

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLOGICAS**  
**POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA**



**APLICACION DE SENSORES REMOTOS (Landsat MSS)  
PARA EL RECONOCIMIENTO DE UNIDADES GEOMORFICAS  
EN LA REGION DELTAICA DEL RIO COLORADO.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA:**

**JORGE TORRES RODRIGUEZ**

**Ensenada, B. C.**

**Diciembre de 1994.**

**APLICACION DE SENSORES REMOTOS (Landsat MSS)  
PARA EL RECONOCIMIENTO DE UNIDADES GEOMORFICAS  
EN LA REGION DELTAICA DEL RIO COLORADO.**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

JORGE TORRES RODRIGUEZ

APROBADA POR:



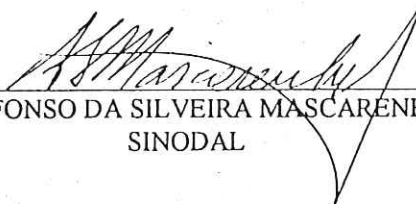
DR. JOSE D. CARRIQUIRY BELTRAN  
DIRECTOR DE TESIS



M.C. FRANCISCO SUAREZ VIDAL  
SINODAL



DRA. PILAR RUIZ AZUARA  
SINODAL



DR. AFFONSO DA SILVEIRA MASCARENHAS  
SINODAL

Ensenada, B.C., a 28 de noviembre de 1994.

*Dedico esta tesis con todo mi cariño*

*A mi esposa, Yolanda*

*y a mis hijos:*

*Jorge, Elvira y Andrea.*

## PREFACIO.

Aunque la temática central de este estudio se ubica en el campo de la Geología Marina, debido a que se trata de un tema de tesis en Oceanografía Costera. Es evidente que el trabajo se apoya fuertemente en conceptos tomados de otras disciplinas como la Ingeniería en Electrónica y las Ciencias Computacionales. Las cuales han servido de base, al proporcionar invaluable herramientas para el procesamiento de la información y el análisis de resultados.

Lo anterior ha venido como consecuencia de la experiencia lograda durante mi carrera profesional y a la oportunidad de haberme desarrollado en la intersección de dos diferentes campos formativos. Por una parte, la formación científica adquirida como oceanólogo, a través de estudios de licenciatura y posgrado en la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC, me ha permitido la conceptualización y el planteamiento de un problema de índole geomorfológico, dentro de un marco interdisciplinario. Mientras que por otro lado, la experiencia de trabajo obtenida en el Depto. de Electrónica y Telecomunicaciones de la División de Física Aplicada del CICESE, ha permitido el familiarizarme con áreas tan disímiles de la oceanografía como pueden ser el procesamiento de imágenes multispectrales o las comunicaciones vía satélite.

Además de los objetivos propuestos durante el planteamiento del problema, considero haber alcanzado otro de tipo personal. Este es, el ofrecer una muestra sobre la aplicación de sensores remotos; que sirva como ejemplo ilustrativo a personas interesadas en iniciarse en este tema, y que explique (de manera sencilla) los principales procedimientos empleados en la obtención de resultados. En este sentido, la sección de apéndices al final de este documento, está ordenada en una secuencia lógica, iniciando con la manera en que el satélite adquiere los datos; para después explicar la aplicación de técnicas correctivas sobre éstos; el concepto de firma espectral en la identificación de diferentes tipos de cubierta en el terreno; y finalmente la utilización de técnicas de clasificación y transformación de imágenes para extraer la información deseada. Cada apéndice es presentado brevemente y de una manera más intuitiva que formal, remitiendo al lector a textos especializados donde los temas son tratados a mayor profundidad. Los Capítulos 1 y 2, son una introducción elemental al concepto de unidad geomorfológica, presentando la descripción del área de estudio a un nivel de detalle aceptable, de acuerdo a la escala de trabajo utilizada. Pasando posteriormente al planteamiento del problema, en función de las características morfológicas de la zona y de antecedentes basados en estudios previos de la región. Los Capítulos 3 y 4, muestran la manera en que la información es procesada, de acuerdo a las técnicas descritas en la sección de apéndices, y la forma en que los resultados son interpretados para llegar a las conclusiones expuestas en el capítulo final.

Deseo externar mi gratitud a las personas que me han apoyado en la concepción y el desarrollo de este trabajo, en especial a los miembros del comité de tesis. Al Dr. José Carriquiry Beltrán, cuyo entusiasmo y contribuciones en el área de procesos

sedimentarios permitieron dar un mayor realce a los alcances del estudio. Al M.C. Francisco Suárez Vidal, de quien escuché por primera vez (hace algunos años) los términos “procesamiento de imágenes” y “percepción remota”, motivándome a incursionar en este tema. A la Dra. Pilar Ruíz Azuara y al Dr. Afonso Da Silveira Mascarenhas, por su tiempo y sugerencias como supervisores en la parte de sensores remotos.

Agradezco al personal del Depto. de Electrónica y Telecomunicaciones del CICESE el apoyo otorgado (equipo y tiempo) para que pudiera concluir este trabajo, en especial al grupo de Telecomunicaciones y al de Procesamiento Digital de Señales. Al M.C. Alejandro Hinojosa, por su valiosa asesoría en el manejo del sistema ErMapper y en el acondicionamiento de los datos para su procesamiento, así como al Físico Carlos López Famoza, por su amable disposición al auxiliarme en problemas con el equipo periférico en el Centro de Cómputo del CICESE. Al M.C. Román Lizárraga, del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la UABC, así como al Ing. José Armando Ramos del INEGI, por haberme facilitado las imágenes Landsat de invierno y verano respectivamente. Al M.C. Amilcar Cupul por su apoyo durante el trabajo de campo. A la Sra. Maricela González León, por haber hecho legibles mis redacciones originales. Y finalmente, al CONACYT, patrocinador de este proyecto mediante una beca crédito.

A todos ellos mi más amplio reconocimiento, en la inteligencia de que cualquier error u omisión, es responsabilidad mía.

Ensenada B. C.  
Noviembre de 1994

Jorge Torres R.

*Observando el mundo real . . .  
nada es verdad, ni es mentira.  
Todo es función de la banda espectral  
y el sensor con que se mira.*

*Pito Pérez  
(paráfrasis)*

# CONTENIDO

	<i>Página</i>
Resumen.....	<i>xiii</i>
Capítulo 1- INTRODUCCION.....	1
1.1 Preliminares.....	1
1.2 Reconocimiento Geomórfico.....	2
1.3 Descripción y Antecedentes del Area de Estudio.....	4
Capítulo 2- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
2.1 Marco de Referencia.....	16
2.2 Objetivos.....	19
Capítulo 3- METODO DE ANALISIS.....	20
3.1 Descripción.....	20
3.2 Procedimientos.....	22
3.3 Materiales y Equipo.....	25
Capítulo 4- RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	26
4.1 Fotointerpretación.....	26
4.2 Clasificación No-supervisada.....	36
4.3 Análisis de Componentes Principales.....	38
4.4 Clasificación de Unidades Geomórficas.....	46
4.5 Morfología de la Zona Submareal.....	51
4.6 Síntesis Regional del Análisis Geomórfico.....	56
Capítulo 5- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
REFERENCIAS CITADAS.....	68

## CONTENIDO (continuación)

	<i>Página</i>
Apéndice A- El Barredor Multiespectral Landsat MSS.....	77
Apéndice B- Aspectos Generales de Percepción Remota.....	84
Apéndice C- Corrección de Errores.....	90
C.1- Corrección Atmosférica.....	90
C.2- Corrección Geométrica.....	95
Apéndice D- Clasificación de Imágenes.....	101
D.1- Clases Espectrales y Clases Informativas.....	101
D.2- Clasificación No-supervisada.....	103
D.3- Clasificación Supervisada.....	107
D.4- Combinación (Metodologías Híbridas).....	109
Apéndice E- Análisis de Componentes Principales.....	111
E.1- Reconocimiento de Patrones.....	111
E.2- Transformada de Karhunen-Loeve.....	112

## LISTA DE FIGURAS

	<i>Página</i>
Figura 1.1.- Localización y fisiografía del área de estudio.....	5
Figura 1.2.- Distribución superficial de los principales ambientes depositacionales .....	7
Figura 1.3.- Principales divisiones morfológicas de las planicies costeras.....	8
Figura 1.4.- Batimetría de la región noroeste del Golfo de California.....	10
Figura 1.5.- Detalle de la carta geomórfica para la región norte del Golfo de California.....	14
Figura 1.6.- Diagrama esquemático de las unidades geomorfológicas en la región deltaica del Río Colorado.....	15
Figura 3.1.- Secuencia del procesamiento y análisis de la información.....	23
Figura 4.1.- Diagrama esquemático de la zona de estudio.....	27
Figura 4.2.- Regionalización geomorfológica con base en la interpretación de la segunda componente principal.....	43
Figura 4.3.- Modelo geomorfológico de las principales unidades ambientales en la región deltaica del Río Colorado.....	57
Figura A-1.- Representación esquemática de pases diurnos según la mecánica orbital de los satélites Landsat 1,2 y 3 .....	78
Figura A-2.- Arreglo del sistema de barrido utilizado en el sensor Landsat MSS.....	80
Figura A-3.- Respuestas espectrales relativas para los canales visibles e infra-rojos del sensor Landsat MSS.....	81
Figura B-1.- Esquema generalizado de las principales interacciones de la energía electromagnética (visible) con la atmósfera.....	86
Figura B-2.- Curva de transmitancia atmosférica.....	87

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

	<i>Página</i>
Figura B-3.- Curvas características de reflectancia para los tres tipos de materiales más comunes en la superficie terrestre.....	89
Figura C-1.- Definición de puntos de control en mapa e imagen.....	98
Figura C-2.- Ejemplo que muestra el empleo de polinomios para localizar puntos de imagen dentro de un mapa.....	98
Figura D-1.- Ejemplo típico de un espacio bidimensional para las bandas 5 y 7 del sensor Landsat MSS.....	102
Figura D-2.- Representación esquemática de diferentes clases informativas, constituidas por clases espectrales.....	104
Figura E-1.- Ejemplo en el que se muestra la transformación de un espacio espectral bidimensional, a sus componentes principales.....	114

## LISTA DE TABLAS

	<i>Página</i>
Tabla 4-I.- Matriz de correlación para el conjunto multitemporal de ocho bandas (verano/invierno).....	39
Tabla 4-II.- Análisis de componentes principales para el juego de datos multitemporal de ocho bandas (verano/invierno).....	40
Tabla 4-III.- Análisis de componentes principales para el juego de datos de verano (junio 14 de 1979).....	53
Tabla A-I.- Principales especificaciones técnicas para el Barredor Multiespectral MSS a bordo del satélite Landsat 3.....	82
Tabla C-I.- Porcentajes de contribución en dispersión para las cuatro bandas del sensor Landsat MSS.....	93
Tabla C-II.- Factores de corrección por efecto atmosférico para las bandas visible-IR del sensor Landsat MSS.....	93

## LISTA DE LAMINAS

	<i>Página</i>
Lámina I.- Despliegue en falso color infra-rojo (R,G,B/7,5,4) de la imagen de verano.....	28
Lámina II.- Despliegue en falso color infra-rojo (R,G,B/7,5,4) de la imagen de invierno.....	29
Lámina III.- Modelo de elevación digital del terreno para la región deltaica del Río Colorado.....	31
Lámina IV.- Vista oblicua del Delta del Río Colorado tomada del Transbordador Espacial.....	34
Lámina V.- Mapa temático generado a partir de procesos de clasificación no-supervisada sobre el juego de datos multitemporal.....	37
Lámina VI.- Transformación del juego de datos multitemporal a su segunda componente principal.....	42
Lámina VII.- Transformación del juego de datos multitemporal a su tercera componente principal.....	45
Lámina VIII.- Mapa temático generado mediante un proceso de clasificación supervisada sobre las cuatro bandas de verano y la segunda componente principal.....	47
Lámina IX.- Mapa temático generado mediante un proceso de clasificación supervisada; utilizando la banda 7 de verano, la segunda componente principal y los valores de altura y pendiente del modelo digital del terreno.....	48
Lámina X.- Mapa temático generado mediante un proceso de clasificación no-supervisada; basandose en la banda 7 de verano y los atributos texturales de la segunda componente principal.....	50

**LISTA DE LAMINAS** (*continuación*)

	<i>Página</i>
Lámina XI.- Transformación de las cuatro bandas de verano a su primera componente principal.....	55

## RESUMEN

No obstante la existencia de una variedad en técnicas aplicables a la discriminación de unidades ambientales utilizando imágenes Landsat, las planicies deltaicas son lugares problemáticos en términos de calibración debido a su naturaleza intrincada, su amplia cobertura espacial y la alta dinámica de los procesos que las gobiernan. En este trabajo se plantea como una alternativa a este problema la aplicación de técnicas de detección de cambio; basadas en el análisis multitemporal de componentes principales y la aplicación de métodos de clasificación y realce radiométrico. La idea central fue utilizar un par de imágenes tomadas en diferentes tiempos, con la finalidad de detectar los límites o bordes de las unidades de terreno; tomando como base los cambios estacionales ocurridos en sus ambientes sedimentarios. Su aplicación a la región deltaica inferior del Río Colorado facilitó la identificación de las principales unidades geomórficas que componen al sistema. Se generó un nuevo modelo geomórfológico, el cual incorporó a la mayoría de las unidades descritas en modelos anteriores y mejora sustancialmente el nivel de entendimiento de la morfología regional (especialmente en la zona de planicies costeras). Estos resultados demuestran la viabilidad en la aplicación de sensores remotos para el reconocimiento geomorfológico a nivel regional, así como la utilización de métodos de análisis multitemporal en combinación con técnicas de clasificación y realce digital.

## Capítulo 1.

### INTRODUCCION.

#### 1.1- Preliminares.

Los ambientes deltaicos son más fáciles de observar y sus subambientes más fáciles de identificar cuando se analizan en un contexto regional; esto debido a su amplia extensión espacial, dificultad de acceso y complejidad del terreno. Una alternativa para lograr esto, es mediante la utilización de técnicas de percepción remota basadas en imágenes de satélite, las cuales, además de proporcionar una visión sinóptica de meso y macroescala espacial, funcionan como una herramienta de análisis en la discriminación de las unidades que componen a estos ambientes. Ejemplos de su aplicación a temáticas como: reconocimiento batimétrico en zonas costeras; detección de sedimento en suspensión; zonación intermareal y análisis morfológico son descritos por Fleming y Lelievre (1977), Cracknell et al. (1982), Bullard (1983), Dinnel et al. (1990), Watson (1991) y Jacobsen y Nielsen (1991). El propósito de esta investigación es ampliar el conocimiento sobre la distribución espacial de las principales unidades geomórficas en la región deltaica del Río Colorado, mediante el reconocimiento en superficie de sus ambientes sedimentarios. Con esta finalidad se emplearán imágenes Landsat MSS, ya que éstas proporcionan un método rápido y económico en la colecta de datos y ofrecen una perspectiva que facilita el análisis de las relaciones espaciales entre los diferentes subambientes, permitiendo una mejor comprensión de la estructura del sistema en general.

### 1.2- Reconocimiento Geomórfico.

Durante las décadas de los 50's y los 60's, la Geomorfología alcanzó un nivel más analítico en relación al enfoque puramente descriptivo que la había caracterizado como "Fisiografía" a principio de siglo (Fairbridge, 1968). Esto vino como resultado del avance logrado en diferentes áreas del conocimiento. Por un lado los conceptos de nuevas teorías como la Tectónica de Placas, y por el otro, el desarrollo de nuevas metodologías de exploración basadas en tecnología espacial. Esto ha situado al científico en puntos de observación ventajosos para el análisis de procesos a escala regional (Demek, 1982).

Lo anterior ha ocasionado una inversión en los procedimientos de exploración geomorfológica tradicionales; basados en estudios a nivel local que posteriormente son extrapolados para obtener una concepción a nivel regional. En la actualidad es posible invertir el proceso de análisis, partiendo de estudios regionales basados en imágenes espaciales para enfocar posteriormente la atención hacia áreas más pequeñas, y analizar zonas a mayor detalle mediante métodos convencionales (Rao y Bedi, 1982). Actualmente la cartografía geomorfológica ha adquirido una importancia relevante como instrumento de investigación en los campos de la geomorfología teórica y aplicada, constituyendo un método gráfico que facilita la integración de información y permite el análisis visual para una región determinada (Demek, 1972).

El cartografiado geomorfológico principia con la identificación de las unidades fundamentales (topoformas) que componen el paisaje. El establecer la naturaleza de estas

unidades es factor crítico para alcanzar el éxito en un estudio geomorfológico; sin embargo, los geomorfólogos no han llegado a un acuerdo que satisfaga completamente todos los tipos de unidades geomórficas y sus escalas. Para el caso de este estudio, nos basaremos en los preceptos de Miyogi et al. (1970), quien define a la unidad geomórfica básica como una topoforma individual, genéticamente homogénea y producida por procesos geomórficos (constructivos o destructivos) definidos. No obstante que la mayoría de las topoformas pueden ser consideradas genéticamente homogéneas en términos de los procesos actuales, se debe tener en cuenta que muchas de ellas deben sus características (al menos en parte) a otro tipo de procesos que ocurrieron en el pasado (Wright, 1972).

El cartografiado geomorfológico es una tarea compleja, la caracterización de las diferentes unidades geomórficas está controlada por la escala utilizada, la naturaleza del terreno y los objetivos del estudio (Pain, 1985). La unidad geomórfica básica debe seleccionarse cuidadosamente con el objeto de ser esencialmente homogénea e indivisible a la escala de trabajo establecida.

### 1.3- Descripción y Antecedentes del Area de Estudio.

La zona de estudio se localiza en el extremo noroeste del Golfo de California, entre los estados de Baja California y Sonora, ocupando un cuadrante de aproximadamente un grado por lado con esquina superior izquierda en los 32° 00' latitud norte y 115° 15' longitud oeste, conformando el extremo sur del cono deltaico del Río Colorado (Figura 1.1, B y C).

El delta está situado en una cuenca estrecha con régimen tectónico activo, delimitada en sus flancos oeste y este por sistemas de fallas con escarpes que funcionan como fuentes de material sedimentario que se adiciona al aportado por el Río Colorado. Al oeste, la limitan escarpes de fallas normales que forman las Sierras de Las Pintas (basaltos y andesitas Mio-Pliocénicas) y de San Felipe (Cretácico medio de composición similar al complejo plutónico peninsular) (Gastil et al. ,1975); y al este, por un escarpe bajo formado por un sistema de fallas de rumbo que la separan de la mesa arenosa del Desierto de Sonora, constituida principalmente por sedimentos Plio-Cuaternarios (Longwell, 1954).

Los amplios intervalos de marea que se registran en la parte norte del Golfo, y las fuertes corrientes de marea, controlan el patrón de depositación en los ambientes marinos y costeros de la región.

El material clástico proveniente del Río Colorado y los flancos de la cuenca es incorporado dentro del sistema, dando como resultado la coexistencia de cuerpos sedimentarios con diferentes características composicionales y texturales de acuerdo a su origen (Thompson, 1968).

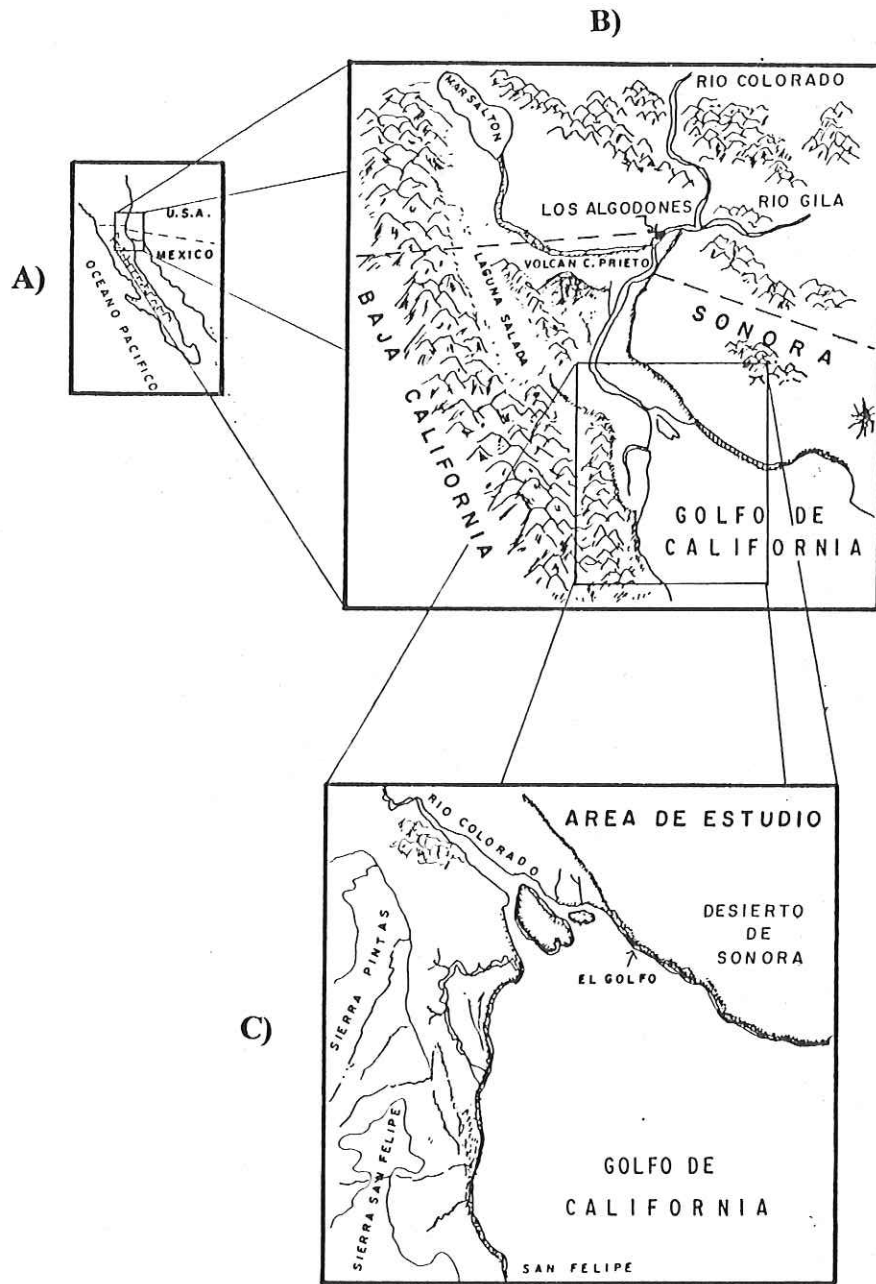
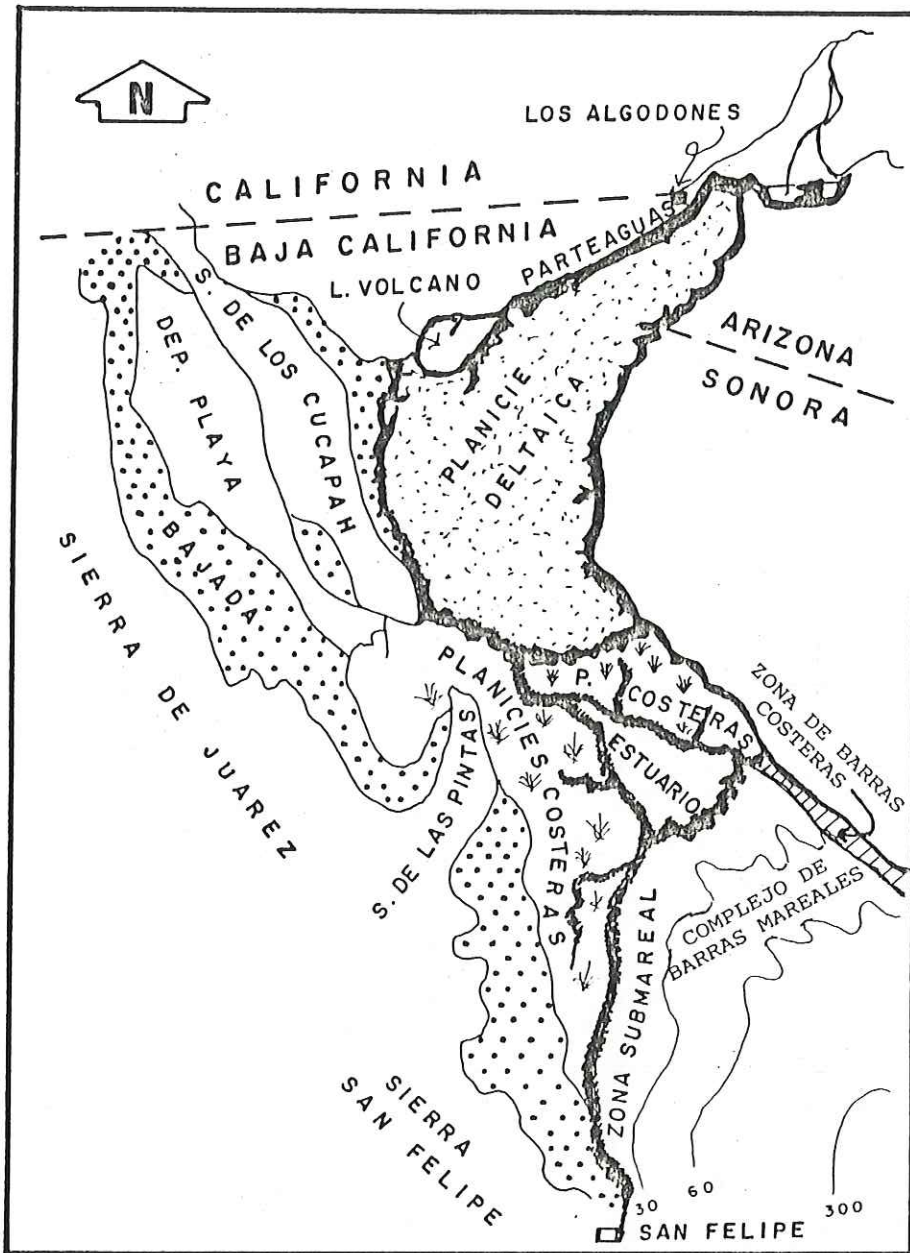


Figura 1.1.- Localización y fisiografía del área de estudio.

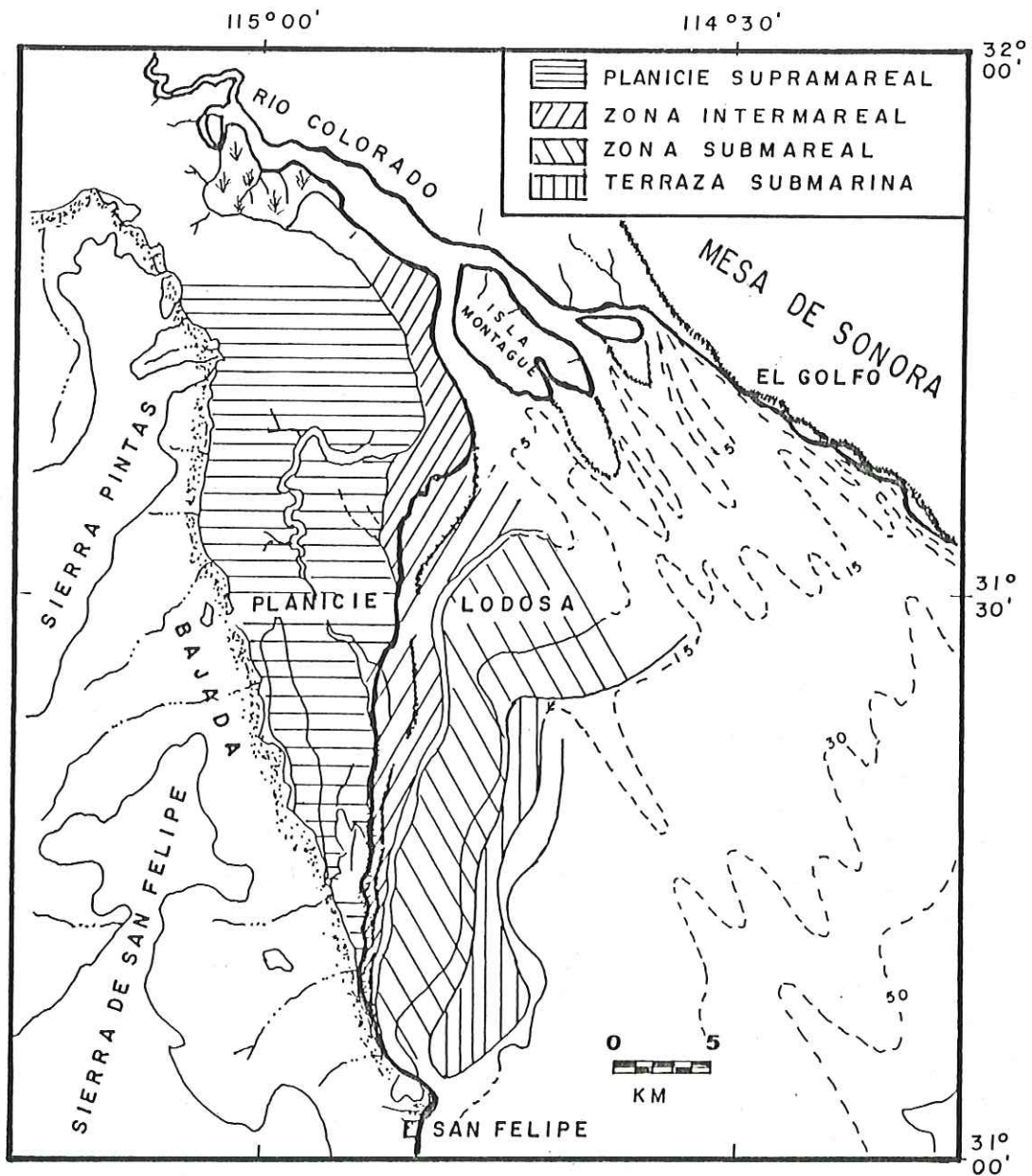
Meckel (1975) establece cuatro ambientes depositacionales principales (continental, costero, marino, y estuarino) según las características genéticas y la organización interna de los cuerpos de arena en cada unidad geomorfológica (ver Figura 1.2). En la zona **continental**, la interdigitación de abanicos aluviales constituye depósitos de bajada al pie de las montañas que delimitan la cuenca por el lado oeste (Figura 1.2), formando terrazas y piemontes sobre un plano transicional entre estas montañas y las planicies costeras. La morfología y amplitud de estos depósitos varía dependiendo de la distancia hacia el basamento rocoso y la proximidad hacia la zona de erosión en la costa.

