes etapas de la metodología.

1.3. Áreas de estudio

La provincia geológica Tampico-Misantla o cuenca Tampico-Misantla (Figura 1.1) está ubicada en la parte norte del estado de Veracruz y en pequeñas porciones de los estados de Tamaulipas, Hidalgo, Puebla y San Luis Potosí. Al norte colinda con el estado de Tamaulipas y los ríos Soto la Marina, San Rafael y la cuenca de Burgos.

Al este con el Golfo de México, al oeste con la Sierra Madre Oriental y los pliegues del Geosinclinal Mexicano. Al sur por el río Misantla y la prolongación de la antifosa que separa el macizo de Teziutlán. Cubre un área de aproximadamente 62, 000 Km².

Se seleccionó el sur de esta cuenca en donde se encuentran ubicados los campos de la Faja de Oro y una parte del Paleocanal de Chicontepec. El área que abarca las coordenadas 98° 00' 00" y 96° 57' 3.3" de longitud oeste y 20° 15' 8" y 21° 00' 00" latitud norte coincide con el área de la imagen MSS de la *Figura 1.2*.

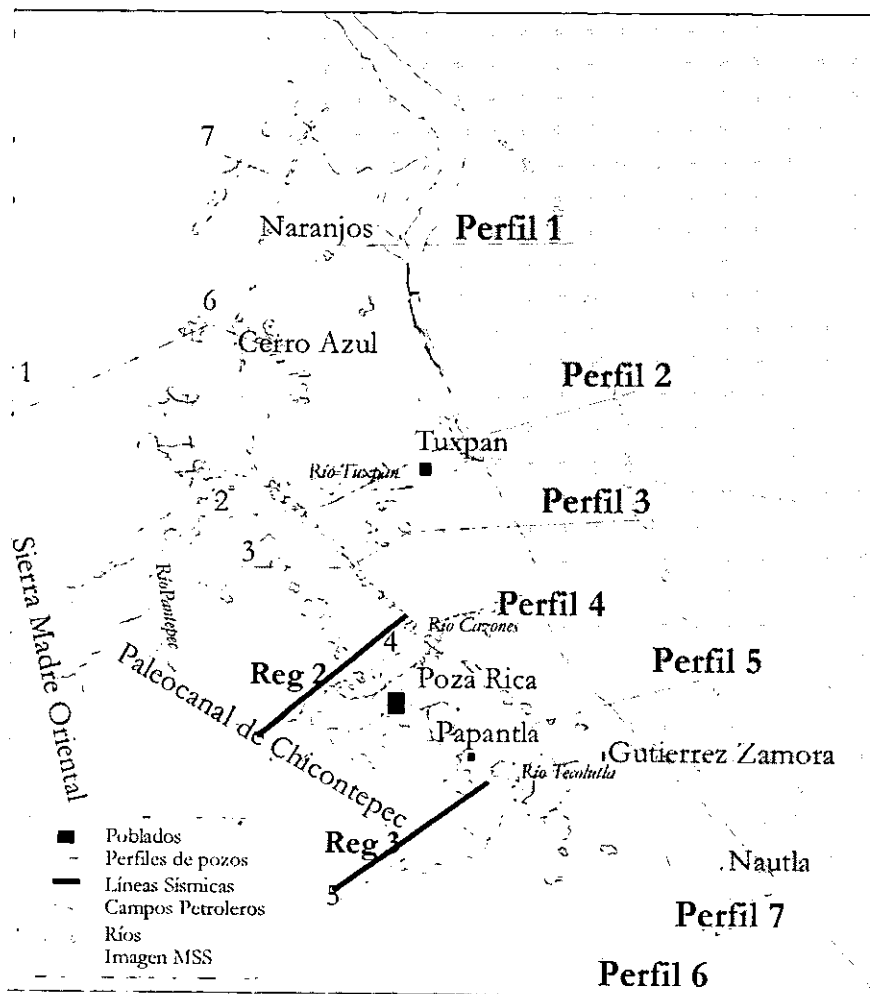


Figura 1.2 Localización de las principales fuentes de información para la región sur de la Cuenca Tampico-Misantla

La cuenca Tampico-Misantla es una de las zonas productoras de hidrocarburos más importante del país, debido a su carácter morfológico.

Tan solo el Paleocanal de Chicontepec contiene aproximadamente el 25% de la reserva total de hidrocarburos del país, su reserva probada remanente al 1 de enero de 1999 es de 6,545.7 millones de barriles de aceite y 2,684.8 miles de millones de pies cúbicos de gas natural (PEMEX, 1999).

Estudios previos que se han publicado de esta zona es la cartografía de la geología superficial escala 1:25000 publicadas por INEGI, la caracterización de las provincias petroleras del país por *Santiago et al.*, (1984), la geología del subsuelo por PEMEX, (1999) y la caracterización geológica de la cuenca por *Quezadas*, (1961), *Castro-Mora*, (1977) y *Moreno-López*, (2000).

El área de estudio para la zona volcánica (Figura 1.1) queda comprendida entre las coordenadas 97° 28' 38.48" y 97° 00' 27.87" de longitud oeste y 18° 50' 50.70" y 19° 17' 8.04" latitud norte o en coordenadas UTM 660000 a 710000 en dirección este y 2085000 a 2133000 latitud norte y las cartas topográficas 1:50000 que contiene la zona son: E14B35, E14B36, E14B45, E14B46, E14B55 y E14B56 del INEGI.

Esta área muestra al Pico de Orizaba y sus alrededores con el fin de tener una visión más amplia de la zona y no únicamente de la estructura volcánica como es el caso de la región de Las Cumbres al norte de ésta zona (Figura 1.3). Además, esto permite estudiar las unidades litológicas pertenecientes a las etapas evolutivas del volcán, su relación con el basamento y con algunos eventos geológicos cercanos a éste.

Los estudios geológicos previos del Pico de Orizaba consisten básicamente de los trabajos geológicos de *Robin y Cantagrel*, (1982), *Negendank et al.*, (1985) y *Carrasco-Núñez y Masao-Ban* (1994), trabajos sobre su evolución *Carrasco-Núñez y Rose* (1991), *Carrasco-Núñez* (1992) y sobre depósitos eruptivos del pleistoceno tardío de *Höskuldsson y Robin*, (1993) y *Siebe et al.*, (1993). También se encuentra el trabajo en el campo volcánico de Las Cumbres sobre evolución geológica realizados por *Rodríguez-Elizarraras* (1998) que colinda al norte del cono del volcán. Este trabajo y el de *Carrasco-Núñez y Masao-Ban*, (1994), incluyen mapas geológicos de la zona (Figura 1.3) con los cuales se hicieron las correlaciones entre las unidades determinadas por este trabajo y las unidades presentadas por esos autores.

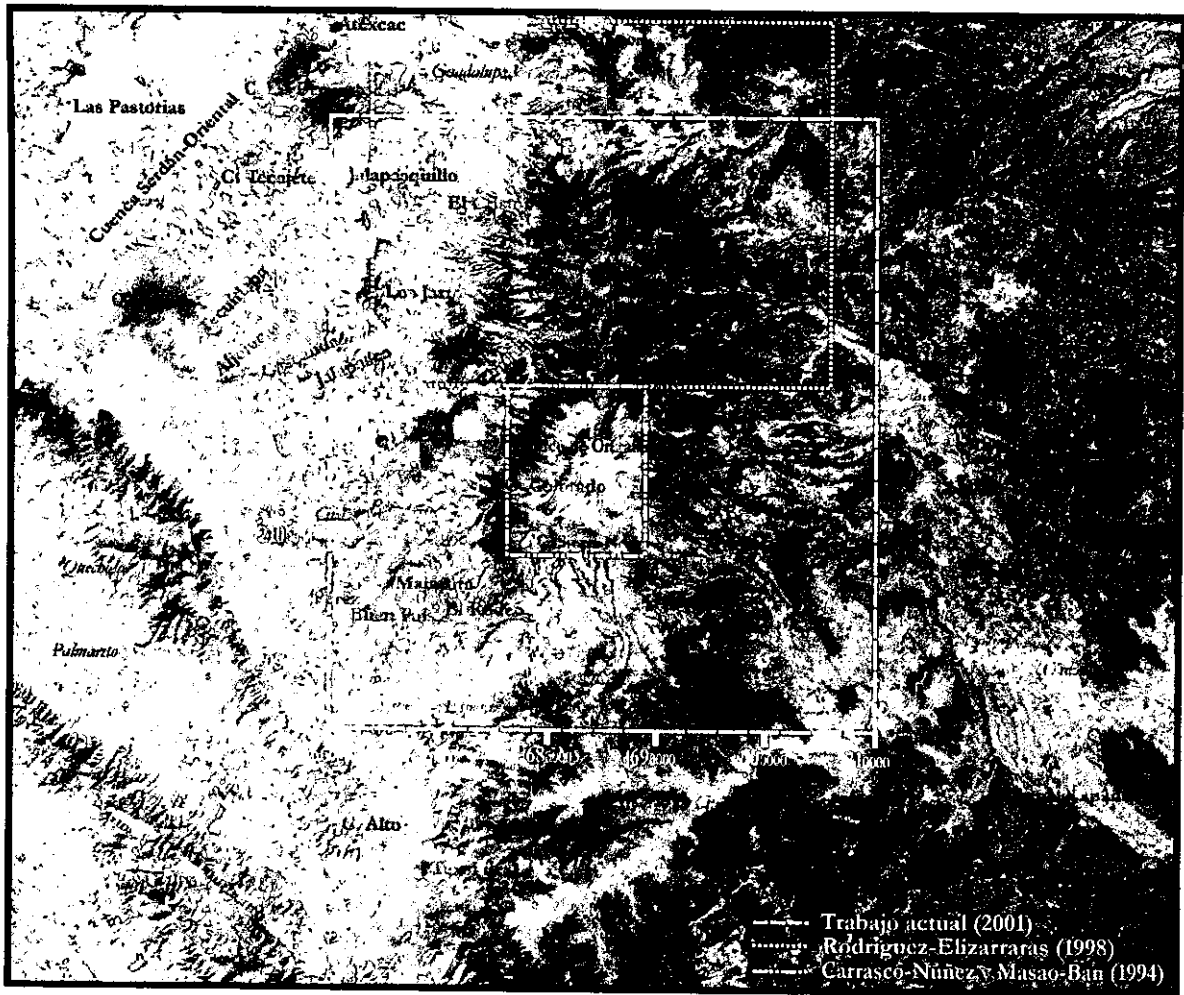


Figura 1.3 Área de estudio de la zona del Pico de Orizaba

Capítulo 2

PRINCIPIOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

2.1. Definición de Percepción Remota

Percepción Remota es la ciencia de recolectar información describiendo objetos distantes u objetivos que pueden ser estudiados solo con instrumentos a larga distancia (*Jensel, 1986*). Estos instrumentos extienden el rango de la percepción humana, el cuál solo incluye el rango de luz visible del espectro electromagnético. La percepción se extiende a otros campos como el magnético, gravitacional y de radiación de partículas. El objetivo de usar percepción remota es la adquisición de información acerca de la naturaleza de una región u objeto distante, sin alterar de ninguna forma la naturaleza de dicha región (*Sánchez y Canton, 1999*).

Para el campo electromagnético, puede ser medida la energía que una región emite, esparce, polariza o refleja. Para los campos de fuerza como el gravitacional o magnético, se mide la energía que se genera al ser modificados o creados por lo cuerpos que componen el medio de estudio. Para las vibraciones mecánicas u ondas como son las acústicas o sísmicas se puede medir las variaciones de estas ondas debido a que son emitidas, transmitidas o reflejadas por el medio.

La definición de Percepción Remota tendrá algunas restricciones para poder estudiar solo la adquisición y tratamiento de imágenes de satélite. Una restricción es que el objeto de estudio debe estar localizado cerca o en la superficie de la Tierra y que el sensor este más o menos a una distancia sustancial de éste. La segunda restricción es que solo se mide un rango de la radiación electromagnética, para conocer algunas propiedades del objeto percibido remotamente. Para los sensores satelitales TM y MSS solo se mide la energía electromagnética reflejada en un rango específico que va del visible a la región del infrarrojo.

La principal ventaja de la percepción remota es la velocidad con que los datos son adquiridos de grandes áreas de la superficie de la Tierra y el hecho de que se puede investigar en áreas inaccesibles (*Rees, 1990*). Algunas de las aplicaciones de la percepción remota con imágenes de satélite se utilizan en meteorología, oceanografía, glaciología, geología, geomorfología, geodesia, topografía y cartografía, agricultura, hidrología, control de desastres, aplicaciones de planeación y con fines militares.

2.2. Principios Físicos

La propagación de la radiación electromagnética como ondas, puede ser explicada mediante las ecuaciones de Maxwell en el vacío, que se pueden escribir como:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0$$

donde

\mathbf{E} es el campo eléctrico

\mathbf{B} es el campo magnético y

μ_0 es la permeabilidad en el vacío = $4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{h}}{\text{m}}$ y

ε_0 es la permisividad en el vacío = $8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{farads}}{\text{m}}$.

La radiación electromagnética se representa por ondas en un eje cartesiano en tres dimensiones. Dos de los ejes representan al campo magnético y eléctrico y la propagación de las ondas es a través del otro eje que es la distancia (*Figura 2.1-A*). El espectro electromagnético abarca un amplio rango de estas diferentes longitudes de onda (*Rees, 1990*). Con esta representación, se puede distinguir un tipo de radiación de otra por su frecuencia o su equivalente que es la longitud de onda. Diferentes regiones del espectro tienen diferentes nombres como el visible, ondas de radio, etc. y son referidas a la manera en como la radiación es detectada o generada, por lo que los nombres son convencionales (*Figura 2.1-B*).

Las ecuaciones de Maxwell fueron desarrolladas para la propagación de la radiación en el vacío. Teóricamente la información concerniente a la superficie de la Tierra se debe de transportar en un medio a través del vacío. Se requiere que dicha percepción del objeto se pueda lograr en ausencia de cualquier tipo de materia que intervenga en el espacio entre la superficie terrestre y el sensor.

El hecho es que muy frecuentemente hay alguna materia física entre el objeto (superficie terrestre) y el observador (sensor). Los efectos de ésta presencia son los de alterar la velocidad y dirección de propagación y atenuar la información contenida de la radiación debido a la interacción con la materia que se encuentra en su trayecto.

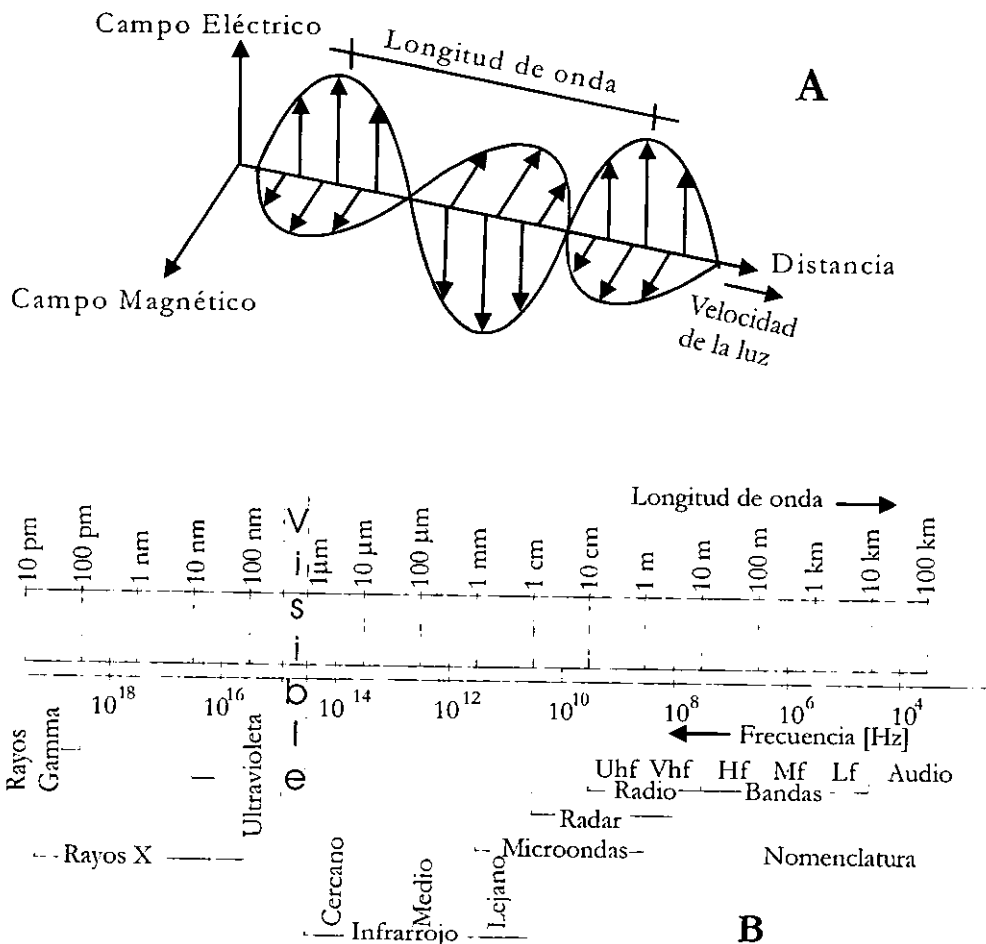


Figura 2.1 Espectro Electromagnético. A. La radiación electromagnética (EMR) es representada por ondas en los campos eléctrico y magnético. B. Diferentes nominaciones que se les ha dado convencionalmente a regiones del espectro

La radiación entonces que es emitida por el sol como fuente de energía, entra a la atmósfera y una parte es absorbida, otra reflejada. Al pasar por otro medio con diferente densidad varía el ángulo de reflexión y este cambia debido a las diferentes densidades en la atmósfera. Esta energía llega a la superficie terrestre y una parte es absorbida y otra reflejada. La energía que es reflejada vuelve a pasar por otras alteraciones hasta que el sensor en el satélite la capta.

Algunos conceptos básicos que toman en cuenta estas alteraciones entre la radiación y la materia son la reflectividad debida a la interacción de la radiación con una superficie rugosa (r) que es solamente función de la dirección de incidencia. Esta expresa la relación de radiación total dispersa con la radiación total incidente. La reflectividad es también llamada albedo de la superficie y se relaciona con la emisividad (ε) por $r = 1 - \varepsilon$.

Otro concepto es la reflectancia espectral de un objeto que es la relación de la energía que es reflejada por un cuerpo. En general se usa el término reflectancia que denota a la capacidad de reflejar bajo ciertas condiciones de ángulo de incidencia pero que no es especificado. Como se explicó, la radiación que proviene del sol, debe por lo menos hacer un viaje a través de la atmósfera de la Tierra, ésta sufre además de la absorción, difusión. La suma de estas dos formas de pérdida de energía es llamada atenuación. La atenuación se relaciona con la reflectancia de los materiales.

Los diferentes materiales tienen, en general, curvas de reflectancia espectral características las cuales permiten identificar el material a partir de los datos percibidos remotamente. La forma de una curva de reflectancia espectral de un material es llamada firma espectral. Las firmas espectrales características de diferentes tipos de rocas, obtenidas de laboratorio para las regiones del visible e infrarrojo cercano, se muestran en la *Figura 2.2*. Las rocas ígneas compuestas por piroxenos, anfíboles y magnetita, además de iones férricos y ferrosos tiene bandas de absorción de entre 0.7 y 1.0 μm . Algunas rocas con olivino tienen una simple banda de absorción (1.0 μm). Una roca de mineralogía similar a las que se encuentran en el Pico de Orizaba, es la fonolita la cual es una roca ígnea extrusiva compuesta por feldespatos y ferromagnesianos de grano fino (*Salisbury y Hunt, 1974*). Este comportamiento espectral será el esperado para nuestra área de estudio. Las firmas espectrales para las rocas sedimentarias tienen bandas de absorción en el rango de 1.4 a 1.9 μm la cual variará dependiendo de su composición. Pero pueden presentar bandas de absorción entre 2.1 y 2.4 μm para lutitas. Las rocas por lo general están cubiertas de vegetación. Una curva representativa de vegetación sana muestra tres altos o picos característicos por sus ventanas de absorción. El primero entre 0.5 a 0.6 μm que es el rango del color verde. Los otros dos entre 0.8 a 0.9 y entre 1.5 a 1.6 μm .

Estos conceptos se utilizan en el diseño de los sensores remotos que captan el rango de energía electromagnética entre la región del visible e infrarrojo. Estos sensores son colocados en los satélites y al conjunto con estos se les conoce como sistemas.

2.3. Características del sistema Landsat TM y MSS

La información que se requiere es obtenida por sistemas de percepción remota de tipo pasivo o activo. Los sensores pasivos graban la radiación electromagnética natural que es emitida o reflejada por el objeto de interés como son las cámaras y videograbadoras. Los sensores activos como el radar o el sonar emiten energía electromagnética y graban la radiación que regresa al sensor. Estos sensores remotos almacenan información de forma analógica y/o digital. Los sistemas TM y MSS son sistemas de tipo pasivo y almacenan la información de manera digital.

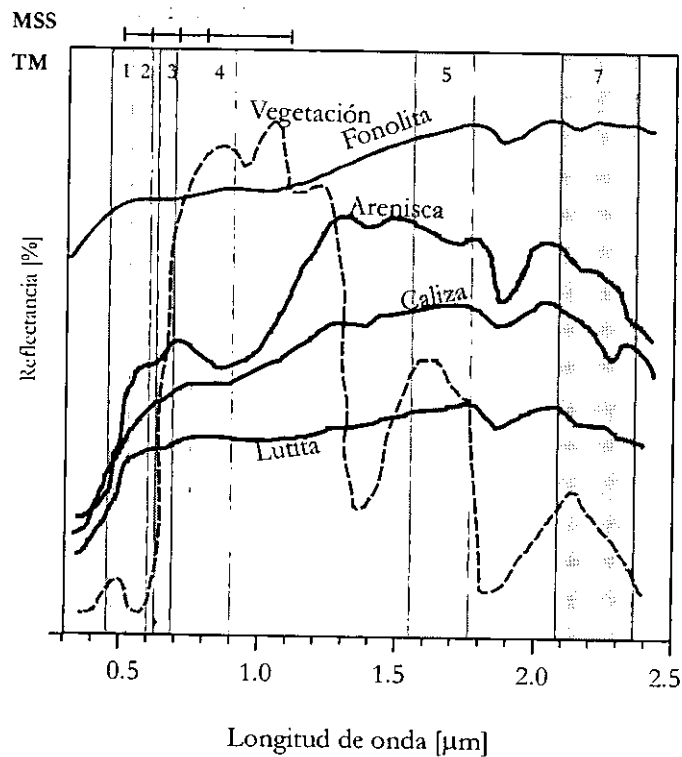


Figura 2.2 Firmas espectrales junto al rango de las bandas TM y MSS de algunas rocas y de la vegetación

Los satélites que portan los sensores para adquirir las imágenes, pertenecen a una serie de satélites lanzados por la NASA (National Aeronautics and Space Administration) llamados Landsat.

El sistema Landsat 4 y 5 cuentan con los sensores MSS (Multi-Spectral Scanner) y TM (Thematic Mapper) cuyas características se muestran en la *Tabla 2.1*. La órbita de estos satélites se ubica a una altura de 705 Km, con un ángulo de inclinación con respecto al ecuador de 98.2°, con un ancho de observación de 185 Km, recorriendo 14.5 órbitas por día y realizando un ciclo en 16 días (*Figura 2.3*).

Para el sensor MSS, el sistema capta el espectro electromagnético en un rango de entre 0.5 a 1.1 μm , dividiéndolo en cuatro bandas. Las tres primeras de una longitud constante de 0.1 μm y la banda 4 es de mayor longitud. La luz reflejada por la superficie, entra por un telescopio en el cual existen filtros con seis detectores electrónicos, cada uno calibrado para diferentes longitudes de onda, lo cual genera las cuatro bandas, de 0.5 a 0.6 μm verde, de 0.6 a 0.7 μm rojo, de 0.7 a 0.8 μm foto-infrarrojo y de 0.8 a 1.1 μm infrarrojo cercano. La banda 4 MSS de 0.8 a 1.1 μm es la más ampliamente usada para determinaciones geológicas.

Tabla 2.1 Especificaciones de los sensores Landsat TM y MSS que muestra el rango espectral y resolución de sus bandas

Banda	Ancho de banda [μm]	Campo instantáneo de visión (IFOV) [m]
MSS		
1	0.5-0.6	79x79
2	0.6-0.7	79x79
3	0.7-0.8	79x79
4	0.8-1.1	79x79
TM		
1	0.45-0.52	30x30
2	0.52-0.60	30x30
3	0.63-0.69	30x30
4	0.76-0.90	30x30
5	1.55-1.75	30x30
6	10.4-12.5	120x120
7	2.08-2.35	30x30

Para TM, el sistema capta el espectro electromagnético en un rango de 0.45 a 2.35 μm , dividiéndolo en siete bandas cuyas características así como algunas de sus aplicaciones son las siguientes:

Banda 1 de 0.45 a 0.52 μm (azul): Provee aumento en la penetración de cuerpos de agua, sirve para análisis de uso de suelo y características en la vegetación. La longitud de onda corta termina justo abajo del pico de transmitancia del agua clara, mientras que la longitud de onda superior es el límite de la absorción de la clorofila azul para vegetación verde saludable. La longitud de onda cercana a 0.45 μm está sustancialmente influenciada por la absorción y difusión atmosférica.

Banda 2 de 0.52 a 0.60 μm (verde): Esta banda abarca la región entre la banda de clorofila del azul y el rojo y además corresponde a la reflectancia de la vegetación saludable. Las bandas 1 y 2 combinadas proveen la misma sensibilidad espectral que una película areal de penetración de agua KODAK.

Banda 3 de 0.63 a 0.69 μm (rojo): Esta es la banda de absorción de la clorofila roja de vegetación verde saludable y determina una de las bandas más importantes para discriminar vegetación. Esta también se puede usar para delinear las fronteras entre suelos y contactos geológicos. Esta banda puede exhibir más contrastes que la bandas 1 y 2 porque el efecto de la atenuación atmosférica se reduce.

Banda 4 de 0.76 a 0.90 μm (infrarrojo reflectivo): Esta banda es especialmente útil en la caracterización de la cantidad de biomasa presente en el paisaje terrestre. Es utilizada para identificar diferentes tipos de cultivos e identificar tipos de suelos húmedos.

Banda 5 de 1.55 a 1.75 μm (infrarrojo medio): Esta banda es sensible a la cantidad de agua presente en las plantas. La información es utilizada en estudios de cultivos en ambientes áridos, además ésta es una de las bandas que puede ser usada para discriminar entre nubes, hielo y nieve.

Banda 6 de 10.4 a 12.5 μm (infrarrojo térmico): Esta banda mide la cantidad de radiación infrarroja emitida por las superficies. La aparente temperatura es una función de la emisión y de la temperatura cinética o verdadera de la superficie.

Banda 7 de 2.08 a 2.35 μm (infrarrojo lejano): Esta es una banda importante para la discriminación de formaciones geológicas. Permite efectivamente la identificación de rocas alteradas por actividad hidrotermal.

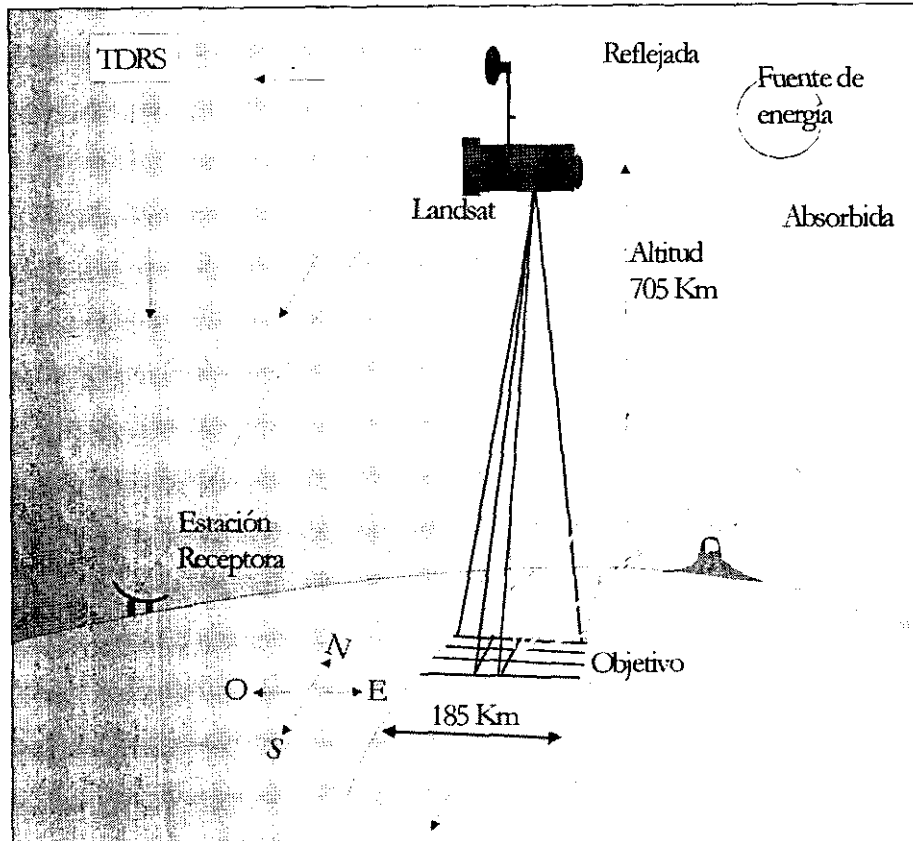


Figura 2.3 Características de la forma de adquisición de la información del satélite Landsat 5

La resolución de las imágenes depende del tipo de sensores remotos. Una medida de la resolución espacial en los sensores es el Campo Instantáneo de Visión, con sus siglas en inglés IFOV. Esta medida nos indica el tamaño máximo de píxel que tenemos en la imagen al desplegarla en una computadora. Así, el tamaño real de un píxel en una imagen MSS será de 79x79 m. Para objetos menores a este tamaño el instrumento toma un promedio de la energía captada y asigna un valor de reflectancia. En el píxel se observará el valor promedio que es el representativo de esa área. Cada píxel corresponde físicamente a un valor de reflectancia, pero que también es llamado valor de brillantez o número digital (DN) cuando se realiza alguna operación con la matriz que representa la imagen.

En el presente trabajo se aplicaron las técnicas generales de estudio de las imágenes para las dos regiones propuestas. Para la Cuenca Tampico-Misantla se ocupó el sistema MSS, porque permite realizar estudios regionales. Además, esta zona no presenta tanta diversidad litológica como la del Pico de Orizaba. Para la zona de este estratovolcán se utiliza el sistema TM. Éste se seleccionó porque hay mayor variedad litológica y es un sistema con mayor número de bandas lo que permite discriminar las diferentes litologías. Esta diferencia de selección fue hecha también para tener ejemplos de aplicación y poder seleccionar alguno de ellos en estudios futuros.

Capítulo 3

**CASO 1: ANÁLISIS GEOLÓGICO AL SUR DE LA CUENCA
TAMPICO-MISANTLA**

3.1. Generalidades

La Percepción Remota juega un papel importante dentro de las técnicas que se utilizan en la industria petrolera. Para seleccionar los estudios adecuados que se deben de realizar en un prospecto petrolero, la industria se sustenta en la Administración de Yacimientos.

La Administración Integrada de Yacimientos, se define básicamente como la práctica adecuada del uso de los recursos disponibles (humanos, tecnológicos y financieros), para maximizar los beneficios y optimizar su recuperación, mientras se minimiza el capital invertido y las operaciones costosas en el yacimiento (*Satter et al., 1994*). Esto sugiere un conjunto de decisiones y operaciones mediante los cuales a un yacimiento se le identifica, cuantifica, desarrolla, explota, y evalúa. Las etapas de vida del yacimiento, desde su descubrimiento hasta su abandono son ilustradas en la *Figura 3.1*.

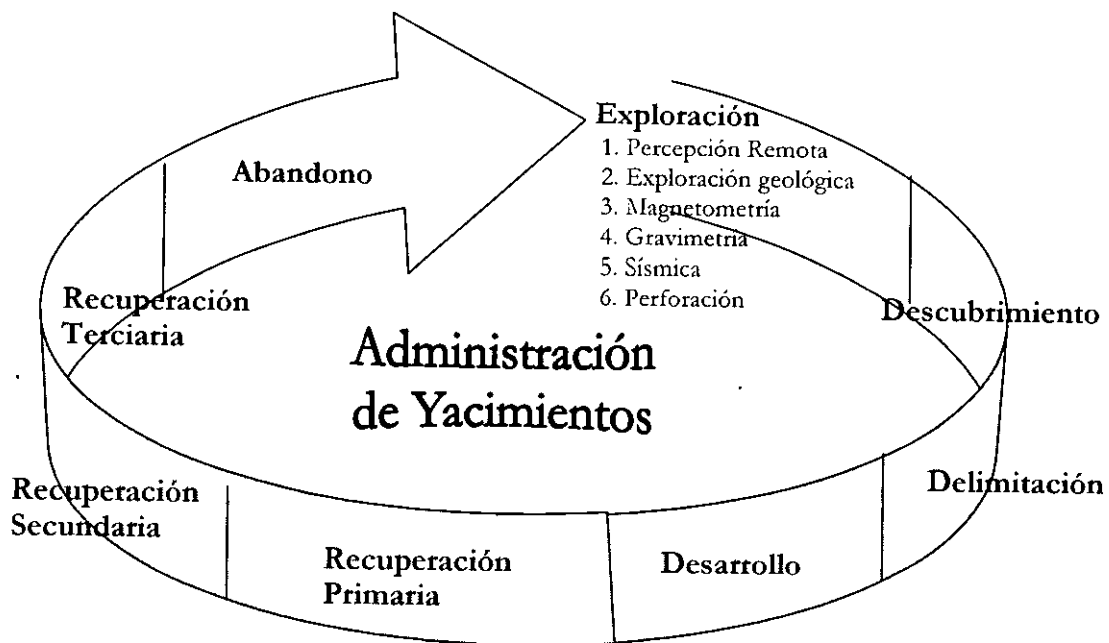


Figura 3.1 Papel de la Percepción Remota en el proceso de la Administración de yacimientos

La formulación de estas etapas incluye: la realización de estrategias de desarrollo y determinación, la adquisición y análisis de datos, los estudios geológicos y modelos numéricos, los pronósticos de reservas y producción, el conocimiento de las instalaciones requeridas, la optimización económica y la aprobación administrativa. El desarrollo de estas etapas va a depender de la seguridad y de la apropiada tecnología existente.

