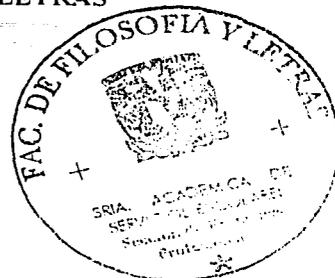


01026
24

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
Colegio de Geografía



IDENTIFICACIÓN DE LINEAMIENTOS Y MAPEO LITOLÓGICO
CON IMÁGENES LANDSAT TM Y UN MODELO DIGITAL DE
ELEVACIÓN: EL CASO DE PUNTA MITA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A

LUZ THAMARA FERNÁNDEZ DE LA VEGA MÁRQUEZ



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO

2003



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.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a la Dra. Rosa María Prol Ledesma no solo por su apoyo en la realización de éste trabajo, sino también por haberme dado la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo y compartir sus conocimientos y su tiempo conmigo.

Al proyecto de CONACYT 32510-T por el apoyo económico.

Al los Doctores Marco Antonio Torres, José López García y Raúl Aguirre Gómez por el tiempo que dedicaron a leer la tesis y por los comentarios y correcciones que hicieron de la misma.

A los Maestros Alberto López Santoyo y Arturo Zaldívar Velázquez por sus consejos durante la carrera y por las pláticas tan enriquecedoras.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**Colegio de Geografía
Facultad de Filosofía y Letras**

**“Identificación de lineamientos y mapeo litológico con imágenes Landsat TM y un
Modelo Digital de Elevación: el caso de Punta Mita”**

T E S I S

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Luz Thamara Fernández de la Vega Márquez

Asesora: Dra. Rosa Ma. Prol-Ledesma

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN

1

I. FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

I.1	Fundamentos	3
I.2	El espectro electromagnético	6
I.2.1	Fuentes de radiación electromagnética	10
I.3	Interacción de la atmósfera con la radiación electromagnética	11
I.4	Respuestas espectrales de los objetos en el espectro electromagnético	13
I.4.1	Vegetación	14
I.4.2	Suelos	15
I.4.3	Cuerpos de agua	16
I.4.4	Rocas	17
I.5	Tipos de sensores	18
I.5.1	Plataformas	25
I.5.2	Sistema Landsat	27

II. BASES PARA LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES

II.1	Selección del método de trabajo: visual o digital	30
II.2	Selección del material de trabajo	32
II.2.1	Imágenes Digitales	33
II.2.2	Modelos Digitales del Terreno	34
II.3	Importancia de la verificación en campo	37

III. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

III.1	Pre-procesamiento: correcciones de la imagen	41
III.1.1	Correcciones geométricas	42
III.1.2	Correcciones radiométricas	43
III.1.2.1	Correcciones atmosféricas	44
III.2	Mejoramiento visual de la imagen	45

IV. TÉCNICAS DE REALCE DIGITAL

IV.1	Realce Espectral	48
IV.1.1	Composiciones en color	49
IV.1.2	Clasificación	51
IV.1.3	Análisis de Componentes Principales	55
IV.1.3.1	Análisis Selectivo de Componentes Principales	59

IV.2	Realce Espacial: Técnicas de filtraje	61
IV.2.1	Aplicación de filtros direccionales	66

V. METODOLOGÍA

V.1	Aspectos Generales de Punta Mita	67
V.2	Descripción de los datos	69
V.3	Identificación de lineamientos	70
V.3.1	Análisis Morfohidrológico	72
V.3.2	Diagramas de Rosa	76
V.4	Aplicación del Realce Espacial	77
V.5	Aplicación del Realce Espectral	79

VI. RESULTADOS

VI.1	Resultado del Análisis Morfohidrológico	83
VI.2	Resultado del Realce Espacial	85
VI.3	Resultado del Realce Espectral	87

CONCLUSIONES	100
---------------------	------------

BIBLIOGRAFÍA	103
---------------------	------------

INTRODUCCIÓN

La importante contribución en programas mundiales, que están realizando los datos provenientes de sensores remotos a bordo de satélites, es cada vez más evidente. Para un estudio global del planeta es imprescindible una alta frecuencia de observaciones, característica que es satisfecha por satélites que obtienen datos, incluso varias veces por día. Estos satélites, si bien fueron originalmente diseñados para observaciones meteorológicas globales, han producido información que se está utilizando en una gama inmensa de aplicaciones a escala global. Entre dichas aplicaciones se pueden mencionar algunas como la evaluación de peligros naturales, diferentes tipos de mapeo como el geológico y de uso de suelo, en la ingeniería forestal, evaluación de recursos hidrológicos, en la conservación de especies animales, planeación urbana y arqueología por mencionar algunas.

La utilización efectiva de los datos provenientes de percepción remota depende de la habilidad del usuario para interpretar, correcta y consistentemente, las imágenes, fotografías aéreas, gráficos o estadísticas que se derivan de las fuentes de percepción remota. Es importante mencionar que esta información es una herramienta cuya eficacia es mayor al emplearse en conjunción con otras como los Modelos Digitales del Terreno, así como con la verificación en campo.

Es una herramienta que trasciende los límites culturales y sobre todo los límites disciplinarios ya que sus aplicaciones no pertenecen a un solo campo de conocimiento.

El presente trabajo es parte de un proyecto multidisciplinario en Punta Mita, Nayarit. Esta zona se ha reportado como de una intensa actividad hidrotermal que se

manifiesta como manantiales termales en el continente y ventilas submarinas en el fondo marino (Núñez-Cornú, et.al..2000). Por lo que, en este trabajo se busca identificar estructuras geológicas principales o lineamientos y hacer una diferenciación litológica mediante el uso de un modelo digital de elevación (MDE) e imágenes Landsat Thematic Mapper 5 (TM 5) de la zona.

Para ello el trabajo está dividido en cinco capítulos: En el capítulo I se describen los fundamentos de la Percepción Remota electromagnética así como los diferentes dispositivos que se emplean para obtener datos de este tipo.

En el capítulo II se mencionan algunas consideraciones que permiten interpretar la información obtenida mediante sensores remotos, en este caso imágenes de satélite y modelos digitales del terreno, así como la importancia del trabajo de campo para la verificación de la información.

Las técnicas de procesamiento de la información incluyendo el análisis previo y las mejoras que se hacen a las imágenes para facilitar su interpretación y las cuales se utilizaron en este trabajo se tratan en los capítulos III y IV.

En el capítulo V se explica cómo se definen los lineamientos y se describe al análisis morfológico como una herramienta complementaria a las técnicas de procesamiento, y también se explica la importancia de los diagramas de rosa en la identificación de lineamientos.

Así mismo, se describen algunas generalidades de la zona en estudio y los resultados del procesamiento al que fueron sometidos el Modelo Digital del Terreno, las imágenes de satélite y la información obtenida durante el trabajo de campo. Finalmente se presentan las conclusiones que se obtuvieron con este trabajo.

I. FUNDAMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

I.1 Fundamentos

Percepción Remota es la traducción literal del término en inglés *Remote Sensing*, en español se conoce como también *Teledetección* por lo que en este trabajo se considerarán como sinónimos.

La percepción remota ha sido definida por numerosos autores especialmente debido al auge que en los últimos 40 años ha cobrado esta tecnología. En 1960 cuando el nombre de Percepción Remota fue acuñado por primera vez, simplemente se refería a la observación y medición de un objeto sin tocarlo.

Sin embargo, desde que esta herramienta ha encontrado aplicación en diversos campos del conocimiento como en la geografía, geología, ingeniería civil, meteorología, urbanismo y oceanografía entre otros, el término de percepción remota se ha ampliado con el tiempo.

Varios autores han elaborado sus definiciones, algunas de ellas son las siguientes:

“La percepción remota se refiere al uso de sensores de radiación electromagnética para registrar imágenes de la superficie terrestre, las cuales pueden ser interpretadas para proporcionar información útil” (Curran, 1985).

“Percepción remota es la adquisición y registro de información de un objeto sin estar en contacto directo con dicho objeto” (Gibson y Power, 2000).

"La Percepción remota es la ciencia y el arte de obtener información acerca de un objeto, área, o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos mediante un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área, o fenómeno bajo investigación" (Lillesand y Kiefer, 1987).

"Percepción remota es la forma de obtener información de un objeto, en la superficie terrestre, sin que haya contacto físico con él. Las información se obtiene utilizando la radiación electromagnética generada por fuentes naturales, como el Sol, o por fuentes artificiales, como por ejemplo el RADAR" (Mather, 1999).

"La percepción remota es la ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes y datos similares, adquiridos desde aeronaves y satélites que registran la interacción entre la materia y la energía electromagnética" (Sabins, 1997).

Estas definiciones coinciden en señalar que la teledetección es una forma de obtener información de objetos de la superficie terrestre, esto incluye tanto a los elementos naturales (suelo, agua, vegetación, recursos naturales en general) como los elementos antrópicos (ciudades, caminos, construcciones) sin estar en contacto directo con dichos elementos. La información se obtiene mediante sensores especiales que captan la energía electromagnética reflejada por la superficie terrestre y que proviene del Sol o bien, de dispositivos que proporcionan esta energía de modo artificial. Esta energía es decodificada por los mismos dispositivos generando en algunos casos, imágenes que posteriormente son interpretadas por especialistas.

La información obtenida de este modo tiene la ventaja de que se conocen diversos aspectos de grandes extensiones de superficie en diferentes intervalos de tiempo, con lo que se pueden hacer estudios multitemporales, que son útiles en la evaluación de aspectos naturales y sociales.

Un sistema de percepción remota se caracteriza por contar con cuatro componentes principales:

- ◆ **Fuente de energía:** En este caso, energía electromagnética que puede ser natural como la energía solar (teledetección pasiva) o bien, artificial como el radar (teledetección activa).
- ◆ **Interacción con la atmósfera:** La atmósfera es un factor que siempre modifica la intensidad y la distribución espectral de la energía que recibe un sensor (Lillesand y Kiefer, 1987).
- ◆ **Interacción con la superficie terrestre:** Las características y la cantidad de radiación emitida o reflejada por la superficie terrestre depende de las características físicas de los objetos que la componen (agua, suelo, vegetación y construcciones) (Curran, 1985).
- ◆ **Sensor:** Es el dispositivo que se encarga de captar, codificar y registrar o bien, enviar la energía electromagnética que interactúa con la atmósfera y la superficie terrestre. El sensor se sustenta en una plataforma que puede ser una aeronave o un satélite.

Otros autores como Lillesand y Kiefer (1987) consideran otros factores además de los anteriores, entre ellos: el manejo de la información y el usuario. Por otro lado Chuvieco (1995) considera también al sistema de recepción-comercialización, al intérprete de la información y al usuario final.

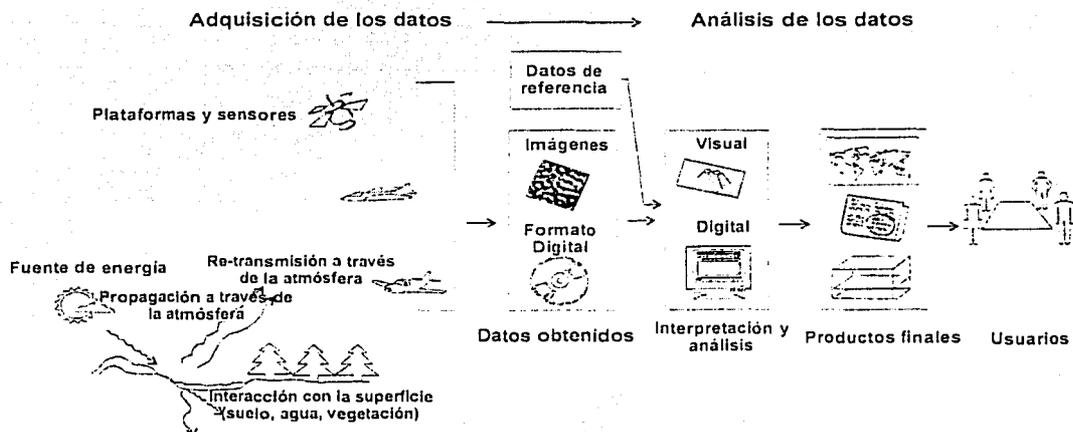


Fig. 1 Sistema de Percepción remota electromagnética (Modificado de Lillesand y Kiefer, 1987).

1.2 El espectro electromagnético

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Cuando nos referimos a energía electromagnética o radiación en Percepción Remota, la característica más común a tener en cuenta es la longitud de onda (Drury, 1987). Debido a que los emisores de energía como el Sol, o los diferentes tipos de cubierta suelen poseer temperaturas muy extremas, como la cubierta de hielo de los polos, el rango de longitudes de

onda también es muy amplio. El rango completo de longitudes de onda es conocido como *Espectro Electromagnético*.

El espectro electromagnético es una categorización de la energía electromagnética dependiendo de sus diferentes longitudes de onda o frecuencias. Se extiende desde las longitudes más largas como las ondas de radio, a las más cortas, conocidas como rayos cósmicos siendo dividida en franjas o bandas espectrales (Sears y Zemansky, 1980) (Fig. 2).

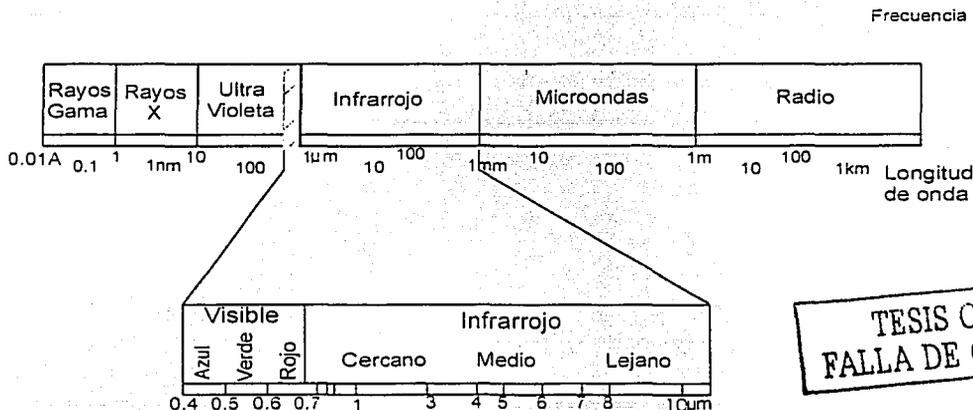


Fig. 2 Espectro Electromagnético

Las longitudes de onda más cortas incluyen los rayos X y la banda del espectro a la cual el sentido de la vista es sensible, llamado *visible*, que se sitúa entre los 0,40 y 0,70 micrómetros. En el visible, hay una clara relación entre la longitud de onda y el color de la luz, las más corta es la luz azul o violeta (0,40 a 0,52 μ) y la más larga es la luz roja (0,63 a 0,76 μ). En los límites del espectro visible tenemos longitudes de onda menores a la de la luz violeta conocida como *ultravioleta* y mayores a la luz roja conocidas como *infrarrojas*.

Luego de la porción del infrarrojo se encuentra la porción *térmica* o infrarrojo lejano que es la longitud de onda en la cual emiten los cuerpos que están a temperaturas dentro del

rango de las encontradas en la superficie terrestre (aproximadamente 300°K). Sigue el rango de las microondas (longitudes de onda del orden del milímetro o centímetro) y más allá se encuentran las ondas de TV, FM y radio AM (desde decenas a varias centenas de metros de longitud) (Sears y Zemansky, 1980).

En percepción remota las bandas espectrales frecuentemente utilizadas son:

- ◆ *Espectro visible (0,40-0,70 μ m)*: Se denomina así por ser el rango de radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano, y coincide con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. La luz, o la radiación visible, es reflejada en grado variable por todos los objetos que son iluminados por el Sol (Eisberg y Lerner, 1981). Se compone de tres rangos el azul (0,45-0,52 μ m); verde (0,52-0,60 μ m) y rojo (0,63-0,69 μ m), los que constituyen los colores primarios de la luz, a partir de los cuales se forman los demás.
- ◆ *Infrarrojo cercano (0,70-0,90 μ m)*: Dentro del espectro electromagnético la radiación infrarroja se encuentra comprendida entre el espectro visible y las microondas. Las ondas infrarrojas tienen longitudes más largas que la luz visible pero más cortas que las microondas, mientras que sus frecuencias son menores a las de la luz visible y mayores que las microondas. El término infrarrojo cercano se refiere a la parte del espectro infrarrojo que se encuentra más próxima a la luz visible (Drury, 1987).
- ◆ *Infrarrojo medio (1,50-2,35 μ m)*: Esta radiación es fácilmente absorbida por muchas sustancias comunes, como el agua por ejemplo, dependiendo del índice de absorción de la sustancia y de la frecuencia de la radiación ciertos tipos de minerales que contienen agua en su estructura.

- ◆ *Infrarrojo térmico o lejano (10,4-12,5 μm)*: El término lejano se refiere a la parte que se encuentra más próxima a la región de las microondas (Eisberg y Lerner, 1981). Los datos del infrarrojo térmico se utilizan en el estudio de la vulcanología, mediante la creación de mapas de temperatura del suelo, así como en el estudio de la composición de la lava y del dióxido sulfúrico en las nubes volcánicas (Drury, 1987).

El resto de los rangos en que se divide el espectro electromagnético son los siguientes:

Ultravioleta: Comprende de 10^{-1} a $0,4 \mu\text{m}$. Tiene el rango de energía que interviene en las reacciones químicas. El Sol es una fuente poderosa de rayos ultravioleta, los cuales al interactuar con la atmósfera exterior la ionizan creando la ionosfera. Los rayos ultravioleta pueden destruir la vida y la capa de ozono de la atmósfera impide su llegada a la superficie de modo tan directo (Eisberg y Lerner, 1981).

Rayos X: Son producidos por electrones que saltan de órbitas internas en átomos pesados. Sus frecuencias van de 10^{-1} a $10^{-1} \mu\text{m}$. Son peligrosos para la vida.

Rayos gamma: Comprenden frecuencias mayores de $10^{-6} \mu\text{m}$. Se origina en los procesos de estabilización en el núcleo del átomo después de emisiones radiactivas. Su radiación es muy peligrosa para los seres vivos (Eisberg y Lerner, 1981).

Ondas de radio: Son las utilizadas en telecomunicaciones e incluyen las ondas de radio y televisión. Su frecuencia oscila desde unos pocos hercios hasta mil millones de hercios ($10^8 \mu\text{m}$) (Sears y Zemansky, 1985).

Microondas: Se localizan entre el infrarrojo lejano y las ondas de radio y se utilizan en las comunicaciones del radar o la banda UHF (Ultra High Frequency). Son ondas

electromagnéticas de grandes longitudes de onda y de baja frecuencia (0.1-250 cm). Probablemente la utilización más conocida de las microondas está en el radar, que consiste en la transmisión de una señal en microondas y la detección de su eco tras ser reflejadas por un objeto distante. La distancia de ese objeto se calcula por el tiempo transcurrido entre la transmisión de la señal y la detección de su eco (Sears y Zemansky, 1985). Además de su empleo en la navegación, el radar se utiliza en meteorología para detección de tormentas, ya que penetran con mucha facilidad la atmósfera.

1.2.1 Fuentes de radiación electromagnética

Las fuentes de radiación electromagnética pueden ser divididas en naturales como el sol y cualquier cuerpo con temperatura superior al cero absoluto, y artificiales como el radar.

El sol es la fuente natural de radiación más importante, ya que al interactuar su energía con los diversos componentes de la superficie terrestre, origina una serie de fenómenos como la absorción, transmisión, emisión, calentamiento, que son investigados por la Percepción Remota.

Cualquier fuente de energía electromagnética es caracterizada por su espectro de emisión, el cual puede ser continuo o distribuido en franjas. El Sol, por ejemplo, emite radiación distribuida continuamente en una franja que va de los rayos X hasta la región de microondas, aunque concentrado en el intervalo de $0,35 \mu\text{m}$ - $2,5 \mu\text{m}$ (Mather, 1999).

Toda sustancia o material con temperatura superior al cero absoluto (0°K ó -273°C) emite radiación electromagnética, como resultado de sus oscilaciones atómicas y moleculares (Verbyla, 1995). Esta radiación emitida puede incidir sobre la superficie de otra sustancia

pudiendo ser reflejada, dispersada, absorbida o transmitida con las mismas o con diferentes longitudes de onda.

Estos cuatro procesos: reflexión, dispersión, absorción, y transmisión ocurren simultáneamente y sus intensidades relativas caracterizan al material que está siendo investigado. Dependiendo de las características físicas y químicas del material, los cuatro procesos ocurren en diferentes regiones del espectro con intensidades distintas. Este comportamiento espectral de las diversas sustancias es denominado firma espectral y es utilizado en Percepción Remota, para distinguir diversos materiales entre sí.

1.3 Interacción de la atmósfera con la radiación electromagnética

Cuando se colecta información a través de un sensor remoto, ya sea mediante un satélite o una aeronave, la mayoría de las veces la señal colectada corresponde a la radiación proveniente del Sol, que interactúa con la atmósfera hasta alcanzar la superficie terrestre y retorna al sensor interactuando nuevamente con la atmósfera. Así, la señal medida es la radiación emitida por el objeto o material de la superficie la cual siempre interactúa con la atmósfera hasta alcanzar el sensor.

La radiación electromagnética interactúa con la atmósfera de dos modos distintos:

Absorción: Que sólo se da en solo algunas bandas del espectro con determinadas longitudes de onda, esto se debe a que los componentes de la atmósfera actúan como un filtro. Entre estos componentes están: el oxígeno, nitrógeno, ozono, vapor de agua, anhídrido carbónico y otros aerosoles. Sin embargo, existen rangos del espectro electromagnético en que

la atmósfera produce mínimas perturbaciones. estos rangos se denominan ventanas atmosféricas (Barret y Curtis. 1999).