Al este, presenta una planicie aluvial con complejos de dunas eólicas y una franja de malpais, producto de los procesos deflacionales y erosivos que operan sobre el mismo aluvión (Stone et al., 1973).

El ambiente **costero**, al oeste y al norte de la desembocadura del Río Colorado, está representado por una amplia planicie lodosa con cobertura aproximada de 2000 Km<sup>2</sup> y se extiende desde el límite superior de las mareas vivas, hasta 10 ó 12 metros bajo el NMM. En base a los resultados de Thompson (1968), la región se divide de manera general en tres diferentes ambientes sedimentarios (planicie supramareal, intermareal, y submareal) según el grado de influencia de factores como: desecación, cristalización de evaporitas, acción del oleaje y corrientes de marea (ver Figura 1.3). Por el flanco este de la cuenca, una cuña angosta de sedimento forma un complejo de barras costeras que acresionan directamente sobre el margen elevado de la mesa arenosa del desierto sonorense (Figura 1.2). Estas playas



**Figura 1.2.-** Distribución superficial de los principales ambientes depositacionales. Modificado de Meckel (1975).

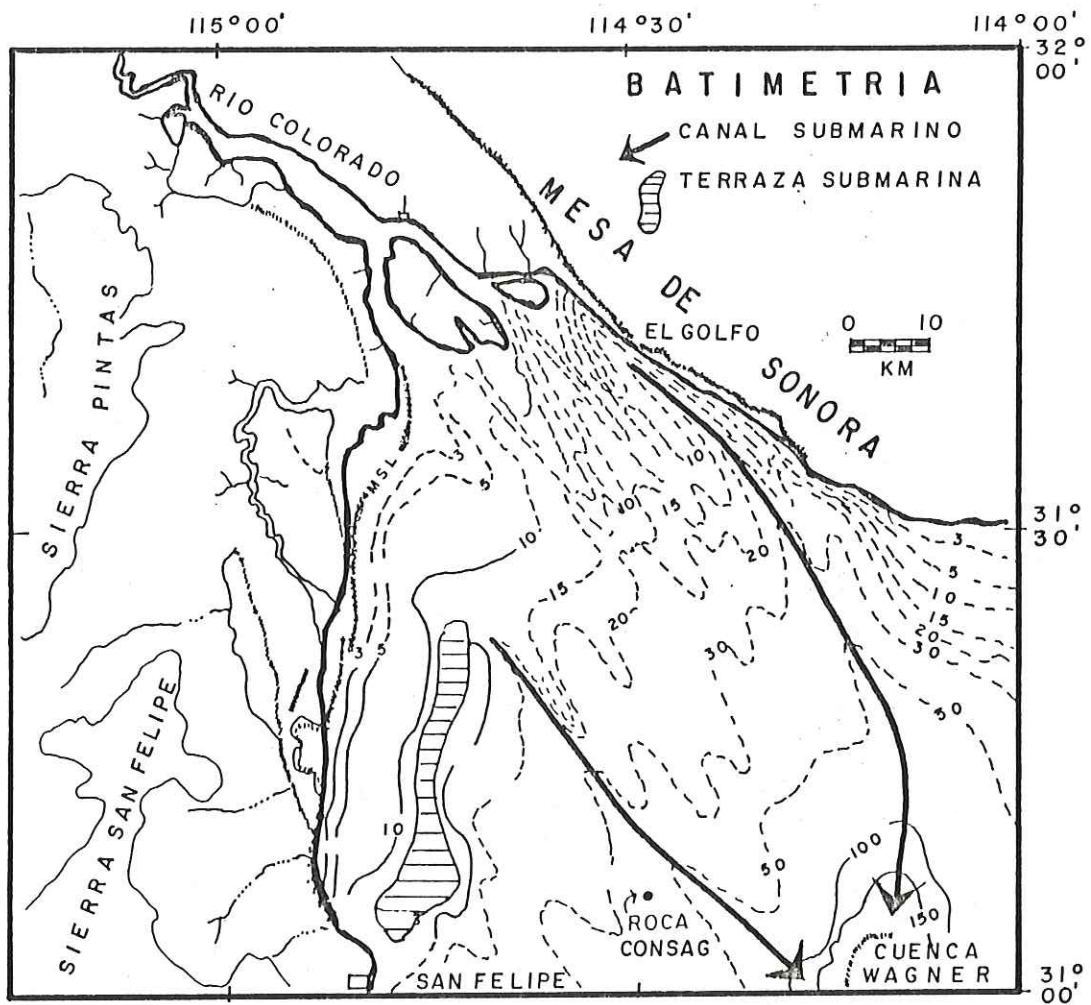


**Figura 1.3.-** Principales divisiones morfológicas de las planicies costeras.  
De acuerdo a Thompson (1968).

tienen una amplitud de 1 a 2 Km en su extremo norte y tienden a desaparecer hacia el sur, mostrando una línea de costa irregular debido a la presencia de barras de arena que se extienden en dirección noroeste.

De acuerdo a Thompson (1968), el ambiente **marino** está caracterizado por una topografía irregular ocasionada por estructuras de cresta y valle, separándose de la planicie lodosa submareal por una terraza submarina (Figura 1.3). Desde el punto de vista morfológico, la zona corresponde a un complejo de barras mareales (Figura 1.2). Su configuración es poco conocida debido a la escasez de datos batimétricos; sin embargo en la parte oeste se infiere una planicie con pendiente suave en dirección este-sureste, con profundidades de 4 a 12 metros y gradientes de  $0.05^\circ$  (ésta, corresponde a la planicie submareal). Por abajo de los 12 metros de profundidad, se extiende la terraza submarina poco definida; su amplitud es variable, presentando 3 Km al norte y hasta 8 Km en su parte sur (Figura 1.4). Al este de la terraza prevalece una topografía irregular, siendo las estructuras más prominentes un par de canales submarinos que confluyen en la Cuenca Wagner al este de San Felipe (ver Figura 1.4).

El área comprendida entre ambos canales, está ocupada por barras de arena con alturas de 8 a 9 metros y espaciamientos promedio de 6 Km. La orientación de estas barras es norte-sur, y no obstante que la continuidad de ellas no ha sido establecida con certeza, existe evidencia de que algunas se prolongan hasta 25 Km mar adentro e inclusive emergen durante las mareas bajas formando islas en la desembocadura del Río Colorado (Thompson, 1968).



**Figura 1.4.-** Batimetría de la región noroeste del Gofu de California.  
Según Thompson (1968).

El ambiente **estuarino** está delimitado lateralmente por las planicies lodosas intermareales; presenta un canal estuarino que se ensancha rápidamente hasta unos 15 Km a la altura de su desembocadura al Golfo, manteniendo una amplitud de 1.5 a 8 Km de ancho a lo largo de sus 40 Km de longitud (Figura 1.2). Al sur, el estuario se une al complejo de barras submarinas y corriente arriba (al norte), se conecta con canales meandriiformes pertenecientes a un ambiente fluvial.

El estuario se caracteriza por un intervalo de marea promedio excepcionalmente alto (6.5 m), lo que origina fuertes corrientes de marea que pueden llegar a velocidades de hasta 3 m/s (Carriquiry et al., 1992). La onda de marea puede alcanzar amplitudes de hasta 10 metros, caracterizándose por un régimen semidiurno y viéndose influenciada por la dirección del viento y el volumen de descarga del río (Thompson, 1968).

En lo que refiere a estudios anteriores, en el campo sedimentológico destacan trabajos como el de McKee (1939) basado en el análisis de estructuras primarias y características texturales del sedimento, con el cual se propone una de las primeras divisiones ambientales para el delta. Gorsline (1967) se enfocó principalmente a la clasificación de ambientes sedimentarios en la región deltaica inferior y Thompson (1968), orientó su estudio a los procesos sedimentarios operantes en las planicies lodosas de la costa oeste. Meckel (1975), por otra parte, analiza la problemática en un contexto regional tomando como base el aspecto genético y la estructura interna de los cuerpos sedimentarios, proponiendo un modelo de los principales ambientes depositacionales para la región. Estudios más recientes (Cupul y

Carriquiry, 1992; Carriquiry et al., 1992) han aportado resultados sobre la mecánica de procesos sedimentarios en la columna de agua. A este respecto, se ha realizado trabajo con la finalidad de determinar los flujos de material en suspensión (seston) e inferir los patrones de sedimentación en la desembocadura del río.

En lo concerniente al marco estructural del área de estudio, la zona es afectada por un grupo de fallas regionales activas relacionadas al sistema San Andrés-Golfo de California. Entre las estructuras más sobresalientes destaca un conjunto de lineamientos. En el límite con la mesa arenosa de Sonora, la falla Cerro Prieto es la última expresión geomórfica subaérea perteneciente al sistema Cerro Prieto-Imperial. Mientras que en la región oeste, los lineamientos El Chinero y San Felipe mantienen rumbos paralelos entre sí, continuándose este último hacia el sur y conectándose con una región distensiva cercana a Puertecitos, B.C. (Suárez-Vidal et al., 1991).

La península de Baja California y en particular el extremo norte del Golfo de California, figuran como una de las zonas más fotografiadas de la República Mexicana. Prueba de ello es el amplio acervo de información recabado durante los últimos 30 años mediante diversos tipos de sensores remotos. Incluyendo cámaras fotográficas manuales en las misiones Mercurio, hasta los sistemas de barrido multiespectral actuales montados a bordo de satélites de reconocimiento (Giddings, 1980).

En este sentido, la aplicación de sensores remotos al estudio de la región ha sido tema de interés varias décadas atrás. Entre trabajos de índole geológico cabe mencionar a García y

Larroque (1973) como uno de los primeros intentos en detectar material en suspensión utilizando imágenes Landsat. Stone et al. (1973) emplearon fotografía orbital de las misiones Gemini y Apollo, encontrando una ventaja relevante debido a su amplia cobertura y permitiéndoles generar una de las primeras cartas geomórficas de la región norte del Golfo de California (Figura 1.5). Vonder Haar y Gorsline (1975) observaron el área de inundación en Laguna Ometepe y efectuaron un análisis comparativo con otros ambientes hipersalinos en función de su frecuencia y duración de inundación. Posteriormente Hayden (1986) propuso una carta de unidades geomorfológicas para la región deltaica (Figura 1.6), tomando como base el análisis visual de la banda 7 de Landsat MSS y ofreciendo una mejor aproximación a la realidad morfológica de la región.

Es evidente el nivel de entendimiento que estos trabajos han aportado en relación a la geomorfología regional. Sin embargo, este nivel puede aún ser superado mediante el aprovechamiento óptimo de las imágenes multiespectrales de satélite (utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes) y su análisis en conjunto con la información geológica y oceanográfica que se tiene de la zona.

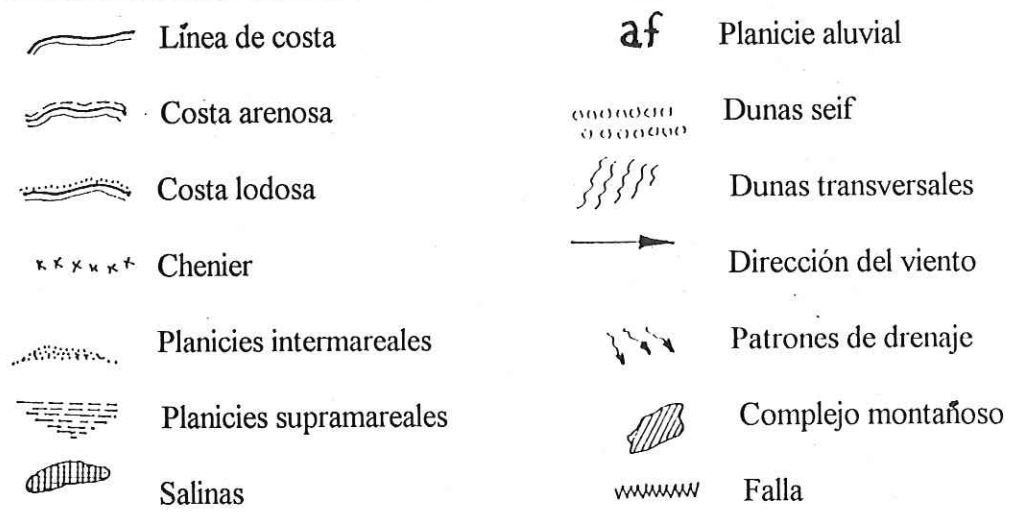
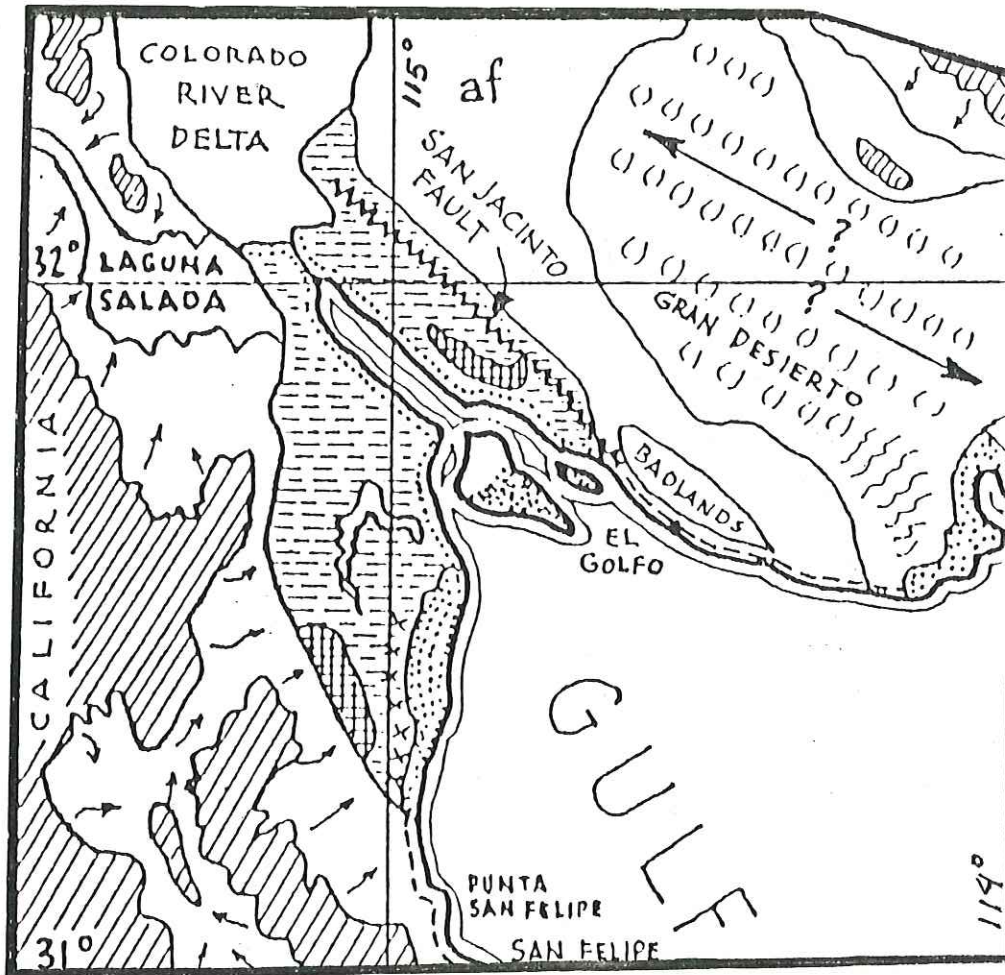
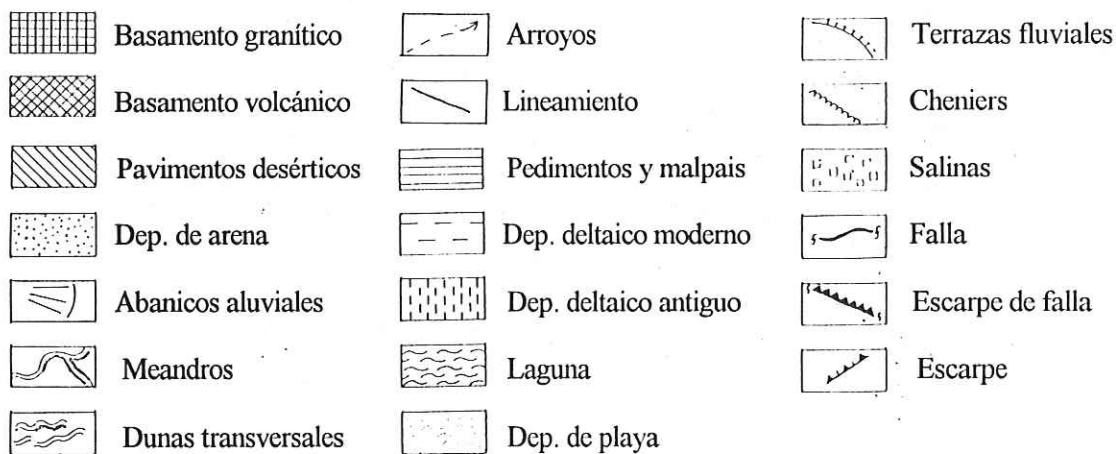
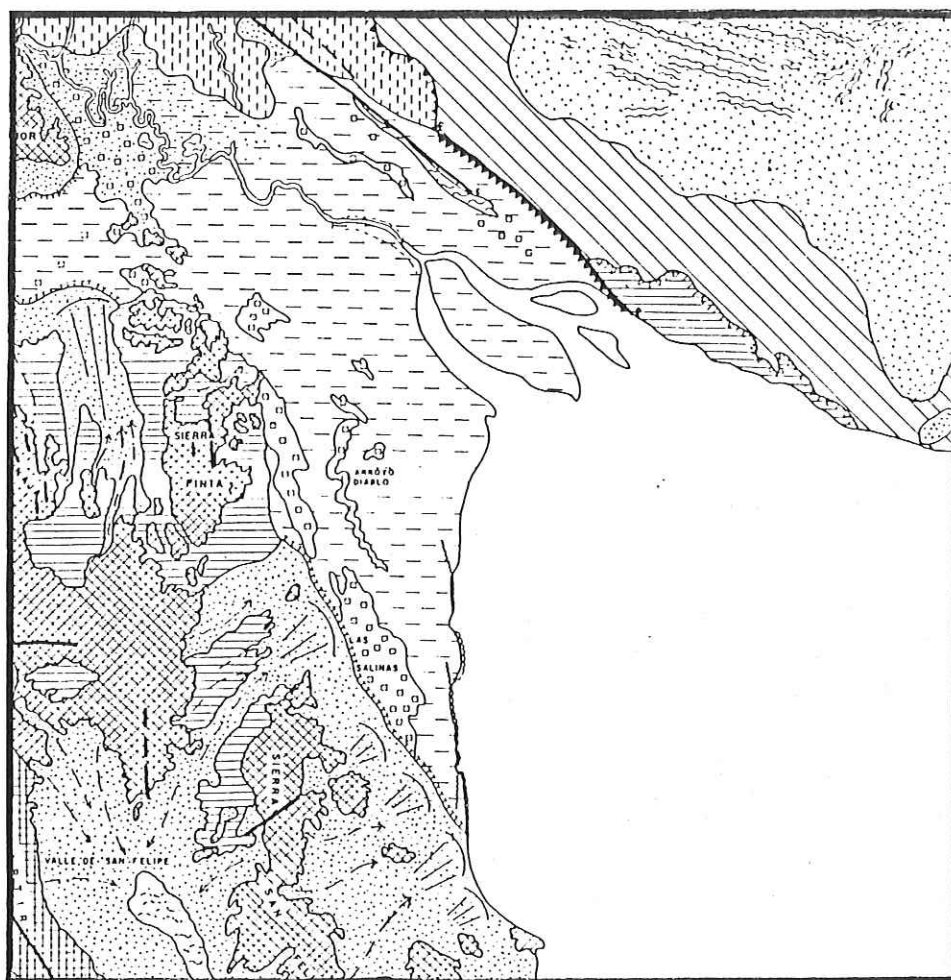


Figura 1.5.- Detalle de la carta geomórfica para la región norte del Golfo de California. De acuerdo a Stone et al. (1973).



**Figura 1.6.-** Diagrama esquemático de las unidades geomorfológicas en la región deltaica del Río Colorado. Modificado de Hayden (1986).

## Capítulo 2.

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

#### 2.1- Marco de Referencia.

Como puede apreciarse en el capítulo anterior, existe un nivel aceptable de conocimiento geológico para la zona deltaica del Río Colorado, principalmente en lo que refiere a procesos sedimentarios (Gorsline, 1967; Thompson, 1968; Meckel, 1975). Sin embargo, debido a que estos trabajos se basan en un número reducido de muestras tomadas en el campo, los modelos resultantes son simplificaciones del medio ambiente real; caracterizado por ser de muy amplia cobertura, complejo e inaccesible por medios de transporte convencionales. Estos estudios enfatizan en aspectos regionales y se basan, por razones obvias, en una extrapolación de la información obtenida de relativamente pocas muestras. En otros términos, estos trabajos tienden hacia una conceptualización **generalizada** de la geomorfología del sistema deltaico, al tratar de representar esta información de campo en un contexto **regional**.

Por otra parte, los estudios geomorfológicos a partir de fotografía orbital (Stone et al. 1973; Hayden, 1986) muestran un avance considerable en cuanto al nivel de entendimiento de la zona bajo una perspectiva regional, no obstante que los niveles de cobertura y extensión de límites entre las unidades geomórficas identificadas son aún inciertos (principalmente en la

zona de planicies costeras). Esto viene como consecuencia del grado de subjetividad impuesto en el empleo de técnicas de interpretación visual sobre el material fotográfico.

De acuerdo al enfoque de este estudio, se pretende afinar detalles en cuanto a la distribución espacial y la identificación de fronteras entre las principales unidades geomórficas que componen la región deltaica. Con este objeto, se tomarán como base las descripciones de la zona realizadas por otros autores (Thompson, 1968; Stone et al., 1973; Meckel, 1975 y Hayden, 1986). La meta principal de este estudio es explotar al máximo la información espectral de sensores remotos mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes. Tales técnicas consistirán básicamente en métodos de realce radiométrico, el análisis multitemporal de componentes principales, y técnicas de clasificación sobre los datos del barredor multiespectral MSS de Landsat. En casos donde resulte apropiado (como son las regiones de mediano a alto relieve), la información espectral será combinada con información textural y parámetros morfométricos (relieve, pendiente) derivados del modelo digital del terreno. La sección de apéndices al final de este documento describe aspectos básicos sobre el funcionamiento de estas técnicas, y en el capítulo de metodologías se explicará la manera en que éstas serán aplicadas.

En términos generales, la idea es obtener una perspectiva global del área de estudio que permita conceptualizar la estructura de la zona a nivel regional, identificando unidades de terreno con características espectrales similares y asociándolas con procesos sedimentarios

inferidos a partir del ambiente depositacional correspondiente. La integración de los resultados del análisis por sensores remotos con las evaluaciones presentadas en los trabajos antes mencionados, permitirá la caracterización de las topoformas que constituyen el sistema, y coadyuvará en el establecimiento de criterios para el reconocimiento de las unidades geomórficas básicas.

2.2- Objetivos.

Efectuar un **reconocimiento a nivel regional**, con la finalidad de identificar las unidades geomórficas que constituyen el sistema deltaico inferior del Río Colorado. Utilizando como herramientas de análisis técnicas de percepción remota.

Debido a la extensión y diversidad ambiental del sistema, se hace necesaria la subdivisión del problema en los siguientes **objetivos específicos**:

- a) Identificar a nivel regional las principales provincias geomorfológicas (continental, costera y marina) conforme al esquema propuesto por Meckel (1975).
- b) Identificar las principales unidades que componen las planicies lodosas de acuerdo al modelo morfológico de Thompson (1968). En base a esto inferir su distribución en las planicies de Sonora.
- c) Complementar los resultados obtenidos por otros autores (Stone et al., 1973; Hayden, 1986) en cuanto a la distribución de unidades geomórficas en las áreas desérticas continentales de Baja California y Sonora.
- d) Inferir la morfología submarina en la desembocadura del estuario.

## Capítulo 3.

### METODO DE ANALISIS.

#### 3.1- Descripción.

Para facilitar la identificación de unidades geomórficas se utilizó un par de imágenes Landsat de la región obtenidas en diferentes fechas (14 de junio de 1979 y 16 de enero de 1980). El objeto de esto fue poder detectar los límites o bordes de las unidades geomórficas con base en los cambios ocurridos en sus ambientes sedimentarios. Estos cambios pueden ser originados por diferencias en el contenido de humedad del terreno, altura del nivel de marea o al ángulo de declinación solar para el caso de zonas con alto relieve. Se infiere que tales diferencias estarán relacionadas a cambios estacionales, y que las unidades ambientales estarán a su vez íntimamente relacionadas a las unidades geomórficas.

No obstante que existe una variedad de técnicas aplicables a la detección de cambio utilizando imágenes Landsat (Wilson et al. 1976; Weismiller et al. 1977; Howarth y Wickware 1981), las planicies de inundación son lugares problemáticos en terminos de calibración debido a su naturaleza intrincada y a la dinámica de los procesos que las gobiernan (Harker, 1977). La alternativa planteada en este estudio es el análisis multitemporal de componentes principales, que al ser capaz de eliminar la correlación entre bandas, permite realzar las zonas de cambio local en imágenes multiespectrales (Richards, 1984). En términos generales, esta técnica permite separar la alta correlación existente entre fechas para zonas que se mantienen

relativamente estables, de la baja correlación asociada a zonas que han cambiado en el tiempo (ver Apéndice E).

Las imágenes empleadas en este trabajo fueron adquiridas por el barredor multiespectral (MSS) a bordo de la plataforma Landsat 3 (Apéndice A). La primera imagen fue tomada en el verano de 1979, durante un período de mareas vivas bajo condiciones de reflujo, y la segunda imagen se tomó durante un sobreflujo del río en invierno de 1980 y en período de mareas muertas. Un análisis exploratorio mediante clasificación no-supervisada (Apéndice D) permitió estimar el número de posibles clases espectrales en las imágenes. Posteriormente, las cartas temáticas resultantes de este proceso de clasificación fueron analizadas en conjunto con mapas geológicos y topográficos de la región utilizando una tableta gráfica, se eligieron sitios de entrenamiento basados en observaciones de campo, y se realizaron clasificaciones supervisadas sobre las imágenes.

En regiones de alto y mediano relieve se utilizaron los principios de Shih y Schowengerdt (1983), adicionando atributos texturales generados a partir de componentes principales, además de información morfométrica (Franklin, 1987) con el fin de enfatizar los cambios texturales en zonas de alta reflectividad y disminuir la confusión espectral en zonas de alto relieve debida al efecto topográfico.