La Percepción Remota forma parte de los estudios de la etapa de exploración dentro del esquema de Administración de Yacimientos. Ya que el potencial que presentan estas técnicas en exploración aún no ha sido determinado del todo, sería conveniente aplicarlo a zonas que ya han sido explotadas con anterioridad a la existencia de Percepción Remota.

En exploración petrolera las interpretaciones geológicas que se realizan de datos obtenidos remotamente son importantes en áreas tanto marinas como terrestres. Por ejemplo, varios estudios en diferentes partes del mundo han demostrado su importancia en la identificación y delimitación de zonas productoras de petróleo, debido a la identificación de patrones estructurales y de geología superficial como los de *Miller, (1975)*, *Ellis et al., (1994)*, *Valenti et al., (1996)*, *Ellis y Dekker, (1998)* y *Wender y Sabins (1991)*.

También se han podido delimitar yacimientos debido a las anomalías por las filtraciones de aceite y gas hacia la superficie (*Wender y Sabins, 1991*). Este ascenso de hidrocarburos que interactúan con las rocas, el suelo y la vegetación provocan condiciones anómalas representativas de la presencia de un posible yacimiento.

Es necesario saber el objetivo de la exploración en México y la manera en donde bajo este objetivo la Percepción Remota pudiera estar, tanto para la Administración de Yacimientos como para los intereses de la explotación en nuestro país.

El objetivo de la exploración en PEMEX es evaluar el potencial petrolífero del subsuelo, e incorporar reservas probadas de hidrocarburos a nivel mundial, bajo el marco estricto de seguridad industrial y protección ambiental (*Sánchez-Montalvo et al., 2000*).

Con este objetivo, la exploración petrolera en México se realiza bajo las siguientes etapas:

1. Estudio de cuencas
2. Sistema Petrolero
3. Identificación, evaluación y selección de plays
4. Identificación, evaluación y selección de prospectos
5. Prueba de prospectos
6. Delimitación y caracterización inicial

Siguiendo este modelo, un plan de exploración para áreas dentro y fuera de costa, comenzaría con el reconocimiento regional de la zona. Seguido progresivamente por estudios más a detalle, para culminar en la perforación de pozos exploratorios. Una modificación del plan propuesto por *Sabins, (1997)*, sugiere los siguientes pasos para exploración en México:

1. Reconocimiento regional con Percepción Remota. Para zonas terrestres, los mosaicos de imágenes Landsat que cubren cientos de kilómetros cuadrados tienen como objetivo localizar secuencias sedimentarias básicas que permiten formación de campos petroleros. En zonas marinas se utilizan imágenes de radar para caracterizar el lecho de regiones con anomalías petroleras. También se puede realizar un reconocimiento topográfico si se cuenta con los modelos de elevación digital.
2. Reconocimiento con levantamientos geofísicos. Estos incluyen levantamientos magnéticos y gravimétricos que en su interpretación muestren estructuras regionales. Las cuencas sedimentarias se caracterizan por bajos tanto magnéticos como gravimétricos y están delimitadas generalmente por rocas de basamento de tipo metamórfico, con altos valores geofísicos.
3. Interpretación detallada de la percepción remota. El procesamiento digital de las imágenes sirve para identificar y crear mapas con diferentes estructuras geológicas como anticlinales y fallas que pueden formar trampas petroleras.
4. Levantamientos sísmicos. Con base en los estudios anteriores se puede localizar de manera precisa las regiones en las cuales se harán los levantamientos sísmicos indispensables en la caracterización de estructuras del subsuelo y en las proposiciones de posibles sitios para perforaciones.

5. Perforación. El conocimiento adquirido en los pasos anteriores indica de forma óptima el lugar en superficie en donde se instalarán los equipos, el tipo de instalaciones requeridas y los posibles prospectos petroleros a perforar de una manera más confiable reduciendo así los costos inesperados por una mala selección de prospectos.

Este plan se basa en el concepto de Administración Integrada de Yacimientos por lo que el gasto de recursos será el necesario para una buena caracterización de los plays o prospectos petroleros. Los mapas de plays pueden ser usados en combinación para delimitar prospectos que luego serán plays. Un mapa de un play muestra la probable extensión geográfica de un campo de aceite o gas de un particular tipo genético, por ejemplo, un play arrecifal o en un anticlinal (*Selley, 1999*).

Para este trabajo se cubren algunos de los pasos del plan propuesto por *Sabins, (1997)*, para la región sur de la Cuenca Tampico-Misantla. El estudio para la zona comenzó con la recopilación de la información de tipo geológica y geofísica. Esta zona es actualmente una de las más antiguas en explotación petrolera de México.

3.2. Marco geológico

Casi todas las áreas que actualmente producen hidrocarburos se encuentran en la Planicie Costera y en la Plataforma Continental del Golfo de México. Esto es, sobre una franja que se extiende desde la frontera con Estados Unidos, hasta la margen occidental de la Península de Yucatán y desde el frente de la Sierra Madre Oriental hasta la Plataforma Continental del Golfo de México. Las cuencas y plataformas de edad Jurásico Tardío y Cretácico se desarrollaron sobre un sistema de fosas y pilares tectónicos, producto de la separación entre América del Norte y África. Sobre las cuencas y paleorelieves Jurásicos y Cretácicos de la planicie costera y la margen occidental del Golfo de México, se desarrollaron durante el Terciario las principales cuencas sedimentarias del país como la cuenca Tampico-Misantla. El carácter que presenta esta cuenca se debe al hundimiento del archipiélago de Tamaulipas, provocado por esfuerzos que plegaron y fallaron la Sierra Madre Oriental a principios del Terciario (*Santiago et al., 1984*).

3.2.1. Geología histórica y estratigrafía

La estratigrafía de esta zona se muestra en las columnas litológicas pertenecientes a Poza Rica, a la cuenca sedimentaria de Tampico y a la del Paleocanal de Chicontepepec (*Tabla 3.1*), descritas por *López-Ramos, (1982)* y *Santiago et al., (1984)*. También, el desarrollo histórico de la cuenca es descrito por este último autor.

El basamento está constituido por rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico Tardío. En las márgenes de la cuenca y en el núcleo de los anticlinales de la Sierra Madre Oriental, se observan rocas del Precámbrico.

Durante el Triásico Temprano y Medio la región permaneció emergida, prevaleciendo un ambiente continental, el cual favoreció el depósito de sedimentos arcillo-arenosos rojos de la formación Huizachal (*Figura 3.2-A*). Para el Liásico, una transgresión marina dio lugar a la Cuenca de Huayacocotla depositándose la formación de dicho nombre constituida por lutitas y areniscas. A finales del Jurásico Inferior (*Figura 3.2-B*), ésta sufrió plegamiento y emersión, quedando expuesta en el Jurásico Medio propiciando el depósito correspondiente a la formación Cahuastas. En el Calloviano-Oxfordiano tuvo lugar una gran transgresión marina, la cual fue invadiendo gradualmente formándose un sistema de archipiélagos en cuyas márgenes durante el Kimeridgiano, hubo depositación con alta energía dando origen a la formación San Andrés. En las depresiones situadas entre las áreas positivas, se depositaron calizas arcillosas y lutitas negras correspondientes a la formación Tamán. Durante el Titoniano la región fue cubierta por el mar y se depositó la formación Pimienta.

Al iniciarse el Cretácico continua la transgresión marina y condiciones favorables para el desarrollo del Atolón Faja de Oro, en las porciones con aguas más profundas se depositaron calizas con pedernal correspondientes a la formación Tamaulipas. Para el Cretácico Medio, se depositó un mayor volumen de calizas clásticas de talud, que posiblemente fueron dolomitizadas y dieron origen a la formación Tamabra. Para el Cretácico Superior (*Figura 3.2-C*) hubo un incremento de material terrígeno, el cual dio origen a las formaciones Agua Nueva, San Felipe y Méndez y se da lugar al levantamiento de la Sierra Madre Oriental.

Tabla 3.1 Columna estratigráfica de la cuenca Tampico-Misantla (Tomado de López-Ramos 1982 y Santiago et al., 1984)

Nomenclatura Europea				Cuenca Sedimentaria de Tampico			Poza Rica		Chicontepec		
Tiempo											
Era	Sistema	Serie	Formación	Formación			Formación		Formación		
Cenozoico	Cuaternario			Reciente			Reciente				
	Terciario	Mioceno	Vindobriano		Tuxpan			Tuxpan			
			Burdigaliano								
		Oligoceno	Sup	Aquitaniense		Mesón	Escolin	Escolin		Horcones	
							Coatzintla	Coatzintla			
			Med	Chattiano		Alazán			Palma Real Sup		
		Inf	Rupeliano		Palma Real Inf			Palma Real Inf		Alazán	
			Latorfiano		Horcones						
		Eoceno	Sup	Ludiano		Chapopote	Tantoyuca		Chapopote	Tantoyuca	
				Bartoniano							
			Med	Aversiano		Guayabal			Guayabal		
			Luterciano								
		Inf	Ypresiano		Aragón			Aragón		Chicontepec Sup/Cana	
	Sparnacino		Chicontepec Sup	Velasco Sup		Chicontepec Sup					
	Paleoceno	Landeniano		Chicontepec Med		Velasco Med		Chicontepec Med		Chicontepec Sup	
				Mantiano		Chicontepec Inf		Velasco Inf		Chicontepec Inf	
		Daniano		Velasco basal			Velasco basal		Velasco basal		
	Mesozoico	Cretácico	Superior	Maestrichtiano		Méndez			Méndez		
Senoniano				Campaniano							
				Santoniano		San Felipe			San Felipe		
				Coniaciano							
Medio			Turoriano		Agua Nueva		Tamaulipas Sup	Tamabra	El Abra	Agua Nueva	
			Cenomaniano							Tamaulipas Sup	Tamabra
		Albiano				Otates				Otates	
Inferior		Neoceno		Barremiano		Tamaulipas Inf			Tamaulipas Inf		
				Hauteriviano							
				Valanginiano							
				Berriosiano							
Jurásico		Superior	Titoniano		Pimienta			Pimienta			
	Kimeridgiano		Bononiano		Grupo Tamán	Tamán	Chipaco	San Andrés	Tamán	Chi-paco	San Andrés
			Havriano								
			Sequaniano								
	Oxfordiano		Argoviano						Santiago		
			Divesiano								
	Medio	Caloviano		Tepexic Huehuetepc			Tepexic				
		Batoniano		Cahuasas			Cahuasas				
		Bajaciano									
Inferior	Liasico	Sup	Aoleniano								
			Toaraciano		Rosario						
			Charmutiano								
		Med	Pliensboquiano								
		Inf	Sinemuriano		Huayacocotla						
Hettangiano											
Triásico	Retiano		Huizachal			Esquistos					
Pérmico			Guacamaya								
Carbonífero			Del Monte								
Devónico			Vicente Guerrero								
Silúrico			La yerba								
Ordovícico			Caballeros								
Cámbrico			Victoria								
PC			La Presa								
			Gneis y esquistos			Gneis y esquistos					

Ésta cuenca que se originó en el Paleoceno, fue afectada en su margen occidental por una depresión de considerable magnitud, denominada Antefosa de Chicontepec, en la que se depositaron sedimentos arcillo-arenosos de tipo turbidítico, correspondientes a las formaciones Chicontepec Inferior y Medio y Velasco.

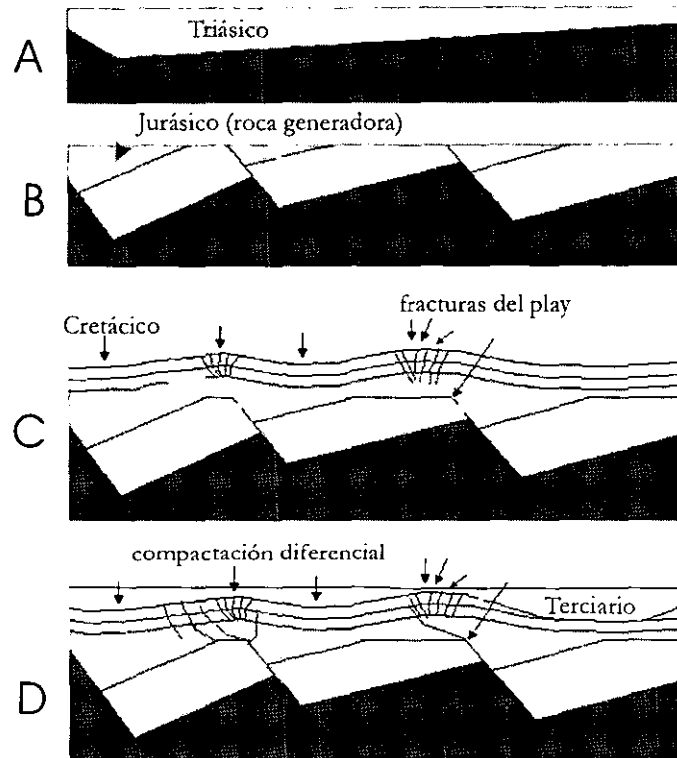


Figura 3.2 Evolución de la Cuenca Tampico-Misantla (Tomado de Moreno-López, 2000)

Durante el Eoceno Temprano se mantuvo una continuidad representándose ésta por facies arenosas de tipo Flysh originando la formación Chicontepec Superior y una arcillosa que es la formación Velasco Superior. En el Eoceno Superior se forma la formación Chapopote y Tantoyuca. En el Oligoceno y el Mioceno el área fue sometida a constantes transgresiones y regresiones, propiciando el depósito de sedimentos areno-arcillosos y en ocasiones conglomeráticos como las formaciones Palma Real Inferior, Palma Real Superior y Tuxpan. Al final en este sistema, se presentó una regresión que tiene como límite la actual línea de costa (Figura 3.2-D). Ésta evolución, hace que en la actualidad no tengamos expuestas las formaciones de interés petrolero en el área de la imagen de satélite. Algunas de éstas unidades afloran al margen con la Sierra Madre Oriental.

3.3. Procesamiento digital de imágenes MSS

La metodología propuesta para el tratamiento de imágenes digitales en el capítulo 1 es aplicada a la imagen para el sur de la cuenca Tampico-Misantla. El software que se utiliza es IDRISI®. El procesamiento digital de esta imagen incluye el análisis estadístico, despliegues de bandas, técnicas de mejoramiento de imágenes, aplicación de filtros direccionales y combinación en falso color. Todas estas técnicas con sus respectivos análisis e interpretaciones geológicas se presentan enseguida.

3.3.1. Análisis estadístico de la imagen

Con el fin de determinar la correlación que existe entre los datos de las diferentes bandas y así poder utilizar aquellas en las que no se duplique la información, fue necesario realizar un análisis estadístico de las bandas de la imagen. Primero se parte de un análisis estadístico univariable y después se realiza un análisis multivariable (*Lillesand y Keifer, 1987*). La información que se obtiene de las bandas es en forma de matrices y se obtienen variables estadísticas como la media y la desviación estándar para el análisis univariado y la matriz de correlación y de varianza-covarianza para el análisis multivariado.

De la *Tabla 3.2*, podemos observar que los valores máximo y mínimo de todas las bandas estudiadas están ajustados a la escala de 0 a 255. La media de las dos primeras bandas se encuentra cercana del valor mínimo, mientras que los valores las otras dos bandas se alejan. En la matriz de varianza-covarianza, los valores son relativamente altos, por lo que su información no es muy confiable para observar la correlación de información entre bandas. De la matriz de correlación se puede interpretar que la información de la imagen se encuentra en dos bandas la 2 y la 4 o la 1 y 3. Las bandas con información similar presentan valores cercanos a uno como la banda 1 y 2 (0.9876). Por lo que al utilizar cualquiera de las dos bandas se tendrían resultados similares. El mismo comportamiento se tiene con las bandas 3 y 4 cuyo valor de correlación es de 0.9887.

La imagen MSS de la zona cuando se adquirió ya corregida por efectos atmosféricos y geométricos. Por esto, los valores de reflectancia o brillantez de las bandas están desplazados y arreglados en un rango de 0 a 255.

En la *Figura 3.3* se muestran los histogramas con el valor mínimo y máximo de cada banda. Todos los histogramas muestran los efectos de la corrección por la distribución espaciada de los valores y porque la mayoría de los valores están junto al eje de las ordenadas. También podemos observar que la información está distribuida a todo lo largo del eje pero con valores bajos de frecuencia. Solo de una pequeña parte de la imagen se puede extraer información útil que es la que está cercana a la media de cada banda.

Tabla 3.2 Análisis univariado y multivariado de la imagen MSS

Banda	1	2	3	4
Estadística univariada				
Media	40.19	36.69	72.82	85.47
Desviación Estándar	41.37	42.05	65.82	78.19
Mínimo	0	0	0	0
Máximo	255	255	255	255
Matriz de varianza-covarianza				
1	1711.79			
2	1718.53	1768.66		
3	2058.49	2117.80	4333.25	
4	2143.53	2212.80	5089.44	6114.09
Matriz de correlación				
1	1			
2	0.9876	1		
3	0.7558	0.7649	1	
4	0.6625	0.6729	0.9887	1

Se realizó un despliegue inicial de las cuatro bandas de la imagen (*Figura 3.4*) para corroborar la información obtenida estadísticamente. Con este despliegue se pudo observar que la banda 1 presenta problemas geométricos desde su adquisición.

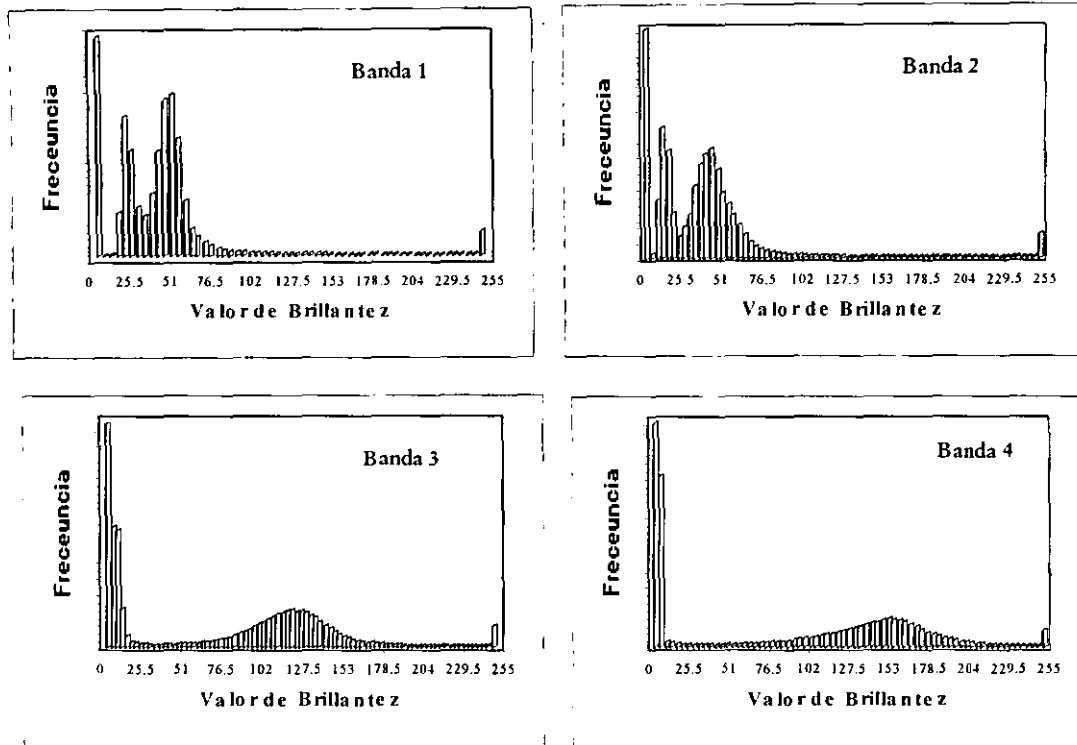


Figura 3.3 Histogramas de las bandas MSS

En la imagen hay un bandeo que pudieran ocasionar problemas en la interpretación de esta. Pero la imagen 2 contaría con información semejante a la banda 1. La utilización de la banda 2 en posteriores técnicas será más conveniente que la utilización de la banda 1. La selección de las tres últimas bandas de la imagen será lo más apropiado y por lo tanto, los resultados serán más confiables. En las cuatro bandas, también se puede observar que algunas regiones presentan nubes y que son zonas de color blanco. Para este tipo de imágenes las nubes, representan pérdida de información. En las imágenes MSS e incluso TM, cabe recordar que se trabaja en la parte del visible e infrarrojo del espectro electromagnético y por lo tanto se capta lo que la superficie refleja. Cuando existen nubes se refleja toda la energía del sol por lo que la información debajo de ellas no es posible obtenerla. Las imágenes de radar pueden penetrar nubes por lo que son recomendables en zonas que presenten estos problemas.

3.3.2. Interpretación geológica de las bandas MSS

Se eligieron las bandas 2 y 4 MSS para hacer un análisis fotogeológico de ellas. Estas bandas muestran diferente información según el análisis estadístico.

En las dos imágenes se puede observar que en las zonas cercanas a la costa y al margen de los ríos la textura es fina, característica del material aluvial y arena presente.

A diferencia de otras partes de la República, como se verá más adelante en la zona volcánica del Pico de Orizaba, no hay sombras debido a que el relieve topográfico es muy plano. Sin embargo, se presenta el problema de las nubes hacia la Sierra Madre Oriental que se encuentra a la izquierda de las imágenes. En la imagen de la banda 2 se pueden observar mejor la distribución de estas a diferencia de la banda 4. En la imagen de la banda 2, el contraste entre el suelo y las nubes es mayor.

También en el despliegue de la banda 2 se puede observar que a lo largo de la costa, los sedimentos son acarreados mar adentro. El valor de reflectancia de estos es mayor que el que presenta el agua de mar que absorbe la energía. Se observan zonas más claras que se van desvaneciendo mar a dentro. Los centros urbanos al igual que las nubes se observan en tonos muy claros, pero se distinguen en que los primeros presentan simetría o bordes angulosos a diferencia de las nubes.

Imagen de la banda 2 MSS (*Figura 3.5*)

En esta imagen, se pueden distinguir varias zonas de acuerdo a las diferencias de texturas y tonos. Éstas zonas se describen de acuerdo a las letras en la figura. Las diferentes respuestas espectrales representan diferentes tipos de formaciones desde el punto de vista geológico. El nombre y edad de los materiales expuestos, son tomados del mapa geológico del *INEGI 1:250000 E14-12*. Del mapa y la imagen se interpreta que se tienen rocas del Terciario desde el Paleoceno hasta sedimentos recientes. La zona representada por A muestra una textura suave y un tono claro. Se encuentra cercana a la ciudad de Tuxpan que es dividida por el río que se encuentra debajo de la letra. Esta formación no tiene una textura definida o marcada, por lo que sugiere es de las más jóvenes de la imagen. INEGI reporta de su mapa en esta zona, areniscas del Mioceno. Al sur de Tuxpan, alrededor de la letra B, el tono de esta zona es de igual intensidad que A, pero difiere la textura. La textura presenta una serie de canales cortos que sugieren una roca mejor consolidada que la anterior y que ésta textura pudiera ser originada por la vegetación que crece sobre estas rocas.

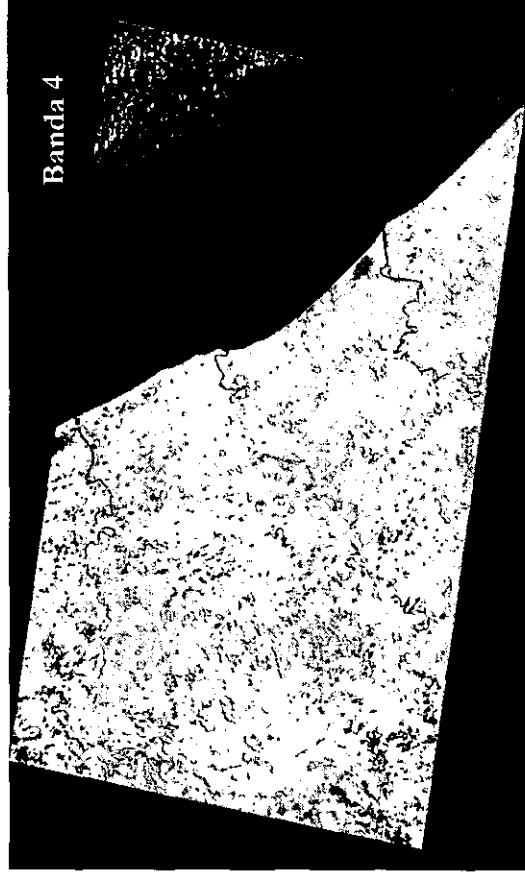
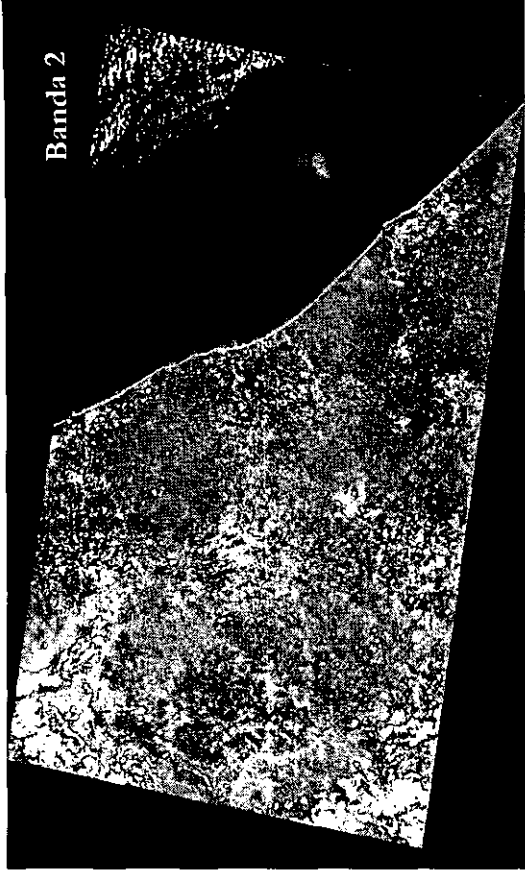


Figura 3.4 Bandas MSS del sur de la Cuernavaca-Tampico-Misantla

En C tenemos una pequeña zona que se distingue por su tono claro a diferencia de las de su alrededor. La textura que presenta es muy similar a la de B, pero ésta se encuentra mejor delimitada que las anteriores zonas. En B y C son reportadas rocas con lutitas y areniscas y su diferencia de tono nos sugiere una diferencia en composición y por tal una vegetación diferente para las dos zonas. En D tenemos un tono muy oscuro e intercalación de las lutitas y areniscas descritas en C, este material es reportado como Basalto. El basalto tiene un tono muy oscuro como se reporta más adelante en la zona volcánica.

En la parte marina, E, podemos observar que los sedimentos que son arrastrados al mar ejercen influencia en la respuesta espectral del agua como se dijo. Se observa que en la desembocadura de los ríos se tiene la mayor concentración de sedimentos y llegan más lejos hacia mar adentro. Es necesario notar esto, ya que muchos de los procesos de depositación que forma parte de la generación de yacimientos petroleros se llevaron a cabo por procesos parecidos a estos hace miles de años. Se observa así, la captación de material clástico y materia orgánica hacia medios propicios para la posible generación de hidrocarburos.

En F podemos distinguir el material que está a las orillas de los ríos. Este material está formado por sedimentos no consolidados que se acumulan por varios años a la margen del río. Los ríos ejercen en la imagen una gran influencia por su número y porque se encuentran distribuidos en toda la imagen. Los principales ríos son el río Tuxpan, Cazonas, Pantepec, Tecolutla, entre otros. Todos ellos están rodeados de estos materiales y algunos rasgos estructurales pueden ser tapados por este material.

Existe cerca de la costa areniscas que presentan la misma textura que en A con canales en varias direcciones sin ninguna preferencia el cual da la particular textura de esta roca. A lo largo de toda la costa se observa dicha textura como en G. Las rocas ígneas se caracterizan por los colores oscuros. Esto se debe a que absorben la energía proveniente del sol y solo una pequeña parte es reflejada. En H podemos observar zonas bien delimitadas de tono oscuro característico de estas rocas. A diferencia de los basaltos en D, la textura que presenta H es más rugosa. Estas rocas son tobas ácidas y se encuentran en la parte inferior de la imagen. En I podemos observar el material costero formado por algunas arenas no consolidadas y que se presenta a lo largo de toda la costa.



Figura 3.5 Banda 2 MSS del sur de la cuenca Tampico-Misantla

En particular, en esta zona, este material se extiende más hacia continente. La textura que presenta es lisa y las irregularidades se pudieran deber a dunas de muy bajo relieve topográfico. Más hacia continente en J podemos observar que las características de las rocas de esta zona, son parecidas a las lutitas y areniscas de C. Pero, se presenta una intercalación de materiales volcánicos y sedimentos aluviales sin poder distinguir contactos entre estas unidades.

Imagen de la banda 4 MSS (*Figura 3.6*)

A diferencia de la banda 2 en donde las diferentes unidades litológicas se pueden distinguir solo por sus respectivos tonos y textura, en esta imagen se puede observar los diferentes patrones de drenaje. Estos patrones son característicos de cada unidad litológica en particular. Con estos se pueden distinguir mejor los contactos litológicos entre diferentes unidades conociendo su distribución. Los patrones de drenaje son de manera general, muy cortos en todas las formaciones, por lo que sugieren rocas relativamente jóvenes o recientes. Éstos patrones de flujo se muestran más largos y mejor definidos hacia el continente sugiriendo que son de rocas más antiguas. En esta imagen también podemos distinguir algunos rasgos de tipo estructural como lineamientos asociados a fallas o fracturas.

Entre A, C y D se observan lineamientos con dirección W-E que en correlación con cartas del INEGI no representan carreteras u otro aspecto relacionado con actividad humana. Los diferentes tipos de sedimentos los podemos distinguir porque no presentan patrones de drenaje y son de textura lisa. Estos sedimentos se presentan en dos diferentes tonos. Los sedimentos oscuros como en A, B y P se presume su color debido a actividad humana. En B y P se pueden observar formas geométricas definidas características de tierras de cultivo. Los sedimentos de tono claro son los que se encuentran alrededor de F, M y S. En los alrededores de S se observa con la misma textura, algunas intercalaciones de sedimentos más oscuros. Estos puede deberse a la actividad humana propia de la zona productora de petróleo. Pero geológicamente es la misma unidad.

Las rocas de tipo ígneo presentan pocos patrones de drenaje. Estos patrones están bien definidos y sugieren que son rocas más consolidadas que las sedimentarias o que presentan mayor resistencia a la erosión.