Las principales ventanas atmosféricas son las siguientes: espectro visible e infrarrojo cercano, situada entre 0,30 y 1,35 μm ; varias en el infrarrojo medio: de 1,5 a 1,8 μm , 2,0 a 2,4 μm , 2,9 a 4,2 μm , y 4,5 a 5,5 μm ; infrarrojo térmico, entre 8 y 14 μm , y microondas, por encima de 20 mm en donde la atmósfera es prácticamente transparente (Chuvieco, 1995).

Dispersión: Se denomina así a la difusión de radiación por las partículas suspendidas en la atmósfera. Dependiendo de la concentración y el diámetro de estas partículas, que por lo general se miden en micrómetros, se tienen varios tipos de dispersión:

- a) Dispersión Rayleigh.- Es en la que intervienen partículas con diámetros mucho menores que las longitudes de onda de la radiación que incide sobre ellas.
- b) Dispersión Mie.- En ella intervienen partículas como aerosoles y polvo atmosférico (Chuvieco, 1995), cuyos diámetros se aproximan a las longitudes de onda que las afectan (Barret y Curtis, 1992).
- c) Dispersión no selectiva: Aquí intervienen partículas de mayor tamaño las cuales dispersan las longitudes de onda del rango de luz visible (Barret y Curtis, 1992).

1.4 Respuestas espectrales de los objetos en el espectro electromagnético

La energía electromagnética que incide en cualquier parte de la superficie terrestre interactúa de cuatro modos distintos, siendo reflejada, dispersada, absorbida y/o transmitida (Fig.3).

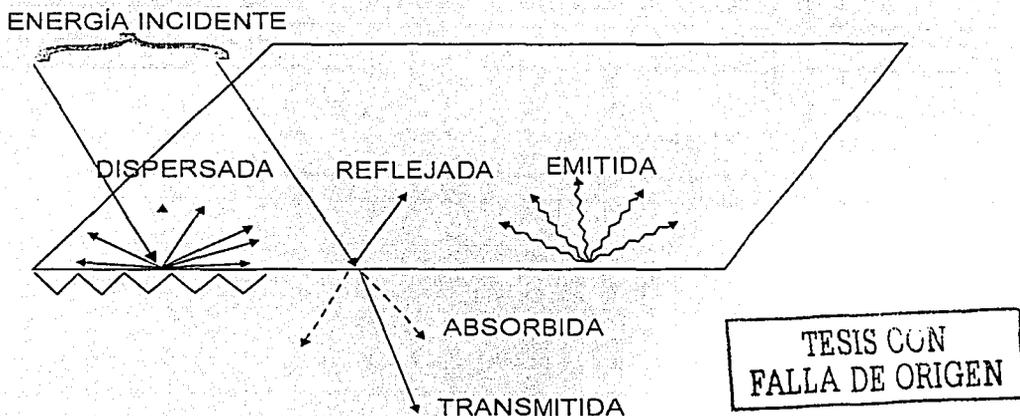


Fig. 3 Interacción de la energía electromagnética con la superficie.

Las proporciones de la energía que es reflejada, absorbida y transmitida varían dependiendo del tipo de material sobre el que inciden y dependiendo también de las longitudes de onda. Esas variaciones hacen posible distinguir diferentes rasgos en una imagen, ya que por ejemplo pueden existir dos objetos que parezcan iguales en un rango espectral y que puedan ser muy diferentes en otro rango (Lillesand y Kiefer, 1987).

En el caso del espectro visible, un ejemplo de esas variaciones espectrales dan como resultado un efecto visual que se manifiesta en lo que denominamos como *color*. de este modo se puede tener un objeto que refleja intensamente la energía en la región azul del espectro y que absorbe en el resto y por lo tanto vemos dicho objeto de color azul (Chuvienco, 1995).

Las variaciones espectrales de las principales cubiertas de la superficie terrestre se conocen como respuestas espectrales o firmas espectrales, debido a que son patrones que caracterizan a cada objeto. Las distintas firmas espectrales se han obtenido a partir de medidas en laboratorio.

Sin embargo, las respuestas espectrales de los objetos, es decir, el modo como es reflejada la energía que incide sobre una superficie no es lo único que capta el sensor remoto, sino también el modo como esa superficie refleja la energía como consecuencia de sus características, por ejemplo la rugosidad.

Dependiendo de su rugosidad puede haber superficies especulares que reflejan la energía con el mismo ángulo del flujo incidente, y lambertianas, que lo reflejan uniformemente en todas direcciones (Chuvienco, 1995). Sin embargo es usual que la distribución del flujo que es reflejado desde la superficie depende de las condiciones de iluminación, el ángulo de elevación del sol, el ángulo de vista del sensor y la cubierta misma (suelo, vegetación o agua).

Por lo tanto la *reflectancia* es una característica que se puede definir como la relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie (Verbyla, 1995).

1.4.1 *Vegetación*

Una curva de reflectancia espectral idealizada de la vegetación sana, se presenta en la Figura 4. La curva muestra valores relativamente bajos en las regiones del rojo y azul del espectro visible, con un pico pequeño en la banda verde del mismo. Esos picos y valles son causados por la absorción que la clorofila y otros pigmentos de las plantas hacen de la luz roja y azul, ya que aproximadamente el 70 o 90% de ambas proveen a las plantas de la energía necesaria para realizar la fotosíntesis (Mather, 1999).

El pequeño pico de reflectancia entre los 0.5 y 0.6 μm es la razón por la que la vegetación aparece precisamente en color verde. Sin embargo, este máximo relativo en la porción verde del espectro electromagnético declina conforme disminuye el contenido de clorofila en las plantas. Siendo en la porción del infrarrojo donde la clorofila muestra su máximo pico de reflectancia. Así mismo, el estrés causado por factores ambientales, tales como la falta de agua o la presencia o ausencia de minerales en el suelo, puede producir una respuesta espectral diferente. De hecho, las anomalías geobotánicas han sido utilizadas exitosamente para determinar la localización de depósitos minerales (Goetz et al., 1983).

Analizando la forma de la curva de reflectancia se pueden distinguir en las imágenes de satélite las áreas con vegetación y las que no contienen vegetación. Tal discriminación es posible debido a las diferencias que hay entre las curvas de reflectancia espectral de la vegetación y otros tipos de cubierta.

Las curvas espectrales pueden ser útiles, en este caso, para estimar algunas propiedades físicas de la vegetación, como el contenido de biomasa; en agricultura la estimación de las características de los tipos de vegetación tiene una fuerte importancia económica.

1.4.2 Suelos

La respuesta espectral de los suelos se caracteriza por un incremento en la reflectancia conforme la longitud de onda aumenta también (Fig.4). La reflectancia en las bandas del visible es afectada por la presencia de materia orgánica y por el contenido de humedad en el suelo; mientras que entre los 0.85-0.93 μm ocurre la absorción del óxido de hierro (Lillesand y Kiefer, 1987).

El óxido de hierro también absorbe la radiación ultravioleta en una banda muy amplia. La presencia del óxido de hierro en los suelos se expresa visualmente por un enrojecimiento

del suelo, el cual se debe a la absorción de las longitudes de onda más cortas y más largas que la roja (Mather, 1999).

La mayor reflectancia en la parte óptica del espectro electromagnético de los óxidos ocurre entre las dos bandas de absorción del agua entre los 1.3-1.5 μm y los 1.75-1.95 μm , y declina en la región de las longitudes de onda mayores a los 2 μm (Barret y Curtis, 1992). En esta parte del espectro es posible identificar minerales de arcilla, si están presentes en el suelo debido a su típica banda de absorción entre los 2.0-2.5 μm (Mather, 1999).

1.4.3 *Cuerpos de agua*

La respuesta espectral del agua varía según la longitud de onda ya que, dentro del espectro óptico e infrarrojo, el agua tiende a absorber la energía a medida que la longitud de onda aumenta (Fig.4). La curva de reflectancia del agua presenta un pico en la región del azul y verde visibles, y declina en las longitudes de onda más largas (Verbyla, 1995).

La respuesta está influenciada también por la profundidad y el contenido de sedimentos que contribuyen a reflejar la energía cuando ésta llega hasta las partículas o al fondo del agua. El agua clara refleja muy poco en varias regiones espectrales. Sin embargo, el agua que contiene sólidos en suspensión refleja cantidades significativas de radiación, especialmente en las porciones roja e infrarrojo cercano del espectro (Verbyla, 1995).

En el caso de la nieve, la reflexión disminuye a medida que la longitud de onda aumenta. La reflectancia dependerá del grado de compactación, tamaño de los cristales de hielo e impurezas contenidas (Lillesand y Kiefer, 1987).

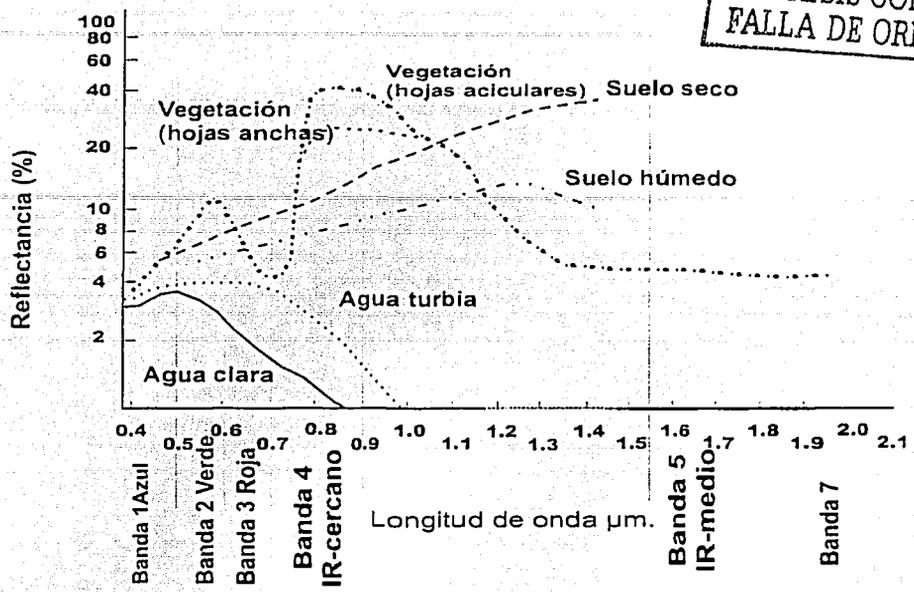


Fig. 4 Curvas de reflectancia espectral de agua, suelo y vegetación (Modificado de Hunt y Ashley, 1979).

1.4.4 Rocas

En ocasiones la respuesta espectral que tienen los diferentes tipos de roca no puede ser observado de modo directo debido a que la vegetación la cubre. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las anomalías geobotánicas son útiles en la identificación de depósitos minerales. Aunque se debe considerar que si la relación entre la formación del suelo y la litología suprayacente ha sido destruida, por ejemplo por la depositación de material glacial sobre la roca local, entonces será difícil hacer la asociación entre la vegetación y la litología (Mather, 1999).

En los casos de zonas áridas la vegetación no causa interferencia, por lo que las curvas de reflectancia espectral de rocas y minerales pueden utilizarse directamente para identificar la

litología del área en estudio. En este caso se debe considerar la acción del intemperismo y la erosión que pueden afectar la respuesta espectral de la roca.

Las curvas espectrales de distintos minerales han sido obtenidas en laboratorio (Hunt, 1977) (Fig.5). por lo que esos estudios han demostrado que dichos minerales poseen curvas de reflectancia únicas.

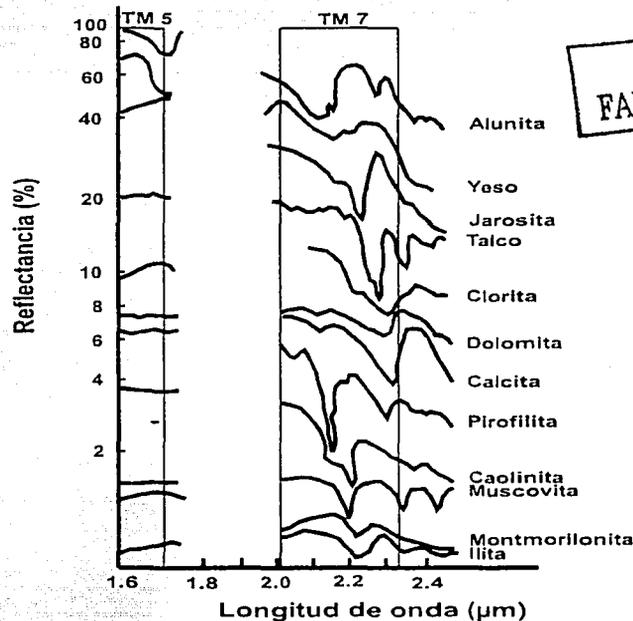


Fig. 5 Curvas de reflectancia espectral de algunos minerales (Modificado de Hunt y Ashley, 1979).

1.5 Tipos de sensores

Todos los materiales y fenómenos naturales absorben, transmiten, reflejan y emiten selectivamente radiación electromagnética. Con el desarrollo actual de la tecnología es posible

medir con una precisión razonable y a distancia, las propiedades espectrales de dichos materiales y fenómenos mediante dispositivos que registran esta radiación en sus diferentes longitudes de onda.

Cualquier sistema de percepción remota presenta los siguientes componentes necesarios para captar la radiación electromagnética:

Colector: Recibe la energía a través de una lente, espejo o antena.

Sensor: Capta la energía colectada de una determinada banda del espectro electromagnético y envía una señal que depende de la intensidad de energía recibida.

Procesador: La señal registrada es sometida a un procesamiento (revelado, ampliación) a través del cual se obtiene el producto.

Producto: Contiene la información respecto a la energía proveniente de la superficie explorada que es necesaria para el intérprete y el usuario.

Otro elemento importante que caracteriza a los sensores remotos es la resolución. Este concepto se refiere a la capacidad del sensor para distinguir dos diferencias espectrales y espaciales en una imagen. De acuerdo a la plataforma y al sensor que se utilicen, los sistemas de sensores remotos se diferencian entre ellos por los siguientes tipos de resolución:

Resolución Temporal: Es la frecuencia de observaciones del sensor sobre un objeto. No depende del sensor sino de la plataforma. Por ejemplo el satélite Landsat 5 completa un ciclo que se repite cada 16 días.

Resolución Espacial: Es el mínimo detalle espacial (píxel) que registra un sensor. Depende del sistema óptico del sensor y de la altitud de la plataforma. El satélite Landsat (*Thematic Mapper*) tiene una resolución de 30 X 30 m en seis de sus bandas (visible e infrarrojo cercano y medio) y de 120 m en su banda correspondiente al infrarrojo térmico; el satélite ERS (*SAR Radar de apertura simétrica*) 30 X 30 m; y el satélite SPOT (HRV-pancromático) de 10 X 10 m.

Resolución Espectral: Es la cantidad de bandas y sus respectivos rangos espectrales con que se capta la energía electromagnética. Entre mayor sea el número de bandas y más angostos sus respectivos rangos, será más fácil la caracterización espectral de distintos tipos de cubierta.

Resolución Radiométrica: Es la capacidad de un sensor para registrar pequeños cambios de energía. Se mide en cantidad de niveles de grises (específicamente 256 niveles) que en formato digital abarcan un rango de 0 a 255 niveles por píxel (Gibson y Power, 2000), a excepción del NOAA (AVHRR), que trabaja con 1024 niveles.

CLASIFICACION DE SENSORES:

Los sensores pueden ser clasificados en función de su fuente de energía o en función del tipo de producto que originan.

En función de la fuente de energía:

- ◆ **PASIVOS:** No poseen una fuente propia de radiación. Los sensores pasivos miden la radiación electromagnética procedente de la cubierta terrestre, ya sea reflejada de los rayos solares o emitida debido a su propia temperatura. Precisamente, la principal fuente de energía electromagnética de este tipo de sensores es el sol. En función del procedimiento que emplean para recibir la radiación procedente de los objetos, los sensores pasivos se dividen en:

a) *Sensores fotográficos:* La cámara fotográfica es el sensor óptico más difundido, especialmente desde plataformas aéreas. A pesar de presentar condiciones más fáciles de operación y costos, la cámara fotográfica tiene una limitación en captar la respuesta espectral, debido a que las películas cubren solamente el espectro del ultravioleta próximo al infrarrojo. También este tipo de sensor limita las horas de sobrevuelo, ya que debido a fenómenos atmosféricos no es posible observar frecuentemente la superficie a grandes altitudes (Chuvieco, 1995).

b) *Sensores de barrido:* Se caracterizan por ser óptico-electrónicos, por combinar una óptica similar a la fotografía con un sistema de detección electrónica. Estos sensores convierten la radiancia recibida (señal analógica), en valores digitales o numéricos cuyo producto son las imágenes digitales. Dichos valores tienen la posibilidad de traducirse nuevamente en los niveles de radiancia originales, lo que implica que además de que los sensores de barrido proporcionan imágenes también hacen una medición de la superficie que observan (Chuvieco, 1995).

Muchos de estos sensores de barrido son multi-espectrales pues detectan la misma superficie de terreno en distintas bandas del espectro electromagnético; es decir, la señal recibida se descompone a bordo en varias longitudes de onda, y cada una se envía a un tipo de detectores sensibles a este tipo de energía.

Lo que se registra entonces es el valor numérico cada cierta distancia. Ese intervalo marca el tamaño de la unidad mínima de información adquirida por el sensor, que se conoce como *pixel* (picture element). La señal se detecta para cada píxel y está relacionada con el tipo de cubierta observada por el sistema (Chuvieco, 1995).

Ejemplo de este tipo de sensores son los instalados en las plataformas Landsat (MSS, *Multispectral Scanner*, y TM *Thematic Mapper*) y NOAA (AVHRR, *Advanced Very High Resolution Radiometer*).

c) *Sistemas de empuje*: Recientemente se ha estado utilizando un radiómetro instantáneo de imagen o sistema de empuje (pushbroom). Este tipo de sistemas están compuestos por una estructura con numerosos sensores colocados en línea, los cuales captan la energía reflejada de una franja o línea dividida en celdas de modo instantáneo (Barret y Curtis, 1999).

La ventaja de este sistema radica en que los sensores captan la información para cada línea en vez de hacerlo para cada píxel como en los sistemas de barrido. Sin embargo, presenta el problema de que son sistemas de difícil ajuste debido a la

gran cantidad de sensores que emplean. Ejemplo de esto es el sistema SPOT, el cual contiene 1,728 detectores (Curran, 1985).

d) *Cámaras de vidicon y cámaras de vídeo*: Se trata de cámaras de televisión que originalmente fueron colocadas en los primeros satélites de la serie Landsat. Las imágenes obtenidas por este sistema presentan una alta resolución en las bandas 0.35-1.1 μm (verde y rojo visible e infrarrojo cercano) (Barret y Curtis, 1999). La superficie es explorada en formato raster mediante un haz de electrones que produce una señal de vídeo del mismo modo que lo hace una cámara de televisión convencional (Lillesand y Kiefer, 1987).

Una ventaja de este sistema es que las imágenes se obtienen de modo instantáneo; sin embargo presenta numerosos problemas técnicos en algunas de sus operaciones (Curran, 1985).

e) *Sensores de antena o radiómetros de microondas*: Son sensores que operan en el rango del espectro que corresponde a longitudes de onda largas, entre 1 y 100 mm (Chuvienco, 1995). En este tipo de sistemas la energía de la escena es colectada mediante una antena, y el producto se registra en una cinta magnética o en formato digital (Lillesand y Kiefer, 1987).

La desventaja que presenta es su baja resolución espacial; por otro lado este sistema es útil en cuanto a que no está afectado por las condiciones atmosféricas ni por las condiciones de iluminación (Chuvienco, 1995).

- ♦ **ACTIVOS:** Son aquellos que poseen su propia fuente de radiación electromagnética, trabajando en longitudes de onda específicas del espectro electromagnético (Gibson y Power, 2000). La forma más común de estos sistemas es el radar que trabaja en una banda comprendida entre 0.1cm y 1m. Debido a su flexibilidad, puede funcionar en cualquier tipo de condición atmosférica (Chuvieco, 1995).

En función del tipo de producto:

A) *Sin imagen:* no generan una imagen de la superficie observada. Por ejemplo, los radiómetros (salida en dígitos o gráficos) y los espectro radiómetros (firma espectral). Son esenciales para la adquisición de información minuciosa sobre el comportamiento espectral de los objetos de la superficie terrestre.

B) *Generadores de imagen:* Se obtiene como resultado una imagen de la superficie observada. Una imagen es el registro de una escena que puede ser capturada en una fotografía o bien, obtenida con un sistema de barrido. Aunque la fotografía continua siendo una parte importante de la percepción remota, ha sido desplazada en cierta medida por los satélites y los sensores de barrido, ya que estos registran la información en formato digital. La presentación digital es más precisa, porque presenta una mayor gama tonal, esto permite un mejor trabajo de procesamiento que se realiza con una computadora y un programa adecuado, con lo cual se logran mejores imágenes, para una mejor interpretación visual más fácil, rápida y eficiente.

Por lo tanto los sistemas generadores de imagen suministran información sobre la variación espacial de la respuesta espectral de la superficie observada.

1.- *Sistema de cuadro*: ("framing systems"): adquieren la imagen de la totalidad de la escena en un mismo instante. por ejemplo: RBV (*Return Beam Vidicon*).

2.- *Sistema de barrido*: ("scanning systems") por ejemplo: Thematic Mapper, MSS, SPOT.

3.- **sistema fotográfico**: Fotografías aéreas.

En todos los tipos de sensores se pueden incorporar filtros para seleccionar rangos espectrales de la energía que se desea registrar (bandas o canales espectrales).