### 3.2- Procedimientos.

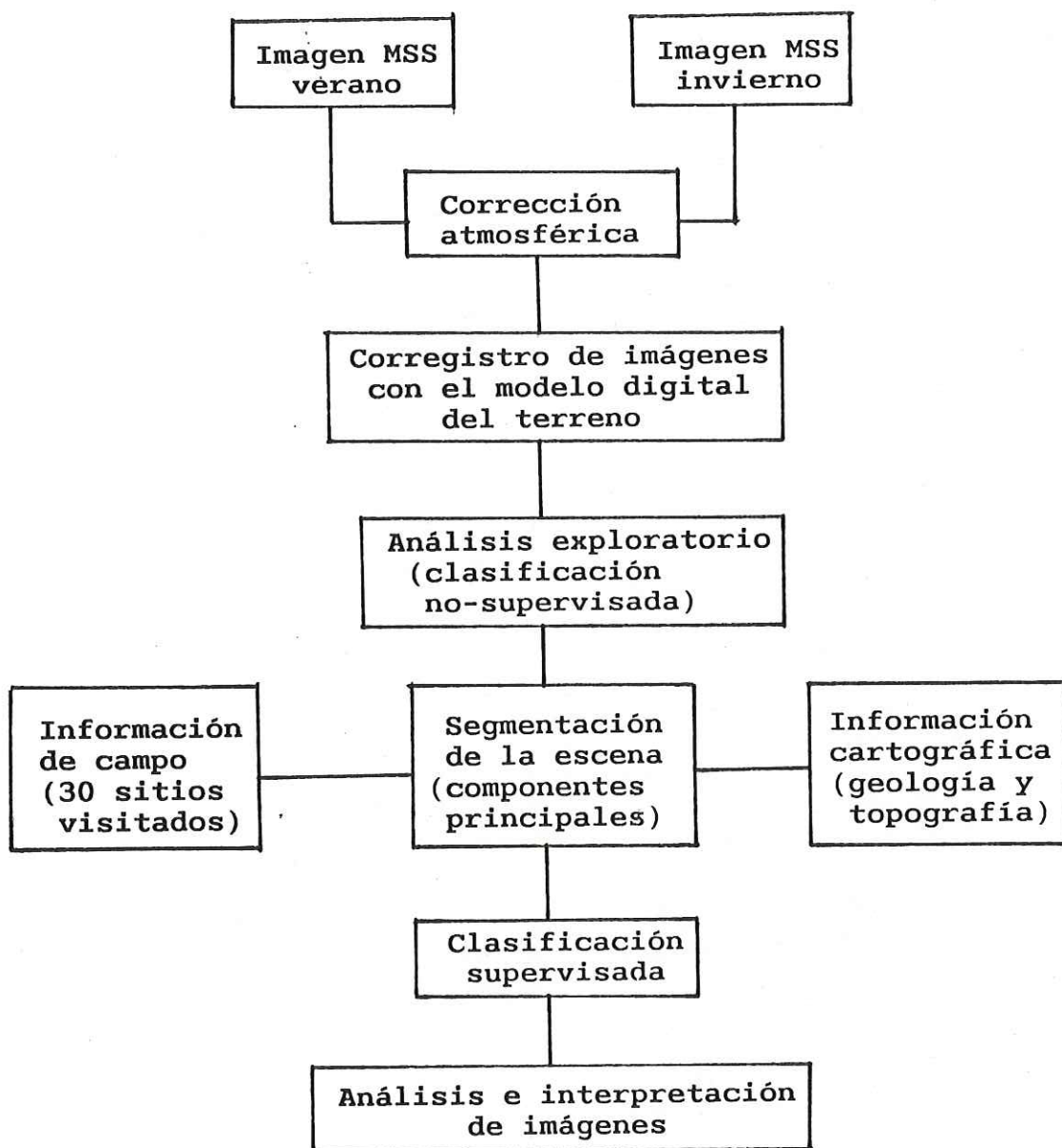
La Figura 3.1 muestra la secuencia general de pasos que se siguieron durante el análisis de las imágenes. El procesamiento digital fue llevado a cabo utilizando el sistema ERMapper 4.0 de la División de Ciencias de la Tierra en Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

#### Corrección atmosférica.

Como primer paso ambas imágenes (1979 y 1980) fueron corregidas por efecto atmosférico con el fin de reducir el nivel de ruido en los procesos de clasificación y mejorar su calidad visual (Schowengerdt, 1983). La técnica de corrección empleada se basó en corrimiento de histograma, de acuerdo a la metodología descrita en el Apéndice C.1.

#### Co-registro de imágenes y modelo digital del terreno.

El análisis multitemporal de imágenes requiere de la superposición de ambas imágenes (pixel a pixel) lo mas exacto posible. Utilizando los procedimientos descritos por Shlien (1979) se co-registraron ambas imágenes con el modelo digital del terreno (ver Apéndice C.2) y se geocodificaron de acuerdo al sistema de proyección UTM.



**Figura 3.1.-** Secuencia del procesamiento y análisis de la información.

Análisis exploratorio.

Con la finalidad de estimar el número de clases espectrales en las imágenes e inferir las posibles clases informativas asociadas a unidades geomórficas, se efectuó un proceso de clasificación no-supervisada sobre el juego de ocho bandas co-registradas. En el apéndice D se describen las bases de las técnicas de clasificación supervisada y no-supervisada.

Segmentación de la escena.

Se calcularon matrices de covarianza y correlación para cada imagen, así como para el juego de ocho bandas producto de su co-registro. La finalidad de esto fue efectuar un análisis de componentes principales sobre el contenido espectral de ambas imágenes y poder delimitar los principales subambientes en base a su interpretación. En el apéndice E, se describe el proceso de transformación a componentes principales, y su aplicación a este tipo de estudios.

Integración de la información.

En este paso se definieron campos de entrenamiento para procesos de clasificación supervisada, tomando como base el material cartográfico disponible y la información obtenida mediante observaciones de campo.

Análisis e interpretación.

Finalmente se generaron impresiones en falso color y blanco/negro, así como cartas de clasificación, todos a escalas nominales 1:750,000. Posteriormente, este material fue interpretado en base a su contexto geológico-oceanográfico, de acuerdo a la bibliografía consultada.

3.3- Materiales y Equipo.

- a) Imagen Landsat MSS. Junio 14 de 1979 (**verano**). Renglón 38, trayectoria 41.  
Formato BSQ con corrección en sus cuatro bandas. ID = 30466-17332.
- b) Imagen Landsat MSS. Enero 16 de 1980 (**invierno**). Renglón 38, trayectoria 41.  
Formato BSQ con corrección en sus cuatro bandas. ID = 30682-17295.
- c) Cartas topográficas y geológicas elaboradas por el INEGI, escala 1:250,000.
- d) Cartas topográficas y geológicas elaboradas por el INEGI, escala 1:50,000.
- e) Estación de trabajo Sun Sparc IPX con 24 MB RAM, unidad de disco duro de 1 GB.
- f) Impresor de color QMS ColorScript modelo 30i.
- g) Sistema de navegación personal GPS TRANSPAK de Trimble.
- h) Digitalizador acústico SAC modelo GP-8 de 36x48 pulgadas.
- i) Vehículo con doble tracción.
- j) Motocicleta para terracería.

## Capítulo 4.

### RESULTADOS Y DISCUSIONES.

#### 4.1- Fotointerpretación.

Con el objeto de facilitar el análisis fotointerpretativo desarrollado en esta sección, se sugiere que el lector se familiarice con el diagrama de la zona de estudio que se muestra en la Figura 4.1. En esta figura, se ilustra esquemáticamente la ubicación y los nombres comunes de las localidades utilizadas en la interpretación de las imágenes.

Ambas imágenes (verano/invierno) fueron analizadas en falso color infra-rojo (R,G,B/7,5,4), observándose que la calidad visual aumenta cuando se hace la corrección por efecto atmosférico (principalmente en las zonas cubiertas por agua).

Las Láminas I y II corresponden a las imágenes de verano e invierno respectivamente. Entre las características que presentan en común, destaca la presencia de una pluma de material en suspensión originada por efecto de resuspensión en el fondo y debida a corrientes de marea. Esta pluma presenta un tono azulado como consecuencia de la alta reflectividad del material en suspensión en las bandas 4 y 5 de Landsat MSS (Kennie y Matthews, 1985).

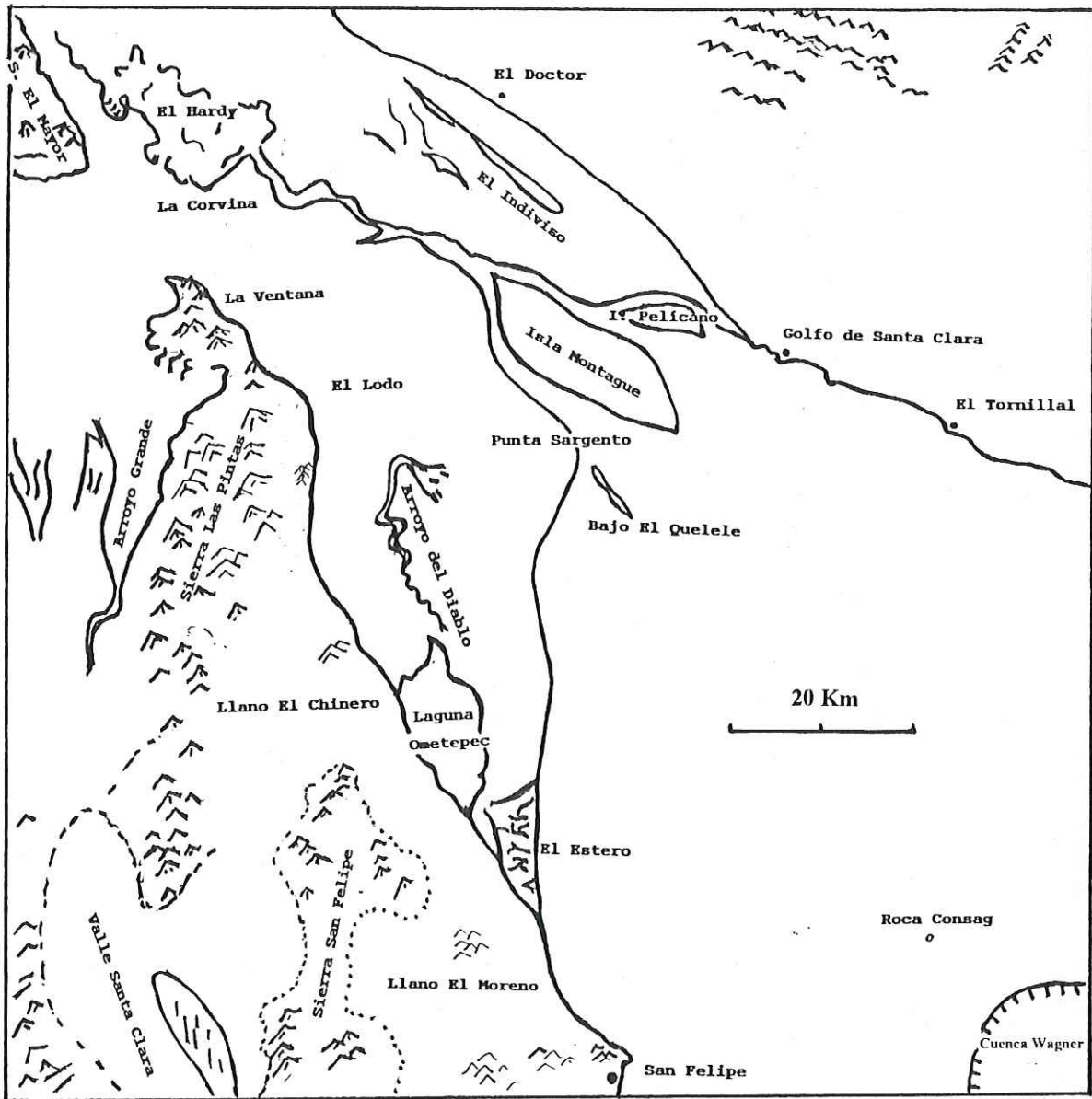


Figura 4.1.- Diagrama esquemático de la zona de estudio.

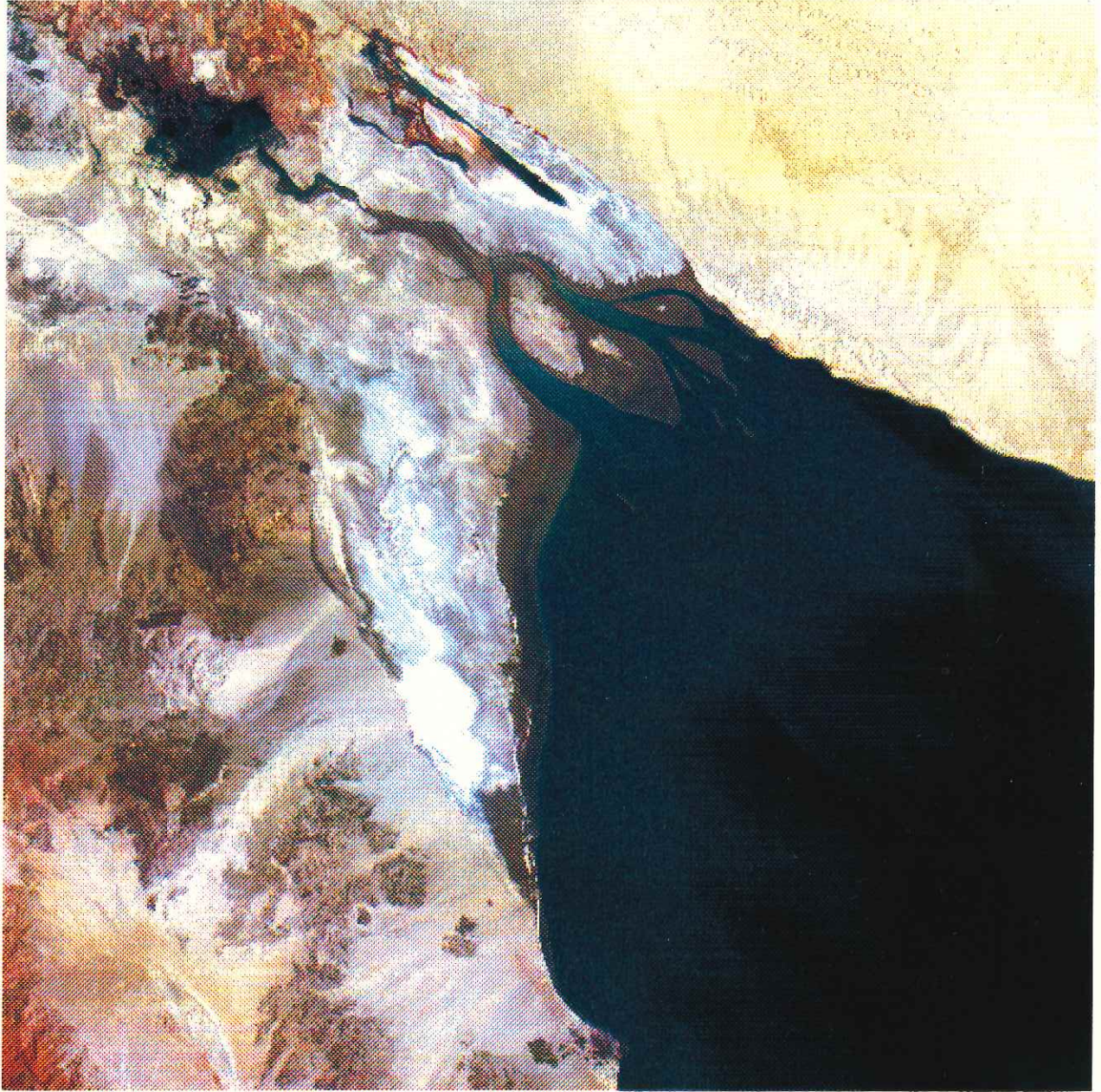


Lámina I.- Proyección en falso-color infra-rojo (R,G,B/7,5,4) de la imagen Landsat MSS de verano. Junio 14 de 1979 (consultar texto).

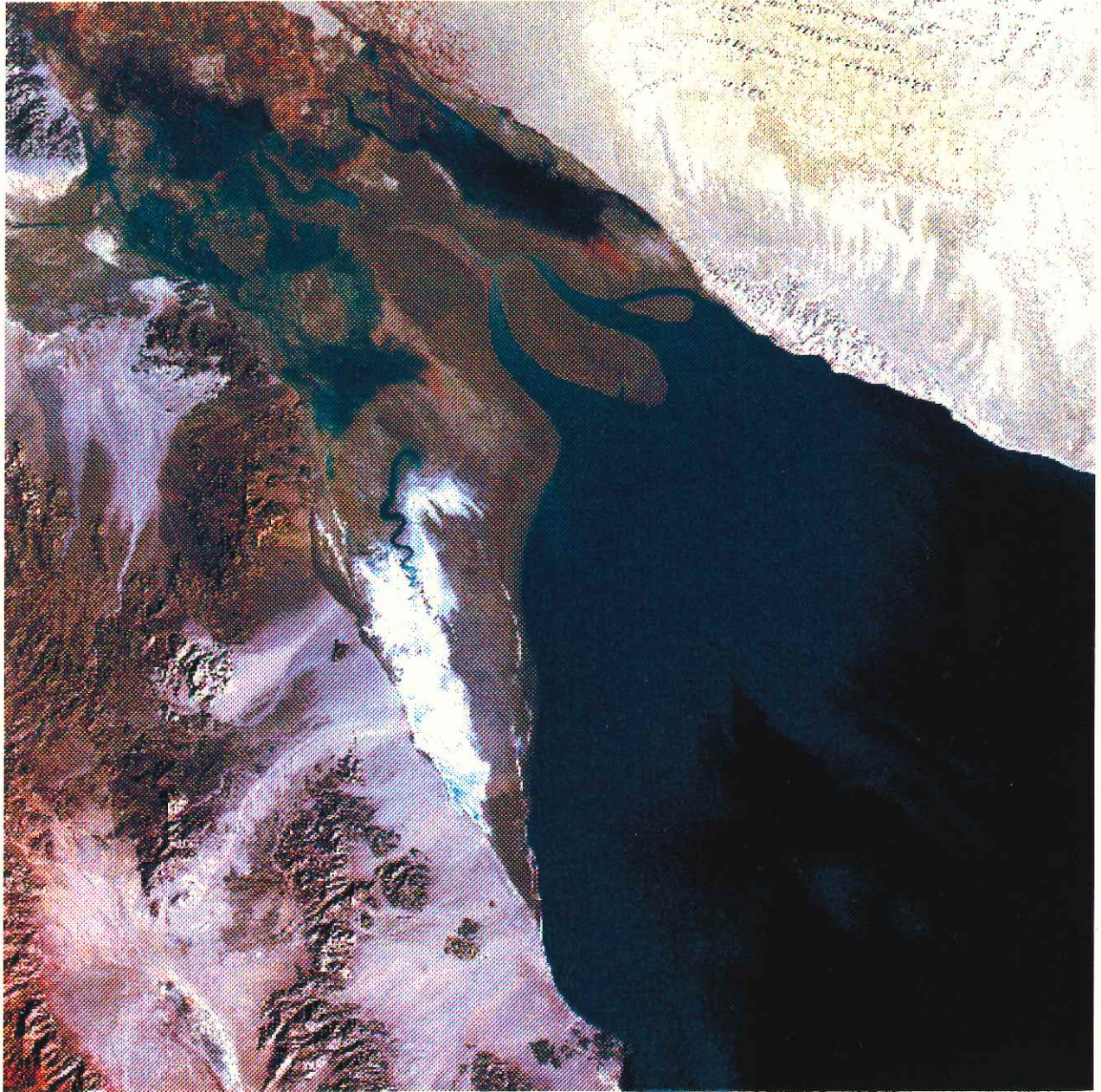


Lámina II.- Proyección en falso-color infra-rojo (R,G,B/7,5,4) de la imagen Landsat MSS de invierno. Enero 16 de 1980 (consultar texto).

La forma de la pluma muestra una clara tendencia hacia la costa bajacaliforniana donde predominan los procesos de depositación (Carriquiry et al., 1992), y contrasta con tonos oscuros que corresponden a zonas más profundas conforme se aproxima hacia la Cuenca Wagner (Figura 4.1). Los tonos rojizos representan áreas con vegetación. La esquina inferior izquierda corresponde a la zona de bosques en el extremo norte de la Sierra San Pedro Mártir. En la margen superior izquierda se observan predios agrícolas con tonalidades que van del amarillo al café-rojizo formando patrones rectangulares.

En la Lámina III se muestra el modelo de elevación digital del terreno para la región deltaica del Río Colorado, con una fuente de iluminación a 40° de elevación en dirección noreste. En esta imagen se pueden apreciar algunas de las principales expresiones topomórficas de la zona. En la esquina superior izquierda se observa el extremo sur de la Sierra El Mayor, terminando abruptamente en una planicie que constituye el paso hacia la Laguna Salada al noroeste.

En dirección sur, la Sierra Las Pintas se delimita al oeste por los abanicos aluviales formados por el Arroyo Grande, al este por la planicie deltaica y al sur por el Llano El Chinero (Figura 4.1).

La Sierra San Felipe, en la parte inferior, sobresale entre las planicies del Llano El Moreno (hacia el este) y una gran depresión semicircular ubicada en el flanco oeste denominada Valle Santa Clara. De las Láminas I y II, así como por observaciones de campo

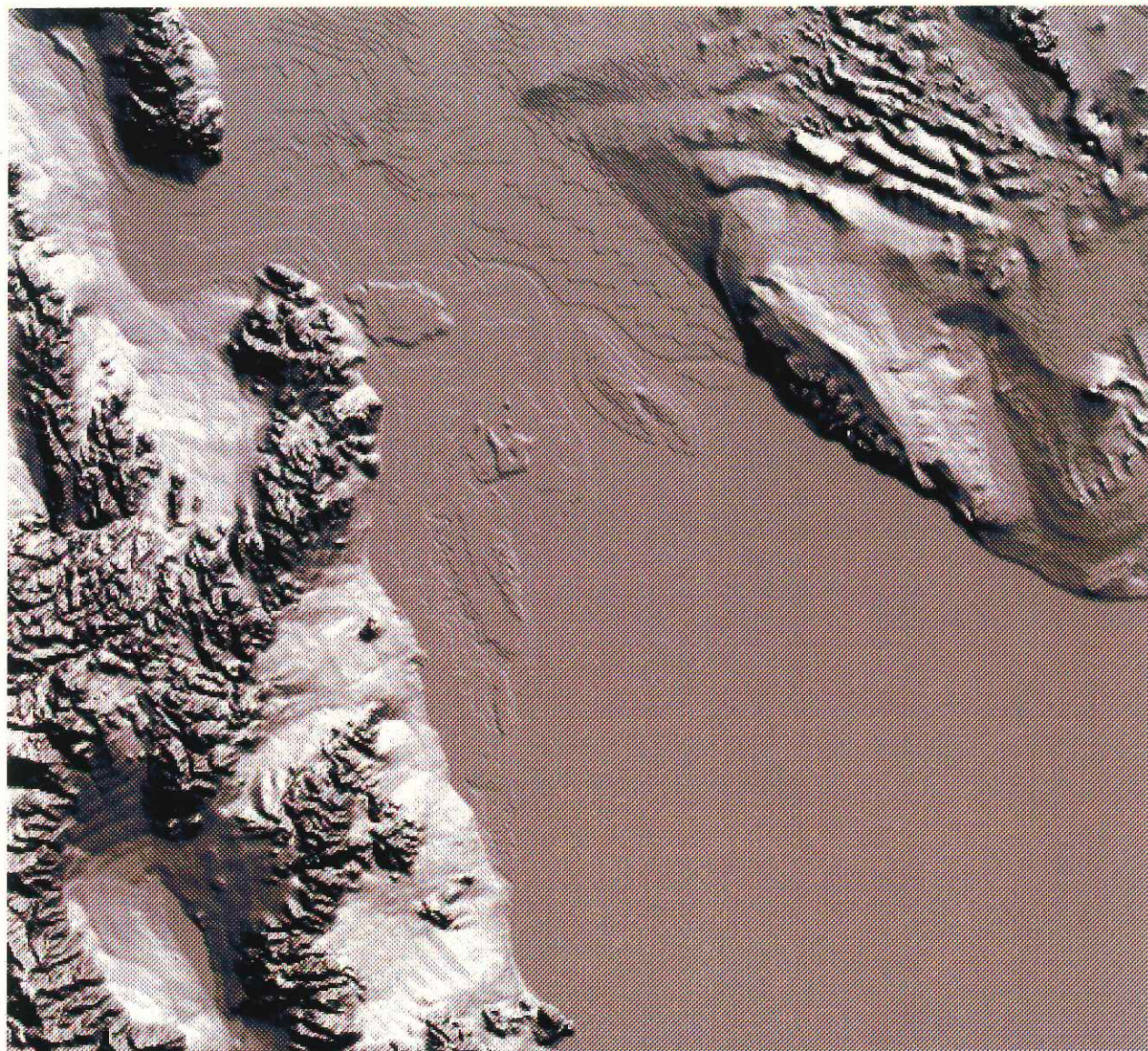


Lámina III.- Modelo de elevación digital del terreno para la región deltaica del Río Colorado, con fuente de iluminación a 40° de elevación en dirección noreste.

se infiere que estos llanos corresponden a depósitos de piemonte, conformados por abanicos aluviales (tonos claros) y pavimentos de desierto (tonos grises y café claro), contrastando con las zonas de mayor relieve (tonos más oscuros) correspondientes al basamento rocoso de las Sierras San Felipe y Las Pintas.

En la misma Lámina III, en su parte superior derecha, destaca una serie de estructuras lineales con rumbo noroeste-sureste, éstas, corresponden a campos de dunas eólicas sobre una planicie desértica. Al sur de éstas, se observa una marcada elevación en el relieve de la planicie, mostrando patrones de drenaje bien desarrollados en dirección a la cuenca del Golfo de California, y contrastando con una amplia depresión en forma de canal hacia el este de El Tornillal. En las imágenes Landsat (Láminas I y II) esta región corresponde a una zona de alta reflectividad asociada a depósitos de ambiente desértico. En ambas imágenes se aprecian los complejos de dunas antes mencionados, los patrones de drenaje a la altura del Golfo de Santa Clara y algunas estructuras en forma de crestas que rodean este sistema de drenaje, relacionadas con pavimentos desérticos de acuerdo a su similitud con estructuras semejantes en el desierto bajacaliforniano. En la línea de costa sonoreense pueden apreciarse barras de arena que acrecionan sobre una zona con marcado grado de disección, incluyendo la porción de playa comprendida entre el Golfo de Santa Clara y El Tornillal.

En relación a la zona de planicies costeras, el modelo de relieve digital del terreno (Lámina III) aporta poca información en cuanto a la morfología del terreno. Los principales rasgos geomórficos están representados por una serie de altos topográficos (2 a 3 mts) a lo

largo de la margen este de la planicie, destacando por su prominencia el ubicado frente a La Ventana a la altura de Las Pintas (Figura 4.1). Por otra parte, los patrones de drenaje en el Arroyo del Diablo y en la zona de El Estero interrumpen la monotonía de la planicie. Predominando una pendiente suave en dirección este, semejante al esquema topográfico propuesto por Thompson (1968).

La imagen mostrada en la Lámina I fue tomada durante un período de mareas vivas y corresponde a una marea baja (Gonzalez, 1994), en ella se observa la zona intermareal descrita por Thompson (1968) en tono café oscuro, así como las islas Montague y Pelicano completamente descubiertas, evidenciando algunas barras submarinas que emergen al sur de estas. Los amplios intervalos de marea que se registran durante mareas vivas ocasionan el desbordamiento del río en la zona de El Hardy (a la altura de La Corvina), inundando la zona que Thompson denominó como Planicie Supramareal (Figura 1.3). Una evidencia de esto (para el caso de sobreflujo en el río) es mostrada en la Lámina IV, donde se observan los vasos de la Laguna Salada y del Mar Salton a su máxima capacidad, como efecto del aporte del Río Colorado y la precipitación pluvial en la región (observe el bajo central del Valle Santa Clara inundado).

Las altas temperaturas que se registran en la región durante el verano originan una rápida evaporación sobre las planicies deltaicas inundadas, produciendo en consecuencia una mayor concentración de sales en aquellas zonas donde el tirante de agua es mayor (zonas relativamente bajas).