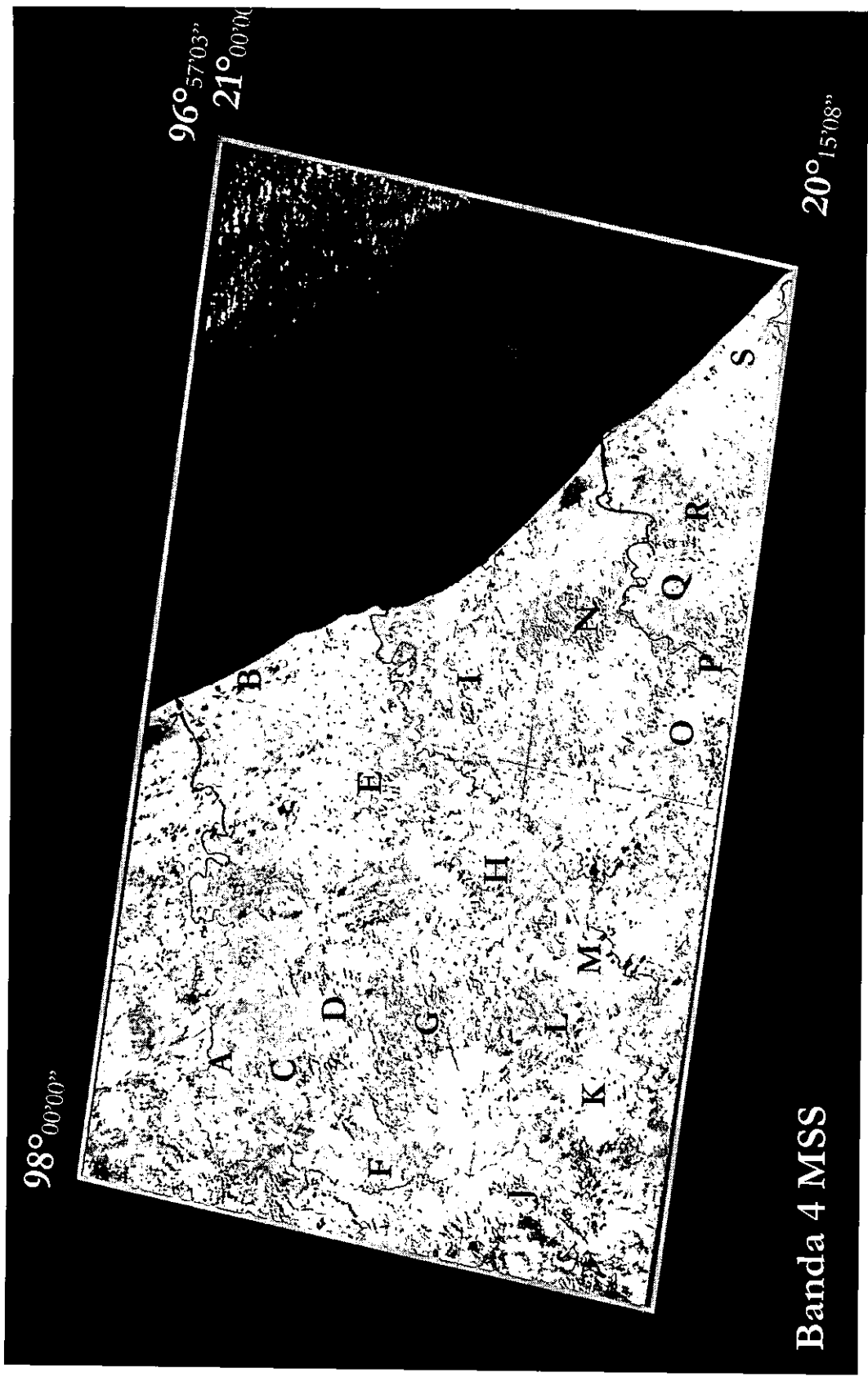


Figura 3.6 Banda 4 MSS del sur de la cuenca Tampico-Misantla

Estas se distribuyen al oeste de la imagen hacia la Sierra Madre Oriental en pequeña regiones comparadas con el tamaño de la imagen. El valor de reflectancia para estas rocas está en una región del espectro tal que siguen presentándose en tonos oscuros como en la banda 2. Los basaltos se observan en C, H y las tobas ácidas en Q.

Las rocas sedimentarias que hay en la imagen son lutitas y arenisca y combinación de estas con diferentes edades. Se pueden distinguir rocas formadas por intercalación de areniscas y lutitas, de las formadas solo por areniscas por el patrón de flujo que presentan. Las rocas formadas por combinación de lutitas y areniscas como en D y O son de diferente tono que las de G y L que son más claras y formadas solo por areniscas. Además las areniscas presentan rasgos característicos que parecen fallas o lineamientos y que no presentan las rocas más oscuras. Otra zona de parecido patrón de flujo y textura se encuentra al sur en O y K.

Las pequeñas diferencias en tono representan diferencia de edad o composición. Las areniscas que están más hacia la zona costera E, I, N y R presentan un patrón de drenaje más complejo y sin dirección preferente. Este patrón está compuesto por canales cortos en todas direcciones, lo que los distingue diferenciándolo de las unidades a su alrededor. Más hacia el continente encontramos rocas sedimentarias con mayor alcance en sus patrones de drenaje y mejor definidos como en J, lo que permite distinguirlas de otras unidades. Estos aspectos se pueden resaltar mejor con los filtros direccionales al igual que rasgos estructurales como los que encuentran en las areniscas.

3.3.3. Filtros direccionales

Todas las imágenes contienen fronteras o límites entre las superficies que tiene igual valor de brillantez o reflectancia y aquellas que tienen diferentes valores. Estas diferencias son debidas a las interacciones de diferentes cuerpos con la radiación electromagnética. Al graficar para una banda los valores de brillantez contra la posición que ocupa el valor del píxel en una dirección, se puede obtener una gráfica en dos dimensiones. De ésta, se obtienen dos componentes llamados de alta y baja frecuencia, los cuales se pueden separar aplicando filtros con un análisis de Fourier.

Las variaciones que se notan en la alta frecuencia reciben el nombre de bordes (edges) y son importantes en geología ya que algunos bordes son fronteras entre rocas con diferentes respuestas espectrales o fronteras de vegetación que sirven para delimitar estos contactos litológicos o también pueden mostrar eventos tectónicos como sistemas de fracturas y lineamientos, pero además pueden mostrar efectos por las sombras del relieve topográfico (Gupta, 1991). Al hacer una transformación de Fourier estamos en el dominio de las frecuencias y se pueden aplicar filtros por convolución. Esta es una operación matricial entre la matriz de los valores de brillantez y una matriz denominada kernel o núcleo de la transformación. Este núcleo es para este caso una matriz de 3 x 3 que se aplica para obtener una nueva matriz con diferentes valores de brillantez.

Si $P(i,j)$ representa la matriz de valores de brillantes originales y el núcleo para la convolución es $C(k,l)$ de dimensiones $(2M + 1, 2N + 1)$, siendo k y l las coordenadas en la matriz de brillantez en donde existe la operación con el núcleo, la expresión matemática de la nueva imagen $O(i,j)$ será:

$$O(i, j) = \sum_{k=-M}^M \sum_{l=-N}^M P(i+k, j+l) C(k+M+1, l+N+1)$$

Varias aplicaciones de este método se han realizado con la banda en la región del infrarrojo cercano para la determinación de lineamientos geológicos y realzar contactos litológicos (Gupta, 1991). Para el caso del presente estudio se utilizó la banda 4 MSS y los diferentes núcleos de la transformación que se aplicaron son tomados de Robinson, (1977), en donde el nombre geométrico indica la dirección de máxima respuesta, así por ejemplo, el núcleo norte ofrece una máxima respuesta para cambios en valores de brillantez verticales de arriba hacia abajo. Como los núcleos son matrices cuadradas de 3 x 3, entonces podemos obtener las siguientes combinaciones:

$$S = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \qquad N = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{array}{l}
 E = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \\
 \\
 NE = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{vmatrix} \\
 \\
 SE = \begin{vmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \\
 \\
 O = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} \\
 \\
 NO = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{vmatrix} \\
 \\
 SO = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}
 \end{array}$$

De la aplicación de esta técnica resultaron ocho imágenes a partir de la banda 4 MSS. Todas las fallas, contactos y patrones de flujo que se pudieron realzar se correlacionaron de las ocho imágenes resultantes. Solo se presenta una de estas imágenes con la información de todas (Figura 3.7). Se seleccionó la imagen a la que se le aplicó el filtro Noroeste (NO) por seleccionar alguno, pero sin que presentara alguna ventaja particular sobre los demás. Los análisis se corroboraron con mapas geológicos y topográficos del INEGI. Carreteras, oleoductos, y límites de sembradíos pueden ser resaltados también por esta técnica, por lo que para fines geológicos pueden ser interpretados como un rasgo estructural y no como parte de la actividad humana.

Los contactos litológicos se pueden observar por el cambio en textura y tono de las diferentes unidades litológicas. Por ejemplo se muestra el contacto entre las areniscas y los sedimentos costeros al sur de la imagen (Figura 3.7). Estos contactos son fáciles de distinguir solo con la diferencia en la tonalidad que muestran diferentes regiones. Sin embargo, es difícil distinguirlos entre las rocas formadas por intercalación de lutitas y areniscas y las formadas solo por areniscas. El patrón que se forma en los dos tipos al aplicarles el filtro no tiene una orientación preferencial o textura diferente.

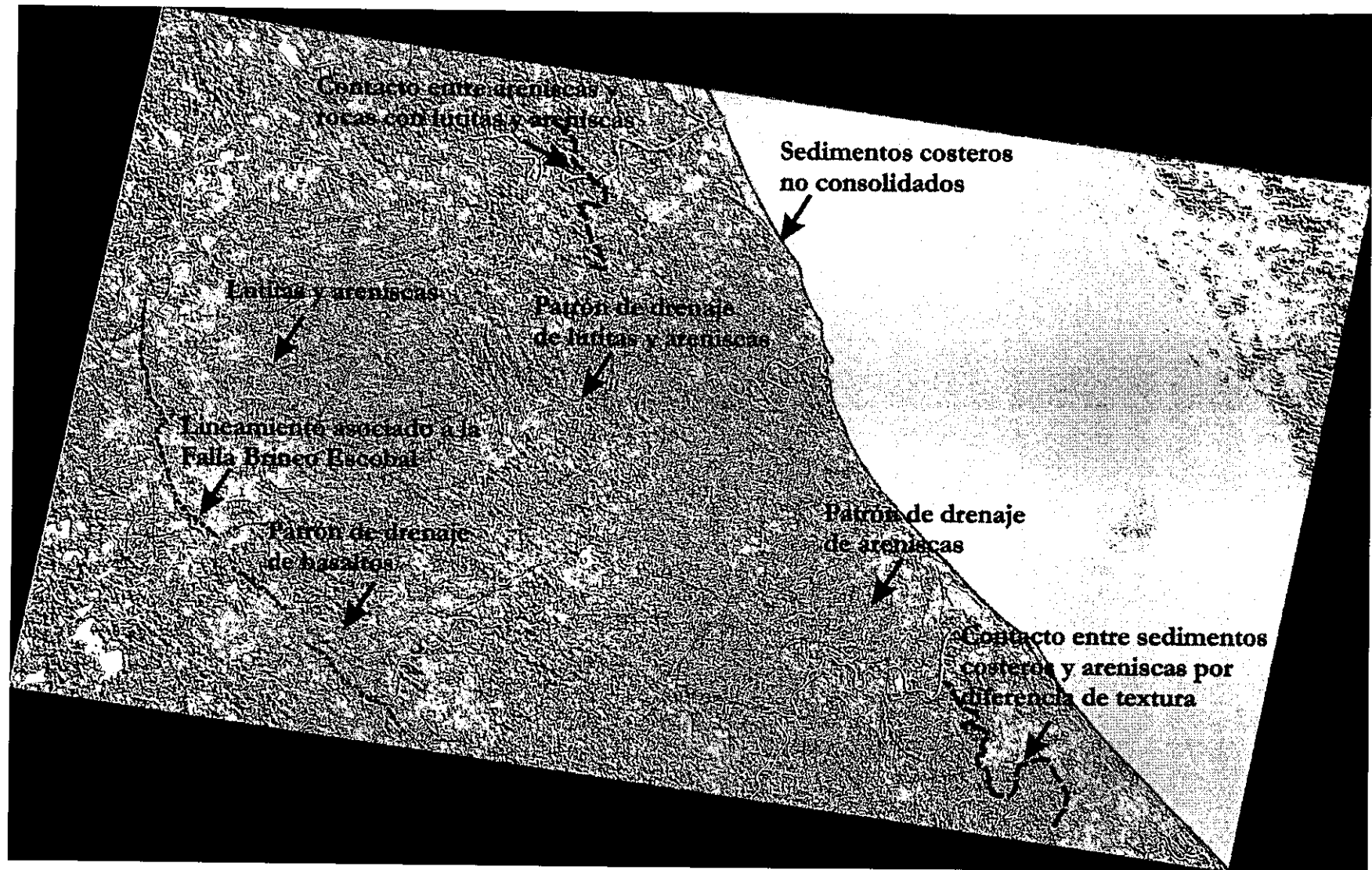


Figura 3.7 Imagen de la banda 4 MSS a la que se le aplico el filtro direccional NO

Todas las estructuras interpretadas se muestran también en la *Figura 3.7*. Se puede observar que no existe preferencia por alguna dirección. Las fracturas con mayor alcance se encuentran en las rocas sedimentarias, sobre todo en las compuestas por lutitas y areniscas. En el centro de la imagen la densidad de las fracturas es menor. En donde existen cambios de textura la densidad de las fracturas es mayor. Estos cambios en tono y textura representan contactos litológicos y entre estos las fracturas son más abundantes. El alcance de algunas fracturas se ve truncado al llegar a los sedimentos cercanos a los ríos o a los sedimentos costeros. La textura que presentan las rocas ígneas con estos filtros es lisa. Algunas pequeñas fracturas sobre estos materiales se pueden observar sobre todo en los contactos, alrededor de los cuerpos lisos descritos.

En todas las imágenes que resultaron de aplicarles filtros direccionales, se observa un lineamiento que se correlaciona con la falla Brinco Escobal. A los lados de esta falla las rocas presentan diferencias de textura y patrones de drenaje.

Del lado oriente de la falla, se observan lutitas y areniscas de textura lisa, con pocos patrones de drenaje, esta unidad litológica hace que el cauce del río Pantepec se desvíe hacia el norte bordeándola. A diferencia del lado occidental hacia la Sierra Madre Oriental, en donde el patrón de drenaje es abundante y todos los patrones de drenaje se dirigen hacia el río.

3.3.4. Interpretación de imágenes en falso color

El procesamiento de este tipo de imágenes satelitales representa un manejo de n dimensiones debido al número de bandas y sus posibles combinaciones, de tal manera que el ojo humano pueda distinguir los diferentes cambios en el rango del visible como combinación de los tres colores primarios rojo, verde y azul (Red Green Blue). Para la imagen MSS el número de dimensiones son cuatro. Para generar una combinación RGB perceptible se despliega en cada eje de un sistema cartesiano tridimensional a un color primario formando un cubo de color RGB (*Showengerdt, 1983*) y en donde la diagonal del origen a la esquina contraria representa los tonos de grises.

Se seleccionó la composición 432 MSS, es decir en el canal del rojo la banda 4, en el verde la banda 3 y en el azul la banda 2. Estas bandas cubren la mayoría de la información de la imagen. Además se tiene información de la región del espectro del visible y del infrarrojo. El análisis estadístico de la imagen también corrobora esta selección. Al realizar otras composiciones como 123, 124, no se observa tanta diferencia en la respuesta espectral de los materiales expuestos. Incluso en combinaciones con cocientes de bandas como 1/2, 2/3, 3/4 no resultó tan marcada la diferencia de tonos como en la combinación 432.

La imagen resultante de esta composición es la mostrada en la *Figura 3.8*. De manera general el color de la imagen va de tonos amarillo, que es porque predominan los valores de reflectancia de la banda 3 y 2 en igual proporción, hasta tonos rojizos en donde predominan los valores de reflectancia de la banda 4. Se puede distinguir como en F, que hay pequeñas regiones de color morado características de las zonas urbanas. Las nubes están bien delimitadas con altos valores de reflectancia para las tres bandas como en G en color blanco.

Las diferentes tonalidades de colores marcan las diferentes composición de los materiales expuestos. Estos diferentes tonos están dentro de un estrecho rango de colores, de ahí que la imagen se torne con muy pocos cambios de color. Predominan las rocas sedimentarias que tienen composición similar.

Los tonos de color amarillos claro en esta composición son característicos de las rocas compuestas por lutitas y areniscas B. Las rocas ígneas presentan un color anaranjado con su textura lisa que las caracteriza H. Los sedimentos a las márgenes de los ríos como en C presentan una intercalación de color verde. En A se observan sedimentos similares pero a diferencia de los de C, están cubiertos por zonas de cultivo que hacen que se tornen de un color café o por otra actividad humana que hace que la respuesta espectral de estos difiera de los primeros.

Los sedimentos cercanos a la costa muestran colores más oscuros en tonos de café como en E. Las rocas compuestas solo por areniscas en D son de color más oscuro que las que tienen intercalación de lutitas. Estas tonalidades de color muestran que hay una similar respuesta espectral de los diferentes materiales expuestos en la superficie que componen la zona.



Figura 3.8 Composición en falso color RGB 432 de la imagen MSS

Los diferentes patrones de drenaje descritos anteriormente se correlacionan con las diferentes tonalidades. Para cada litología corresponde un patrón de drenaje y un diferente tono de color. Por lo que es importante que se correlacione toda la información disponible de la zona para construir un modelo con toda esta información que ayude a la caracterización de la zona.

3.4. Modelo tridimensional del sur de la cuenca

En la actualidad, se tiene especial interés en conocer las características geológicas del subsuelo en esta cuenca, pero poco se ha hecho para correlacionarlas con las manifestaciones superficiales. Un modelo geológico integral de una cuenca o región petrolera deberá incluir varios tipos de datos provenientes de varias disciplinas, lo que permitirá entender de manera más general las relaciones que hay entre los elementos del lugar. La información necesaria para crear este modelo consta de la imagen de satélite, la localización de los campos y pozos, la información de la columna geológica de los pozos, la información sísmica interpretada y otros estudios adicionales como serían las interpretaciones de magnetometría y gravimetría.

Toda esta información administrada de manera eficiente podría generar un modelo dinámico que podrá ser utilizado por varias disciplinas. Es importante que dicho modelo se encuentre de manera digital, para que personas de diferentes disciplinas puedan acceder a esta información fácilmente. Así, como cada estudio nuevo que se realice no se tendrá la necesidad de recurrir a recopilar la información ya que ésta estará disponible en un solo lugar.

Para la construcción del modelo se necesitó recopilar la mayor cantidad de información disponible. La imagen de satélite que se utiliza para construir el modelo, queda comprendida en la región que administra el Activo de Exploración de Petróleos Mexicanos denominado Misantla-Golfo de México (*PEMEX, 1999*) y éste activo tiene varios objetivos para exploración (*Figura 3.9*).

Existen en la actualidad varios campos productores en los diferentes plays que lo componen. Los campos pertenecen a un play en específico que puede ser del Terciario, El Abra, Tamabra, San Andrés o Synrift. La información de la geología del subsuelo se obtuvo de las columnas estratigráficas de 49 pozos distribuidos en toda la cuenca.

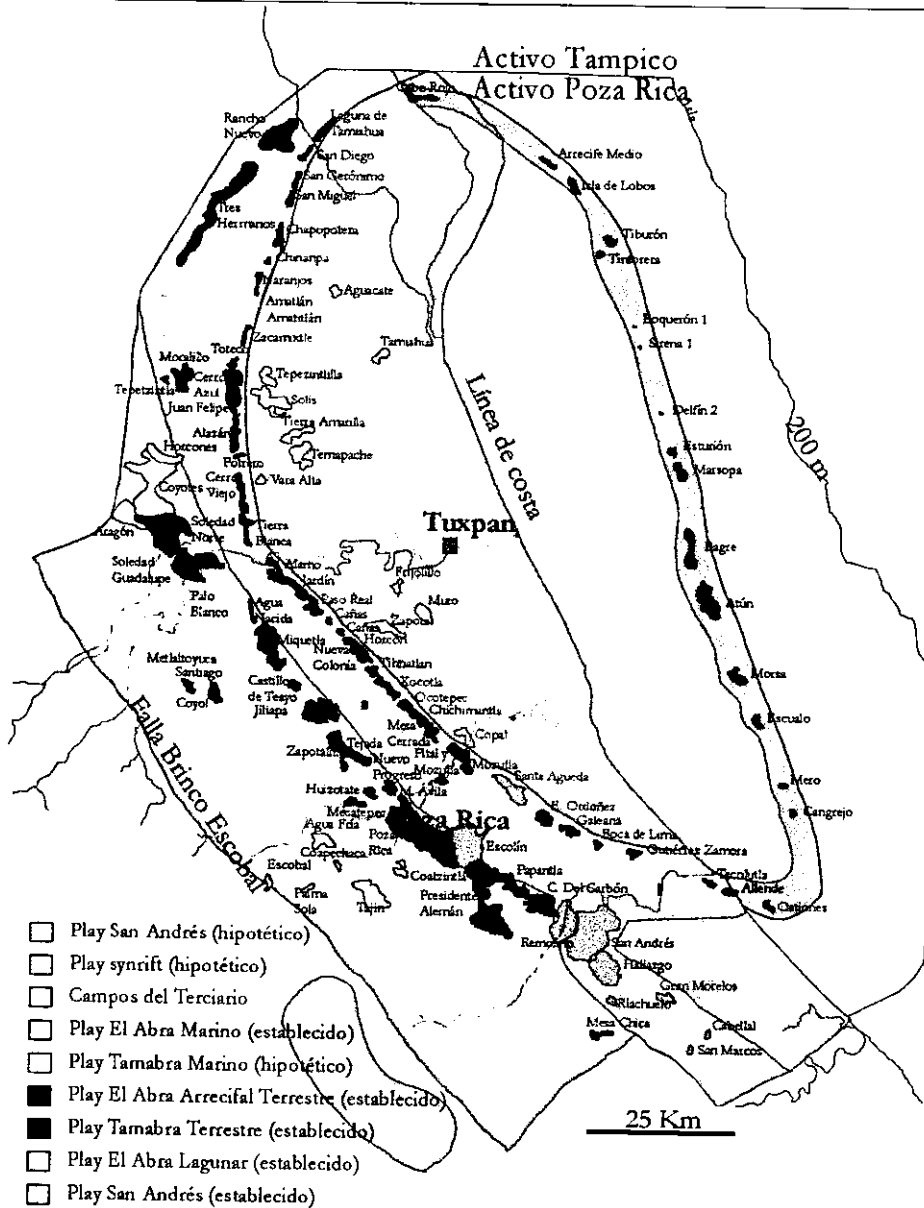


Figura 3.9 Campos y objetivos de exploración en la cuenca Tampico-Misantla (Tomado de PEMEX, 1999)

Estos están agrupados en siete perfiles publicados por Moreno-López, (2000). Se obtuvieron dos líneas sísmicas y la información de la estructura del basamento en 3D.

3.4.1. Pozos

Con la finalidad de construir un modelo tridimensional con la distribución de las capas en el área, se recopiló la información de la columna geológica de 49 pozos.

Éstos pozos están distribuidos en un área mayor a la de la imagen MSS (ver *Figura 1.2* para ubicación). Los pozos están agrupados en siete perfiles (*Figura 3.10*).

El perfil 1 tiene una longitud de 123 Km y una dirección E-W. Toca a los pozos Huachinango-2, Renovación-1, San Sebastián-101 (cruza el perfil 4), Agua Nacida-2, Solis-200, Piedra Labrada-103 (cruza con el perfil 6), Tepetzintla-200, Camaitlan-1 y Callejón-1.

El perfil 2 tiene una longitud de 87 Km, corre de NE-SW. Pasa por la ciudad de Tuxpan y los pozos Tritón-1, Esturión-1, Tuxpan-3, Santa María-1, Jardín-105, Jardín-35, Agua Nacida-101 y Palo Blanco-110.

El perfil 3 tiene una longitud de 100 Km, corre de E-W. Toca a los pozos Atún-302, Tumilco-2, Muro-2, Zapotal-10, Horcon-102, Tincontlán-1 y Miquetla-123.

El perfil 4 es el más pequeño con una longitud de 30 Km. Toca a los pozos Zapotalillo-3, Plan de Ayala-1, Reparó-1, Reparó-2, Buenaventura-1, Mesita-1 y Cazones-2.

El perfil 5 tiene una longitud de 70 km y dirección E-W. Está al sur de la ciudad de poza Rica y toca a los pozos San Lorenzo-1, Chote-1, Cerro del Carbón- 101, Cedros-3 y Mero-1.

El perfil 6 corre de norte a sur y tiene una longitud de 150 Km. Es uno de los más largos y cruza al Paleo canal de Chicontepec. Toca a los pozos Piedra Labrada-101, Ahuatepec-1, Tecomate-101, Zapotalillo-3, Pardo-1, Corralillo-1, San Lorenzo-2 y Correo-1.

El perfil 7 tiene una longitud de 180 Km y cruza todo el arrecife. Toca a los pozos Tres Hermanos-133, Mellizo-1, Faja de Oro-3, San Sebastián-101, Tuxpan-3, Finca-1 y Negro-1.

En cada uno de estos perfiles se configuraron las cimas de las formaciones pertenecientes al Terciario, Cretácico y Jurásico en 3D, utilizando la información puntual de cada pozo e interpolando para el área con el método de Kriging.

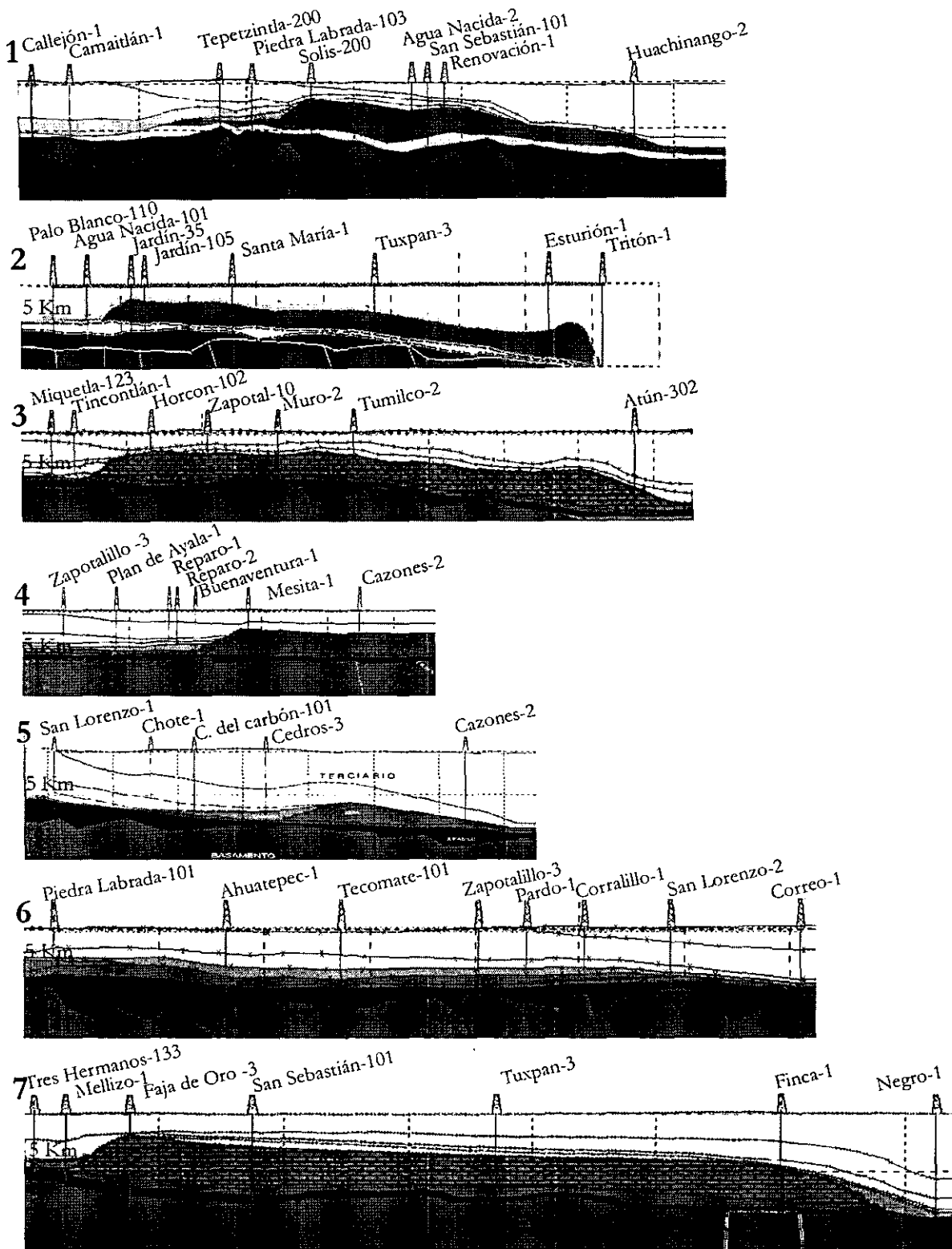


Figura 3.10 Perfiles realizados con información de pozos de la Cuenca Tampico-Misantla (Tomado de Moreno-López, 2000)

3.4.2. Sísmica

La información sísmica del área se encuentra en dos perfiles. Estos dos se localizan en el continente y son denominados Reg-2 y Reg-3 (Díaz-Navarro, 1977). Estas líneas sísmicas se encuentran al sur del área en dirección NE-SW (ver *Figura 1.2*).

La línea sísmica compuesta denominada Reg-2 (*Figura 3.11*), coincide con el perfil 3 al menos en un 70%. Cuenta con una longitud de 84 Km y con una dirección SW-NE. Los espesores del paquete Terciario son potentes con rangos de 1000 metros. El Cretácico tiene espesores moderados de 300 metros. El jurásico tiende a aumentar hacia el oriente con fallamiento de tipo normal. Todos estos sedimentos tienden a inclinarse hacia la parte NE. El basamento tiene una profundidad entre 1000 junto a la Sierra Madre Oriental y 2600 metros. Presenta bloques altos y bajos que tienden a ser más someros hacia la porción SW y a profundizar al NE.

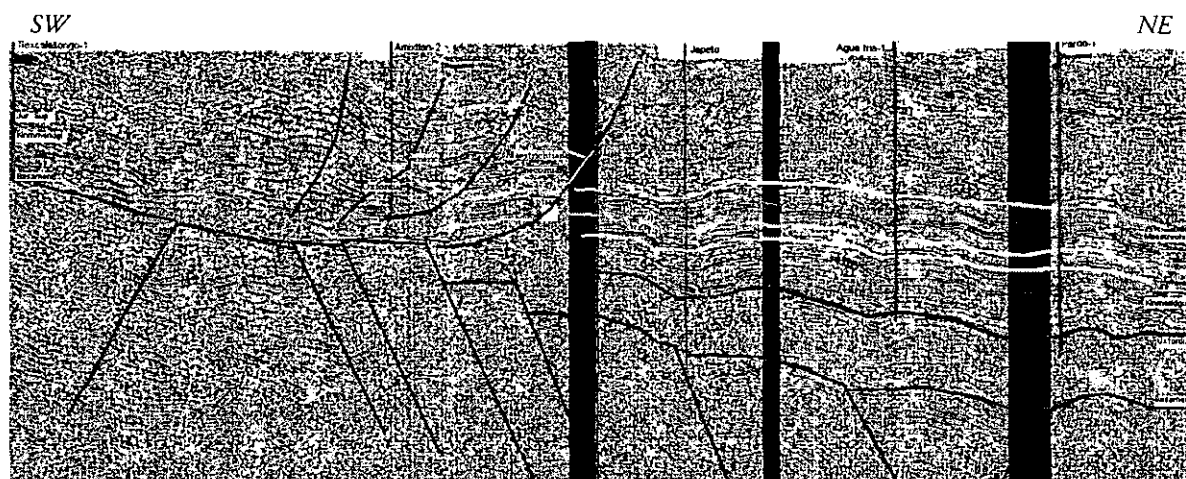


Figura 3.11 Línea sísmica Reg-2 (Tomado de Díaz-Navarro, 1977)

El registro sísmico Reg-3 (*Figura 3.12*) tiene una longitud de 84 Km. Ésta está entre las ciudades de Poza Rica y Tecolutla. Coinciden en su mayoría con el perfil 5.

En lo que se refiere a los paquetes sedimentarios estos presentan una pendiente de 20° con una caída al NE, indicando que todo el arrastre de los sedimentos es hacia la parte NE.

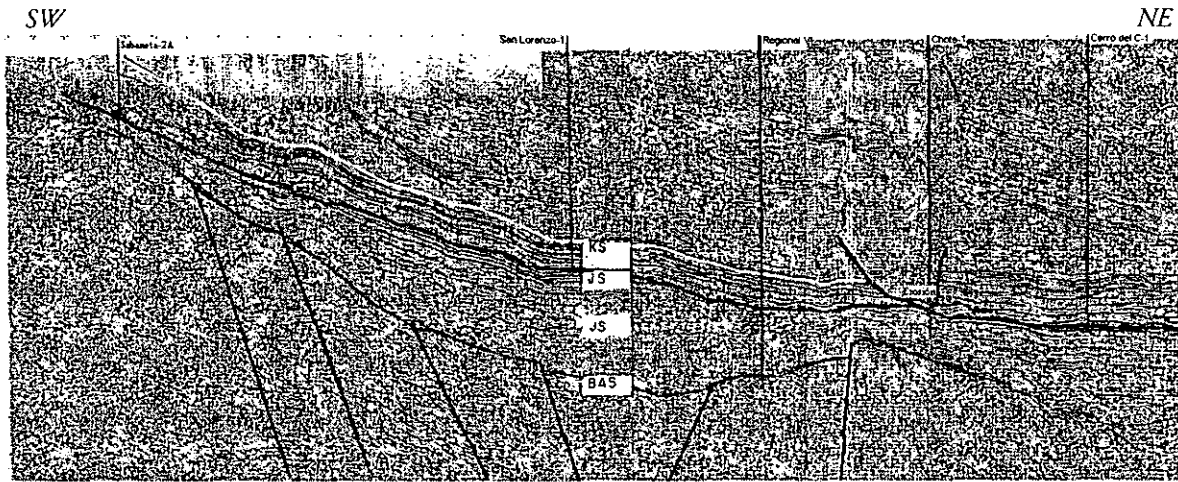


Figura 3.12 Línea sísmica interpretada Reg-3 (Tomado de Díaz-Navarro, 1977)

3.4.3. Gravimetría y Magnetometría

Los datos de gravimetría y magnetometría fueron usados en la interpretación y modelado de la morfología del basamento en la cuenca Tampico-Misantla por *Moreno-López (2000)*.

La adquisición corresponde a levantamientos tanto terrestres y marinos en toda la cuenca. Los datos se integraron, corrigieron y procesaron al aplicarles el método de inversión y con esto estimar la profundidad del basamento (*Moreno-López, 2000*). El basamento aquí descrito tiene la misma denominación que usó este autor y está compuesto por rocas de tipo ígneo y metamórfico debajo de los depósitos sedimentarios.

Solo se tomó el resultado del modelo de profundidades del basamento y se configuró su cima (*Figura 3.13*). Es importante para el aprovechamiento de la zona, tener la información del basamento en el modelo ya que dentro de la cuenca, en las zonas de los altos basamentales en donde se desarrollaron los cuerpos arrecifales se cree han sido favorecidas por la energía calorífica de cuerpos ígneos intrusivos durante la maduración de la materia orgánica.