I.5.1 Plataformas

Las plataformas son los vehículos que transportan a los sensores. Estos vehículos han sido una parte fundamental en el desarrollo de la teledetección, y su evolución ha dependido de los avances de la tecnología.

Los primeros intentos de teledetección se realizaron a mediados del siglo XIX, con una cámara fotográfica colocada en un globo aerostático. A principios del siglo XX con la Primera Guerra Mundial y el desarrollo de la aviación también se hacen enormes progresos en cuanto al desarrollo de nuevas cámaras y películas fotográficas, por lo que la fotografía aérea, sobre todo para fines estratégicos, se vuelve indispensable.

Sin embargo, en la Segunda Guerra Mundial es cuando se mejoran las plataformas, las películas y emulsiones fotográficas y se introducen sensores más sofisticados como el radar, el uso de esta tecnología estaba restringida a usos militares.

Después de la guerra, al iniciarse la competencia entre las potencias mundiales por la exploración del espacio exterior surge la necesidad de contar con vehículos capaces de realizar esta tarea y son construidos los primeros satélites, no sólo para uso militar sino ahora también para investigaciones civiles. Estas investigaciones se dedicaron a obtener datos atmosféricos y meteorológicos en un inicio, posteriormente se evidenció la enorme aplicación de los sistemas satelitales y la creación de nuevos tipos de sensores para aplicar esta tecnología en la investigación de los recursos naturales en general.

Actualmente las plataformas aéreas siguen representando un componente importante dentro de la percepción remota sobre todo para estudios regionales. Sin embargo, las plataformas satelitales representan la posibilidad de que los sensores que portan adquieran información de un mismo lugar a una escala mayor en numerosas ocasiones, lo que permite hacer evaluaciones temporales de distintos fenómenos.

Otra ventaja es que los productos obtenidos a partir de sensores de plataformas satelitales pueden ser procesados de diversas maneras, permitiendo obtener una mayor cantidad de información temática.

1.5.2 Sistema Landsat

TESIS CON
FALTA DE PAGINAS

El programa **LANDSAT**, desarrollado por la National Aeronautics and Space Administration (**NASA**), fue originalmente denominado Earth Resources Technology Satellite (**ERTS**). Fue el primer programa de satélites de percepción remota cuyo objetivo fue posibilitar la adquisición de imágenes de la superficie de la Tierra de manera global y repetitiva.

El primer satélite de esta serie fue lanzado el 23 de julio de 1972 con la denominación de **ERTS-1**. El 14 de enero de 1975 el nombre fue cambiado para **LANDSAT**, y en 1975 fue lanzado el segundo satélite, entonces denominado **LANDSAT-2**.

De la serie **LANDSAT** ya fueron lanzados los siguientes satélites:

SATÉLITE	LANZAMIENTO	FIN DE OPERACIONES	SISTEMAS DE SENSORES
ERTS-1	23 / julio / 1972	05 / enero / 1978	MSS y RBV
LANDSAT 2	22 / enero / 1975	27 / julio / 1983	MSS y RBV
LANDSAT 3	05 / marzo / 1978	07 / septiembre / 1983	MSS y RBV
LANDSAT 4	16 / julio / 1982	fin de 1983	MSS y TM
LANDSAT 5	01 / marzo / 1984	En operación	MSS y TM
LANDSAT 6	10 / mayo / 1993	10 / mayo / 1993	ETM
LANDSAT 7	1999	En operación	ETM

La buena resolución de sus sensores, el carácter global y periódico de la observaciones que realizan y su buena comercialización, explican el profuso empleo de esta serie de satélites por expertos de muy variados campos en todo el mundo (Chuvienco, 1995).

Los primeros satélites Landsat contaban con un sensor denominado MSS (Multispectral Scanner). Este sensor es un equipo de barrido óptico electrónico, que opera en cuatro bandas del espectro electromagnético, dos en el visible: banda 4 - verde (0.5 a 0.6 μ m) y banda 5 - rojo (0.6 a 0.7 μ m) y dos en el infrarrojo cercano (0.7 a 0.8 μ m). La escena terrestre observada por este sensor representa un área de 185 Km. y la resolución espacial es de 80 x 80 m. En el LANDSAT 3 fue agregada una banda en la faja del infrarrojo térmico (banda 8), cuya resolución era de 240m y que captaba la radiación emitida por los objetos terrestres, sin embargo esta banda presentó problemas después de lanzado por lo que fue retirado (Kiefer y Lillesand, 1987).

Posteriormente se incorporó el sensor Thematic Mapper (TM) que como su antecesor el sensor MSS, es un sensor multiespectral avanzado de barrido, concebido para proporcionar una resolución espacial más fina, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en comparación con el sensor MSS. Éste opera simultáneamente en siete bandas espectrales (Tabla 1): Tres en el visible, una en el infrarrojo próximo, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo térmico. Tiene una resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo cercano y medio y 120 metros en la banda del infrarrojo térmico (Jensen, 1996). La escena terrestre registrada por este sensor es también de 185 km.

BANDAS	BANDA ESPECTRAL (μm)	APLICACIONES
1	0,45-0,52 (azul)	Mapeo de aguas costeras. Diferenciación entre suelo y vegetación. Identificación de rasgos culturales.
2	0,52-0,60 (verde)	Diseñada para medir el pico de reflectancia en el verde de la vegetación saludable.
3	0,63-0,90 (rojo)	Es donde se da la mayor absorción de la clorofila, por lo que es útil en la discriminación de especies vegetales. Identificación de áreas urbanas, uso del suelo y agricultura.
4	0,76-0,90 (infrarrojo cercano)	Delimitación de cuerpos de agua. Mapeo geomorfológico. Mapeo geológico. Identificación de incendios Discriminación de contenido de humedad en suelos. Identificación de vegetación enferma y contenido de biomasa.
5	1,55-1,75 (infrarrojo medio)	Banda sensible al contenido de humedad de la vegetación. Diferenciación entre nubes, hielo y nieve.
6	10,40-12,50 (infrarrojo termal)	Mapeo de estrés en plantas. Mapeo de corrientes marinas. Identificación de diferencias topográficas en áreas montañosas. Mapeo de actividad geotérmica.
7	2,08-2,35 (infrarrojo medio)	Identificación de zonas de alteración hidrotermal. Discriminación de rocas.

Tabla 1. Características de las bandas espectrales del sensor Thematic Mapper TM (Jensen 1996).

II. Bases para la interpretación de imágenes

Tanto las fotografías aéreas como las imágenes de satélite contienen información en forma de rasgos y objetos que dicen mucho acerca de las interacciones que suceden entre estos y la superficie terrestre. Para que esta información pueda ser aprovechable necesita ser interpretada. La interpretación se refiere a la técnica que permite el análisis e interpretación de los objetos y/o fenómenos que aparecen en las fotografías y en las imágenes de satélite.

La complejidad de la interpretación varía dependiendo de los objetivos que se plantean para hacerla, ya que puede incluir el simple reconocimiento de objetos o formas así como las interacciones entre los mismos. Una buena interpretación depende de factores como el entrenamiento y la experiencia del intérprete, la naturaleza de los elementos o fenómenos observados y la calidad de las fotografías o imágenes utilizadas (Lillesand y Kiefer, 1987).

La interpretación visual de imágenes involucra distinguir numerosas clases de superficies basándose principalmente en diferencias tonales y texturales. Sin embargo, el contexto espacial relaciona varios elementos de la imagen que también son importantes en la interpretación de la misma (Gibson y Power, 2000). De hecho en un estudio sistemático de las imágenes se involucra, además, características como: forma, tamaño, patrones, sombras y asociaciones.

II. 1. Selección del método de trabajo: visual o digital

A pesar del continuo desarrollo en el que se encuentra la percepción remota en todas sus áreas, y su búsqueda por obtener productos que no requieran la interpretación de un

analista, aun siguen teniendo una importancia básica y un valor práctico tanto el análisis visual de datos como la interpretación por procesos manuales.

Sin embargo, se debe considerar que la interpretación de los productos de la percepción remota involucra no solamente al análisis visual, sino que también requiere del análisis digital de los datos contenidos en las imágenes para hacer una mejor interpretación de las mismas.

La interpretación visual de una imagen es el primer paso. Las técnicas visuales hacen uso de la habilidad del cerebro humano para evaluar cualitativamente los patrones espaciales en una escena. La habilidad para hacer juicios subjetivos basados en elementos seleccionados de la escena es esencial en la fotointerpretación.

Las técnicas visuales ofrecen ciertas desventajas debido a que pueden ser un tanto subjetivas; sin embargo, para realizar la interpretación visual se requiere entrenamiento lo cual puede ser una tarea intensiva. En suma, las características espectrales no son siempre evaluadas completamente con esfuerzos de interpretación visual. Esto se debe en parte a la limitada habilidad del ojo para discernir valores tonales en una imagen y la dificultad para un intérprete de analizar simultáneamente numerosas imágenes espectrales y enormes volúmenes de datos. En estos casos es preferible utilizar el análisis digital de la imagen (Lillesand y Kiefer, 1987).

El análisis digital tiene la ventaja de utilizar métodos cuantitativos como por ejemplo, para medir variaciones en la reflectancia de una superficie, y lo más importante es que estos datos pueden ser registrados digitalmente y transmitidos de modo inmediato desde la plataforma satelital a la estación de recepción de datos.

Otra ventaja del análisis digital es que los datos pueden ser copiados repetidamente sin que se pierda información por estar contenidos en un formato numérico. Es precisamente esta característica la que permite que los datos digitales puedan ser manipulados matemáticamente

mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes. Dichas técnicas permiten extraer gran cantidad de información.

Ambos métodos son importantes para obtener resultados satisfactorios al momento de analizar e interpretar la información, por lo que la selección del método de trabajo dependerá de los objetivos que se pretendan alcanzar.

II.2. Selección del material de trabajo

La selección del material de trabajo depende de los objetivos y el nivel de exactitud a la que se pretende llegar. Con base en ello se establecen el elemento fundamental en todo estudio que involucre la teledetección: la escala.

Dependiendo de la finalidad del estudio se define la escala y el formato del material que se utilizará, ya sea fotografía aérea o imágenes de satélite, y de ser así el tipo de plataforma y de sensor.

Como ya se mencionó, una ventaja de los datos en formato digital es que pueden copiarse repetidamente sin que por ello se pierda información, por lo que cada copia es idéntica al dato original. Sin embargo, si una fotografía se copia numerosas veces, las copias se van degradando con respecto a la original (Gibson y Power, 2000).

En el caso específico de este trabajo se eligió un Modelo Digital de Elevación e Imágenes de satélite, es decir, el formato digital por ser el que mejor cumple con los objetivos planteados.

II.2.1 Imágenes Digitales

Una imagen digital puede ser definida por una función bidimensional, de la intensidad de luz reflejada o emitida por un área en el terreno (píxel), en forma $I(x,y)$, donde los valores de I representan, en cada coordenada espacial (x,y) , la intensidad de la imagen en ese píxel.

Esa intensidad es representada por un valor entero, no negativo y finito, denominado por algunos autores (Lillesand y Kiefer, 1987; Verbyla, 1995; Gibson y Power, 2000) como *Número Digital*, algunos autores se refieren a él como *Nivel Digital* (Chuvieco, 1995); otros lo llaman *Nivel de gris* (Schowengerdt, 1983) y Jensen (1996) lo identifica como *Valor de Brillantez*.

A cada punto observado por los sensores, corresponde el área mínima denominada "píxel" (*picture element*), que debe estar geográficamente identificado y para el cual son registrados los valores digitales relacionados a la intensidad de energía reflejada en intervalos (bandas) bien definidos del espectro electromagnético. Así, una imagen digital puede ser entonces considerada como una matriz de números o valores tridimensional, en donde los ejes x e y representan las dimensiones espaciales y el eje z representa la radiancia espectral o el Nivel Digital de cada píxel (Mather, 1999). Las columnas y renglones de la matriz definen las coordenadas espaciales de los píxeles.

La radiancia es el flujo radiante proveniente de una fuente, en una determinada dirección, por unidad de área (Gibson y Power, 2000). La cantidad de la radiancia en una imagen es representada por niveles de gris. Por lo tanto los elementos de esta matriz son entonces Números Digitales (ND) en el rango de 0-63, 0-127, 0-255 o 0-1024, dependiendo del sensor utilizado, que producen un intervalo de radiancia determinado. La mayoría de las veces se utiliza el rango de 0-255 Niveles de Gris para hacer el despliegue de las imágenes.

11.2.2 Modelos Digitales del Terreno

Los Modelos Digitales del Terreno se basan en la concepción general de Modelo. Un modelo, referido al ámbito geográfico, es una representación simplificada de un espacio real en la que aparecen algunas de sus propiedades (Joly, 1988). Existen diferentes tipos de modelos en virtud de su correspondencia con la realidad: *icónicos, análogos y simbólicos*:

1. En los icónicos la relación de correspondencia se establece a través de las propiedades morfológicas.
2. Los análogos poseen algunas propiedades similares a los objetos representados.
3. Por último los simbólicos tienen un nivel mayor de abstracción ya que el objeto real es representado mediante una simbolización matemática.

Es en este último donde se incluyen los modelos digitales de terreno que no son otra cosa que una modelización matemática de alguna característica espacial.

Se define entonces al Modelo Digital del Terreno como un conjunto de datos numéricos que describen la distribución espacial de una característica del territorio cuantitativa y continua (Felicísimo, 1999).

Este tipo de Modelos, son bases de datos en los que además de quedar representada la altura de cada punto del terreno (Modelos Digitales de Elevación o MDE), también figuran sus coordenadas espaciales, la latitud y la longitud, por lo que se trata de un espacio georreferenciado en sus tres coordenadas (x, y, z), y con una proyección geográfica determinada.

La principal característica de los Modelos Digitales del Terreno es que estos permiten realizar procesos de simulación, permitiendo elaborar modelos de previsión de fenómenos de interés, tanto físicos como sociales.

a) Modelo Digital de Elevación

El Modelo Digital de Elevación (MDE) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la elevación de la superficie del terreno. La unidad básica de información de un MDE es un valor de elevación Z, al que acompañan los valores correspondientes de X e Y, que expresados en un sistema de proyección geográfica permiten una precisa referenciación espacial.

Existen varias formas de representar estos modelos de elevación de acuerdo a la estructura y organización de sus datos. Clásicamente dos formas son las más comunes de presentar los modelos (Felicísimo, 1999):

1. **Vectorial:** basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices.
2. **Raster:** basado en las localizaciones espaciales sobre una retícula regular de puntos a los cuales se les asigna el valor de elevación.

Los anteriores tipos de modelos presentan variantes que permiten la evolución a nuevas estructuras de organización de los datos, pero conservando la forma clásica de representación de los mismos. Los más comunes corresponden a:

Estructuras vectoriales:

a) *Contornos:* Es un vector compuesto por un conjunto de pares de coordenadas que describen la trayectoria de una línea isométrica (curvas de nivel), donde el número de

elemento de cada vector es variable. En este caso el MDE está constituido por el conjunto de curvas de nivel que pasan por una zona, separadas generalmente por intervalos constantes de altitud.

b) *Redes de triángulos irregulares*: Es una estructura cada vez más utilizada, que se representa como conjunto de triángulos irregulares unidos. Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales y se unen sobre el terreno para formar un mosaico que se adapta a la superficie con diferentes grados de detalle, en función de la complejidad del relieve. Normalmente la distribución de puntos es aleatoria, pero es posible partir basándose en los puntos de isolíneas.

Estructuras raster:

a) *Matrices regulares*: Es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda o asociar un valor puntual de altura para el centro de la celda. La retícula puede ser una malla cuadrada regular de filas y columnas. Cada dato está implícitamente localizado según su situación en la matriz. Las matrices de altitud suelen provenir de la interpolación de modelos previos de contornos o por métodos fotogramétricos.

b) *Matrices de resolución variable*: En este tipo de matrices los elementos pueden estar ordenados como en las matrices regulares o bien organizados en submatrices a resolución diferente. La estructura final es como un árbol jerárquico y dinámico de submatrices con profundidad en principio arbitraria y cuya resolución espacial se duplica en cada nivel.

La información que contiene el MDE puede dividirse en dos formas diferentes:

Datos Explícitos: se refiere a las alturas y la posición de éstas con relación a la ubicación dentro de la matriz o al sistema de referencia. Son los datos contenidos del modelo.

Datos implícitos: se refiere a las relaciones espaciales entre los elementos (como por ejemplo la relación de la altura de un punto respecto a la de otro y la distancia a la cual están separados) que también pueden considerarse incluidas en el modelo.

Ambos tipos de información permiten obtener datos de diferente carácter. Del primer tipo se derivan, por ejemplo, los estadísticos básicos del modelo, que dan información sintética sobre el terreno y resumen sus características generales. El segundo tipo de información se utiliza para construir modelos derivados que dan cuenta de nuevas variables topográficas como la pendiente, rugosidad, orientación y curvatura. La información estructural implícita en el MDE se utiliza en operaciones de ámbito local, es decir, se usan los datos de un entorno limitado a cada punto (Felicísimo, 1999).

II.3. Importancia de la verificación en campo

La Percepción Remota o teledetección se ha convertido en una herramienta de uso muy extendido en numerosas áreas del conocimiento y su demanda se ha incrementado a medida que las técnicas de adquisición de este tipo de datos han mejorado. Sin embargo, se debe considerar que la teledetección es, como ya se mencionó, una herramienta que para ser aprovechada por completo depende de la interpretación que un especialista haga de los datos que con ella se obtienen.

Debido a esto es necesario verificar la exactitud de los análisis e interpretaciones que se dan a este tipo de datos. Esta verificación puede realizarse de diferentes formas y la información que se obtiene puede proceder de diversas fuentes, como mapas temáticos, reportes de laboratorio o de observaciones directas en campo.

La *verificación en campo* en contraste con la teledetección, se realiza directamente en el sitio de donde se obtuvo la información y puede ser útil en los siguientes casos (Lillesand y Kiefer, 1987):

1. Para ayudar en el análisis e interpretación de datos obtenidos de un sensor remoto.
2. Para calibrar un sensor.
3. Para verificar la información obtenida de un sensor remoto.

La selección de los sitios de verificación en campo debe decidirse en función de varios criterios como son: los objetivos del estudio, la continuidad del fenómeno o recurso estudiado, el acceso a la zona, la disponibilidad de información *in situ* de la zona, personal entrenado, equipo adecuado y conocer las características orbitales de la plataforma utilizada (Barret y Curtis, 1999).

El tiempo es otro factor que influye de modo decisivo en esta actividad, ya que el principal objetivo de la verificación de campo es proporcionar un registro de las condiciones de la zona en un tiempo cercano a la adquisición de la imagen.

En la práctica es difícil obtener datos que guarden sincronía con los datos del sensor, y por esto se debe considerar qué tipo de fenómeno se estudia. Barret y Curtis (1999) mencionan que se debe categorizar el tipo de variable estudiada en:

Transitorias: Son las que cambian rápidamente con el tiempo como la cubierta vegetal o eventos de contaminación del agua.

No-transitorias: Son las variables que no cambian de modo apreciable con el tiempo, por ejemplo, la geología o la topografía del terreno.

La verificación en campo depende de los objetivos del estudio que se efectúa, tales como investigaciones geológicas que requieren la toma de muestras de rocas para ser

analizadas y descritas. Los estudios hidrológicos requieren hacer mediciones de las corrientes, del contenido de sedimentos en suspensión y del clima y temperatura locales.

Otros tipos de datos son más permanentes, y rasgos como la morfología del terreno puede ser verificada en campo con mapas topográficos. De hecho la morfología es uno de los rasgos fundamentales al hacer la interpretación de las imágenes y fotografías aéreas, ya que elementos como la forma de la pendiente influyen en el modo como el sensor capta la radiación electromagnética.

a) Mediciones en campo de la reflectancia espectral

Otra forma de verificación de campo es la medición de la reflectancia de los materiales en superficie para determinar sus patrones de respuesta espectral. La medición de la reflectancia espectral de diferentes superficies es una actividad un tanto complicada, pero es recomendable realizarla ya que en un laboratorio no se logran reproducir de modo exacto las condiciones de reflectancia que prevalecen al momento de que el sensor capta la información.

Los instrumentos utilizados para medir la reflectancia en campo son: el *espectroradiómetro*, que se encarga de medir la energía proveniente de un objeto en función de la longitud de onda, y el *radiómetro*, que mide la intensidad de la radiación electromagnética de algunas bandas espectrales, más que hacerlo en todo el espectro.

Para obtener la reflectancia de una superficie determinada se siguen tres pasos:

1. Se calibra el instrumento ajustándolo a la reflectancia de un objeto que ya se conoce.
2. El instrumento es suspendido sobre el objeto de interés y se mide su reflectancia.

3. Finalmente la reflectancia espectral se lleva a la computadora en donde se obtiene un cociente que resulta de relacionar la energía reflejada por el objeto en cada banda entre la energía que incide sobre el mismo objeto en cada banda (Lillesand y Kiefer, 1987).

III. Procesamiento digital de imágenes

El análisis digital de datos, más específicamente, de las imágenes digitales de percepción remota satelital, hizo posible que en los últimos cuarenta años se desarrollaran un gran número de las técnicas orientadas al análisis de datos multispectrales adquiridos por diversos tipos de sensores. Estas técnicas han recibido el nombre de *procesamiento digital de imágenes*.

Por *Procesamiento Digital de Imágenes* se entiende la manipulación de una imagen a través de una computadora y un programa informático adecuado, de modo que la entrada y la salida del proceso sean imágenes (Bosque, 1994). El objetivo de utilizar el procesamiento digital de imágenes es mejorar el aspecto visual de ciertos elementos estructurales para el intérprete o usuario y proporcionar otras herramientas para su interpretación, inclusive generando productos que puedan ser posteriormente sometidos a otros procesamientos.