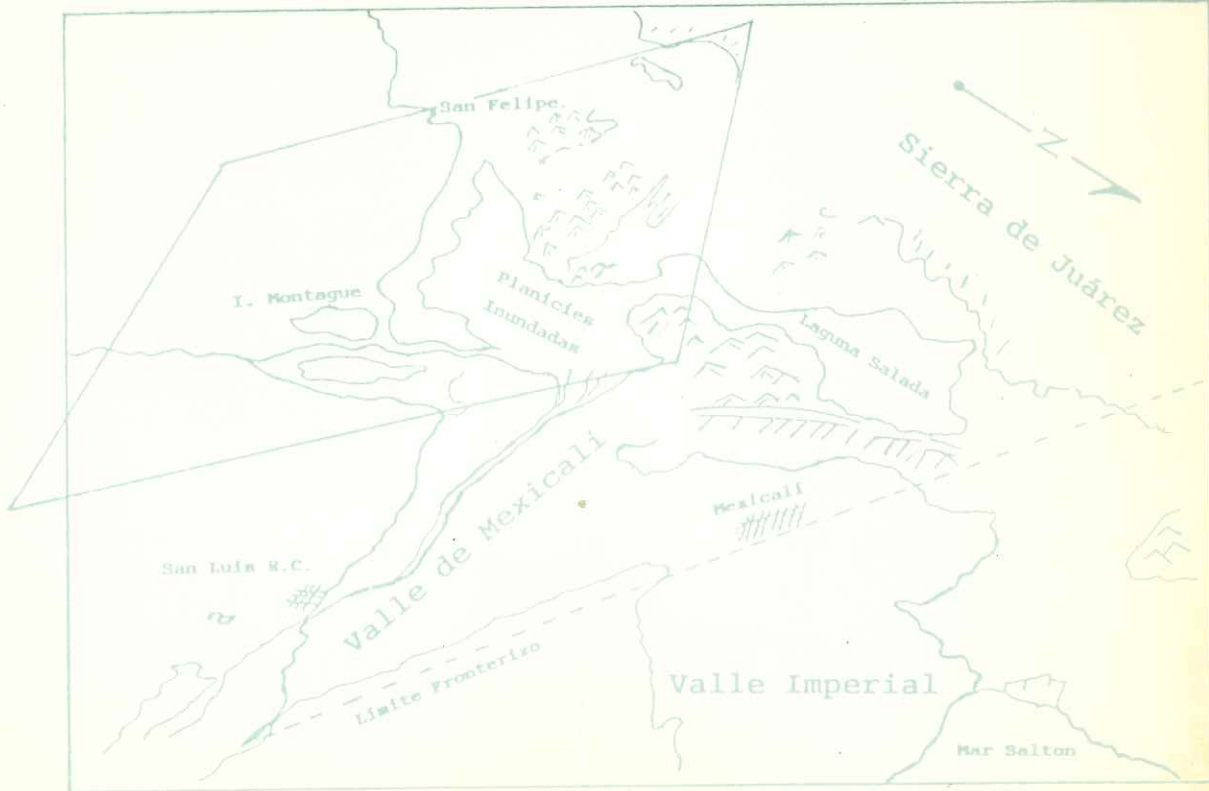
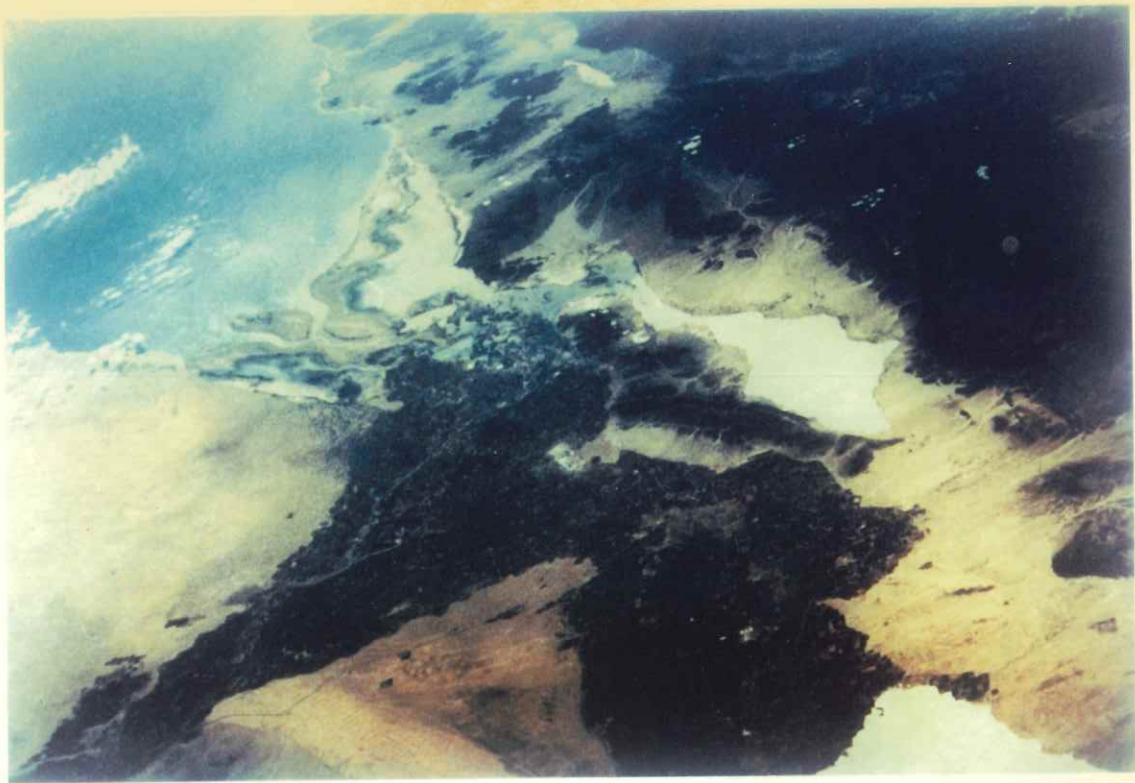


Lámina IV - La fotografía superior muestra una vista-oblicua en dirección sur, tomada del Transbordador Espacial (octubre de 1984). En ella se observan los límites de inundación de las planicies deltaicas, así como los vasos de la Laguna Salada y del Mar Salton a su máxima capacidad. El recuadro del mapa inferior corresponde aproximadamente al área de cobertura de la imagen Landsat utilizada en este estudio (Foto cortesía Alejandro Hinojosa).

Esto, da como resultado una diferenciación en el contenido de humedad y en el grado de cristalización de evaporitas sobre la planicie; causando las tonalidades que se observan en la Lámina I. Las zonas elevadas muestran un tono amarillo paja (Lámina I) como se puede apreciar en la estructura longitudinal a lo largo del tramo Las Pintas-El Chinero (previamente identificada como planicie alta-inactiva por Thompson, 1968); las zonas intermedias asociadas a humedales (e.g. la zona de El Lodo) muestran una coloración café verdoso, mientras que en las zonas centrales de la planicie se va incrementando el contenido de sales (tonos claros) hasta llegar a un máximo en los vasos del Arroyo del Diablo, Laguna Ometepepec y Laguna El Indiviso en la margen del Desierto de Sonora.

La imagen en la Lámina II corresponde a la fase inicial de un flujo de marea en período de transición hacia mareas vivas (Gonzalez, 1994) y fue tomada durante el invierno de 1980. El contraste más drástico que se aprecia con respecto a la Lámina I es el estado de inundación de la planicie deltaica, observándose más claramente en la zona de El Lodo y los vasos del Arroyo del Diablo y Laguna El Indiviso. Es muy probable que durante el ciclo de mareas muertas anterior, el alto volumen de descarga del río haya lavado la planicie deltaica, removiendo parcialmente la capa superficial de sales evaporíticas hacia el sur y dando origen a los patrones que se observan en la imagen. El alto grado de humedad en la planicie disminuye la reflectividad del terreno, imposibilitando el reconocimiento de detalles en su estructura a excepción de los cordones de cheniers (altamente reflectivos) sobre la línea de costa bajacaliforniana y algunos parches rojizos a la altura de El Lodo y al sur de Laguna El

Indiviso. Estos pueden estar relacionados con vegetación de marisma salobre o con tapetes algales. En las regiones continentales (Baja California y Sonora) se observan las expresiones geomórficas analizadas anteriormente en las Láminas I y III. La principal diferencia entre ambas imágenes (verano/invierno) consiste en un acentuado efecto topográfico para zonas de mediano a alto relieve, ocasionado por el bajo ángulo de declinación solar durante la estación de invierno.

#### 4.2- Clasificación No-supervisada.

Empleando el algoritmo ISOCLAS, se solicitó la búsqueda de 15 clases en 80 iteraciones bajo un esquema de clasificación no-supervisado. El sistema identificó 13 clases espectrales, convergiendo el proceso en 63 iteraciones. Este resultado está relacionado con el número máximo posible de clases informativas discernibles en la región. El resultado de la clasificación se muestra en la Lámina V, donde cada clase espectral ha sido codificada con diferente color. La distribución de patrones es bastante coherente con las observaciones fotomórficas discutidas, principalmente en las zonas de piemontes, planicies intermareales y cubierta acuática. Sin embargo, en las regiones: (a) montañosas y (b) planicie supramareal, se observa un alto nivel de confusión espectral originada por el efecto topográfico en (a) y por diferencias en condiciones de inundación en (b). No obstante, algunas estructuras permanecen visibles, como es el caso de los meandros del Arroyo del Diabló y el vaso de Laguna Ometepec (Figura 4.1).

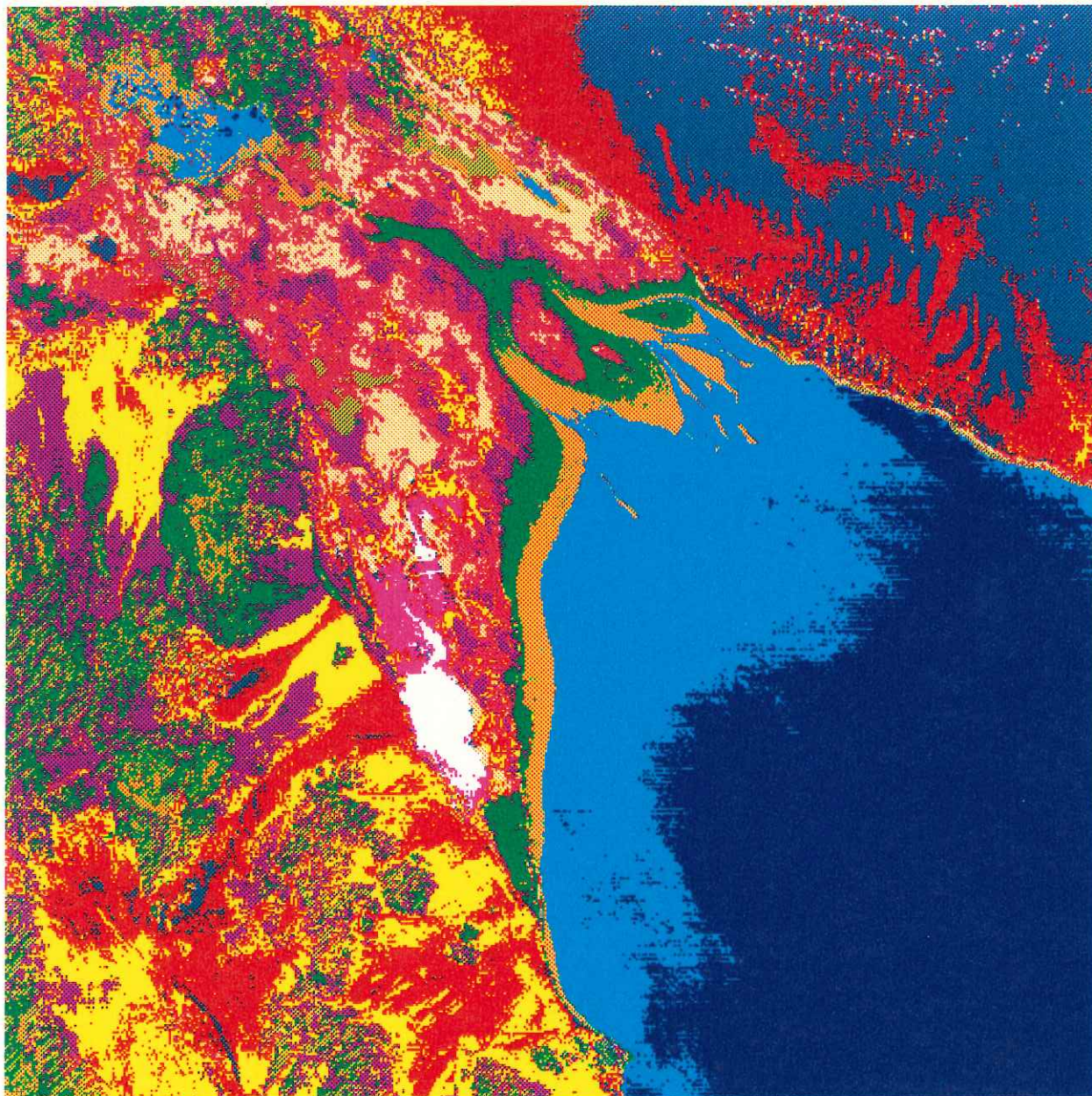


Lámina V.- Mapa temático generado a partir de procesos de clasificación no-supervisada sobre el juego de datos multitemporal (verano/invierno).

4.3- Análisis de Componentes Principales.

En la Tabla 4-I se presenta la matriz de correlación para el bloque multitemporal de ocho bandas (verano/invierno). Se observa una alta correlación existente entre las cuatro bandas de verano (4-5, 5-6, 6-7) generada por la alta reflectividad en los cuatro canales espectrales, y como consecuencia del estado seco del terreno. Sin embargo, las bandas de verano muestran un marcado distanciamiento en correlación con respecto a las bandas de invierno; esto, debido a diferencias en iluminación y grado de humedad.

Por otra parte, las bandas de invierno muestran entre sí una alta correlación entre bandas visibles (4-5), y una alta correlación entre bandas infra-rojas (6-7), existiendo una baja correlación entre bandas visibles e infra-rojas debido a la absorción del infrarrojo por el terreno húmedo.

El análisis de componentes principales permite realzar las zonas de alta y baja correlación mediante transformaciones de la información espectral. En la Tabla 4-II se muestran los eigenvectores del análisis de componentes principales efectuado sobre el bloque multitemporal de ocho bandas. Después de un análisis visual de las ocho componentes, se eligieron las primeras tres, mismas que explican en conjunto el 97.26% de la varianza total.

La primera componente está altamente influenciada por las bandas de verano, esta transformación da origen a una imagen en la que predominan las características fotomórficas de verano. Debido a su alto contenido de información (alrededor del 76%) a ésta, se le denomina "componente de brillo" y es empleada comúnmente en fotointerpretación.

**Tabla 4-I.-** Matriz de correlación para el conjunto de ocho bandas, julio 11 de 1979 (verano) y enero 16 de 1980 (invierno).

		V E R A N O				I N V I E R N O			
		MSS4	MSS5	MSS6	MSS7	MSS4	MSS5	MSS6	MSS7
I N V I E R N O	MSS4	1.000	0.887	0.857	0.799	0.553	0.563	0.538	0.459
	MSS5	0.887	1.000	0.966	0.942	0.425	0.473	0.472	0.410
	MSS6	0.857	0.966	1.000	0.975	0.405	0.455	0.464	0.400
	MSS7	0.799	0.942	0.975	1.000	0.335	0.403	0.428	0.383
V E R A N O	MSS4	0.553	0.425	0.405	0.335	1.000	0.965	0.881	0.769
	MSS5	0.563	0.473	0.455	0.403	0.965	1.000	0.949	0.862
	MSS6	0.538	0.472	0.464	0.428	0.881	0.949	1.000	0.951
	MSS7	0.459	0.410	0.400	0.383	0.769	0.862	0.951	1.000

**Tabla 4-II.-** Análisis de componentes principales para el juego de datos multitemporal (ocho bandas). El renglón inferior contiene los porcentajes de contribución para cada componente.

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	
VERANO	MSS4	0.408	-0.031	-0.788	-0.354	0.275	0.088	0.030	0.031
	MSS5	0.528	-0.233	-0.012	0.042	-0.811	0.074	0.011	-0.048
	MSS6	0.503	-0.246	0.235	0.171	0.334	-0.691	-0.047	0.101
	MSS7	0.392	-0.231	0.404	0.034	0.386	0.686	-0.011	-0.099
	MSS4	0.158	0.391	-0.191	0.528	0.050	0.010	-0.412	-0.578
	MSS5	0.222	0.514	-0.033	0.386	-0.009	0.156	0.089	0.710
	MSS6	0.217	0.498	0.194	-0.220	0.006	-0.104	0.690	-0.363
INVIERNO	MSS7	0.162	0.408	0.291	-0.605	-0.065	-0.057	-0.585	0.081
	% Info.	75.620	18.369	3.268	1.362	0.807	0.289	0.170	0.115

La segunda componente enfatiza las diferencias verano-invierno y por lo tanto, es empleada como patrón de referencia en la delimitación de fronteras entre los principales sistemas geomorfológicos a nivel regional. La Lámina VI muestra la transformación de los datos a su segunda componente principal. Los tonos extremos (claros y oscuros) denotan las áreas de máxima variabilidad; mientras que las tonalidades intermedias (grises) corresponden a zonas que han permanecido estables. Esta imagen revela claramente la existencia de cuatro zonas, las cuales están asociadas a provincias geomórficas definidas en función de los procesos operantes en la región (ver Figura 4.2). La zona I corresponde a la región sujeta a inundaciones y delimita el ambiente de planicie deltaica. La zona II comprende el desierto Bajacaliforniano incluyendo la región de San Felipe y Sierra El Mayor. La zona III conforma la parte sureste del desierto sonorense y la zona IV corresponde a la desembocadura del Río Colorado y parte del extremo norte del Golfo de California. El área de meandros a la altura del Hardy (Figura 4.1) y los campos agrícolas en la parte norte de la imagen no fueron tomados en cuenta para este análisis.

La segunda componente además de servir como medio de segmentación en la imagen, resultó ser una excelente herramienta fotointerpretativa, debido a su nivel de resolución en estructuras finas, como por ejemplo: los cordones de cheniers y la delimitación de zonas intermareales en la costa Bajacaliforniana; las barras arenosas y patrones de drenaje en la costa del Golfo de Santa Clara, y el relieve topográfico y patrones de disección por arroyos en el

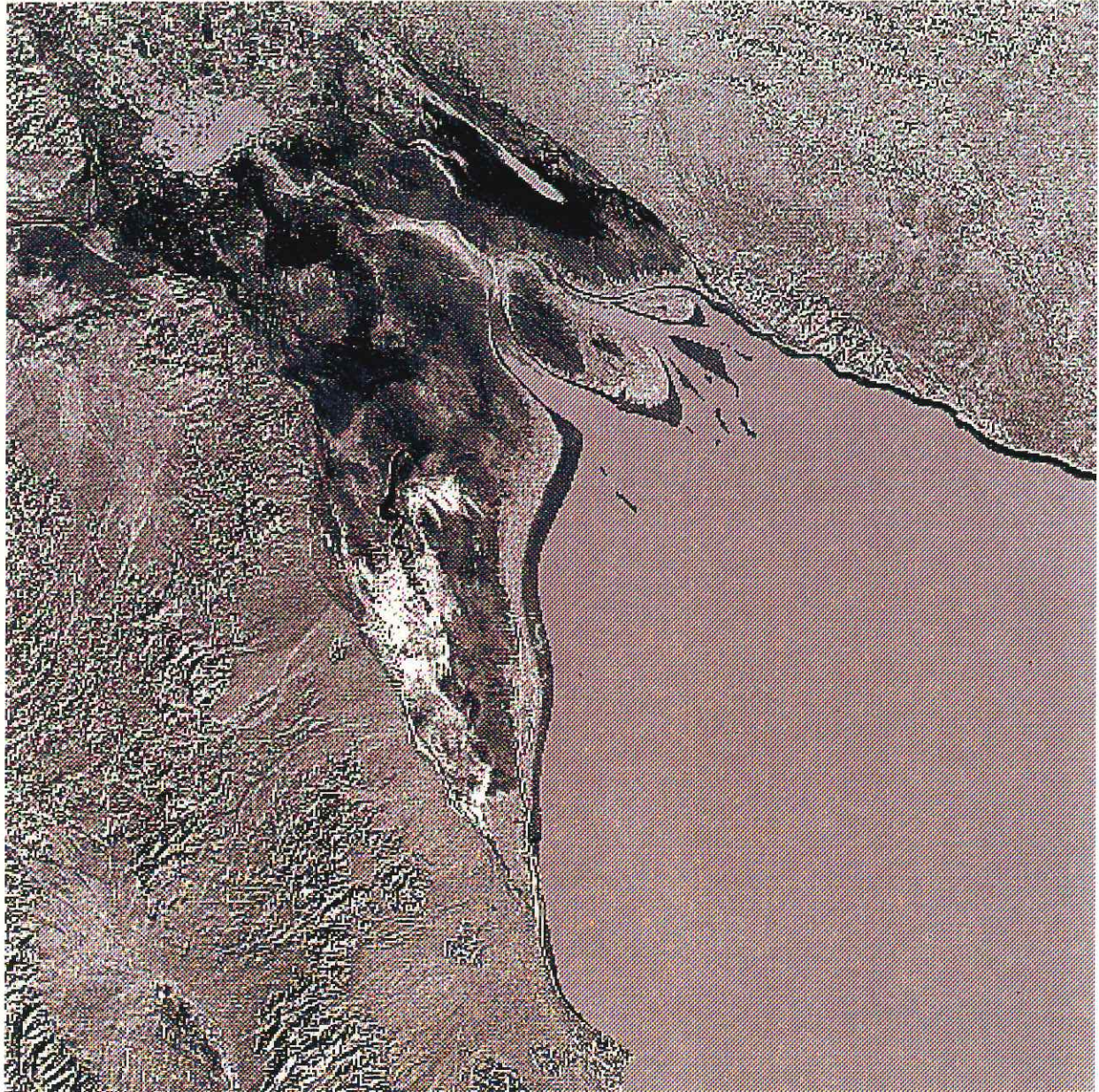
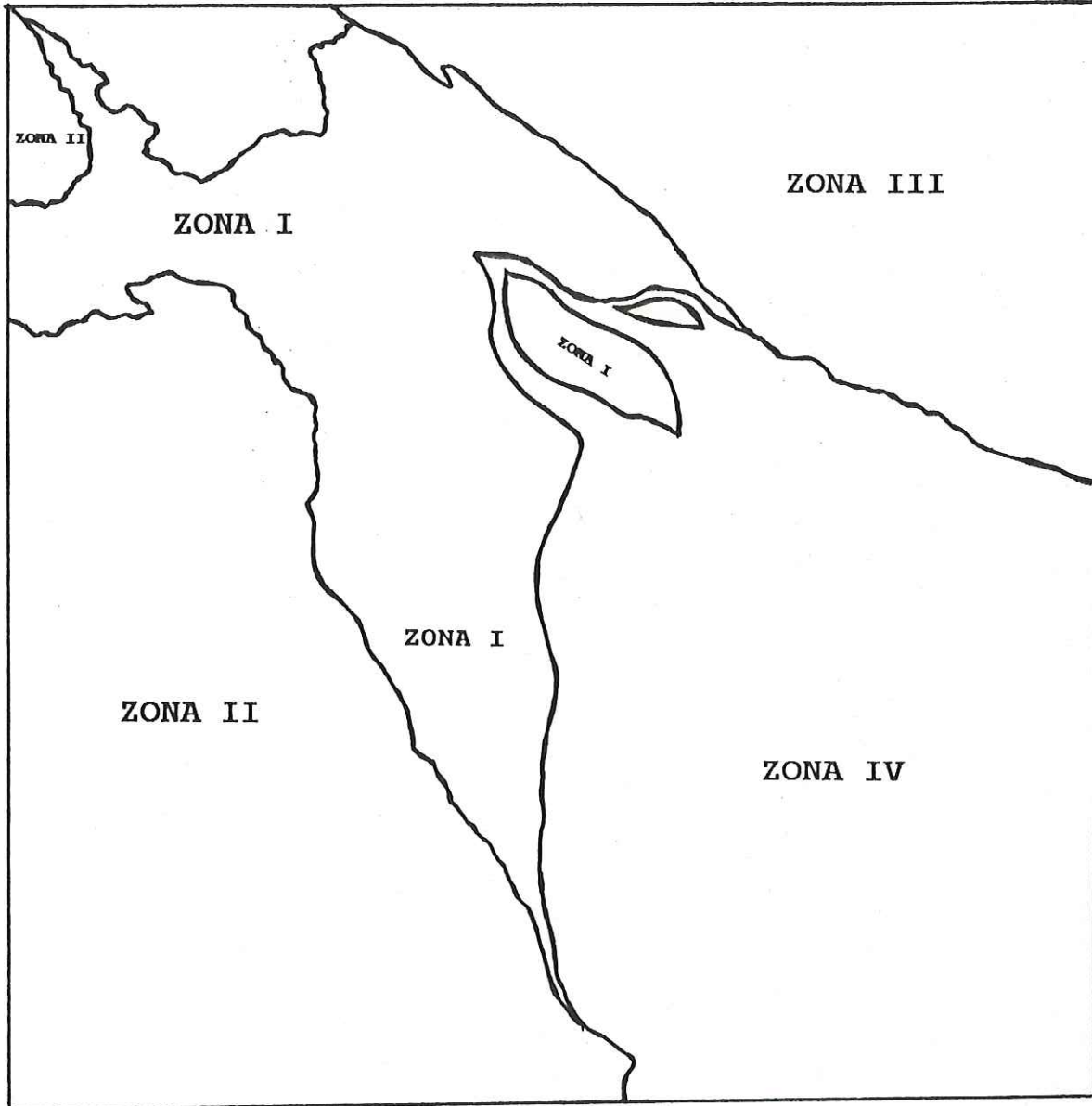


Lámina VI.- Transformación del juego de datos multitemporal a su segunda componente principal (consultar texto).



**Figura 4.2.-** Regionalización geomorfológica con base en la interpretación de la segunda componente principal del juego de datos multitemporal. La zona I corresponde a la región sujeta a inundaciones (planicies lodosas). La zona II está conformada por los desiertos de Baja California (cuencas y cordilleras). La zona III comprende la mesa arenosa del desierto sonorense y la zona IV incluye la desembocadura del estuario y el extremo noroeste del Golfo de California.

desierto Bajacaliforniano. Además del aporte en información textural para las áreas continentales.

Con respecto a la tercera componente principal, esta realza las diferencias reflectivas entre bandas visibles e infra-rojas, mostrando una mayor contribución por parte de las bandas de verano y un gradiente de reflectividad inverso sobre la planicie de inundación. Estos datos fueron procesados digitalmente con el objeto de producir la imagen que se muestra en la Lámina VII. En esta, la aplicación de filtrado direccional produce un efecto de iluminación sobre la planicie deltaica, generando un "relieve sintético" del terreno a partir de información espectral. Entre otras topoformas, destaca una depresión longitudinal a lo largo de la planicie deltaica en el tramo El Lodo - Laguna Ometepe, la cual, mantiene una estrecha relación con la zona de inundación mostrada en la Lámina IV. Otras estructuras observables son las cadenas de cheniers en la costa Bajacaliforniana; una depresión en la zona de meandros de El Hardy; el complejo de barras emergentes en la boca del estuario, y un prominente lineamiento recto a lo largo del vaso de Laguna El Indiviso, asociado a la Falla Cerro Prieto. La cual, forma parte del Sistema Cerro Prieto-Imperial; uno de los tres principales grupos de fallas activas en la región (Suárez-Vidal et al., 1991). Para tener una idea del nivel de resolución que el algoritmo puede tener en la detección de estructuras; el punto ubicado al este de San Felipe corresponde a la Roca Consag.



Lámina VII.- Transformación del juego de datos multitemporal a su tercera componente principal (consultar texto).

#### 4.4- Clasificación de Unidades Geomórficas.

La Lámina VIII corresponde a la zona I (planicie deltaica) y representa un mapa temático generado mediante un proceso de clasificación supervisada sobre las cuatro bandas de verano y la segunda componente principal, utilizando un algoritmo de máxima similitud. La zona intermareal (ver Figura 1.3) se subdivide en dos regiones: (1) zona intermareal inferior (color amarillo ocre) desde el límite de bajamar media inferior hasta aproximadamente el nivel medio del mar, y (2) zona intermareal superior (color verde) que cubre desde el nivel medio del mar hasta los cordones de cheniers en el límite de marea alta superior; incluye las zonas de esteros y las planicies de inundación a lo largo de las márgenes del canal estuarino.

La región de planicies supramareales (Figura 1.3) está codificada en color violeta, incluye las zonas elevadas (color amarillo canario) y las zonas bajas con alta cristalización de evaporitas (colores gris y blanco). Los pixeles sin clasificar se imprimieron en color negro, las regiones cubiertas por agua se codificaron en azul, y el mapa de clasificación se proyectó sobre la banda 7 para dar un mayor realce visual a la escena.