3.4.4. Integración de la información

La combinación de la información de pozos, sísmica, magnetometría y gravimetría sirvió para configurar un modelo tridimensional al sur de la cuenca Tampico-Misantla (*Figura 3.14*). El modelo muestra la distribución del basamento, El Abra, Tamabra y del Terciario.

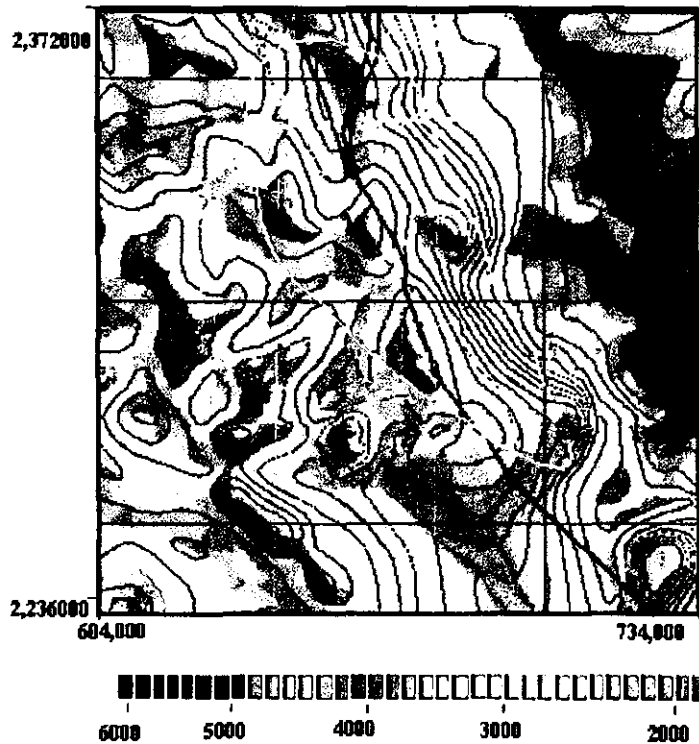


Figura 3.13 Basamento modelado por inversión de datos de gravimetría y magnetometría (Tomado de Moreno-López, 2000)

El paquete que se utilizó para el despliegue de datos fue GOCAD®. Las interfaces litológicas de todos los pozos, fueron incluidas en el modelo 3D como información unidimensional (pozo por pozo), posteriormente fueron malladas con un interpolador DSI (Designed Smooth Interpolation). Las mallas obtenidas son desplegadas como un sólido al que se le asigna un color y textura particular y corresponde a la cima de un estrato geológico en particular. De esta manera se procedió con todos los estratos litológicos de la zona. A la formación el Abra se le asignó una escala en color de acuerdo con sus profundidades.

La topografía del basamento fue introducida al modelo como una malla regular, ya que proviene de un proceso numérico de inversión.

Posteriormente se le asignó color y textura. Esto permite que puedan ser desplegados gráficamente uno a uno los estratos del modelo, e incluso hacer cortes verticales y diseñar perfiles litológicos en cualquier dirección y rumbo. Lo que a su vez da mayor flexibilidad y utilidad a la información digital.

Con este modelo se pudieron realizar algunas correlaciones que presenta la información superficial y la información del subsuelo. Antes de tener el modelo tridimensional, se sobrepuso a la imagen MSS la localización y extensión de los diferentes campos pertenecientes a los diferentes plays del lugar (*Figura 3.15*).

Se puede observar que los campos comprendidos en el play el Abra Arrecifal Terrestre, se alinean a un arco en la parte terrestre. En la imagen MSS este arco se forma con una serie de zonas casi sin patrones de drenaje de una textura lisa, pero de igual respuesta espectral que la de las areniscas en las que se encuentran.

El campo Santa Águeda que pertenece al play San Andrés también presenta una zona sin patrones de drenaje pero con diferente respuesta espectral (*Figura 3.15-A*). Estas zonas se extienden hacia el sur de este campo.

A diferencia de lo anterior, todos los campos del play Tamabra se encuentran debajo de las zonas con los patrones descritos de las lutitas y areniscas. En las zonas en donde estos patrones de drenaje no tienen una dirección definida y son demasiado cortos producen que la textura de la imagen sea rugosa. Los campos del Terciario algunos pertenecientes al Paleocanal de Chicontepec, se encuentran distribuidos en zonas aisladas, en las cuales la textura es lisa y no se observan patrones de drenaje característicos. Al incluir las fracturas podemos observar que los campos están alineados en áreas con poca densidad de fracturas superficiales. Solo muy pocas atraviesan alguno sobre todo en los campos pertenecientes al Terciario y al play Tamabra.

Con el modelo tridimensional se pudo observar que hay una relación entre las anomalías descritas de la imagen satelital con los altos estructurales de la formación Tamabra, Abra y el Basamento.

En donde están los altos estructurales de estas formaciones, los patrones de drenaje de las rocas expuestas en superficie son casi imperceptibles y los valores de reflectancia son altos mostrando colores muy blancos. Además, en estas zonas la densidad de fallas superficiales es poca si se compara con otras zonas.

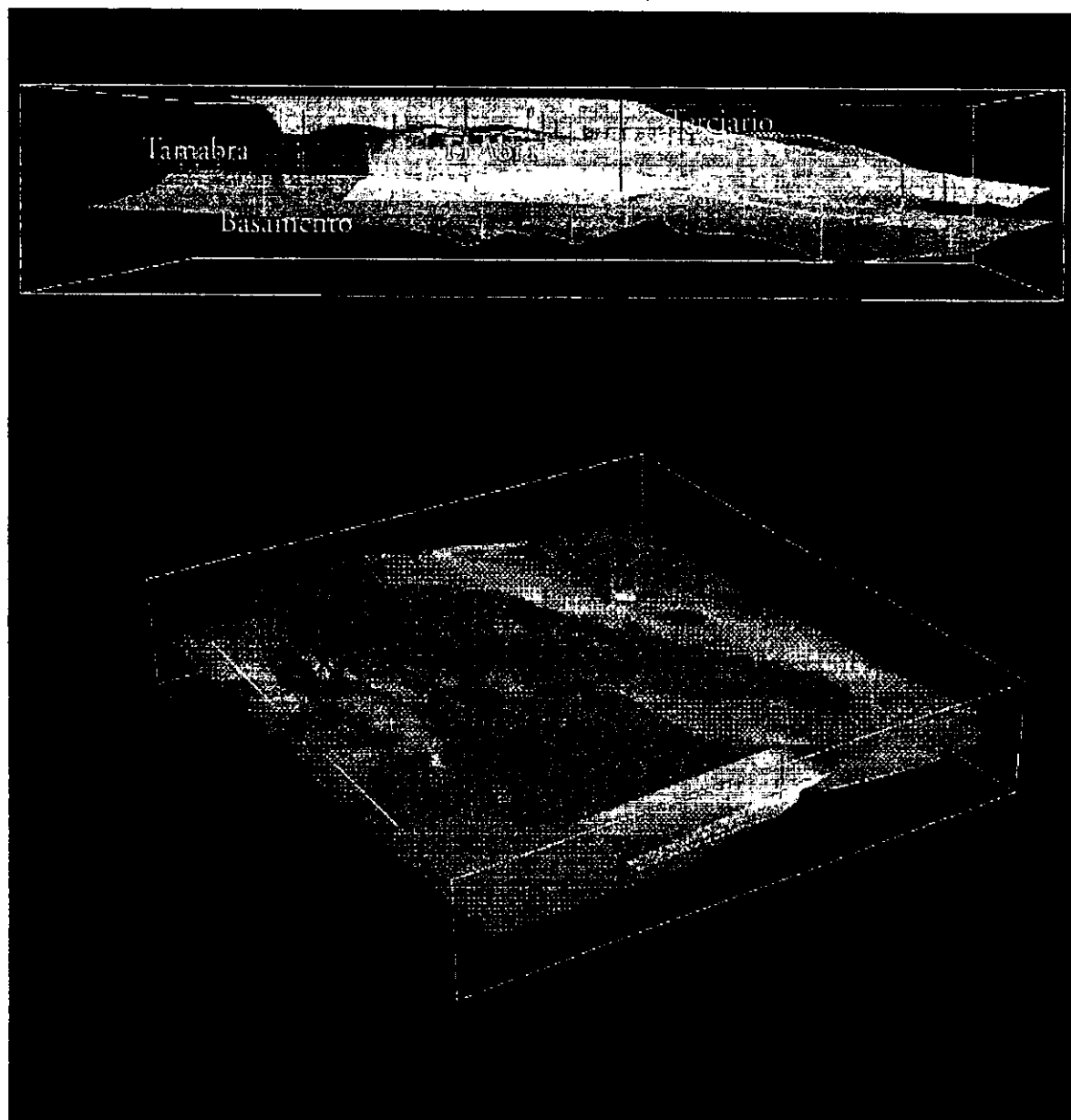


Figura 3.14 Modelo tridimensional del sur de la cuenca Tampico-Misantla

Alrededor de estos altos estructurales de las formaciones anteriores, en la imagen de satélite es en donde se tiene la mayor concentración de fracturas. Para la zona perteneciente al Paleocanal de Chicontepec estos altos estructurales no se observan y en la imagen se tiene sobre todo material sedimentario no consolidado.

Se pueden encontrar en la imagen otras zonas que presentan los mismos patrones superficiales que los que tienen los campos petroleros actuales. La primera zona está entre los campos Santa Águeda y E. Ordóñez y se extiende hasta el campo C. del Carbón (*Figura 3.15-A*). Esta región está constituida por areniscas que se determinaron con el análisis de la imagen de satélite, pero presenta características de textura lisa, similar a la de los campos vecinos y también los valores de reflectancia son altos para las cuatro bandas como en la localización de los demás campos. Con el modelo tridimensional se puede observar que esta zona en la superficie, se relaciona como una extensión de la formación el Abra y que forma parte de la estructura del arrecife.

La segunda zona se encuentra al sur del campo Presidente Alemán (*Figura 3.15-B*). El patrón de drenaje que presenta este campo es corto, la textura es lisa y tiene altos valores de reflectancia. Colindando al sur con este campo se observan características similares sugiriendo continuidad de este campo. En el modelo del subsuelo, la distribución de las formaciones no presenta cambios respecto a las capas que se encuentran debajo del campo Presidente Alemán.

Otras dos regiones se encuentran en lo que es el Paleocanal de Chicontepec. La zona comienza junto al campo Agua Fría hacia el norte y se extiende hasta el campo Coyol (*Figura 3.15-C*). Se ve interrumpida por una región altamente afallada en donde los patrones de drenaje y los valores de brillantez cambian. En las dos regiones, la mayoría de las capas en el subsuelo en el modelo 3D, se observan que están correlacionadas por pequeñas cimas. Por su cercanía a la línea sísmica Reg-2, se pueden inferir pequeñas cimas de las capas que forman el Jurásico. También los datos del modelo del basamento muestran en esta zona altos estructurales.

La imagen de satélite, la distribución y forma de las capas del subsuelo y la localización de plays, campos petroleros y pozos forman el modelo tridimensional de la *Figura 3.15*. De cada uno de estos elementos se obtuvo información importante.

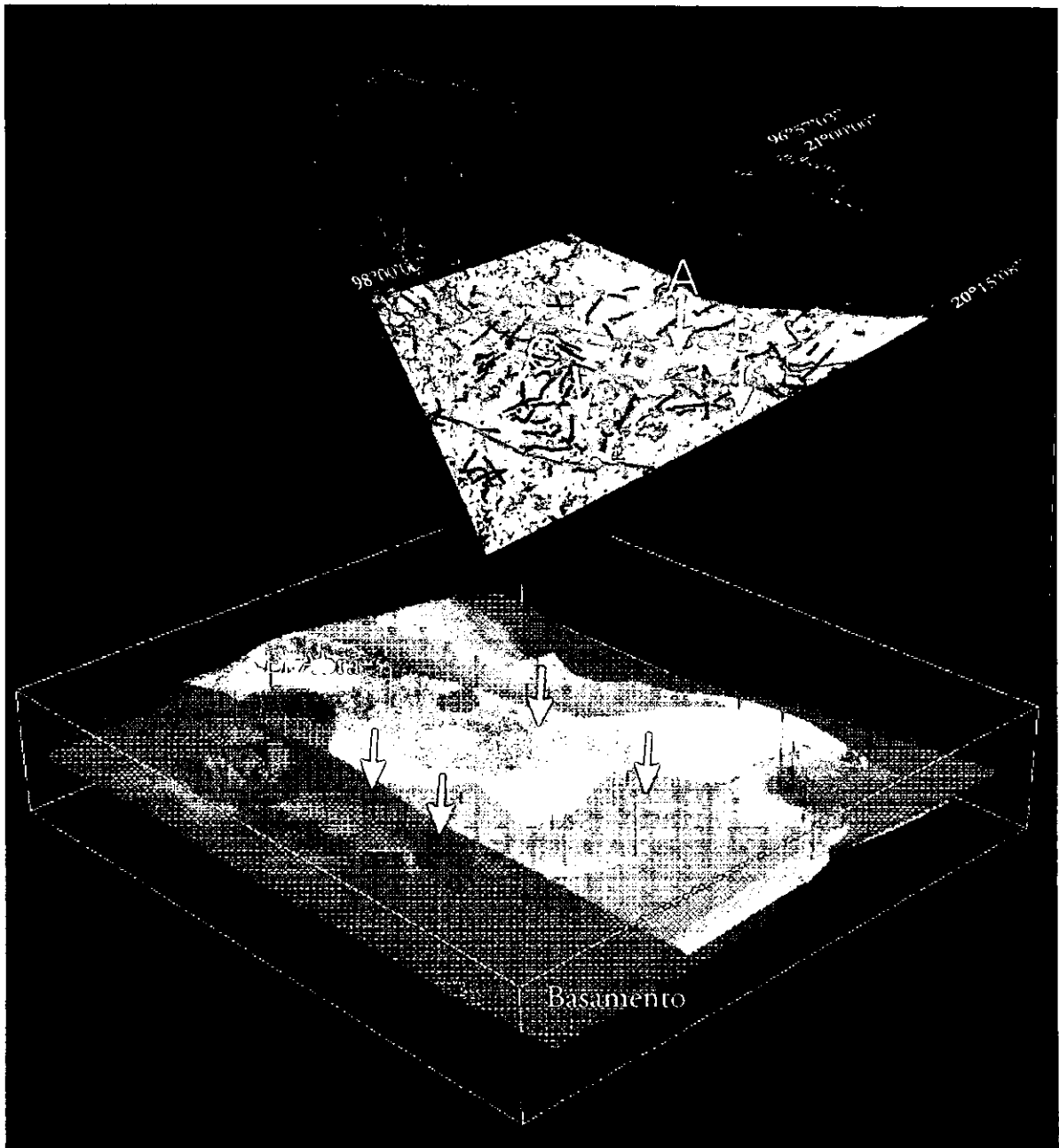


Figura 3.15 Modelo tridimensional del sur de la cuenca Tampico-Misantla con la imagen MSS

De las técnicas aplicadas a la imagen de satélite se determinaron fracturas, fallas, localizaciones de contactos litológicos, distribución de patrones de drenaje y localizaciones de zonas con igual respuesta espectral.

De los estudios geofísicos se determinó la distribución de las capas del subsuelo que a su vez proporcionaron su distribución de manera tridimensional y su relación con las otras capas.

De los pozos perforados, la localización, profundidad y columnas geológicas con las que se configuró la cima de las formaciones que atravesaron y las localizaciones de las zonas productoras.

De la información geológica se obtuvo la distribución de los campos y relaciones que guardan los diferentes plays en la zona.

Todos estos elementos integrados ayudan a tener una caracterización regional de la cuenca Tampico-Misantla. Cada elemento por separado no proporcionaría el mismo conocimiento de la cuenca que de manera conjunta. El modelo resultante muestra de manera integral la información desde la superficie hasta el basamento y los análisis que se determinaron son sobre la base de esta integración de información.

Para estudios posteriores, es más fácil tomar decisiones teniendo en cuenta un modelo integral, que teniendo por separado a los elementos antes mencionados. Desde el punto de vista económico y administrativo, esto ayuda a que se aprovechen más los recursos disponibles con que se cuenta. Muchas de las disciplinas relacionadas con la explotación y exploración de petróleo se verían beneficiadas con la construcción de modelos digitales tridimensionales como éste.

En exploración se podría ubicar la localización de nuevas zonas prospectos. La simulación matemática de yacimientos se apoyaría en el modelo geológico del yacimiento y sería también una de las disciplinas beneficiadas.

La localización para la construcción de líneas de distribución y recolección se podrán definir mejor teniendo conocimiento del terreno, de sus características y las relaciones que guardan con elementos humanos y geológicos.

Pero todavía hay más beneficios de la Percepción Remota. La utilización de las técnicas de análisis digital de imágenes de satélite puede utilizarse para más objetivos en otras regiones en las que se usan los mismos elementos y técnicas de análisis pero con tener diferente enfoque del presentado aquí. Es el caso del Pico de Orizaba en donde se mostrarán más de los beneficios que puede aportar esta disciplina al integrarla a otras.

Como parte final del modelo 3D se integró la información superficial y la del subsuelo y se construyó el modelo que se muestra en la *Figura 3.15*. Este modelo puede ser rotado, girado o aumentado y la información de cualquier pozo puede obtenerse con una simple tecla de computadora. También tiene la flexibilidad de proporcionar la información de cualquier estrato u objeto, en formato ASCII para poder utilizarla en cualquier paquete computacional o para otros fines de tratamiento petrolero, geológico o geofísico.

Capítulo 4

CASO 2: EVALUACIÓN GEOLÓGICA DE LA ZONA DEL PICO DE ORIZABA

4.1. Marco geológico

El Volcán Citlaltépetl o Pico de Orizaba, es el estratovolcán más alto de México y una de las estructuras andesíticas más importantes de América (5,675m sobre el nivel del mar). Está localizado en la parte oriental de la Faja Volcánica Transmexicana. El Citlaltépetl es un volcán con alto potencial de riesgo para las zonas urbanas cercanas, las cuales cuentan con una población de aproximadamente 500,000 habitantes en un radio de 40 Km, debido a su actividad eruptiva histórica.

4.1.1. Geología Regional

La Faja Volcánica Transmexicana es una provincia Plioceno-Cuaternaria que cruza la parte central del país (*Carrasco-Núñez y Masao-Ban, 1994*), entre los paralelos 18 y 21° latitud norte en la que existe gran actividad volcánica. En esta provincia se encuentran volcanes importantes como el volcán de Colima, Popocatépetl, Iztláhuatl, Citlaltépetl, entre otros grandes estratovolcanes, domos volcánicos, conos monogenéticos y algunas calderas. Ésta provincia volcánica se superpone a la Sierra Madre Oriental.

El basamento en la región del Pico de Orizaba consta de capas plegadas y afalladas de lutitas y calizas del Cretácico, que se extienden desde la planicie costera del Golfo de México hasta el Altiplano Mexicano (*Negendank et al., 1985*). Existe un importante desnivel entre la Sierra Madre Oriental y la Planicie costera, por esta razón, el volcán muestra asimetría. Del lado oeste tiene una elevación de 3,000 m mientras que en el lado oriental llega hasta 4,500 m de altura desde su base.

Esta área se caracteriza por vulcanismo de tipo basáltico, andesítico y riolítico. Al noreste del Citlaltépetl existe una zona de interés económico por los yacimientos geotérmicos que se presentan en la caldera de Los Húmeros (*Figura 4.1*).

Al norte de la misma estructura, se encuentra un estratovolcán andesítico denominado Cofre de Perote de 4,200 m de altura y de edad del Pleistoceno (*Negendank et al., 1985*). Otros elementos volcánicos del Pleistoceno al norte, son algunas calderas pequeñas con una estructura central de domo, como son Cerro Tecomales (3,500 m) y Cerro Las Cumbres (3,940 m) (ver *Figura 1.3*). Entre Las Cumbres y el Citlaltépetl hay algunos domos riolíticos y dacíticos. Al occidente de la zona existen también conos monogenéticos y cráteres de explosión o maars como Atexcac, Jalapasquillo, Cascantla, Aljojuca, Jalapasco o Tecuitlapa (ver *Figura 1.3*). Al noroeste del Pico de Orizaba, están Las Derrumbadas, domo riolítico complejo del Pleistoceno asociado a avalanchas y flujos de depósitos.

Al oriente del Pico de Orizaba, se encuentran pequeños volcanes y flujos de lava consolidada. Al sur está el volcán Sierra Negra de 4,650 m de altura que tuvo su primer erupción durante el Pleistoceno (*Robin y Cantagrel, 1982*). Entre el Pico de Orizaba y Sierra Negra existen depósitos de pómez. Así como también en la región del Cofre de Perote estos depósitos presentan diferentes espesores y fueron producidos por diferentes eventos explosivos.

4.1.2. Geología histórica y estratigrafía

Los estratovolcanes como el Citlaltépetl muestran una compleja evolución con períodos de construcción de conos, seguidos de erupciones destructivas (*Figura 4.2*). Una rápida revisión de su historia nos muestra que el Pico de Orizaba está compuesto de un primitivo estratovolcán en el que se levanta la cumbre del cono que hoy conocemos y que se construyó por tres distintas fases volcánicas y magmáticas descritas por *Robin y Cantagrel, (1982)*.

En la primera etapa que probablemente tardó más de un millón de años, hubo actividad volcánica efusiva discontinua. Las lavas están principalmente compuestas de andesitas (*Figura 4.2-A*). En esta etapa se construyó el cono del volcán Torrecillas o Paleo-Pico de Orizaba, durante el Pleistoceno. El final de esta etapa termina con el colapso en la porción norte del edificio, formando una caldera y la construcción del cono parásito llamado Sierra Negra que termina en la siguiente etapa.

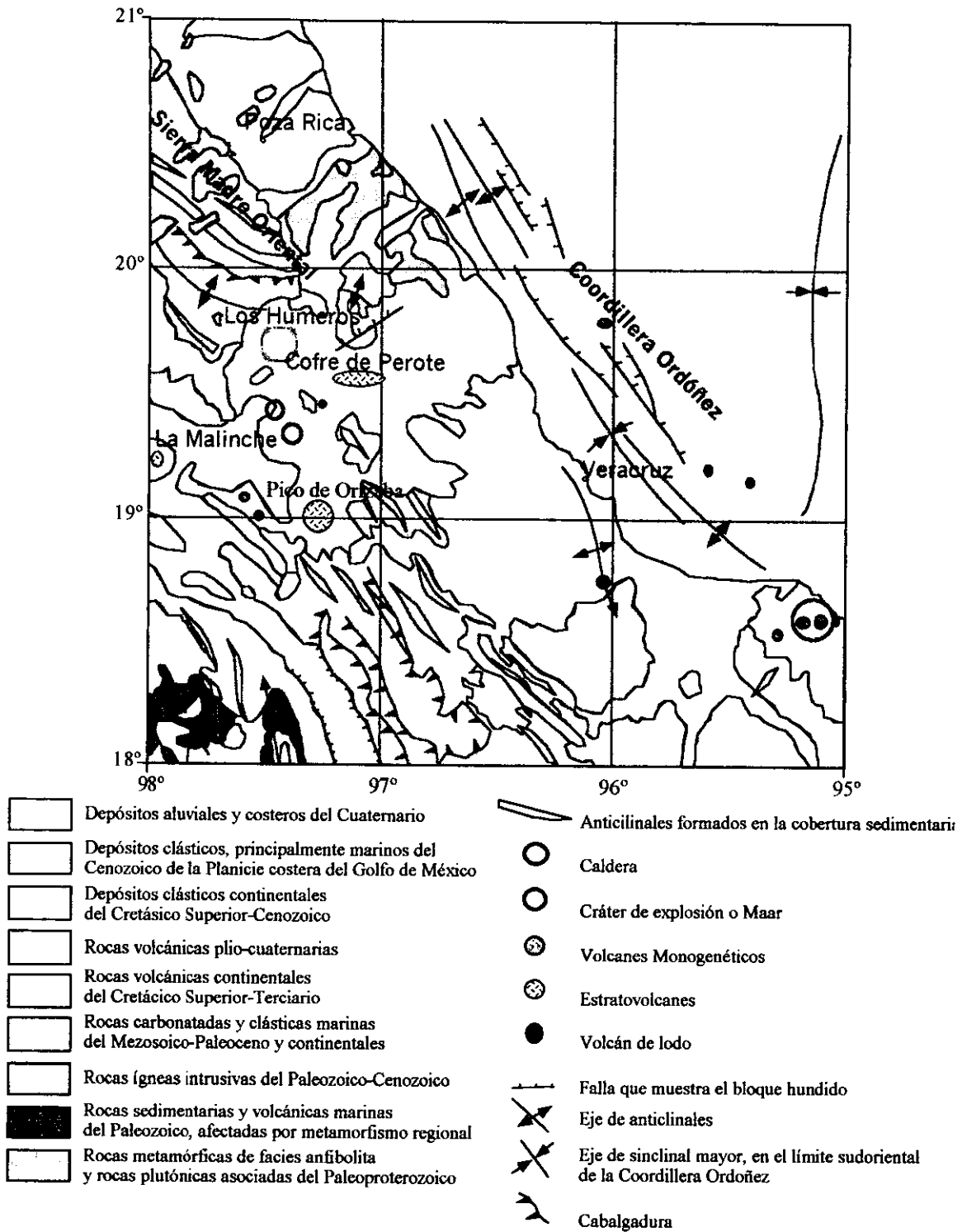


Figura 4.1 Mapa de la tectónica regional del Pico de Orizaba (Tomado de Serna, 1990)

En la segunda etapa (*Figura 4.2-B*) se sobrepone el cono del volcán Espolón de Oro y la extrusión de domos de sílice periféricos. Esta etapa empieza con la formación de la caldera seguida por una extrusión de domos de dacita y anfíbol y flujo de lava de andesita y dacita en el lado norte de la estructura y una erupción de ignimbritas ocurrida al final del Pleistoceno Tardío (*Carrasco-Núñez, 1992*).

En la última etapa (*Figura 4.2-C*) se construye el actual cono que comenzó en el Holoceno con erupciones explosivas intermitentes, que produjeron flujos piroclásticos de cenizas, eventos de emisión de pómez y bombas de composición dacítica y andesítica. El domo Chichimeco de dacita al noreste se forma en esta etapa.

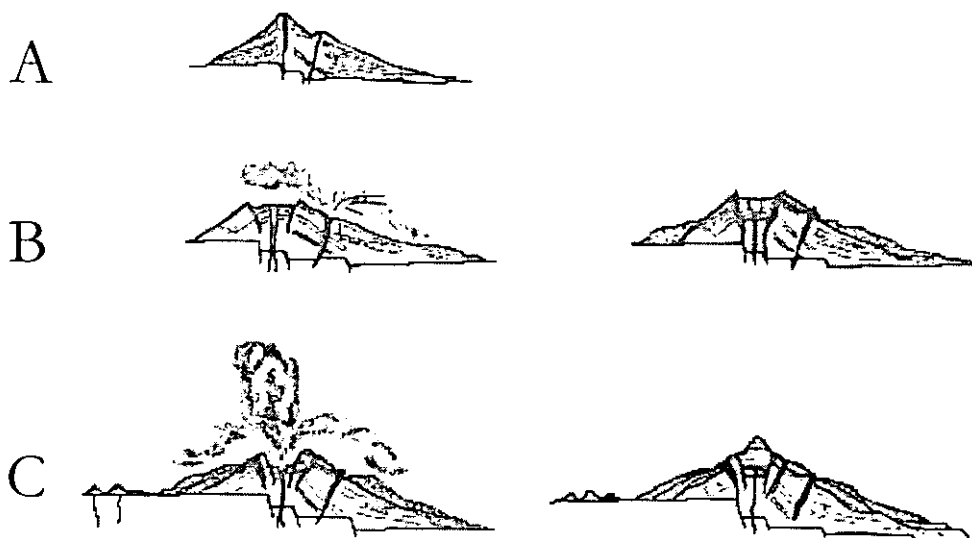


Figura 4.2 Evolución del Pico de Orizaba que comprende tres grandes periodos (Tomada de Robin y Cantagrel, 1982)

La estratigrafía del lugar puede ser descrita en función de las etapas de actividad volcánica, descritas anteriormente por *Carrasco-Núñez y Masao-Ban, (1994)* y *Carrasco-Núñez, (2000)* es decir, en términos de las secuencias de roca representada por los grupos Torrecillas, Espolón de Oro y Citlaltépetl (*Figura 4.3*).

El grupo Torrecillas del Paleo-Pico de Orizaba está formado por cuatro unidades:

1. La unidad Pilancón formada de andesitas y andesitas basálticas, con plagioclasas, ortopiroxenos y clinopiroxenos.
2. La unidad Jamapa de andesita y dacita, formada por flujos de lava masivos que contienen plagioclasas, hornblenda y clinopiroxenos.
3. La unidad Torrecillas está compuesta por andesita porfírica y brechas alternadas compuestas de plagioclasas con clinopiroxeno, hornblenda.
4. La última unidad la componen las rocas de Sierra Negra que consiste de flujos de lava de andesitas, porfírica y masivas que están ínterestratificadas con brechas que contiene plagioclasas, ortopiroxenos y clinopiroxenos al suroeste del volcán.

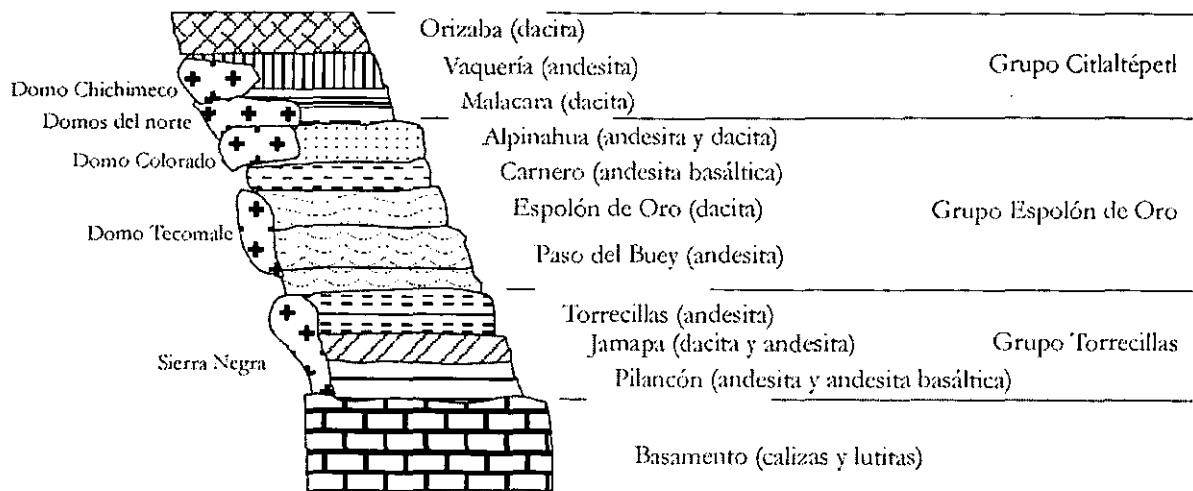


Figura 4.3 Columna estratigráfica del Pico de Orizaba, construida a partir de los estudios de Carrasco-Núñez y Masao-Ban, (1994) y Carrasco-Núñez (2000)

El grupo Espolón de Oro también tiene cuatro unidades:

1. La unidad Paso del Buey está dividida en dos partes y consisten de flujos de lava masivos, porfíricos y andesíticos que contienen plagioclasas y hornblenda.
2. La unidad Espolón de Oro formada por flujos de lava de dacita.

3. La unidad Carnero de andesita basáltica expuesta solo en el lado oeste del volcán y que contiene olivino, ortopiroxeno y clinopiroxeno.

4. La unidad Alpinahua la cual comprende una secuencia de lavas y depósitos volcánicos compuestos de andesita y dacita y que cubre la unidad Espolón de Oro al norte.

El grupo Citlaltépetl es el más reciente, está cubierto por el glaciar que provoca fuertes efectos de erosión en la cima del volcán. Este grupo está formado por tres unidades:

1. La unidad Malacara formada por dacitas de hornblenda porfirítica y que se muestra al sureste del cráter.

2. La unidad Vaquería de andesita, consiste de flujos de lava afanítica.

3. La dacita Orizaba es la unidad más reciente que se muestra en los flancos noreste y suroeste del volcán. Esta unidad es un flujo de lava morfológicamente distinta a las anteriores unidades, que contiene plagioclasa, hornblenda, ortopiroxeno y clinopiroxeno.

La actividad periférica al volcán que estratigráficamente se encuentra entre los grupos Espolón de Oro y Citlaltépetl está representada por la construcción de domos (ver *Figura 1.3* para localización):

1. El domo Tecomale situado al norte del cráter del Pico de Orizaba consiste en una sucesión de flujos de riolita y obsidiana.

2. El domo Colorado al suroeste de cráter, consiste de dacita porfirítica y algunos flujos de ceniza compuestos por dos unidades de material semejante. Estas unidades forman un anfiteatro que posiblemente se formó por flujos piroclásticos que destruyeron al domo.

3. Al lado norte del cráter del Citlaltépetl se encuentran otras estructuras como el domo Sillatepec asociado a flujo de cenizas y andesita.

3. a. El domo Mirador que está compuesto de dacita localizado al norte del Sillatepec, está el domo Chichihuale compuesto por un anfiteatro de composición semejante. Este domo está formado por una erupción masiva de dacitas porfirítica y flujos piroclásticos.