El procesamiento digital de imágenes puede ser dividido en tres etapas independientes: **pre-procesamiento, realce y clasificación**. En este capítulo sólo se tratará la primera etapa: el pre-procesamiento.

III.1. *Pre-procesamiento: correcciones de la imagen*

Las imágenes producidas por sensores remotos no siempre tienen una calidad óptima, ya que cada sensor tiene diferentes características y diferentes posibilidades de captar una imagen dependiendo de factores variados como su diseño o la altitud de la plataforma. Existen otros factores externos: los atmosféricos que pueden afectar la calidad de los datos, por lo que

es necesario hacer un pre-procesamiento de las imágenes para reducir los efectos producidos por dichos factores.

El pre-procesamiento se refiere al procesamiento inicial de los datos brutos para la calibración radiométrica de la imagen, la corrección de distorsiones geométricas y la eliminación de ruido. En resumen esta etapa es necesaria para corregir los defectos que puedan contener las imágenes (Gibson y Power, 2000).

Las correcciones radiométricas y geométricas de la imagen se hacen con el propósito de preparar los datos para realizar estudios precisos. Los estudios de análisis multitemporal por ejemplo, requieren alta precisión en la corrección geométrica de la imagen.

III.1.1 Correcciones geométricas

Las imágenes producidas por sensores remotos no son mapas; sin embargo, frecuentemente la información que se extrae de ellas puede ser integrada a un sistema de información geográfica o simplemente ser presentada a los consumidores en la forma de un mapa (Mather, 1999). La transformación de una imagen de satélite para que posea la escala y proyección de un mapa se conoce como *corrección geométrica*.

Este concepto incluye cualquier cambio en la posición o coordenadas que ocupan los píxeles de la imagen. Esta transformación puede emplearse tanto para corregir cartográficamente una imagen, como para superponer dos o más imágenes entre sí.

La corrección geométrica es útil en alguno de los siguientes casos:

- Para transformar una imagen para que coincida con la proyección de un mapa.
- Para localizar puntos de interés sobre el mapa y la imagen.

- Para sobreponer secuencias temporales de imágenes de la misma área, que pudieran ser adquiridas de diferentes sensores.
- Para sobreponer imágenes y mapas dentro de un Sistema de Información Geográfica.

La corrección geométrica se realiza en tres fases: 1) localización de puntos comunes a la imagen y al mapa o a otra imagen de referencia (Puntos de control), 2) cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y las del mapa, y 3) transferencia de los Números Digitales originales a la nueva posición, definida por la transformación previa (Chuvieco, 1995).

III.1.2 Correcciones radiométricas

Las correcciones radiométricas modifican los Números Digitales originales con el objetivo de acercarlos a los que estarían presentes en la imagen en caso de una recepción sin interferencias de ningún tipo. Generalmente este tipo de correcciones involucra la restauración de líneas o píxeles perdidos, la corrección del bandeo de la imagen y las correcciones atmosféricas.

En el caso de la restauración de los píxeles perdidos simplemente se obtiene el promedio del píxel que está sobre y debajo de cada píxel anómalo para de ese modo completar el Número Digital o la línea que falta. Sin embargo, este método es cosmético, es decir, que es útil sólo para mejorar el aspecto visual de la imagen para facilitar su interpretación y no reemplaza la información perdida.

El bandeo de la imagen (*striping*) se debe a una mala calibración entre los detectores incluidos en el sensor (Chuvieco, 1995). La corrección de esta anomalía se hace ajustando los

histogramas de cada detector tomando a uno de ellos como referencia, ya que se asume que cada uno tendería a presentar histogramas similares. De este modo se detecta y posteriormente se corrige el histograma que presente una respuesta alejada del resto de los histogramas.

III.1.2.1 Correcciones atmosféricas

Como se mencionó anteriormente, las partículas, el vapor de agua y los gases que se encuentran en la atmósfera pueden dispersar, absorber y reflejar la radiación electromagnética que incide sobre ellas. Sin embargo, el efecto atmosférico que más afecta la adquisición de las imágenes es la dispersión, especialmente en la región del visible (Chávez, 1988). De hecho, el efecto de dispersión atmosférica tiende a incrementar los Niveles Digitales asignados a cada píxel. Así mismo, la dispersión afecta a las longitudes de onda más cortas.

Existen varias técnicas para hacer correcciones atmosféricas como las de Tanre et al. (1990), Hall et al. (1991). Sin embargo, Chávez (1988) desarrolló un método que consiste en ajustar el histograma de la imagen por sus valores mínimos. Esto se basa en el hecho de que en teoría las áreas cubiertas con materiales de fuerte absorción como el agua por ejemplo, deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. Pero en la práctica, el histograma de los Niveles Digitales de la imagen siempre presenta un valor mínimo superior que se atribuye a la dispersión atmosférica (Chuvieco, 1995).

Por lo que la corrección por ajuste al histograma consiste en restar los valores mínimos de cada banda situando el origen del histograma en cero (Jensen, 1996), con lo que se reduce el efecto atmosférico.

III.2 Mejoramiento visual de la imagen

Existen varias técnicas de realce que mejoran la calidad visual de las imágenes y que permiten que los rasgos que presentan sean más evidentes y que por lo tanto se facilite su interpretación (Lundén y Wester, 1993). Entre las técnicas de realce más comunes en el tratamiento de las imágenes digitales se pueden mencionar: el ajuste de contraste, las composiciones en falso color y los filtrajes.

Ajuste del contraste

La manipulación de contraste consiste en una transferencia radiométrica en cada píxel, con el objetivo de aumentar la discriminación visual entre los objetos presentes en la imagen, es decir, el ajuste de contraste permite redistribuir los niveles de gris de la imagen en un rango de despliegue más amplio (Bosque et al, 1994).

Estos ajustes de contraste se realizan en el **histograma** de la imagen. El histograma es una de las formas más comunes de representar la distribución de los niveles de gris de una imagen y también la más utilizada en el procesamiento de imágenes.

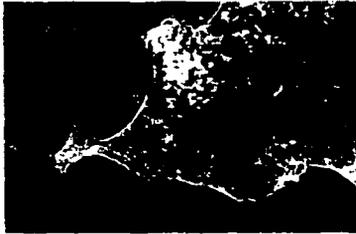
El histograma ofrece la información de cuántos píxeles poseen un determinado nivel de gris en la imagen, en un intervalo definido entre 0 (negro) y 255 (blanco). Otra característica es que el histograma no presenta ninguna información espacial de la imagen y sí una función de probabilidad de encontrar un nivel de gris referente a un objeto de la imagen. De hecho un aumento de contraste no revelará nunca una información nueva que no esté contenida en la imagen (Bosque et al, 1994). El contraste solamente presentará la misma información existente en los datos brutos, pero de una forma más clara para el usuario.

Los histogramas pueden ser *unidimensionales*, es decir, para una sola imagen (banda), o *multidimensionales*, cuando representa la distribución de dos o más bandas.

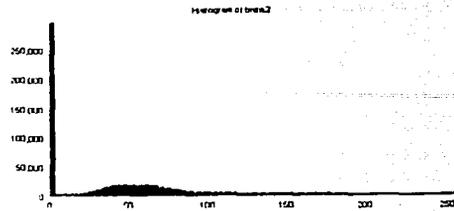
La forma del histograma proporciona información importante, como la intensidad media y la dispersión de los valores de niveles de gris, siendo esta última la medida de **contraste** de la imagen. En tanto mayor es la dispersión a lo largo del eje de los niveles de gris, mayor es el contraste de la imagen. La variación en el contraste aparece como una compresión del histograma en caso de una reducción, o una expansión en caso de aumento de contraste. Al igual que el brillo, variando el contraste se puede provocar una pérdida de información de la imagen.

Para aumentar el contraste de una imagen, se expande el intervalo original de niveles de gris de la imagen original, utilizando una función que consiste en mapear las variaciones dentro del intervalo original de tonos de gris, para otro intervalo deseado. Esta técnica es una operación puntual que utiliza una función matemática denominada transformación radiométrica, la cual considera solamente el nivel de grises original de cada *píxel* para calcular el nuevo valor en la imagen de salida (Bosque et al, 1994). El resultado es una imagen con mejor contraste y por lo tanto una mejor visualización de los detalles que aparecen en la misma (Fig.6).

a)



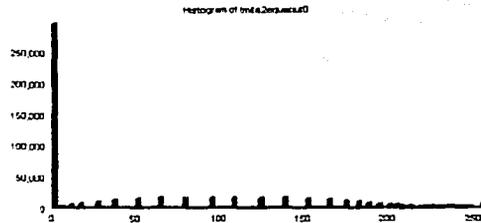
Graph Type		Mode	Summary Statistics	
<input checked="" type="checkbox"/> Bar Graph	<input checked="" type="checkbox"/> Non-Cumulative	Class width: 2	d: 579823	
<input type="checkbox"/> Line Graph		Display min: 0	Actual min: 0	
<input type="checkbox"/> Area Graph	<input type="checkbox"/> Cumulative	Display max: 256	Actual max: 256	
		Mean: 36.3773	Standard dev: 51.0238	



b)



Graph Type		Mode	Summary Statistics	
<input checked="" type="checkbox"/> Bar Graph	<input checked="" type="checkbox"/> Non-Cumulative	Class width: 2	d: 579823	
<input type="checkbox"/> Line Graph		Display min: 0	Actual min: 0	
<input type="checkbox"/> Area Graph	<input type="checkbox"/> Cumulative	Display max: 256	Actual max: 256	
		Mean: 65.0274	Standard dev: 53.3091	



c)



Graph Type		Mode	Summary Statistics	
<input checked="" type="checkbox"/> Bar Graph	<input checked="" type="checkbox"/> Non-Cumulative	Class width: 2	d: 579823	
<input type="checkbox"/> Line Graph		Display min: 0	Actual min: 0	
<input type="checkbox"/> Area Graph	<input type="checkbox"/> Cumulative	Display max: 256	Actual max: 256	
		Mean: 56.6216	Standard dev: 70.8568	

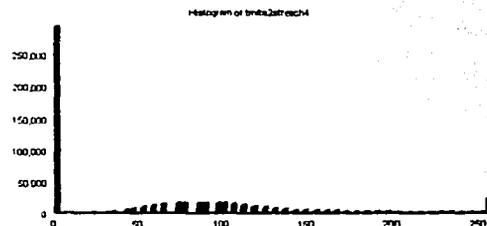


Fig. 6 Ajustes de histograma: a) histograma original de la imagen; b) histograma equalizado; c) histograma con ajuste de saturación del 4%.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV. Técnicas de Realce Digital

El análisis visual y la interpretación frecuentemente son suficientes en muchos casos para extraer información de las imágenes producto de la percepción remota. Si las imágenes se presentan en formato digital, tal como aquellas obtenidas de una plataforma satelital, entonces es posible utilizar la computadora y un determinado programa informático para manipular y desplegar los datos y para generar imágenes que cumplan con las necesidades del intérprete (Mather, 1999).

Esta manipulación de los datos contenidos en las imágenes se conoce como *realce digital*. Según Mather (1999), el término realce es utilizado para indicar la alteración de la apariencia de una imagen de tal modo que sea más fácilmente interpretada para un propósito determinado.

Existen numerosas técnicas de realce que varían dependiendo del tipo de estudio que se realiza. En el capítulo anterior ya se mencionaron técnicas de realce como las de ajuste al histograma, y que fueron consideradas parte del pre-procesamiento de las imágenes. En el presente capítulo se consideran otras técnicas como las de realce espectral, que algunas veces alteran solamente el modo como se visualiza la información como por ejemplo las composiciones a color, y otras en las que siempre se modifican los datos como en las técnicas de realce espacial.

IV.1 Realce Espectral

Los métodos de realce espectral son de gran utilidad para cumplir con el objetivo de extraer información importante acerca de objetos específicos. Lo que se requiere para lograr

este objetivo es que los materiales de interés puedan ser discriminados objetivamente (Mustard y Sunshine, 1999). Por esto se han desarrollado varias técnicas de realce y procesamiento.

Cuando se tiene conocimiento previo acerca del comportamiento y las causas físicas de la radiación electromagnética y su interacción con la atmósfera y los diferentes materiales, esas técnicas son herramientas muy efectivas.

Ejemplo de este comportamiento son las superficies, las cuales presentan diferentes grados de absorción de la energía electromagnética que incide sobre ellas, por lo que sus respuestas espectrales son también diferentes dependiendo de la composición de las rocas; esto hace posible distinguir algunas de sus características sobre una imagen.

IV. 1.1. Composiciones en color

En muchas ocasiones es difícil identificar algunos rasgos en las imágenes desplegadas en tonos de gris, por lo que es necesario recurrir a las composiciones en color que son imágenes producidas por la combinación óptica de las distintas bandas a través de filtros.

Las composiciones en color son útiles para representar con un color en particular materiales específicos, cuya intensidad es proporcional a los valores de brillantez contenidos en la imagen (Drury, 1987).

Esta técnica se basa en el mismo principio que sigue el ojo humano para percibir el color, es decir, que los sensores al igual que los ojos captan la reflectividad que tienen los objetos para distintas longitudes de onda. El ojo humano sólo percibe las longitudes de onda comprendidas entre los 0.4 y 0.7 μm , separando la energía recibida en tres componentes de acuerdo a la sensibilidad espectral de las células sensoras (Chuvieco, 1995).

Esos tres componentes son los denominados colores primarios: azul, verde y rojo, a partir de los cuales puede reconstruirse cualquier otro color.

Si el sensor recoge información sobre las bandas del espectro azul, verde y rojo, se obtiene una composición en color natural. Sin embargo, en ocasiones se requiere otro tipo de composiciones que aporten una mejor información espectral, esas composiciones se conocen como de *Falso color* (Gillespie et al, 1986).

Una imagen de falso color es aquella en la que sus colores no corresponden al color verdadero de la escena visto por nuestros ojos, y que se produce al desplegar las distintas bandas espectrales en cañones de color diferentes a los del rango espectral donde fueron tomadas (Gillespie et al, 1986). Específicamente, al asignar tres bandas de una imagen que no corresponde a las frecuencias de los colores fundamentales (rojo, verde y azul), se producirá una imagen en colores que no son los naturales o verdaderos.

Por ejemplo, la composición en falso color más común es la compuesta por las bandas 4 (infrarrojo cercano), 3 (rojo) y 2 (verde), desplegadas en los cañones Rojo, Verde y Azul (*Red, Green, Blue, RGB*) respectivamente. Al colocar la banda 4 TM (0.76-0.90 μ m) que corresponde al infrarrojo cercano (que es donde la vegetación presenta alta reflectancia), en el cañón de despliegue correspondiente a la banda 3 (Rojo), la vegetación quedará entonces representada en color rojo (Fig. 7).

Sin embargo, las composiciones en color no proporcionan por sí mismas la información acerca de lo que representan en la imagen, por lo que es necesario que el analista tenga conocimiento acerca de la respuesta espectral de los diferentes tipos de cubierta para hacer una interpretación correcta.

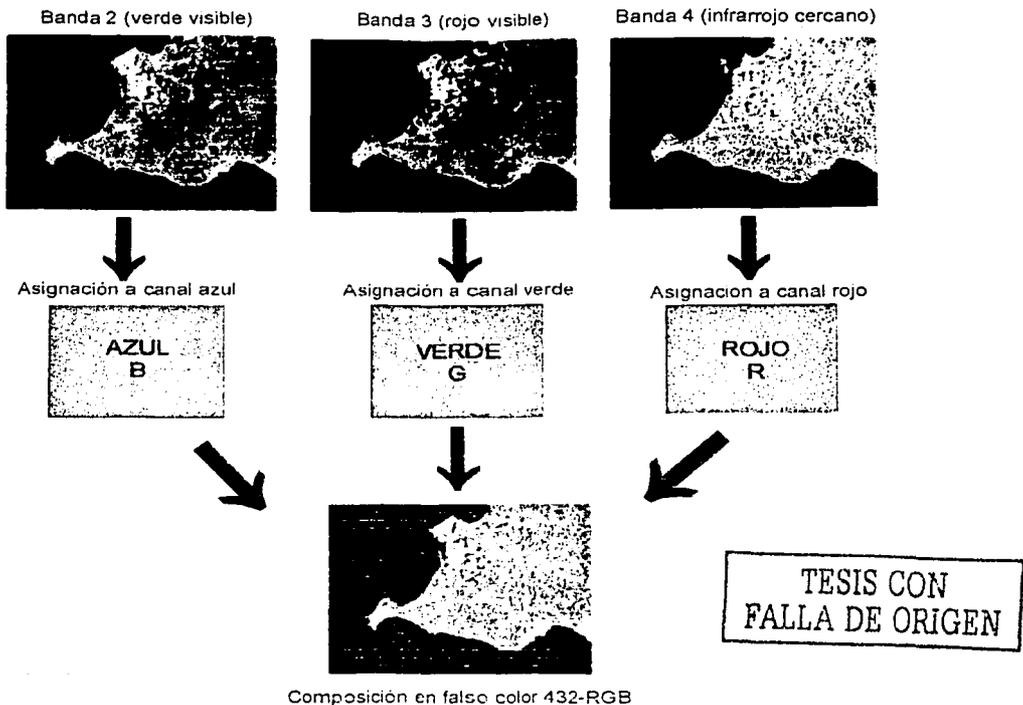


Fig. 7 Composición en falso color generada con las bandas TM 2, TM 3 y TM 4 desplegadas en los canales Azul (B), Verde (G) y Rojo (R) respectivamente.

IV.1.2 Clasificación

Una clasificación es el proceso de extracción de información en imágenes para reconocer patrones y objetos homogéneos (Bosque, 1994). Este proceso se realiza agrupando los píxeles de la imagen en categorías o clases separadas a los que se les llama *sitios de entrenamiento*, de acuerdo con sus diferentes características espectrales. Así, cada uno de los píxeles originales de la imagen quedará definido por el Número Digital que será el

identificador de la clase en donde se le haya incluido (Chuvieco, 1995). La clasificación de imágenes puede ser usada para producir mapas temáticos o puede también ser incorporada dentro del análisis digital.

En lo que se refiere a las técnicas de clasificación digital de imágenes, estas pueden ser divididas, dependiendo del criterio utilizado para definir los sitios de entrenamiento en: clasificación supervisada y clasificación no supervisada.

a) Clasificación Supervisada

La clasificación supervisada es un procedimiento para identificar áreas espectralmente similares a partir de definir los sitios de entrenamiento sobre objetos que previamente se conoce que existen en el área (Gibson y Power, 2000).

En la clasificación supervisada se requiere tener conocimiento previo de la localización y el tipo de diferentes cubiertas que aparecen en la imagen. Esto puede llevarse a cabo mediante trabajo de campo o identificación en fotografías aéreas.

Se trata de mostrar al algoritmo de clasificación unas áreas tipo o sitios de entrenamiento que usualmente son un grupo de píxeles que representan a cada una de las categorías o clases que se pretende discriminar (Bosque, 1994). El clasificador hace esa discriminación basándose en las diferentes respuestas espectrales de cada categoría.

Existen numerosos factores tales como el tipo de suelo, el contenido y la humedad que pueden afectar la respuesta espectral de los sitios de entrenamiento de los diferentes tipos de cubierta, y por lo tanto también se puede afectar la exactitud del mapa final. Debido a lo anterior se puede seleccionar más de un área de entrenamiento para cada categoría con el objeto de representar la variabilidad de las distintas cubiertas (Bosque, 1994).

En este tipo de clasificación cada píxel de la imagen es comparado con los píxeles de cada sitio de entrenamiento, y posteriormente son asignados a la clase más similar. Sin embargo, existen algunos algoritmos o clasificadores que se utilizan para medir el grado de similitud entre un píxel y una clase, y otros algoritmos pueden asignar el mismo píxel a otra clase diferente (Gibson y Power, 2000).

Algunos de los algoritmos de clasificación supervisada son (Fig.9):

Clasificador de Mínima Distancia: Se basa en asignar cada píxel a la categoría o clase espectralmente más próxima en el espacio espectral. Todos los píxeles son clasificados sin ambigüedad (Mather, 1999).

Clasificador de Paralelepípedos o "de caja": Los píxeles son asignados a una determinada categoría en función de los valores máximo y mínimo determinados para cada clase mediante los sitios o áreas de entrenamiento. Se le llama también "de caja" ya que este clasificador construye cajas o cuadros alrededor de cada clase. Una caja puede rodear los valores máximos y mínimos y, si un píxel se encuentra sobre el valor mínimo y por debajo del valor máximo, se dice que cae dentro de la caja y entonces será asignado a esa clase (Gibson y Power, 2000).

En ocasiones los píxeles pueden caer dentro de dos cajas, en este caso se les puede dejar sin clasificar o asignar una clase especial a este tipo de píxeles.

Clasificador de Máxima Verosimilitud: Este clasificador considera una distribución normal de los sitios de entrenamiento (Gibson y Power, 2000). Aquí se evalúa la varianza y covarianza de cada clase para así determinar donde se colocará cada píxel. La probabilidad estadística de que un píxel pertenezca a una clase es calculada a partir de su vector de media y su matriz de varianza-covarianza. El clasificador de máxima verosimilitud es generalmente el



más empleado debido a que se ajusta con mayor rigor a la disposición original de los datos (Chuvienco, 1995). Sin embargo, es también el que más tiempo de proceso de cómputo consume.