La Lámina IX representa un mapa de clasificación supervisada de la zona II utilizando la banda 7 de verano, la segunda componente principal y los valores de relieve y pendiente generados a partir del modelo digital del terreno. El mapa temático ha sido proyectado sobre el modelo digital del terreno con la finalidad de enfatizar el efecto de la topografía en la clasificación. El color azul delimita las regiones con alto relieve y alto grado de pendiente, lo

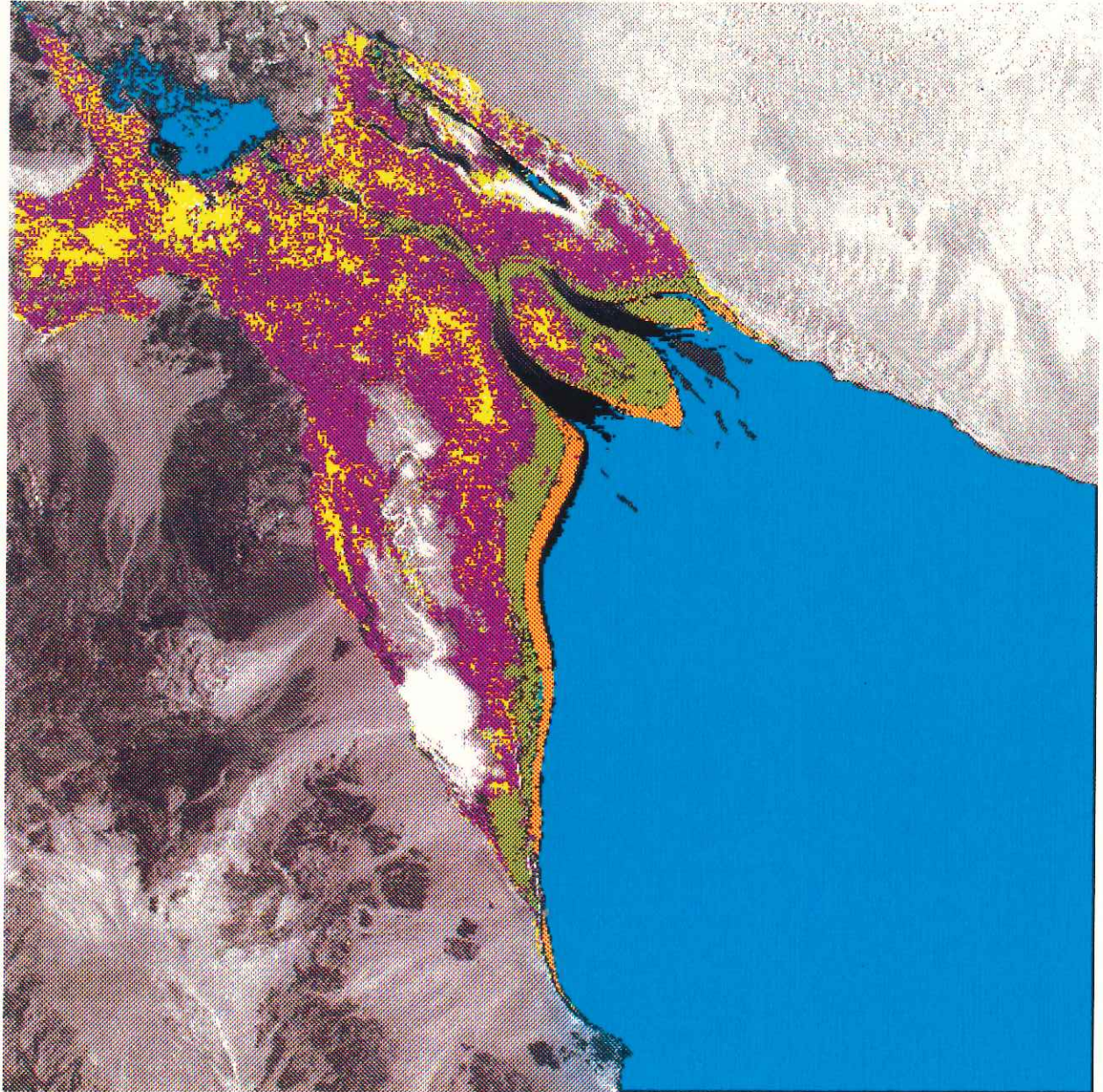


Lámina VIII.- Mapa temático generado mediante un proceso de clasificación supervisada sobre las cuatro bandas de verano y la segunda componente principal, utilizando un algoritmo de máxima similitud (zona I).

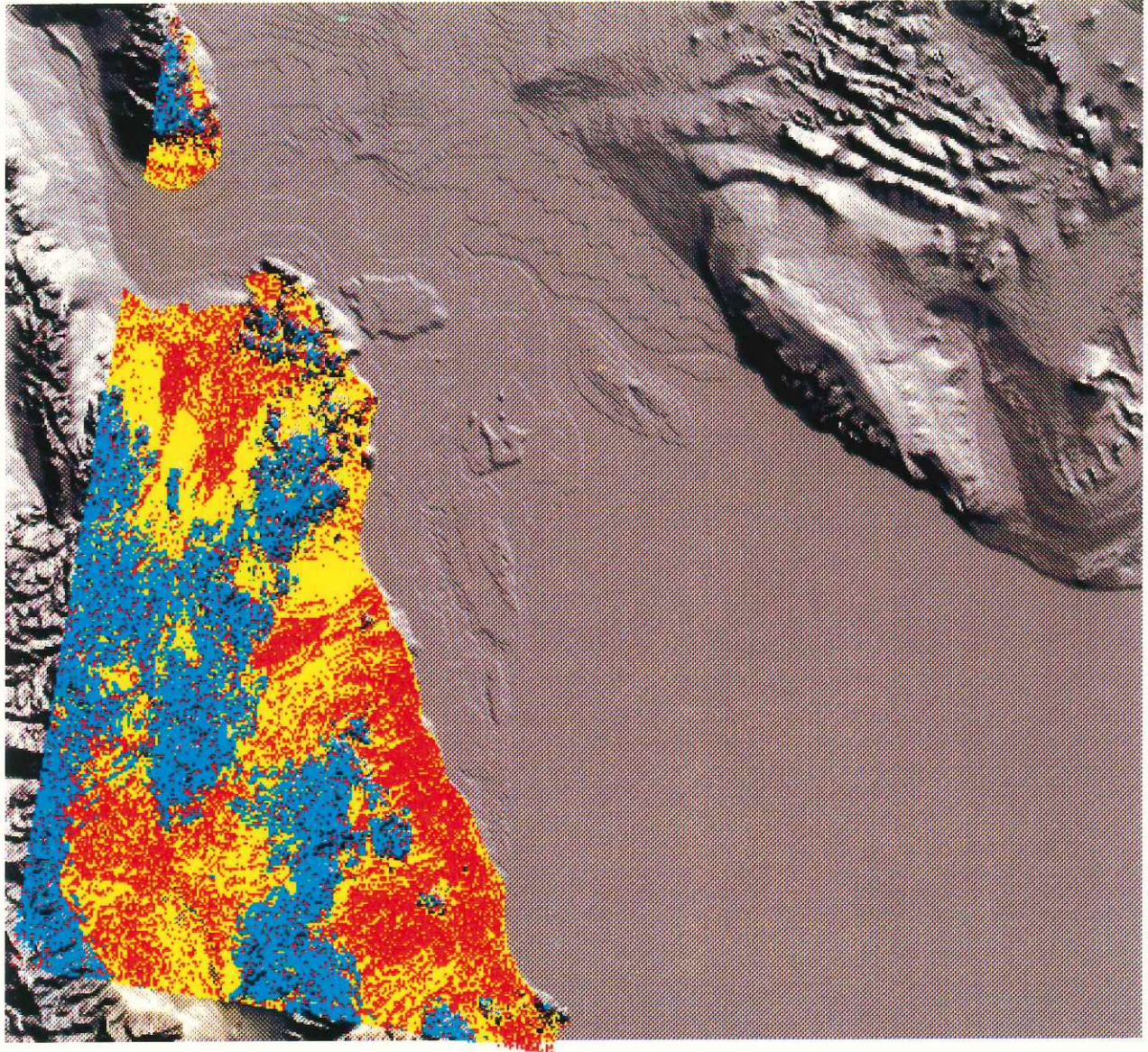


Lámina IX.- Mapa temático generado mediante un proceso de clasificación supervisada, utilizando la banda 7 de verano, la segunda componente principal y los valores de altura y pendiente del modelo digital del terreno (zona II).

cual es característico de las zonas donde aflora el basamento rocoso. La cobertura restante de la zona II corresponde a las planicies aluviales de piemonte, conformadas por dos grupos geomórficos principales: (1) topoformas asociadas a niveles altos de energía y flujo de material (abanicos aluviales y arroyos) codificados en rojo, y (2) topoformas relacionadas con zonas relativamente estables, donde predominan los procesos deflacionales (depósitos de hamada y de serir) formando pavimentos de desierto (color amarillo).

La zona III presentó algunas dificultades en la elección de sitios de entrenamiento para análisis supervisado. Esto se debió al limitado contenido de información presentada en las cartas geológicas y topográficas, y al relieve relativamente bajo de la región. Para este caso, se optó por un esquema no-supervisado basándose en las propiedades reflectivas de la banda 7 y los atributos texturales de la segunda componente principal. Utilizando el algoritmo ISOCLAS, éste se programó para la búsqueda de 10 clases espectrales en un proceso de 60 iteraciones; convergiendo el algoritmo en la iteración 31 y detectando un total de 6 clases. La Lámina X muestra el resultado de este análisis, del que se infieren tres tipos principales de terreno codificados en amarillo, rojo y azul. Las tres clases espectrales restantes (verde, café y blanco) estuvieron asociadas a zonas de baja reflectividad en regiones sombreadas (campos de dunas y patrones de drenaje). El color amarillo en el extremo superior izquierdo corresponde a una zona de transición caracterizada por áreas de depósitos evaporíticos (planicie costera) y vegetación desértica (mesa arenosa). El color rojo representa las áreas donde predominan los

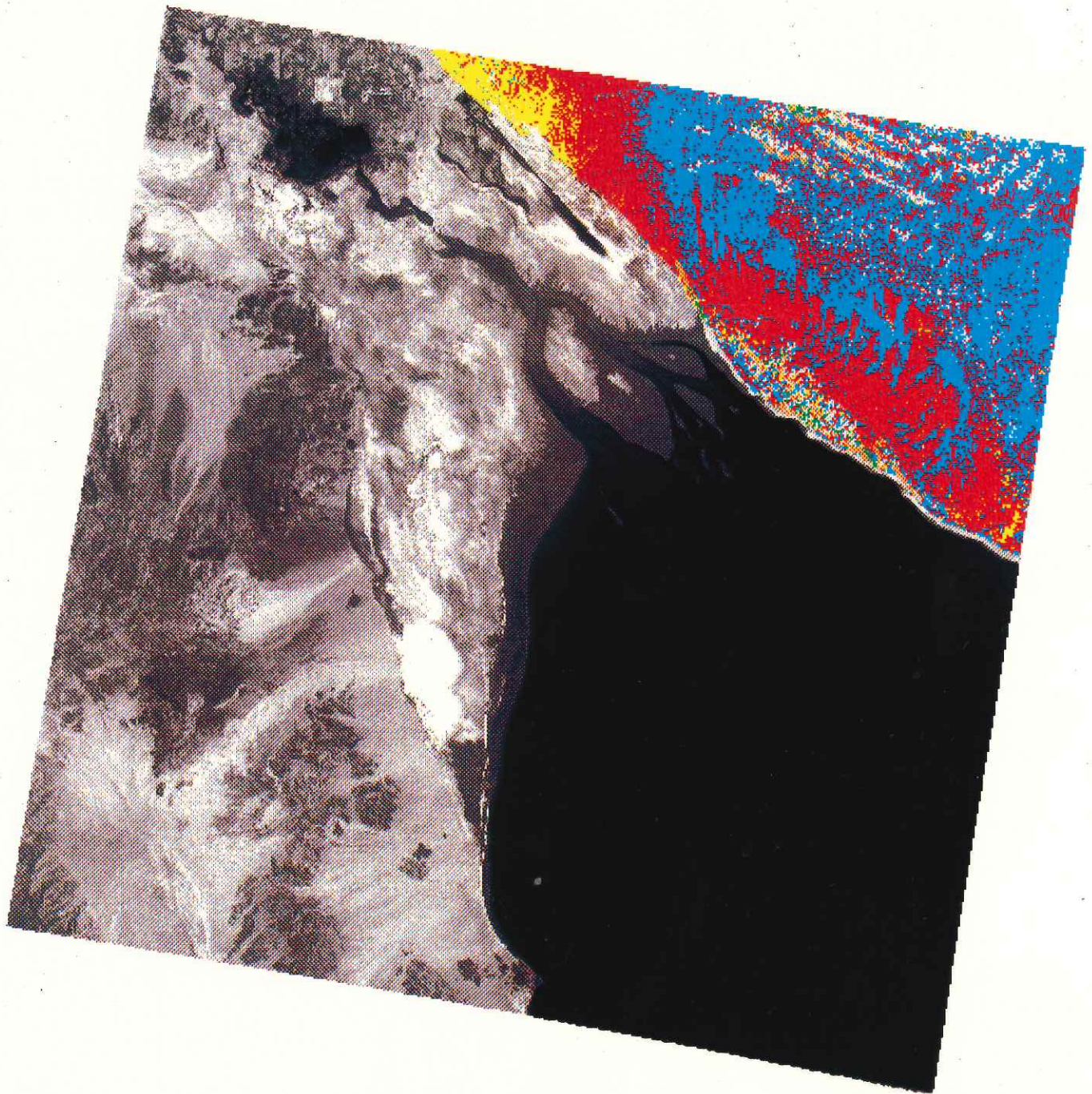


Lámina X.- Mapa temático generado mediante un proceso de clasificación no-supervisada, basandose en la banda 7 de verano y atributos texturales de la segunda componente principal (zona III).

procesos deflacionales, incluyendo zonas de pavimentos desérticos Hayden (1986), y carpetas de arena (sand sheets) intercaladas con depósitos de *Zibar* (Lancaster et al., 1987). El color azul corresponde a un área influenciada por procesos depositacionales o de acumulación de sedimento, caracterizada por una zona con varias hileras de dunas en estrella; intercaladas por dunas regresivas en las zonas de interduna (Lancaster et al., 1987). Las cadenas de dunas y la zona de malpaís adyacente a la costa pueden ser identificados, no obstante el nivel de confusión espectral que presentan como consecuencia del efecto topográfico en la iluminación. Fryberger (1979) menciona que la morfología de estas dunas es determinada, en gran parte, por la variación del régimen de vientos. En apoyo a esto, Lancaster et al. (1987) encontraron que estas cadenas de dunas están alineadas paralelamente al vector resultante del campo de vientos, los cuales corren en dirección Norte y Noroeste.

#### 4.5- Morfología de la Zona Submareal.

Las técnicas de Percepción Remota permiten el análisis indirecto de objetos o procesos observados a distancia. Esto es válido siempre y cuando se tenga una buena conceptualización acerca de la naturaleza de los procesos que ocurren en la zona de estudio, así como de la forma en que los datos son procesados e interpretados. De otra manera, el análisis se fundamentaría en aspectos puramente subjetivos y los resultados corren el riesgo de caer en terreno de la especulación.

Aplicaciones del sensor Landsat MSS al reconocimiento batimétrico en zonas costeras han sido reportadas por Fleming y Lelievre (1977), Cracknell et al. (1982) y Bullard (1983), entre otros. Sin embargo, debido a que estos métodos se basan en los niveles de penetración de las bandas visibles en la columna de agua, su aplicación se restringe a cuerpos de agua relativamente claros. En el presente estudio, la alta concentración de material en suspensión (Cupul y Carriquiry, 1992) imposibilitaría un análisis similar.

En la Tabla 4-III se muestran los resultados del análisis de componentes principales efectuado para la zona IV (Figura 4.2) en las bandas espectrales de verano. Del análisis de esta Tabla se infiere lo siguiente:

- a) La primera componente (portadora del máximo de información, 79%) está orientada en dirección del máximo de variabilidad de los datos. Por consiguiente, permite detectar estructuras no discernibles en los datos originales.
- b) Los valores en las cargas de los coeficientes de la primera componente sugieren un alto grado de contribución por parte de las bandas visibles (4 y 5), implicando con esto que la señal proviene de material en suspensión en la columna de agua.
- c) Los valores en las cargas de los coeficientes de la primera componente indican un nivel muy bajo de contribución por parte de las bandas infrarrojas (6 y 7) y por lo tanto se asume que este material no se encuentra muy cercano a la superficie.

**Tabla 4-III.-** Análisis de componentes principales para el juego de datos de verano (1979).  
 El renglón inferior contiene los porcentajes de contribución para cada componente.

	CP1	CP2	CP3	CP4
MSS4	0.618	-0.658	-0.429	0.043
MSS5	0.698	0.224	0.638	-0.236
MSS6	0.330	0.543	-0.286	0.717
MSS7	0.150	0.472	-0.572	-0.654
% Info.	79.010	15.450	4.480	1.060

Por otra parte, la imagen de verano corresponde a una etapa de bajo aporte fluvial y por tanto, la pluma que se observa en la Lámina I debió ser producida por efecto de resuspensión en el fondo causado por la corriente de marea, la cual en este momento se encontraba en el punto más bajo del refluo (Gonzalez, 1994). En base a esto, se puede argumentar que la transformación de los datos a su primera componente principal producirá una imagen cuya estructura estará íntimamente relacionada con la distribución de material resuspendido, y por lo tanto, la distribución de estas estructuras estará relacionada a la morfología del fondo.

La Lámina XI muestra el resultado de la primera componente principal (posterior a un suavizado), desafortunadamente la alta contribución de las bandas visibles impone el efecto de "bando" característico en ellas. Un vistazo a las Figuras 1.3 y 1.4 permitirá apreciar su semejanza con la morfología propuesta por Thompson (1968); pudiéndose observar la zona submareal, la terraza submarina y la zona de barras mareales en la desembocadura del estuario (inclusive el trazo de los canales submarinos). Es necesario señalar que los resultados mostrados en la Lámina XI no tienen ningún significado batimétrico directo, sin embargo, representan el comportamiento de un proceso sedimentario que está íntimamente relacionado con la morfología del fondo.



Lámina XI.- Transformación de las cuatro bandas de verano a su primera componente principal (zona IV).

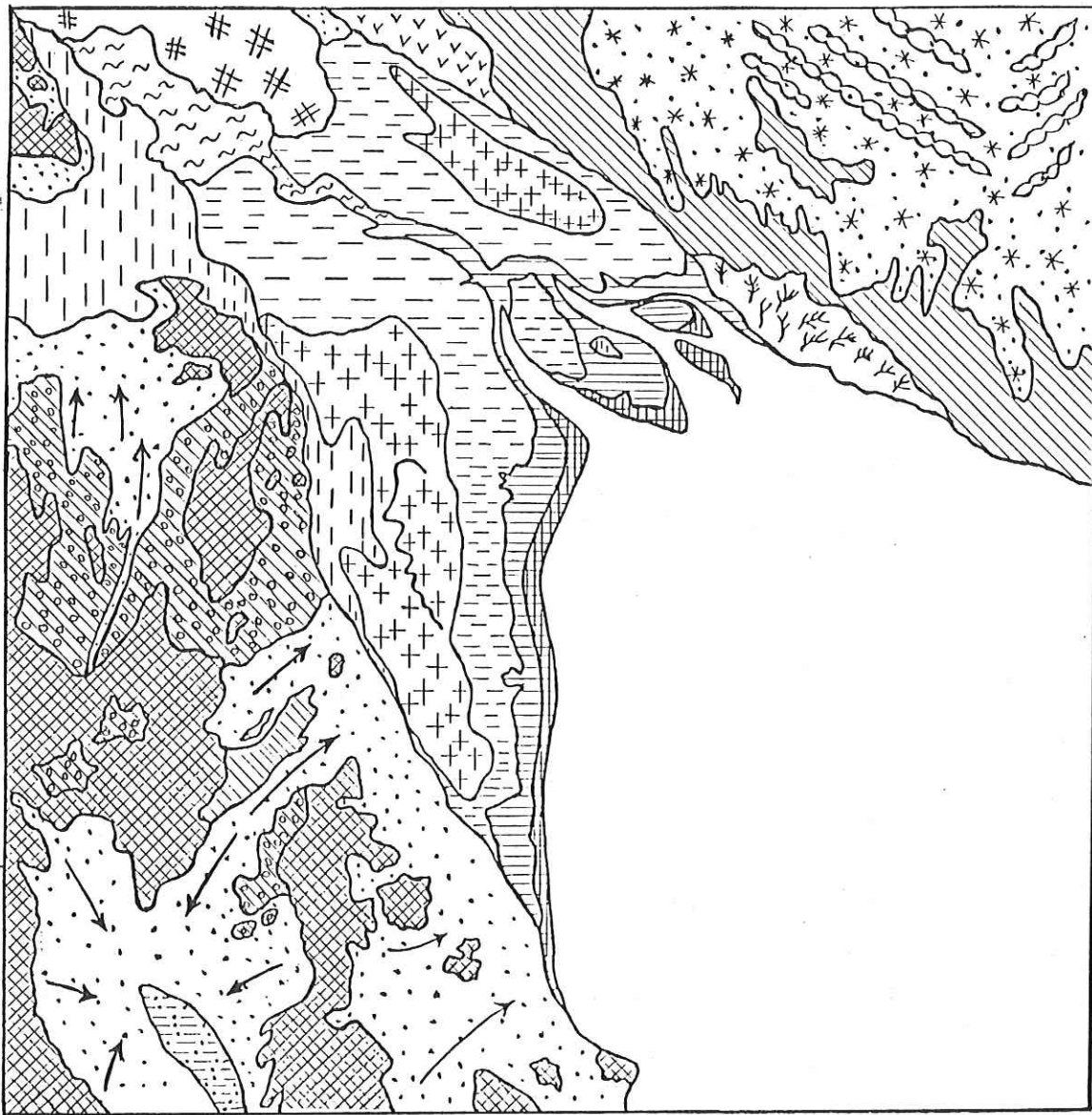
#### 4.6- Síntesis Regional del Análisis Geomórfico.

Con la finalidad de integrar los resultados obtenidos en las secciones anteriores, la Figura 4.3 presenta un modelo esquemático en el que se describe la distribución espacial y los límites entre las principales unidades geomórficas que conforman los distintos ambientes (costero, deltaico y desiertos continentales). En este esquema (Figura 4.3), se propone un modelo geomórfico preliminar, cuyo enfoque está más orientado al contexto morfogenético que al estructural. Aunque el presente modelo mantiene ciertas similitudes con otros modelos geomórficos definidos anteriormente (Thompson, 1968; Stone et al., 1973; Meckel, 1975 y Hayden, 1986), éste ofrece ventajas adicionales, debido a que su enfoque es más específico en el contexto de los procesos sedimentarios.

El nivel de complejidad en la región deltaica del Río Colorado obedece al hecho de estar ubicada en la intersección de cuatro sistemas geomórficos diferentes (zonas I, II, III y IV, Figura 4.2). En lo concerniente a la parte central (zona I), ésta corresponde a un ambiente eminentemente deltaico, donde los principales procesos geomórficos activos son:

- a) -El retrabajo de material clástico debido a corrientes de marea y al oleaje moderado en un ambiente intermareal de costa protegida.
- b) -Los procesos de desecación y cristalización de evaporitas en un ambiente de planicie supramareal.

Este sistema está compuesto por al menos cinco unidades geomórficas diferentes (ver Figura 4.3), las cuales a su vez contienen estructuras de menor tamaño como: cordones de

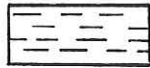


**Figura 4.3.-** Modelo geomorfológico para la región deltaica inferior del Río Colorado, en el que se muestra la distribución espacial y límites de las principales unidades geomórficas que lo componen. Este modelo ha sido conceptualizado en base a la regionalización morfológica presentada en la Figura 4.2 y al análisis individual de cada una de sus subdivisiones (excepto la zona IV). Consúltese la sección 4.4, para una explicación del análisis de estas subdivisiones ambientales y la lista de símbolos que se muestra en la siguiente página.

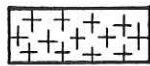
**Unidades Geomórficas**  
**ZONA I (Plano Deltaico)**



Planicie alta inactiva



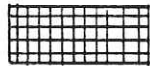
Planicie supramareal



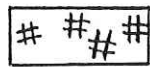
Depresión somera con depósitos evaporíticos



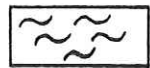
Planicie intermareal superior



Planicie intermareal inferior



Zona de cultivo



Ambiente fluvial

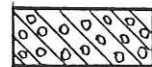
**Unidades Geomórficas**  
**ZONA II (Desierto Bajacaliforniano)**



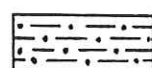
Zona de alto relieve  
Basamento rocoso



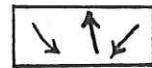
Zona de deposición  
Piemontes



Zona de erosión  
Depósitos de hamada



Depósitos de playa  
(playa lake)



Dirección de drenaje

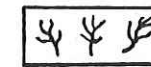
**Unidades Geomórficas**  
**ZONA III (Desierto Sonorense)**



Zona de depositación  
desierto arenoso, dunas regresivas



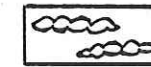
Zona de erosión  
Depósitos de serir y zibar



Zona de malpais



Depósitos evaporíticos  
con vegetación desértica



Cadenas de dunas  
en estrella

**Figura 4.3** (continuación).- Lista de las claves simbólicas utilizadas en el modelo geomorfológico. De acuerdo a la regionalización morfológica mostrada en la Figura 4.2.

cheniers, canales de marea, y una extensa planicie lodosa no vegetada; en cuyas zonas bajas se forman depósitos evaporíticos (ver Láminas VII y VIII). En relación a los modelos anteriores, el modelo aquí propuesto (Figura 4.3) presenta mejoras sustanciales en cuanto al nivel de comprensión de la morfología de esta zona; principalmente, en la especificación de los límites de sus unidades ambientales (planicie supramareal e intermareal), e inclusive, se han adicionado dos unidades más: (1) depresión o cuenca somera y (2) planicie alta inactiva.

En cuanto a las regiones desérticas continentales (zonas II y III), las unidades mostradas en el modelo de la Figura 4.3 corresponden a grupos geomórficos definidos en función del tipo de procesos sedimentarios operantes (deposición/erosión). En el flanco oeste de la cuenca, la zona II está dominada por procesos fluviales de clima árido. Las áreas de deposición están caracterizadas por *piemontes* bien desarrollados, destacando por su magnitud los Llanos El Chinero y San Felipe. Estos depósitos incluyen topofomas menores como *abanicos* y *arroyos* (*sensu* Friedman et al., 1992), no mostrados en el modelo debido a la escala de trabajo. Por otra parte, las áreas de erosión están relacionadas a depósitos de *hamada* (*sensu* Reineck y Singh, 1973), los cuales están asociados a regiones de alta disección cercanas a zonas en donde aflora el basamento rocoso. Ejemplos de estos depósitos los tenemos al sur de la Sierra Las Pintas y al norte de la Sierra San Felipe.

El Valle Santa Clara se encuentra aislado de los procesos deltaicos por la Sierra San Felipe, su ambiente corresponde al de una cuenca desértica con drenaje interior. Sedimento y agua son abastecidos por los complejos montañosos circundantes, acumulándose el material

más fino en el vaso de la cuenca, donde posteriormente el agua se evapora y se forman depósitos de *playa* (playa lake; *sensu* Friedman et al., 1992).

La zona desértica de Sonora (zona III) es dominada por procesos geomórficos de tipo deflacional. La morfología de esta zona nos indica que el Desierto de Sonora no es un sistema eólico sencillo e integrado, sino una serie de depocentros eólicos aislados y relativamente bien diferenciados, como lo han mencionado Blount y Lancaster (1990). En esta región, las zonas de acumulación se caracterizan por depósitos aluviales cubiertos por cordones de dunas en estrella (Lancaster et al., 1990), observándose un cambio en la orientación de estas cadenas originado por variaciones en el régimen de vientos. Las zonas donde predominan los procesos erosivos, se caracterizan por depósitos de *serir* (*sensu* Reineck y Singh, 1973), producto de la remoción del material fino en las capas superficiales del aluvión.

No obstante que esta región es predominantemente eólica, existen dos zonas que exhiben características especiales. Por una parte la sección comprendida entre El Golfo de Santa Clara y El Tornillal, la cual muestra evidencias significativas de erosión fluvial, conformando la franja de malpaís que se observa en la Figura 4.3. La segunda zona está ubicada al noroeste de El Doctor, y pertenece a un ambiente de transición entre la planicie de marea y la mesa arenosa, dando lugar a la formación de depósitos evaporíticos poblados por vegetación desértica.