6. El complejo del domo Chichimeco que está compuesto de domos más recientes que los anteriores asociados a flujos de lava de andesita constituyen el cerro con el mismo nombre.

Al norte del área de estudio, está la zona denominada por *Rodríguez-Elizarraras, (1998)* como Campo Volcánico de Las Cumbres (CVLC) (ver *Figura 1.3*). Se compone de varios centros de emisión que incluyen un estratovolcán, domos dacíticos y riolíticos, así como conos de escoria y cráteres de explosión. La columna estratigráfica que muestra las principales unidades que forman este complejo se muestra en la *Figura 4.4* y las características de estos elementos, son descritos por este autor.

1. Las Cumbres. Estratovolcán con predominio de actividad efusiva. Derrames de lava fisurales muy extensos y potentes, de composición andesítica, dacítica y riolítica.

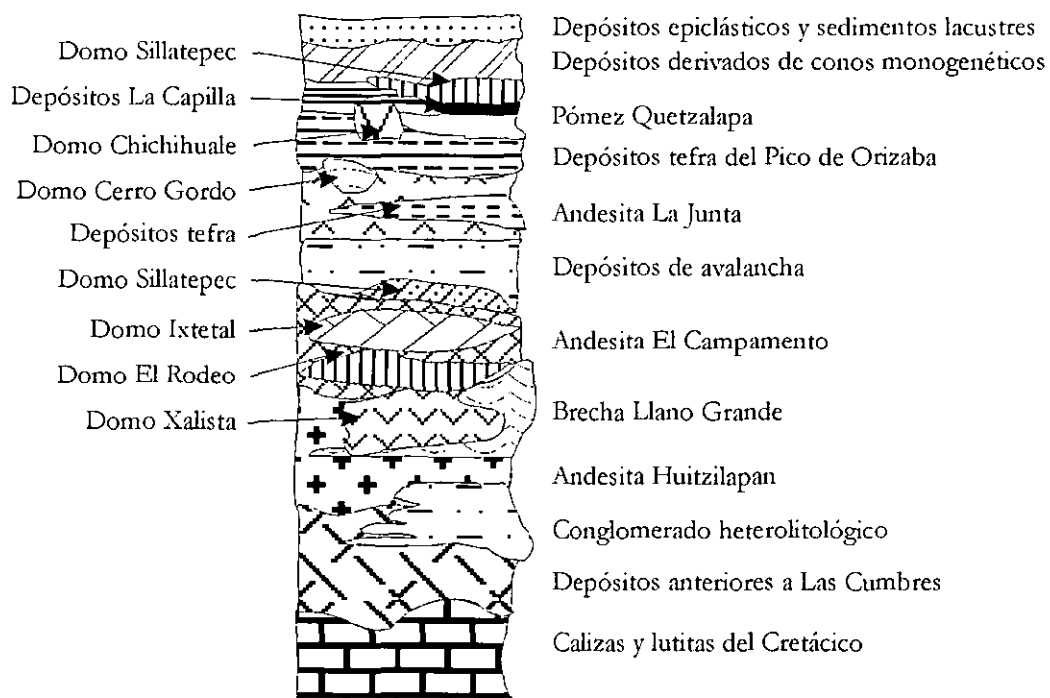


Figura 4.4 Columna estratigráfica del Centro Volcánico Las Cumbres (Tomado de *Rodríguez-Elizarraras, 1998*)

2. Llano grande. Domo de composición andesítica y basáltica. Se formó por depósitos pseudoignimbríticos con líticos de composición basáltica en la base y andesitas estratificadas en la cima.
3. Xalista. Domo de composición dacítica y riolítica. Se formó por derrames de lava dacítica en la base con intrusiones de obsidiana en la cima.
4. El Rodeo. Domo con predominio de depósitos de flujo piroclástico con obsidiana de composición riolítica.
5. Ixtetal. Domo con intrusiones de obsidiana en riolitas masivas y depósitos de flujo piroclástico.
7. El Cristón. Volcán monogénico parásito, que se ubica en el flanco poniente de Las Cumbres. Se encuentra sepultado por depósitos de tefra más recientes como la pómez Quetzalapa.
8. Cerro Gordo. Domo de lava masiva de composición dacítica. Se ubica en la parte central del cráter de Las Cumbres. Su emplazamiento constituye la culminación de la destrucción del volcán Las Cumbres.
9. Jalapasquillo. Anillo de toba (Tuff Ring), de composición riolítica. Es un cráter de explosión con depósitos freatomagmáticos ricos en obsidiana.
10. La Capilla. Cráter de explosión de composición riolítica. Coincide con el probable centro de emisión de la pómez Quetzalapa.
11. Yolotepec. Domo exógeno de composición riolítica con predominio de depósitos piroclásticos de surgencia (surge deposits).

4.2. Procesamiento digital de imágenes de imágenes TM

Uno de los objetivos de la presente tesis es describir la geología superficial de la región del Pico de Orizaba basándose en técnicas de análisis de imágenes de satélite. La metodología que se sigue es el procedimiento propuesto por *Lang et al., (1987)* definido en el capítulo 1.

A las seis bandas que componen la imagen TM, se les realizó un procesamiento digital. La secuencia seguida en el procesamiento de la imagen, comienza con la definición del problema (*Jensel, 1986*). En este caso, distinguir las diferentes unidades litológicas de la zona del Pico de Orizaba. Se formuló una hipótesis con base en el objetivo y problema: los datos de las bandas TM permiten identificar, las diferentes unidades litológicas del área de estudio y lograr una mejor definición de contactos litológicos en comparación con otras técnicas geológicas.

Se utilizaron algunas de las mismas técnicas de análisis que se usaron con la imagen MSS del sur de la Cuenca Tampico-Misantla como son el análisis estadístico, el análisis geológico de bandas, la utilización de filtros direccionales y las composiciones en falso color. Pero dada la naturaleza de la imagen y el objetivo de esta parte de la tesis, se realizaron técnicas adicionales como la corrección geométrica y atmosférica de la imagen, el índice de vegetación, la clasificación no supervisada y la supervisada. También se utilizaron los principios de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de mapas geológicos con diferente información geológica de la zona del Pico de Orizaba.

4.2.1. Fuentes de información, equipos y programas de cómputo.

La imagen TM para este trabajo fue proporcionada por el Laboratorio de Sistemas de Información y Percepción Remota del Instituto de Geografía de la UNAM, cuenta con seis bandas (*Figura 4.5*) y sus características se muestran en la *Tabla 4.1*. Como el análisis es digital es necesario contar con un sistema de procesamiento de imágenes adecuado a la tecnología que se esté manejando. Los programas que se utilizaron para el tratamiento digital de la imagen fueron Idrisi para plataforma PC y para la integración de los resultados con los estudios previos se utilizó ENVI sobre una plataforma Macintosh, ambos del Departamento de Exploración del Instituto de Geofísica.

Tabla 4.1 Características de la imagen Landsat TM para la región del Pico de Orizaba

Características Generales
Fecha de Adquisición: 20-04-1990
Proyección: UTM (Universal Transverse Mercator)
Zona: 14N
Datum: NAD 27
Unidades: Metros
Esferoide: Clarke 1866
Tamaño de píxel: 28.5
Coordenada de referencia: (638391.759, 2139238.818)
Número de bandas: 6
Formato: BILL
Número de Bits: 8
Columnas y renglones: (2948, 2472)

4.2.2. Correcciones geométricas y atmosféricas

Antes de comenzar a interpretar la información geológica que resulta de la utilización de técnicas de procesamiento de imágenes, es necesario analizar los datos de la imagen disponibles desde el punto de vista de los posibles problemas que pudiera presentar en su forma de adquisición o de posibles efectos físicos que alteran dicha información. Con el fin de obtener una imagen limpia de efectos secundarios se realizaron dos tipos de correcciones, una geométrica y otra atmosférica.

Corrección geométrica

Las distorsiones geométricas que se generan al adquirir imágenes Landsat TM pueden ser sistemáticas o por efectos constantes como la velocidad del escáner o distorsiones no sistemáticas las cuales no son apreciables y que pueden ser debidas a la velocidad del sensor o variaciones de altitud (Floyd, 1996).

El formato de la imagen TM para este estudio, es el formato BIL (Band Interleaved by Line) (ver Tabla 4.1). Este formato pertenece a un grupo denominado NDF (NLAPS Data Format) y cuyas imágenes se corrigen geométricamente por dos operaciones básicas.

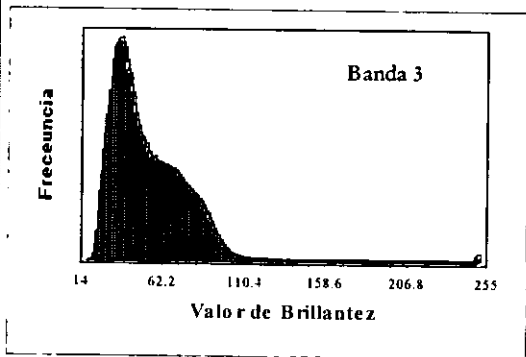
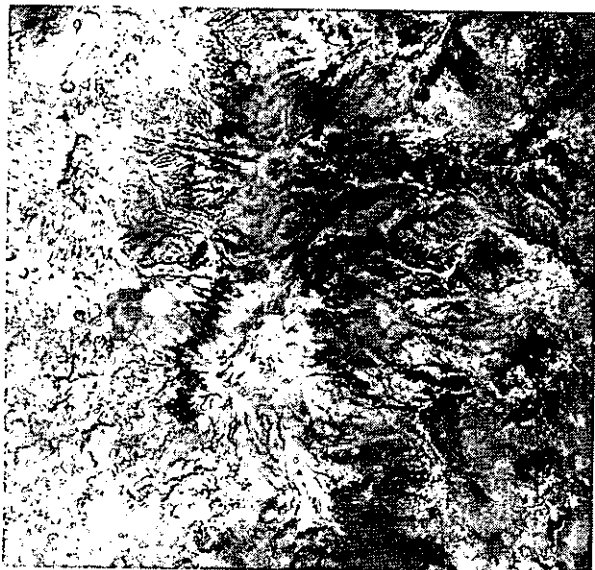
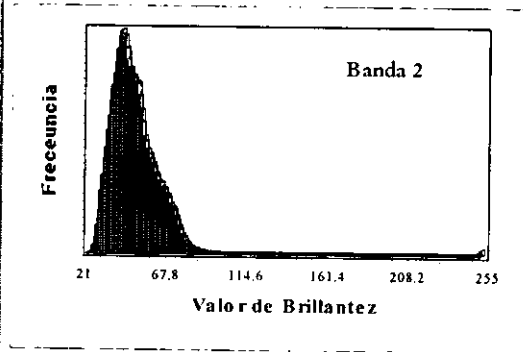
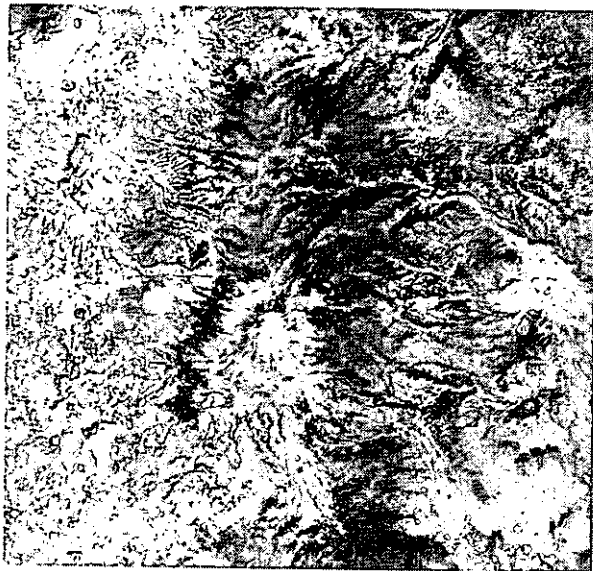
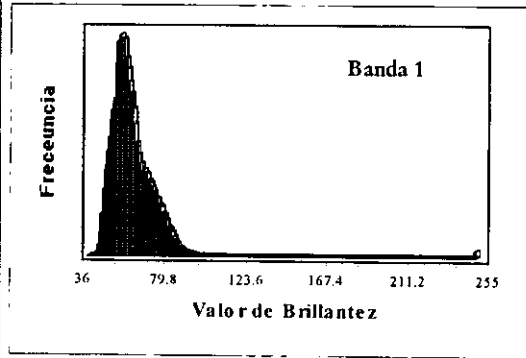
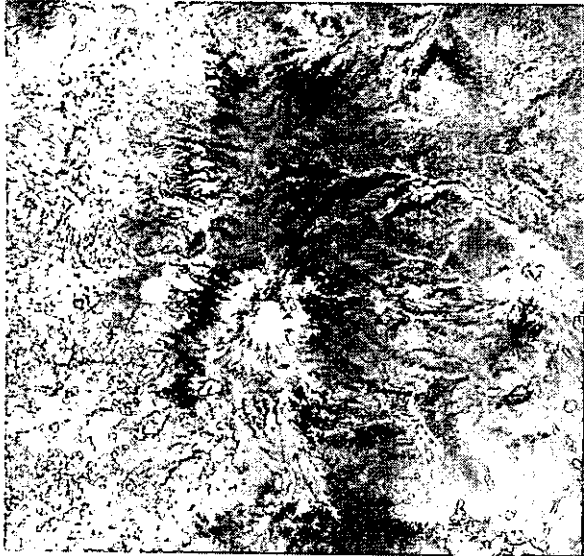
1. Remover las distorsiones de la imagen basándose en el conocimiento que se tiene del satélite y el sensor, que incluye la velocidad no lineal del escáner y las variaciones promedio entre la velocidad del espejo y el detector al momento de la adquisición. En el despliegue de las bandas, esta imagen no presentaba este tipo de problemas por lo que no fue necesario realizar esta corrección.
2. Referenciar la imagen a una malla regular basada en una proyección geográfica. Se realizó este tipo de corrección con el programa ENVI, utilizando la proyección UTM 14 (Universal Transverse Mercator) y 25 puntos de control para registrar la imagen. Con estos datos se le aplicó una interpolación bilineal a cada banda. Ésta consiste en interpolar primero a lo largo de una dirección para obtener dos valores intermedios de valor de reflectancia o número digital (DN) y después interpolar en la segunda dirección obteniendo el valor final de DN, obteniéndose cada banda ya corregida por estos efectos. Las bandas ya corregidas por este efecto son las mostradas en la *Figura 4.5*.

Correcciones atmosféricas

Debido a que la energía electromagnética viaja a través de la atmósfera, se genera una cierta dispersión en la información percibida. Existen dos métodos principales para eliminar estos efectos.

Un método consiste en sustraer el mínimo valor de reflectancia usando el histograma de frecuencia de cada banda. Se despliegan los histogramas de cada banda y se obtiene el valor mínimo de cada uno de ellos.

Este valor se sustrae a todos los valores de la imagen para que todos los histogramas empiecen lo más cercano a cero. La banda 7TM es la que presenta los menores efectos debidos a la atmósfera por lo que se recomienda siempre comparar el histograma de cada banda con el de esta.



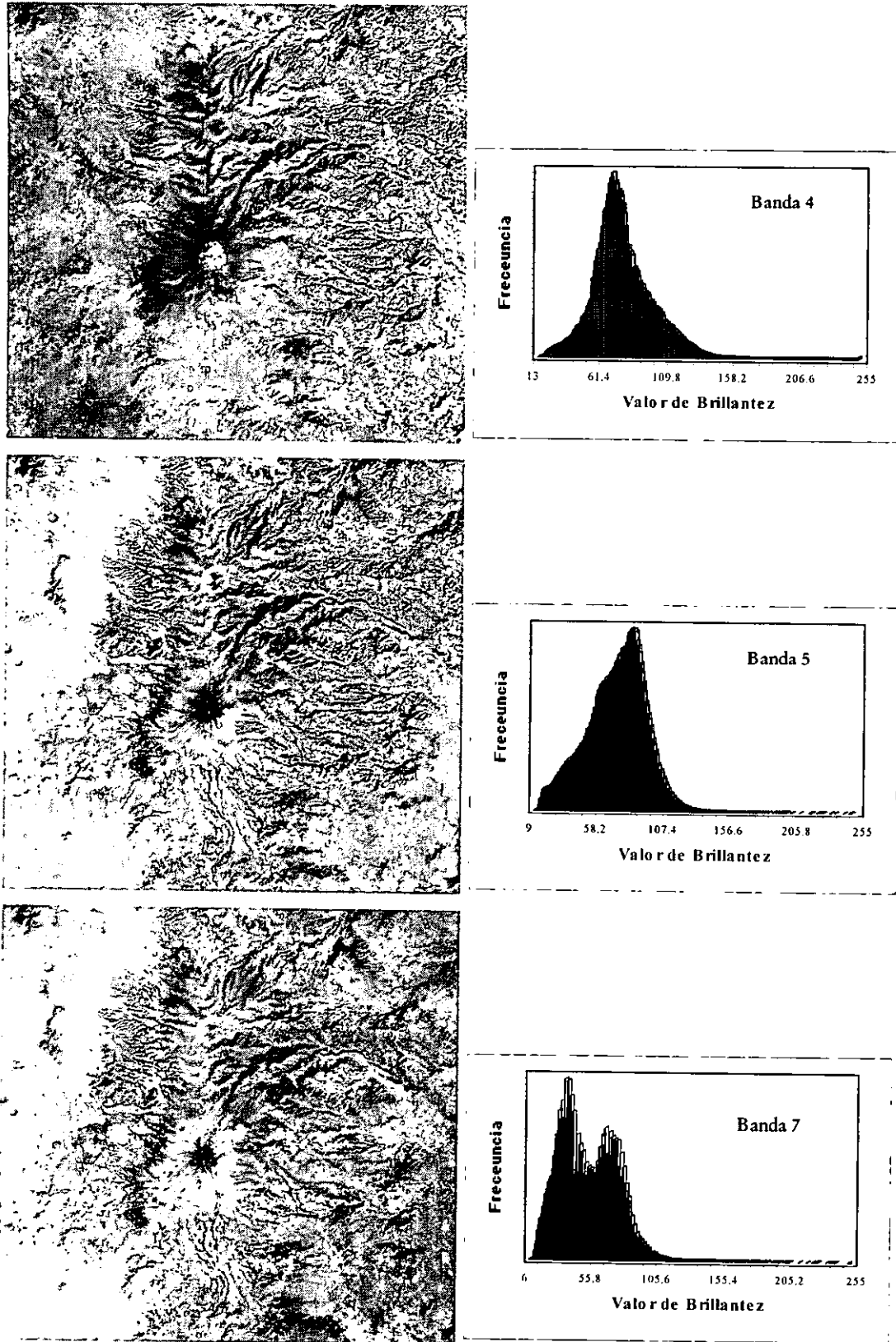


Figura 4.5 Las seis bandas TM con sus histogramas

Otro método consiste en sustraer el factor de corrección atmosférica en cada banda. Este valor es la ordenada al origen de una recta interpolada, que se obtiene al graficar los valores de los píxeles. En las ordenadas son los valores de la banda 7 y las abscisas los valores de la banda que se va a corregir.

Se efectuaron los dos métodos y se obtuvo que el factor de corrección y el mínimo valor de brillantez de cada histograma eran semejantes, por lo que cualquiera de los dos métodos arrojaban el mismo resultado. Se muestra en la *Figura 4.6*, los histogramas de las bandas antes y después de ser corregidos por este tipo de efectos. Por ejemplo, para la banda 3 el mínimo valor de brillantez es 14 (*Figura 4.6*), mientras que el factor de corrección resultó de 14.1. Se utilizó el valor de 14 y se sustrajo a toda la banda resultando el histograma que se puede observar empieza en cero.

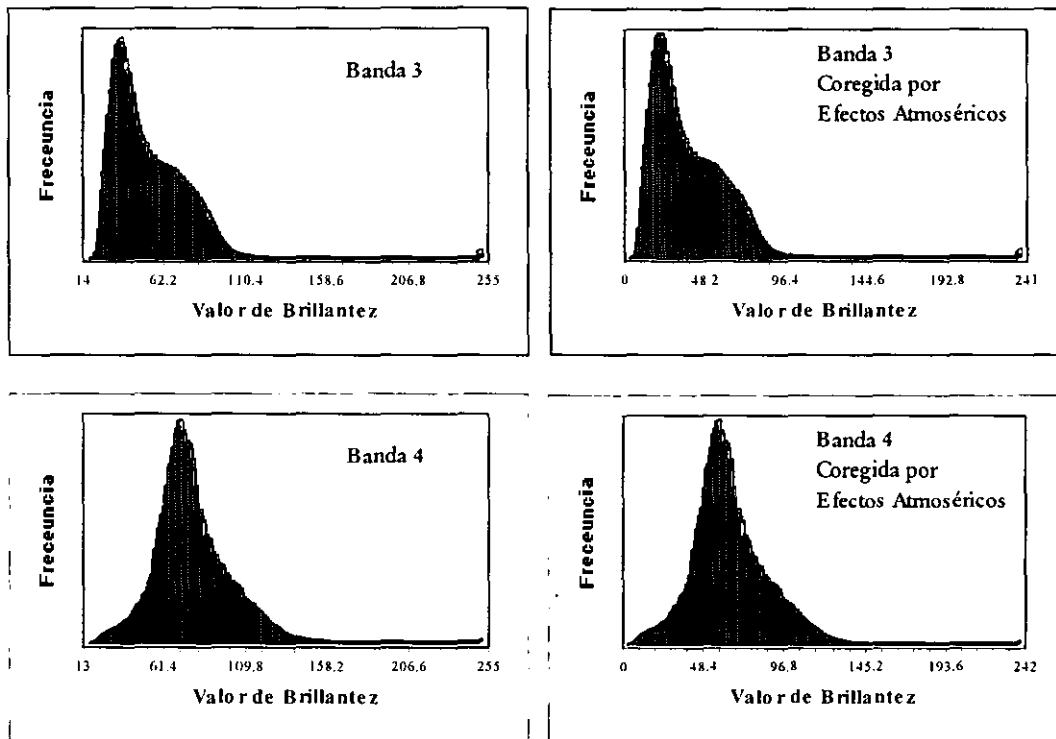


Figura 4.6 Ejemplo de histogramas a los que se les aplicó un método de corrección atmosférica

Se realizaron algunos despliegues en pantalla de los datos de las imágenes, observándose que no existe gran diferencia de información entre las bandas antes de corregir y después de corregir, esto debido a la poca dispersión al momento de adquirir la imagen.

Sin embargo, tanto las bandas corregidas y las originales fueron utilizadas en este trabajo con el fin de tener diferentes puntos de comparación de la información disponible.

Es necesario realizar y evaluar los dos tipos de correcciones mencionadas antes efectuar de otro procesamiento, ya que los resultados futuros podrán presentar desviaciones por estos efectos. En el caso de esta imagen no existe una fuerte desviación entre los datos iniciales y los datos corregidos.

4.2.3. Análisis estadístico de la imagen

Al igual que para la imagen MSS (ver 3.3.1) se realizó un análisis estadístico a la imagen TM del Pico de Orizaba. Los resultados obtenidos de las 6 bandas TM desde el punto de vista univariado (*Tabla 4.2*) se puede correlacionar con los histogramas de las bandas (*Figura 4.5*) en los que se puede observar la distribución bimodal presente en las bandas 1, 3 y 7 que ocasiona que las medidas de tendencia central no estén cercanas a los valores de máxima brillantez. A diferencia de la distribución unimodal de las bandas 2, 4 y 5, mostrando que la información se encuentra presente en una pequeña región de valores de brillantez.

De los resultados de éste análisis se puede determinar la alta correlación existente entre las bandas 1, 2 y 3 por el valor cercano a uno en la matriz de correlación. También se puede observar que la banda 4 no presenta correlación con ninguna de las otras bandas, por lo que una composición en falso color con esta banda será útil ya que no se duplica la información. Las bandas 5 y 7 presentan información parecida y la 5 con la 4 presenta mayor correlación de la información que la que pudiera presentar la 4 y la 7. Estos análisis se pueden verificar en el despliegue individual en escala de grises de cada banda, se observan patrones parecidos de brillantez en regiones iguales como el caso de las tres primeras bandas (1, 2 y 3) a diferencia de las otras tres (4, 5 y 7).

4.2.4. Índice de vegetación

Para la interpretación geológica de imágenes, la vegetación es un problema ya que puede cubrir aspectos estructurales o absorber y reflejar la energía de manera diferente a la de las rocas descubiertas.

Aunque podría presentar una ventaja ya que cierto tipo de plantas crece sobre un cierto tipo de rocas de donde absorbe los minerales que necesita.

Tabla 4.2 Estadística univariada y multivariada de la imagen TM para el Pico de Orizaba

Banda	1	2	3	4	5	7
Estadística univariada						
Media	59.22	47.20	49.09	74.49	70.74	50.06
Desviación Estándar	13.31	14.84	21.66	22.11	22.57	21.39
Mínimo	36.00	21.00	14.00	13.00	9.00	6.00
Máximo	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00
Matriz de varianza-covarianza						
1	177.18					
2	191.89	220.27				
3	260.81	306.33	469.25			
4	73.63	97.52	63.84	488.91		
5	125.07	175.22	297.70	203.85	509.33	
7	159.61	207.80	365.40	47.77	430.85	457.44
Matriz de correlación						
1	1					
2	0.9713	1				
3	0.9045	0.9528	1			
4	0.2501	0.2971	0.1332	1		
5	0.4163	0.5231	0.6089	0.4085	1	
7	0.5606	0.6546	0.7886	0.1010	0.8926	1

Las moléculas de clorofila absorben del orden del 70 al 90 % de la luz roja y verde, aunque reflejan más de verde, lo que hace que nuestros ojos observen la vegetación de este color. La vegetación viva también refleja en la porción del infrarrojo cercano. Varias fórmulas matemáticas para combinar estos datos con los rangos de las bandas pueden usarse para encontrar indicadores de vegetación.

En el caso del análisis geológico se puede asociar un cierto indicador de vegetación con un tipo de unidad litológica, lo que permite identificar diferentes tipos de litologías, ya que dependiendo de su composición, favorece el crecimiento de ciertos tipos de vegetación.

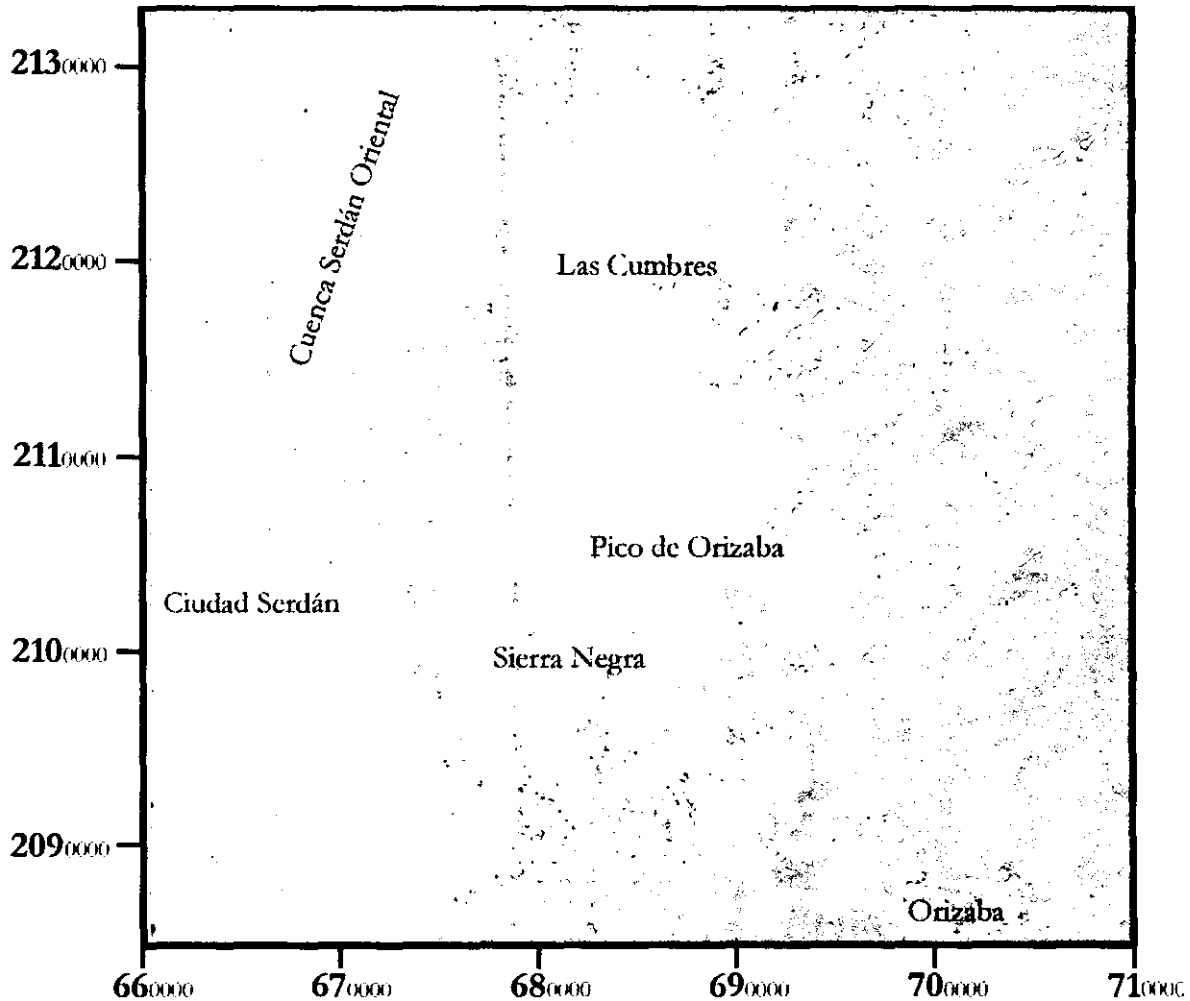


Figura 4.7 Imagen que muestra de manera cualitativa la vegetación en diferentes tonos de verdes y las zonas descubiertas o con vegetación pobre en amarillo

Estos métodos consisten principalmente en realizar cocientes de bandas utilizando las ventanas de absorción de estos materiales con el fin de aumentar la respuesta espectral utilizando una banda que se encuentre dentro de la ventana de absorción y otra fuera de ésta. El Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) es el que se utilizó para determinar de manera cualitativa las zonas cubiertas por vegetación.

Ésta fórmula ayuda a compensar los efectos por cambios debido a condiciones de iluminación, terreno inclinado, superficies irregulares y otros factores (Sanchez y Canton, 1999). En esta imagen se presentan estos problemas en la parte oriental.

La fórmula NDVI es:

$$NDVI = \frac{C2 - C1}{C2 + C1}$$

donde C2 es la banda del infrarrojo cercano y C1 la banda del rojo visible.

Se puede observar que en toda la región oriental de la imagen (Figura 4.7), las unidades litológicas están cubiertas por una densa vegetación debido al clima húmedo que se presenta en la zona y a la topografía irregular del terreno, favoreciendo el crecimiento de la misma.

Esto se asocia con el tipo de litología que tenemos y que en su mayoría son rocas sedimentarias a diferencia de la parte occidental, en la cual se puede observar que es una zona de cultivos de temporal y que por la época en que fue tomada la imagen estos presentaban suelo descubiertos listos para sembrar, se observa similitud con la región cercana al cráter del volcán y en la cual la roca no está cubierta por vegetación.

4.2.5. Interpretación geológica de las bandas 3, 4, 5 y 7 (TM)

De los datos del análisis multivariado y despliegues iniciales de las 6 bandas se seleccionaron las bandas 3, 4, 5 y 7 para su análisis en forma más detallada, ya que estas bandas brindan información geológica útil y no se duplica la información. Se discriminaron las dos primeras bandas del visible que presentan información similar a la de la banda del rojo (3) y además observando las firmas espectrales de diferentes rocas, observamos que la respuesta espectral por lo general es mayor en el infrarrojo medio y decrece en el infrarrojo lejano. Además estudios como los de Uribe-Luna, (1999) muestran que rocas de tipo andesítico y calizas muestran diferencias significativas en las bandas 4 y 7 TM.

Se mejoró la calidad visual de las imágenes de las bandas al aplicarles un ensanchamiento lineal con saturación al 2.5% (linear contrast stretch) debido a que la mayoría de la información se encontraba en una delgada franja de valores sobre el eje que va de 0 a 255 como se muestran en el histograma de la banda 3 (Figura 4.8). Éste método se aplicó a todas las bandas para mejorar su calidad visual y ayudar a la interpretación (Figura 4.5).