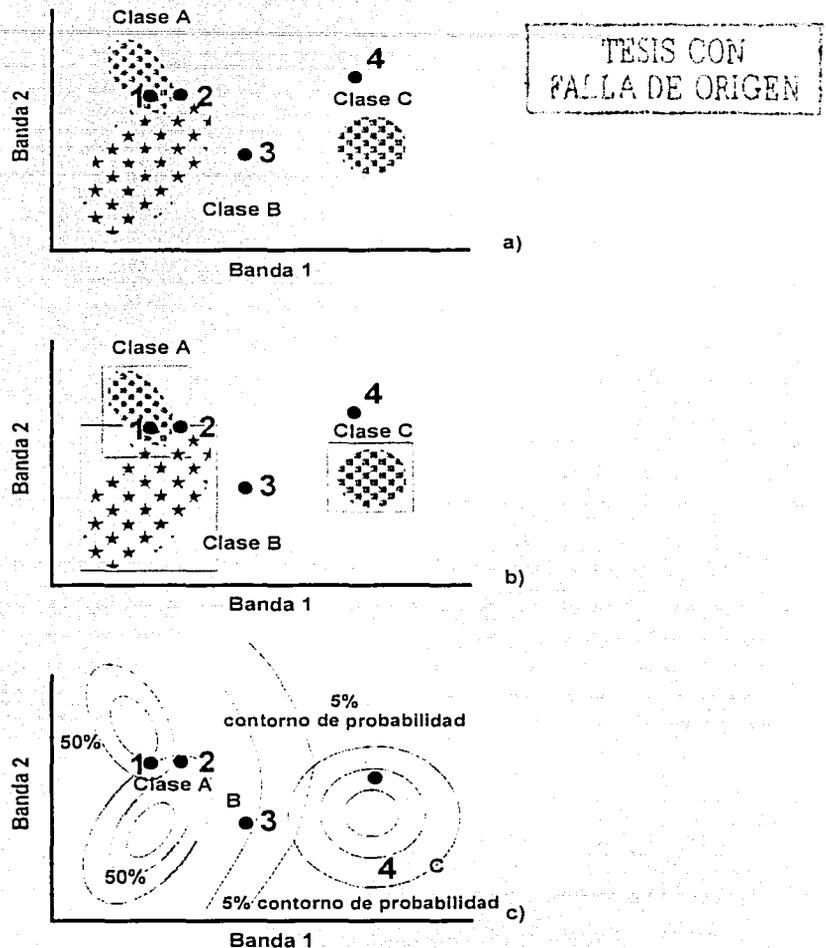


Fig. 8 Clasificación supervisada: a) mínima distancia, b) paralelepipedo y c) máxima verosimilitud (Gibson y Power, 2000).

b) Clasificación No Supervisada

Esta clasificación se basa solamente en la búsqueda de clases espectrales homogéneas presentes en la imagen (Bosque, 1994), sin tener un conocimiento previo del área en estudio.

La clasificación no supervisada crea grupos a los que se denomina *clusters*; estos grupos contienen píxeles con valores similares de brillantez en las bandas utilizadas en la clasificación, por lo que se asume que pertenecen a la misma clase espectral. El paso posterior es entonces determinar la identidad de cada clase espectral.

Es necesario hacer una verificación de campo de los resultados tanto de la clasificación supervisada como de la no supervisada y determinar la matriz de error, para de este modo determinar que tan precisas resultan en comparación con la verdad de campo.

IV.1.3 Análisis de Componentes Principales

En muchas ocasiones se observa que las bandas individuales de una imagen multiespectral están altamente correlacionadas, es decir, que las bandas son similares visual y numéricamente. Esta correlación proviene del efecto de las sombras resultantes de la topografía, de la sobreposición de las ventanas espectrales entre bandas adyacentes y del propio comportamiento espectral de los objetos.

Frecuentemente, el análisis de las bandas espectrales individuales puede ser poco eficiente debido a la información redundante presente en cada una de esas bandas. La transformación por **componentes principales (ACP)**, es una técnica de realce que reduce o remueve esta redundancia espectral, o sea, genera un nuevo conjunto de imágenes cuyas bandas individuales presentan información no disponible en otras bandas.

El ACP es una transformación matemática a partir de la cual se generan nuevas imágenes, que son llamadas *componentes* o *ejes*, las cuales son combinaciones lineales de las imágenes originales (Chávez, 1989). Estas nuevas imágenes no tienen correlación matemática entre sí. De hecho el mayor porcentaje de la varianza total, es decir, la mayor cantidad de información o el mayor contraste, quedan contenidos en la primera componente y decrece en las siguientes componentes. La suma de la varianza de todas las componentes es igual a la varianza total presente en las imágenes originales (Chávez, 1989).

Como se mencionó, el ACP es una técnica que permite reducir el número de imágenes o variables que son necesarias para ser analizadas. Por ejemplo, el ACP puede ser aplicado a las seis bandas no térmicas del Landsat Thematic Mapper y solo las primeras tres componentes resultantes se utilizarían para elaborar una composición en color, hacer un análisis digital o una clasificación. Esto se debe a que en estas componentes se concentra más información significativa, aproximadamente un 98% (Gibson y Power, 2000).

Una de las ventajas que ofrece el ACP es que se reduce el tiempo de procesamiento en la computadora, aunque por otro lado puede presentar dos problemas: el primero es la pérdida de información de interés que queda en las componentes que no se utilizan (CP4, CP5 y CP6, por ejemplo), y el segundo es la dificultad de interpretar visualmente las composiciones en color que se derivan de las componentes principales (Chávez, 1989).

En la figura 10 se muestra que la transformación por componentes principales se visualiza más fácilmente en dos dimensiones. Los Números Digitales de las dos bandas quedan representados en una elipse contenida en un eje coordenado (en tres dimensiones la nube de puntos puede formar un elipsoide). Entre más simétrica sea la elipse las bandas estarán más

correlacionadas. La figura corresponde a la rotación de los ejes originales de cada banda para hacerlos coincidir con las direcciones de máxima y mínima variancia de la información.

El eje mayor de la elipse es la primera Componente Principal (CP1) y la varianza (z) a lo largo de este eje, es más largo que los ejes originales x e y . Mientras que la segunda Componente Principal (CP2) forma un ángulo recto con la CP1.

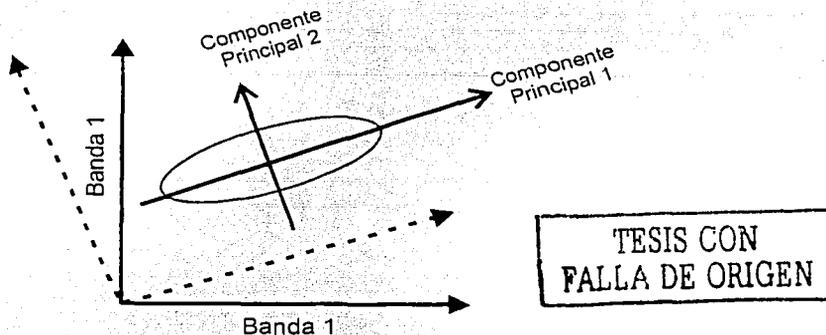


Fig. 9 Componentes Principales resultado de la traslación y rotación de los ejes originales.

Para obtener los ejes de las Componentes Principales es necesario calcular la longitud y la dirección de los mismos. En este proceso se utiliza el coeficiente de correlación o covarianza para determinar un conjunto de cantidades llamadas *eigenvalores* o *autovalores* (longitud) y *eigenvectores* o *autovectores* (dirección). Estos son factores estadísticos que definen la contribución de cada banda original para una componente principal (Gibson y Power, 2000).

Para facilitar la percepción de esas contribuciones, se deben transformar los autovectores en porcentajes. Conociendo cada coeficiente de autovector, se pueden comparar los porcentajes con las curvas espectrales de materiales conocidos como por ejemplo, vegetación, agua o diferentes tipos de suelo, determinándose así en cuál componente principal se concentra más información espectral.

Componente	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
% varianza	84.43	10.59	4.22	0.43	0.34
autovalores	12355.42	1549.22	617.35	62.26	50.18
Mita B2	0.918689	0.232033	-0.258709	0.006470	-0.087633
Mita B3	0.950322	0.245523	-0.258709	-0.001639	0.127626
Mita B4	0.874339	-0.495992	-0.021168	0.017710	0.001160
Mita B5	0.950998	0.090907	0.183550	-0.111713	-0.005337
Mita B7	0.931612	0.259534	0.263356	0.092093	0.000000

Tabla 2 Análisis de Componentes Principales.

En el ejemplo de la Tabla 2 se tiene que la primera componente principal (CP1) presenta una varianza del 84.43%, lo que significa que dicha componente concentra la mayor cantidad de información relacionada con la topografía y el albedo.

De esta forma, se entiende que para CP1 la banda 2 (B2) está contribuyendo con más información. Este mismo raciocinio puede ser adoptado para las siguientes componentes principales.

La primera componente principal (CP1), contiene la información de brillo asociada a las sombras de topografía y a las grandes variaciones de la reflectancia espectral general de las bandas. Esta componente principal posee la mayor parte de la variancia total de los datos, concentrando la información antes dispersa, en varias dimensiones.

La segunda y las subsecuentes componentes principales presentan gradualmente menos contraste entre ellas y no contienen información topográfica, debido a la ausencia de sombras (Sabine, 1999).

La tercera y cuarta componentes principales contienen típicamente menos estructura de la imagen y más ruido que las dos primeras, indicando la compresión de los datos en las primeras bandas. Las subsecuentes componentes representan básicamente el ruido existente en los datos originales (Sabine, 1999).

IV.1.3.1 Análisis Selectivo de Componentes Principales

Como ya se citó, el Análisis de Componentes Principales es útil ya que reduce tanto el tiempo como el tamaño o mejor dicho, las dimensiones de la información procesada; sin embargo en muchas ocasiones este método presenta algunos problemas.

Estos problemas incluyen la pérdida de información de interés que queda registrada en las componentes que no se utilizan y la dificultad para interpretar las composiciones en color que se obtienen de dicho análisis (Chávez, 1989).

Ambos problemas pueden ser superados mediante otra técnica que difiere del Análisis de Componentes Principales ya explicado anteriormente, en el cual se utilizan todas las bandas disponibles, esta técnica es el Análisis Selectivo de Componentes Principales (ASCP), en el cual se utiliza solo un par de bandas para obtener dos componentes, siendo la segunda componente en donde se registra la información que es única a cada banda.

El ASCP consiste de dos métodos. En el primer método se utilizan pares de bandas altamente correlacionados para reducir la dimensionalidad; en el segundo, se eligen pares de bandas medianamente y poco correlacionados para mapear el contraste espectral entre cada

una. Cabe aclarar que el grado de correlación entre dos imágenes se refiere a la cantidad de contraste espectral entre ellas y esto lo determina la contigüidad de cada banda en el espectro (Chávez. 1989).

Con el primer método se toman dos subgrupos de bandas altamente correlacionadas, el primer subgrupo con las bandas 1, 2 y 3 por ejemplo, y el segundo con las bandas 5 y 7, con cada grupo se hace un Análisis de Componentes Principales estándar.

Posteriormente se toma la primera componente resultante de cada grupo y la banda TM4 y se elabora una composición en color. La imagen resultante luce similar a una composición en falso color con las bandas originales TM 4, 3 y 2 (RGB),

El segundo método se utiliza para realzar información que es única en cada banda y no tanto para encontrar la respuesta espectral de varios tipos de cubierta (Chávez, 1989). Es decir, el objetivo principal de este método es mapear el contraste espectral entre materiales con rasgos espectrales en diferentes partes del espectro, para así encontrar la información que es única en cada banda.

Difiere del primer método en dos cosas: en el modo como se eligen las bandas, ya que aquí sólo se usan 2 bandas con media (de 0.70 a 0.90) y poca correlación (menos de 0.70), y en que la segunda componente (CP2) que resulta es la que contiene información relevante. Por lo que la interpretación es aún más sencilla.

IV.2 Realce Espacial: Técnicas de filtraje

Como se mencionó anteriormente, con las técnicas de realce espectral se modifica el modo en el cual la información contenida en una imagen se presenta al usuario, ya sea

alterando su contraste. elaborando composiciones en falso color o enfatizando algunas propiedades espectrales de interés para el intérprete. Al aplicar estas técnicas sólo se modifica la manera en la cual la información espectral de la imagen es desplegada y visualizada, los datos en sí mismos. no cambian.

Al contrario de esto. las técnicas de filtraje son transformaciones de la imagen *pixel a pixel*, es decir, que los datos si son alterados. Esto se debe a que el realce espacial opera selectivamente sobre los datos de la imagen que se considera, contienen información en varias escalas espaciales (Mather, 1999). Las transformaciones de los datos no dependen solamente del nivel de gris o Número Digital de un determinado píxel, sino también del valor de los Números Digitales de los píxeles vecinos, en la imagen original.

Los filtros son especialmente útiles para enfatizar rasgos en la imagen de distinta *frecuencia espacial*. La frecuencia espacial se refiere a la “rugosidad” de las variaciones tonales que se presentan en una imagen, es decir, las partes de una imagen con alta frecuencia espacial son tonalmente “rugosas”. Esto significa que los niveles de gris en esas áreas cambian abruptamente en un relativamente pequeño número de píxeles (Lillesand y Kiefer, 1987), es el caso de los lineamientos como fallas o fracturas.

Las áreas “suaves” en las imágenes son aquellas que presentan baja frecuencia espacial, lo que significa que los niveles de gris varían gradualmente en un relativamente gran número de píxeles como por ejemplo los campos de cultivo o los cuerpos de agua (Lillesand y Kiefer, 1987).

Ambos filtros son esencialmente matrices numéricas que utilizan operaciones aritméticas simples (sumas, restas, multiplicaciones y divisiones), y que permiten que se genere una nueva imagen asignando nuevos valores a cada píxel dependiendo de los resultados de

dichas operaciones aritméticas (Fig. 11). Esas matrices son llamadas *ventanas* o *kernell*, y se caracterizan por ser móviles y de tamaño variable.

Lo anterior se explica con el ejemplo de la figura 10. En este caso se trata de una matriz de 3 X 3, aunque también pueden utilizarse matrices de 5 X 5 y 7 X 7. La matriz se coloca inicialmente en el extremo superior izquierdo de la imagen y con esto se obtiene un nuevo Número Digital para el píxel que queda en el centro de la matriz (columna 2. renglón 2). Este nuevo Número Digital es el promedio de los valores de los píxeles que quedan contenidos en la matriz. Posteriormente la matriz se va desplazando del mismo modo, píxel a píxel, por toda la imagen (Gibson y Power, 2000). Se entiende que el kernell se aplica secuencialmente a cada píxel. La elección del tamaño del kernell depende de las frecuencias espaciales encontradas en la imagen. Una imagen con alta frecuencia requiere por lo tanto, del uso de un kernell pequeño como el de 3 X 3, mientras que una imagen con bajas frecuencias requiere un filtro más grande, como de 9 X 9.

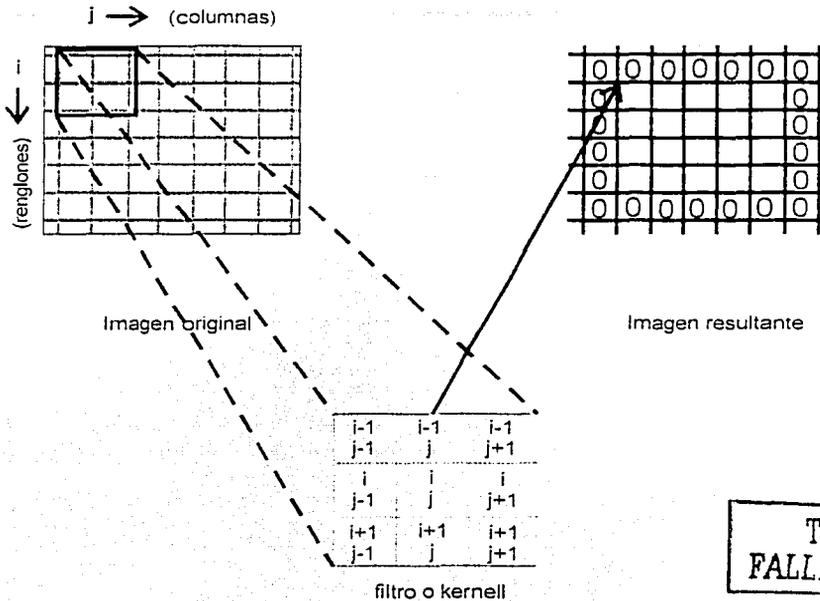


Fig.10 Ventana o kernell de 3 X 3 (Mather, 1999).

Con base en lo anterior, los filtros espaciales pueden ser clasificados en filtros de *pasa bajas* y *pasa altas* (Mather, 1999). Los dos filtros son de los más utilizados en procesamiento de imágenes.

a) Filtros *pasa bajas*

El efecto visual de un filtro *pasa baja* es de suavización y reducción del número de niveles de gris en la escena. Las altas frecuencias, que corresponden a las transiciones abruptas son atenuadas. La suavización tiende a minimizar ruidos y origina una imagen menos nítida, con niveles de gris más desvanecidos.

b) Filtros pasa altas

El filtraje pasa alta tiende a realzar los detalles, produciendo una "agudización" ("*sharpening*") de la imagen, es decir, las transiciones entre regiones diferentes se tornan más nitidas, que es el caso de los lineamientos geológicos. Este filtro permite aislar o amplificar los detalles locales.

Específicamente, los tipos de filtros de realce más comunes son: Filtro Laplaciano, Sobel, Prewitt y el de Método de Diferencia.

Algunos filtros tienen ventaja sobre otros. Por ejemplo, el filtro Laplaciano es más útil para detectar bordes y límites como los de los cultivos, mientras que el filtro de Prewitt detecta mejor rasgos lineales como las líneas de falla.

Un filtro Laplaciano (Fig. 11) utiliza un kernell que calcula un nuevo valor de gris para el pixel central mediante la suma de todos los valores de gris dentro de la ventana. Cuando los coeficientes del kernell no están distribuidos simétricamente, pero se alinean en una dirección particular, entonces el realce resultante tendrá también una preferencia direccional también. Cuando esto sucede se habla de filtros direccionales.

Números Digitales
originales

18	20	17	19	18	13	9
20	24	19	22	14	11	10
23	32	29	27	19	9	8
21	36	30	28	16	14	10
30	44	23	17	10	7	7
44	50	28	14	13	13	11
43	46	44	33	25	21	16

Primera aplicación
del filtro

18	20	17	19	18	13	9
20	24	19	22	14	11	10
23	32	29	27	19	9	8
21	36	30	28	16	14	10
30	44	23	17	10	7	7
44	50	28	14	13	13	11
43	46	44	33	25	21	16

Aplicación del filtro

1	1	1
1	1	1
1	1	1



Imagen filtrada

0	0	0	0	0	0	0
0	22	23	20	17	12	0
0	26	27	23	18	7	0
0	30	30	22	16	11	0
0	34	30	20	15	11	0
0	39	33	23	17	14	0
0	0	0	0	0	0	0

24 Es reemplazado por: $[(18 \times 1) + (20 \times 1) + (17 \times 1) + (20 \times 1) + (24 \times 1) + (19 \times 1) + (23 \times 1) + (32 \times 1) + (29 \times 1)] / 9 = 22$

Fig. 11 Filtro Laplaciano (Gibson y Power, 2000).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.2.1 Aplicación de filtros direccionales

Una de las aplicaciones más comunes de los filtros direccionales es el realce de rasgos lineales sutiles o el mapeo de lineamientos y rasgos geomorfológicos los cuales no son claramente visibles sobre un Modelo de Elevación no procesado por ejemplo. Estos rasgos lineales aparecen, como se mencionará posteriormente, como límites lineales entre dos zonas de diferente brillantez o diferente textura.

En el caso del presente trabajo se aplicaron filtros direccionales (N-S, E-W, NE-SW, NW-SE), los cuales se seleccionaron con base en las direcciones de una parte de los lineamientos previamente reportados por Núñez-Cornú et. al. (2000) y en el mapa geológico de la zona. Los filtros se aplicaron directamente al Modelo Digital de Elevación, de esta forma, se realizaron los detalles espaciales que cambian de modo abrupto en sus niveles de brillantez en distancias muy cortas dentro del Modelo. En el capítulo de resultados se presenta la imagen de los lineamientos identificados con el MDE después de que se le aplicaron los filtros direccionales.

V. METODOLOGÍA

V.1 Aspectos Generales de Punta Mita

Punta Mita se localiza en la porción noroeste de la Bahía de Banderas ($105^{\circ} 20' - 105^{\circ} 35' W$ y $20^{\circ} 45' - 20^{\circ} 50' N$), sobre la costa del Pacífico, en el estado de Nayarit. Está bordeada por la Sierra Madre Occidental y la Sierra Volcánica Transmexicana al este (Fig. 12).

En cuanto a su fisiografía, el estado de Nayarit cubre cuatro provincias fisiográficas: Sierra Madre Occidental, Llanura Costera del Pacífico, Sierra Volcánica Transmexicana y Sierra Madre del Sur. Punta Mita pertenece a la porción noroccidental de la Sierra Madre del Sur.

Punta Mita contiene cuatro unidades geológicas principales: granito, basalto, arenisca y conglomerados. Las rocas graníticas predominan en el área alrededor de la Bahía de Banderas (Núñez et. al., 2000). Al pertenecer a la margen del Pacífico de México, específicamente a la que abarca el llamado bloque de Jalisco (Núñez-Cornú et. al., 2000), se sabe que es una zona tectónicamente activa, ya que se encuentra en la parte de la Trinchera Mesoamericana donde la Placa de Rivera subduce a la Placa Norteamericana. Debido a esta razón, la zona ha experimentado actividad sísmica continua, en especial dos sismos de gran magnitud, el primero en 1932 (Mw 8.2) y el más reciente en 1995 (Mw 8.0) (Ramírez, 2002). Así mismo, en la línea de costa se observan terrazas marinas sobre el nivel del mar, las cuales indican levantamiento tectónico (Ramírez, 2002). Se ha reportado que un flujo basáltico en la porción suroeste de la zona en estudio es afectada por un grupo de morfolineamientos con direcciones preferenciales

entre los N42°E, N20°E y N68°E y que están relacionados con la actividad tectónica y volcánica de la unidad geológica el bloque de Jalisco (Núñez-Cornú, et. al., 2000).