La orientación de las barras costeras en la costa de Sonora (Lámina VI), así como la forma de la Isla Pelicano y de las barras mareales adyacentes (Lámina VII), indican una dirección predominante de transporte litoral hacia el Norte. En contraposición con la costa Bajacaliforniana, donde la orientación de la pluma sedimentaria (Lámina I) y la magnitud del depósito sedimentario en las planicies lodosas, parecen indicar que el transporte neto del material es en dirección Sur. De manera similar, mientras que el patrón dentado en la costa de Sonora (Lámina VI) indica que esta costa es erosional; la amplia costa del frente deltaico subaéreo de Baja California y la suave pendiente submarina, indican que esta costa es de tipo progradacional (Carriquiry, 1993).

Son evidentes las mejoras logradas en cuanto al conocimiento geomorfológico de la región. Esto viene como resultado de utilizar en forma óptima la información multispectral, obteniendo el máximo de provecho a través de técnicas de procesamiento digital de imágenes.

Sin embargo, no es posible establecer una relación comparativa entre el modelo geomórfico aquí desarrollado y los modelos propuestos por otros autores. Esto se debe, en parte, a que cada modelo ha sido concebido bajo diferente enfoque morfológico, además de estar conceptuados a diferentes escalas espaciales. Por ejemplo; a escalas más pequeñas (cubriendo áreas mayores), los sistemas geomórficos descritos en este modelo podrían ser vistos como subsistemas o unidades incluidas dentro de un sistema de mayor dimensión y con diferentes características geomorfológicas. Esto es; el área analizada en este estudio podría

conformar una subregión de la Cuenca de Drenaje del Río Colorado, la cual, correspondería a un ambiente fluvial enmarcado en un sistema geomorfológico eminentemente montañoso.

Por el contrario, si alguna de las unidades geomórficas identificadas en este trabajo, fuera tomada como tema de estudio para un análisis más detallado. Observaríamos que aparecen otras estructuras, las cuales definen nuevas topoformas relacionadas a procesos geomórficos de escala local.

## Capítulo 5.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

No obstante la amplia extensión del área de estudio y la complejidad de los ambientes que la componen, el nivel de clasificación geomorfológica obtenido en este trabajo incorporó a la mayoría de las unidades geomórficas descritas por otros autores (Thompson, 1968; Stone et al., 1973; Meckel, 1975 y Hayden, 1986). En general, se han identificado de manera efectiva los principales sistemas y unidades que los constituyen, particularmente aquellas que cubren áreas extensas; comprobándose con esto, la viabilidad en la aplicación de sensores remotos para el reconocimiento geomorfológico a nivel regional, y la utilización de métodos de análisis multitemporal en combinación con técnicas de clasificación.

Por otra parte, el análisis fotointerpretativo de productos obtenidos mediante técnicas de procesamiento digital, demostró potencialidad en el reconocimiento de topoformas relativamente pequeñas (en el contexto regional) como para ser identificadas por medio de técnicas de clasificación (e.g. cordones de cheniers, patrones de drenaje, lineamientos, etc.). Además, se comprobó su efectividad en la detección de estructuras que son enmascaradas por el efecto de procesos que ocurren en los ambientes de planicie costera (Lámina VII) y zona submareal (Lámina XI).

En conclusión, los resultados obtenidos en este trabajo aportan una concepción más realista sobre la estructura morfológica del área de estudio, en relación a trabajos realizados anteriormente. Habiéndose logrado los siguientes alcances:

- a) Se ha obtenido una caracterización regional de las principales subdivisiones geomorfológicas que conforman la zona de estudio (Figura 4.2).
- b) Se cuenta con una aproximación más precisa de la estructura y distribución espacial de los ambientes sedimentarios en las planicies de inundación (Láminas VII y VIII). Observando una mejora sustancial en el nivel de comprensión de la región en relación al proporcionado por material cartográfico del INEGI y los trabajos de Stone et al., (1973) y Hayden (1986).
- c) La distribución de unidades geomórficas en el desierto bajacaliforniano (Lámina IX) mostró bastante congruencia con las cartas geológicas del INEGI y con los resultados de Hayden (1986). Sin embargo, estas cartas son demasiado generales para la región desértica de Sonora, habiéndose superado esta situación mediante la identificación de las unidades geomórficas mostradas en la Lámina X.

- d) Se obtuvo una primera aproximación a la configuración morfológica de la región submareal (Lámina XI), la cual es poco conocida debido a la escasez de datos batimétricos. Ganando además, conocimiento acerca de la estructura de la pluma sedimentaria en la desembocadura del Río Colorado.
  
- e) Se cuenta con un modelo mejorado de la geomorfología regional (Figura 4.3), en el cual, se describen las principales unidades geomórficas en el contexto de los procesos sedimentarios operantes en la región.

Además de la relevancia que los procesos sedimentarios tienen en la zona, resulta evidente la influencia que la tectónica regional ejerce sobre su morfología. Misma que actúa como mecanismo de control en la distribución de sus ambientes sedimentarios. El Sistema San Andrés, es una de las megaestructuras más importantes y ampliamente estudiadas en el mundo. Esta engloba, dentro de su marco estructural, a diferentes provincias tectónicas entre las que se cuenta el Sistema San Andrés-Golfo de California.

El delta inferior del Río Colorado, en conjunto con la depresión del Salton, forma parte de éste sistema y representa una de sus últimas expresiones geomórficas subaéreas, antes de ocultarse bajo las aguas del Golfo de California. En este sentido, es importante

continuar este tipo de estudios con la finalidad de conocer con más detalle la geomorfología regional, lo cual haría posible generar modelos que ayudaran a explicar los mecanismos sedimentarios y/o tectónicos que controlan la región. Con esta finalidad se hacen las siguientes recomendaciones:

- a) Extender este tipo de estudios hacia regiones aledañas, con el objeto de obtener una perspectiva que permita el análisis de las topoformas ya identificadas en relación a estructuras de mayor tamaño.
- b) Seleccionar zonas de estudio estratégicas con la finalidad de concentrar atención y esfuerzos en el estudio a detalle de estructuras que ayuden a comprender el marco estructural regional.
- c) Apoyarse en información adicional; fotografía aérea, información geofísica y otro tipo de sensores remotos. Así como intensificar muestreos y observaciones de campo.
- d) Hacer énfasis en el empleo de metodologías cuantitativas, con el objeto de poder evaluar la magnitud y cobertura de parámetros observados en el campo y obtener así, una aproximación aún más cercana a la realidad.

En el campo de la ciencia aplicada, la justificación a estudios de este tipo se respalda en el área de la administración y conservación de recursos naturales. La información de sensores remotos conforma, en parte, las bases de datos sobre las que operan los Sistemas de Información Geográfica. Por lo tanto, se está a tiempo de crear infraestructura, en forma de inventarios temáticos, sobre las características del terreno y de los recursos en zonas susceptibles a explotación. En el corto a mediano plazo, el empleo de este tipo de sistemas será común en el monitoreo de los ambientes costeros, facilitando el análisis y la toma de decisiones adecuadas, para un manejo más eficiente y un aprovechamiento racional de los recursos.

## REFERENCIAS CITADAS.

- Ahern, F.J., D.G. Goodenough, S.C. Jain, V.R. Rao and G. Rochon. (1977). Landsat atmospheric corrections at CCRS., In Proceedings of the IV Canadian Symposium of Remote Sensing., Quebec City, pp 583-595.
- Ball, G.H. and D.J. Hall. (1965) A novel method of data analysis and pattern classification. Stanford Research Institute, Menlo Park, Ca.
- Blount, G. and N. Lancaster (1990). Development of the Gran Desierto sand sea, northwestern Mexico. *Geology* 18:724-728.
- Bullard, R.K. (1983). Detection of marine contours from Landsat film and tape. In: Cracknell, A.P. (Ed). Remote sensing applications in marine science and technology. Dordrecht, D. Reidel, p 373-381.
- Carriquiry, J.D., C. Zamora y A.L. Cupul. (1992). Patrones de sedimentación del seston en la desembocadura del Río Colorado, México. IV Congreso de la Asociación de Investigadores del Mar de Cortés. U.A.B.C.
- Carriquiry, J.D. (1993). Dinámica de sedimentación en el Delta del Río Colorado. II Reunión Int. Geología Peninsular. Sociedad Geológica Peninsular.
- Castleman, K.R. (1979). Digital image processing., Prentice-Hall, N.Y.

- Coleman, G.R. and H.C. Andrews. (1979). Image segmentation by clustering., Proc. IEEE, 67, 773-785.
- Cracknell, A.P., N. MacFarlane, K. MacMillan, J.A. Charlton, J. McManus and K.A. Ulbricht. (1982). Remote sensing in Scotland using data received from satellites. A study of the Tay Estuary region using Landsat multispectral scanning imagery. Int. J. Rem. Sens. vol 3:113-137.
- Cupul, M.A.L. y J.D. Carriquiry. (1992). Flujos de material en la desembocadura del Río Colorado durante mareas muertas. IV Congreso de la Asociación de Investigadores del Mar de Cortés. U.A.B.C.
- Curcio, J.A. (1961). Evaluation of atmospheric aerosol particle size distribution from scattering measurement in the visible and infrared., J. Opt. Soc. Am. vol 51:548-551.
- Demek, J. (1972). (Ed.), Manual for Detailed Geomorphological Mapping, 320 pp., IGU Comission on Geomorphic Survey and Mapping, Academia, Prage.
- Demek, J. (1982). Geomorphological mapping: progress and problems. In: Perspectives in Geomorphology, Vol. III-Applied Geomorphology, H.S. Sharma (Ed.), Concept Publishing Co., New Delhi, India.
- Dinnel, S.P., W.W. Schroeder and W.J. Wiseman Jr. (1990). Estuarine-shelf exchange using Landsat images of discharge plumes. Jour. Coast. Res. vol. 6(4):789-799.

- Duda, R.O. and P.E. Hart. (1973). Pattern classification and scene analysis., Wiley, N.Y.
- Fairbridge, R.W. (1968). Kara-Bogaz-Gulf. In: Fairbridge R.W. (Ed.) Encyclopedia of Geomorphology, Reinhold Book Corp., New York.
- Fleming, E.A. and D.D. Lelievre. (1977). The use of Landsat imagery to locate uncharted coastal features on the Labrador coast. Proc. 11th. Int. Symp. on Rem. Sens. of Env., Michigan, April 1977 p:775-782.
- Franklin, S.E. (1987). Terrain analysis from digital patterns in geomorphometry and Landsat MSS spectral response. Photogramm. Eng. and Rem. Sens. vol. 53(1):59-65.
- Friedman, G.M., J.E. Sanders and D.C. Kopaska-Merkel, (1992). Principles of Sedimentary Deposits. - Stratigraphy and Sedimentology. Macmillan Pub. Co., 717pp.
- Fryberger, S.G. (1979). Dune forms and wind regime. In: Mckee E.D. (ed), A Study of Global Sand Seas. USGS Prof. Paper, 1052: 137-170.
- García de B. G. y M. Larroque. (1973). Geología (Partículas en suspensión). En: Estudio químico sobre la contaminación por insecticidas en la desembocadura del Río Colorado, Tomo II, Sección III. Universidad Autónoma de Baja California. Rep. a la Dir. de Acuacultura, S.R.H. Ensenada B.C. p:201-234.
- Gastil, R.G., R.P. Phillips, E.C. Allison. (1975). Reconnaissance geology of the State of Baja California. Geol. Soc. of Amer. Inc., Boulder, Colorado.
- Giddings, L.E. (1980). México desde el espacio. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, Xalapa, Veracruz.

- Gonzalez, N.J.I. (1994). Comunicación personal. Red Mareográfica. Departamento de Oceanografía. Física. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), México.
- Gonzalez, R.C. and R.E. Woods (1992). Digital image processing. Addison-Wesley.
- Gorsline, D.S. (1967). Sedimentologic studies of the Colorado Delta. Report Number USC GEOL 67-1, Office of Naval Research, Geography Branch, Washington, D.C.
- Harker, G.R. (1977). Flood-plain delineation using multispectral data analysis., Photogramm. Eng. and Rem. Sens., 43:1, pp 81-87.
- Hayden, R.S. (1986). Geomorphological mapping. In: Short N.M. and R.W. Blair (Eds). Geomorphology from space: a global overview of regional landforms. NASA Scientific and Technical Information Branch. Washington, D.C.
- Howart, P.J. and G.M. Wickware (1981). Procedures for change detection using Landsat digital data., Int. Jour. of Rem. Sens., 2:3, pp 277-291.
- Hunt, G.R. (1980). Electromagnetic Radiation: The communication link in remote sensing. In: Siegal B.S. and A.R. Gillespie (Ed), Remote Sensing in Geology. John Wiley & Sons, New York.
- Jacobsen, N.K. and T.S. Nielsen. (1991). Remote sensing and geo-ecological studies of the Danish Wadden Sea. Sea Classification and mapping of landscape elements in a tidal area by means of remote sensing, Spot images: a preliminary report. In: Elliott M. and

- J.P. Ducrottoy (Ed), Estuaries and Coasts: Spatial and Temporal Intercomparisons. p:69-75. Olsen & Olsen.
- Kennie, T.J.M. and M.C. Matthews. (1985). Remote sensing in civil engineering. Halsted Press, John Wiley & Sons, New York.
- Lancaster, N., R. Greeley and P.R. Christensen, (1987). Dunes of the Gran Desierto Sand-Sea, Sonora, Mexico. Earth Surface Processes and Landforms, 12:277-288.
- Longwell, C.R. (1954). History of the lower Colorado River and the Imperial depression: Calif. Div. Mines Bull., vol. 170:53-56.
- McKee, F.D. (1939). Some types of bedding in the Colorado River Delta. Jour. of Geology, vol. 47:64-81.
- Meckel, L.D. (1975). Holocene sand bodies in the Colorado Delta area, Northern Gulf of California. In: Deltas, Models for Exploration: Houston Geol. Soc., p:239-265.
- Miyogi, D., S.K. Sarkar, and S. Mallick (1970). Geomorphic mapping in the plains of West Bengal, India. Selected Papers, Vol I- Physical Geography, pp. 89-94. XXI International Geographical Congress, India.
- Orti, F. (1981). Optimal distribution of control points to minimize Landsat image registration errors. Photogramm. Eng. and Rem. Sens., vol. 47:101-110.
- Otterman, J. and C.J. Robinove, (1981). Effect of the atmosphere on the detection of surface changes from Landsat Multispectral Scanner data., Int. Jour. Remote Sens., vol. 2(4): 351-360.

- Pain, C.F. (1985). Mapping of landforms from Landsat imagery: An example from eastern New South Wales, Australia. *Rem. Sens. of Environ.* vol. 17:55-65.
- Rao, K.R. and N. Bedi (1982). Remote sensing for geomorphology. In: *Perspectives in Geomorphology, Vol. I- Recent Trends*, Concept Publishing Co., New Delhi, India.
- Reineck, H.E. and I.B. Singh, (1973). *Depositional Sedimentary Environments - With Reference to Terrigenous Clastics*. Springer-Verlag, New York, 439 pp.
- Richards, J.A. (1984). Thematic mapping from multitemporal image data using principal components transformation. *Rem. Sens. of Environ.* vol. 16:35-46.
- Richards, J.A. (1986). *Remote Sensing Digital Image Analysis; an introduction.*, Springer-Verlag.
- Robinson, I.S. (1985). *Satellite Oceanography; an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. John Wiley & Sons.
- Rowan, L.C., Wetlaufer P.H., Goetz A.F.H., Billingsley F.C. and Stewart J.H. (1974). Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in south-central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS images., U.S. Geological Survey Professional Paper 883, 35 pp.
- Ruíz-Azuara, P. (1984). Taller sobre percepción remota. Serie: Prospección de recursos naturales por percepción remota. Unidad 1: Fundamentos de percepción remota. Laboratorio Interdisciplinario, Facultad de Ciencias, PSPA-UNAM., 105pp.
- Sabins, F.F. (1978). *Remote sensing: principles and interpretation.*, Freeman, San Francisco.

- Schowengerdt, R.A. (1983). *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*, Academic Press, Inc.
- Shih, E.H.H, and R.A. Schowengerdt (1983). Classification of arid geomorphic surfaces using Landsat spectral and textural features. *Photogramm. Eng. and Rem. Sens.* vol. 49(3):337-347.
- Shlien, S. (1979). Geometric correction, registration and resampling of Landsat imagery., *Canadian Jour. Rem. Sens.*, vol 5: 74-89.
- Skaley, J.E. (1980). Photooptical techniques of image enhancement. In: Siegal, B.S. and A.R. Gillespie (Ed), *Remote sensing in geology*, John Wiley & Sons, New York.
- Slater, P.N., F.J. Doyle, N.L. Fritz and R. Welch, (1983). *Photographic Systems for Remote Sensing*, American Society of Photogrammetry, *Manual of Remote Sensing* (second edition), vol. 1:231-291.
- Stone, R.O., L.D. Carter and S.P. Vonder Harr. (1973). Geomorphic analysis of orbital photographs of the northern Gulf of California. *Z. Geomorphol. N.F., Suppl. Bd.* 18:156-174, Berlin.
- Suarez-Vidal, F., R. Armijo, G. Morgan, P. Bodin, R.G. Gastil (1991). Framework of recent and active faulting in northern Baja California. In: Dauphin J.P. and B.R.T. Simoneit (Ed) *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. Am. Assoc. Petrol. Geol., Mem. 47.

- Swain, P.H. and S.M. Davis (Eds.) (1978). Remote sensing: the quantitative approach., McGraw-Hill, N.Y.
- Thomas, I.L., N.P. Ching, V.M. Benning and J.A. D'aguanno. (1987). A review of multi-channel indices of class separability. *Int. J. Rem. Sens.*, vol. 8(3):331-350.
- Thompson, R.W. (1968). Tidal Flat Sedimentation on the Colorado River Delta, Northwestern Gulf of California., *Geol. Soc. Amer. Mem.* 107.
- Turner, R.E., W.A. Malila and R.F. Nalepha, (1971). Importance of atmospheric scattering in remote sensing., In: *Proceedings of the VII International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, Ann Arbor, MI, pp 1651-1697.
- U.S. Geological Survey (1979). *Landsat Data Users Handbook (revised)*., U.S. Department of the Interior.
- Vincent, R.K. (1972). An ERTS Multispectral Scanner experiment for mapping iron compounds., In *Proceedings of the VIII International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, MI, pp 1239-1247.
- Vonder, Haar S.P. and D.S. Gorsline. (1975). Flooding frequency of hypersaline coastal environments determined by orbital imagery: geologic implications. *Science* , 190 (4210): 147-149.
- Watson, J.P. (1991). A visual interpretation of a Landsat mosaic of the Okavango Delta and surrounding area., *Rem. Sens. Env.* vol. 35:1-9

- Weismiller, R.A., S.J. Kristof, D.K. Scholz, P.E. Anuta, and S.A. Momin (1977). Change detection in coastal environments., *Photogramm. Eng. and Rem. Sens.*, vol 43, p 1533.
- Wilson, J.R., C. Blackman, and G.W. Spann (1976). Proceedings of the 14th annual conference on urban and regional information systems (Atlanta, Georgia), pp. 426-469.
- Wright, R.L. (1972). Principles in a geomorphological approach to land classification. *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 16(4):351-373.

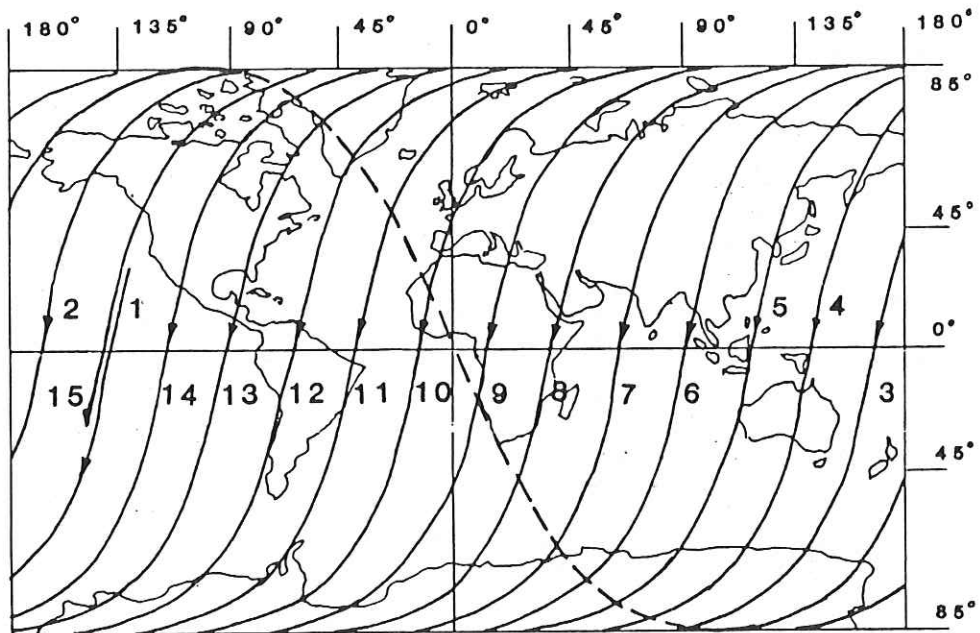
## **Apéndice A.**

### **El Barredor Multiespectral**

#### **Landsat MSS.**

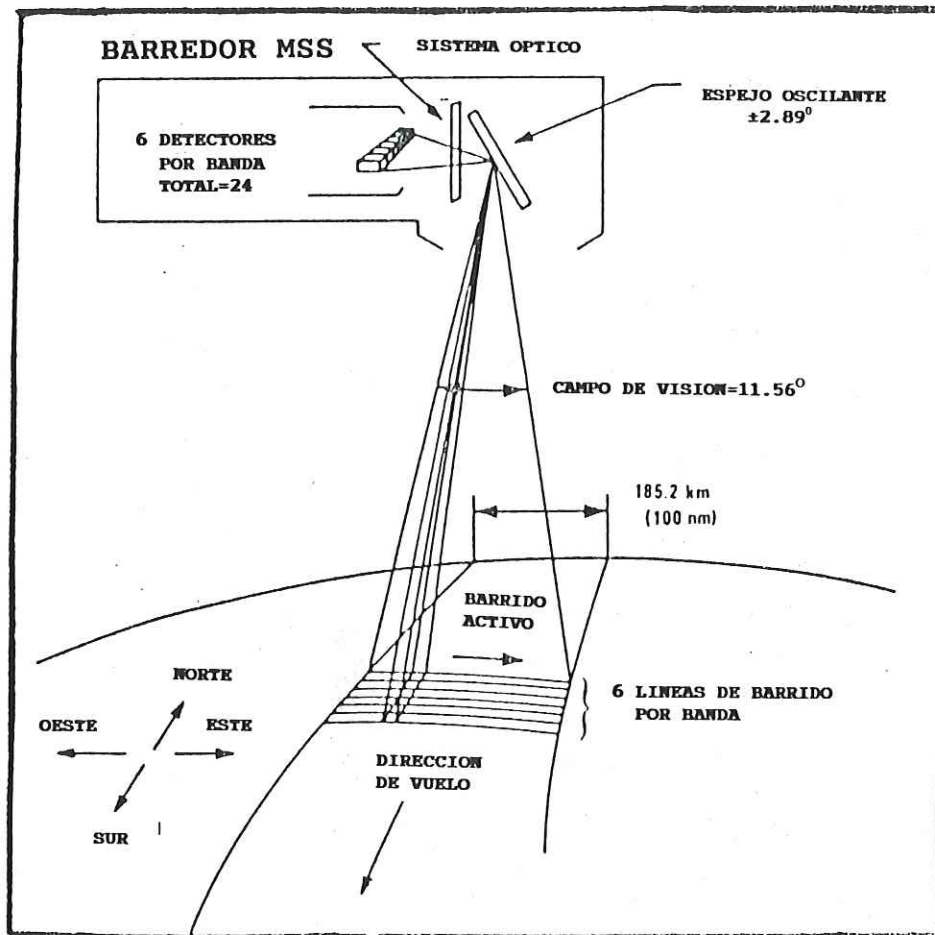
La serie de satélites Landsat fue la primera en ser diseñada con el objeto de proveer un medio de adquisición de datos multiespectrales a nivel global y en una base regular y predecible. Las tres primeras plataformas Landsat fueron del tipo Nimbus, y tuvieron características orbitales idénticas. Sus órbitas fueron polares-heliosíncronas, lo cual da lugar a un movimiento retrógrado del plano orbital en el mismo sentido y rapidez con que lo hace el sol. Esto permite que los datos sean adquiridos a la misma hora (tiempo local) en cada pase. La hora nominal de toma de datos (bandas visibles) es a las 9:30 a.m. en su trayectoria descendente (norte-sur).

La plataforma Landsat 3 efectuaba 14 órbitas diarias, y la órbita 15 (al inicio del día siguiente) se ubicaba a 159 Km al oeste de la órbita 1, este avance diario en cobertura continuaba durante 18 días (251 revoluciones) hasta cubrir completamente el globo, para visitar de nuevo el punto inicial. La Figura A-1 muestra un esquema de las trayectorias diurnas para los satélites Landsat 1,2 y 3 de acuerdo a su mecánica orbital. La línea intermitente corresponde a la trayectoria ascendente (nocturna) entre los pases diurnos 2 y 3.

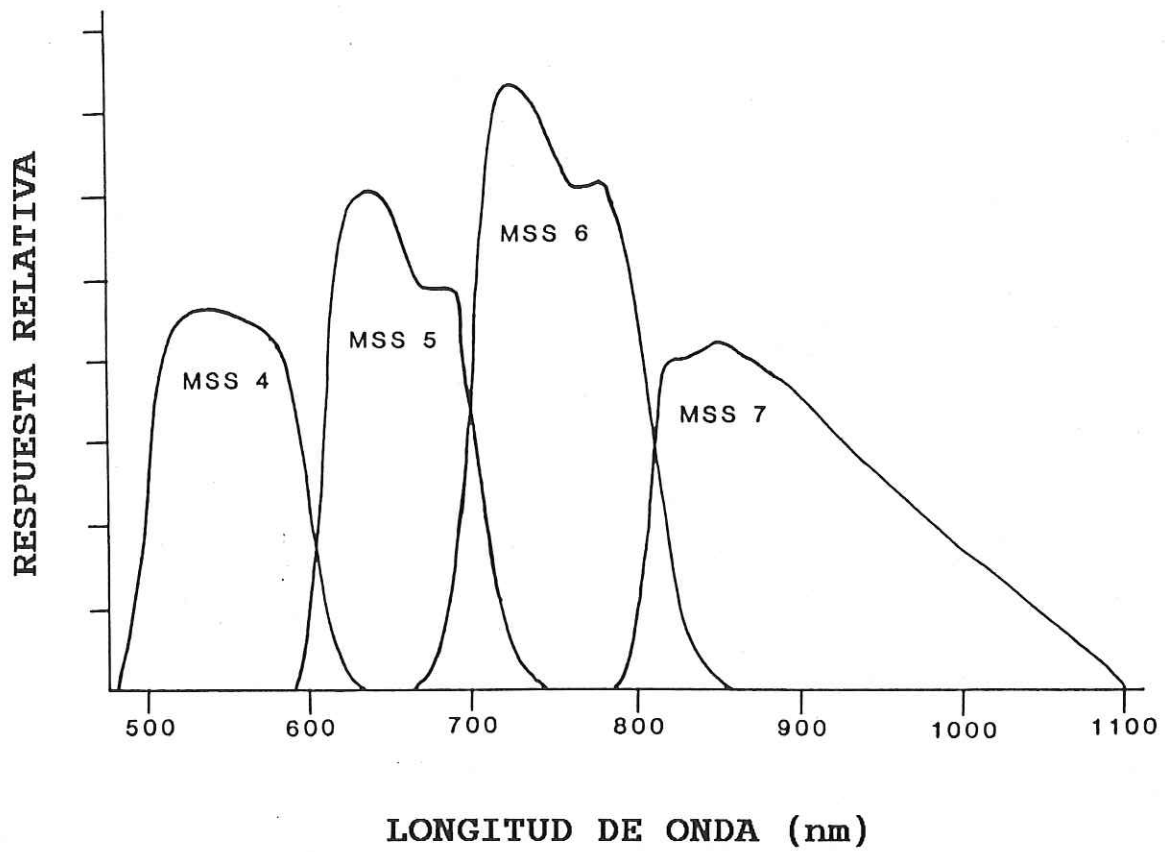


**Figura A-1.-** Representación esquemática de pases diurnos según la mecánica orbital de los satélites Landsat 1,2 y 3. Tomado de Robinson (1985).