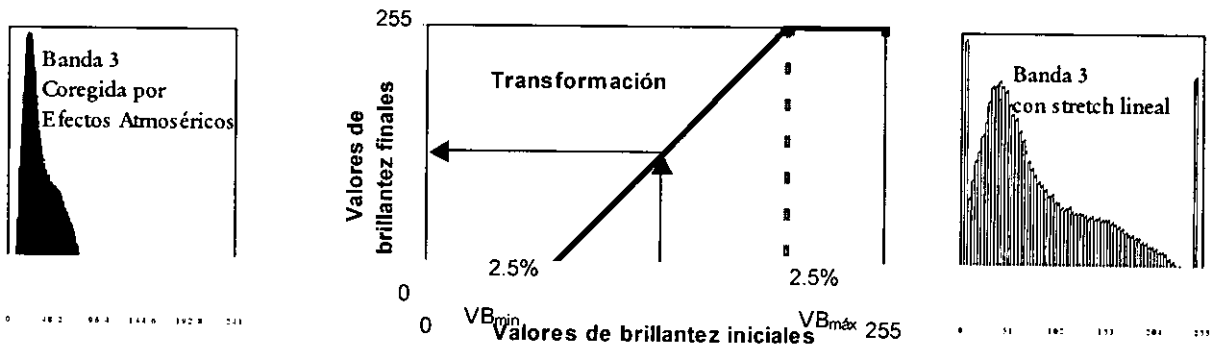


Figura 4.8 Transformación de una banda con un contraste con ensanchamiento lineal (linear contrast stretch)

Imagen en el rojo del espectro electromagnético (Banda 3 TM-Figura 4.9)

En la imagen de la Banda 3 TM (Figura 4.9) se puede distinguir al norte, la zona de las Derrumbadas (B) la cual presenta similitud de tono y textura que el de las rocas ígneas pertenecientes a Las Cumbres (C). Las rocas sedimentarias tanto calizas y lutitas (D) se muestran de un tono oscuro casi negro y no se observa contraste con las rocas volcánicas que están entre las cañadas de Las Cumbres (E), también se presenta una textura similar entre ellas. Los sedimentos que rellenan la cuenca Serdán-Oriental (A) y el material alrededor de los conos monogenéticos presenta un tono claro. En estos sedimentos existen zonas de cultivo de temporal los cuales opacan los colores claros de los sedimentos expuestos.

Se observa claramente una distinción entre material volcánico del campo Las Cumbres de un tono más claro, sobre todo en el domo dacítico Cerro Gordo (C) y posible material perteneciente al Pico de Orizaba (G y E) el cual es de un tono más oscuro y cuya textura se observa más fina.

También se observa una distinción entre las rocas volcánicas de tono oscuro o rocas sedimentarias de tono oscuro y el material que rellena algunas de las cañadas y que posiblemente sea material volcanoclástico (F e I) proveniente del Pico de Orizaba diferente al mencionado anteriormente.

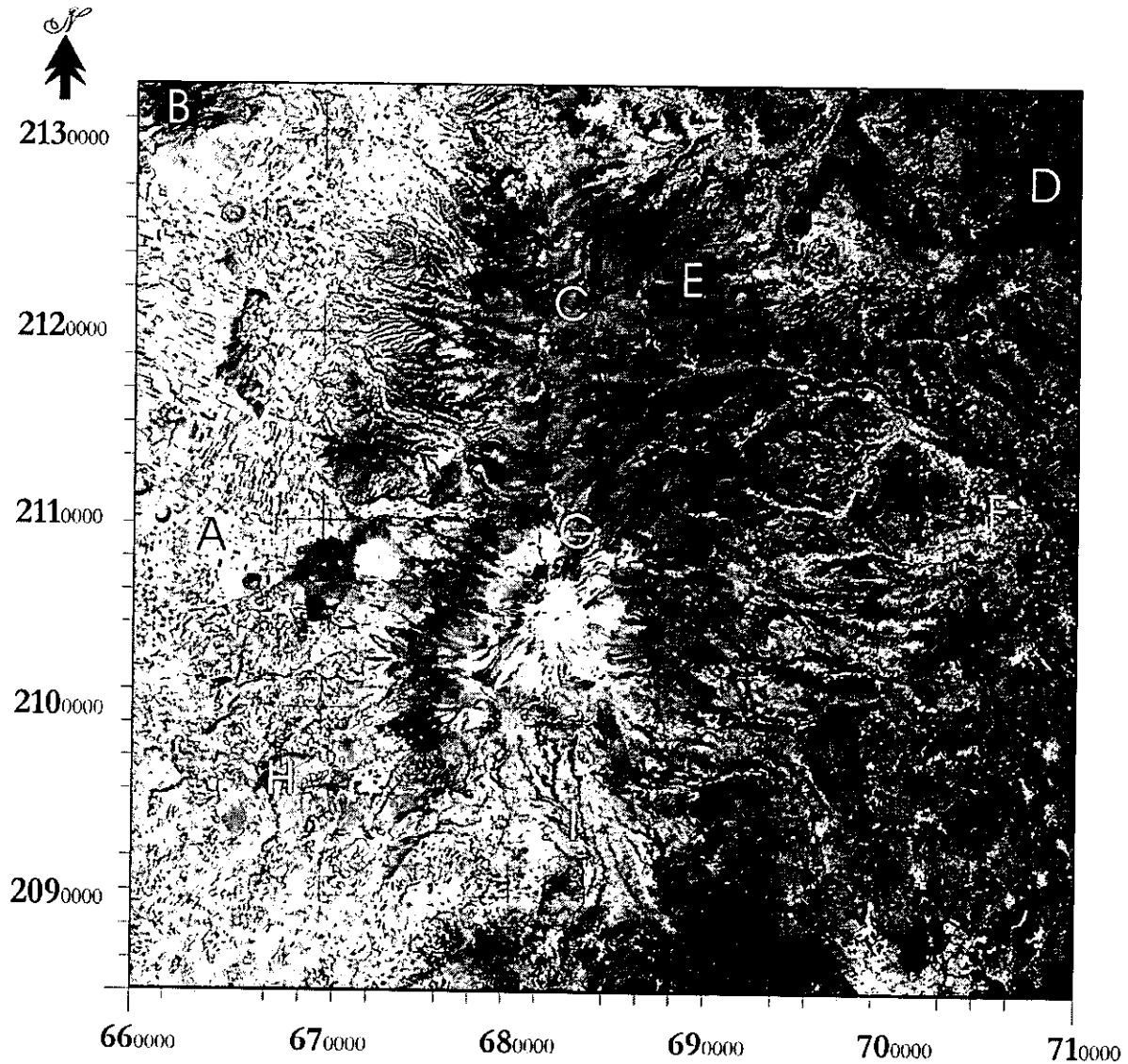


Figura 4.9 Imagen en tono de grises de la banda 3 TM

En H se puede observar una zona en la cual existen cerros de tipo basálticos y los cuales a su alrededor están cubiertos de sedimentos.

También en H, los basaltos se diferencian porque la textura cambia en comparación con los sedimentos de tono claro y zonas de cultivos más oscuras al occidente de estos. En la misma zona pero de diferente textura se observa material proveniente del Pico de Orizaba. En la zona del edificio del Pico (G), se puede apreciar la zona que está cubierta por nieve de un color blanco y las diferentes tonalidades de grises en la zona descubierta o de roca desnuda. La zona cubierta por vegetación hacia la periferia del cono se iguala en color con las rocas sedimentarias (D) y material del campo Las Cumbres (F).

Imagen en el infrarrojo cercano (Banda 4 TM-Figura 4.10)

En la imagen de esta banda (Figura 4.10), se puede apreciar dos diferentes regiones por sus tonos característicos y que se observan inclusive en la distribución bimodal del histograma de esta banda (Figura 4.5). Las irregularidades topográficas se observan mejor en esta imagen que en la imagen de la banda la banda 3. En esta imagen se aprecia mejor contraste de tonos entre las partes iluminadas y en sombra de una estructura.

En la parte sureste de la imagen se muestra la parte más clara y que son sedimentos en los que está la ciudad de Orizaba (A) y más al norte Coscomatepec (B). El tono de los sedimentos va disminuyendo hacia el norte siendo notorio el cambio de textura lisa por una de tipo rugosa en donde se encuentran estos sedimentos y las rocas sedimentarias (C).

Al sur de la imagen se tienen calizas y lutitas, que no se pueden distinguir por tono de los sedimentos. Estos dos tipos de litologías solo se pueden distinguir por su textura que se debe al cambio de vegetación que crece en diferentes litologías.

Se puede apreciar en esta banda la influencia y tamaño que tiene el centro volcánico Las Cumbres (D). Este centro volcánico, está compuesto por varias unidades litológicas que no se distinguen en esta imagen. Todas estas unidades presentan tonos y texturas similares. De igual manera se puede observar la influencia y alcance de la estructura del Pico de Orizaba (E) pero no se puede hacer una distinción entre éste y el volcán Sierra Negra que se encuentra junto a esta estructura al sur.

Los sedimentos en F tienen un tono oscuro a diferencia de los que están en A. Estos sedimentos se pueden diferenciar de las rocas basálticas y sedimentarias al norte de donde se encuentran. Las calizas y lutitas (G) se muestran en tonos claros en las regiones donde están iluminadas y en tonos oscuros en las zonas de sombra. También se pueden distinguir a los diferentes cráteres y conos en las periferias del Pico de Orizaba (H) junto a la zona de sedimentos pero no así en la zona cercana a los edificios volcánicos.

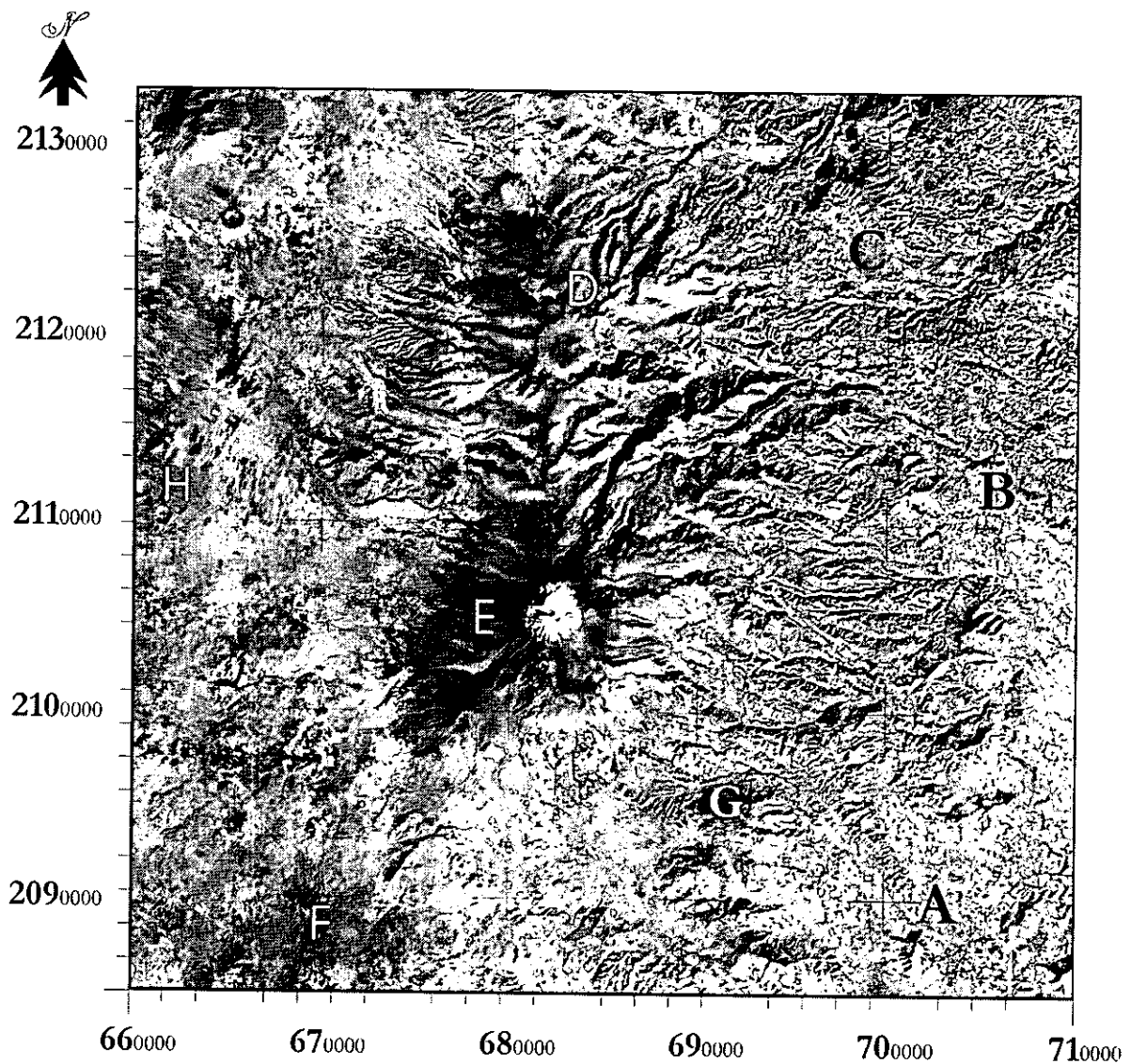


Figura 4.10 Imagen en tono de grises de la banda 4 TM

Imagen en el infrarrojo medio (Banda 5 TM-Figura 4.11)

En la imagen de esta banda (Figura 4.11) se pueden apreciar principalmente los patrones de flujo o drenaje de algunas unidades litológicas de la zona. Estos patrones se clasificaron a partir de la nomenclatura propuesta por Siegal y Gillespie, (1980).

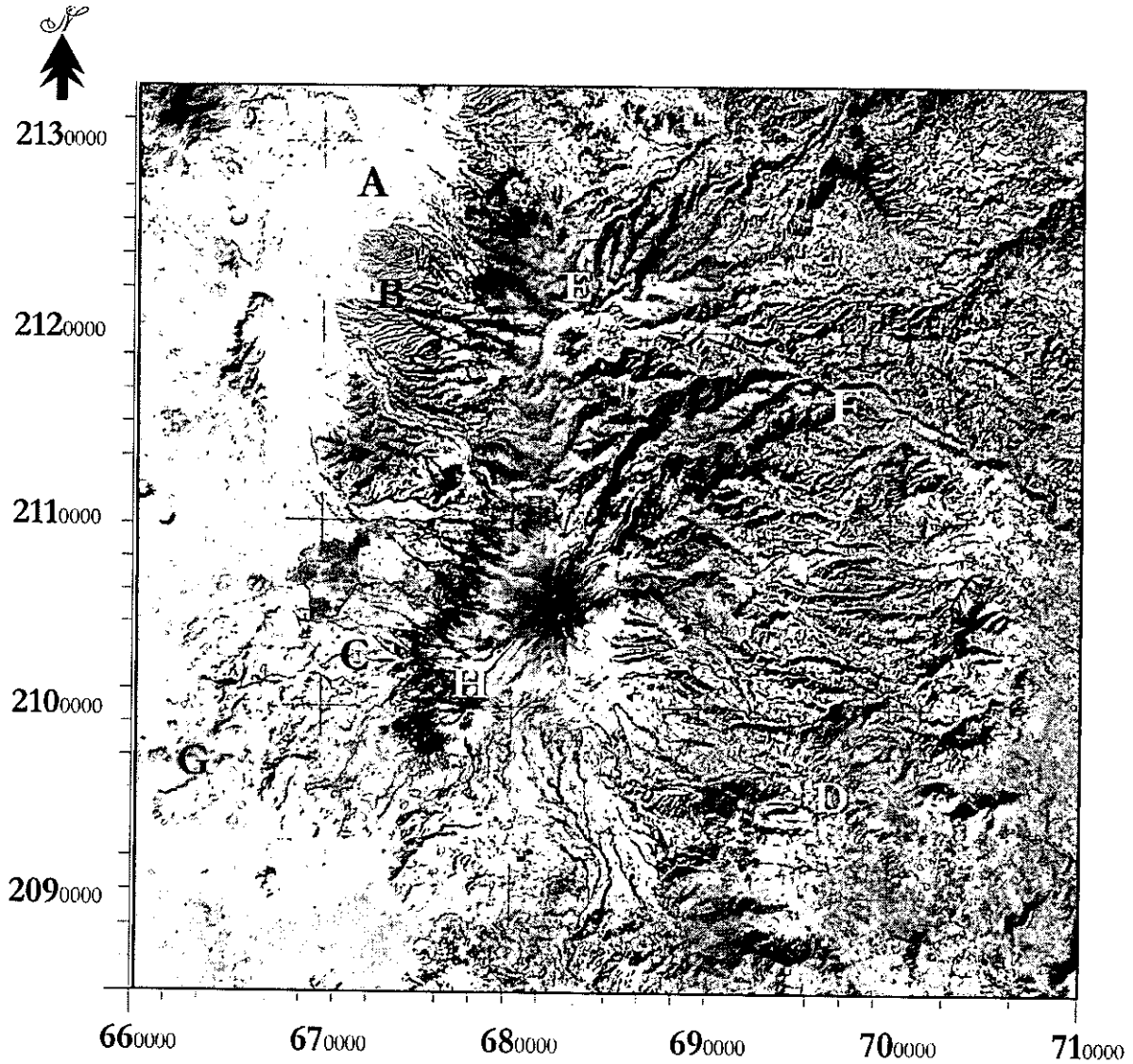


Figura 4.11 Imagen en tono de grises de la banda 5 TM

Los patrones de drenaje tienen diferentes formas debido al grado de compactación, mineralogía y granulometría que presentan las rocas. Los patrones característicos de las diferentes unidades son mostrados en la Figura 4.12 y las letras que los representan son las mismas en la Figura 4.11 de donde se tomaron.

El patrón de drenaje de los sedimentos constituyentes de la Cuenca Serdán-Oriental (A) se presenta de tipo paralelo y de larga extensión. Estos patrones de drenaje son característicos de sedimentos no consolidados que se encuentran en zonas con poco relieve topográfico.

Los patrones de flujo de los sedimentos son alimentados por los cauces que provienen de la sierra que forman las estructuras de Las Cumbres (B) cuyo patrón de drenaje es de corto alcance y de tipo dentrítico. Éste patrón es característico de zonas con grandes diferencias de relieves topográficos o en las caras de los cerros con pendientes pronunciadas.

Otro tipo de patrón de drenaje que se puede observar es el que se forma en el material de algunos conos o cráteres de expulsión (C) y el cual es de tipo rectangular. La forma de este patrón de drenaje se debe a que los materiales están rodeados de sedimentos no consolidados por donde fluye el agua fácilmente, pero en las zonas más compactas, se desvían estos patrones, formando su geometría característica.

En las rocas sedimentarias en donde se alcanza a observar la forma de algunos pliegues erosionados, el patrón de drenaje que presenta tiene una geometría característica diferente de otras unidades litológicas. Sobre un eje guía se desarrollan un sin número de ramificaciones de corto alcance el cual se clasifica como tipo trellis (D). Este patrón de drenaje se desarrolla sobre un área delimitada y en sus fronteras sugiere un contacto litológico. Este patrón de drenaje no solo se observa en D, también al norte de la imagen, cercano al centro volcánico de Las Cumbres.

Otro patrón de drenaje parecido al explicado en D, se presenta en E. La diferencia es el alcance del patrón. La geometría se desarrolla sobre ejes principales y ramificaciones que forman cañadas muy pronunciadas y que se distinguen por su cambio de iluminación. Debido a este cambio, pueden observar un contraste de tono por lo que el patrón de flujo es de tipo dentrítico y de largo alcance (E). Este patrón de drenaje es característico de rocas sedimentarias como las lutitas y calizas pero el mayor alcance que presenta sugiere rocas más antiguas que las anteriores.

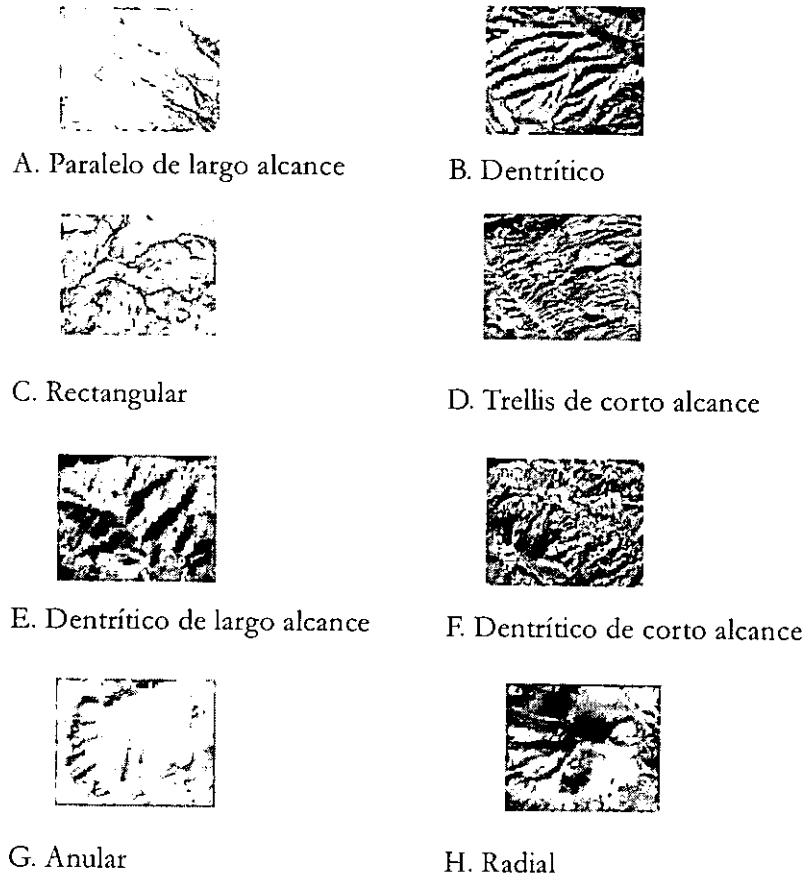


Figura 4.12 Tipos de patrones de flujo o drenaje característicos de las diferentes litologías, tomados de la imagen en tono de grises de la banda 5 TM

Sobre rocas compuestas por material de volcanoclástico como las que se encuentran al este de la imagen, encontramos un patrón de flujo clasificado como dentrítico pero con mayor densidad de líneas de flujo que el de F, haciendo incluso que por la resolución de la imagen se vea un cambio significativo en la textura de esta litología.

En el basalto podemos observar un particular tipo de drenaje el cual solo se forma en la periferia del cuerpo y que se denomina anular (G), este tipo de patrón solo se encuentra al suroeste de la imagen, al sur de Ciudad Serdán. Esto indica el alto grado de compactación de estas rocas por lo que solo comienzan a erosionarse alrededor en el contacto entre estos cuerpos y las litologías a su alrededor.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

El volcán Sierra Negra al igual que otros tipos de volcanes de tipo cónico presentan patrones de flujo conocidos como radial (H) . En estas estructuras, los patrones de drenaje parten de la parte más alta del cono hacia su periferia.

Imagen en el infrarrojo lejano (Banda 7 TM-Figura 4.13)

En esta imagen se observan mejor los contrastes entre las diferentes unidades litológicas comparándola con las imágenes anteriores. El rango de esta banda entre 2.08 y 2.35 en el infrarrojo lejano, hace que la respuesta espectral de las rocas está poco alterada por los efectos atmosféricos presentando este contraste. Las diferentes litologías que se pueden observar en el Pico de Orizaba (1), están determinadas por su textura fina y el tono de gris claro. Se observa el alcance superficial de esta estructura que en el noreste llega hasta 12.

Las rocas del Pico de Orizaba se pueden diferenciar por los tonos de las que componen los diferentes domos como en 12 o de las rocas que componen a Las Cumbres como en 10. Estos domos cercanos al Pico de Orizaba como el Domo Chichihuale (12) se puede diferenciar del material del Pico de Orizaba por su tono más claro y su textura suave. En la parte occidental de la imagen, los sedimentos de la cuenca Serdán-Oriental (4) se distinguen del material perteneciente a los maars, cráteres de explosión y conos monogenéticos (3, 5, 6 y 7). En estos últimos, el material del que están compuestos y que los rodea, presenta altos valores de reflectancia y colores muy claros a diferencia de los sedimentos de la cuenca.

En ésta imagen, no existe distinción entre las calizas (2) y las rocas ígneas de Las Cumbres (8). La textura y tono que presentan son similares y solo los distinguen sus patrones de drenaje. Las calizas y lutitas (2 y 11) se muestran en tonos muy oscuros confundiendo con el material volcánico que está en las zonas de sombra como en 10. La nieve del Pico de Orizaba (9) y el material volcánico de Las Cumbres (10) presentan el mismo valor de reflectancia y un tono similar. En esta banda en especial, se pueden distinguir los poblados y carreteras del lugar (13) por los tonos claros y las formas geométricas regulares. Estas características los diferencia de los patrones de drenaje o posibles contactos litológicos que hay entre unidades.

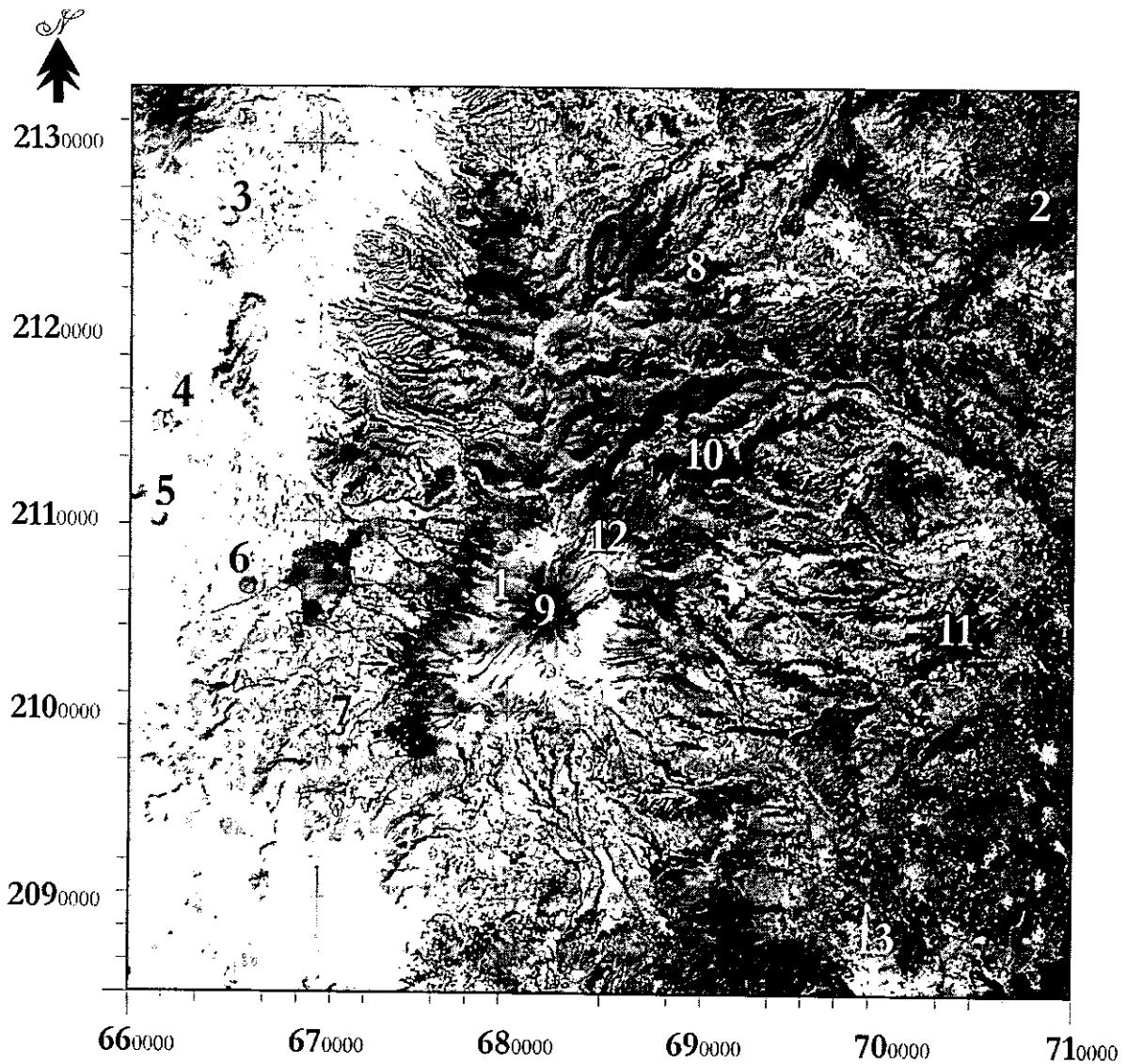


Figura 4.13 Imagen en tono de grises de la banda 7 TM

4.2.6. Filtros direccionales

Con base en lo expuesto en el inciso 3.3.3, para éste análisis se utilizó la banda 4 TM y cuatro núcleos de transformación que corresponde a las direcciones sur, norte, este y oeste (S, N, E y O). Las imágenes que resultaron de estos cuatro filtros se interpretaron por separado para determinar posibles fracturas y solo se muestra la imagen que resultó de aplicar el filtro N (Figura 4.14) con las fracturas interpretadas de las demás.

Estos filtros sirvieron para interpretar fracturas, algunos contactos geológicos y patrones de drenaje de las unidades litológicas de la zona de estudio.

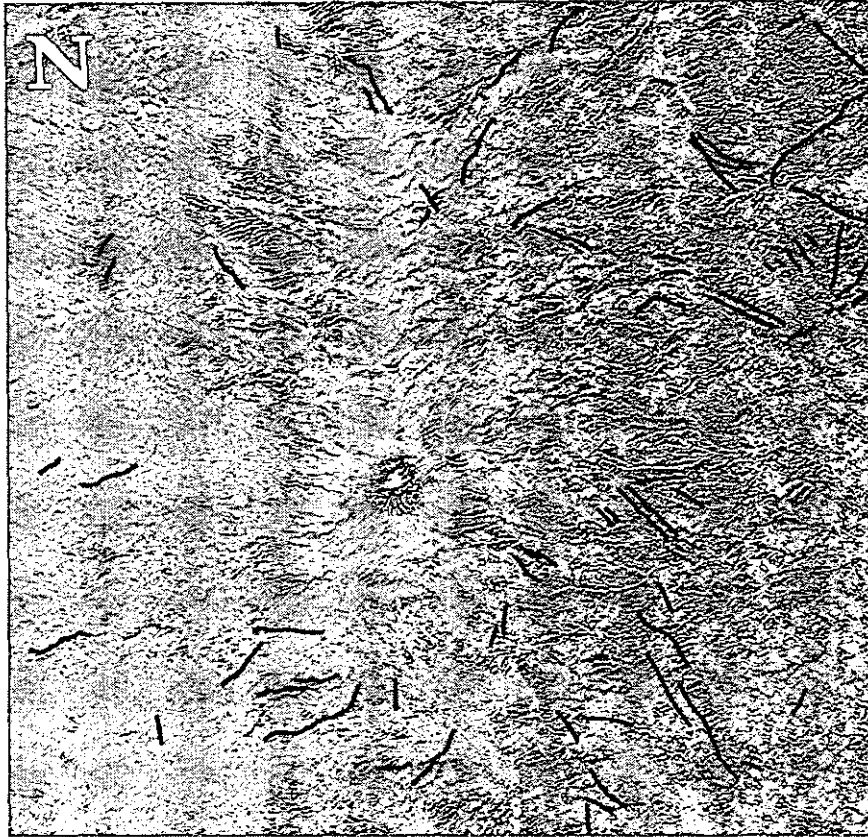


Figura 4.14 Resalte de bordes utilizando filtros direccionales

En la zona oriental de la imagen se presenta una compleja topografía por lo que muchos de los límites que se pudieron resaltar con este método, en realidad representan las regiones de sombra y no un contacto entre diferentes litología o fractura. La mayor densidad de fracturas está en las rocas sedimentarias como calizas y lutitas. En los sedimentos de la cuenca Serdán Oriental los bordes que se realzan son los límites entre las diferentes parcelas de cultivo pero no se presenta ningún rasgo estructural importante.

4.2.7. Composición en falso color

Las composiciones de falso color se utilizan para hacer un análisis visual con el fin de poder discriminar los diferentes tipos de litología (*Short y Blair, 1986, Siegal y Gillespie, 1980*).

Se debe de seleccionar la mejor composición de bandas de tal manera que muestren la mayor variedad litológica permisible. La selección de una banda en el infrarrojo cercano y medio permite aprovechar la respuesta espectral de las rocas intemperizadas con contenidos de calcio y rocas dentríticas reduciendo el efecto de la respuesta espectral de la vegetación (Eberhardt, 1987). Este tipo de rocas se encuentra en el área de estudio por lo que una composición que tenga la banda 4 o 5 TM será una buena elección.

Se hicieron varias composiciones en falso color como combinaciones de las diferentes bandas pero se seleccionó la composición 7,4,3. Particularmente la selección de la composición RGB (7,4, 3) ha servido para estudio de mapeo litológico (Beennet, 1993).

El análisis multivariable hecho anteriormente nos mostró que este tipo de composición la podemos seleccionar, ya que de ésta manera no duplicamos la información desde el punto de vista estadístico. Ésta selección también se basa en las firmas espectrales de las rocas mostradas en la *Figura 2.2*, observándose que son más reflectivas en el infrarrojo medio y decrece en el infrarrojo lejano por lo que utilizar la banda 7 y 4 a una banda del visible (3) nos mostraría un buen despliegue de información.

En la imagen compuesta por las bandas 7, 4 y 3 (*Figura 4.15*), se puede observar que la vegetación representada por la banda 4, ésta en el canal del verde y que está asociada sobre todo con las rocas sedimentarias que forman el basamento del Pico de Orizaba y cuya distribución está al oriente de la imagen.

Las distintas tonalidades de verde nos marcan los diferentes tipo de vegetación que crecen sobre estas unidades (5, 18 y 20). Se puede ver la diferente respuesta de la vegetación que cubre a rocas de tipo ígneo y que son principalmente andesitas del Complejo Las Cumbres (6 y 7). Al sur del domo Cerro Gordo (13) se puede distinguir otra tonalidad de verde la cual representa a la vegetación que crece sobre depósitos de avalanchas derivados del Pico de Orizaba (13 y 17) y que crearían una división entre el material volcánico del Citlaltépetl y de Las Cumbres. También se distingue el material piroclástico o sedimentos en las cañadas en tonos rojos sin vegetación (4).