Recientemente esta zona ha despertado el interés de varios investigadores debido a que se descubrió la existencia de actividad hidrotermal submarina, lo cual es un argumento más que apoya la hipótesis de que Punta Mita y en general la Bahía de Banderas es una zona tectónicamente activa.

Por otro lado, el régimen climático que domina en Punta Mita es el cálido, que se caracteriza por tener una precipitación pluvial media anual de 1200 a 1500 mm y una temperatura media de más de 22° centígrados. Este tipo de clima se encuentra asociado a comunidades vegetales del tipo de selva baja, selva mediana subcaducifolia, manglar y pastizales, ocupando gran parte de la zona en estudio (INEGI, 1984).

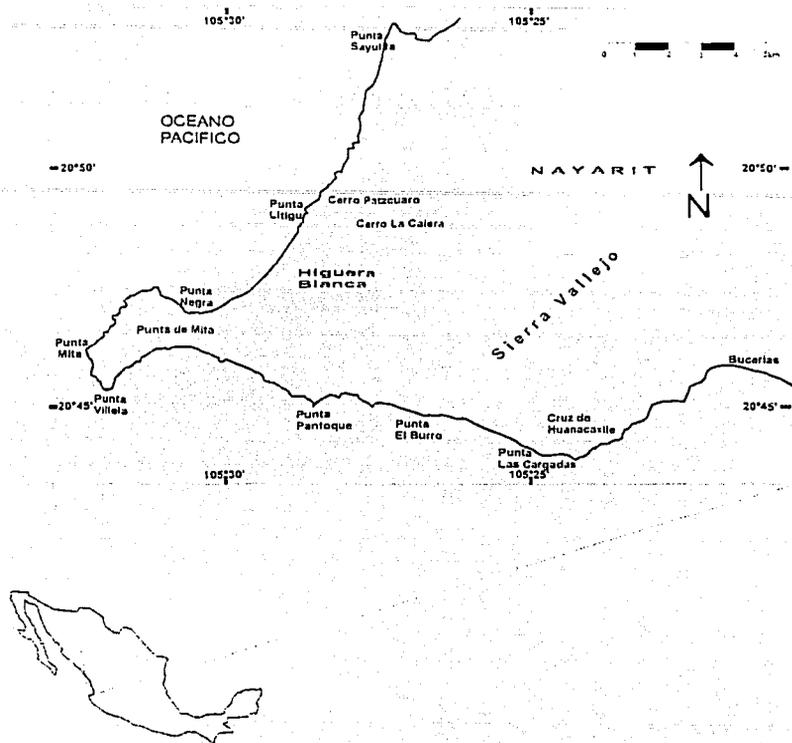


Fig. 12 Localización de Punta Mita, Nayarit.

V.2 Descripción de los datos

Se utilizaron cuatro diferentes clases de datos que se combinaron para enfatizar los rasgos geológicos espaciales y espectrales del área en estudio:

1. Mapas topográfico y geológico escala 1:50 000 de la zona de Punta Mita, Nayarit (Punta Sayulita F-13-C-58, INEGI).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2. Imágenes de las 6 bandas espectrales no térmicas del Landsat 5 Thematic Mapper, con resolución de 30 X 30 m por píxel (y un rango espectral que cubre desde el visible en las bandas TM 1, 2 y 3 (0.45-0.69 μm) hasta el infrarrojo medio en las bandas TM 4, 5 y 7 (1.55-2.35 μm).
3. Modelo Digital de Elevación de Punta Mita, Nayarit (INEGI, 1999).
4. Información obtenida durante el trabajo de campo.
5. Programa informático para procesamiento de imágenes IDRISI for Windows v.32.2

V.3 Identificación de lineamientos

Uno de los objetivos del presente trabajo es obtener un mapa geológico en el que se presentan los lineamientos que pueden ser fracturas o fallas, y que reflejan el tipo de actividad geológica y tectónica que ocurre en la zona de Punta Mita. La importancia de esta identificación radica en que numerosos depósitos de importancia económica como los de origen hidrotermal, de oro y plata por ejemplo, se localizan a lo largo de zonas de fractura. Los fluidos hidrotermales contienen minerales que a su paso a través de las fracturas, cambian la composición mineralógica de la roca adyacente y finalmente se depositan (Ruíz-Armenta y Prol-Ledesma, 1995).

Por esta razón se debe primeramente definir lo que son los lineamientos. Los lineamientos se pueden definir como un rasgo mapeable, simple o compuesto, cuyas partes son alineadas con una relación rectilínea o fuertemente curvilínea que difiere distintivamente de los patrones de los rasgos adyacentes y que presumiblemente reflejan un fenómeno del subsuelo

(O'Leary, 1976). Estos rasgos, además, proporcionan información valiosa sobre el tipo de litología de la zona donde están presentes.

Por ello existen varios factores que favorecen la identificación de lineamientos, principalmente porque los mismos aparecen como "bordes", lineales o curvos que pueden apreciarse como límites entre dos zonas de diferente brillantez o textura. Estas alineaciones pueden indicar (Nguyen y Ho, 1988):

- El contacto entre dos unidades litológicas con propiedades espectrales diferentes.
- Cambios o anomalías en la cubierta vegetal.
- El borde de una cuenca hidrológica.
- Patrones de drenaje.

Al mismo tiempo se han definido varios criterios para la identificación de lineamientos como los que mencionan Ruíz-Armenta y Prol-Ledesma (1995), y que son los siguientes:

1. Los lineamientos pueden ser oscuros, brillantes o alineaciones sutiles de color gris en un fondo más oscuro.
2. Los lineamientos menores de 1 cm en la imagen no pueden ser mapeados.
3. Los segmentos de líneas con una separación menor a 0.5 cm se pueden unir para formar lineamientos continuos.

Sin embargo, existen otros elementos como los rasgos geomorfológicos, ejemplificados por el patrón de drenaje y que son visibles en las imágenes de satélite y en los Modelos del Terreno, que también son de utilidad en la identificación de los lineamientos. En el siguiente apartado se mencionará un ejemplo de como el análisis morfológico del patrón de drenaje se aplicó en el presente trabajo para el mapeo de lineamientos de la zona de Punta Mita.

V.3.1 Análisis Morfohidrológico

El patrón de drenaje es uno de los factores más importantes que contribuyen para la identificación de lineamientos en un área, ya que refleja muchas de las características predominantes, como la pendiente, el material y también el tipo de sistema de fracturas (Avery y Lennis, 1992). Por lo tanto el primer paso en la evaluación de los lineamientos es reconocer el sistema de drenaje de la región (Süzen y Toprak, 1998).

Es por esto que para el reconocimiento de la red de drenaje se emplearon tanto el mapa topográfico de la zona como un Modelo Digital de Elevación (MDE), el cual contiene información suficiente para definir, al menos en una primera aproximación, las propiedades de la red de drenaje superficial y, por extensión, de la cuenca hidrológica (Felicísimo, 1999).

En primer lugar se estableció como límite para el reconocimiento del drenaje hasta la porción norte de Punta Sayulita al Norte y Bucerías al Este (Fig. 13). Sobre la carta topográfica escala 1:50 000 se hizo el reconocimiento del patrón de drenaje para ilustrar tanto la extensión y localización de los materiales que tienen diferencias significativas, así como la localización de lineamientos, ya que las corrientes son generalmente controladas por el tipo de material y por zonas de debilidad litológica y estructural (Guerra, 1980). De este modo fue posible identificar cuatro tipos de drenaje:

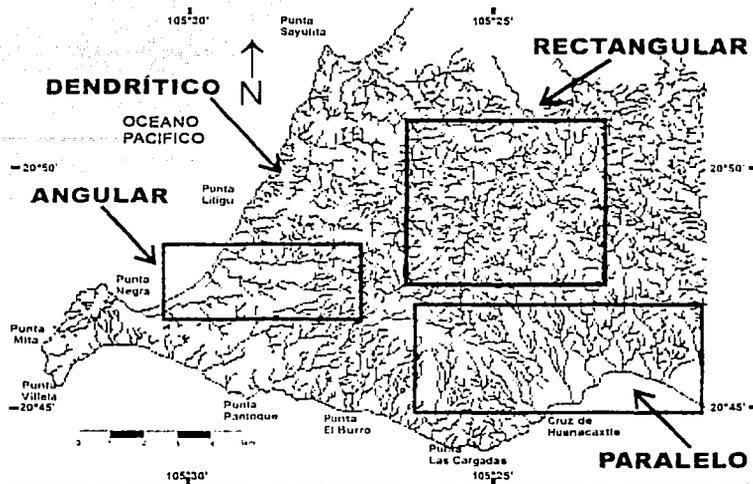


Fig. 13 Reconocimiento de patrones de drenaje en Punta Mita.

- ♦ **Rectangular:** El drenaje rectangular es una variación del dendrítico y consiste en corrientes tributarias que se unen a la corriente principal en ángulos casi rectos (Guerra, 1980). Este patrón refleja un patrón regional que consiste en sistemas de juntas o fallas y foliación, y generalmente se presenta en rocas metamórficas, como pizarras, esquistos y gneiss. Las zonas de climas húmedos y con perfiles de suelo muy delgado favorecen la presencia de este drenaje (Avery y Lennis, 1992).
- ♦ **Paralelo:** El drenaje paralelo consiste en corrientes que fluyen de modo que coinciden con la pendiente regional que generalmente tiende a ser pronunciada (Guerra, 1980). Las corrientes tributarias se unen a la principal aproximadamente en el mismo ángulo. Generalmente se presenta a lo largo de fracturas paralelas en rocas resistentes (Avery y Lennis, 1992).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- ◆ Dendritico: Es el tipo de drenaje más común y se caracteriza por que los ríos tributarios se distribuyen en todas direcciones sobre la superficie del terreno, y se unen a la dirección principal formando ángulos agudos de diferente graduación (Guerra, 1980). Precisamente al ser material resistente a la erosión, las estructuras como fallas o fracturas controlan al sistema de drenaje.

Este tipo de drenaje se ubica en rocas sedimentarias homogéneas casi horizontales principalmente, o en rocas ígneas macizas, como las graníticas. También se observa en rocas horizontales estratificadas, siempre y cuando todos los estratos ofrezcan el mismo grado de resistencia al intemperismo y a la erosión. Debido a esta cualidad puede presentarse esta configuración en rocas metamórficas cristalinas, ya que el metamorfismo intenso borra las diferencias de resistencia de los distintos sedimentos (Guerra, 1980).

- ◆ Angular: que al igual que la configuración rectangular refleja la influencia sobre el drenaje de los sistemas de fracturas o diaclasas en las rocas (Guerra, 1980).

El paso siguiente fue inferir y mapear lineamientos a partir del patrón de drenaje sobre un acetato, para ilustrar las principales características topográficas y morfológicas, y también para enfatizar el impacto del sistema de fallas en la geometría del área (Süzen y Toprak, 1998) (Fig. 14). Los lineamientos identificados fueron contados (frecuencia) y segmentados para medir su longitud y para compararlos posteriormente con el mapa geológico, el modelo digital de elevación y las imágenes de satélite.

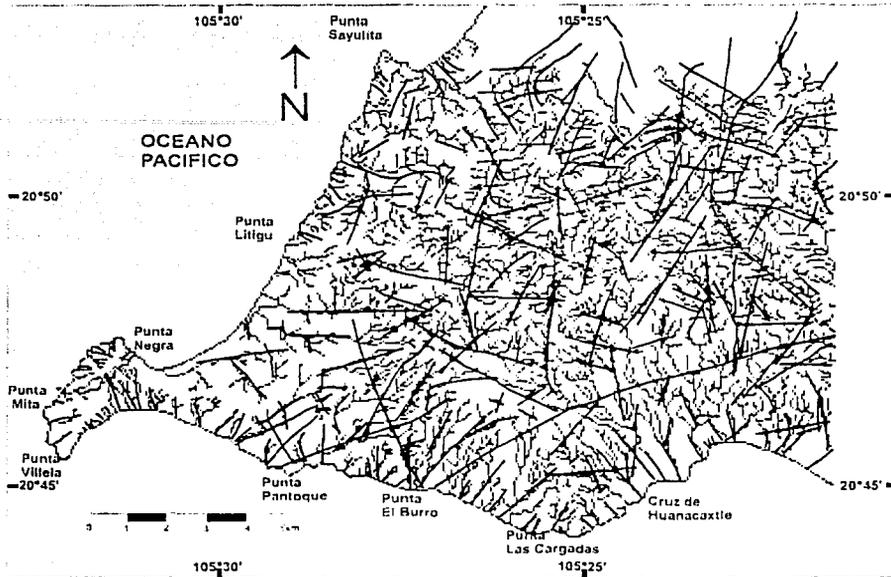


Fig. 14 Identificación de lineamientos a partir del patrón de drenaje.

Con el análisis morfohidrológico se identificaron 112 lineamientos. Los resultados fueron utilizados para elaborar un primer diagrama de rosa de fracturas. De los lineamientos identificados en el mapa geológico también se obtuvo un diagrama de rosa en el que se encontraron un total de 74 lineamientos, y que se utilizó para compararlo con los diagramas obtenidos del análisis morfológico y el realce espacial aplicado al Modelo Digital de Elevación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

V.3.2 Diagramas de rosa

La mayoría de las veces, los estudios geomorfológicos, geológicos o geofísicos que involucran la identificación de lineamientos conllevan la utilización de herramientas que proporcionen más información de los mismos. Este es el caso de los *diagramas de rosa* o *diagramas de roseta*, en donde quedan representados los valores direccionales de los lineamientos.

La roseta convencional consiste de un plano horizontal que representa longitudes limitado por un semicírculo; un histograma radial con segmentos de arco en lugar de barras indicando la densidad de los planos de intersección con el plano horizontal. Los límites de cada segmento de arco corresponden al total de objetos (generalmente lineamientos) representados por el segmento. En otras palabras, el diagrama de rosa es un histograma radial de densidad o frecuencia de orientaciones.

Para elaborar los diagramas cada lineamiento se mide tomando en consideración la escala que se utiliza; se segmenta cada lineamiento considerando que no todos son totalmente rectilíneos y que sus inflexiones pueden representar varias orientaciones, y posteriormente se anotan la longitud y la orientación del segmento o los segmentos. La orientación queda determinada en intervalos de cinco, diez o veinte grados dependiendo de la exactitud que se requiera. La suma total de las longitudes de los lineamientos se marca en el diagrama semicircular como segmentos de arco de acuerdo a su orientación.

En este trabajo se utilizaron los diagramas de rosa para conocer la orientación preferencial de los lineamientos que fueron identificados tanto con el análisis morfohidrológico que se hizo con base en el reconocimiento del patrón de drenaje como con las técnicas de

realce espacial aplicadas al Modelo Digital de Elevación así como la que se obtuvo del mapa geológico de INEGI.

V.4 Aplicación del Realce Espacial

La aplicación de técnicas de Realce espacial tuvo como objetivo la identificación y el mapeo de lineamientos. En este caso se siguieron los criterios que mencionan Ruíz-Armenta y Prol-Ledesma (1995) para la identificación de los mismos y que fueron mencionados en párrafos anteriores. Estos rasgos geomorfológicos se buscaron para comparar posteriormente los resultados obtenidos tanto en el análisis morfológico como en el realce espacial mismo.

En una primera etapa el realce espacial consistió en el Análisis de Componentes Principales de las imágenes TM y la posterior aplicación de varios filtros direccionales a la imagen de la Componente Principal 1 y al MDE para enfatizar bordes o lineamientos que nos indicaron la presencia de fracturas o fallas, y para conocer si existe algún patrón en la disposición de dichos lineamientos. Se eligió la imagen CP1 por contener la mayor cantidad de información relacionada con la topografía. Sin embargo, con la imagen de la CP1 no se obtuvo mucho énfasis en los lineamientos lo que hizo difícil la identificación de los rasgos lineales, por lo que el MDE fue más adecuado para hacer el realce de bordes (Fig. 15). Debido a esto las imágenes de satélite se utilizaron sólo para el mapeo de unidades litológicas identificadas en campo.

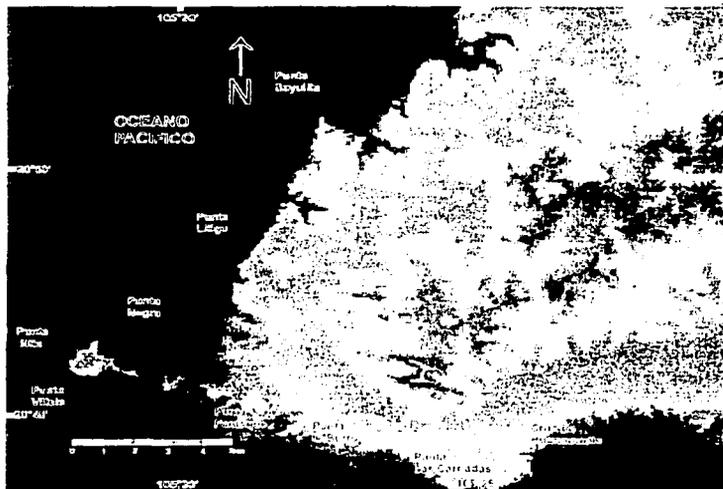


Fig. 15 Modelo Digital de Elevación de Punta Mita, Nayarit.

En este caso se aplicaron los filtros direccionales de Prewitt, los cuales se sumaron de manera que se obtuvieron el mayor número de lineamientos en todas las direcciones; los filtros de Prewitt son de los más útiles para detectar lineamientos que pueden representar fracturas o bordes como se mencionó en el capítulo cuatro. Dichos bordes o lineamientos fueron digitalizados manualmente sobre el MDE (Fig. 16). Con esto fue posible contabilizar un total de 152 lineamientos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

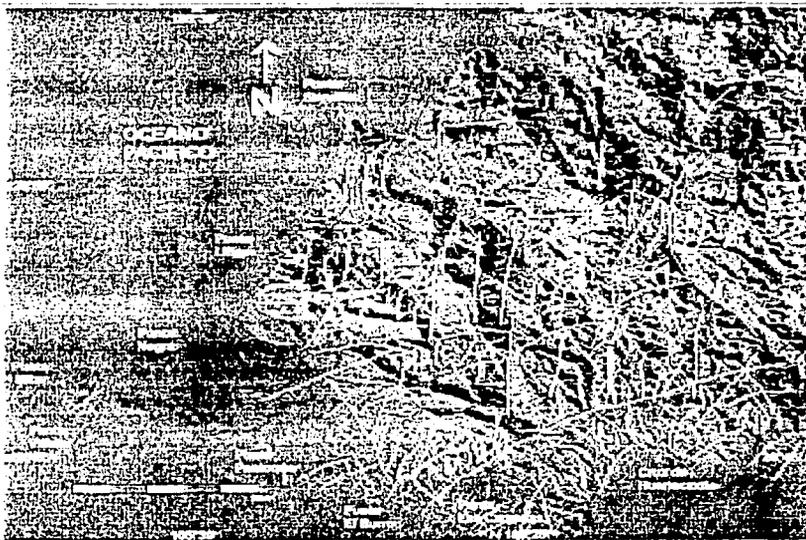


Fig. 16 Lineamientos identificados con la suma de filtros direccionales.

Lo siguiente fue elaborar el diagrama de fracturas para determinar la longitud y orientación preferencial de los lineamientos, así como los esfuerzos que ocurren en la zona.

V.5 Aplicación del Realce Espectral

El realce espectral permitió identificar mediante el Análisis Selectivo de Componentes Principales (ASCP) (Chávez, 1989) y composiciones en falso color las unidades de roca que se encontraron en el trabajo de campo para producir un mapa geológico que mostrara así la relación entre los lineamientos y la litología.

Se utilizó un recorte de las 6 bandas no térmicas de la imagen Landsat TM-5 (868 Columnas, 668 Renglones) del 23 de febrero de 1999. La fecha de toma de la imagen facilitó la identificación litológica por ser la temporada de menor humedad y por lo tanto se contó con una menor cubierta vegetal.

El Análisis Selectivo de Componentes Principales fue útil para realzar y mapear las diferencias espectrales en las imágenes. Sobre las imágenes Landsat TM se aplicaron los dos métodos que incluye esta técnica y que se mencionaron en el capítulo cuatro. De la aplicación del primer método se obtuvo una composición en color elaborada con las primeras Componentes Principales de los subgrupos de bandas TM 1, 2 y 3 y TM 5 y 7, así como con la banda TM4 (Fig. 17).



Fig. 17 Composición en color resultado de la aplicación del primer método del ASCP.

Para la elección de los pares de bandas que sirvieron para el segundo método del ASCP se examinaron las matrices de correlación de cada banda, siendo los pares TM2-TM7; TM4-TM7 y TM2-TM4 los seleccionados para aplicar este método.

Así mismo, para interpretar los resultados que se obtuvieron en las matrices de correlación de cada par de bandas, se analizó la información recopilada en campo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El muestreo en campo se limitó a un área de 158 km² desde el pueblo Cruz de Huanacastle hasta Punta Mita en la parte más occidental del norte de la Bahía de Banderas, y hacia el noreste de Punta Mita, hasta Cerro Pátzcuaro.