El barredor multiespectral (MSS) fué el sensor principal en los satélites Landsat 1,2 y 3 (nuevas versiones continúan empleándose en las plataformas Landsat actuales). Se trata de un dispositivo mecánico de barrido transversal a la dirección de vuelo del satélite (ver Figura A-2). Su óptica telescópica es de tipo Cassegrain. El barrido se lleva a cabo mediante un espejo oscilante y por cada banda espectral se barren 6 líneas simultáneas sobre el terreno, empleando un arreglo de 24 detectores (6x4). Estos detectores (fotomultiplicadores en las bandas 4,5,6 y fotodiodos de silicio en la banda 7) responden al nivel de luz solar reflejada por la superficie terrestre. Sus señales analógicas son muestreadas en tiempo con el fin de obtener mediciones discretas del terreno y posteriormente son digitizadas en amplitud a palabras de 6 bits para obtener niveles de brillo (píxeles). Posteriormente, las señales de las bandas 4,5 y 6 son comprimidas vía amplificadores logarítmicos, con el objeto de mejorar su relación señal/ruido y hacer más eficiente su transmisión a estaciones terrenas, donde posteriormente son descomprimidas a palabras de 7 bits. La banda 7 no es comprimida, debido a que el ruido generado por este tipo de sensor se ajusta a un modelo de cuantización lineal. La Figura A-3 muestra las respuestas espectrales relativas entre bandas y la Tabla A-I presenta algunas de las principales especificaciones técnicas (espectrales y orbitales) para este sensor. Para información más detallada el lector puede referirse a U.S. Geological Survey (1979)



**Figura A-2.-** Arreglo del sistema de barrido utilizado en el sensor Landsat MSS. Modificado de U.S. Geological Survey (1979).



**Figura A-3.-** Respuestas espectrales relativas para los canales visibles e infra-rojos del sensor Landsat MSS. Tomada de Robinson (1985).

**Tabla A-I.- Principales especificaciones técnicas para el Barredor Multiespectral MSS a bordo del satélite Landsat 3.**

Plataforma		Landsat 3 (Nimbus)		
Período de vida útil		5 Mzo. 1978 - 7 Sep. 1983		
Tipo de órbita		Heliosíncrona, polar; nodo descendente 9:30 a.m.		
Altura de vuelo		920 km		
Período de revolución		103 min		
Ciclo de re-visita		18 días, 14 órbitas (251 rev.)		
Amplitud de barrido		185 km		
Banda	MSS4	MSS5	MSS6	MSS7
Amplitud mm	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-1.1
Nivel sat. $W m^{-2} sr^{-1}$	24.8	20.0	17.6	46.0
Niveles de digit.	128	128	128	64
Resolución espacial m	79 x 79	79 x 79	79 x 79	79 x 79

La banda 4 (verde) ha sido implementada para el análisis de cuerpos de agua costeros (estudios de turbidez y penetración de luz), la banda 5 (rojo) se aplica en estudios de discriminación de cubierta vegetal, y las bandas 6 y 7 (infrarrojo cercano) se utilizan en la discriminación de tipos de suelos y en la delineación de cuerpos de agua respectivamente (Kennie y Matthews, 1985). La amplitud de barrido transversal (185 Km) y su celda de resolución nominal (79 m X 79 m), hacen que el barredor multiespectral de LANDSAT pueda considerarse como un sensor adecuado a las necesidades de este estudio.

**Apéndice B.**

**Aspectos Generales**

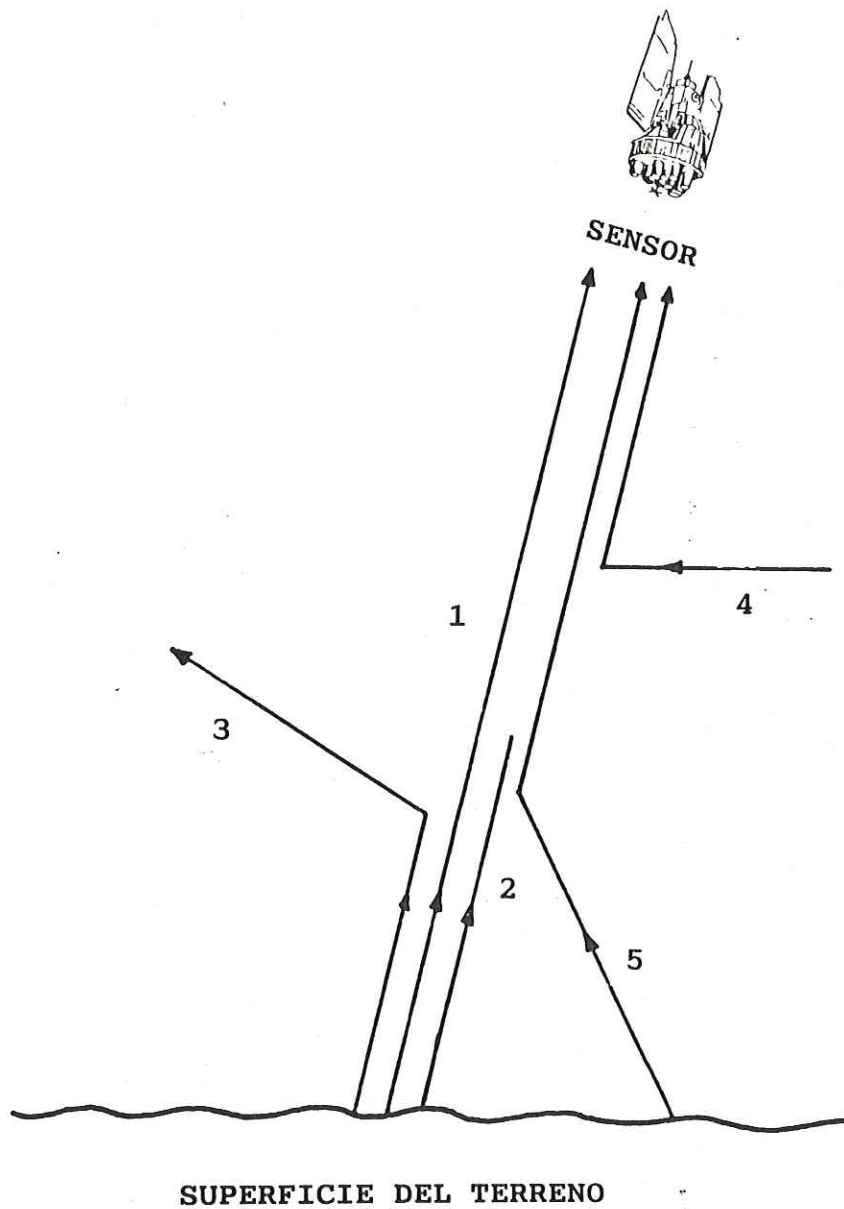
**de Percepción Remota.**

De acuerdo a Hunt (1980), el término "Percepción Remota" se refiere al conjunto de técnicas y metodologías que permiten obtener información referente a la naturaleza de un objeto, sin establecer contacto físico con éste. No obstante lo anterior, para el caso de este estudio, la información se adquiere analizando las características de la energía electromagnética reflejada por los elementos que componen la escena, lo cual implica que la información referente al objeto llegará al sensor por medio de variaciones de campo (distorsionándose al pasar a través de la atmósfera) y por lo tanto puede considerarse como "un contacto físico" a distancia (Ruiz-Azuara, 1984). Para el caso de sensores remotos de tipo pasivo (e.g. MSS de Landsat), el sol es la principal fuente de energía en las regiones del visible e infrarrojo reflectivo.

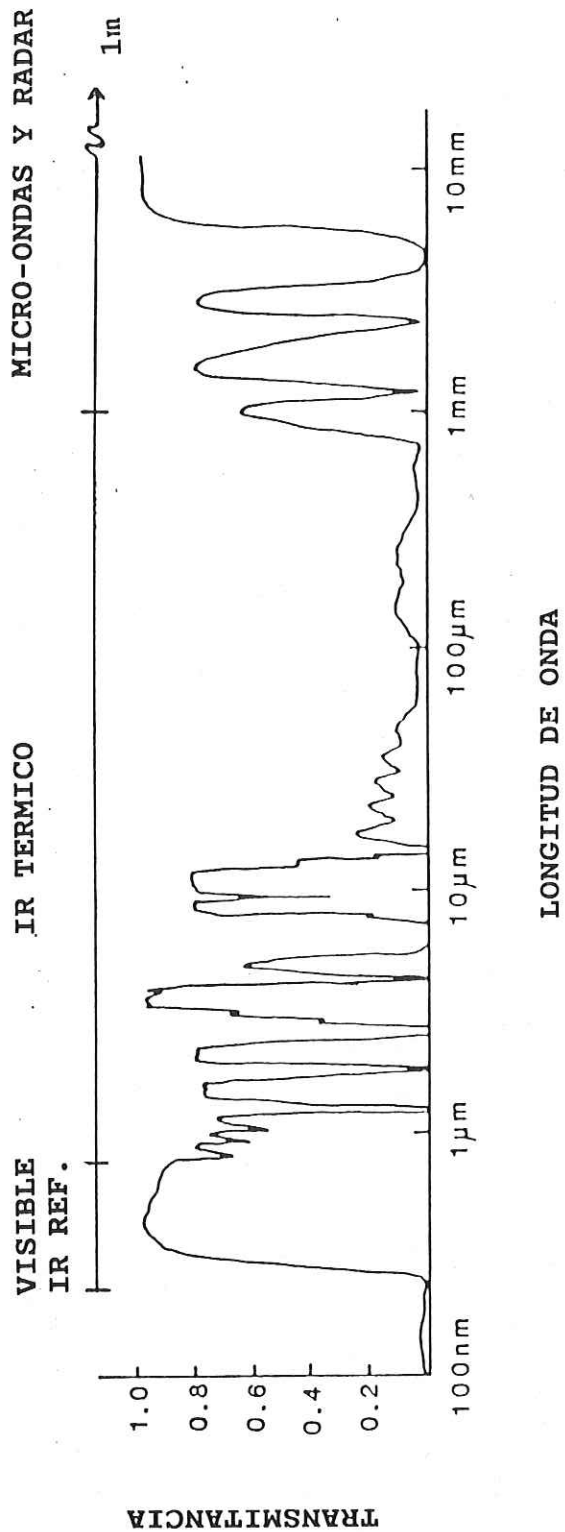
En el supuesto hipotético de un ambiente carente de atmósfera, la señal medida por un sensor a bordo de un satélite estaría simplemente en función del nivel de energía que incide sobre la escena y las propiedades reflectivas de esta. Sin embargo, la presencia de la atmósfera puede modificar sustancialmente esta situación, debido a la interacción de sus componentes con la energía electromagnética.

La Figura B-1 ejemplifica de manera general las interacciones que pueden ocurrir entre la atmósfera y los rayos de energía electromagnética durante su trayectoria hacia el sensor. Este esquema es válido para el intervalo visible-infrarrojo cercano, donde los efectos de dispersión predominan sobre los de absorción, y los efectos de emisión por parte de la atmósfera son prácticamente nulos. La componente 1 representa la radiación proveniente de la escena, esta es la señal con información útil al analista. La componente 2 constituye la radiación proveniente del terreno y que es absorbida por la atmósfera, mientras que la componente 3 es la fracción de energía que se dispersa y es dirigida hacia otros puntos fuera del campo de visión del sensor. Las componentes 4 y 5 se originan fuera del campo de visión del sensor, por lo que son consideradas efectos de *ruido* en la señal. La componente 4 representa la contribución debida a procesos de dispersión atmosférica, y la componente 5 es un caso especial de dispersión, en el que pueden influir otros aspectos como la actitud de la fuente de iluminación, relieve topográfico, radiancia del cielo, etc.

Debido a la presencia de la atmósfera terrestre, parte de la energía radiante proveniente del sol es absorbida por los componentes atmosféricos (principalmente O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub>) y solo una fracción de ésta, es capaz de alcanzar la superficie terrestre, para posteriormente ser reflejada hacia el sensor. De esta manera, la atmósfera actúa como un filtro, permitiendo el paso de energía sólo en algunas regiones del espectro electromagnético (Figura B-2). A estas regiones de alta transmitancia se les denomina *ventanas atmosféricas*; y



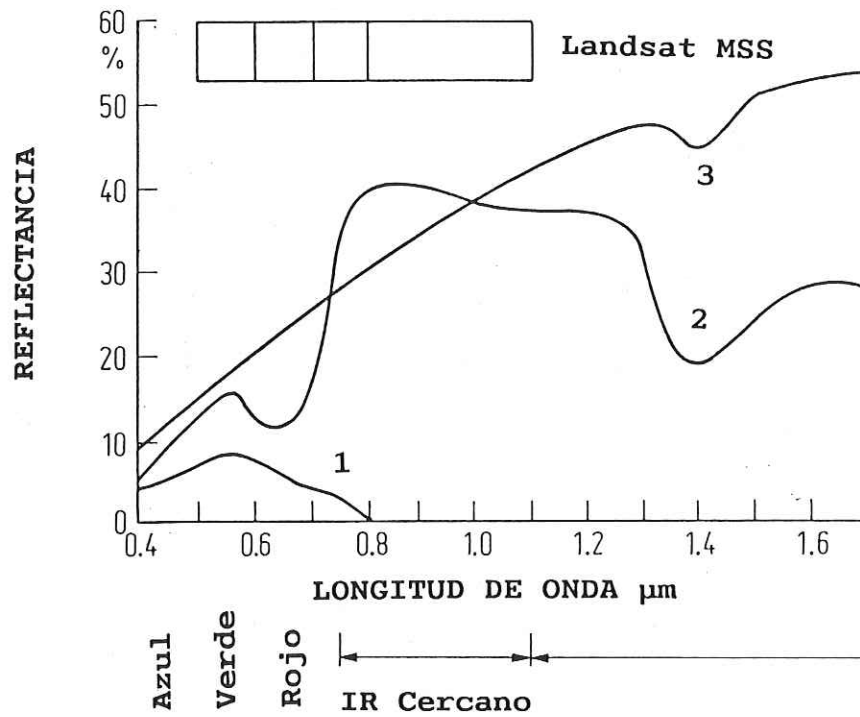
**Figura B-1.-** Esquema generalizado de las principales interacciones de la energía electromagnética con la atmósfera. Modificado de Robinson (1985).



**Figura B-2.-** Curva de transmitancia atmosférica. Las regiones con alta transmisión de energía electromagnética son denominadas ventanas atmosféricas. Diagrama tomado de Robinson (1985).

es en estos intervalos electromagnéticos donde se diseñan los sensores utilizados en percepción remota (observe la alta transmitancia en el intervalo Visible-IR reflectivo).

Por otra parte, la elección de las bandas espectrales en que operará el sensor, estará en función del tipo de aplicación que se le dará a éste. Por ejemplo, la Figura B-3 muestra como los tres materiales dominantes en la superficie terrestre (agua, vegetación y suelo) reflejan la energía del sol en el intervalo visible-IR. En la parte superior se observa la relación que guardan sus respuestas con las bandas del sensor MSS de Landsat. En este gráfico se observa como el agua es un pobre reflector en el intervalo azul-verde, disminuyendo hacia el rojo y prácticamente nulo en el IR. Para el caso de los suelos, su reflectividad aumenta con la longitud de onda. Mientras que la curva de vegetación muestra un patrón más complejo; alto en el verde, bajo en el rojo y con un notorio incremento en la región del IR reflectivo. El comportamiento de estas curvas respecto a las longitudes de onda nominales en las bandas espectrales empleadas, da como resultado un conjunto de patrones característicos para cada tipo de material. A estos patrones se les denomina *firmas espectrales*, y son elementos esenciales en percepción remota para discriminar los diferentes tipos de cubierta en el terreno.



**Figura B-3.-** Curvas características de reflectancia para los tres tipos de materiales más comunes en la superficie terrestre (1 agua, 2 vegetación, 3 suelos). En la parte superior se observan las posiciones de las bandas espectrales del barredor MSS de Landsat, en el intervalo visible-infrarrojo cercano. Modificado de Richards (1986).

## **Apéndice C.**

### **Corrección de Errores.**

Cuando una imagen es adquirida por sensores a bordo de satélites, esta información puede contener errores en su geometría y en los valores de radiancia medidos. A estos últimos se les denomina errores radiométricos y se originan a partir de la instrumentación del sensor y del efecto atmosférico. Por otra parte, los errores geométricos se originan de diversas maneras como resultado de movimientos relativos entre el satélite, la mecánica de sus barredores y el movimiento de rotación de la tierra. Además, debido a algunas aberraciones en los sistemas ópticos de los sensores, a la curvatura de la tierra y a variaciones en la posición o actitud de las plataformas espaciales, se pueden generar errores geométricos con diferente grado de severidad.

#### *C.1- Corrección Atmosférica.*

La influencia de la atmósfera sobre la información multiespectral captada por sensores a gran altura (satélites o aeronaves) ha sido un amplio tema de estudio desde el inicio de la era espacial (Curcio, 1961; Turner et al. 1971; Sabins, 1978; Slater, 1983) identificándose como principales procesos la dispersión y absorción de la luz.

La absorción por moléculas atmosféricas es un proceso selectivo que convierte la energía incidente en calor. En particular, las moléculas de oxígeno, dióxido de carbono, ozono y agua atenúan fuertemente la radiación en ciertas bandas espectrales (Figura B-2). Sin embargo, los sensores empleados comúnmente en percepción remota son diseñados para operar alejados de estas regiones, de tal manera que sus efectos son mínimos. Por lo tanto, generalmente la dispersión por partículas atmosféricas es el mecanismo dominante de distorsión radiométrica en la imagen (Skaley, 1980; Slater et al., 1983).

Existen dos modelos de dispersión ampliamente conocidos y dependientes de la longitud de onda utilizada. El primero (modelo Rayleigh) predice una relación inversamente proporcional con la cuarta potencia de la longitud de onda ( $\lambda^{-4}$ ), lo cual significa que las longitudes de onda más cortas se dispersan en mucho mayor grado que las longitudes largas. Este tipo de dispersión es causada principalmente por moléculas gaseosas en la atmósfera.

El segundo modelo (modelo Mie) argumenta que, en general, para una atmósfera moderada, la dispersión es inversamente proporcional a la longitud de onda ( $\lambda^{-1}$ ). Sin embargo, esta relación puede variar de  $\lambda^0$  (dispersión completa, e.g. nublado total) hasta  $\lambda^{-4}$ . La dispersión de Mie es causada por partículas de tamaño aproximado a la longitud de onda, tales como humo y polvo atmosférico.

Se ha sugerido que en una atmósfera real los mecanismos de dispersión no se ajustan precisamente a los modelos de Mie o de Rayleigh, sino que aparentemente siguen una relación de  $\lambda^{-2}$  a  $\lambda^{-0.7}$  (Curcio, 1961; Slater et al. 1983). Utilizando esta información, la dispersión que

ocurriría en una atmósfera nublada podría aproximarse de  $\lambda^{-0.7}$  a  $\lambda^{-0.5}$ , y extrapolando de una atmósfera muy clara a una muy nublada, se puede generar el siguiente juego de modelos de dispersión:

<u>Condición Atmosférica</u>	<u>Modelo de Dispersión</u>
Muy Claro .....	$\lambda^{-4}$
Claro .....	$\lambda^{-2}$
Moderado .....	$\lambda^{-1}$
Nublado .....	$\lambda^{-0.7}$
Muy Nublado.....	$\lambda^{-0.5}$

Estos modelos pueden ser utilizados para predecir el nivel de efecto atmosférico relativo a cada banda espectral, a partir del conocimiento de su efecto en una banda en particular (generalmente las bandas 4 ó 5).

La Tabla C-I muestra los porcentajes de dispersión con que contribuye cada banda a la dispersión total del sistema, de acuerdo a los cinco escenarios de condiciones atmosféricas y las longitudes de onda del sensor Landsat MSS. A partir de esta Tabla se puede observar que utilizando un modelo  $\lambda^{-4}$  (atmósfera muy clara), la banda MSS4 contribuye con aproximadamente el 52% de la dispersión total, mientras que la banda 7 con solo el 6%.

**Tabla C-I.-** Porcentajes de contribución en dispersión para las cuatro bandas de MSS. De acuerdo a los cinco escenarios de condiciones atmosféricas (ver texto).

MSS	$\lambda$	$\lambda^{-4}$	%	$\lambda^{-2}$	%	$\lambda^{-1}$	%	$\lambda^{-0.7}$	%	$\lambda^{-0.5}$	%
4	.55	11.	52	3.3	38	1.8	32	1.5	29	1.3	28
5	.65	5.6	27	2.4	28	1.5	27	1.4	26	1.2	26
6	.75	3.2	15	1.8	21	1.3	23	1.2	24	1.1	24
7	.95	1.2	6	1.1	13	1.1	18	1.1	21	1.0	22
Tot		21		8.6		5.7		5.2		4.6	

**Tabla C-II.-** Factores de corrección por efecto atmosférico para las bandas Visible-IR del sensor MSS. Dada la banda 4 como banda de referencia (ver texto).

MSS	$\lambda^{-4}$	$\lambda^{-2}$	$\lambda^{-1}$	$\lambda^{-0.7}$	$\lambda^{-0.5}$
4	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	0.513	0.717	0.846	0.888	0.920
6	0.288	0.537	0.732	0.806	0.857
7	0.111	0.334	0.578	0.730	0.761

Esto demuestra que la mayor parte de dispersión atmosférica, la cual es un componente aditivo, ocurrirá en la parte visible del espectro bajo condiciones de atmósfera muy clara.

Se han desarrollado diferentes técnicas de corrección atmosférica para emplearse con datos digitales de sensores remotos. Dadas las características aditivas de este efecto, la mayoría de estas técnicas pueden ser agrupadas como técnicas de sustracción o corrimiento de histograma (Vincent, 1972; Rowen et al., 1974) y técnicas basadas en mediciones de parámetros atmosféricos *in situ* durante el pase del satélite (Ahern et al., 1977; Otterman y Robinove, 1981). No obstante que estas últimas son más precisas debido al conocimiento de las características de la atmósfera, la realidad es que la mayoría de los usuarios (como es el caso de este estudio) requieren trabajar con información de archivo y en regiones para las cuales no existen bancos de información meteorológica.

De acuerdo a lo anterior, la metodología empleada en este estudio se basó en la técnica de sustracción. Para esto, el analista deberá elegir la banda cuyo histograma de frecuencias muestre más claramente un incremento de píxeles en su cola inferior (generalmente las bandas visibles); este punto corresponde a un valor *DN* que representa, de manera indirecta, las condiciones atmosféricas durante la toma de la imagen. Por lo tanto, conforme el valor *DN* aumente, el efecto atmosférico será mayor.

La Tabla C-II muestra los factores de corrección necesarios para predecir los valores de efecto atmosférico para las bandas visibles de Landsat MSS, seleccionando la banda MSS4 como banda de referencia. Por ejemplo; para un valor *DN* inicial de 13 en la banda 4, los

valores predictivos en las bandas 5,6 y 7 (para una atmósfera muy clara) serán 6.64, 3.74 y 1.4 respectivamente. De esta manera, los valores del efecto aditivo por dispersión atmosférica pueden aproximarse de acuerdo a una proporción relativa a su longitud de onda. Observese como en una atmósfera muy nublada (el extremo opuesto) los valores en los coeficientes de corrección de la Tabla C-II mantienen distancias muy cercanas, lo cual indica el carácter no-selectivo de la atmósfera bajo estas condiciones.

### *C.2- Corrección Geométrica.*

La corrección geométrica consiste esencialmente en dos procesos: (a) transformación de coordenadas espaciales y (b) submuestreo de los datos.

La aplicación de estos procedimientos es de importancia fundamental para el acondicionamiento de imágenes digitales y la manera de emplearse estará en función de las características de los datos y la naturaleza del problema que se pretende resolver. En general, la problemática consiste en cambiar las propiedades geométricas de una imagen, pixel a pixel, con la finalidad de poder representarla bajo un nuevo sistema de coordenadas (geocodificación) o bien, empalmar dos imágenes de la misma región (co-registro) con el objeto de integrar diferentes bancos de información y analizarlos simultáneamente.

*Transformación de Coordenadas.*

Existen dos tipos de distorsión geométrica: por una parte la que puede corregirse determinísticamente, mediante el modelado de la naturaleza y magnitud de esta distorsión a través del establecimiento de fórmulas de corrección, y por otro lado la de comportamiento aleatorio, en la que se establecen relaciones matemáticas entre las direcciones de pixeles en la imagen y sus coordenadas correspondientes en el terreno.

El primer tipo se genera a partir de fuentes de distorsión bien caracterizables. Para el caso de Landsat MSS este tipo de error se genera de manera sistemática debido a: (a) la rotación de la tierra durante la toma de la imagen, (b) efectos no-lineales en la mecánica de barrido del sensor, y (c) a las características orbitales del satélite. Debido a que estos efectos son consistentes a través del tiempo, pueden ser corregidos determinísticamente utilizando modelos de mecánica orbital y datos de calibración para el sensor.

Para el segundo caso las distorsiones son generalmente de naturaleza impredecible, y son corregidas mediante el empleo de puntos de control y modelos matemáticos de distorsión. Las fuentes de distorsión relacionadas a este efecto son principalmente la actitud de la plataforma espacial (roll, pitch, yaw), la altura de vuelo del satélite y el efecto topográfico. Las técnicas de corrección empleadas en estos casos pueden ser utilizadas incluso cuando el analista desconoce por-completo el tipo y fuente de distorsión.

Una de las técnicas más comunes es el empleo de series de potencias polinomiales (mapeo polinomial). El principal requisito para la aplicación de este método es la existencia de

material cartográfico en forma de mapas referidos en algún sistema de coordenadas (geográficas, UTM, etc.). El procedimiento consiste en la selección de puntos de control, tomando como base estructuras fácilmente identificables en el mapa y en la imagen (cruces de carreteras, expresiones topográficas, meandros de ríos, salientes rocosos en las costas, etc.). Posteriormente se definen dos sistemas de coordenadas cartesianos como se muestra en la Figura C-1; uno describe la ubicación de los puntos en el mapa  $(x,y)$  y el otro define la localización de los pixeles correspondientes en la imagen  $(u,v)$ . Ambos sistemas de coordenadas pueden ser relacionados mediante un par de funciones de mapeo  $f$  y  $g$  de tal manera que

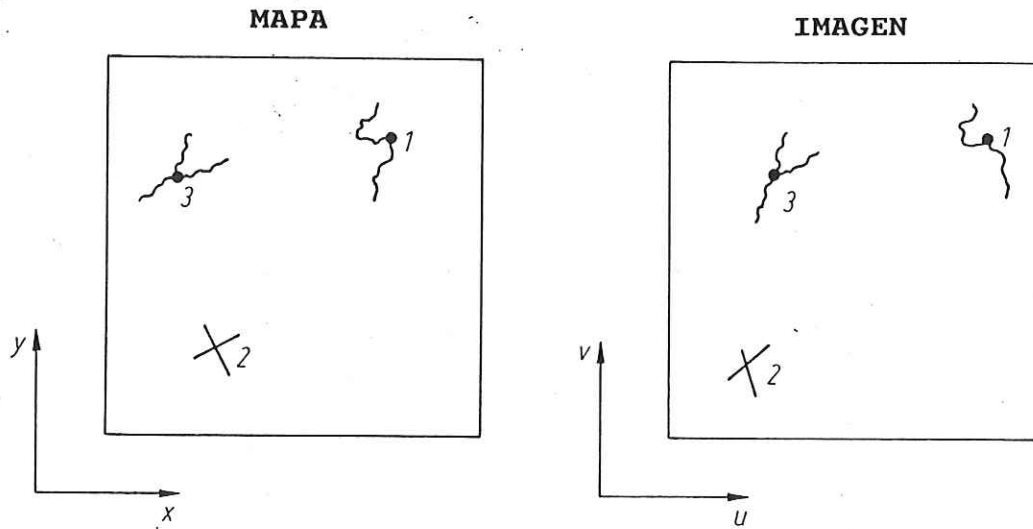
$$u = f(x,y)$$

$$v = g(x,y)$$

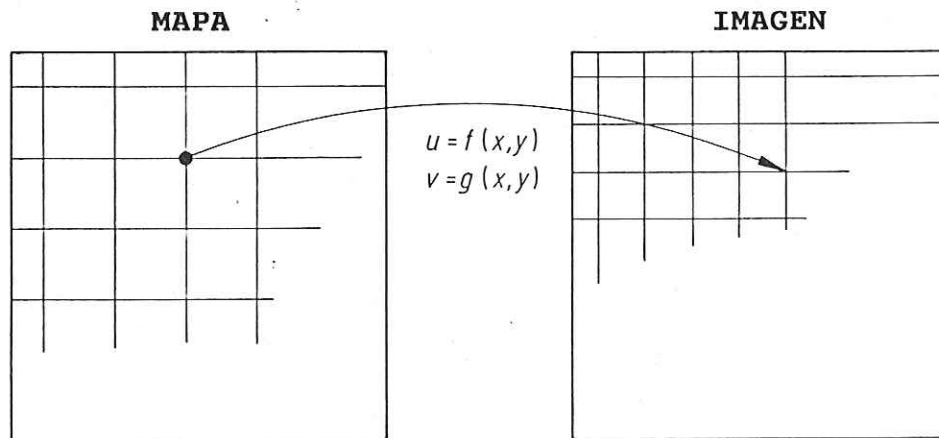
Si estas funciones son conocidas, entonces se puede localizar un punto en la imagen conociendo su ubicación en el mapa. Sin embargo, la forma explícita para estas funciones de mapeo no es conocida por lo que generalmente se eligen como polinomios de primero, segundo o tercer grado. Por ejemplo, para el caso de segundo orden las funciones de mapeo  $f$  y  $g$  quedarían definidas por

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2$$



**Figura C-1.-** Definición de puntos de control en el mapa e imagen, mostrando su ubicación relativa en función de sistemas de coordenadas (x,y) y (u,v). Tomada de Richards (1986).