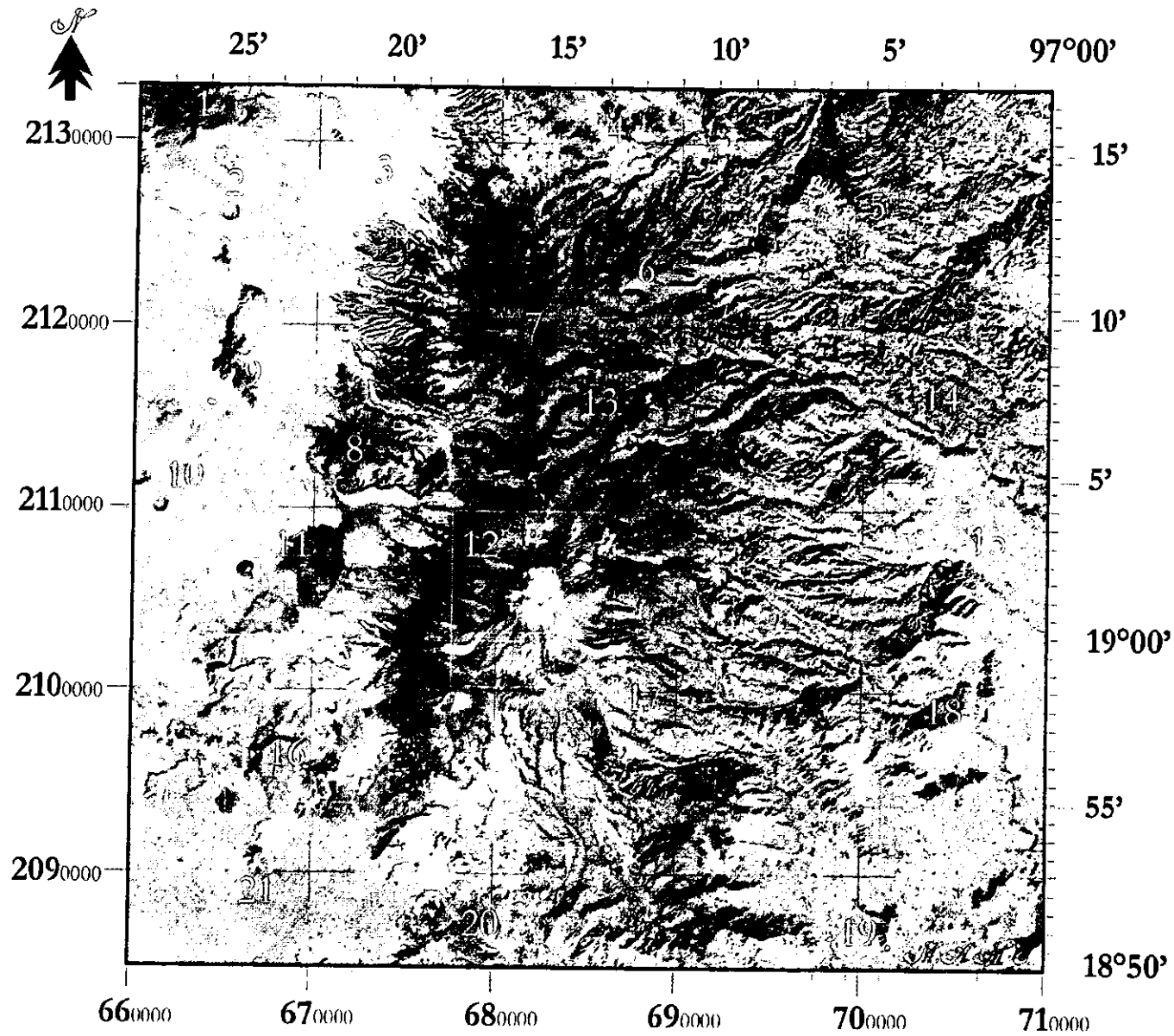


Figura 4.15 Composición en falso color de las bandas 7, 4, 3

La zona descubierta de vegetación se diferencia por los tonos de rojo a morado (12). Estos colores también se observan en las zonas urbanas (19). Las rocas que forman los conos monogenéticos y cráteres de explosión toman altos valores de reflectancia en las tres bandas, mostrando un color blanco alrededor (2, 10 y 11). Se puede observar con esta composición los contactos entre las formaciones que forman estructuras de rocas basálticas (1, 9 y 16). También se distinguen los contactos de las calizas (8 y 18) porque presentan diferente color que las formaciones aledañas a estas.

Las rocas de origen volcánico se pueden distinguir en esta composición de las rocas sedimentarias por su color. En la zona sin vegetación en lo alto del Pico de Orizaba (12) se presentan diferentes respuestas espectrales de las formaciones presentes. Otros tipos de materiales volcánicos están al norte de la imagen (1 y 4) que presentan un color ligeramente más claro.

La textura con esta composición también ayuda a diferenciar unidades litológicas. Los dos tipos de sedimentos que encontramos son de textura fina y se encuentran en la parte occidental de la imagen en 3 y 21, son de color violeta y en la parte oriental en 15 de color verde, la diferencia de colores se debe principalmente a la vegetación que los cubre. El clima que predomina en la zona oriental es húmedo y favorece el crecimiento de vegetación. En contraste en la parte occidental de la imagen el clima es seco y se tienen sembradíos de temporal que por la fecha en que fue tomada la imagen se encontraban sin vegetación.

Para poder distinguir las unidades litológicas que componen el Pico de Orizaba, se realizó un análisis más detallado de la zona descubierta de vegetación junto al cráter del Citlaltépetl (*Figura 4.16*). En esta zona se pueden distinguir algunas unidades cuyo nombre y edad se refieren a los denominados por Carrasco-Núñez y Masao-Ban, (1994). Los números que siguen son los referidos al corte de la imagen en falso color (*Figura 4.15*) que es la *Figura 4.16*.

En esta imagen se correlacionó el material no diferenciado de avalanchas y material piroclástico en las faldas del edificio volcánico porque presenta colores oscuros como en 7 y 10.

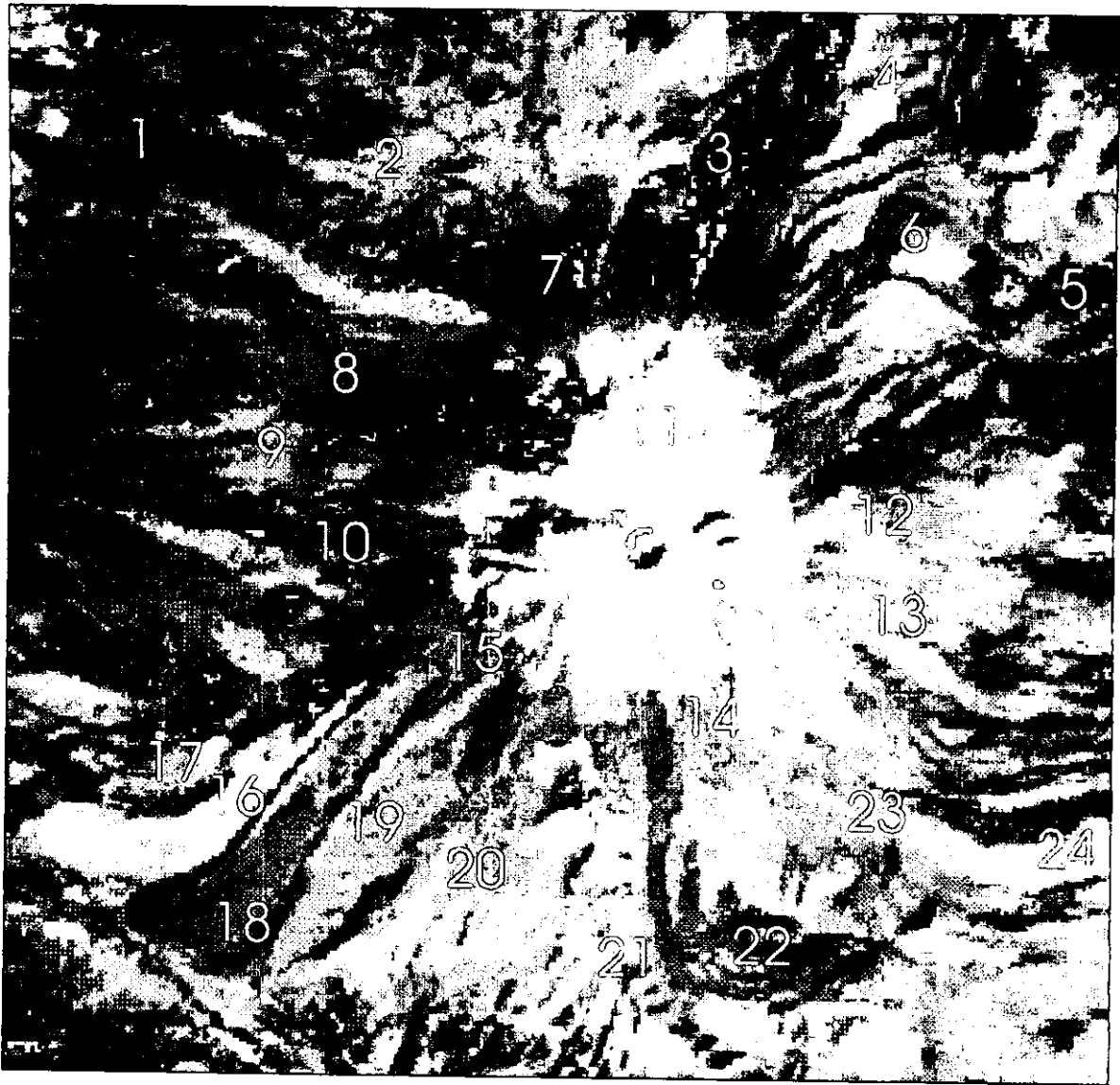


Figura 4.16 Corte de la imagen en falso color 743 de la zona de roca desnuda del Pico de Orizaba

El basamento en el que se construyó el edificio volcánico compuesto por calizas, presenta una respuesta espectral igual a la de la vegetación. En estas rocas se favorece el crecimiento de la vegetación presentado en esta composición, diferentes tonos de verde (24 y 5) y se encuentra en las orillas de la imagen. También se pueden distinguir por las diferentes respuestas espectrales, los cuatro grupos relacionados con las etapas evolutivas del volcán.

El grupo más antiguo denominado Torrecillas se puede distinguir de los otros grupos en la parte baja del edificio volcánico.

La respuesta espectral de estas rocas, se muestra en colores oscuros de tono grisáceo en 3, 8, y 23. El grupo Espolón de Oro el cual estratigráficamente está en medio, se distingue por su color violeta oscuro en 4, 9, 12, 19 y 20. También se puede apreciar la diferencia que hay con la actividad de domos como El Colorado que dada su composición muestra dos colores en 16 y 17, el domo Chichimeco en 6 y el domo Chichihuale en 2. El grupo más reciente es el Citlaltépetl y se pueden apreciar dos tonos de color, el primero en un tono rojizo en 13, 18, 21 y 22 y que representa a las rocas compuestas por dacita. El segundo color característico de las rocas del grupo Citlaltépetl presenta un tono azul compuesto por flujo de andesitas en 14 y 15. Esta tonalidad de color azul se debe a que estas rocas tienen influencia en la respuesta espectral por la cercanía con el casquete de nieve (11).

4.2.8. Clasificación no supervisada y supervisada

Se utilizaron en esta parte del estudio, dos técnicas que no se utilizaron en la imagen de la cuenca Tampico-Misantla. Estas técnicas son la clasificación no supervisada y la supervisada. Estas técnicas utilizan algoritmos de tipo estadístico para agrupar píxeles con semejantes respuestas espectrales. Este procedimiento asume que una zona geográfica que es representada por la imagen puede agruparse en múltiples regiones del espectro electromagnético por su respuesta espectral y que se tendrá una buena agrupación de estas zonas. Este proceso puede usar los dos métodos de clasificación multispectral (*Jensel, 1986*).

Aplicar estas técnicas en esta parte del estudio, sirve para encontrar una correlación entre la agrupación estadística y la interpretación que se hicieron con las técnicas anteriores. Las diferentes litologías presentan diferente respuesta y su agrupación puede diferenciar algunos contactos geológicos.

Clasificación no supervisada

La clasificación no supervisada se utiliza para poder determinar diferentes tipos de litología agrupadas en clases o clusters basándose en los datos estadísticos. Esta clasificación se hace cuando nos se tiene conocimiento previo de los materiales que existen en la imagen o para determinar el número óptimo de clases. Estas clasificaciones utilizan las composiciones en falso color por lo que la agrupación de píxeles es en tres dimensiones.

La composición que se utilizó fue con las bandas 7, 4 y 3. Para poder realizar este tipo de clasificación se utiliza el histograma de frecuencias que está asociado a diferentes tipos de litologías (Figura 4.17). Primero se determinó la mayor cantidad de clases posibles las cuales fueron 36 utilizando el nivel fino de clasificación (Figura 4.17).

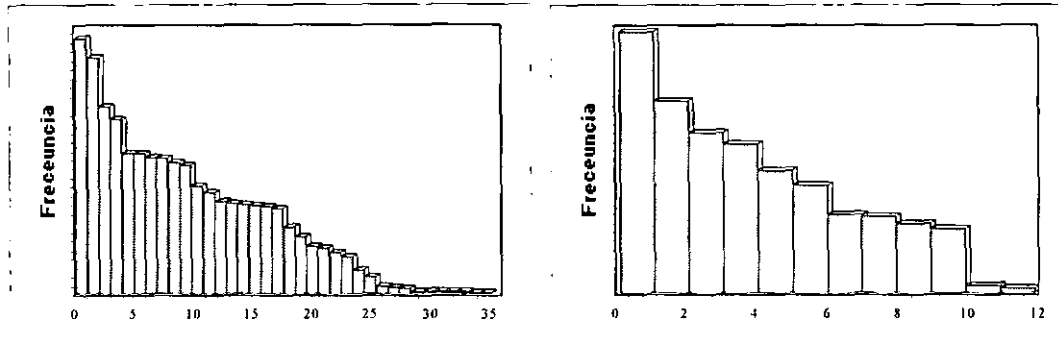


Figura 4.17 Histogramas de las dos clasificaciones no supervisadas y en el que se observa la agrupación de clases en el segundo

En el primer histograma de la Figura 4.17 se puede apreciar que es posible agrupar en 12 grupos aproximadamente a los diferentes clusters porque son los que dominan la imagen. Además se puede observar que toda la información de la imagen está agrupada entre los clusters 5 a 19.

Estos resultados determinaron que se volviera a realizar una nueva clasificación, pero ahora con 12 clusters (Figura 4.19) y con la cual se puede observar una mejor definición de los contactos de las diferentes litologías que componen la imagen. En esta clasificación se puede observar, de manera general, que se agrupan los diferentes tipos de litología.

Por ejemplo un clúster está asociado a todo el material volcánico por lo que toda la región del Pico de Orizaba y Las Cumbres las asocia al mismo clúster (Figura 4.19). Por lo que no se presenta diferencia entre las diferentes litologías que componen al Pico de Orizaba o Las Cumbres.

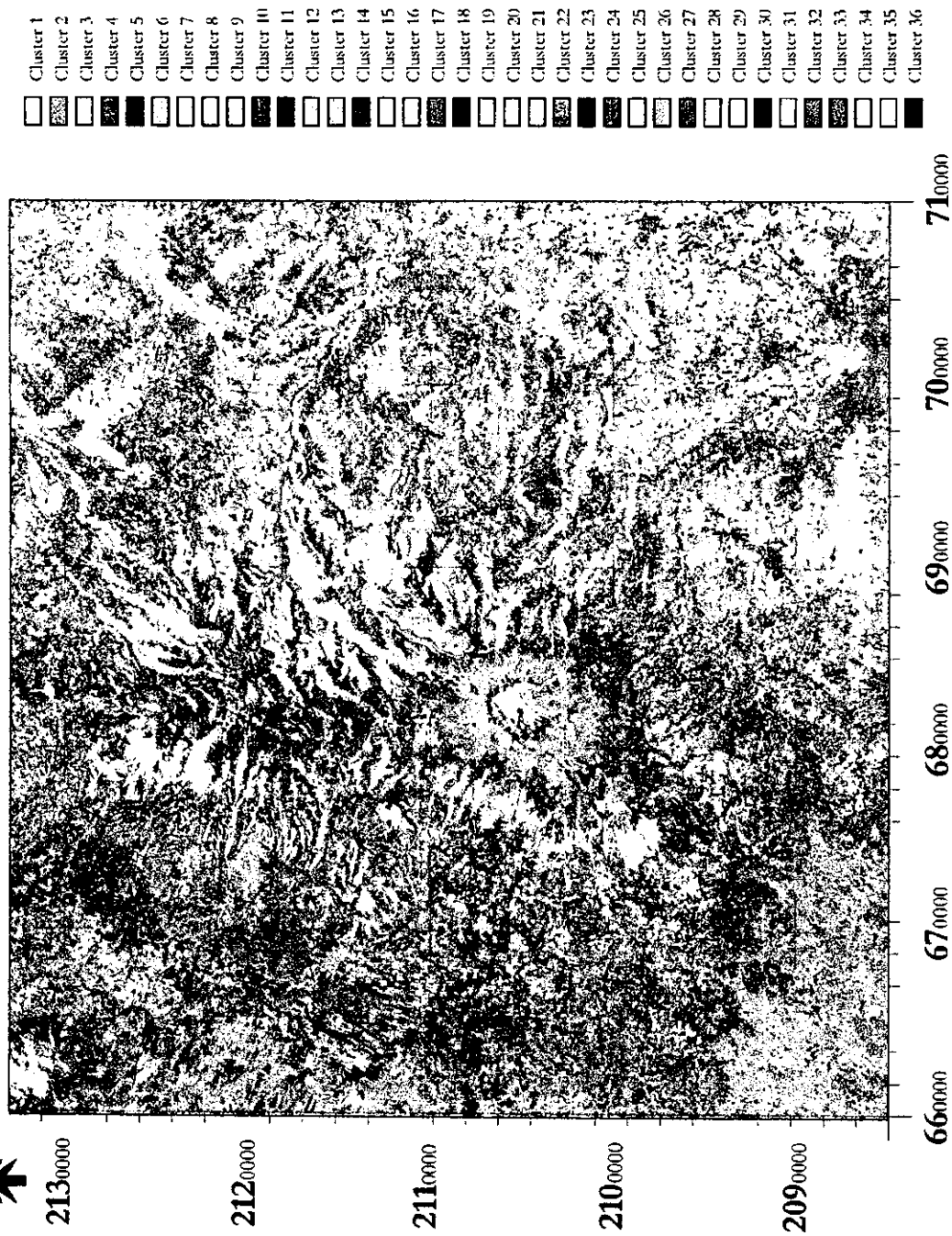


Figura 4.18 Clasificación no supervisada con el mayor número de clases posibles

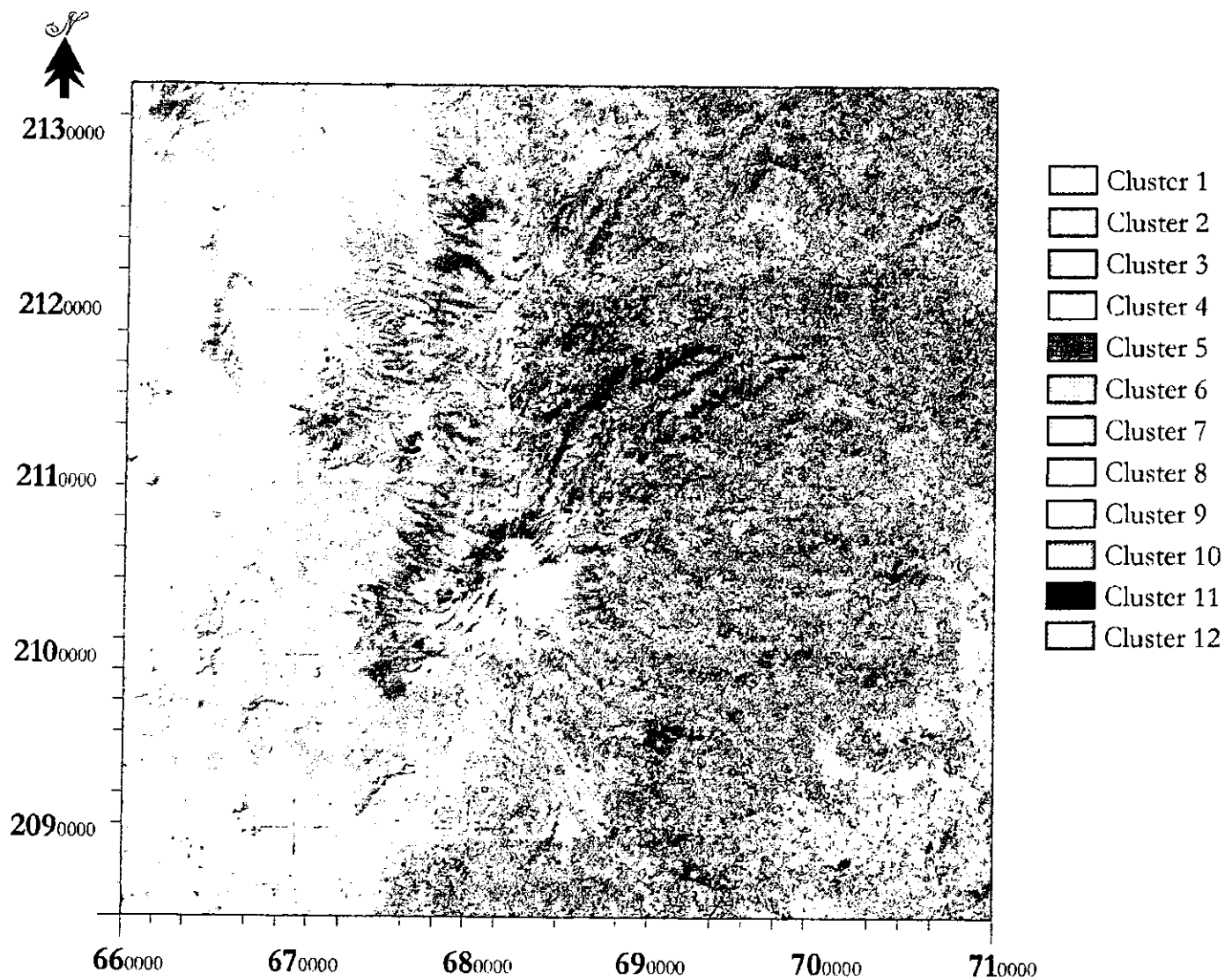


Figura 4.19 Clasificación no supervisada con 12 clases y en la cual existe una mejor definición de contactos litológicos

También, un mismo tipo de litología está siendo representada por dos clusters, esto debido al efecto topográfico de la región. Un clúster para la zona iluminada y otro para la zona de sombras. Este problema se presenta para la mayoría de las clases asociadas a los diferentes tipos de rocas que se encuentran en estas zonas, el efecto de iluminación, hace que los valores de brillantez cambien para la misma unidad litológica, por lo que la agrupación estadística que utiliza este método, las agrupa en diferentes clases. Solo con el análisis fotogeológico que se realizó anteriormente se puede observar que los cluster pertenecen a una misma unidad litológica.

Ésta clasificación como se mencionó sirve, para obtener el número de clases óptimo. Además sirve para obtener una clasificación supervisada confiable sin que los pixeles se comiencen a agrupar de manera errónea. Cuando se utilizan muchas clases entonces existe una mala agrupación de pixeles por toda la imagen como se observó al utilizar 36 en la *Figura 4.18*.

Clasificación supervisada

Esta técnica se utiliza cuando se conocen los materiales en la superficie terrestre. En el método de clasificación supervisada se utilizó el algoritmo de discriminación paramétrica llamado máxima verosimilitud, el cual asume que los datos de respuesta espectral de la imagen tiene una distribución gaussiana. Se basa en la regla bayesiana en donde la probabilidad de que un píxel candidato pertenezca a una clase estadísticamente esté dentro de los valores más altos de un histograma (*Niblack, 1985*). De esta forma son consideradas las clases que tiene un conjunto de pixeles con distribución gaussiana como las clases más representativas de clases verdaderas o más aproximadas a la realidad geológica.

El procedimiento consiste en determinar campos de entrenamiento en la imagen donde se conoce la litología. Sobre estos campos se construyen las firmas espectrales de cada unidad con las siete bandas de la imagen. Estas firmas son con las que se alimenta el algoritmo y dependiendo de la respuesta espectral de estas se agrupan los demás pixeles. Se utilizó la imagen en falso color 7,4,3 de donde se seleccionaron elementos puntuales y se conoce la litología. Se elaboraron 25 campos de entrenamiento o áreas que se usaron en el algoritmo de clasificación en las que se construyeron polígonos cuyos pixeles son utilizados como muestras por su valor espectral.

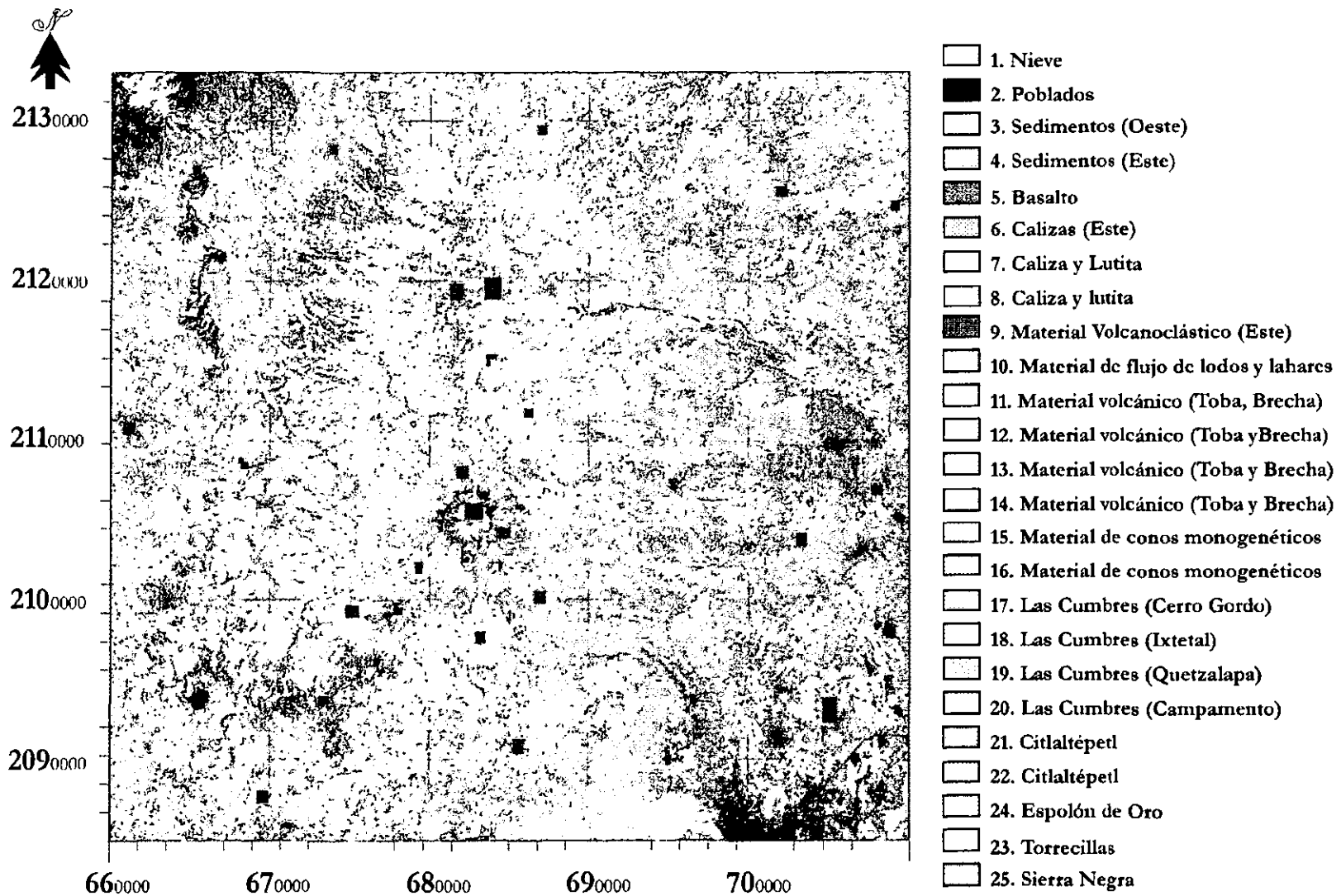


Figura 4.20 Clasificación supervisada con 25 clases en la que se muestra también los campos de entrenamiento de los que se obtuvieron las firmas espectrales de estas clases

Estos campos de entrenamiento representan las clases que se utilizaron para la clasificación de la imagen. Algunos de los campos se escogieron inclusive de manera repetitiva para una misma formación, ya que por el relieve topográfico de la zona, era necesario tener para una misma litología al menos dos áreas representativas de esta unidad. Con esta clasificación se determinaron 25 unidades litológicas (*Figura 4.20*). En la imagen con 25 unidades, se presenta un problema que ocasiona que se repitan las diferentes unidades litológicas provocando que existan pixeles de formaciones mal clasificados. Estos pixeles están en otras regiones en donde no es probable su existencia. Esta mala clasificación es porque existe un mayor número de clases que hace que aumente la probabilidad de que un píxel se agrupe mal.

Una manera de evaluar la exactitud de esta clasificación es con la matriz de error o tabla de contingencia (*Congalton, 1991*). Ésta relaciona los valores espectrales de las semillas de los campos de entrenamiento con los valores de los pixeles del resto de la imagen. La matriz de error muestra las columnas con los números máximos de pixeles procesados agrupados correctamente dentro de una clase. Dividiendo el número total de pixeles analizados entre el total de pixeles agrupados por clase y multiplicados por cien se tiene el porcentaje de probabilidad de que los pixeles de la imagen fueran correctamente clasificados.

Se elaboró la matriz de error para la clasificación con 25 unidades (*Tabla 4.3*). Los números de la tabla son los mismos que tienen las diferentes unidades litológicas en la *Figura 4.20* y en la que podemos observar por ejemplo el porcentaje de pixeles bien clasificados de los diferentes tipos de calizas. Estos valores van de 75 a 42% pero también podemos observar que muchos de estos pixeles se clasificaron como otra clase de caliza que no era su respectiva clase. Esto debido a que las diferentes clases de calizas corresponden a diferentes campos de entrenamiento uno en la sombra y otro en la parte iluminada, pero la similitud de la respuesta espectral de las diferentes calizas que mineralógicamente son similares ocasionó esta mala clasificación.

En las formaciones pertenecientes a las etapas de construcción del Pico de Orizaba en donde se escogieron diferentes campos de entrenamiento, algunos pixeles se clasificaron fuera de la zona del volcán.

Tabla 4.3 Matriz de error para una clasificación con 25 clases. Los pixeles correctamente clasificados dentro de cada clase se encuentran en la diagonal

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	NP	%	
1	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	401	10
2	0	279	5	0	40	3	12	0	10	6	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	4	2	367	76	
3	0	3	407	0	17	12	45	1	14	9	0	12	0	1	0	0	9	0	3	0	1	0	0	0	0	534	76	
4	0	2	0	245	0	0	0	0	39	0	3	140	0	12	2	3	1	0	0	0	0	2	0	1	5	455	54	
5	0	25	0	0	274	0	0	0	0	0	49	42	56	13	21	14	3	3	4	6	0	0	3	12	12	537	51	
6	0	0	0	23	2	326	35	15	3	2	1	3	2	0	1	0	5	6	1	2	0	1	2	0	2	432	75	
7	0	2	3	1	0	70	374	345	14	0	12	1	10	12	0	1	0	16	12	13	0	0	0	0	0	2	888	42
8	0	0	0	0	7	42	130	237	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	419	57
9	0	9	19	0	0	0	6	3	678	26	71	12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	829	82	
10	0	9	1	7	2	0	5	0	0	500	2	0	3	0	0	0	2	22	1	3	1	0	0	0	0	558	90	
11	0	5	7	0	6	0	1	2	0	3	369	145	56	12	0	0	0	0	0	0	0	19	2	14	4	645	57	
12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	114	225	89	36	0	1	0	0	0	0	12	0	14	0	0	492	46	
13	0	2	0	0	2	1	0	0	12	0	112	125	342	74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	672	51
14	0	7	12	0	0	0	0	0	2	10	55	25	123	678	13	0	0	2	4	2	13	1	0	0	14	961	71	
15	0	7	2	0	1	0	0	0	2	1	0	0	0	2	177	41	0	0	16	1	0	2	0	2	1	255	69	
16	0	12	2	13	17	0	1	0	89	2	5	16	13	2	235	356	0	3	0	2	1	12	1	12	2	796	45	
17	0	6	0	0	0	3	2	1	0	0	0	0	55	0	0	0	386	22	0	0	2	0	0	0	0	477	81	
18	0	23	15	75	8	1	5	0	0	12	25	14	0	19	34	33	33	589	5	6	67	12	1	0	5	982	60	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	8	0	52	250	0	0	0	0	0	9	345	72	
20	0	3	1	12	14	0	0	0	3	2	9	1	14	19	34	0	12	2	1	170	1	0	0	0	13	311	55	
21	0	8	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	11	0	8	3	0	7	0	0	371	250	0	0	10	671	55	
22	0	4	0	6	0	0	0	0	3	3	2	0	0	4	0	2	1	9	0	1	176	394	3	0	9	617	64	
23	0	1	0	7	0	4	0	0	1	0	0	0	7	0	0	1	0	2	11	0	14	8	254	0	18	328	77	
24	0	9	0	0	0	0	7	0	0	0	12	4	0	72	0	3	0	1	4	0	19	2	0	689	0	822	84	
25	0	2	0	12	0	0	0	1	3	0	6	7	0	0	1	89	0	0	3	0	0	0	1	3	198	326	61	
NP	400	419	474	401	390	464	623	605	873	577	847	773	786	958	552	555	452	736	315	206	680	704	282	740	308			
%	100	67	86	61	70	70	60	39	78	87	44	29	44	71	32	64	85	80	79	83	55	56	90	93	64			

Esto ocasionó que se tuvieran en toda la imagen pixeles de estas formaciones. Esto se puede observar en la matriz de error porque solo pocos pixeles están en la diagonal principal y un alto número de pixeles de diversas clases mal clasificados se encontraron en toda la matriz.