En la zona de muestreo se mapearon unidades litológicas que fueron identificadas como:

1. Cuerpo intrusivo de granodiorita con zonas ricas en biotita y óxidos de hierro, se localiza en la porción de Cruz de Huanacastle hasta Punta las Cargadas y San Ignacio.
2. Roca metamórfica que abarca la mayor parte de la zona muestreada, desde Punta las Cargadas hasta Punta el Burro en la línea de costa, y hacia el norte hasta el contacto con calizas.
3. Arenisca, a partir del contacto con la roca metamórfica; conglomerado y arenisca en Punta de Mita intercalado con basaltos en el área de Punta Negra.
4. Basaltos en Punta Negra y hacia el interior, derrames de lava y flujos piroclásticos alternados con areniscas; presencia de diques a lo largo de la costa norte de Bahía de Banderas.
5. Caliza recristalizada (mármol) en Cerro la Calera y Cerro Pátzcuaro.
6. Depósitos aluviales en la línea de costa.

Esta información recopilada en campo fue entonces mapeada y confrontada con los datos obtenidos a partir del ASCP aplicado a las imágenes de satélite.

Posteriormente, considerando los diferentes tipos de materiales detectados mediante el ASCP, se hizo evidente que las diferencias espectrales más significativas ocurren en el infrarrojo cercano, el infrarrojo medio y en menor grado en el visible. Por lo que para enfatizar las anomalías espectrales más fuertes se elaboraron composiciones en falso color donde se combinan las bandas TM4, 5 y 7 con los canales del visible.

La selección de las bandas que se utilizaron para elaborar las composiciones en color se basó en las 20 posibles combinaciones de tres bandas reportadas por Zumsprekel y Prinz (2000) (Tabla 3) y en las cuales se considera el Factor de Índice Óptimo (OIF) desarrollado por Chávez et. al. (1982), y que es útil para evaluar el contenido de información de datos correlacionados y el contraste espectral de los Números Digitales de las imágenes (Zumsprekel y Prinz, 2000).

Rank	TM combination (RGB)	OIF
1	751	22.37
2	541	18.75
3	531	18.14
4	752	17.58
5	753	17.45
6	754	17.37
7	741	15.52
8	543	15.35
9	731	15.18
10	542	14.83
11	532	14.58
12	521	14.04
13	743	13.73
14	742	12.23
15	431	12.04
16	732	12.02
17	721	11.28
18	432	9.68
19	421	8.69
20	321	8.50

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3 Combinación entre bandas basada en el OIF desarrollado por Chávez (1982).

VI. RESULTADOS.

VI.1 Resultado del Análisis Morfohidrológico

De la aplicación del análisis morfohidrológico se obtuvieron resultados positivos, ya que el patrón de drenaje fue un valioso indicador del tipo de material litológico de la zona así como de rasgos que no figuran en el mapa geológico e incluso que son difíciles de percibir en las imágenes de satélite o el Modelo Digital de Elevación.

De este modo se identificaron, como ya se mencionó, cuatro tipos de drenaje:

Rectangular y Paralelo: Ambos tipos de drenaje predominan en buena parte de la zona estudiada, coincidiendo con una considerable unidad metamórfica y otra identificada como un cuerpo intrusivo de granodiorita, desde la carretera hacia Bucerías hasta Punta el Burro sobre la costa, y al norte hasta el contacto con Cerro Pátzcuaro.

Dendrítico: Es el patrón de drenaje que predominó en la mayor parte de Punta Mita, indicando la presencia de rocas de composición homogénea y resistente.

Angular: Se localizó entre el poblado de Higuera Blanca y Punta Negra, coincidiendo con importantes unidades de basalto.

Los lineamientos inferidos y mapeados a partir del análisis morfohidrológico fueron 112, los cuales al ser representados mediante un diagrama de rosa mostraron orientaciones preferenciales entre los $N80^{\circ}$ y $90^{\circ}E$ y los $N40^{\circ}$ y $50^{\circ}W$ (Fig. 18). Así mismo los 74 lineamientos identificados en el mapa geológico de INEGI presentaron orientaciones de $N50^{\circ}$ - $60^{\circ}E$ y $N20^{\circ}$ - $30^{\circ}E$, mostrando así poca coincidencia con aquellos encontrados con el análisis morfohidrológico (Fig. 19).

Esta información se confrontó con el realce espacial y espectral para obtener el mapa de la figura 27.

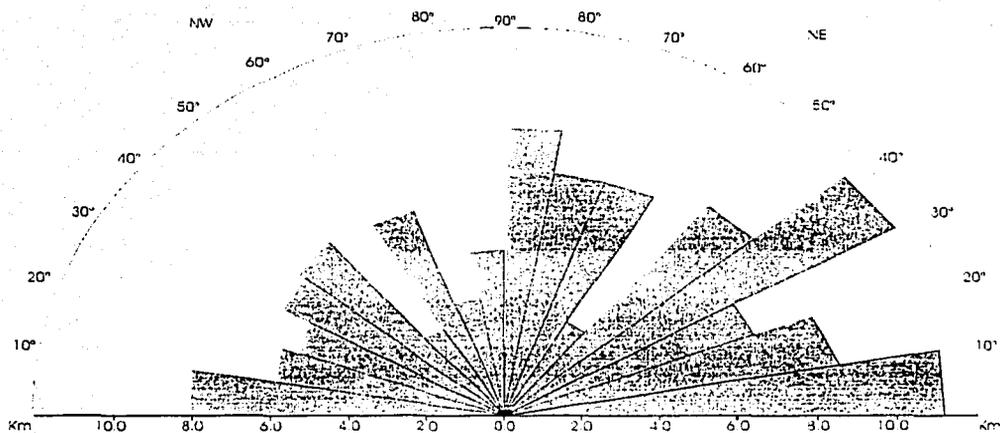


Fig. 18 Diagrama de Rosa obtenido a partir de los lineamientos identificados en el Análisis Morfohidrológico. Se contabilizaron 112 lineamientos con direcciones preferenciales entre los $N40^{\circ}$ y $50^{\circ}E$; $N 0^{\circ}-10^{\circ}E$ y $NS0^{\circ}-90^{\circ}E$.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

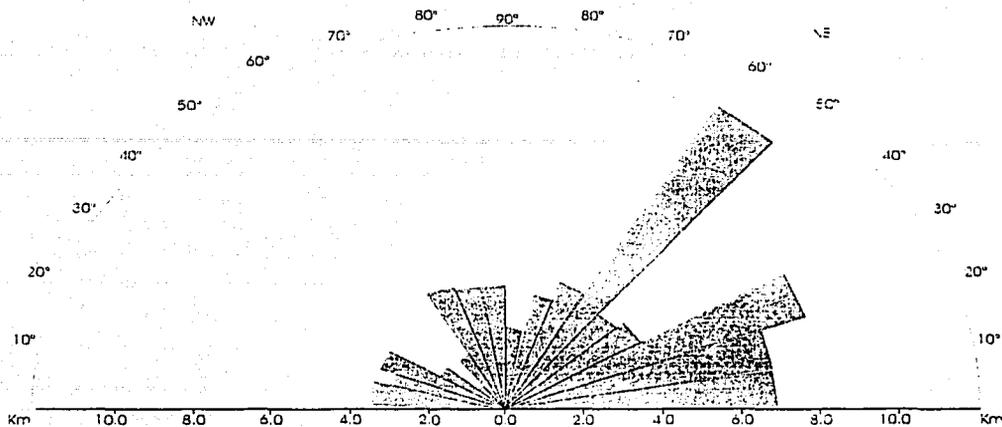


Fig. 19 Diagrama de rosa obtenido a partir de los lineamientos reportados en el mapa geológico de INEGI. Se identificaron 74 lineamientos con orientaciones preferenciales de $N50^{\circ}-60^{\circ}E$ y $N20^{\circ}-30^{\circ}E$.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VI.2 Resultado del Realce Espacial

La aplicación de técnicas de Realce espacial fue de utilidad y mostró mayor efectividad en la identificación de un mayor número de lineamientos, en total se identificaron 152 lineamientos, es decir un 26.3% más en comparación con el análisis morfohidrológico en el que se identificaron 112.

Por otro lado, el diagrama de rosa (Fig. 20) mostró que algunas de las máximas concentraciones se encuentran entre los $N80^{\circ}$ y $90^{\circ}E$ y entre los $N40^{\circ}-50^{\circ}E$. Esto coincide con los lineamientos obtenidos a partir del patrón de drenaje. El mapa geológico (INEGI, 1989)

presenta poca coincidencia con ambos. Al mismo tiempo la suma de los filtros de Prewitt con sus diferentes componentes direccionales permitieron la identificación de concentraciones de lineamientos en otras direcciones como las encontradas entre los $N40^{\circ}$ y $60^{\circ}W$.

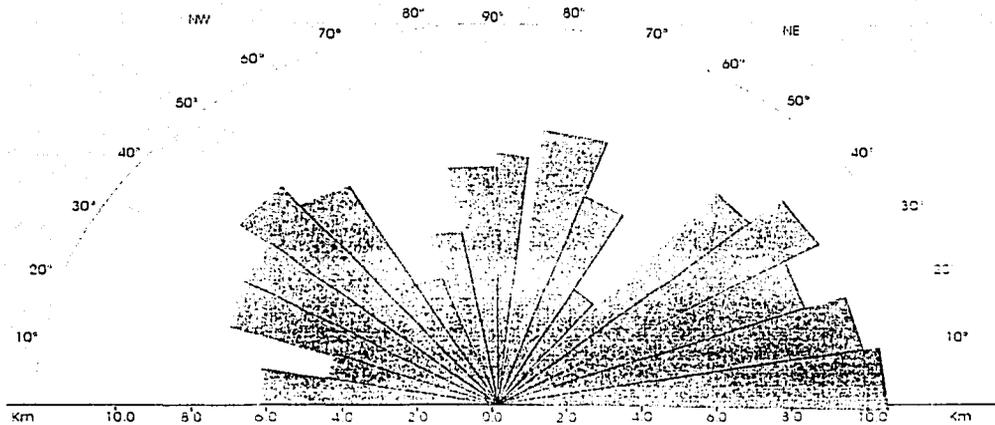


Fig. 20 Diagrama de Rosa obtenido a partir de los lineamientos identificados con las técnicas de realce espacial aplicadas al Modelo Digital de Elevación. Se identificaron 152 lineamientos con direcciones preferenciales entre los $N 0^{\circ}$ - $10^{\circ}E$; $N40^{\circ}$ - $50^{\circ}E$; $N70^{\circ}$ - $80^{\circ}E$ y los $N40^{\circ}$ - $60^{\circ}W$.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VI.3 Resultado del Realce Espectral

Con el Realce Espectral específicamente con los dos métodos del Análisis Selectivo de Componentes Principales (ASCP) (Chávez, 1989) se realizaron y mapearon diferencias espectrales con los que se identificaron unidades litológicas que se confrontaron con lo visto en campo.

Como se mencionó en el capítulo anterior, de la aplicación del primer método del ASCP se obtuvo una composición en color que sin embargo, no aportó información que facilitara la identificación de las unidades litológicas vistas en campo.

En cuanto al segundo método del ASCP se analizaron las matrices de correlación de cada banda, siendo los pares de imágenes TM2-TM7 y TM4-TM7 medianamente correlacionados (0.783 y 0.785 respectivamente) mientras que el par TM2-TM4 presentó el menor coeficiente de correlación (0.581) esto es importante ya que de acuerdo con este método, entre menor sea la correlación entre bandas mayor cantidad de información espectral es realizada (Tablas 4 a), 4 b) y 4 c)).

Fue a partir de estas imágenes que se hizo la diferenciación litológica que posteriormente se confrontó con la información recopilada en campo y que se muestra en el mapa de la figura 21.

Var/Covar	Mita2	Mita7
Mita2	318.94	433.02
Mita7	433.02	959.66
Matriz Corr.	Mita 2	Mita7
Mita2	1.000000	0.782696
Mita7	0.782696	1.000000
Componente	C1	C2
% Var.	92.13	7.87
Eigenval.	1177.95	100.66
eigenvec.1	0.450135	0.892960
eigenvec. 2	0.892960	-0.450135
Loading	C1	C2
Mita2	0.865070	0.501651
Mita7	0.989317	-0.145783

Tabla 4 a) Matriz de correlación del par de bandas 2 y 7 medianamente correlacionado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Var/Covar	Mita4	Mita7
Mita4	939.49	745.34
Mita7	745.34	959.66
Matriz Corr.	Mita4	Mita7
Mita4	1.00000	0.784959
Mita7	0.784959	1.000000
Componente	C1	C2
% Var.	89.25	10.75
Eigenval.	1694.98	204.17
eigenvec.1	0.702306	0.711875
eigenvec. 2	0.711875	-0.702306
Loading	C1	C2
Mita4	0.943328	0.331861
Mita7	0.946078	-0.323940

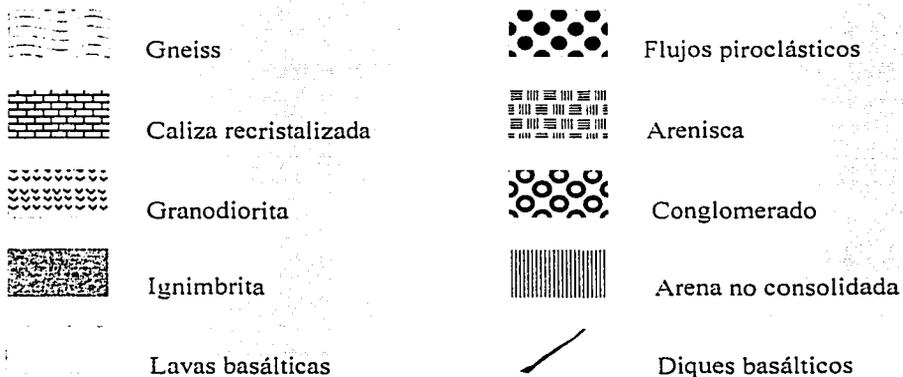
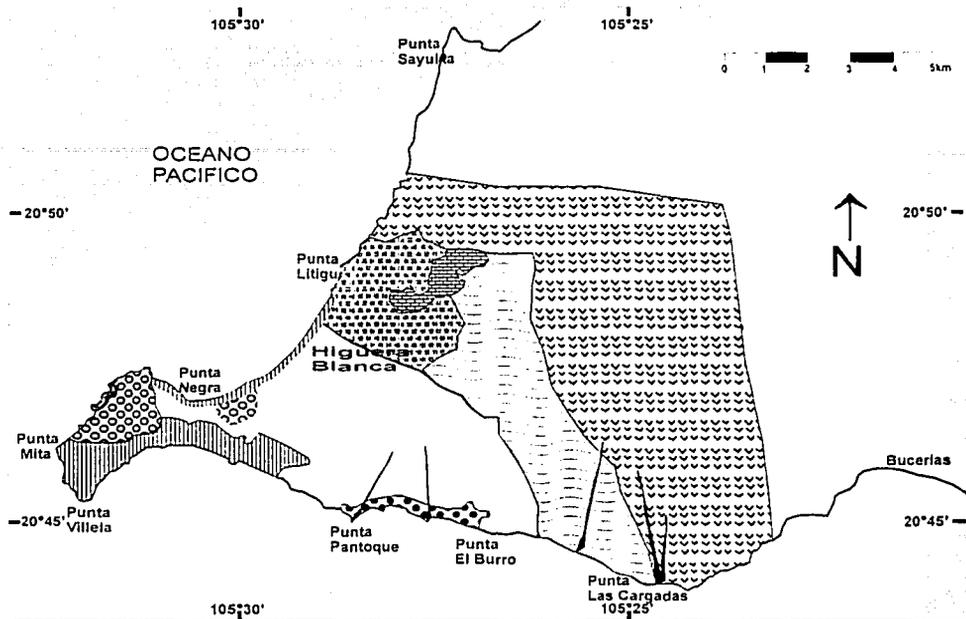
Tabla 4 b) Matriz de correlación del par de bandas 4 y 7 medianamente correlacionado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Var/Covar	Mita2	Mita4
Mita2	318.94	317.92
Mita4	317.92	939.49
Matriz Corr.	Mita2	Mita4
Mita2	1.000000	0.580787
Mita4	0.580787	1.000000
Componente	C1	C2
% Var.	85.30	14.70
Eigenval.	1073.45	184.98
eigenvec.1	0.388298	0.921534
eigenvec. 2	0.921534	-0.388298
Loading	C1	C2
Mita2	0.712363	0.701812
Mita4	0.985045	-0.172299

Tabla 4 c) Matriz de correlación par de bandas 2 y 4 que está poco correlacionado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 21 Mapa Geológico de Punta Mita elaborado durante el trabajo de campo

Las matrices de correlación aportaron gran cantidad de información para cada par de imágenes al momento de hacer la diferenciación litológica; esta información se identifica visualmente como variaciones de brillantez en los tonos de gris de los píxeles de las componentes resultantes.

Así, del ASCP aplicado al par TM2-TM7 se observa un mayor porcentaje de varianza en la CP1 por el aporte de información de la banda TM7, mientras que la CP2 presenta el mayor aporte de la banda TM2 (Tabla 4 a)) (Fig. 22).

En la CP2 se aprecian zonas oscuras que en este caso corresponden a basaltos con alteración por óxidos de hierro en la porción de Punta Negra, y una zona de píxeles aún más oscuros en la parte correspondiente a depósito aluvial en la parte central de Punta de Mita hasta Punta Villela. En Cerro Calera y Cerro Pátzcuaro se identifican también algunos píxeles oscuros, esta zona corresponde en campo a calizas. Este par no proporcionó mucha información sobre la roca metamórfica en comparación con los siguientes pares. Una pequeña parte dentro de lo identificado como depósito aluvial, aparece en píxeles aún más oscuros correspondiendo a conglomerados de arenisca, lutita y limonita, coincidiendo con lo visto en campo.

Component 2

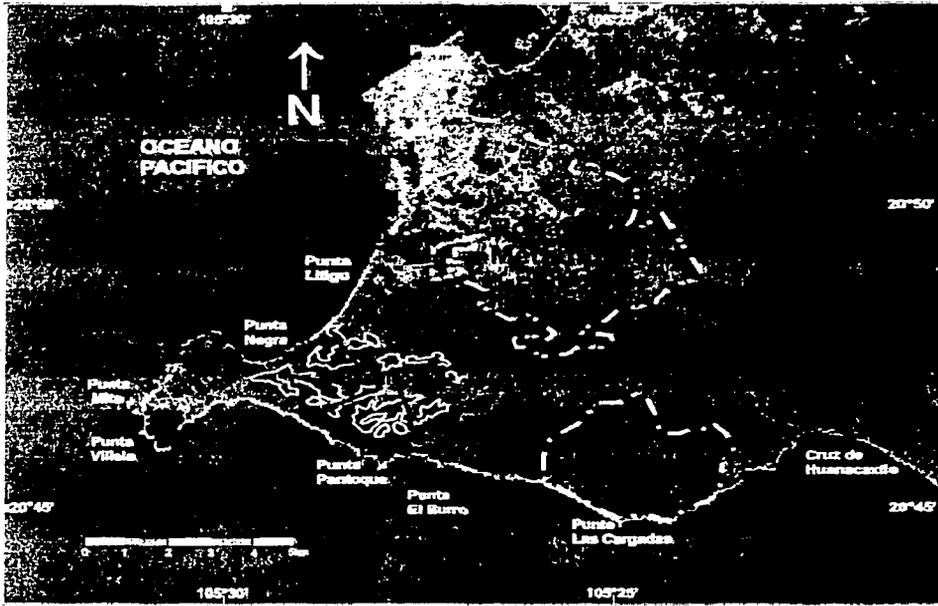


Fig. 22 Componente Principal 2, resultado del ASCP del par TM 2-7.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el par TM4-TM7 (Fig. 23) la Componente Principal 1 recibe un porcentaje de varianza elevado de la banda TM7 (Tabla 4 b) por lo que la separación entre areniscas y basaltos se facilita. En la CP2 el mayor aporte lo hace la banda TM4, por lo que es posible identificar ignimbrita de composición riolítica en tonos grises más claros que el resto de la zona que lo rodea, la cual corresponde a basaltos según lo visto en campo en la línea de costa noroccidental de Punta Mita. Igualmente se identifican algunos derrames de lava.

Por otro lado, el intrusivo se identifica fácilmente con píxeles de tonos grises más oscuros que la roca metamórfica con la que hace contacto. Así mismo, la roca metamórfica

muestra un mayor contraste con la porción formada por calizas, las cuales se presentan en píxeles más claros y brillantes.

Component 2

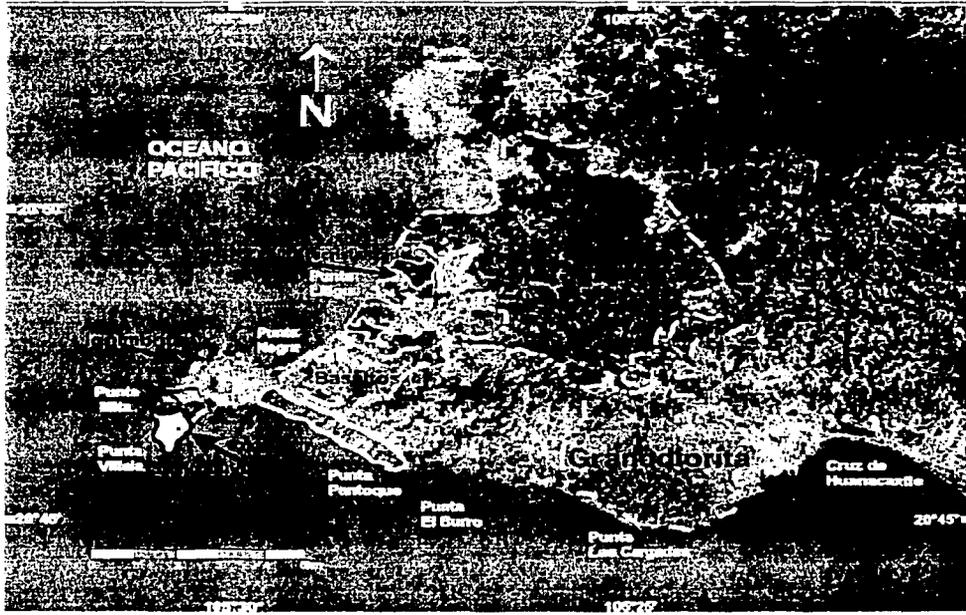


Fig. 23 Componente Principal 2. resultado del ASCP del par TM 4-7.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El par TM2-TM4 (Fig. 24) tiene un buen contraste espectral (Tabla 4 c)), lo que facilita la identificación de áreas de vegetación en tonos oscuros en la CP2, y debido a su respuesta en la banda TM4; el agua se presenta en tonos un poco más claros que la vegetación en la misma componente.