**Figura C-2.-** Ejemplo que muestra el empleo de polinomios de mapeo para localizar puntos de la imagen dentro de una malla previamente definida sobre el mapa. Richards (1986).

Si se eligen suficientes puntos de control, los coeficientes polinomiales  $a_i$  y  $b_i$  pueden ser calculados utilizando métodos de mínimos cuadrados. Notese que el número mínimo de puntos de control requerido para una aproximación polinomial de primer orden será de tres puntos, mientras que las de segundo y tercer orden necesitan seis y diez respectivamente. No obstante que en la práctica se elige un número de puntos de control mayor que diez, los ajustes polinomiales a órdenes mayores de tres generalmente introducen una distorsión mayor que la que se pretende corregir. Sin embargo, es recomendable un número considerable de puntos de control debido a que el error de posicionamiento de puntos individuales no ejercerá una influencia notoria en los coeficientes polinomiales.

#### *Submuestreo de Datos.*

Una vez determinadas explícitamente las funciones de mapeo  $u$  y  $v$ , el siguiente paso es construir una versión de la imagen corregida geoméricamente. La manera de hacer esto es definiendo una retícula sobre el mapa, la cual actuará como una malla cuyos nodos ubicarán los centros de pixeles en la imagen corregida. Esta malla es paralela, e incluso puede estar definida en el sistema de unidades cartográficas del mapa. El espaciamiento de esta malla se elige de acuerdo al tamaño de pixel requerido para la imagen corregida y, como es de esperar, los centros de pixeles en la malla (co-registrada con el mapa) no corresponderán exactamente con los centros de pixeles en la imagen original (Figura C-2). En casos como este, se emplean comunmente tres técnicas de interpolación, con el objeto de determinar el

valor de brillo correspondiente a este punto en la imagen corregida (asignación del vecino más cercano, interpolación bilineal e interpolación cúbica).

*Asignación del vecino más cercano* es el esquema de interpolación más rápido, debido a errores de redondeo se pueden esperar discontinuidades geométricas del orden de medio pixel en la imagen procesada, este efecto es irrelevante en aplicaciones visuales pero puede ser importante en procesamiento numérico posterior. La *interpolación bilineal* utiliza tres interpolaciones lineales sobre los cuatro píxeles que rodean el punto en corrección; su resultado es una imagen suavizada con una geometría más continua. Finalmente, la *interpolación cúbica* ajusta polinomios cúbicos sobre un kernel de cuatro por cuatro píxeles que rodean al pixel en la imagen, involucrando por lo tanto, un tiempo de cómputo mayor. La imagen resultante es de alta calidad estética y es utilizada generalmente para fines fotointerpretativos. Una desventaja de este tipo de interpolador es que puede producir efectos de borde. Aunque este efecto contribuye a una mayor calidad visual de la imagen, puede ser nocivo en análisis numérico posterior donde la exactitud en los valores radiométricos es importante.

Las técnicas de corrección geométrica a imágenes digitales han sido ampliamente estudiadas desde el inicio de la radiometría multispectral a principio de los 70's. Actualmente existe una amplia variedad de software para llevar a cabo este tipo de correcciones de manera automática e interactiva. Para información más completa sobre el tema, consúltese Shlien (1979), Orti (1981), Schowengerdt (1983) y Richards (1986).

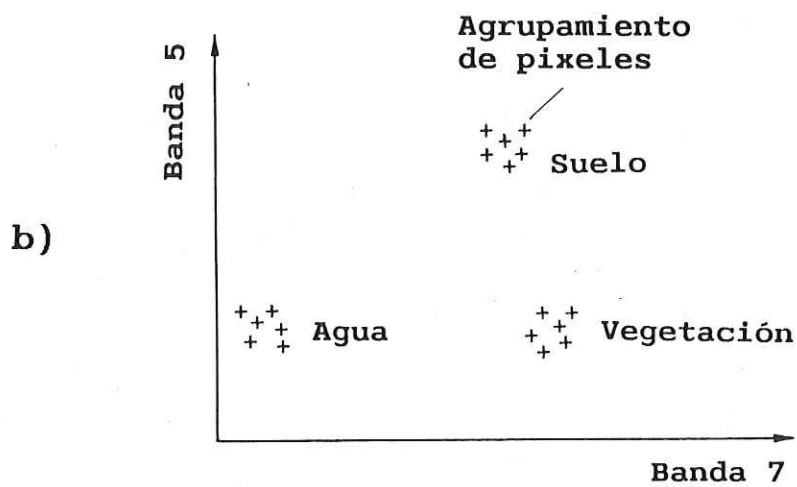
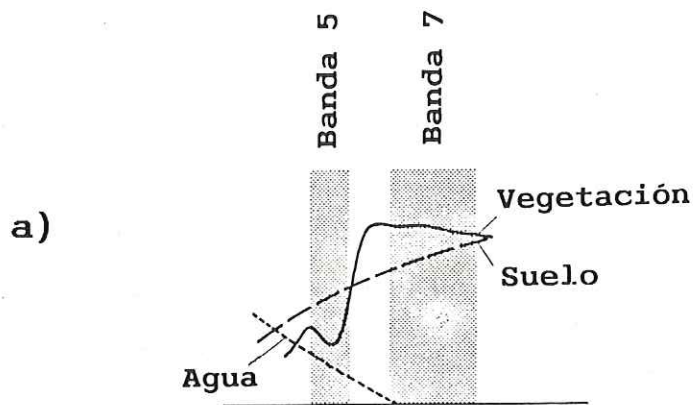
## Apéndice D.

### Clasificación de Imágenes.

#### *D.1- Clases Espectrales y Clases Informativas.*

La manera más eficiente de analizar cuantitativamente la información multiespectral es graficando los valores radiométricos de los píxeles como vectores en un espacio multidimensional. En este espacio, cada píxel de la imagen es representado como un punto con coordenadas definidas por los valores de energía reflejada del píxel en cada componente espectral. Esto se ilustra en la Figura D-1 para un espacio bidimensional en las bandas 5 y 7 de MSS.

Suponiendo que las bandas han sido diseñadas para proveer una buena discriminación entre los elementos que componen la escena (suelo, agua, vegetación), es de esperarse que los píxeles tiendan a formar agrupamientos en el espacio multiespectral, correspondientes a diversos tipos de cubierta del terreno. El tamaño y la forma de estos agrupamientos dependerá de las variaciones en la cubierta y de los efectos de ruido en la imagen. Estos agrupamientos se denominan *clases informativas* y son los elementos (patrones) que el analista desea reconocer en la imagen.



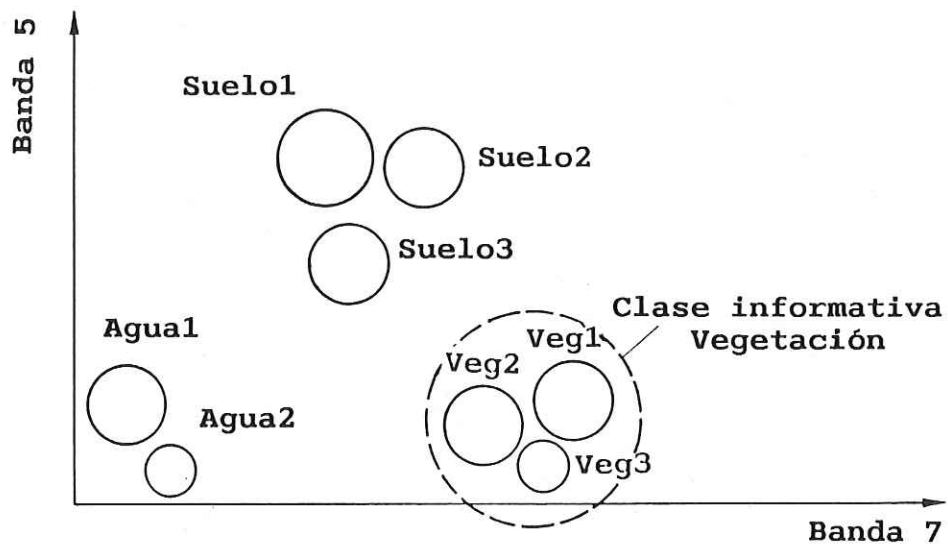
**Figura D-1.-** Ejemplo típico de un espacio multispectral bidimensional para las bandas 5 y 7 de MSS. En (a) se muestran las respuestas espectrales para tres diferentes tipos de terreno (agua, suelo y vegetación) y en (b) la distribución de agrupamientos de pixeles según sus características de reflectancia. Modificado de Richards (1986).

En la práctica, sin embargo, estas clases no aparecen como grupos aislados, sino que tienden a formar subgrupos de menor tamaño para la misma región de suelos, vegetación o agua. Esto puede deberse a diferentes propiedades de la cubierta como: grado de humedad, relieve topográfico, tipo de vegetación o concentración de material en suspensión en aguas costeras. En consecuencia, el espacio multiespectral aparecerá como se muestra en la Figura D-2, donde cada clase informativa puede estar compuesta por varias *clases espectrales*. En resumen, las clases espectrales pueden ser conceptualizadas como distribuciones de probabilidad unimodales y las clases informativas como posibles distribuciones multimodales, siendo esto último el problema fundamental a resolver mediante las técnicas de clasificación.

Existen dos tipos de procedimientos de clasificación con aplicación al análisis de imágenes en percepción remota. Uno se denomina clasificación no-supervisada y el otro clasificación supervisada. Ambos pueden ser empleados individualmente como alternativas de análisis, dependiendo del problema a resolver, o pueden ser combinados en metodologías híbridas como procesos complementarios.

#### *D.2- Clasificación No-supervisada.*

La clasificación no-supervisada es un proceso mediante el cual los píxeles que componen la imagen son asignados a clases espectrales, sin que para ello sea necesario conocer de antemano el número y nombres de las clases existentes.



**Figura D-2.-** Representación esquemática de diferentes clases informativas, constituidas por diferentes subgrupos o clases espectrales. Richards (1986).

Este procedimiento comúnmente se emplea como un análisis exploratorio para determinar el número y la ubicación de las clases espectrales existentes en los datos. Posteriormente al proceso de clasificación, el analista identifica las clases (patrones) mediante la asociación de muestras de pixeles correspondientes a estas clases, con información obtenida a partir de información cartográfica y visitas de campo. Generalmente, estos métodos se basan en técnicas de agrupamiento (cluster analysis), entre las que cabe mencionar el algoritmo ISODATA, también conocido como K-medias o algoritmo de medias móviles (Ball y Hall, 1965; Duda y Hart, 1973). El algoritmo consiste en un proceso de optimización iterativo en el cual se propone un número  $K$  de puntos como candidatos a  $m$  centros de agrupamiento arbitrarios (clusters).

$$\hat{m}_i, \quad i=1, \dots, K$$

Posteriormente, cada pixel  $x$  de la imagen es revisado y asignado a cierto grupo  $m_i$  en base a su distancia Euclidiana en el espacio multiespectral.

$$d(x_1, x_2) = \left[ \sum_{i=1}^N (x_{1i}^2 - x_{2i}^2) \right]^{1/2}$$

donde  $x_1$  y  $x_2$  son dos puntos en el espacio multiespectral (centro del cluster y vector del pixel) y  $N$  es el número de componentes espectrales.

Eventualmente pueden existir varias alternativas en la asignación de un punto a diferentes grupos en el espacio multiespectral. Un criterio comúnmente empleado como indicador de asignación es la suma de errores cuadráticos (SSE), definida por

$$SSE = \sum_{g_i} \sum_{x \in c_i} |x - m_i|^2$$

donde  $m_i$  es la media del  $i$ ésimo grupo y  $x \in c_i$  es un punto (patrón) en el espacio multiespectral asignado a este grupo (cluster). La sumatoria exterior se efectúa sobre todos los grupos, de tal manera que se calcula la distancia acumulada de cada patrón hacia el centro de cada cluster individual y después se suma sobre todos los clusters. Si esta sumatoria es pequeña, el agrupamiento se considera válido.

A partir de los agrupamientos generados se calcula un nuevo conjunto de medias

$$m_i, \quad i=1, \dots, K$$

Si  $m \approx \hat{m}_i$  para toda  $i$ , el proceso termina. De lo contrario el valor actual de  $m$  es asignado en  $\hat{m}$  y se reinicia el proceso en su siguiente iteración, hasta que el movimiento de las medias  $m_i$  sea mínimo.

La elección del número de clusters  $K$  y la ubicación inicial de estos, se especifica de antemano por el usuario, en función de ello se puede evitar la generación de grupos o clases anómalas y se mejora la convergencia del algoritmo.

### *D.3- Clasificación Supervisada.*

El principio básico de la clasificación supervisada radica en el hecho de que cada clase espectral puede ser descrita por una distribución probabilística. Tal distribución describirá la probabilidad de que un determinado pixel pertenezca a una clase dada en el espacio multispectral. La distribución utilizada en este caso es la normal o Gaussiana, debido a que presenta características que le permiten adecuarse matemáticamente a estos procesos de clasificación. Además de presentar un alto nivel de robustez en el sentido de no ser sensible a violaciones conceptuales basadas en el hecho de que las poblaciones reales no son estrictamente normales.

Por definición, una distribución normal multidimensional se expresa en el espacio multispectral de la siguiente manera

$$p(x) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x - m)' \Sigma^{-1}(x - m)\right\}$$

donde  $x$  es la ubicación de un pixel-vector en un espacio con  $N$  componentes espectrales,  $m$  es la posición promedio de la clase espectral y  $\Sigma$  es la matriz de covarianza, la cual describe la dirección de dispersión de los datos en el espacio.

Debido a que toda distribución normal puede ser descrita por medio de sus parámetros de tendencia central ( $\bar{X}$ ) y dispersión ( $\sigma$ ). En consecuencia una distribución normal multidimensional quedará definida en términos de su vector promedio  $m$  y su matriz de covarianza  $\Sigma$ , y por lo tanto, si  $m$  y  $\Sigma$  son conocidas para toda clase espectral en una imagen, cada pixel puede ser examinado y asignado a la clase correspondiente de acuerdo a la probabilidad  $p$  calculada.

Antes de efectuar el proceso de clasificación,  $m$  y  $\Sigma$  deben ser estimados para cada clase a partir de conjuntos de pixeles representativos (campos de entrenamiento). Para ello, es importante que estos campos sean muestras homogéneas de la clase respectiva, y al mismo tiempo, que el rango de variabilidad intraclass sea incluido. Para lograr esto, se sugiere emplear más de un campo de entrenamiento por clase.

En general, la clasificación supervisada consiste en tres pasos. Primero, se define un conjunto de campos de entrenamiento para cada clase a partir de información de mapas, fotografía aérea o visitas de campo. Segundo, se calculan  $m$  y  $\Sigma$  a partir de los campos de entrenamiento (fase de aprendizaje). Y tercero, se inicia la fase de clasificación, donde cada pixel es asignado a una clase en función de su probabilidad. En esta etapa, el etiquetado de

pixeles puede ser llevado a cabo en base a varios criterios como: método de paralelepípedo, mínima distancia o máxima similitud (maximum-likelihood).

#### *D.4- Combinación (Metodologías Híbridas).*

Debido a que los métodos supervisados no dan como resultado clases informativas perfectamente separables en el espacio multispectral, y a que los métodos no-supervisados no producen clases estrictamente apegadas a la naturaleza de los tipos de cubierta del terreno; se hace necesario un enfoque combinado para aprovechar las ventajas de ambos.

Como primer paso, se efectúa clasificación no-supervisada sobre el juego de datos, produciendo un mapa del área de estudio codificado en colores de acuerdo a las clases generadas por la computadora. En seguida, el analista evalúa este mapa contrastándolo con información de campo y cartográfica. Normalmente algunas clases son unidas o subdivididas y, en base a ellas, se definen campos de entrenamiento para realizar el procesamiento supervisado. El resultado final será un mapa temático que contendrá las mejores características de ambas técnicas. De esta manera, los métodos supervisados y no-supervisados se complementan entre sí; el primero impone el conocimiento que el analista tiene sobre el área de estudio y el segundo aprovecha la naturaleza inherente de los datos, consiguiendo con esto, una conceptualización más precisa de la realidad.

El volumen de material bibliográfico relacionado con este tema es relativamente conspicuo, algunas referencias apropiadas al tema pueden ser: Swain y Davis (1978), Coleman y Andrews (1979), Schowengerdt (1983), Richards (1986) y Thomas et al. (1987).

## Apéndice E.

### Análisis de Componentes Principales.

#### *E.1- Reconocimiento de Patrones.*

En muchos casos, las clases informativas de interés no forman clusters o agrupamientos de clusters como se muestra en la Figura D-2, sino que se encuentran formando un continuo de puntos a través del espacio multispectral. Esto sucede, por ejemplo, cuando ocurre un cambio gradual en las características del terreno, debido a diferencias en el contenido de humedad, abundancia de vegetación, propiedades litológicas, etc. Además, este tipo de problemas están relacionados con otros intrínsecos a las características del sensor; como por ejemplo la alta correlación espectral que existe entre bandas (4-5 y 6-7 para MSS) debido al tipo de respuesta espectral de algunos materiales. O bien, la superposición en sensibilidad espectral entre bandas adyacentes (ver Figura A-3).

Lo anterior da como resultado la imposibilidad de extraer cierto tipo de información denominada *patrones* (patterns), mediante los cuales el analista es capaz de identificar (separar) las clases informativas o las subclases relacionadas a los diferentes tipos de cubierta en el terreno. El patrón más simple que puede ser considerado corresponde a los niveles radiométricos de un pixel en cada banda espectral. Sin embargo, debido a los problemas

mencionados en el Apéndice D, estos generalmente no son suficientemente precisos como para lograr una buena clasificación. En este sentido, se ve la necesidad de acondicionar los datos mediante técnicas de transformación. Comúnmente a estos procedimientos se les denomina técnicas de pre-clasificación, y van encaminadas a modificar la imagen con el fin de hacer más notorios los contrastes entre diferentes tipos de terreno, mediante la separación de estos patrones (segmentación de la imagen). Para ello, estos métodos se valen de técnicas de realce digital (filtros convolucionales, ajuste de contraste por métodos de histograma) combinados con técnicas de transformación (Fourier, Kahut-Thomas, Karhunen-Loeve, etc.). Estas técnicas al ser integradas con métodos de clasificación dan lugar a un amplio campo de aplicación denominado *reconocimiento de patrones*.

#### *E.2- Transformada de Karhunen-Loeve.*

En nuestro caso nos enfocaremos a la aplicación de la transformada de Karhunen-Loeve (también conocida como análisis de componentes principales o transformada de Hotelling) al análisis multiespectral. Esta es una técnica ampliamente conocida y comúnmente disponible en paquetes de software para procesamiento de imágenes.

En esencia, la transformación a componentes principales consiste en un mapeo de la imagen multiespectral hacia un nuevo sistema de coordenadas (componentes principales) en el cual, su primer eje corre en dirección del máximo de variabilidad de los datos, el segundo eje

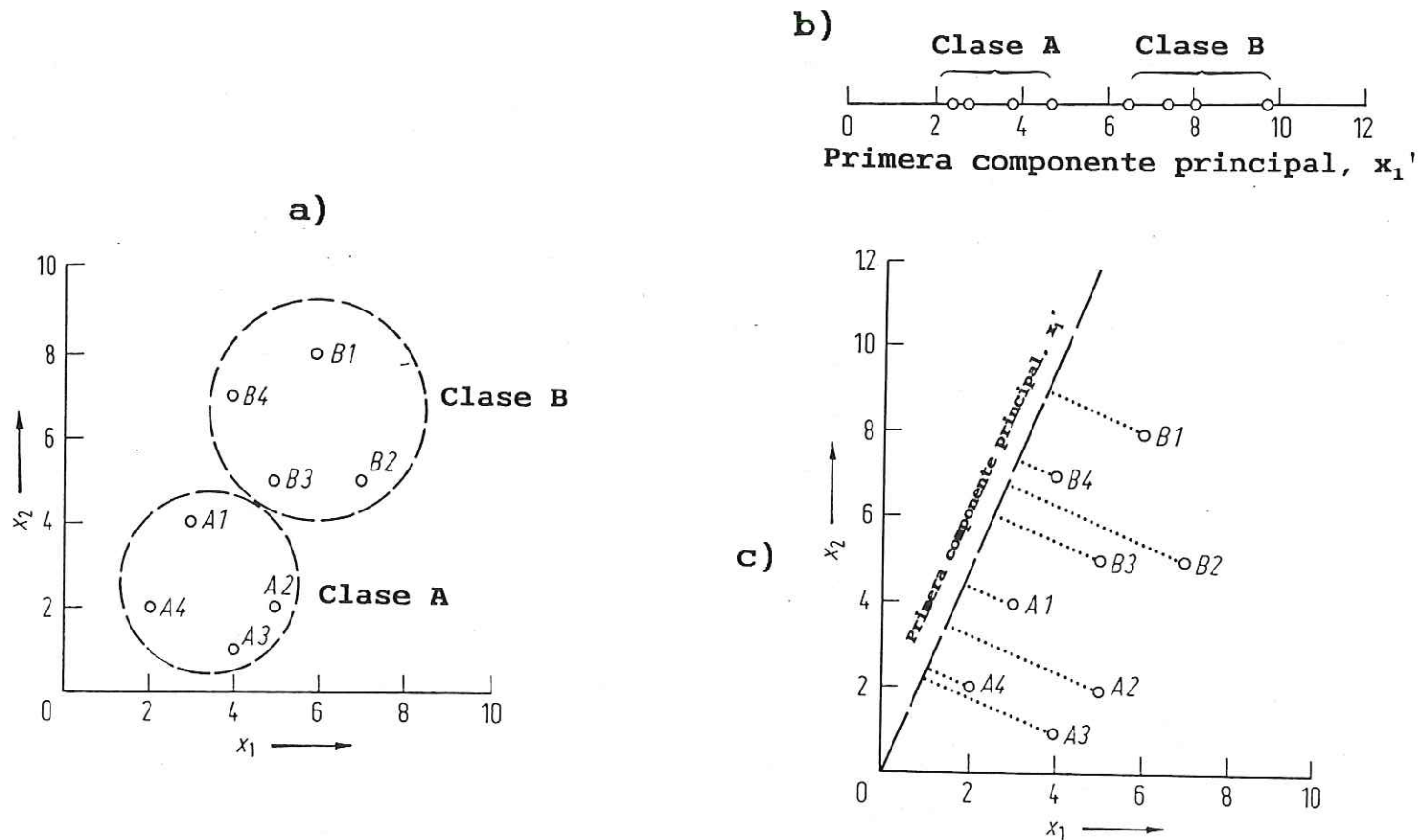
(ortogonal al primero) en dirección al siguiente máximo de variabilidad y así sucesivamente. De esta manera, es de esperar que la última componente principal contenga el mínimo de varianza y por lo tanto contribuya con poco en la separación de patrones. Sin embargo, en ocasiones cierto tipo de información puede ser relevante en estas últimas componentes.

La Figura E-1 muestra un caso para dos bandas en el cual una transformación a componentes principales permite la separación de dos clases (A,B) que originalmente se encontraban mezcladas debido a una alta correlación espectral. Observe como a lo largo de la primera componente principal es posible separar ambas clases e incluso se pueden identificar subclases, como consecuencia de su amplio intervalo dinámico, intrínseco a su alta varianza.

Independiente de la estructura de las clases existentes, la transformada Karhunen-Loeve hace uso de la media global  $m$  y de la varianza global  $\Sigma$  de los datos. La posición promedio de un pixel-vector en el espacio multiespectral estará definida por el valor esperado del vector  $x$ , de acuerdo a

$$m = \varepsilon\{x\} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K x_j$$

donde  $m$  es la media global y  $x_j$  es el jésimo pixel-vector de un total  $K$ . Mientras el parámetro  $m$  define la posición esperada de un pixel en el espacio multiespectral, la matriz de covarianza estimará el grado de dispersión de los pixeles alrededor de la media. Esta se define por



**Figura E-1.-** Ejemplo en el que se muestra la transformación de un espacio espectral bidimensional a sus componentes principales. En (a) se observan dos clases informativas (A,B) sobrepuestas respecto a los ejes originales. En (b) se muestra la ubicación de estas clases a lo largo de la primera componente principal, y en (c) la relación entre el eje de la primera componente principal y las componentes de los datos originales. Modificado de Richards (1986).

$$\Sigma_x = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (x_j - m)(x_j - m)^t$$

donde el superíndice  $t$  denota un vector transpuesto.

La matriz de covarianza es un concepto matemático de importancia fundamental en el análisis digital de información multiespectral y está estrechamente vinculada con la matriz de correlación  $R$ , mediante la expresión

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{\sigma_{ii}\sigma_{jj}}}$$

donde  $\rho_{ij}$  es un elemento de la matriz de correlación y  $\sigma_{ij}$  son los elementos de la matriz de covarianza,  $\sigma_{ii}$  y  $\sigma_{jj}$  son las varianzas de la  $i$ -ésima y  $j$ -ésima bandas espectrales. Notese que ambas matrices (covarianza y correlación) son simétricas y que, para el caso de datos donde no hay correlación entre ninguno de sus componentes espectrales, estas matrices serán diagonales. Por tanto, el nuevo espacio de transformación será un espacio vectorial en el que los datos son representados sin correlación (la matriz de covarianza es diagonal).

Si los nuevos pixel-vectores son representados como  $x'$  en el nuevo sistema de coordenadas, entonces puede existir una función de transformación  $\Omega$  para las coordenadas originales  $x$  tal que

$$x' = \Omega x$$

donde la matriz de covarianza en el espacio  $x'$  es diagonal, y existe un parámetro  $m_{x'}$  como estimador de posición promedio que se define por

$$m_{x'} = \varepsilon \{x'\} = \varepsilon \{\Omega x\} = \Omega \varepsilon \{x\} = \Omega m_x$$

donde  $m_x$  es el promedio de los datos originales.

Por definición, la matriz de covarianza en el espacio  $x'$  está descrita por

$$\Sigma_{x'} = \varepsilon \{ (x' - m_{x'}) (x' - m_{x'})^t \}$$

por lo tanto

$$\begin{aligned} \Sigma_{x'} &= \varepsilon \{ (\Omega x - \Omega m_x) (\Omega x - \Omega m_x)^t \} \\ &= \Omega \varepsilon \{ (x - m_x) (x - m_x)^t \} \Omega^t \\ &= \Omega \Sigma_x \Omega^t \end{aligned}$$

donde  $\Sigma_x$  es conocida (matriz de covarianza de los datos originales) y, dado que  $\Sigma_{x'}$  debe ser diagonal, entonces  $\Omega$  es la matriz transpuesta de los eigenvectores de  $\Sigma_x$ .

Por lo tanto,  $\Sigma_{x'}$  es la matriz diagonalizada de los eigenvalores de  $\Sigma_x$ .

$$\Sigma_{x'} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \lambda_2 & \\ 0 & & \lambda_N \end{bmatrix}$$

donde  $N$  es el número de componentes espectrales.

Los resultados de este tipo de transformaciones generalmente son complementados con técnicas de realce digital como; filtros detectores de bordes, corrimiento de umbral en histograma o despliegues en falso color, para facilitar las labores de interpretación al analista.

En materia de procesamiento digital de imágenes, existe una cantidad de textos clásicos, entre los que destacan Castleman (1979), Schowengerdt (1983), Richards (1986) y Gonzalez y Woods (1992).