Con base en los datos anteriores se reagruparon clases para tener solo doce (*Figura 4.21*) y poder realizar de nuevo la clasificación y en la que hubo menor error en cuanto a pixeles mal clasificados fuera de las zonas que se sabe existen estas unidades. En ésta nueva clasificación los contactos litológicos entre las doce unidades se observan mas delineados a diferencia de la toba que se encuentra esparcida en toda la parte este de la imagen.

Debido a las irregularidades de la topografía algunos de los pixeles fueron mal agrupados, ya que la respuesta espectral que pudieron presentar respecto de los pixeles que estaban en la región de luz fue diferente para todas las bandas. Esto ocasionó que se tengan definidas pocas unidades litológicas con estos métodos de clasificación debido a las diferentes respuestas espectrales. Otra limitante del método es física que se presenta por el ancho de banda que maneja este sistema (TM) solo se pueden diferenciar las rocas ígneas de las sedimentarias. En la región cercana al cráter en donde no hay vegetación si se pudieron determinar al menos los principales grupos debido a la diferente composición química y mineralógica que se presentaron en las etapas de formación del estratovolcán.

4.3. Sistema de Información Geográfica y su uso en la realización de mapas geológicos

La cartografía geológica tradicional, comúnmente se desarrolla a partir de la verificación en campo y más reciente con el uso de sensores remotos. Una herramienta adicional de trabajo puede ser un Sistema de Información Geográfica (SIG) que se propone para integrar de una manera sencilla toda la información geológica que se generó con este trabajo, permitiendo su fácil acceso.

Este tipo de herramientas constituye una nueva perspectiva de trabajo geológico porque permite analizar y consultar la información de múltiples formas así como se puede utilizar para trabajos de tipo interdisciplinario y consulta al mismo tiempo.

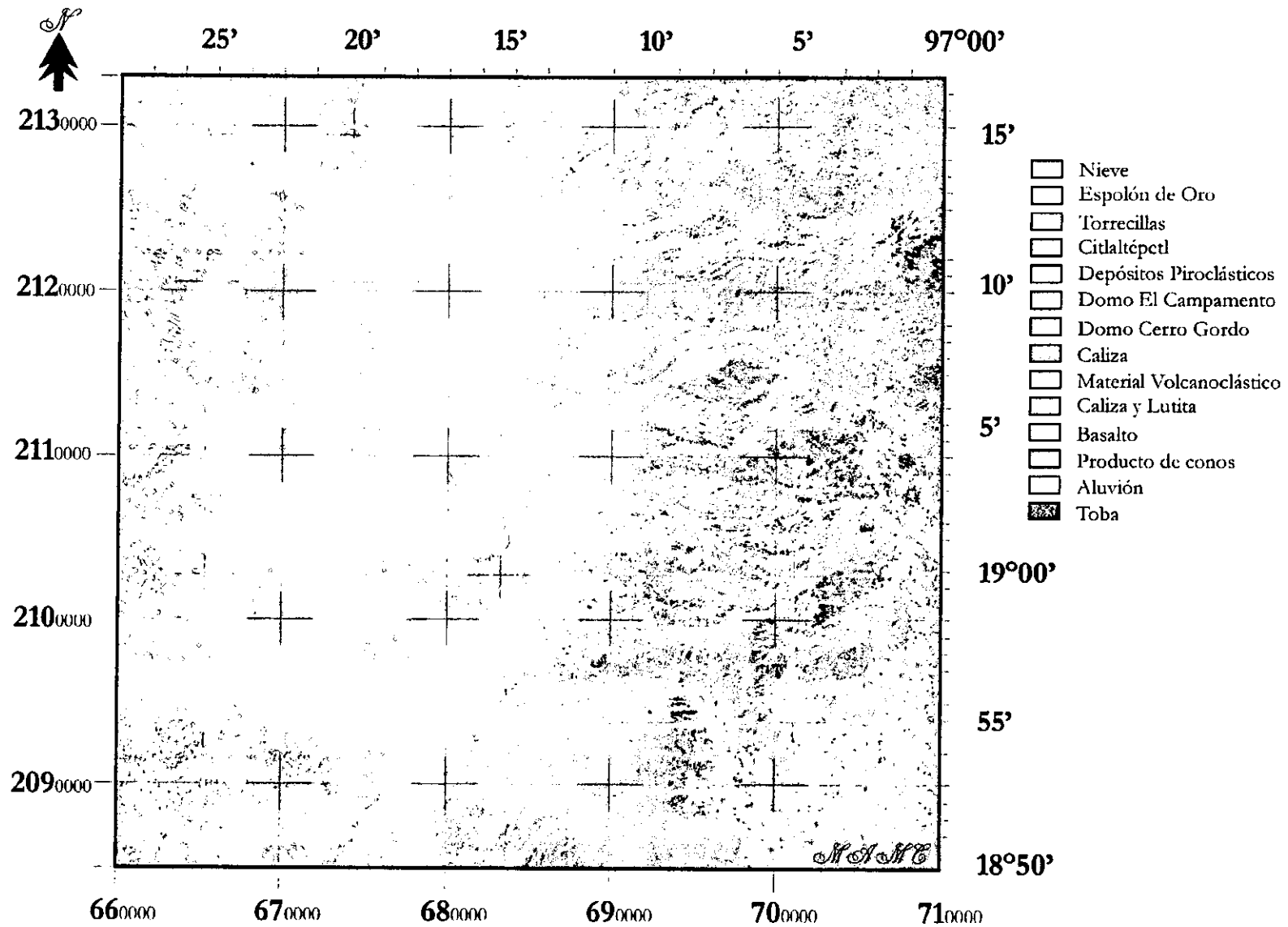


Figura 4.21 Clasificación supervisada con 12 clases en las que se reagruparon algunas de las clases de la primera clasificación

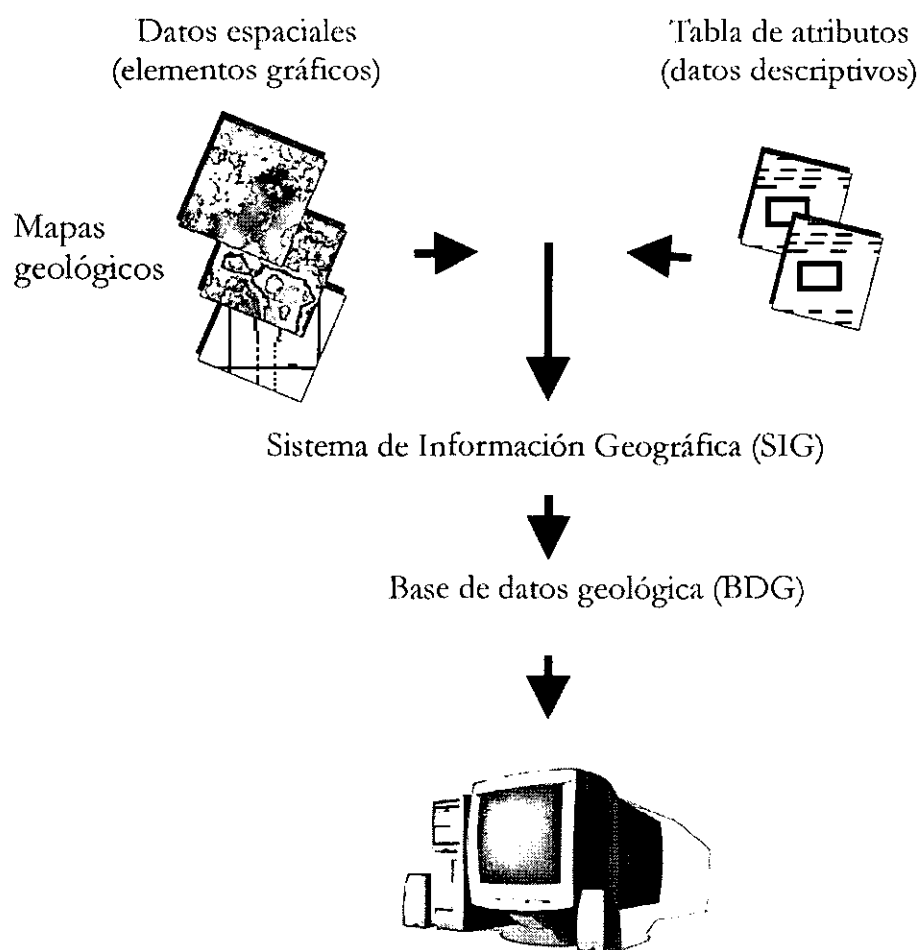


Figura 4.22 Elementos de la definición de la base de datos geológica (BDG)

Para construir dicho sistema es necesario contar con una base de datos que nos proporcione todas las características de las diferentes unidades que el estudio comprende (Tabla 4.4).

4.3.1. Integración de la información geológica en un mapa

Una base de datos geológica es una colección de datos relativos a temas de geología que se constituye de datos espaciales y atributos alfanuméricos. Los datos espaciales son elementos gráficos como puntos, líneas y polígonos que son la representación digital de elementos de la superficie terrestre. Los atributos alfanuméricos son una colección de datos de textos y números por ejemplo aquellos que describen las unidades en cuestión (Uribe-Luna, 1999).

Tabla 4.4 Características de las principales unidades litológicas de la zona diferenciadas con el análisis de imágenes

Unidad	Característica
Sedimentos Cuenca Serdán-Oriental	Depósitos epiclásticos y sedimentos que constituyen el relleno de la cuenca. Sus espesores varían entre 5 y 30 metros.
Calizas (Ki)	Basamento prevolcánico del Cretácico inferior.
Caliza y lutita (Ks)	Basamento prevolcánico del Cretácico superior con intercalación de lutitas.
Productos derivados del Píco de Orizaba	Depósitos de tefra ricos en horblenda derivados del Pico de Orizaba.
Basalto	Se distribuye al SW del área de edad Cuaternaria.
Las Derrumbadas	Domo complejo riolítico del pleistoceno tardío con asociación de flujo de lavas y depósitos de avalancha.
Grupo Citlaltépetl	Lavas de dacita porfirítica formado por tres unidades la dacita Malacara, la andesita Vaquería y la dacita Orizaba y representan la última etapa eruptiva del Pico de Orizaba.
Domos y depósitos asociados	Domos riolíticos en la periferia del cráter del volcán cuya formación es de diferentes épocas como el Colorado, Tecomale, Sillatepec y Chichihuale.
Grupo Espolón de Oro	Formado por lavas masivas de andesita y dacita, consta de la andesita Paso del Buey, la dacita Espolón de Oro la dacita basáltica Carnero y la andesita y dacita Alpinahua.
Grupo Torrecillas	Andesita compuesta de una secuencia de brechas alteradas con tefra y andesitas porfiríticas, de edad de 0.3 Ma aproximadamente.
Volcán Sierra Negra	Compuesto de flujos de lava andesítica, de tipo porfirítica y masiva con algunas intercalaciones de brechas asociadas.
Productos de conos monogenéticos	De edad reciente son productos derivadas de la actividad de conos monogenéticos, así como depósitos freatomagmáticos derivados de maars.
Domo Chichihuale	De composición dacítica, lava masiva con fenocristales de plagioclasa, anfíbol, biotita y cuarzo.
Pómez Quetzalapa	Depósitos plinianos de pómez y líticos de caída ricos en biotita cuyo espesor máximo es de 15 m y su edad de ca. 23, 000 años A. P.

Andesita Cerro Gordo	Lava masiva en la base y en bloques en la cima con fenocristales de plagioclasa, anfíbol, biotita, cuarzo y olivinos.
Andesita El Campamento	Derrame de lava masiva de composición andesítica de Las Cumbres.
Domo El Rodeo	Domo de obsidiana contemporáneo a la andesita el Campamento distribuido al Norte del campo Las Cumbres.
Domo Ixtetal	Domo de obsidiana contemporáneo a EL Rodeo de edad Cuaternaria.
Andesita Huitzilapa	Lava masiva de composición andesítica de las primeras etapas de Las Cumbres.
Mesa Llano Grande	Emplazamiento de depósitos de flujo piroclástico de composición básica.
Obsidiana Xalista	Domo de obsidiana contemporáneo a la andesita Huitzilapa y al flujo Mesa Llano Grande
Andesita (anterior a las Cumbres)	Lava masiva de composición andesítica, estructuras volcánicas erosionadas anteriores a Las Cumbres cuya distribución es al N y NE.

En un sistema de información éstos dos conceptos se estructuran en un formato de manera digital, para definir capas de información y que constituyen un mapa geológico de un solo tema, cada mapa contiene a un conjunto de elementos del mismo tipo con características comunes. Éstas definiciones sirvieron para crear una mapa con los patrones de drenaje, otro con las unidades litológicas de las interpretaciones de las bandas y de las composiciones, etc. También se integró la información obtenida a partir de los filtros direccionales y las clasificaciones supervisadas y no supervisadas. Todos estos mapas se integraron en el mapa presentado en la *Figura 4.23*. Éste mapa del Pico de Orizaba cuenta con todos los resultados de las interpretaciones de las técnicas de análisis digital y en la cual se tiene la información de manera más integrada, para trabajos posteriores.

Para ésta zona se hicieron varios mapas en los que se presentan las unidades geológicas importantes que se pudieron detectar con el tratamiento e interpretación de la imagen Landsat TM. Los contactos litológicos expuestos son una integración de todas las técnicas hechas a la imagen. Estos contactos se obtuvieron de las diferentes interpretaciones de las composiciones de color que se realizaron. El mapa geológico de la zona del Pico de Orizaba (*Figura 4.23*), cuenta con capas de información de diferentes temas. Estas capas de información representan diferentes mapas. Las unidades litológicas, las escalas, los patrones de drenaje y las fracturas están incluidas en la imagen. De acuerdo al tema que necesitemos, se puede desplegar el tipo de mapa requerido. Además se puede integrar la imagen de satélite y la información de las unidades litológicas.

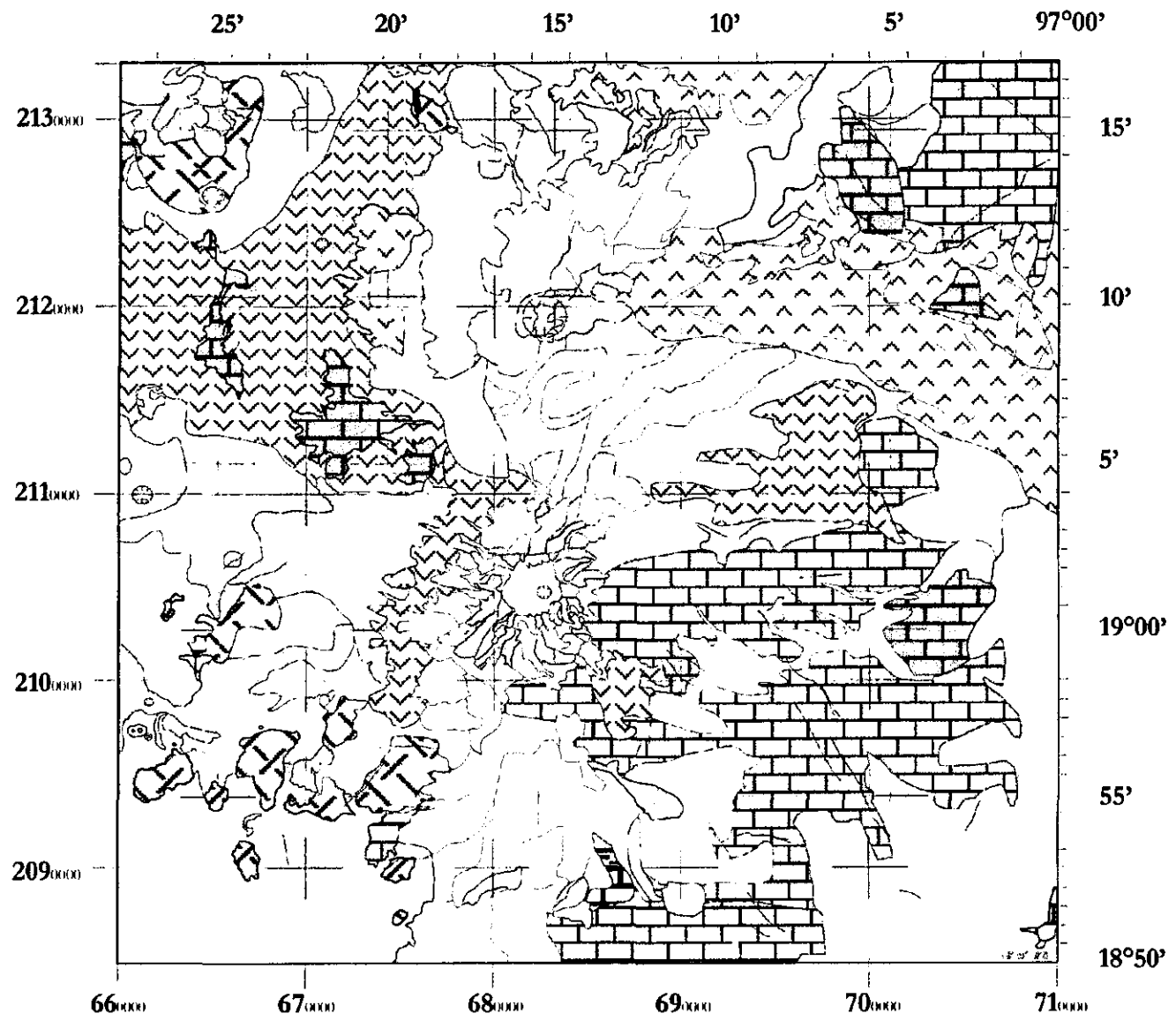


Figura 4.23 Mapa geológico creado con las definiciones de una BDG

Nomenclatura

Volcán Citlaltépetl¹

- Grupo Citlaltépetl
- Domos y depósitos asociados
- Grupo Espolón de Oro
- Grupo Torrecillas
- Volcán Sierra Negra

Campo volcánico Las Cumbres²

- Productos de conos monogenéticos
- Domo Chichihuale
- Pómez Quetzalapa
- Andesita Cerro Gordo
- Andesita El Campamento
- Domo El Rodeo
- Domo Ixtetal
- Andesita Huitzilapan
- Mesa Llano Grande
- Obsidiana Xalista
- Andesita (anterior a Las Cumbres)

- Nieve
- Las Derrumbadas
- Sedimentos Cuenca Serdán-Oriental
- Caliza (Ki)
- Caliza y lutita (Ks)
- Productos derivados del Pico de Orizaba³
- Basalto
- Patrón de flujo
- Cráter
- Fractura
- Cono

1 Carrasco-Núñez and Masao-Ban, 1994

2 Rodríguez-Elizarraras, 1998

3 Depósitos piroclásticos incluyendo depósitos de lahares y flujos de lodo

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los principios de Percepción Remota y la utilización de técnicas de tratamiento digital de imágenes permitieron realizar la caracterización geológica de la parte sur de Tampico-Misantla y de la región del Pico de Orizaba. Ésta caracterización se realizó con un bajo costo y de manera más eficiente respecto a las técnicas geológicas tradicionales, ya que se pudieron distinguir las principales unidades litológicas de cada región y asociar los resultados obtenidos con información geológica, geofísica y petrolera disponible.

La combinación de los resultados del estudio de Percepción Remota y la información petrolera, geológica y geofísica previa, permitieron la proposición de un modelo tridimensional para el sur de la cuenca Tampico-Misantla. Este modelo tridimensional permite visualizar de una manera sencilla las principales características geológicas de esta región.

El análisis de la imagen de la cuenca Tampico-Misantla permitió distinguir lutitas, areniscas, basaltos, tobas y sedimentos. Las rocas sedimentarias presentaron en las cuatro bandas altos valores de reflectancia respecto a las ígneas y los patrones de drenaje de las rocas sedimentarias son de corto alcance mientras que las rocas ígneas casi no presentan patrones de drenaje. Estas características permitieron distinguir fácilmente diferentes unidades litológicas.

Con la aplicación de filtros direccionales las lutitas y areniscas presentaron la mayor densidad de fracturas, además de que se logró resaltar una alineación estructural importante que se relaciona con la falla Brinco Escobal. Al integrar la información geológica y geofísica en el modelo tridimensional, se obtuvo que los campos petroleros de los diferentes plays, se agrupan en las zonas de menor densidad de fracturas superficiales. En los campos pertenecientes al play El Abra, las areniscas correlacionadas en la superficie presentan altos valores de reflectancia y pocos patrones de drenaje.

Se encontraron cuatro zonas con estas mismas características. La primera entre los campos de Santa Águeda y E. Ordóñez, la segunda al sur del campo Presidente Alemán y las otras dos zonas en el Paleocanal de Chicontepec entre el campo Agua Fría y Coyol. Estas zonas están en altos estructurales del basamento al igual que campos productores vecinos y las dos primeras, también están en altos estructurales de la formación El Abra.

La caracterización litológica de la región del Pico de Orizaba, mediante el estudio de la Percepción Remota permitió discriminar las diferentes unidades volcánicas pertenecientes a diferentes sistemas eruptivos como son: Las Cumbres, El Pico de Orizaba, Sierra Negra y diferentes estructuras como cráteres de explosión o maars. Además, se lograron identificar secuencias sedimentarias en las vecindades del Pico de Orizaba como las de la cuenca Serdán-Oriental y las de la Sierra Madre Oriental. Esto se obtuvo gracias a los diferentes patrones de drenaje y respuestas espectrales que presentan estos dos grandes tipos de composiciones litológicas.

Los grupos litológicos pertenecientes a las etapas evolutivas del Pico de Orizaba (Torrecillas, Espolón de Oro y Citlaltépetl) se pudieron distinguir por sus diferentes valores espectrales en la composición 4, 3, 2 TM. La utilización de imágenes en falso color, la aplicación de filtros direccionales y la existencia de información geológica previa de la región del Pico de Orizaba, además de los criterios geológicos del interpretador, permitieron proponer una clasificación supervisada de las principales unidades litológicas de esta región. Esta clasificación supervisada fue la que permitió identificar de manera eficiente las principales rocas del área y plasmarlas en un mapa geológico. Cabe destacar que esta técnica no es cien por ciento segura en la identificación de diferentes litologías ya que hay parámetros subjetivos o por ejemplo, se mencionó que una misma unidad de roca puede presentar dos o más patrones espectrales dependiendo de su posición en la imagen. Puede estar en una zona de alta reflectancia o en una zona de sombra (arroyos) o cubierta por vegetación. Sin embargo en la clasificación supervisada se pueden proponer diferentes criterios para tratar de solucionar estas dificultades.

El modelo tridimensional del sur de la cuenca Tampico-Misantla y los resultados geológicos obtenidos de la región del Pico de Orizaba, presentados en un Sistema de Información Geográfica (GIS), pueden ser la base de futuros estudios con diferentes aplicaciones. Por ejemplo, los patrones de drenaje caracterizados por medio del tratamiento de imágenes del Pico de Orizaba, ayudarían a vulcanólogos y geomorfólogos a determinar zonas con alto riesgo en el caso de avalanchas o eventos eruptivos futuros. Así en el caso del Pico éstas zonas de alto riesgo estaría la S y SE de la estructura afectando a grandes núcleos de población como son Orizaba y Fortín de la Flores.

Futuros estudios de exploración, explotación y tratamiento de productos petroleros pueden basarse en los patrones de drenaje y características geológicas identificadas en estudios multidisciplinarios de Percepción Remota, geología y geofísica de la cuenca de Tampico-Misantla. Además, la fácil visualización lograda mediante el modelo tridimensional de esta cuenca, permitiría en un momento dado, realizar una simulación matemática de yacimientos, determinar la localización de pozos de exploración y explotación y planear el diseño de líneas de recolección y distribución de hidrocarburos.

Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se recomienda la realización de este tipo de estudios multidisciplinarios con la aplicación de Percepción Remota, modelación de resultados geofísicos e interpretación de información geológica previa; para la obtención de mapas, secciones y modelos digitales que sirvan de base para estudios específicos como son la administración de yacimientos, caracterización de zonas de riesgo o investigaciones científicas.

REFERENCIAS

- [1] Beennet, 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. p.p. 779-786.
- [2] Cabral-Cano E., 1993. Evaluaciones estratigráficas, estructurales y cartográfica geológicas apoyadas en técnicas de visualización digital; un ejemplo de Tierra Caliente, Gro., Revista Geo-UNAM, Vol. 2, No. 4., p.p. 22-28.
- [3] Carrasco-Núñez G. and Rose W. I., 1991. Initial geological studies on Citlaltépetl summit crater, Mexico: EOS, Transactions American Geophysical Union, v. 71, no. 43, p.p. 1712 (abstract).
- [4] Carrasco-Núñez G., 1992. Estructura y estratigrafía de las lavas del volcán Citlaltépetl, México, Universidad de Colima, Reunión Nacional del Volcán de Colima, 3rd., Reunión de Vulcanología, 2nd., Colima, México, Memoria.
- [5] Carrasco-Núñez G. and Masao-Ban, 1994. Geologic Map and Structure sections of the Citlaltépetl Volcano summit area, Mexico with Summary of the Geology of the Citlaltépetl volcano summit area, Cartas Geológicas y Mineras 9, Instituto de Geología, UNAM.
- [6] Carrasco-Núñez G., 2000. Structure and proximal stratigraphy of Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), Geological Society of America, Special Paper 334, p.p. 247-262.
- [7] Castro-Mora, J. T., 1977. Estudio del Cretácico de las franjas Tamabra y Tamaulipas al SE de la Faja de Oro entre los ríos Nautla y Cazones. Atolón de la Faja de Oro, Etapas Estratigráficas y Diagenéticas, Parte B, (C-1014), Inédito.
- [8] Congalton R. G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, Remote Sens. Environ., 37:35-46, p.p. 35-46.
- [9] Díaz-Navarro R., 1977. Inversión de Anomalías Gravimétricas, AMGE, p.1-27.
- [10] Eberhardt J. E., 1987. Mid-infrared remote sensing systems and their application to lithologic mapping. Transactions of Geosciences and Remote Sensing, Vol. 25., No. 4.
- [11] Ellis J. M., W. Narr, P. B. Goodwin, and G. Perez, 1994. Remote sensing technology for geologic mapping and field operations Colombia, Proceedings Tenth Thematic conference on Geologic Remote Sensing, V. 1, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, p.p. 3-13.

- [12] Ellis, J. M., and L. L. Dekker, 1998. Petroleum exploration with air-borne radar (SAR) and geologic field work, Sinu Basin of northwest Colombia, Proceedings sixth Thematic Conference on Geologic remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI., p.p.79-89
- [13] Floyd F. S., 1996. Remote Sensing Principles and Interpretation. Freeman and Company.
- [14] Gaposkin, E. M., 1973. Smithsonian Standar Earth (III), Smithson Astrophys. Obs. Spec. Rep., 353 p.p.
- [15] Gupta R. P., 1991. Remote Sensing Geology, Germany, Springer-Verlag, p.p. 356.
- [16] Höskuldsson A. and Robin C., 1993. Late Pleistocene to Holocene eruptive activity of Pico de Orizaba, eastern Mexico, Bulletin of Volcanology, v. 55. p.p. 571-587.
- [17] Jensel J. R., 1986. Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective, New Jersey, Prentice Hall.
- [18] Kaula W. M., 1966. Theory of satellite geodesy, Blaisdell, Wltham, Mass.
- [19] Lambech K., 1988. Geophysical Geodesy, The slow deformations of the Earth, Oxford Science Publications, 712 p.p.
- [20] Lang H., Adams S.L., Conel J. E., McGuffie B. A., Paylor. E. D., and Walker R. E., 1987. Multispectral Remote Sensing as Stratigraphic and Structural Tool, Wind River Basin and Big Norn Basin Areas, Wyoming, Am. Assoc. Pet. Geol., Bull., 71(4), p.p. 389-402.
- [21] Lillesand, T. M. and Keifer R. W., 1987. Remote Sensing and Image Interpretation, Second Edition, John Wiley & Sons.
- [22] López-Ramos E., 1982. Geología de México, Tomo II, 3^a. Edición, México, D.F.
- [23] Miller, J. B., 1975. Landsat images as applied to petroleum explorations in Kenya, NASA Earth Resources Survey symposium, NASA TM X-58168, v. 1-B, p.p. 605-624.
- [24] Moreno-López M., 2000. Inversión de datos gravimétricos y magnetométricos en 3-D, con aplicación a la Cuenca Tampico-Misantla, piroclásticos, [M. C. tesis]: México, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México, 48 p.p.
- [25] Negendank, J. F. W., Emmermann R., Krawczyk R., Mooser F., Tobschall H. y Werle D., 1985. Geological and geochemical investigations on the eastern Trans Mexican Volcanic Belt, Geof. Int., v. 24-4, p.p. 477-575.
- [26] Niblack, W., 1985. An introduction to digital image processing, Prentice Hall International, p.p. 168-180.

- [27] PEMEX, 1999. Las reservas de hidrocarburos de México. Evaluación a Enero de 1999, Vol. I y II, PEMEX.
- [28] Quezadas F. A., 1961. Las rocas del basamento de la Cuenca Tampico-Misantla, Congreso de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Diciembre.
- [29] Rees W. G., 1990. Physical Principles of Remote Sensing, Cambridge University Press, Topics in Remote Sensing, 247 p.p.
- [30] Robin C. and J. M. Cantagrel, 1982. Le Pico de Orizaba (Mexique): Structure et évolution d'un grand volcan andesitique complexe, Bulletin of Volcanology, v.45, no. 4, p.p. 299-315.
- [31] Robinson G.S., 1977. Edge Detection by Compass Gradient mask, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 6, p.p. 492-501.
- [32] Rodríguez-Elizarraras S. R., 1998. El campo volcánico de Las Cumbres (CVLC) al oriente de la faja volcánica trans-mexicana (FVTM), estados de Puebla y Veracruz: Evolución geológica y características de sus principales depósitos piroclásticos, [D. C. tesis]: México, Universidad Nacional Autónoma de México, 263 p.p.
- [33] Sabins F. F., 1991. Digital processing of satellite images of Saudi Arabia, Proceedings Middle East Oil Conference, Bahrain, SPE paper 21357, Society of Petroleum Engineers, Dallas, TX. p.p. 207-212
- [34] Sabins F F., 1997. Remote Sensing: Principles and Interpretation, Third Edition, New York, W.H. Freeman and Company.494 p.p.
- [35] Salisbury J. M. and Hunt G. R., 1974. Remote Sensing of rock type in the visible and near infrared ,Proc 9th Int. Symp. Remote Sens. Environ., Ann. Arbor., MI, Vol. III, p.p. 1953-1958.
- [36] Sanchez Julio and Canton Maria P., 1999. Space Image Processing, Washington D. C.: CRC Press, 424 p.p.
- [37] Sánchez-Montalvo C. G., S. Hernández-Guzmán, G. Jiménez-Malpica, 2000. Un Siglo de la Perforación en México, Tomo II, Unidad de Perforación y Mantenimiento de Pozos, PEMEX.
- [38] Santiago A. J., J. Carrillo B, B. Martell A., 1984. Geología Petrolera de México, Evaluación de Formaciones en México, Petróleos Mexicanos & Schlumberger Offshore Services.
- [39] Satter A., J. E. Varnon and M. T. Hoang, 1994. Integrated Reservoir Management, Society of Petroleum Engineers, SPE paper 22350, Journal of Petroleum Technology, December, p.p. 1057-1064.

-
- [40] Selley R. C., 1999. Elements of Petroleum Geology, Second edition, Academic Press.
- [41] Serna Z., 1990, Mapa Tectónico de México, Escala 1:4,000,000, Instituto de Geografía, U.N.A.M.
- [42] Short N. M. and Blair Jr., Robert W., 1986. Geomorphology from Space. A global overview of regional landforms, Washington D.C.: NASA SP-486, 716 p.p.
- [43] Showengerdt R. A., 1983. Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing. Academic Press, 29 p.p.
- [44] Siebe, C., Abrams M. and Sheridan, M. F., 1993. Major Holocene block-and ash fan at the western slope of ice-capped Pico de Orizaba volcano, Mexico; implications for future hazards, Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 59, p.p. 1-33.
- [45] Siegal B. S. and Gillespie A. R., 1980. Remote sensing in geology, New York: John Wiley & Sons Inc., 702 p.p.
- [46] Uribe-Luna J., 1999. Cartografía y estratigrafía mediante sensores remotos en un sistema de información geográfica: Área de Huajuapán de León, Oaxaca, México, [M. C. tesis]: México, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [47] Valenti, G. L., I. C. Phelps and L. I. Eisenberg, 1996. Geological remote sensing for hydrocarbon exploration in Papua New Guinea, Proceedings Eleventh Thematic Conference on Applied remote Sensing, Environmental Institute of Michigan, Ann Arbor, p.p. I-97 to 108.
- [48] Wender, L. E. and F. F. Sabins, 1991. Geologic interpretation of satellite images of Saudi Arabia: Proceedings Middle East of Oil Conference, Bahrain, SPE paper 21358, Society of Petroleum Engineers, Dallas, TX., p.p. 213-218.