En la porción de Punta el Burro hasta Punta Pantoque, píxeles oscuros coinciden con flujos piroclásticos vistos en campo. En la imagen se distingue un contraste entre estos píxeles

y otros más claros, lo que indica un contacto con lo que en campo se identificó como una secuencia de coladas o derrames constituidos por rocas de composición básica intercaladas con areniscas, desde Punta Pantoque hasta el poblado Punta de Mita. Con este par son claramente visibles el contacto entre la arenisca y caliza recristalizada (gris claro) al SW de Cerro la Calera y Cerro Pátzcuaro, y el contacto entre la roca metamórfica y el cuerpo intrusivo de granodiorita.

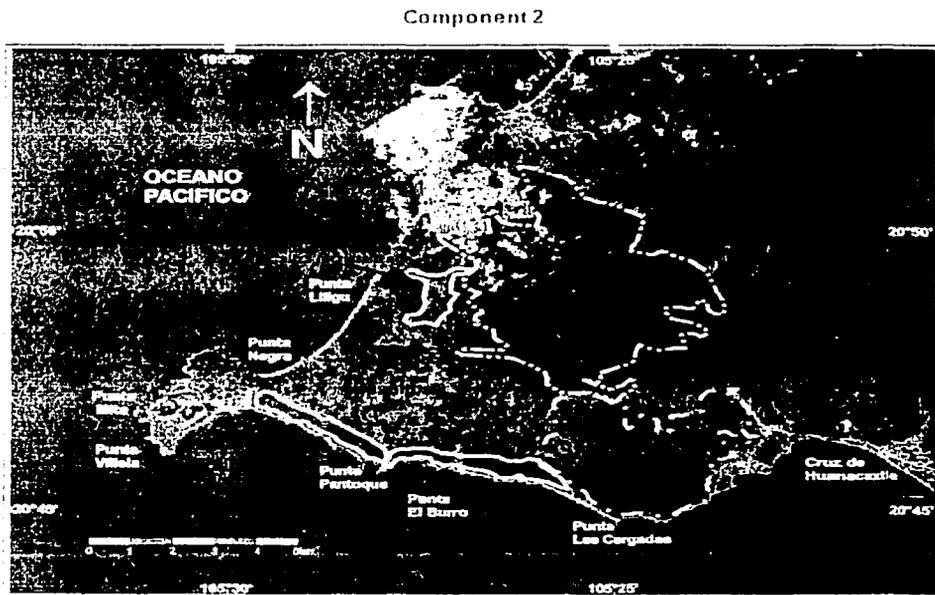


Fig. 24 Componente Principal 2, resultado del ASCP del par TM 2-4.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En cuanto a las composiciones en color basadas en el Factor de Índice Óptimo (OIF) (Chávez et. al., 1982) y que se mencionan en el capítulo cinco, se hizo un análisis de las 20 posibles combinaciones de bandas que ahí se consideran y se encontró que las combinaciones

muestran distintos contenidos de información multiespectral, y es notorio que la combinación TM 751 (RGB) presenta el OIF más elevado, sin embargo en el caso de este estudio la combinación que mostró la mayor cantidad de información es la TM 541 (RGB) (Tabla 4). Sin embargo, al visualizar la imagen resulta un tanto difícil identificar unidades litológicas, en comparación con los resultados del ASCP que facilitaron la interpretación de las imágenes.

La composición en falso color resultante de la combinación TM 541-RGB (Fig. 25), muestra unidades de rocas basálticas y depósitos aluviales recientes correspondiendo con lo visto en campo, en tonos verdes y marrón. En tonos violáceos, aparecen lo que se identificó en las imágenes de las Componentes Principales como basaltos. los tonos violáceos en esta composición a color se debe quizá al enriquecimiento de óxido de hierro por intemperismo (Zumsprekel y Prinz, 2000).

La vegetación aparece en tonos de verde, así como los flujos piroclásticos que presentan tonos de verde más oscuros. Las intrusiones graníticas cubiertas por depósitos aluviales recientes identificadas en la CP2 del ASCP del par TM2-4, aparecen como píxeles blancos y amarillo brillante. La zona de caliza recristalizada aparece en tonos marrones más brillantes.



Fig. 25 Composición en falso color resultante de la combinación TM1 541-RGB.

El resultado final de la aplicación del análisis morfohidrológico, la aplicación de técnicas de realce digital, tanto espectral como espacial y el trabajo de campo son los mapas de las figuras 26 y 27. En el primero se muestran las unidades de roca que se identificaron con las imágenes Landsat Thematic Mapper después de la aplicación del realce espectral, y el segundo presenta tanto las unidades litológicas como los lineamientos encontrados mediante el análisis morfohidrológico y realce espectral del Modelo Digital de Elevación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

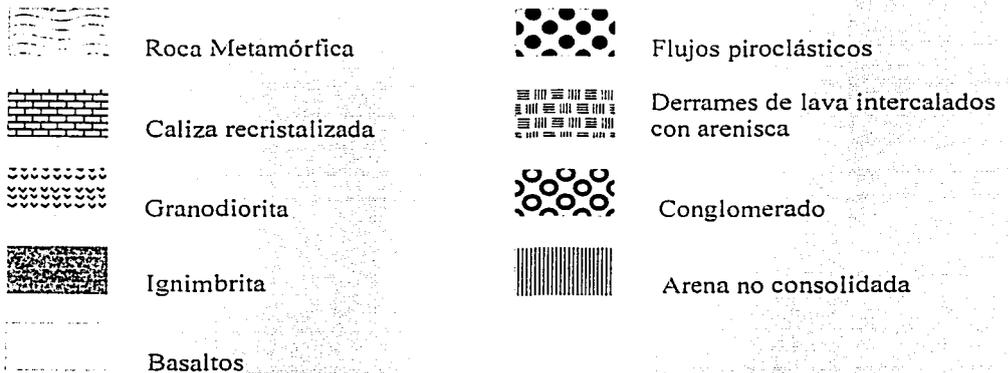
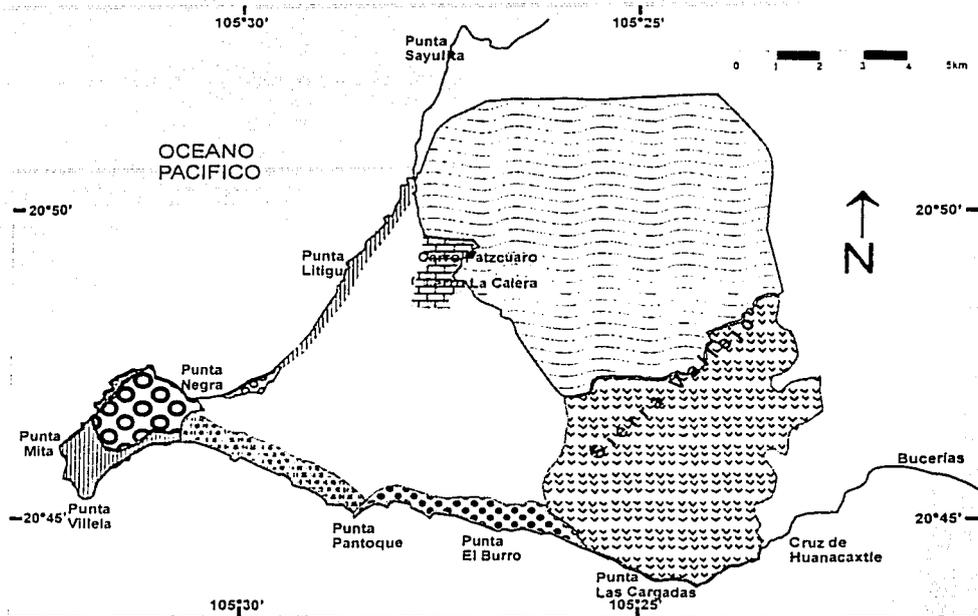


Fig. 26 Mapa resultado de la aplicación de técnicas de realce espectral en imágenes Landsat TM; técnicas de realce espacial aplicadas al MDE, análisis morfológico y trabajo de campo.

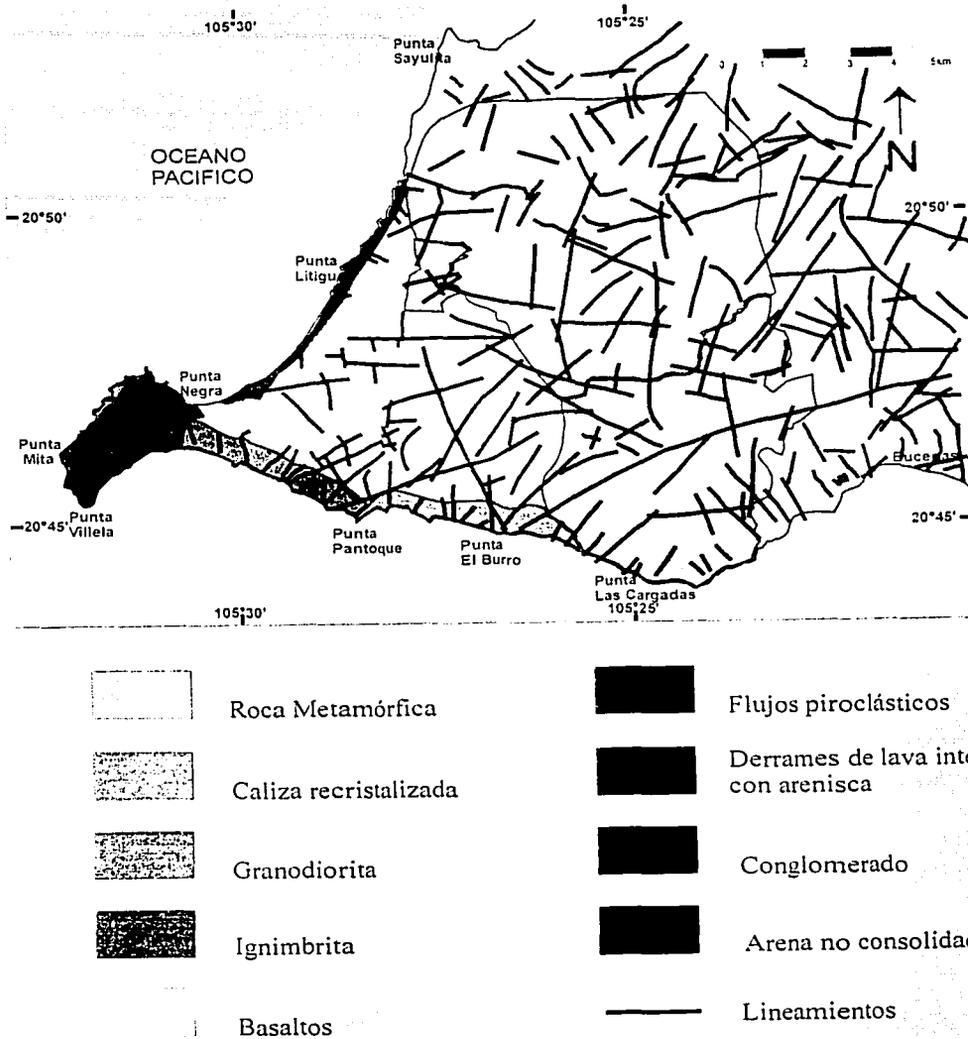


Fig. 27 Mapa resultado de la aplicación de técnicas de realce espectral y realce espacial en imágenes Landsat TM, análisis morfológico y trabajo de campo. Se muestran las unidades litológicas y lineamientos identificados.

CONCLUSIONES

Con el mapa que se presenta en el capítulo de resultados (Fig. 26), se ilustra la utilidad del uso conjunto de Modelos Digitales de Elevación e Imágenes de satélite como herramientas complementarias al trabajo de campo para la identificación y el mapeo tanto de unidades litológicas como de estructuras geológicas, en este caso, lineamientos que puedan estar relacionados con fracturas o fallas.

Cada una de las técnicas aplicadas aportaron información que fue integrada en dicho mapa. Ejemplo de esto es el Análisis Morfológico a partir del cual se identificaron cuatro tipos de drenaje cuyas características sugirieron el tipo de material predominante así como evidenciaron zonas de debilidad que tienen su expresión en el terreno en forma de lineamientos. Dichos rasgos no figuran en el mapa geológico ya existente de la zona, e incluso son difíciles de percibir en las imágenes de satélite o el Modelo Digital de Elevación.

Así mismo se utilizaron los dos métodos que presenta el Análisis Selectivo de Componentes Principales. Sin embargo, el más útil fue el segundo método, el de selección de pares de bandas medianamente y poco correlacionados, el cual se empleó en las imágenes de satélite y con el que se encontró que el par de bandas TM 4-7 presenta mayor contraste entre los píxeles de la imagen, con lo que se hizo una delimitación un poco más detallada que con los pares TM 2-7 y TM 2-4.

Al hacer una comparación entre el mapa elaborado durante el trabajo de campo y el mapa final hecho a partir de las imágenes generadas con el Análisis Selectivo de Componentes Principales, se observan varias similitudes. Sin embargo difieren de modo significativo en la diferenciación que se hace en ambos de las zonas de roca metamórfica, el cuerpo intrusivo de granodiorita y la arenisca.

Por otro lado la composición en color que resultó de la aplicación del primer método del ASCP no aportó información espectral significativa en cuanto a la litología.

Del mismo modo, la composición en color elaborada con las bandas TM 541-RGB, y en las que se considera el Factor de Índice Óptimo ayudó en la visualización de zonas de vegetación y de solo algunas de las litologías, es decir las correspondientes a la caliza recristalizada y al deposito aluvial, sin embargo no fue muy útil en la delimitación del resto de las unidades.

Con el Realce Espacial se encontró que los filtros direccionales de Prewitt facilitan la identificación de lineamientos, y que al hacer la suma de filtros direccionales se obtuvo una imagen en la que fue posible detectar no solamente lineamientos con orientación que coincidía con lo ya reportado (dirección preferencial NE-SW), sino que se identificó un mayor número de lineamientos en todas direcciones.

Del análisis morfológico así como del realce espacial se obtuvieron diagramas de rosa, de los lineamientos de la zona, y se encontraron coincidencias entre ellos. Posteriormente se compararon con el diagrama de rosa elaborado a partir de los morfolineamientos del mapa geológico de INEGI encontrando poca coincidencia con los diagramas anteriores, debido a que comúnmente no se verifica la información de los lineamientos o fallas reportados en los mapas geológicos. Las direcciones predominantes encontradas coinciden con la reportadas anteriormente.

Es importante mencionar que ninguna de las técnicas mencionadas sustituye el trabajo de campo, el cual puede considerarse ya sea como un punto de partida en una investigación

que involucre a la Percepción Remota, o bien como un punto de comparación y verificación de resultados.

Es recomendable continuar la investigación con sensores remotos y por lo tanto aplicar otras técnicas de procesamiento y de interpretación de nuevos datos que se obtengan de la zona de Punta Mita, especialmente debido a la reciente actividad hidrotermal submarina descubierta. En estos datos se podrían incluir imágenes de satélite con mejor resolución como por ejemplo imágenes Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper), imágenes ASTER, fotografías aéreas e información de campo más detallada.

BIBLIOGRAFÍA

- Avery, T. E. y Lennis, B. G. 1992 Fundamentals of Remote Sensing and airphoto interpretation. 5th. ed. New York: MacMillan.
- Barret, E. C. y Curtis, L. F. 1999. Introduction to Environmental Remote Sensing. 4th. ed. Londres: Stanley Thorne (Publishers) Ltd.
- Bosque, S. J., Escobar, F.J., García, E., Salado, G. M. 1994. Sistemas de Información Geográfica: prácticas con PC, Arc Info e Idrisi. Madrid: Ra-Ma ediciones.
- Curran, P. J. 1985. Principles of Remote Sensing. Londres: Longman.
- Chávez, P.S. Jr. y Yaw Kwarteng, A. 1989. Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic Mapper Image Data Using Selective Principal Component Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55, 339-348.
- Chuvieco, E. 1995. Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid: RIALP ediciones.
- Drury, S. A. 1987. Image interpretation and geology. Londres: Allen y Unwin,
- Eisberg, R. M. y Lerner, L. S. 1981. Física: Fundamentos y aplicaciones. McGraw-Hill.
- Felicísimo, A. M., y García, M. P. 1990. Corrección del efecto topográfico en las imágenes Landsat mediante el uso de un Modelo Digital de Elevaciones. III Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección: 209-216. Madrid.
- Felicísimo, A. M. 1999. La utilización de los MDT en los estudios del medio físico. <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>
- Gibson, P. J. y Power, C. H. 2000. Introductory Remote Sensing: Digital Image Processing an Applications. New York: Routledge.
- Gillespie, A. R., Kahle, A. B. y Walker, R. E. 1986. Color enhancement of highly correlated images. I: Decorrelation and HIS contrast stretches. *Remote Sensing of Environment*, 20, 209-235.

Goetz, A. F. H., Rock, B.N y Rowan, L. C. 1983. Remote Sensing for exploration: an overview. *Economic Geology*, 78, 573-589.

Guerra, P. F. 1980. Fotogeología. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Hall, F. G., Strebel, D. E., y Nickeson, J. R. 1991. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, 35, 11-27.

Hunt, G. R. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42, 501-513.

Hunt, G. R. y Ashley, R. P. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, 74, 1613-1629.

Jensen, J. R. 1996. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing perspective. 2nd ed. Prentice Hall series in Geographyc information science.

Lillesand, T. M. y Kiefer, R. W. 1987. Remote Sensing and Image Interpretation. 3rd. ed. New York: Wiley.

Loughlin, W. P. 1991. Principal Component Analysis for Alteration Mapping. *Photogrammetric Engineering y Remote Sensing*, Vol. 57, No. 9, 1163-1169.

Mather, P. M. 1999. Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc.

_____. 1994. Monografía Geológico-Minera del Estado de Nayarit. México. Editada por el Consejo de Recursos Minerales.

Mustard, J. F. y Sunshine, J. M. 1999. Spectral Analysis for Earth Science: Investigations Using Remote Sensing Data. *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*, 3 ed.. Vol 3, edited by Andrew N. Rencz. New York: John Wiley & Sons, Inc.

- Nguyen, P. T. y Ho, D. 1988. Multiple source data processing in remote sensing Digital Image Processing in Remote Sensing. Tylor & Francis, London & Philadelphia, pp.153-176.
- Núñez, C. F.; Prol, L. R.; Cupul, M. A. y Suárez, P. C. 2000. Near shore submarine activity en Bahía Banderas western Mexico. *Geofísica Internacional*, 39, No. 2, 171-178.
- O'Leary, D. W. 1979. Lineament, linear, lineation; some proposed new standars for old terms. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 87, No. 10, 1463-1469.
- Orozco, M. G. 1995. Mapeo geológico y de alteración hidrotermal, utilizando imágenes de satélite en el Campo geotérmico de La Primavera, Jalisco, México. Tesis para obtener el título de Ingeniero Geólogo, México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Ramírez, M. T. 2000. Holocene coastal uplift along Punta de Mita, the Pacific margin of southwest Mexico. Conferencia organizada por el Department of Geography & Earth Sciences, Brunel University. Agosto 29-Septiembre 2 de 2002.
- Rowan, L. C.; Goetz, A. F. H. and Ashley, R. P. 1977. Discrimination of hydrothermal altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images. *Geophysics*, 42, No. 3, 522-535.
- Ruiz, A. J. R y Prol, L. R. M. 1995. Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal. *Física de la Tierra*, 7, 105-137.
- Sabine, C.1999. Remote Sensing Strategies for Mineral Exploration. *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*, 3 ed., Vol 3, edited by Andrew N. Rencz. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Sabins, F. J. 1997. Remote Sensing: Principles and Interpetation. 3rd. ed. San Francisco: W. H. Freeman.
- Sears, F. W. y Zemansky, M. W. 1980. Física General. Aguilar.
- Showengerdt, R. A. 1983. Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing. Londres: Academic Press.
- _____.1984. Síntesis Geográfica de Nayarit. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.

Süzen, M. L. y Toprak, V. 1998. Filtering of satellite images in geological lineament analyses: an application to a fault zone in Central Turkey. *International Journal of Remote Sensing*, 19, No. 6. 1101-1114.

Verbyla, D. L. 1995. *Satellite Remote Sensing of Natural Resources*. CRC Press, Inc. Florida: Lewis Publishers.

Wester, K. y Lundén, B. 1996. Digital Elevation Data, Landsat TM and Magnetic Data for Visualization of Geomorphological and Geological Features. *American Society for Testing and Materials*, 29-37.

Zumsprekel, H. y Prinz, T. 2000. Computer-enhanced multispectral remote sensing data: a useful tool for the geological mapping of Archean terrains in (semi)arid environments. *Computers & Geosciences*, 26, 87-100.



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLECCION DE GEOGRAFIA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN