



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SEGMENTACION ADAPTABLE DE IMAGENES DE RADAR DE APERTURA SINTETICA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO EN COMPUTACION

P R E S E N T A N :

SANDRA INES ZAVALA GOMEZ

RICARDO CORDERO ROSALES

JUAN IVAN FERRERA GARRIDO



DIRECTOR DE TESIS. D.I. MIGUEL MOCTEZUMA FLORES

MEXICO, D. F.

1 DE FEBRERO DEL 2000

280215



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Deseamos destacar y agradecer el apoyo brindado por las siguientes Instituciones:

Dirección General de Asuntos y Personal Académico (DGAPA), a través del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), bajo el registro IN- 105397.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), a través del Programa de Cooperación e Intercambio Académico, Trienio 1999-2001.

Agencia Espacial Europea (ESA), por facilitarnos sus imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) de los satélites ERS a través del Proyecto AO-318.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por darnos la oportunidad de obtener una excelente educación como ciudadanos de este País y a la Facultad de Ingeniería por ayudarnos a obtener una especialidad útil y productiva. Pueden estar seguros que siempre llevaremos su nombre muy en alto.

POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU.

Al **Dr. Miguel Moctezuma Flores** por aceptar dirigir este proyecto, así como, por todos sus sabios consejos, motivación y gran apoyo que nos brindó durante la realización de este trabajo.

A :

Dr. Francisco García Ugalde

Dr. Víctor García Garduño

Dr. Boris Escalante Ramírez

Dr. Jesús Savage Carmona

por su honorable participación como miembros del jurado evaluador.

Un agradecimiento especial a:

División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería,
División Eléctrica.

Dr. Xavier Descombes. Département Images, E.N.S.T. Paris, France

Dr. Jorge Lira. Instituto de Geofísica, UNAM

Ing. Víctor Hugo Reyes Evaristo

por sus valiosas aportaciones y sugerencias durante la realización de este trabajo.

A Dios y a la vida
Por darme la oportunidad de hacer algo
productivo y permitirme estar aquí.

A mis padres Efrén y Rosy
Por su cariño, amor y apoyo total e
incondicional; que fue la semilla para que
con carácter y valor siempre alcance mis
metas.

A mis hermanos Elsa y Rafael
Por la comprensión y comunicación que
tenemos como buenos amigos.

*A mi tía Esthela y mis padrinos Enrique y
Magdalena*
Y a toda mi familia en general.
Por la confianza, esperanza y buenos
consejos que depositaron en mi.

A mis grandes amigos Iván y Ricardo
Por su tenacidad, paciencia y su invaluable
amistad. Se que llegarán lejos.

A todos mis Profesores
Que desde el inicio de mi educación
académica, contribuyeron a la búsqueda de
mi ética, criterio, responsabilidad y
profesionalismo.

Este logro no nada mas es mío, también es de ustedes.

Sandy

A MIS PADRES GUADALUPE Y FELIPE.

Por su apoyo en mi formación y por su amor a lo largo de mi vida, gracias.

A MIS HERMANOS:

María Elena
Felipe
Miroslava

A MIS CUÑADOS:

Rosalinda
José Ignacio
Pablo

A MIS SOBRINOS:

Pablo
Thalía
María Elena
Ignacio
Miroslava

Gracias por todos los buenos momentos que hemos pasado.

A todos mis compañeros a lo largo de mi educación, con especial cariño al grupo 36 de la generación 92 de la Facultad de Ingeniería, gracias por enseñarme el valor de la amistad.

A todos mis Profesores a lo largo de mi educación les agradezco por su entrega, dedicación y paciencia.

A SANDY Y A RICARDO,
Por su amistad incondicional, sus sabios consejos y su agradable compañía. Les deseo lo mejor del mundo.

A DIOS.
Por darme la oportunidad de realizar algo nuevo cada día.

IVÁN

A MIS PADRES FELIPE Y ROCÍO.

A quienes les dedico este logro, gracias a su cariño, apoyo y confianza puede concluir mi trabajo y estudios profesionales.

A MIS HERMANOS.

Por sus consejos, ejemplos y apoyo que fue la base para continuar siempre adelante.

A SANDY E IVÁN.

Por su apoyo y confianza, sin ellos este trabajo tampoco sería realidad.

A MIS AMIGOS.

Por sus consejos y el apoyo que en su momento me brindaron, en especial al grupo 36 y 36A de la F.I. por su amistad y apoyo.

A MIS MAESTROS.

Por sus enseñanzas, consejos y ejemplos que servirán toda la vida para llevar el nombre de la UNAM y de la Facultad de Ingeniería muy en alto.

A DIOS Y A LA VIDA.

Por darme la oportunidad de estudiar en la UNAM en donde pase increíbles momentos de mi vida, obtuve una excelente formación profesional y personal, y tuve la oportunidad de conocer a todos mis grandes amigos.

Ricardo

Introducción	1
CAPÍTULO 1. Principios Físicos de la Percepción Remota.	2
1.1 Historia de la Percepción Remota	3
1.2 ¿Qué es un sistema de Percepción Remota?	4
1.3 Espectro Electromagnético	6
1.4 Datos en imágenes de Percepción Remota	7
1.5 Aplicaciones de los Sistemas de Percepción Remota	8
CAPÍTULO 2. Sistemas Espaciales de la Percepción Remota.	10
2.1 Tipos de sensores	11
2.1.1 Tipos de resolución de un sensor (especial, espectral, radiométrica, temporal)	12
2.2 Sistemas de Radar	12
2.2.1 Características del Sistema de Radar	13
2.2.2 Ventajas del Sistema de Radar	13
2.2.3 Aplicaciones del Sistema de Radar	14
2.3 Imágenes de Radar	14
2.3.1 ¿Cómo se forma una Imagen de Radar?	15
2.3.2 Obtención de datos	15
2.3.3 Aplicaciones de las Imágenes de Radar	16
CAPÍTULO 3. Satélites de Percepción Remota.	17
3.1 Historia de los satélites de estudio metereológico	18
3.2 Bandas utilizadas por los satélites	19
3.3 Organismos de control de satélites	19
3.3.1 Organización NOAA	19
3.3.2 ESA	19
3.3.3 NASA	20
3.3.4 CNES	20
3.4 Satélites Geoestacionarios	21
3.4.1 GOES (Geostationary Operational Enviromental Satellites)	21

3.5 Satélites Polares	24
3.5.1 Satélites NOAA (American National Oceanic and Atmospheric)	25
3.5.2 Satélites Landsat	28
3.5.3 SPOT (Satellite Probatoire pour l'Observation de la Terre)	32
3.5.4 ERS (European Remote-Sensing Satellites)	35
3.6 Mosaicos de Imágenes.	
3.6.1 Imágenes de los satélites GOES	39
3.6.2 Imágenes de los satélites NOAA	41
3.6.3 Imágenes de los satélites Landsat	43
3.6.4 Imágenes de los satélites SPOT	45
3.6.5 Imágenes de los satélites ERS	48
CAPÍTULO 4. Campos Aleatorios de Markov.	51
4.1 Introducción al Procesamiento Digital de Imágenes	52
4.2 Etiquetación	53
4.2.1 Problemas de etiquetado en Visión	55
4.2.2 Etiquetado con Referencias Contextuales	56
4.3 Sistema de Vecindades y Cliques	57
4.4 Campos Aleatorios de Markov	59
4.4.1 Segmentación y reconstrucción de imágenes usando Campos Aleatorios de Markov	61
4.4.2 Otras aplicaciones de los Campos de Markov	62
4.5 Distribución de Gibbs	62
4.5.1 Equivalencia entre Gibbs y MRF	64
4.6 Otras Teorías de Campos Aleatorios	65
4.6.1 Modelo Ising	65
4.6.2 Distribución de Bayes y MAP	66
CAPÍTULO 5. Segmentación de Escenas Urbanas.	68
5.1 Introducción	69
5.2 Recocido Simulado	70
5.2.1 Planteamiento para minimizar la función de energía	70
5.2.2 Algoritmo de Recocido Simulado	71
5.2.3 Energía y ley de Temperatura	72
5.3 Modelo de Potts	73

5.4 Método de Segmentación de Vecindades Adaptables	74
5.4.1 Segmentación de la imagen	75
5.5 Imágenes de Prueba y Áreas de Estudio	79
5.5.1 Imágenes de satélite	80
5.5.2 Fotoimágenes Aéreas	83
5.6 Resultados	87
CAPÍTULO 6. Conclusiones.	111
Apéndice.	<i>i</i>
Glosario	<i>iv</i>
Bibliografía.	<i>vii</i>

Introducción

Desde la puesta en órbita del primer satélite artificial en Octubre de 1957, el hombre ha cambiado la concepción del mundo y su relación con él. Actualmente existen gran cantidad de satélites, tanto civiles como militares orbitando alrededor de nuestro Planeta, dedicados a diferentes aplicaciones. Los satélites civiles se han utilizado principalmente para las telecomunicaciones y la observación de la Tierra. Aunque el estudio panorámico de la superficie terrestre comenzó a principios de siglo con las fotografías aéreas, fué hasta 1972, cuando nace formalmente la Percepción Remota con la puesta en órbita el primer satélite ERTS (Earth Resources Technology Satellite).

En general, los satélites de Percepción Remota están equipados con una variedad de instrumentos, específicamente diseñados para registrar los detalles de la superficie terrestre, los océanos y la atmósfera. La utilidad de la información adquirida por los sensores, instalados a bordo de los satélites, han hecho de la Percepción Remota un campo de gran actividad tanto a nivel de desarrollo de nuevas tecnologías y de estudio e investigación en diversos campos como la ecología y el medio ambiente, las áreas urbanas, la agricultura, la geología, la hidrología o la climatología.

Las técnicas de Percepción Remota, a través de las imágenes adquiridas por los satélites, contribuyen al estudio de los fenómenos atmosféricos, catástrofes climatológicas, la expansión de la mancha urbana y deforestación de los bosques, entre otras cosas. La mejora en la velocidad y confiabilidad de las computadoras, contribuyen a que las estaciones meteorológicas terrestres adquieran a través de las imágenes satelitales, los parámetros necesarios para alimentar a los modelos numéricos de predicción climática y poder hacer pronósticos en tiempo real.

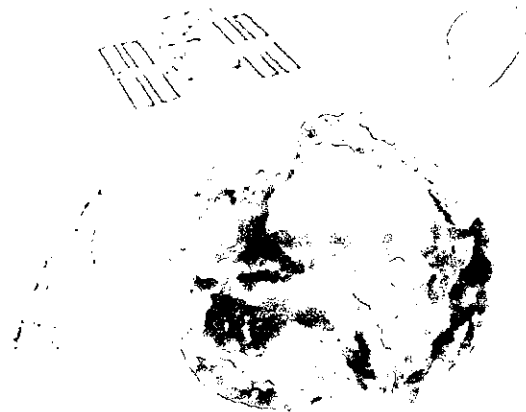
El lento desarrollo económico en los países subdesarrollados, ha tenido como una de sus principales consecuencias, el desmedido crecimiento en sus principales ciudades, debido principalmente a la gran cantidad de gente que busca un mejor nivel de vida en éstas, acarreando una enorme cantidad de problemas de índole social y ecológica. En la búsqueda de cubrir las necesidades de vivienda de toda la población, se han tenido que generar en las periferias de las ciudades, nuevos asentamientos urbanos y con ellos los servicios públicos requeridos, ganándole cada vez más terreno a las áreas verdes.

Cómo estas áreas verdes se reducen dramáticamente con el tiempo, el estudio de las imágenes satelitales y fotografías de éstas zonas, proporcionan información importante para la planificación y crecimiento urbano; por esta razón, es necesario que las grandes ciudades, sobre todo en los países subdesarrollados, las autoridades monitoreen estrechamente la disminución de vegetación, así como, la velocidad y dirección en que crece la ciudad. Estas acciones permitirán tomar las decisiones necesarias para controlar esa expansión respetando los ecosistemas. No obstante la problemática mencionada, los datos de las imágenes satelitales aún no se han aplicado con éxito a la observación y supervisión detallada de las áreas urbanas y sus cambios.

En este trabajo tres aspectos son especialmente denotados: La Percepción Remota, las imágenes SAR, y la detección de elementos de áreas urbanas. Se propone el uso del Método de Vecindades Adaptables basado en las Campos Aleatorios de Markov (MRF). En los capítulos 1 y 2 se presenta una introducción a los sistemas de Percepción Remota y se muestran las principales herramientas en las que esta se sustenta. El capítulo 3 presenta la historia y descripción de algunos de los más importantes satélites de Percepción Remota. En el capítulo 4 se exponen los principales postulados de la teoría de los Campos Aleatorios de Markov. El capítulo 5 describe la segmentación de escenas urbanas utilizando el método propuesto, así como los resultados obtenidos y su comparación con otros métodos de segmentación.

CAPÍTULO 1

PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA



1.1 Historia de la Percepción Remota.

El hombre por naturaleza es un ser curioso, siempre ha querido conocer todo lo que le rodea y aún más. A través del tiempo, su necesidad de exploración ha dado origen a diversas tecnologías y técnicas que le han facilitado la observación del entorno. Un ejemplo notable es la Percepción Remota.

La Percepción Remota es una técnica de observación de la superficie terrestre, dependiente del desarrollo tecnológico existente en cada época. Esta abarca aspectos muy variados como la óptica y detectores del sensor, vehículos, sistemas de transmisión, equipos de tratamiento, etc. Las formas de Percepción Remota han crecido vertiginosamente en las últimas décadas, dando origen a un notable progreso, tanto en la cantidad, variedad y calidad de información disponible para diversos campos científicos.

Las primeras experiencias de Percepción Remota datan de 1859 cuando el fotógrafo francés Gaspar Félix de Tournachon obtuvo las primeras fotografías aéreas abordo de un globo. Al año siguiente, James Wallace repitió las fotografías aéreas sobre la ciudad de Boston, despertando el interés de la nueva perspectiva aérea para un conocimiento detallado de la organización urbana. En los años posteriores se produjo un importante desarrollo en la fotografía aérea, gracias a los progresos realizados en óptica y mezclas químicas de reveladores. En 1909, Wilbur Wright adquirió la primera fotografía aérea abordo de un aeroplano, abriendo el camino de la observación desde plataformas remotas. La primera cámara aérea propiamente dicha se desarrolló en 1915 durante la Primera Guerra Mundial, por J.T.C. Moore-Brabazon.

Durante la Segunda Guerra Mundial se dio un gran desarrollo de las técnicas de percepción remota. Se mejoró la óptica de las cámaras de reconocimiento, así como los reveladores utilizados. Se introdujeron las películas en infrarrojo (desarrolladas por Kodak Research Laboratories), sensores nuevos, como el radar, y se mejoraron los sistemas de comunicación. La aeronáutica prosperó, dando mayor estabilidad a las plataformas de observación. Todas estas innovaciones se aplicaron después de la guerra para usos civiles, desarrollándose las primeras aplicaciones de esta exploración aérea para el conocimiento y control de los recursos naturales.

Con el lanzamiento del satélite soviético Sputnik I, en 1957, inicia la era espacial. En 1960, la NASA lanzó el primer satélite de la serie TIROS, pionero de múltiples misiones de observación meteorológica. En esta misma década, junto con los satélites artificiales, se lanzaron misiones tripuladas dedicadas a explorar el Sistema Solar y la Luna, aportando también valiosas imágenes sobre la superficie terrestre. En 1961 durante una de las misiones del Mercury, Alan B. Shepard realizó las primeras fotografías espaciales, de forma espontánea y un tanto rudimentaria; en 1965 la misión Gemini-Titán realizó los primeros experimentos formales de fotografía espacial, para usos geológicos y meteorológicos. Durante las misiones del Apollo-6 y Apollo-7 se adquirieron diversas series de fotografías verticales; en 1969 en el Apollo-9 se realizó el primer experimento multiespectral, denominado S065, compuesto por cuatro cámaras Hasselblad con distintos filtros.

En Julio de 1972, se lanzó el satélite ERTS 1 (Earth Resources Technology Satellite, llamado posteriormente Landsat 1). Este proyecto, resulta el más productivo por el momento para aplicaciones civiles de la Percepción Remota. Con esta serie de satélites, se incrementó el interés de la comunidad científica internacional, desarrollándose estudios en muchos países del mundo sobre las imágenes proporcionadas por estos satélites. Posteriormente se desarrollaron otros proyectos específicamente diseñados para la observación del medio ambiente. Los más conocidos son el laboratorio espacial tripulado Skylab (1973), propiedad de la NASA, el satélite francés SPOT (1986) y los europeos ERS (1991), entre otros.

En los últimos años, las misiones de Percepción Remota se han incrementado notablemente. La situación política mundial favorece las mejoras en la exploración espacial proporcionada por los satélites de usos civiles, al regularse las restricciones impuestas por los servicios de defensa. El interés hacia los estudios del cambio climático global aseguran el financiamiento de muy ambiciosos proyectos de Percepción Remota.

1.2 ¿Qué es un sistema de Percepción Remota?

El término Percepción Remota es una traducción del inglés *remote sensing*¹, ideado a principios de los 60's para designar cualquier medio de observación remota.

En forma genérica, la Percepción Remota es la obtención de información sobre un objeto sin entrar en contacto físico con él. Este término se utiliza comúnmente hoy en día en técnicas electromagnéticas para la adquisición de información; esto es, técnicas para la creación de imágenes de partes del espectro electromagnético (por ejemplo, luz visible, energía infrarroja (calor), rayos X, luz ultravioleta, etc.) existente entre la Tierra y un sensor situado sobre una plataforma de observación, siendo la fuente de radiación proveniente del Sol (Percepción Remota pasiva) o del propio sensor (Percepción Remota activa).

Las plataformas de observación pueden ser de tipo esporádico, como aviones, helicópteros o naves espaciales, o de tipo semipermanente como los satélites de observación de la Tierra situados en órbitas polares o ecuatoriales. Por su parte, los sensores pueden ser de tipo analógico (cámaras fotográficas, cámaras de video...) o digital (sistemas de barrido mono o multispectrales). La combinación de los distintos tipos de plataformas y sensores proporciona una gran variedad de datos con distintas resoluciones espaciales, espectrales y temporales.

Un Sistema de Percepción Remota está formado por diversos elementos, descritos a continuación, que abarcan desde la obtención de los datos hasta su uso final (fig. 1.1).

- (i) Fuente de energía, es el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Puede tratarse de un foco externo a éste, en cuyo caso se habla de Percepción Remota pasiva, o de un haz energético emitido por el sensor (Percepción Remota activa). La principal fuente de energía es el sol.
- (ii) Superficie terrestre, esta formada por distintas superficies, como vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal procedente de la fuente de energía, la cual es reflejada o emitida de acuerdo a sus características físicas.
- (iii) Sistema sensor, esta compuesto por los sensores y la plataforma móvil que los alberga. Su misión es capturar la energía emitida por las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o en su defecto, enviarla directamente al sistema de recepción.
- (iv) Sistema de recepción y comercialización, se encarga de recibir la información transmitida por la plataforma móvil, se graba en un formato apropiado, se corrige y se distribuye a los interesados.
- (v) Intérprete, es el encargado de convertir esos datos en información temática de interés, ya sea de forma visual o digital.
- (vi) Usuario final, es el encargado de analizar el documento resultante de la interpretación y darle un uso correcto.

¹ También traducido en algunos textos como Teledetección.

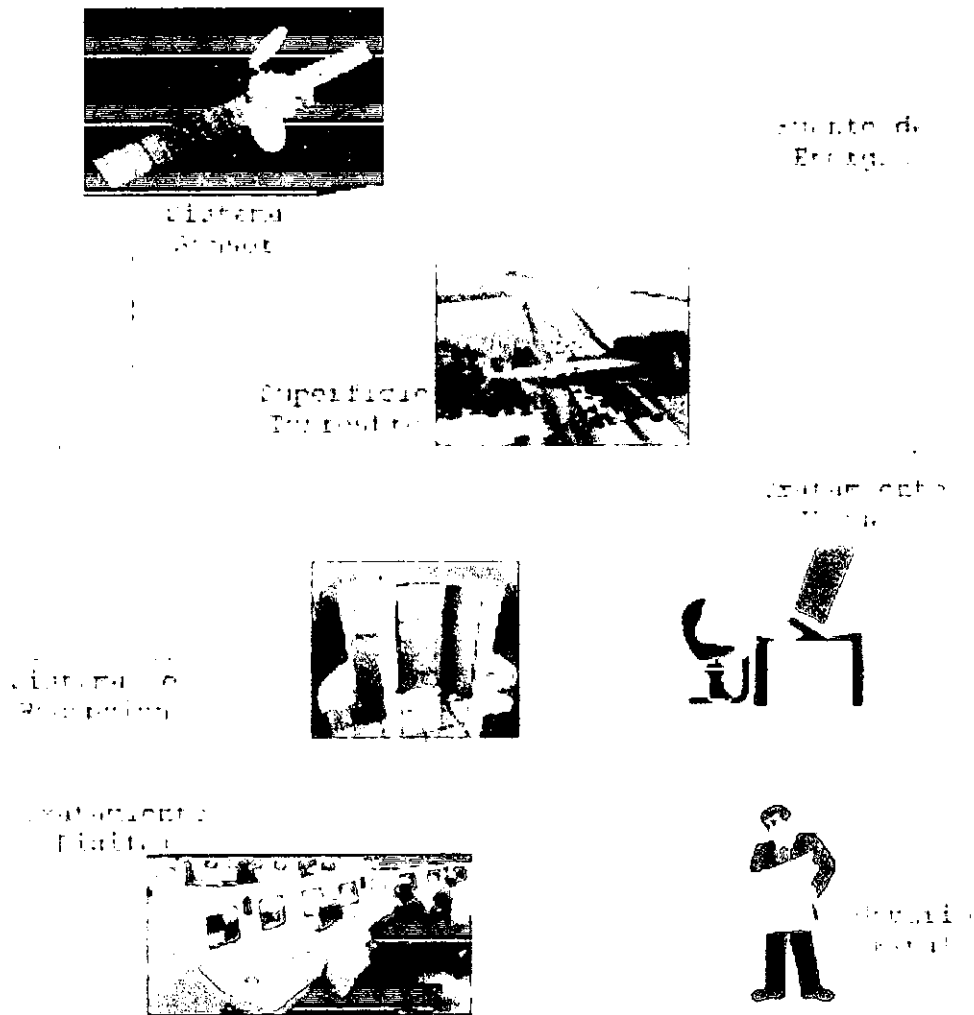


FIGURA 1.1 - Componentes de un sistema de Percepción Remota.

Para poder comprender mejor los elementos del Sistema Percepción Remota, mencionaremos un ejemplo convencional en el ser humano, el sentido de la vista; que es clasificado como un Sistema de Percepción Remota Pasivo. El ojo humano (iii) recibe la luz procedente de los objetos exteriores (ii) por reflejo de la luz solar (i). Esa señal es transmitida al cerebro (iv), el cual es capaz de formar una serie de imágenes sobre el mundo real que lo rodea. La persona que observa es intérprete (v) y al mismo tiempo usuario final (vi) de la imagen detectada, lo cual le permite tomar decisiones sobre su propio comportamiento. Con lo que se comprueba que la visión humana es un sofisticado Sistema de Percepción Remota, puesto que interpreta con mucho detalle los objetos que observamos.

1.3 Espectro Electromagnético

La posibilidad de adquirir información a distancia se basa específicamente en la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Los elementos de una escena tienen una respuesta espectral propia y además esta combinación espectral es similar a la que presentan otros objetos o superficies de las mismas características u homogeneidad. La Percepción Remota se apoya en este principio para identificar objetos en la superficie terrestre.

Podemos definir totalmente cualquier tipo de energía dando su longitud de onda o frecuencia. El espectro electromagnético (figura 1.2) es la sucesión continua de esos valores de frecuencia, aunque conceptualmente se divide en bandas, en las que la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar.

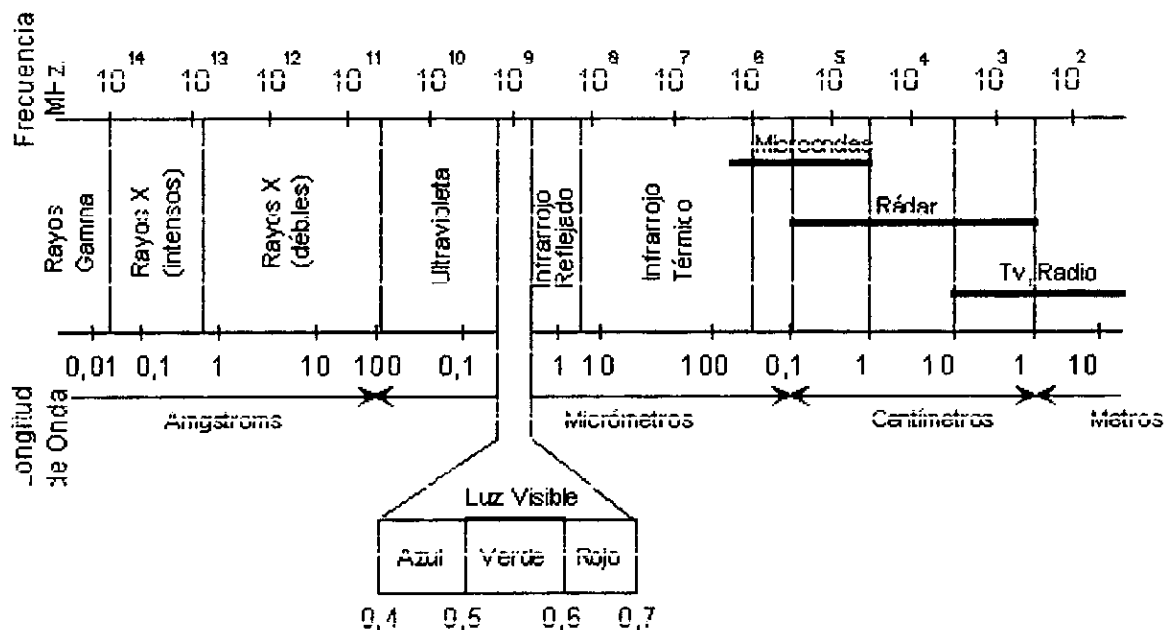


Figura 1.2 Espectro Electromagnético.

- Rayos Csmicos (longitudes de onda inferiores a 10^{-14} m²). Proviene del espacio exterior y tienen una gran potencia de penetración.
- Rayos Gama (10^{-14} - 10^{-10} m). Estos son liberados por los materiales radioactivos.
- Rayos X (10^{-11} - 10^{-9} m). Pueden penetrar los tejidos del cuerpo humano y por lo tanto pueden ser utilizados como una herramienta de diagnóstico en la medicina, la industria y la ciencia para producir fotografías de rayos X.
- Rayos Ultravioleta (380 - 5 nm³). Están presentes en la luz solar, y en grandes cantidades pueden afectar la vida humana.

² metros

³ nanometros

Dada la tecnología actual, las bandas utilizadas en la Percepción Remota abarcan a partir del espectro visible.

- Espectro visible (0.4 - 0.7 μm ⁴). Es la única radiación electromagnética perceptible por el ojo humano (de ahí su nombre). Coincide con la longitud de onda donde es máxima la radiación solar. Podemos localizar los distintos colores primarios en las longitudes: Azul: 0.4 - 0.5 μm ; Verde: 0.5 - 0.6 μm ; Rojo: 0.6 - 0.7 μm
- Infrarrojo (750 nm - 1 mm). Estas ondas penetran el cuerpo humano y generan un calor interno el cual puede ser detectado independientemente de la visibilidad. Este espectro se divide en:
 - ◆ Próximo Infrarrojo (0.7 - 1.3 μm). Esta banda es importante para diferenciar masas vegetales y concentraciones de humedad.
 - ◆ Medio Infrarrojo (1.3 - 8 μm). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie terrestre, por lo que hay muchas dificultades de discriminación.
 - ◆ Térmico Infrarrojo (8 - 14 μm). Es la región del espectro en la que emiten energía todos los cuerpos de la superficie terrestre.
- Microondas (de 1 mm en adelante). Tiene la propiedad de ser transparente a la cubierta nubosa, pero también de llevar asociada muy poca energía. Por eso, si se quiere usar esta banda tendrá utilizar Percepción Remota activa.
- Radar (1 mm - 1 m). Radiómetro activo del uso de las Microondas que trabaja en cualquier condición atmosférica, su inconveniente es la baja resolución.
- Ondas de radio (10 cm en adelante). Utilizadas en los sistemas de telecomunicaciones y de calentamiento.

1.4 Datos en imágenes de Percepción Remota

La principal fuente de datos en Percepción Remota consiste en una imagen matricial bidimensional. Un dato en particular representa un elemento de la escena sobre la Superficie Terrestre, llamado elemento imagen y representado como un pixel.

En una imagen es posible obtener tres tipos de información:

- *Espacial*, indica la organización en el espacio de los elementos.
- *Esppectral*, denota la naturaleza de las superficies.
- *Temporal*, donde se observan los cambios en el tiempo de una determinada zona.

Es posible almacenar una imagen digital completa (con todas las bandas) de tres formas distintas basándose en el ordenamiento de los pixeles:

- *BSQ (Band Sequential)*. Las bandas son almacenadas en orden consecutivo. Conveniente para procesamiento espacial, ya que toda la información de una banda es accesada fácilmente al encontrarse junta y consecutiva.
- *BIP (Bands Interleaved by Pixel)*. Todas las bandas de un determinado pixel son almacenadas en forma consecutiva. Conveniente para procesamiento espectral, ya que la información de cada pixel se encuentra continua.

⁴ micrómetros

- *BIL (Bands Interleaved by Line)*. Todas las bandas de una línea determinada de píxeles son almacenadas de forma consecutiva. Relaciona los dos formatos anteriores.

1.5 Aplicaciones de los Sistemas de Percepción Remota

La Percepción Remota se ha aplicado con bastante éxito y sobre todo, con la certeza de que será una destacable tecnología a corto plazo. Las principales aplicaciones de la Percepción Remota son múltiples entre las que podemos destacar:

Meteorología

- Predicción de desastres naturales de origen climático
- Análisis de masas nubosas y su evolución
- Modelización climática a diferentes escalas

Agricultura y Bosques

- Discriminación de tipos de vegetación: tipos de cultivos, tipos de maderas, etc.
- Determinación de la vegetación activa (proceso de creación de clorofila)
- Medición de extensión de cultivos y maderas por especies
- Clasificación de usos del suelo

Cartografía y Planeamiento Urbanístico

- Cartografía y actualización de mapas
- Clasificación de la fertilidad de la tierra
- Clasificación de zonas urbanas y rurales
- Planificación regional
- Cartografía de redes de transporte
- Cartografía de límites tierra - agua
- Cartografía de fracturas

Geología

- Reconocimiento de tipos de roca
- Cartografía de zonas geológicas
- Revisión de mapas geológicos
- Delineación de rocas y suelos no consolidados
- Cartografía de intrusiones ígneas
- Cartografía de depósitos de recientes superficies volcánicas
- Búsqueda de guías de superficie para mineralización
- Determinación de estructuras regionales
- Cartografías lineales

Recursos Hidrográficos

- Determinación de límites, áreas y volúmenes de superficies acuáticas
- Cartografía de inundaciones
- Determinación del área y límites de zonas nevadas
- Medida de regiones glaciales
- Medida de modelos de sedimentación y alteraciones
- Determinación de la profundidad del agua
- Delineación de campos irrigados
- Clasificación de lagos
- Detección de zonas de alteraciones hidrotermales

Oceanografía y Recursos Marítimos

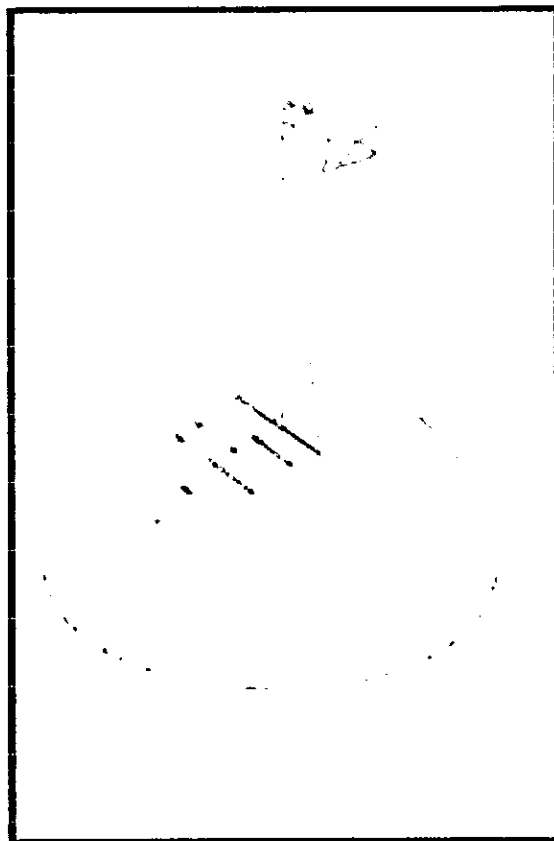
- Detección de organismos marinos vivos
- Determinación de modelos de alteración y circulación
- Cartografía térmica de la superficie del mar
- Cartografía de cambios en límites de las costas
- Cartografía de costas y áreas superficiales
- Cartografía de hielos para navegación
- Estudio de mareas y olas

Medio Ambiente

- Control de superficies mineras
- Cartografía y control de contaminación de aguas
- Detección de contaminación del aire y sus efectos
- Determinación de efectos de desastres naturales
- Control medioambiental de actividades humanas
- Seguimiento de incendios forestales y sus efectos
- Estimación de modelos de erosión

CAPÍTULO 2

SISTEMAS ESPACIALES DE LA PERCEPCIÓN REMOTA



2.1 Tipos de sensores

En un Sistema de Percepción Remota, un elemento básico es el sensor, ya que de su correcta elección depende el buen cumplimiento de los objetivos de un proyecto de Percepción Remota. La selección del sensor esta en función de sus resoluciones espectral, espacial, temporal y radiométrica.

Un sensor de observación terrestre es un dispositivo instalado en las plataformas de observación, destinado a captar la energía electromagnética reflejada o emitida por los objetos observados. Algunos sensores, tipo radiómetros, se limitan a devolver el valor de la energía captada en cada punto de observación entre unos intervalos de longitud de onda determinados. Sin embargo, muchos de los sensores, están diseñados para reconstruir una imagen de la superficie observada, en la que la intensidad o brillo de cada punto de la imagen es proporcional a la cantidad de energía irradiada por una pequeña superficie (campo de visión instantánea) dentro de un intervalo de longitudes de onda determinado.

Un sensor se compone básicamente de un sistema óptico o de una antena, que enfoca los rayos electromagnéticos hacia el elemento fotosensible, y opcionalmente puede disponer de un sistema mecánico de barrido. En los sistemas activos (radar, láser) es además necesario una fuente de iluminación o radiación, que dirija, un haz de rayos electromagnéticos hacia el objeto o superficie observada.

Como se mencionó anteriormente (1.2), los sensores pueden ser de tipo analógico o digital. Los sensores analógicos son aquellos en los que el elemento fotosensible es una emulsión química que reacciona con la radiación de una determinada longitud de onda. En los sensores digitales el elemento fotosensible es una sustancia que al recibir el impacto de determinados fotones genera una señal eléctrica que puede ser digitalizada. Por ejemplo:

Sensores analógicos	Sensores digitales
películas b/n y color	MSS y TM (LANDSAT)
películas infrarrojo	XS y Pancromático (SPOT)
películas térmicas	AVHRR (NOAA)
	SAR (ERS, JERS)
	DEDALUS (Aerotransportado)

Es posible realizar otra clasificación que divide a los sensores en activos y pasivos (1.2). Donde los activos son aquellos que emiten radiación en la longitud de onda deseada por su propia fuente, y luego reciben la señal que los objetos han reflejado en el mismo rango del espectro que el sistema emisor; dentro de este grupo entran los sistemas de radar y láser. Los pasivos se limitan a recibir radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie de observación; dentro de este grupo se integran los sensores ópticos e infrarrojos.

Otra clasificación importante es la que existe entre sensores monoespectrales y multispectrales (1.2). Los primeros integran para cada punto o pixel de la imagen toda la energía recibida dentro de un intervalo de longitudes de onda. Los segundos, para cada pixel son capaces de registrar separadamente los valores de radiación recibidos en distintas bandas de longitudes de onda, por ejemplo:

Sensores monospectrales	Sensores multispectrales
Fotografía b/n Pancromático SPOT	Fotografía color TM y MSS (LANDSAT), XS (SPOT), AVHRR (NOAA)
SAR (ERS)	ATM (DEDALUS)

Otro método de clasificación son las diferencias en función del satélite o plataforma sobre la que van instalados.

Por último también podrían clasificarse los sensores por el rango de longitudes de onda a la que son sensibles.

2.1.1 Tipos de resolución de un sensor (espacial, espectral, radiométrica, temporal)

Las características fundamentales de los datos adquiridos en un sistema de Percepción Remota, se pueden definir por parámetros como:

- *Resolución espectral.* Se refiere al número de bandas y a la anchura espectral de esas bandas que un sensor puede detectar. Por ejemplo la banda 1 del TM recoge la energía entre 0.45 y 0.52 μm . Es una resolución espectral más fina que la de la banda pancromática del SPOT, que está entre 0.51 y 0.73 μm .
- *Resolución espacial.* Es una medida del objeto más pequeño que puede ser resuelto por el sensor, o el área en la superficie que recoge cada píxel.
- *Resolución radiométrica.* Se refiere al rango dinámico, o número de posibles valores que puede tomar cada dato. Por ejemplo con 8 bits, el rango de valores va de 0 a 255.
- *Resolución temporal.* Se refiere a cada cuanto tiempo recoge el sensor una imagen de un área particular. Por ejemplo el satélite Landsat puede ver la misma área del globo cada 16 días.

2.2 Sistemas de Radar

El Radar (RADio Detection And RAngin) mide las características de las señales de microondas que emite la antena del radar y que son reflejadas por una superficie u objeto distante. Cuando las señales llegan a una superficie se reflejan en todas direcciones y parte de la energía reflejada vuelve a la antena como un eco muy débil. Estos ecos se convierten a datos digitales y se guardan para un procesamiento posterior.

La aplicación más común del radar es detectar la presencia y posición de objetos en una región determinada del espacio. Sin embargo, utilizando las técnicas adecuadas, el radar nos permite obtener más información del objeto detectado. Una de las principales técnicas de radar es conocida como SAR (Synthetic Aperture Radar - Radar de Apertura Sintética), con la cual se puede formar una imagen aproximada del objeto a partir de sus reflexiones.

La técnica SAR, es un tipo de Sistema de Radar modificado para producir imágenes en vez de gráficos de rangos y direcciones. Las imágenes de radar transmiten pulsos de energía de microondas y, es por ello considerado un Sistema de Sensor Remoto Activo. Estas características lo hacen diferente del resto de los Sistemas de Sensores Remotos y permite operar de noche o bajo condiciones de nubosidad densa.

Un Sistema de Radar esta formado por un conjunto de elementos, listados a continuación:

- Un transmisor que genera un pulso de radio y luz de gran potencia con longitudes de onda entre 1 y 100 cm.
- Un sensor activo que envía pulsos a la antena y retorna el eco al receptor.
- Una antena que envía el pulso transmitido a la zona de estudio y recoge los ecos devueltos.
- Un receptor que convierte el eco devuelto a código digital numérico.
- Un grabador de datos que almacena la imagen para ser procesada y visualizada.

2.2.1 Características del Sistema de Radar

Las imágenes obtenidas por los Sistemas de Radar presentan características especiales que las distinguen de las demás.

Ruido Speckle (moteado). Aparece en una imagen como un *salpullido* ocasionado por una combinación de la dispersión de muchas dispersiones pequeñas dentro de un pixel. El speckle puede desaparecer al hacer la media entre diferentes vistas, pero esto reduce la resolución de la imagen

Ambigüedades. Son pixeles confusos, particularmente los aparecidos en los bordes de las zonas de agua. Esto es debido a las reflexiones procedentes de otros pulsos.

Superposición de niveles. En un caso extremo, la cima de la montaña aparece más cercana que la parte baja. Esto puede mejorarse incrementando el ángulo del punto de vista.

Sombra radar. Las pendientes traseras de las montañas aparecen negras. Esto puede ser mejorado usando datos de otra toma.

Alto contraste en áreas urbanas. Estas zonas causan una dispersión debido a las esquinas reflejantes y los efectos suavizantes de las calles. Los ángulos afilados aparecen brillantes y las carreteras oscuras.

Distorsión radiométrica. La imagen puede aparecer más luminosa en el centro. Esto también puede causar bandas en la imagen, todo debido al tipo de antena de radar.

Interferencias. Formas lineales o paralelogramos brillantes a lo largo de la imagen pueden ser causadas por otros emisores radar operando en la misma frecuencia dentro del área de trabajo.

2.2.2 Ventajas del Sistema de Radar

Algunas ventajas de las imágenes Radar frente a otros sistemas ópticos (por ejemplo, Landsat o SPOT) se mencionan a continuación:

- Como la energía de las microondas no es afectada por las cubiertas nubosas, el Sistema Radar de obtención de imágenes es capaz de obtener datos en zonas tradicionalmente nubosas como los polos o los trópicos.
- En regiones muy áridas la energía de las microondas puede penetrar en la superficie hasta una profundidad considerable, proporcionando medidas únicas de las propiedades de la Superficie Terrestre.
- En regiones con vegetación muy abundante, puede penetrar las copas de los árboles y en la imagen resultado podrá observarse claramente la superficie situada bajo la vegetación.

- Utiliza la interacción de las microondas con la superficie de estudio y su posterior reflexión y difusión. Esto nos permite deducir información sobre la naturaleza de los objetos que no hubiese sido posible obtener utilizando otros métodos convencionales. SAR por lo tanto, complementa otro tipo de datos de Percepción Remota.

2.2.3 Aplicaciones del Sistema de Radar

Las imágenes radar ayudan a producir mapas topográficos digitales del Globo entero con un alto grado de precisión, en alturas de aproximadamente 1 m en zonas relativamente llanas y 5 m en zonas de alto relieve.

El radar puede recolectar datos de noche, a través de nubes e incluso lluvia. Esto permite un acceso a información de zonas afectadas por terremotos, huracanes, lavas, inundaciones, maremotos, etc.

Es útil en exploraciones arqueológicas por su habilidad para penetrar en la arena seca y en algunas cubiertas vegetales.

2.3 Imágenes de Radar

Las imágenes radar se componen de muchos puntos. Cada punto ó pixel en una imagen Radar representa la reflexión de un objeto en ese punto del espacio; las zonas más oscuras representan reflexión pequeña y las zonas más brillantes indican una reflexión grande. Una imagen con mucho brillo indica que una gran parte de la energía se refleja hacia la antena, mientras que una imagen con poco brillo implica que se refleja poca energía.

A la reflexión de un objeto se le conoce como Sección Radar, en inglés Radar Cross Section o RCS y es una medida de la proporción de la energía incidente reflejada en el objeto. Los objetos iluminados por el radar se componen de varias superficies reflejantes, las cuales contribuyen a la reflexión total, es decir, a la RCS.

Por lo tanto se puede definir una imagen Radar como la distribución espacial de la reflexión electromagnética correspondiente a un objeto.

Una imagen radar funciona igual que el flash de una cámara de fotografía, el flash de una cámara envía un pulso de luz y se graba sobre una película, esta es la luz reflejada que ha atravesado la lente de la cámara. En vez de una cámara y una película, el radar usa una antena y una computadora para grabar las imágenes. En una imagen radar, solamente se puede ver la señal que se refleja y vuelve a la antena.

Las imágenes de radar pueden dar diferentes resultados :

Zonas afectadas por terremotos o actividad volcánica. Por interferometría (técnica que permite generar modelos digitales con gran precisión) se puede obtener una resolución de 2 a 10 cm.

Visualización de masas de hielo en el mar. Pueden ser usadas para controlar cambios climáticos o seguir el movimiento de los grandes icebergs. El mar en zonas polares es una mezcla de hielo, burbujas de aire y bolsas de agua. En las imágenes radar, el mar abierto se ve de color negro debido a la reflexión especular ignorando las olas. El hielo *nuevo* es muy rugoso, mientras que el *viejo* es relativamente suave causando un alto nivel de volumen de dispersión.

Mezcla de suelos. La constante dieléctrica del suelo varía según sea el contenido heterogéneo del suelo. De este modo, a medida que el contenido de la mezcla se incrementa, la penetración de las ondas radar disminuye causando que la imagen aparezca con mayor brillo de lo habitual.

La resolución espacial de las imágenes de Radar la establece fundamentalmente el ancho de banda de la señal y la apertura angular. Las limitaciones prácticas impuestas por los equipos de medición o por el objeto mismo nos condicionan la resolución y por tanto la capacidad de discernir entre dos reflexiones muy próximas.

2.3.1 ¿Cómo se forma una Imagen de Radar?

La obtención de imágenes SAR implica el uso de dos técnicas completamente diferentes. Una para conseguir suficiente resolución en distancia, y la otra para obtener una resolución transversal adecuada.

En el método directo, la imagen de radar de un objeto tridimensional se puede realizar usando un radar que emita pulsos muy cortos y con una antena muy directa. El volumen tridimensional ocupado por el objeto iluminado es *barrido* por el haz de la antena, y la intensidad de los ecos recibidos se representa como una función de las coordenadas espaciales. La resolución espacial depende del tamaño del haz que llega al objeto y de la anchura del pulso.

La ventaja del método directo es la facilidad para formar la imagen, la cual requiere un mínimo procesado posterior de los datos, constituye.

Sus principales desventajas son:

- Para obtener un alto grado de resolución espacial, se necesitan anchos de pulsos muy pequeños (inferior a ηs) y antenas con parábolas muy grandes (la anchura del haz es inversamente proporcional al tamaño de la antena), pudiéndose superar los límites prácticos del sistema.
- La resolución transversal, obtenida de la anchura del haz de la antena se degrada cuando se incrementa la distancia.
- Al iluminar secuencialmente el objeto, se omiten las interacciones y acoplamientos que pueden ocurrir cuando el objeto se ilumina por completo.

El método sintético (SAR) es otra manera de formar imágenes radar, en donde la resolución espacial es el resultado de varias observaciones del objeto a diferentes frecuencias y ángulos.

Los principios que permiten obtener imágenes de radar por método sintético son: una señal con el mayor ancho de banda posible nos proporciona la suficiente resolución en distancia, mientras que la resolución transversal se consigue iluminando el objeto desde distintas posiciones.

2.3.2 Obtención de datos

Una vez que hemos visto que se puede formar la imagen de un objeto a partir de las medidas de su RCS para distintas frecuencias y ángulos de observación vamos a probar la técnica con casos prácticos. En primer lugar necesitamos obtener mediciones de la RCS de un objeto, para ello tenemos tres opciones:

- Mediante un sistema radar se obtienen mediciones reales, ya sea de un objeto en el espacio desde una estación terrestre, o bien de la superficie terrestre desde un satélite artificial.
- Realizando las medidas en una cámara anecoica, sobre objetos reales a escala o a tamaño natural.
- Utilizando simuladores de la sección radar de objetos, es posible calcular la sección radar (RCS) monoestática de blancos eléctricamente grandes modelados por parches NURBS (Non Uniform Rational B-Spline). Para ello, los blancos se consideran

conductores perfectos. Con este programa se simula el resultado de las mediciones que se obtendrían con un equipo radar.

2.3.3 Aplicaciones de las Imágenes de Radar

Las principales aplicaciones de imágenes de Radar son:

- Investigaciones de reflexión electromagnética de objetos complejos (p.e. el estudio de tipos de terreno desde satélites artificiales).
- Simulación analítica y física de rasgos de radar para determinar las respuestas de los sensores de radar (p.e. para la optimización de la forma y estructura de los aviones, diseñados con el fin de maximizar o minimizar, según las aplicaciones, sus ecos de radar).
- Sistemas de reconocimiento de objetos que usen la imagen como un identificador único para un objeto en particular (p.e. en cadenas de montaje).
- Pruebas no destructivas para visualizar a través de medios que soporten la propagación de radar (p.e. las ecografías).

CAPÍTULO 3

SATÉLITES DE PERCEPCIÓN REMOTA



Primera imagen de la Tierra vista desde el espacio.
Satélite TIROS 1. Abril 1, 1960.

En Percepción Remota se conoce por plataformas de observación a los vehículos, tripulados o no, en los que se instalan los sensores destinados a la observación de la superficie terrestre. Existen múltiples tipos de plataformas, de características muy diversas que podrían clasificarse atendiendo a múltiples criterios. Las características de la plataforma determinan fundamentalmente la periodicidad de observación (resolución temporal) y en menor medida la resolución espacial de las observaciones.

Atendiendo al criterio de la misión pueden clasificarse como misiones esporádicas y permanentes o semipermanentes:

Misiones esporádicas (sistemas tripulados)	Aviones Helicópteros Naves espaciales
Misiones permanentes o semipermanentes satélites artificiales	órbita polar órbita geoestacionaria

En la actualidad gran parte de los esfuerzos en Percepción Remota están enfocados al procesado y comprensión de los datos procedentes de los satélites de observación de la Tierra, tipo LANDSAT, SPOT, ERS, NOAA, etc., pero es necesario no menospreciar la gran cantidad de información que existe en formatos analógicos, procedentes de fotografías aéreas convencionales o de fotografías tomadas desde el espacio en numerosas misiones tripuladas, y que en muchos casos constituyen un registro histórico de gran valor y difícilmente sustituible.

3.1 Historia de los satélites de estudio meteorológico.

Los satélites meteorológicos se han convertido en una de las herramientas más prácticas que ha producido la tecnología espacial para la predicción del tiempo desde que empezaron a lanzarse en abril de 1960. La puesta en órbita del TIROS-1, primer satélite meteorológico, constató la enorme capacidad informativa aportada para el estudio de la atmósfera, así como la importancia de observar la Tierra desde el espacio.

La configuración básica de un satélite meteorológico, consistió en una cámara con la función de fotografiar electrónicamente los sistemas nubosos. La información recibida fué enviada rápidamente a la Tierra, debido a que las condiciones meteorológicas pudieron variar en muy poco tiempo. La transmisión de estas imágenes televisivas, aunque ofrecieron menor definición que la película fotográfica, permitieron la suficiente resolución para el trabajo meteorológico.

Los primeros satélites iban equipados con un registrador magnético que almacenaba toda la información recogida durante la órbita de reconocimiento. Al pasar por la vertical de una estación de adquisición de telemetría, el satélite transmitía, a alta velocidad, todas las imágenes almacenadas. A partir de 1963 la NASA, con el lanzamiento del TIROS-8, puso en servicio un nuevo sistema de transmisión: el sistema APT (Automatic Picture Transmission). Este sistema, perfeccionado con el NIMBUS-1 (1964) y el ESSA-2 (1966), permitía a cualquier estación terrena recibir la comunicación del satélite meteorológico mientras la sobrevoló o bien recorrió alguna órbita adyacente. Las imágenes recibidas correspondieron a la zona sobrevolada (nadir). De esta forma se consiguió un acceso a estos satélites, sin depender de las estaciones de seguimiento de la NASA. El equipo necesario fué mucho más simple y económico, permitiendo que los organismos meteorológicos e instituciones educativas de muchos países hayan montado servicios de seguimiento de satélites con excelentes resultados.

3.2 Bandas utilizadas por los satélites

Dentro del espectro óptico donde las longitudes de onda son milimétricas, tenemos la región de microondas que se divide en las diferentes bandas que utilizan los sistemas de radar cuyos rangos se encuentran en la siguiente tabla.

Denominación	Anchura (cm)		Valor Típico	Anchura (GHz)	
Ka	0.75	1.10			
K	1.10	1.67	1.0	10.90	36
Ku	1.67	2.40			
X	2.40	3.75	3.0	5.75	10.90
C	3.75	7.50	5.6	3.90	5.75
S	7.50	15.00	10.0	1.55	3.90
L	15.00	30.00	23.0	0.39	1.55
P	30.00	100.00	70.0	> 0.39	

3.3 Organismos de control de satélites

3.3.1 Organización NOAA (American National Oceanic and Atmospheric Administration)

Operar los satélites del sistema ambiental de EU es una de las mayores responsabilidades de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), esto significa manejar sus satélites meteorológicos, los datos, y los servicios de Información; la organización que se encarga de esto es National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS). NESDIS opera los satélites y administra el procesamiento y distribución de los millones de bits de datos e imágenes que estos satélites producen a diario. El principal usuario de todo esto es el Servicio Meteorológico Nacional de EU, que usa los datos del satélite para crear pronósticos ambientales para el público, la televisión, la radio, y servicios consultivos. La información de satélite se comparte también con diversas agencias Federales, tales como los Departamentos de Agricultura, Defensa, y Transporte; con otros países, tales como Japón, India, Rusia, miembros de la Agencia Espacial Europea (ESA), la Oficina Meteorológica de Reino Unido, y el sector privado.

El sistema de satélites climatológicos NOAA que opera actualmente se compone de dos tipos de satélites: Los Geoestacionarios GOES para cobertura de corto alcance y el "now-casting"; y los satélites de órbita polar para largo alcance, llamados NOAA. Ambos tipos de satélite son necesarios para proveer un sistema completo global del monitoreo climático.

3.3.2 ESA (European Spatial Agency - Agencia Espacial Europea)

En la década de los años sesenta, seis países Europeos (Bélgica, Francia, Alemania, Italia, los Países Bajos y el Reino Unido) se asociaron con Australia para desarrollar y construir un sistema de lanzamiento, esta unión se realizó en una organización conocida como European Launcher Development Organisation (ELDO - Organización de Desarrollo de Lanzamiento Europeo).

En 1962 Dinamarca, España, Suecia y Suiza se unieron a ELDO y formaron European Space Research Organisation (ESRO - Organización de Investigación Espacial Europea) para desarrollar programas espaciales para satélites. En 1973, en una conferencia de ministros de los diez países Europeos se reunió en Bruselas y acordaron crear la Agencia Espacial Europea (ESA). En 1975 Irlanda se une a ESA y el 30 de

Octubre de 1980 ratifican la unión y dieron existencia legal a ESA, posteriormente se integraron Austria, Noruega y Finlandia.

Se han firmado acuerdos de cooperación para permitirle a Canadá participar en ciertos programas de ESA.

3.3.3 NASA (National Aeronautics and Space Administration - Administración Nacional Espacial y Aeronáutica)

El programa de exploración espacial (NASA) fue creado durante la administración de Dwight Eisenhower después que la Unión Soviética envió el primer satélite espacial Sputnik. En 1961, Kennedy aprobó fondos adicionales para el programa espacial. Kennedy había propuesto mandar un hombre a la Luna antes del fin de la década de 1960. En 1961, NASA envió el primer astronauta de los Estados Unidos al espacio y en 1969 los primeros astronautas descendieron en la Luna.

NASA, en si es una agencia del gobierno de los Estados Unidos que planea y lleva a cabo actividades espaciales; conduce investigaciones y desarrolla métodos en aeronáutica y viajes espaciales. NASA también conduce y coopera con las fuerzas armadas con el comité de Civilian-Military Liason Committee. NASA tiene centros localizados por todos los estados de los Estados Unidos.

3.3.4 CNES (Centre National d'Etudes Spatiales - Centro Nacional de Estudios Espaciales)

El Centro Nacional de Estudios Espaciales fue creado en 1961, por el gobierno francés. El CNES es un Organismo Publico de Carácter Industrial y Comercial, encargado del desarrollo de las actividades espaciales francesas.

El CNES realiza principalmente las siguientes actividades:

- orientar al gobierno sobre las políticas espaciales de Francia y ponerlas en marcha
- realizar programas de investigación espacial con la colaboración de los laboratorios del CNRS (Centro nacional de Investigación Científica), las Universidades, industrias privadas y los grandes organismos científicos.
- administración de los recursos generados por los proyectos espaciales.

El CNES presenta cuatro centros principales: el edificio sede en París; la Dirección de Lanzamientos (DLA) el cuál se creó en el suburbio parisense Evry en 1973 y tiene la responsabilidad de la misión asociada al transporte espacial; el Centro Espacial de Toulouse (CST) se encarga de la preparación y desarrollo de programas; y el Centro Espacial de Guyana (CSG) en Kourou (Guyana Francesa), es una base de lanzamientos y pruebas.

3.4 Satélites Geoestacionarios

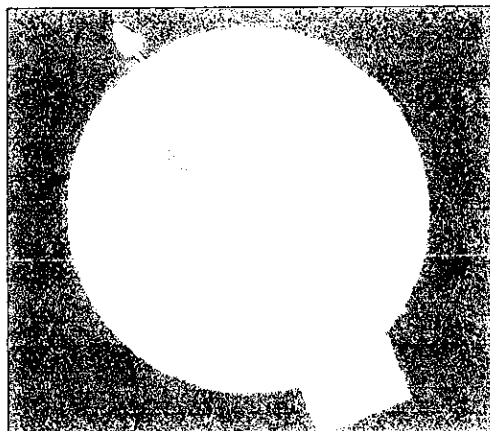
Los satélites se pueden clasificar según su ubicación y el movimiento que describen alrededor del Planeta, dicha clasificación se divide en satélites geoestacionarios y polares.

Los satélites geoestacionarios están ubicados en un punto fijo de la *órbita geoestacionaria*, situada a una distancia cercana a los 35800 Km (22,300 millas) del ecuador terrestre, lo suficientemente alto para permitir a los satélites una vista completa de la Superficie Terrestre. Permiten la observación continua de un área geográfica las 24 horas del día, ya que completan en este tiempo una órbita alrededor de la Tierra. En la actualidad hay activos cinco satélites meteorológicos situados en órbita geoestacionaria: el INSAT hindú, los americanos GOES 8 y 9 (Geostationary Operational Environmental Satellite), el GMS (Geostationary Meteorological Satellite) japonés, el METEOSAT (European Geostationary Meteorological Satellite), y el GOMS (Geostationary Operational Environmental Satellite) de la URSS a 70° Este.

Para completar la observación, se dispone de satélites que se desplazan en órbitas circumpolares con dirección norte-sur y a la inversa. Estos satélites polares permiten observar los fenómenos atmosféricos en latitudes altas. Las zonas geográficas situadas por arriba de los 60° de latitud no pueden ser monitoreadas por los satélites geoestacionarios debido a la esfericidad de la Tierra.

Estos satélites cumplen funciones específicas importantes para el estudio y evolución de la superficie terrestre así como de el clima que esta presenta. A continuación presentaremos algunos satélites con la característica de ser geoestacionarios.

3.4.1 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites)



Los satélites GOES proveen un monitoreo continuo necesario para el análisis intensivo de datos. Los GOES se encuentran en una órbita geosíncrona, es decir, se encuentran ubicados en una *órbita geoestacionaria*. Esto les permite quedarse suspendido continuamente sobre una posición en la superficie, manteniendo un monitoreo constante sobre los problemas atmosféricos llamados *triggers* que son condiciones de tiempo severas, tales como tornados, inundaciones repentinas, tormentas de granizo, y huracanes. Cuando estas condiciones se presentan los satélites GOES son capaces de monitorear el desarrollo de la tormenta y sus movimientos.

Las imágenes del satélite GOES se usan también para calcular y predecir lluvia durante los tornados y los huracanes, así como estimar nevadas y alcance total de la nieve. Estos datos ayuda a los meteorólogos sobre las tormentas invernales y deshielos en primavera. Los sensores de satélite también detectan los campos de hielo y mapean los movimientos del mar y lagos de hielo.

A continuación mencionaremos aspectos importantes de los últimos satélites de la serie GOES, estos fueron lanzados en Cabo Cañaveral, Florida.

NOMBRE DEL SATÉLITE	FECHA DE LANZAMIENTO	VEHÍCULO DE LANZAMIENTO	OBSERVACIONES
GOES 6	Abril 28, 1983	Delta 3914	El VAS falló el 21 de enero de 1989
GOES 7	Febrero 26, 1987	Delta 3914	Tiene problemas de estabilidad
GOES 8	Abril 13, 1994	Atlas 1	Operando
GOES 9	Mayo 23, 1995	Atlas 2	Operando

GOES 6

El satélite se diseñó para sensar condiciones meteorológicas desde una posición fija, y para proveer estos datos a pronosticadores y empresas privadas, al igual que todos los posteriores GOES. Se diseñó para reemplazar al GOES 4 y proporciona perfiles continuos de humedad y temperatura atmosférica.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SATÉLITE

Su estructura es un cilindro de 85 in¹ de diámetro, 138 in de alto y pesa 874 libras. Los lados del cilindro están cubiertos por 15,000 celdas solares que, conjuntamente con pilas de nicad, proveen de energía al satélite. El instrumento primario que lleva es el VAS (Visible Infrared Spin Scan Radiometer -VISSR- Atmospheric Sounder). Este instrumento proporciona imágenes de día y de noche de las condiciones de las nubes así como también perfiles de temperatura y humedad.

El satélite usa la banda S y antenas UHF para aumentar la transmisión de datos meteorológicos para 10,000 estaciones terrenas que usan modelos numéricos para pronosticar el estado del tiempo, y para distribuir la transmisión del procesamiento de imágenes y mapas del clima a estaciones terrenas WEFAX. Además, un Monitor de Ambiente Espacial (SEM) y el Sistema de Almacenamiento de Datos (DCS).

El GOES 6 se puso en una órbita sobre el Pacífico (136°W) y se nombró GOES OESTE. El sondeador VAS presentó fallas en Enero 21 de 1989, por lo cual ya no son posibles los sondeos y lectura de imágenes. Sin embargo, todavía opera como el satélite Oeste WEFAX, aunque su órbita es inestable.

GOES 7

Se diseñó para continuar el mismo programa del GOES 6 y para reemplazar al GOES 5.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SATÉLITE

El cuerpo del GOES 7 es igual al GOES 6, el elemento primario VAS cumple las mismas funciones que las del GOES 6, sin embargo, se puede obtener todavía los sondeos en una hora determinada.

El GOES 7 también usa la banda S y antena UHF para transmitir los datos a las estaciones terrenas WEFAX, también proporciona monitoreo a SEM y recolecta datos para DCS igual que el GOES 6.

¹ pulgadas

El satélite a la altura del Atlántico (75°W) fue nombrado originalmente como GOES ESTE. El satélite esta todavía en operación; sin embargo, debido al fracaso del GOES 6 ha sido sacado de su órbita varias veces para cubrir el oeste y la costa este del E.U. Actualmente tiene la posición de (112°W) lo cual le permite la cobertura de la costa oeste de los E.U. El GOES 7 presenta fallas en su rotación, esto provoca que su órbita aumenta 0.9° de latitud cada año. A la puesta en órbita del GOES I (GOES 8 o GOES Este), el GOES 7 fue puesto en órbita a 105°W y es usado como satélite de comunicaciones principalmente.

Se encuentra a 135°W de longitud, cubriendo la Costa Oeste de los Estados Unidos, el Océano Pacífico y Alaska.

GOES 8

Es el primero de una serie de cinco satélites ambientales, que provee datos para mejor pronóstico del tiempo. El GOES 8 se ubica actualmente a 75°W de longitud (del Ecuador), cubriendo la Costa Este de Norte y Sudamérica y gran parte del Océano Atlántico.

La función principal, tanto del GOES 8 como el 9; se realiza por los instrumentos primarios llamados Imager y Sounder. El Imager es un instrumento multicanal que rastrea la emisión de energía y la energía solar reflejada por la superficie y la atmósfera terrestre. El Sounder proporciona datos para determinar el perfil de humedad y temperatura de la atmósfera, información de zonas nubladas; y distribución de ozono.

Otros instrumentos a bordo del satélite son el transponder de búsqueda y rescate, un colector de datos y un sistema transmisor para las estaciones terrenas, y un monitor de ambiente espacial. Incluye instrumentos, como un magnetómetro, un sensor de rayos X, un detector alfa y protones de alta energía, y un sensor de partículas energéticas.

GOES 9

Originalmente se le llamó GOES J, cuando logró su órbita final se renombró como GOES 9 y se unió al GOES 8.

Se encuentra ubicado a 135°W de longitud (del Ecuador). Por ello, los GOES 8 y 9 juntos, proporcionan una cobertura aproximada de 20°W a 165°E de longitud. El GOES 9, es un elemento fundamental en el programa de modernización del Servicio Meteorológico Nacional del NOAA.

CARACTERÍSTICAS DE LOS GOES 8 Y 9

Las características principales de los GOES 8 y 9 se mencionan a continuación.

Dimensiones:	Cuerpo Principal: 2.0m x 2.1m x 2.3m Longitud Desplegada: 26.9m
Peso:	2104.7 kg
Control de altitud:	Estabilizado a 3 ejes
Vida útil:	5 años mínimo
Tipo de órbita:	Geosíncrona
Parámetros Aproximados.	
Altitud:	35,788 km (19,324 nmi)
Longitud:	GOES 8: 75°W GOES 9: 135°W
Latitud:	GOES 8: +/- 0.5° GOES 9: +/- 0.5°
Energía:	Panel solar y baterías (1050 Watts en panel solar hasta fin de vida útil)

Sensores:	Imagen Sonido Sistema de Monitores del ambiente espacial Magnetómetro EPS y HEPAD XRS Transponder de búsqueda y rescate (Search and Rescue - SAR) Sistema de almacenamiento de Datos (Data Collection System - DCS)
-----------	--

Los datos reunidos por los GOES 8 y 9, en combinación con los radares Doppler y los sistemas de comunicaciones proveen a meteorólogos e hidrólogos de mediciones del clima, imágenes más frecuentes, y nuevos tipos de rastreos atmosféricos. Con ello se advierte sobre tormentas eléctricas, inundaciones repentinas, huracanes, y aspectos climatológicos; lo cual puede salvar vidas, beneficia a la agricultura y en general a intereses comerciales.

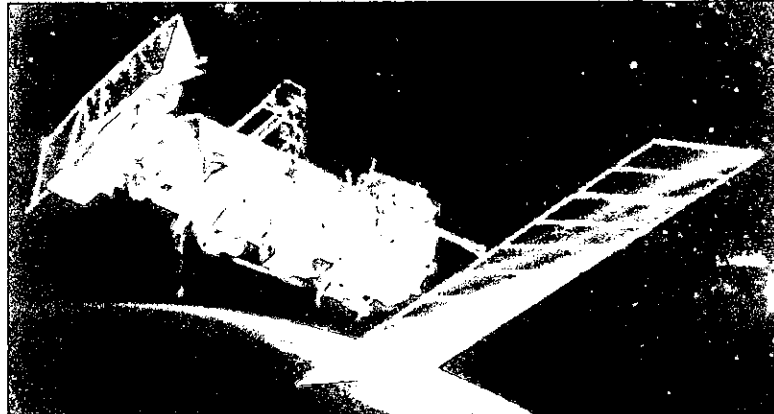
Los GOES 8 y 9 están equipados con instrumentos diseñados para proporcionar mediciones en tiempo real de la actividad solar, de partículas en el ambiente, y el campo magnético terrestre en órbita sincrónica. Además, los satélites son capaces de transmitir señales de peligro a aeronaves, de realizar búsqueda de barcos y ayudar en la búsqueda y rescate de satélites dañados en su sistema de seguimiento de órbita.

La organización NOAA administra los servicios y los datos proporcionados por la serie de satélites GOES. Después de que el satélite completa su órbita, NOAA asume la responsabilidad del control, recepción, generación y distribución de productos.

3.5 Satélites Polares

Orbitan sincrónicamente los polos, es decir, perpendicularmente al Ecuador terrestre con inclinaciones comprendidas entre los 80°-100°. Sus órbitas son bajas y están comprendidas entre los 800 y 1200 km, esto implica por un lado que el periodo de sus órbitas es corto oscilando sobre de los 90 minutos y por el otro, que el tiempo visible entre horizontes cuando pasan por la vertical de la estación o punto de telemetría es como máximo de unos 15 minutos. El espacio longitudinal barrido en un punto determinado de su nadir, que lo repiten dos veces cada día, es de unos 2700 km. Entre los que se encuentran los NOAA 12 y 14; los soviéticos METEOR 3/5, OKEAN-1, OKEAN-2 y OKEAN 1-7; los chinos FENGUYN's y los europeos ERS 1 Y 2.

3.5.1 Satélites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration Satellite)



Complementando los satélites geoestacionarios, hay 2 satélites de órbita polar operando actualmente, conocidos como Satélites de Observación Infrarroja Televisiva Avanzada, en Inglés es *Advanced Television Infrared Observation Satellite (TIROS - N o ATN)*, circulando la Tierra en una órbita casi norte - sur, pasando muy cerca de ambos polos. Se les conoce como TIROS NOAA.

La siguiente tabla muestra aspectos importantes de cada satélite NOAA.

NOMBRE DEL SATÉLITE	FECHA DE LANZAMIENTO	VEHICULO DE LANZAMIENTO	OBSERVACIONES
NOAA 11	Septiembre 24, 1988	Atlas E / F	
NOAA 12	Mayo 14, 1991	Atlas E / F	Operando
NOAA 13	Agosto 9, 1993	Atlas E	No funciona
NOAA 14	Diciembre 30, 1994	Atlas E	Operando
NOAA 15	Mayo 13, 1998	Titán II	Operando

Todos fueron lanzados de la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California.

NOAA 11

El Objetivo de este programa fue continuar el programa *Advanced TIROS - N* para trabajar en compañía con NOAA-10 y reemplazar al NOAA-9 a fin de proveer cobertura continua de la Tierra y obtener datos meteorológicos globales de alta resolución.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SATÉLITE

El cuerpo es de forma rectangular de 166 in de largo por 74 in de alto, con un panel solar de 191 in por 94 in. El satélite fue orientado y estabilizado en tres ejes, con un peso aproximado de 2000 libras.

El NOAA-11 fue el cuarto satélite operacional en la serie *Advanced TIROS-N*. El satélite llevó el AVHRR y TOVS (los cuales estuvieron presentes en los NOAA anteriores), el monitor solar de protones, y el sistema SARSAT.

Además, los instrumentos ERBE, que consisten de onda corta y radiómetros de onda larga, se usaron para estudiar la Tierra (Earth's albedo) en el intento de reconocer e interpretar variaciones anuales y estacionales del clima. El radiómetro SBUV se lanzó con este satélite desde que se destinó para reemplazar al NOAA-9.

Se estableció en la órbita polar circular, (470km). Actualmente sus sistemas operan exitosamente, manda imágenes de alta resolución sobre temperatura, humedad, y ozono para investigación meteorológica. El formato APT (Automatic Picture Transmission) y HRPT (High Resolution Picture Transmission) existen en este satélite. El NOAA-11 es todavía operacional.

NOAA 13

El objetivo de este programa fue continuar el programa Advanced TIROS - N para trabajar en compañía con NOAA-10, 11 y 12 a fin de tener cobertura continua de la Tierra y para proveer datos meteorológicos globales.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SATÉLITE

El cuerpo tiene una estructura rectangular (166 in de largo por 74 in de alto) y abastecido por un panel solar de 191 in por 94 in. El satélite fue orientado y estabilizado a 3 ejes de la Tierra, y pesó aproximadamente 2200 libras.

El NOAA-13 fue el sexto satélite operacional en la serie Advanced TIROS - N. El satélite llevó el AVHRR, TOVS, y el monitor solar de protones. El mismo equipamiento estuvo presente en los satélites previos NOAA. Los instrumentos ERBE, el radiómetro SBUV y el sistema SARSAT fueron instalados en este satélite. Se puso en la órbita polar circular (470km). El satélite y todos sus sistemas operaron exitosamente por 21 días hasta que una falla en un circuito provocó una pérdida de energía. Actualmente el satélite permanece en su órbita polar pero inactivo.

NOAA 12

El objetivo del programa NOAA 12 es continuar el programa Advanced TIROS - N para trabajar conjuntamente con los NOAA-10 y NOAA-11 a fin de obtener amplia cobertura de la Tierra y obtener datos meteorológicos.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SATÉLITE

El cuerpo es de forma rectangular de 166 in de largo por 74 in de alto, con un panel solar de 191 in por 94 in. El satélite fue orientado y estabilizado a tres ejes de la Tierra, con un peso aproximado de 2200 libras.

El NOAA-12 fue el quinto satélite operacional de la serie Advanced TIROS - N. El satélite incluyó el AVHRR, TOVS, y al monitor solar de protones. Todo lo cual estuvo presente en los NOAA anteriores. Los instrumentos ERBE, el radiómetro SBUV y el sistema SARSAT no estuvieron incluidos en este satélite. Fue colocado en órbita polar circular (450km). El satélite y sus sistemas operan correctamente. Los formatos APT y HRPT son empleados en este satélite.

NOAA 14

El objetivo del programa NOAA 14 es la continuación del programa Advanced TIROS - N para trabajar con los NOAA-10, 11 y 12 a fin de obtener amplia cobertura de la Tierra y obtener datos meteorológicos globales.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SATÉLITE

El cuerpo es de forma rectangular de 166 in de largo por 74 in de alto, con un panel solar de 191 in por 94 in. El satélite fue orientado y estabilizado a tres ejes de la Tierra, y peso aproximado de 2200 libras.

NOAA-14 es el sexto satélite operacional en la serie Advanced TIROS - N. El satélite lleva a bordo los instrumentos AVHRR, TOVS, y al monitor de protones solar. Todo lo cual estuvo presente en el satélite NOAA anterior. Los instrumentos ERBE, el radiómetro SBUV y los sistemas SARSAT también fueron incluidos en este satélite. Se

colocó en órbita polar circular (470km). En la actualidad el satélite trabaja cumpliendo con la funcionalidad planeada.

DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL NOAA-12 y NOAA-14

Dimensiones:	Modelo modular con un panel solar desplegable (un ala)
Cuerpo Principal:	3.71m Largo, 1.88m Diámetro (NOAA-12) 4.18m Largo, 1.88m Diámetro (NOAA-14)
Panel Solar:	2.37m x 4.91 m, 11.6 m ²
Peso:	NOAA-12: 1418 kg en elevación, 735 kg en órbita NOAA-14: 1712 kg en elevación, 1030 kg en órbita
Vida útil:	Mayor de 2 Años
Vehículo de lanzamiento:	ATLAS - E
Parámetros Aproximados	
Altitud:	NOAA-12: 833 km Mañana NOAA-14: 870 km Tarde
Inclinación:	NOAA-12: 98.7° NOAA-14: 98.86°
Período:	NOAA-12: 101.35 min NOAA-14: 102.12 min
Tiempo local a nodo descendente:	NOAA-12: 0730 am NOAA-14: 0140 am
Sensores:	<ul style="list-style-type: none"> • Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) • TIROS Operational Vertical Sounder System (TOVS)*, Sistema operacional de sondeo vertical • Stratospheric Sounding Unit (SSU)*, Unidad de sondeo estratosférica • High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS/2), Sondeo de radiaciones infrarrojas de alta resolución. • Microwave Sounding Unit (MSU), Unidad de sondeo de microondas • Space Environment Monitor (SEM), Monitor de ambiente espacial • Search and Rescue (SAR) Instruments (Repeater and Memory)*, Instrumentos de búsqueda y rescate • ARGOS/Data Collection System (DCS), Sistema de Recaudo de Datos

* - No a bordo del NOAA-12

En órbitas polares se puede monitorear la Tierra entera y proveer de datos atmosféricos e imágenes de nubes. Ellos investigan condiciones de tiempo que eventualmente afectan el tiempo y clima de los Estados Unidos. Los satélites proveen datos visibles e infrarrojos que se usan para diversos propósitos, medidas de radiación, y perfiles de temperatura. Los sensores ultravioleta de órbita polar también exploran los niveles de ozono en la atmósfera y son capaces de detectar el *agujero de ozono* sobre la Antártida desde la mitad de septiembre hasta la mitad de Noviembre. Estos satélites envían más de 16,000 mediciones globales diarias por medio de las estaciones NOAA's CDA y proveen información para definir modelos, especialmente para áreas oceánicas remotas.

NOAA 15

En mayo de 1998 se lanzó el NOAA-15 que es el primero de una serie de 5 satélites meteorológicos que sustituirán a los actuales satélites NOAA, los cuáles tendrán una vida

útil de mas de 12 años. Estos nuevos satélites llevan una serie de instrumentos que se han modificado o mejorado de los satélites anteriores NOAA que continúan en órbita y operación.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SATÉLITE

Entre los instrumentos de éste satélite se encuentran el AVHRR/3 (Advanced Very High Resolution Radiometer), sucesor del AVHRR/2 que lleva un sexto canal de cercano Infrarrojo; la Unidad de Sondeo de Microondas (Microwave Sounding Unit - MSU) y la Unidad de Sondeo Estratosférico (Stratospheric Sounding Unit - SSU) enfocados a condiciones climáticas severas; el Radiómetro (Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer - SBUV); el Medidor de Radiación (High Resolution Infrared Radiation Sounder - HIRS/3) sucesor del HIRS/2; el Sistema de Recolección de Datos (Data Collection System - DCS/2) transmite datos en el rango de 1200 a 2560 bits por segundo; el Monitor de Ambiente Espacial (Space Environment Monitor - SEM-2); el Detector de Energía Total (Total Energy Detector - TED); el Procesador de Búsqueda y Rescate (Search and Rescue Processor - SARP).

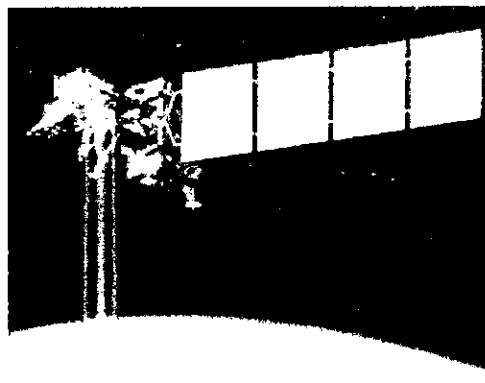
Todos estos instrumentos presentan mejoras con respecto a los instrumentos de los satélites de la serie anterior NOAA.

COMO SE NOMBRAN LOS SATÉLITES

NOAA asigna una letra al satélite antes del lanzamiento, y un número cuando entra en órbita. Por ejemplo, GOES - H, una vez en la órbita, fue designado GOES-7; GOES - G, que se perdió en el lanzamiento, nunca se le asignó un número. El mismo sistema se usa para satélites de órbita polar; por ejemplo, NOAA-11, ahora en órbita, fue designado NOAA - H antes del lanzamiento. NOAA - J llegó a ser NOAA-14. NOAA - K ahora llamado NOAA-15, y los posteriores a éste se llaman actualmente NOAA - L y NOAA - M puesto que todavía no están en órbita.

3.5.2 Satélites Landsat

La serie de satélites de la familia Landsat, tiene su origen en 1972 cuando la NASA puso en órbita el primero, denominado ERTS (Earth Resource Technology Satellite - Satélite Tecnológico de Recursos Terrestres). A partir del segundo lanzamiento, que tuvo lugar en 1975, se les cambio el nombre por el de LANDSAT. Los primeros 3 satélites Landsat tenían una fisionomía muy similar, con unas dimensiones aproximadas de 3 m de altura por 1.5 de diámetro, que se convertían en 4 cuando se extendían los paneles solares. El peso de todo el sistema, rondaba los 960 Kg.



La USGS (U.S. Geological Survey's - Inspección Geológica en EE.UU.) a través del EDC (EROS Data Center - Centro de Datos EROS) ha administrado los archivos de datos del Landsat por más de dos décadas, estos contienen una amplia información sobre la

superficie terrestre. A través de estos datos se pueden observar los efectos de reforestación, contaminación, actividad volcánica catastrófica y otros eventos naturales.

Información sobre los satélites.

Satélite	Lanzamiento	Características	Sensores
Landsat 1	Julio 23, 1972	Retirado en Enero 6 de 1978	MSS y RBV
Landsat 2	Enero 22, 1975	Retirado en Febrero 25 de 1982	MSS y RBV
Landsat 3	Marzo 5, 1978	Retirado en Marzo 31 de 1983	MSS y RBV
Landsat 4	Julio 16, 1982	Inició su operación en Diciembre 14 de 1993	TM y MSS. Suspensión de adquisición de datos del MSS en 1992
Landsat 5	Marzo 2, 1984	Actualmente en operación	TM y MSS. Suspensión de adquisición de datos del MSS en 1992
Landsat 6	Octubre 5, 1993	No alcanzó órbita debido a una falla de suministro de combustible	TM, MSS y ETM
Landsat 7	Posiblemente en Diciembre de 1999	En construcción	TM, MSS y ETM+

Datos Técnicos:

Tipo de órbita:	sincrono-solar, cuasi-polar
Altitud de órbita (sobre el ecuador):	917 Km (Landsat 1,2,3) 705 Km (Landsat 4,5)
Periodo Orbital:	103 minutos (Landsat 1,2,3) 98.9 minutos (Landsat 4,5)
Duración del ciclo:	18 días (Landsat 1,2,3) 16 días (Landsat 4,5)
Área de cobertura:	185 Km.

Principal instrumentación de los satélites Landsat 4 y 5.

Sensor MSS (Multispectral scanner - Rastreador Multiespectral).

El MSS es un sistema de imágenes no fotográfico que utiliza un espejo oscilando y una serie de sensores con fibra óptica. Los sensores MSS son la línea de dispositivos de rastreo que observan la Tierra a un ángulo justo a la trayectoria orbital. La exploración se realiza por un espejo oscilador, el cual rastrea simultáneamente cada una de las cuatro bandas espectrales que maneja para cada barrido, el Landsat 3 llevó un sensor MSS con una banda adicional, llamada banda 8, que respondió a la banda térmica (calor) de radiación infrarroja.

El sensor MSS Monitorea la Superficie Terrestre desde el este hasta el oeste; utiliza seis detectores para cada banda espectral que proporcionan seis rastreos lineales en cada barrido. La combinación del rastreo geométrico, la órbita del satélite y la rotación de la Tierra proporciona cobertura para estudiar cambios en la Superficie Terrestre.

La gama de bandas radiométricas para los sensores MSS se muestra a continuación:

Landsat 1-3	Landsat 4-5	Longitud de onda (micrómetros)
Banda 4	Banda 1	0.5 - 0.6
Banda 5	Banda 2	0.6 - 0.7
Banda 6	Banda 3	0.7 - 0.8
Banda 7	Banda 4	0.8 - 1.1
Banda 8	---	10.4 - 12.6

La resolución de los sensores MSS se muestra en la siguiente tabla:

Landsat's 1-3	Landsat's 4-5	Resolución (metros)
Banda 4	Banda 1	79/82*
Banda 5	Banda 2	79/82
Banda 6	Banda 3	79/82
Banda 7	Banda 4	79/82
Banda 8**	---	237

* La altura nominal era de aproximadamente 920 km para los satélites Landsat's 1, 2, y 3 y para los Landsat's 4 y 5 de 705 km, con resoluciones de 79 y 82 metros respectivamente.

** Solo el Landsat 3.

Sensor TM (Thematic Mapper).

La principal aportación de los dos últimos Landsat es la incorporación de un nuevo sensor, denominado Thematic Mapper (TM), especialmente diseñado para la cartografía temática.

Los sensores MSS y TM inicialmente detectan la radiación reflejada sobre la Superficie Terrestre en la longitud de onda visible en IR, pero el sensor TM proporciona más información radiométrica que el sensor MSS. La longitud de onda oscila para el sensor TM desde la onda visible (azul), medio-IR, extremo-IR del segmento del espectro electromagnético. Tiene 16 detectores para las bandas de longitud de onda visibles y medias - IR; los sensores TM proveen 16 líneas de rastreo en cada detector activado. Proporciona 4 detectores para la banda térmica - IR y provee 4 líneas de rastreo para cada rastreador en activación.

El sensor TM tiene una resolución espacial de 30 metros para la longitud de onda visible, próximo-Infrarrojo y medio-Infrarrojo y una resolución espacial de 120 metros para la banda térmico-Infrarrojo.

LANDSAT 7

El Landsat 7 se piensa que puede ser lanzado en Diciembre de 1998.

Instrumentación Landsat 7.

Incluye al Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+ Mapeador Temático Realzado Plus). Este nuevo sensor proporciona una mejor combinación de tratamiento sinóptico, alta resolución espacial, rango de espectro y calibración radiométrica.

El ETM+ incluye:

- Un duplicado de las siete bandas TM usadas.
- Una banda termal que tiene una resolución espacial de 60 m (reemplaza la Banda 6, TM).
- La banda adicional monocromática con resolución espacial de 15 m y un rango espectral de 0.52 a 0.90 micrómetros. Una tarjeta, con máxima apertura radiométrica de 5° de calibración radiométrica absoluta.

Características del Scanner Multiespectral (MSS)

Tamaño de la Imagen:	185 x 170 km
Resolución Espacial:	80 m
Rango de Intensidad:	64 niveles de grises (6 bit) - remuestreo a 8 bit/256 niveles de grises
Bandas Espectrales MSS:	Sistema emisor de energía electromagnética en cuatro ondas.
Banda 1:	0.50-0.60 micrómetros (verde)
Banda 2:	0.60-0.70 micrómetros (rojo)
Banda 3:	0.70-0.80 micrómetros (cerca-infrarojo)
Banda 4:	0.80-1.10 micrómetros (cerca-infrarojo)

Características del Thematic Mapper (TM)

Tamaño de la Imagen:	185 x 170 km
Resolución Espacial:	30 m
Rango de Intensidad:	256 niveles de grises (8 bit)
Banda Espectral TM:	Sistema de emisión de energía electromagnética en siete longitudes.

- *Banda 1:* 0.45-0.52 micrómetros (azul-verde); asignada para penetración en concentraciones de agua (presas, lagos, etc.), tierra y discriminación de vegetación, y crear mapas forestales (coníferas/secos)
- *Banda 2:* 0.52-0.60 micrómetros (verde), corresponde a la reflexión de la punta de la vegetación. Recomendado para discriminación de la vegetación y vigorosidad de las plantas.
- *Banda 3:* 0.63-0.69 micrómetros (rojo), esta banda opera en la región de absorción de clorofila y es usada para detectar carreteras, tierra desértica y tipos de vegetación.
- *Banda 4:* 0.76-0.90 micrómetros (cerca-infrarojo), esta banda es usada para estimar la biomasa. Si bien separa cuerpos de agua desde la vegetación y discrimina tierra húmeda, esta no es efectiva desde el TM3 para identificar carreteras.
- *Banda 5:* 1.55-1.75 micrómetros (mediano-infrarojo), esta considerada como la mejor banda simple; muestra carreteras, tierra desértica agua y provee un buen contraste entre los diferentes tipos de vegetación.
- *Banda 6:* 10.5-12.5 micrómetros (termal infrarojo), esta banda responde a radiaciones termales emitidas por el objetivo. Si se desea se puede usar también la banda IR que proporciona una resolución de 120 m.
- *Banda 7:* 2.08-2.35 micrómetros (medio-infrarojo), esta banda es muy usada para discriminación de minerales y tipos de rocas.

3.5.3 SPOT (Satellite Probatoire pour l'Observation de la Terre - Satélite de Prueba para la Observación de la Tierra)



El Sistema de satélites SPOT ha sido desarrollado en Francia por el CNES, con la colaboración de Bélgica y Suecia. El sistema comprende una serie de naves espaciales, instalaciones terrenas para el control y programación de los satélites, así como infraestructura de producción y distribución de imágenes.

Información de los Satélites.

NOMBRE	VEHÍCULO DE LANZAMIENTO	FECHA DE LANZAMIENTO	OBSERVACIONES
SPOT 1	Ariane	Febrero 22, 1986	Se activo el 31 de Diciembre de 1990. Aún activo.
SPOT 2	Ariane	Enero 22, 1990	Aún en operación.
SPOT 3	Ariane	Septiembre 26, 1993	Dejó de funcionar el 14 de Noviembre de 1997.
SPOT 4	Ariane	Marzo 24, 1998	Listo para lanzarse en caso de un fracaso prematuro de los satélites en la órbita.
SPOT 5	Ariane	2002	Será lanzado para asegurar la continuidad del programa.

Datos Técnicos

Tipo de órbita:	circular, sincrónico-solar
Altitud de órbita (sobre el ecuador):	822 km
Período Orbital(nominal):	101.4 min
Inclinación:	98.7 grados
Revoluciones por día:	14 + 5/26
Período:	101 minutos
Duración del ciclo:	26
Revoluciones por el ciclo orbital:	369
Tiempo de vida útil:	Mayor de 3 años
Dimensiones de la estructura principal:	2m x 2m x 4.5m
Peso total:	1907 Kg

Las características más relevantes de los satélites SPOT, tales como, la alta resolución espacial y la generación de imágenes estéreo, permiten reunir datos sobre la superficie terrestre de áreas de interés especial (deforestación, erosión, zonas desérticas y urbanas), y en general, evaluar el impacto de trabajos ambientales.

La carga principal de los satélites consiste de dos radiómetros de Alta Resolución Visible (HRV-Haute Resolution Visible), dos grabadoras de imágenes y un equipo de telemetría para la transmisión de imágenes que son recibidas en las estaciones terrestres.

La posición de cada receptor HRV puede ser controlada desde las estaciones Terrenas para poder observar otras regiones de interés, no necesariamente en posición vertical bajo el satélite. El ángulo de inspección de cada HRV se puede ajustar +/- 27 grados, con respecto a la vertical (nadir), facilitando la observación de la misma zona en órbitas sucesivas (los sensores pueden enfocar cualquier punto situado dentro de un rango de 475 Km de ambos lados del trazado de la órbita). Es posible adquirir imágenes estereoscópicas y por tanto generar modelos digitales del terreno. El HRV puede operarse en modo multiespectral (verde, rojo, casi-infrarrojo) o en modo pancromático.

Modo multiespectral (XS). Las imágenes se trabajan en un espectro de tres bandas. Modo pancromático (P o PA). Las imágenes se trabajan en un espectro de una sola banda, correspondiendo a la parte visible del espectro sin incluir el azul. Este canal proporciona imágenes en blanco y negro. Esta banda se destina principalmente en aplicaciones que requieren un mayor detalle geométrico. Las características más importantes de estos modos de operación se muestran en la siguiente tabla:

CANAL	RANGO ELECTROMAGNÉTICO	RESOLUCIÓN
XS1	0.50 - 0.59 μm (verde)	20 metros
XS2	0.61 - 0.68 μm (rojo)	20 metros
XS3	0.79 - 0.89 μm (próximo infrarrojo)	20 metros
PA	0.51 - 0.73 μm (visible)	10 metros

SPOT 4

Su diseño permitirá que tenga una vida útil de tres a cinco años, esto garantiza que los servicios del SPOT se extiendan más allá del año 2000. El SPOT 4 consiste de una nueva generación de satélites que incluye un módulo de servicio con capacidad de carga dos veces mayor que el SPOT 3. Esto aumenta la capacidad y permite agregar un compartimento denominado 'equipment bay' utilizado para alojar la unidad de telemetría y las grabadoras. Este compartimento también está destinado para albergar instrumentación adicional, denominada carga pasajera.

Mejoras en la carga útil de instrumentos:

- La adición de la banda medio infrarrojo (1.58-1.75 μm), en modo multiespectral.
- Ampliación del registro espectral. Esto se ha logrado reemplazando la banda pancromática (0.51-0.73 μm) por la banda XS2 (0.61-0.68 μm), operando ambas con una resolución de 10-m y 20-m.
- Mejoras en el reconocimiento de Terrenos. Se introducen sensores electrónicos que otorgan niveles de ganancia acorde al tipo de paisaje y temporada del año, asegurando así un rango dinámico mayor. Además, los instrumentos de imágenes no son susceptibles a los deslumbramientos provocados por la polarización de la luz de incidencia.

- Los dos instrumentos de imágenes HRV-IR son programados para la adquisición de imágenes independientes, aumentando notablemente el número total de imágenes captadas. En particular, esto será posible cambiando la dirección del visualizador de un instrumento sin afectar la calidad de las imágenes adquiridas al mismo tiempo por otro instrumento.
- La capacidad de almacenamiento de cada una de las dos grabadoras se incrementa de 22 a 40 minutos. Además, puede añadirse una memoria de estado sólido de 8.5 Gbit que incrementa la confiabilidad total de las grabadoras y extenderá su vida útil.

La misión SPOT 4 se complementa con las siguientes *cargas pasajeras*:

- Pastec. Un equipo de demostración tecnológica para el estudio del ambiente orbital.
- Paquete Doris (determinación precisa de la órbita del satélite y sistema de radioposicionamiento). Este sistema, exitosamente demostrado por la misión SPOT 2, permite el cálculo de la posición de la nave en el espacio (después de ser procesada la información en la Tierra) con un error menor a 10 cm. Se utiliza también para ubicar las marcas del terreno con la misma exactitud. Para la misión SPOT 4, se probará un software de experimentación adicional, Doris/Diode, para determinar la posición de la nave en tiempo real, dentro de un rango de error menor a 10 m, utilizando datos generados por el paquete Doris. Estos datos de posición, a su vez, se incluirán en los datos auxiliares transmitidos con la carga de telemetría.
- El radar transponder. Utilizado para calibrar los radares terrestres en el seguimiento de los satélites.
- El "Pie", o el pasajero de comunicaciones láser. Un componente experimental denominado Silex desarrollado por la Agencia Espacial Europea. Silex (semiconductor intersatellite link experiment-semiconductor experimental para enlaces intersatelitales) es un sistema láser de comunicaciones satélite a satélite. Utiliza receptores y transmisores láser de estado sólido. El "Pie" transmitirá imágenes de telemetría a través de un medio láser a una gran velocidad, esta información será recibida y retransmitida por el satélite geostacionario Artemis.
- El instrumento de vegetación, con un ángulo de visión que abarca 2000 km. de terreno cultivable ofrece una resolución espacial de alrededor de 1 km. Usa las mismas bandas espectrales que los instrumentos HRV-IR (B2, B3 y mid-IR) más una banda adicional conocida como B0 (0.43-0.47 μm) para aplicaciones oceanográficas. El instrumento de Vegetación está siendo desarrollado como un proyecto cooperativo Europeo incluyendo el EC.

SPOT 5

Después del SPOT 4, la familia de SPOT proveerá servicio de continuidad con el SPOT 5 para el cual el CNES diseña un nuevo instrumento de alta resolución geométrica o HRG (High Resolution Geometry). SPOT 5 ofrecerá nuevas capacidades y desempeño para hacer frente a la demanda creciente en cartografía, agricultura, planeación y ambiente

La carga útil principal consiste en instrumentos de alta resolución, los cuales son una mejora de la instrumentación del SPOT 4:

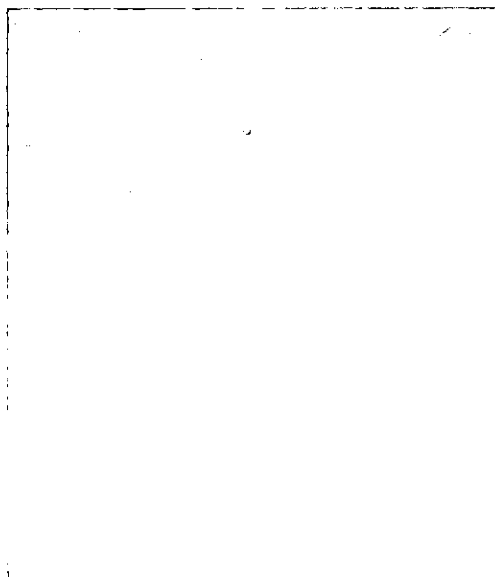
Mayor resolución de terreno: 3 y 5 metros (en vez de 10 m) en modo pancromático, mayor resolución en modo multiespectral: 10 m (en vez de 20 m) en las 3 bandas espectrales en los rangos visibles y próximo infrarrojo. La banda espectral medio infrarroja (esencial para los datos de vegetación) se mantiene con una resolución de 20 m por pixel debido a limitaciones impuesta por la geometría de los sensores CCD utilizados en esta banda. El ancho del campo de cada instrumento es de 60 km.

Los continuos adelantos tecnológicos han hecho posible las mejoras de desempeño:

- Sensor lineal de arreglos de 12,000-puntos, estabilidad dimensional de materiales, sistemas de compresión de datos, mayor capacidad de memoria estática.
- Como es el caso de los satélites previos, SPOT 5 es desarrollado con la cooperación de Bélgica y Suecia.
- Continuidad de la Banda espectral y mejoras en la resolución espacial.
- Las bandas espectrales del SPOT 5 serán iguales que las utilizadas por el SPOT 4. La banda pancromática, sin embargo, volverá a los valores utilizados por el SPOT 1 y 3 (PA 0.51-0.73 μm).
- Las especificaciones de calidad geométrica requieren una exactitud planimétrica de 10m (rms) y una exactitud de elevación de 5m (rms). Estos requerimientos son compatibles con normas convencionales de planimetría o mapeo a una escala de 1:50000.

Estas elecciones mantienen el deseo de transmitir un alto volumen de datos en la tasa de los 150 Mbits/s utilizados por las técnicas de compresión de datos.

3.5.4 ERS (European Remote-Sensing Satellites - Satélites Europeos de Percepción Remota)



Los primeros satélites europeos de Percepción Remota (ERS-1 y ERS-2) fueron desarrollados por la Agencia Espacial Europea (ESA) como una familia de satélites multidisciplinarios de observación terrestre.

Información de los Satélites

NOMBRE	VEHICULO DE LANZAMIENTO	FECHA DE LANZAMIENTO	LUGAR DE LANZAMIENTO
ERS 1	Ariane 4	Julio 17, 1991	Kourou, Guyana Francesa
ERS 2	Ariane 4	Abril 21, 1995	Kourou, Guyana Francesa

Datos Técnicos.

Tipo de órbita:	heliosincrónica, cuasi-polar, cuasi-circular
Altitud:	Aproximadamente 785km
Inclinación:	Aproximadamente 98.5 grados.
Período:	Aproximadamente 100.5 min.
Resolución temporal:	3,35 (standard) y 176 días
Período recurrente:	35 días

Los satélites ERS son muy similares, ambos se encuentran en este momento en órbita con toda su instrumentación trabajando simultáneamente; la única diferencia entre ambos satélites es la inclusión en el satélite ERS 2 del instrumento GOME.

Los satélites ERS fueron concebidos como una plataforma orbital capaz de realizar mediciones de la atmósfera de la Tierra y de su Superficie con un alto grado de exactitud. Para lograr esto utiliza técnicas de microondas para coleccionar medidas globales e imágenes, sin depender de la hora del día o de condiciones meteorológicas.

Los objetivos primarios de la misión ERS apuntan a la vigilancia de los hielos marítimos y los océanos, aportando datos para:

- Mejorar la representación de interacciones de atmósfera/océanos en modelos climáticos
- Mayores avances en el conocimiento de la circulación oceánica y transferencia de energía
- Estimación más confiable del balance de los témpanos de hielo entre el Artico y el Antártico
- Mejorar el monitoreo de la polución y la dinámica de los procesos costeros
- Mejorar la detección y administración de los cambios sufridos en el planeta.

La capacidad de los ERS para adquirir un extenso conjunto de datos globales del océano, la atmósfera, los hielos y los fenómenos terrestres, contribuye al estudio y aplicación de conocimientos en las siguientes áreas:

- Océano/hielo: circulación oceánica, hielos marítimos, monitoreo de icebergs, etc.
- Tierra Física: silvicultura, glaciaciones, estudios de agricultura y geología
- Clima: contribución al programa de investigación del clima Mundial y al experimento de circulación oceánica mundial
- Atmósfera y mar: pronóstico del tiempo, velocidad y dirección de los vientos, pronóstico del estado de la superficie oceánica, localización de los bancos de peces mediante el monitoreo de la temperatura del mar.

Instrumentación ERS-1 y ERS-2

- *SAR (Synthetic Aperture Radar - Radar de Apertura Sintética)*. Le permite hacer mediciones en condiciones meteorológicas adversas. Especialmente puede medir algunos parámetros que no abarcan otros sistemas de satélites ya existentes: estado del mar, su temperatura, los vientos de su superficie, movimientos de las aguas y desplazamientos de témpanos de hielo
- *SCAT (Wind Scaterrrometer - Dispersómetro de vientos)*. Este instrumento (junto con el SAR que forma el Instrumento Activo de Microonda, AMI) proporciona datos sobre la dirección y la velocidad del viento sobre la superficie marítima.
- *RA (Radar Altimeter - Radar Altimétrico)*. El RA observa trayectorias en el punto nadir abarcando una huella de unos cuantos kilómetros. Envía señales de radar de la tierra y la superficie del océano y almacena la señal de regreso. La señal recibida en función del tiempo es llamada forma de onda. El procesamiento de esta forma de onda provee información sobre: la altura de las olas y la velocidad del viento (sobre el mar), la superficie muestreada y la altura del satélite sobre la superficie terrestre. Esto permite monitorear la circulación global de los océanos, de los sistemas regionales de corrientes y permite el estudio del campo de gravitación marina.
- *ATSR (Along-Track Scanning Radiometer - Equipo de barrido térmico)*. Mediante el barrido de una señal de microondas, se detecta y mapea radiación infrarroja en diversas longitudes de onda. Cuando el cielo está libre de nubes, estas medidas pueden convertirse adecuadamente en temperaturas de las superficies de tierra y mar.
- *Microwave Sounder - Resonador de Microonda*. Opera junto con el ATSR; el Resonador de Microonda provee una medida del vapor de agua contenido en la atmósfera de la Tierra verticalmente más adelante la órbita de satélite.
- *PRARE (Precise Range and Range-Rate Equipment - Equipo de determinación de colocación y velocidad del satélite)*. Este instrumento envía señales a transponders ubicados en la Tierra (en la actualidad existen 20). Después de la recepción de la señal de regreso, la colocación relativa y la velocidad del satélite puede ser determinada hasta por 4 transponders simultáneamente. Esto provee medios para determinar la ubicación del satélite (latitud, longitud, y altura) en cada punto de la órbita. El instrumento PRARE desafortunadamente falló en el satélite ERS 1 poco después del lanzamiento.
- *LRR (Laser Retro-Reflector - Retrorreflector Láser)*. El Retrorreflector láser Retro es un instrumento puramente pasivo y puede compararse a los reflectores de los automóviles y las bicicletas. Refleja los pulsos de láser transmitidos desde Tierra, el tiempo total transcurrido del pulso láser (una vez recibida la señal reflejada por el satélite) es una medida para el cálculo de la distancia entre el satélite y la estación. Para el ERS-1 este era el único medio para conocer la órbita precisa del satélite; para el ERS-2 es una adición útil para determinar su órbita y para calibrar el instrumento PRARE.

El segundo satélite de la serie, el ERS-2, incorpora las siguientes mejoras:

- *GOME (Global Ozon Monitoring Experiment - Experimento de Monitoreo Global de Ozono)*. Su propósito es el de medir la cantidad de ozono en la parte superior de la atmósfera y proveer estadísticas sobre la evolución del agujero de Ozono y como es afectado por la contaminación.
- Equipo de barrido térmico mejorado con 3 nuevas bandas en el visible y el próximo infrarrojo (ATSR-2, Along Track Scanning Radiometer).

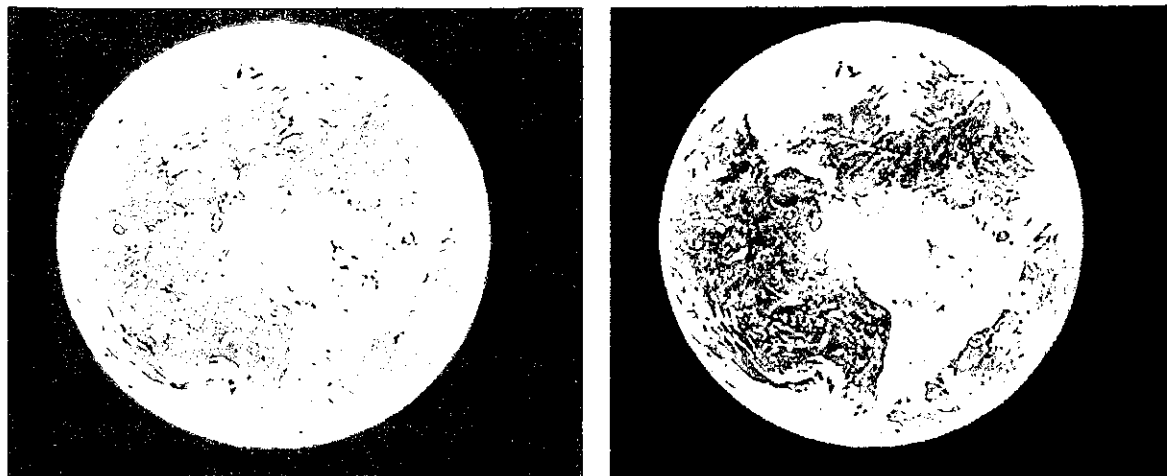
En las siguientes tablas se muestran características del instrumento más importante que incorpora el ERS, el instrumento activo de microondas (AMI, Active Microwave Instrument). Éste se puede utilizar en 3 modos distintos: radar de imágenes (AMI SAR mode), modo olas (AMI WAVE mode) y modo viento (AMI WIND mode), cada uno de los cuales tiene una utilidad concreta:

AMI SAR MODE	
Frecuencia y polarización	5.3GHz (banda-C), VV
Ángulo off-nadir	23°
Cobertura en la dirección de avance	100 Km
Resolución	30m x 30m

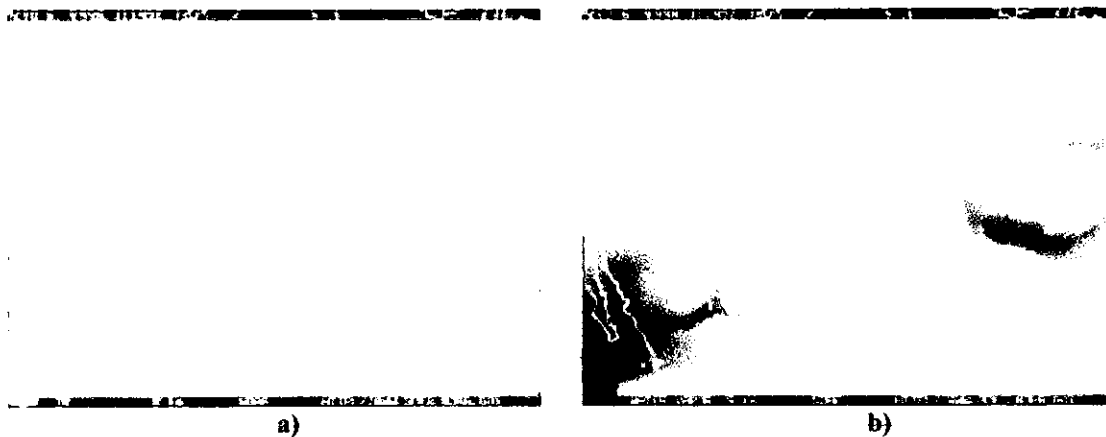
AMI WAVE MODE	
Área de cobertura	5km x 5km
Intervalo	100 Km o 300 Km en el área de observación

AMI WIND MODE	
Frecuencia de polarización	5.3GHz (banda-C) , VV
Cobertura en la dirección de avance	500 Km
Resolución	50 Km

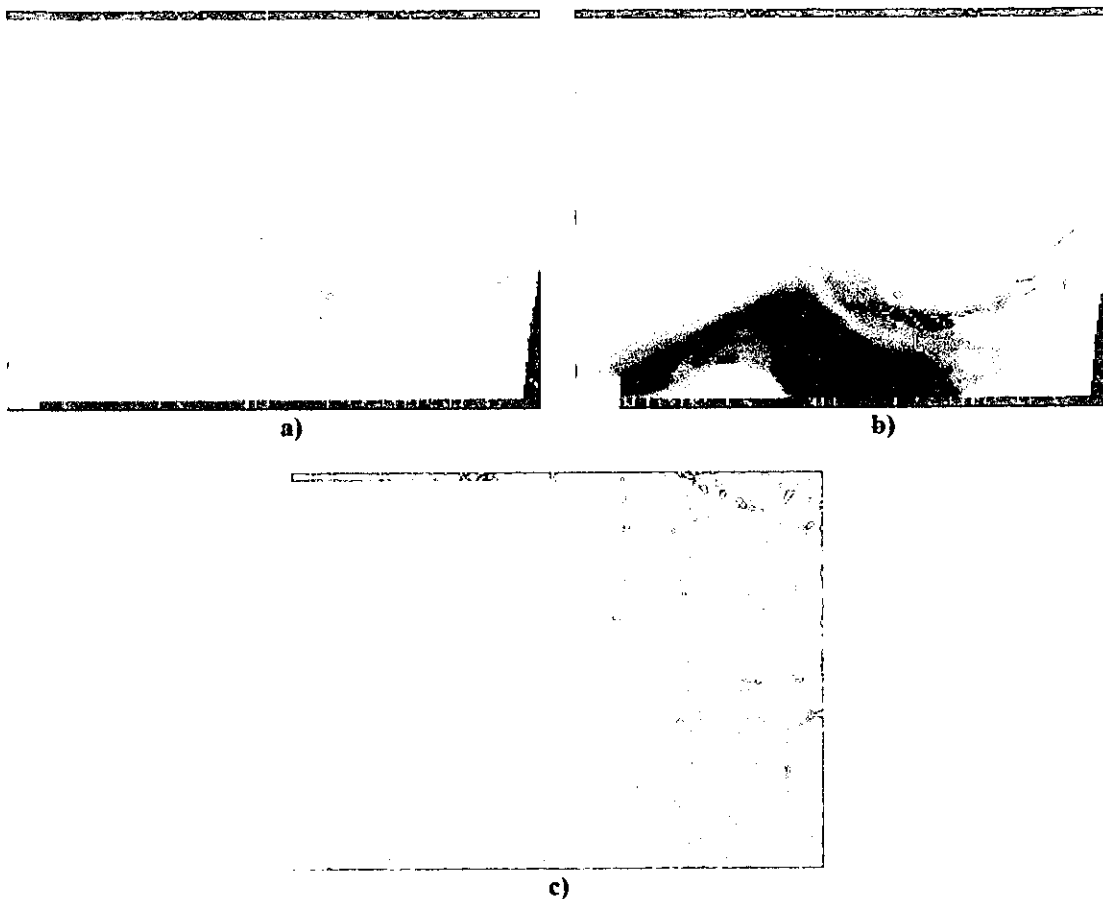
3.6.1 Imágenes de los satélites GOES



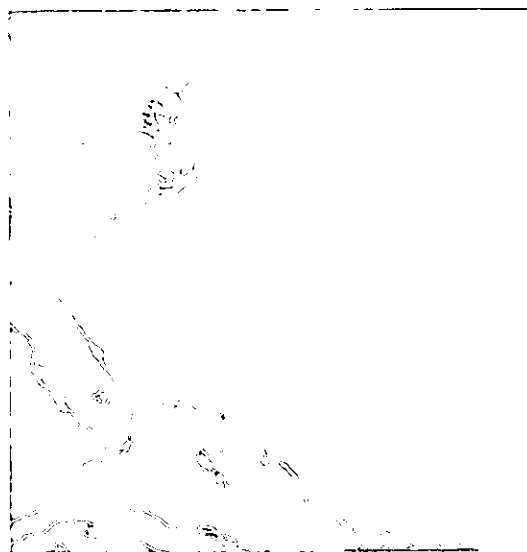
*Continente Americano, imágenes en monocromático y en colores falsos.
Satélite GOES 8. Marzo 29, 1997.*



*Costa Este de los Estados Unidos.
a) Canal Infrarrojo, b) Canal de Vapor de agua y c) Canal Visible.
Satélite GOES 8. Octubre 6, 1998.*

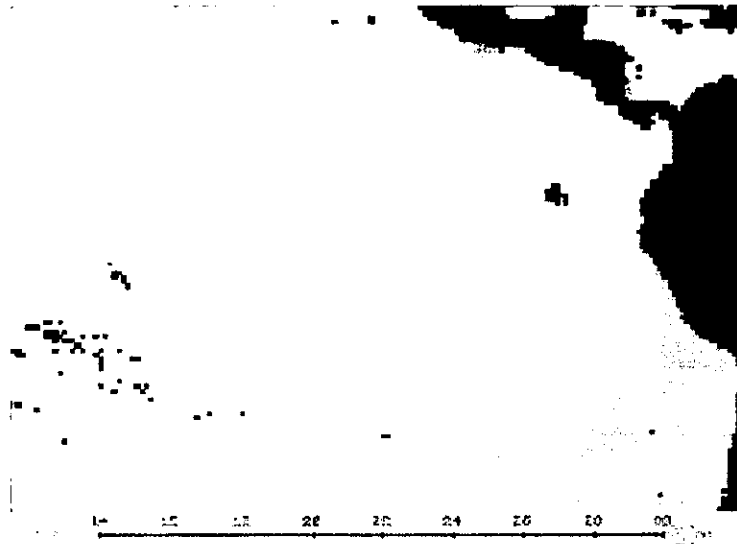


*Costa Oeste de los Estados Unidos.
a) Canal Infrarrojo, b) Canal de Vapor de agua y c) Canal Visible.
Satélite GOES 9. Octubre 6, 1998.*

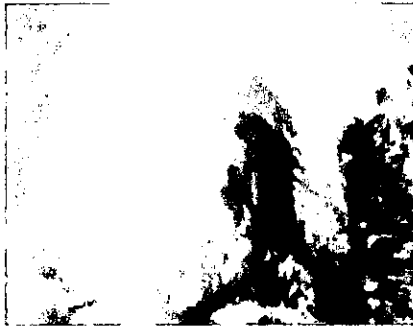


*Huracán Hugo. Costa Este de los Estados Unidos.
Satélite GOES 7. Septiembre 21, 1989.*

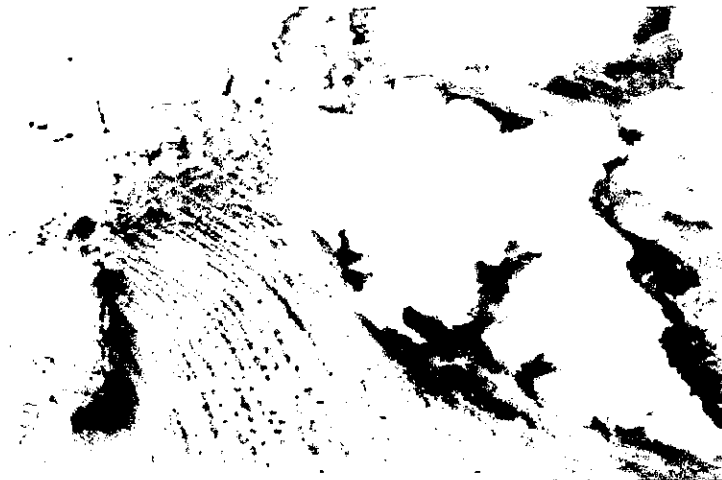
3.6.2 Imágenes de los satélites NOAA



Pacifico Ecuatorial. Temperatura de la superficie marina. Colores Falsos. Satélite NOAA 14. Octubre 3, 1998.



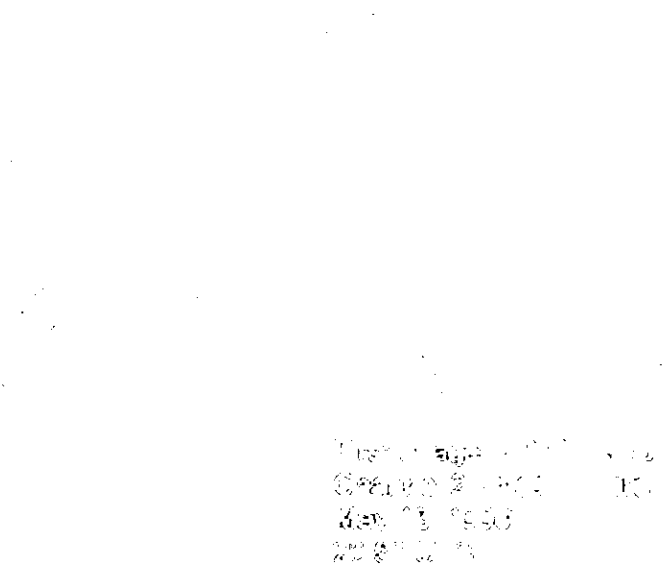
Huracán Andrew, Golfo de México. Satélite NOAA 11



Hielo marino y nubes en Spitzbergen. Imagen HRPT con resolución de 1.1 Km por pixel. Satélites NOAA, Diciembre 2, 1994.

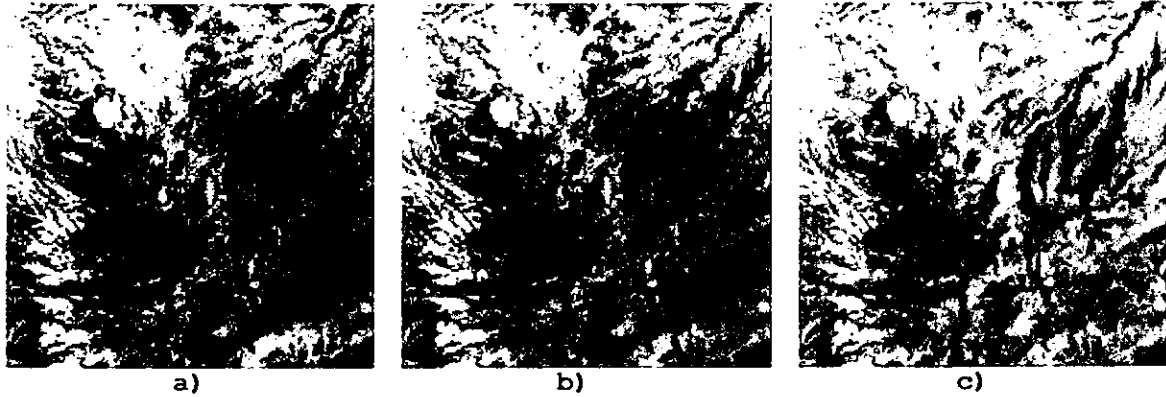


*Zona del Oeste de Europa.
Satélite NOAA 14. Junio 18, 1998.*

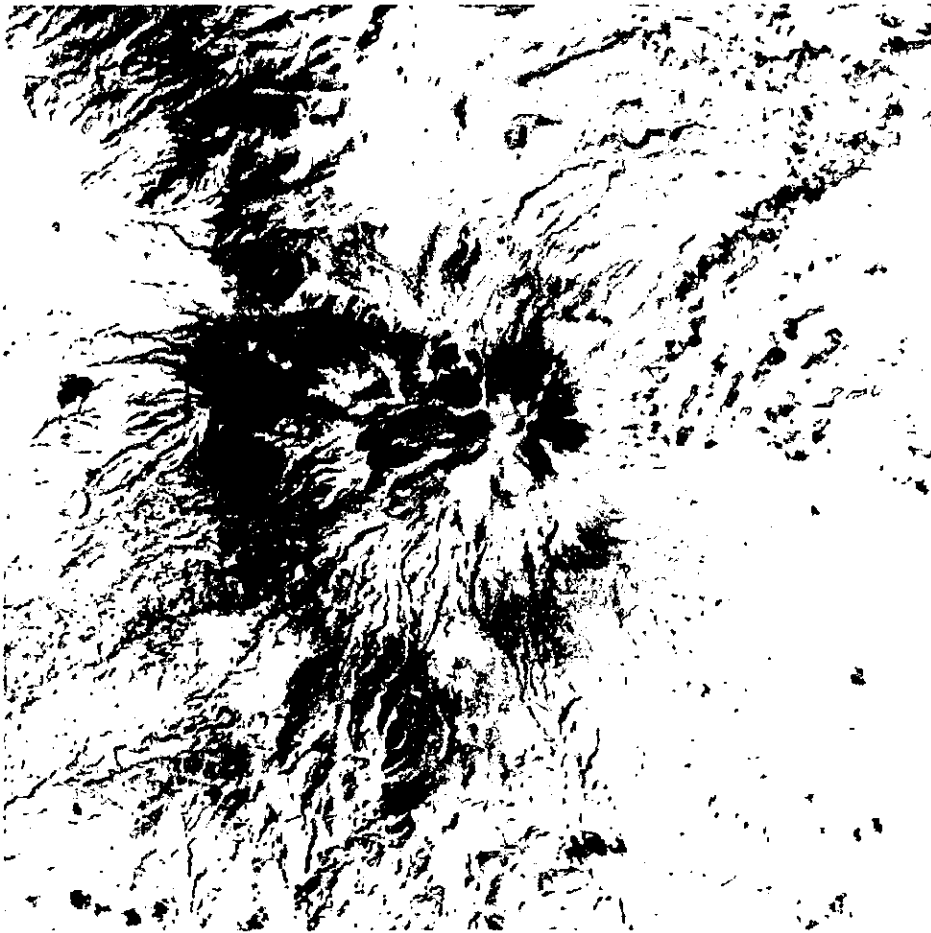


*Kamchatka, Rusia. Canal 2, próximo infrarrojo.
Primera imagen recibida de satélite NOAA 15. Mayo 13, 1998*

3.6.3 Imágenes de los satélites Landsat



*México, área de Veracruz.
Imagen TM.
a) Bandas 3,2,1; b) Bandas 4,3,2; c) Bandas 7,4,3.
Satélite Landsat. Marzo 16, 1986.*



*Volcán Popocatepetl, México.
Imagen TM, Bandas 1, 2 y 7. Composición de Infrarrojo.
Satélite Landsat. Enero 31, 1985.*



*Kiev, Ucrania. Planta nuclear de Chernobyl después del accidente.
Imágen TM en color.*

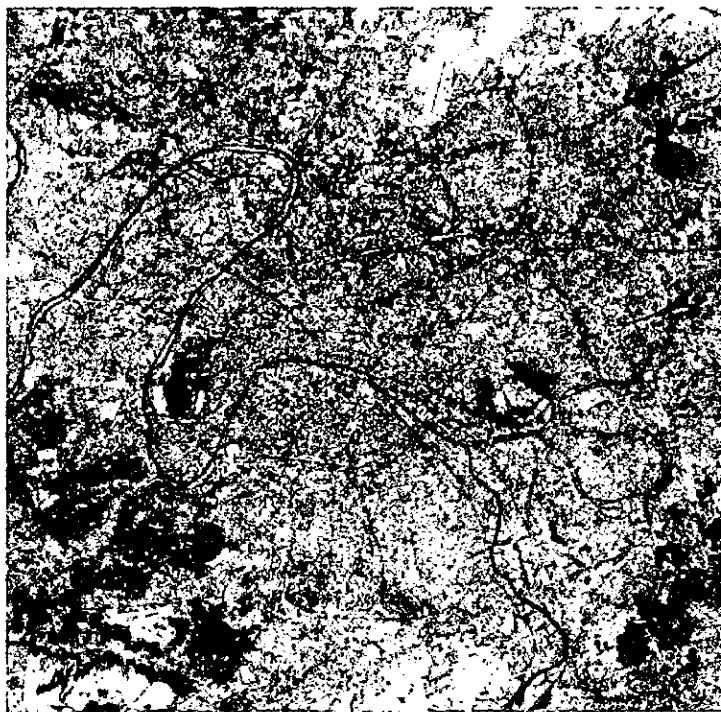


*Imagen del océano Atlántico.
Satélite Landsat. 1998.*

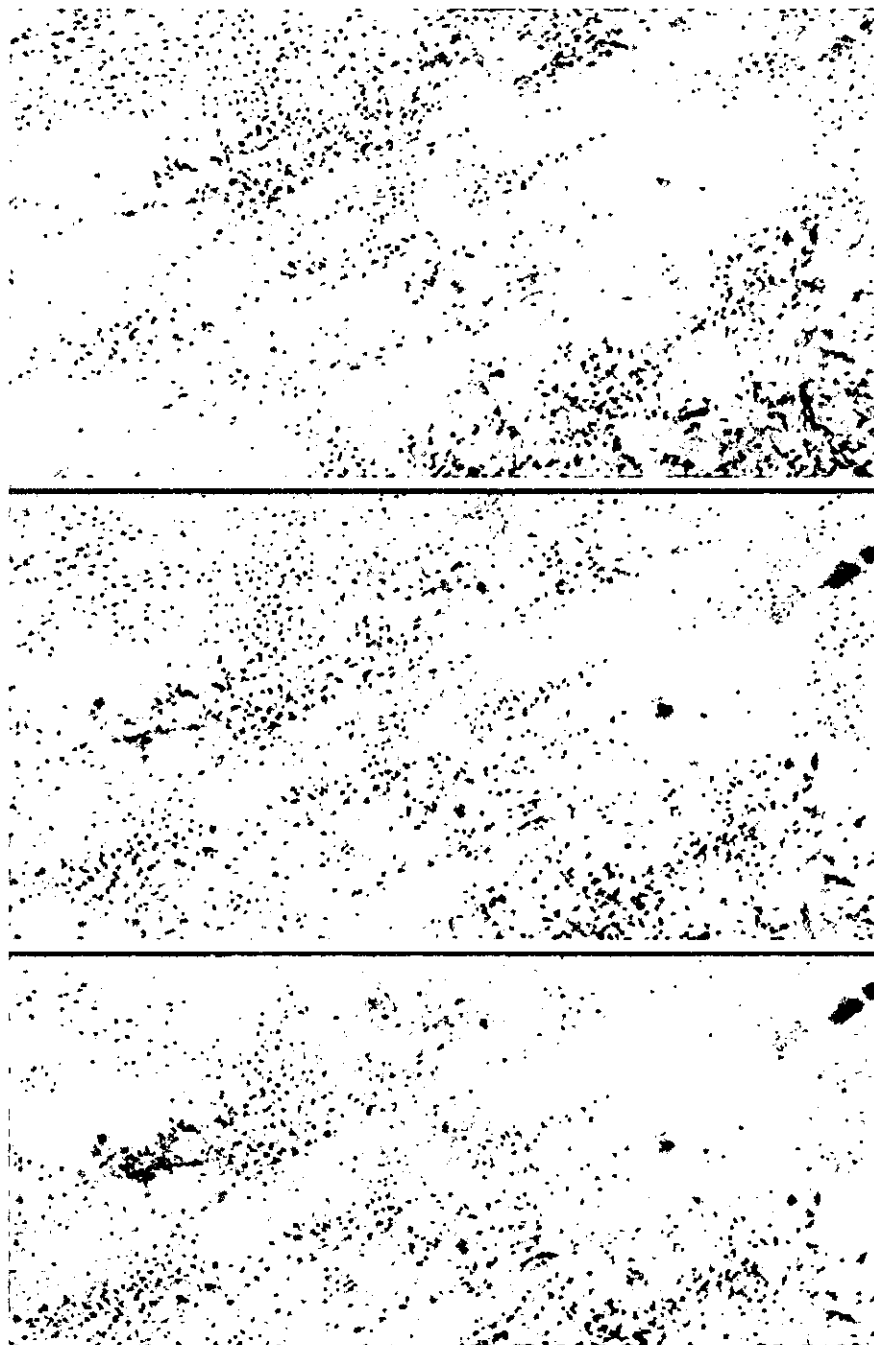
3.6.4 Imágenes de los satélites SPOT.



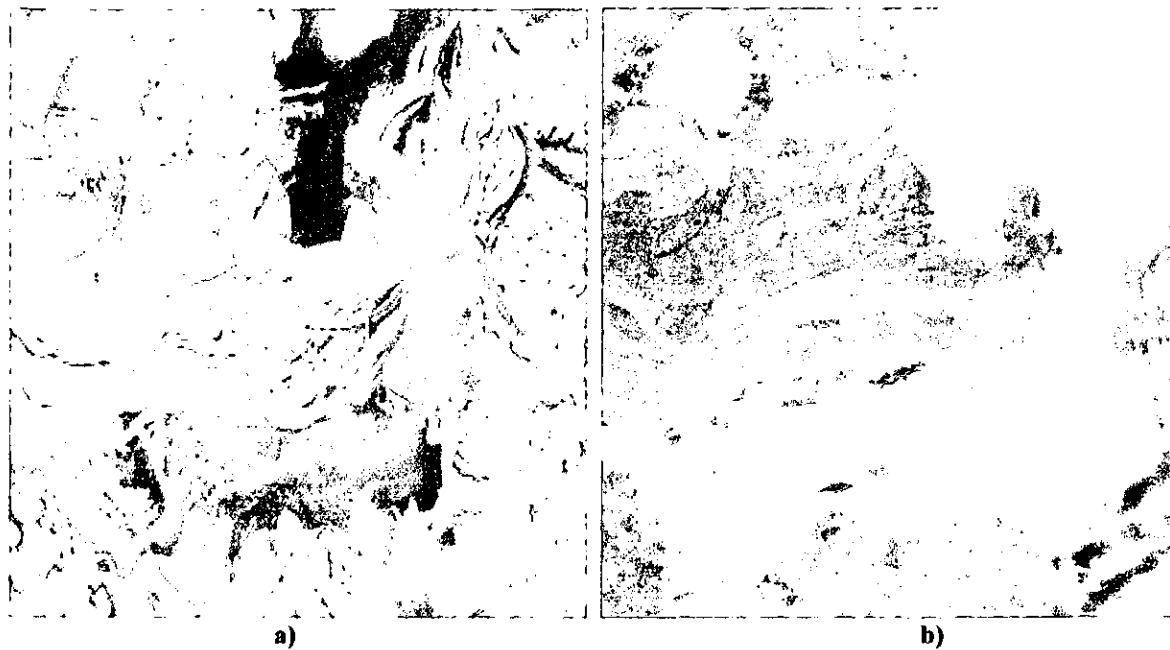
*Toulon Africa. Imagen TM.
Adquirida entre el 14 de Julio y el 18 de Agosto de 1993.
Escala original 1:50 000. Satélite SPOT 4*



*París visto por SPOT.
Imagen en colores pseudo-naturales. Marzo 14, 1993.*

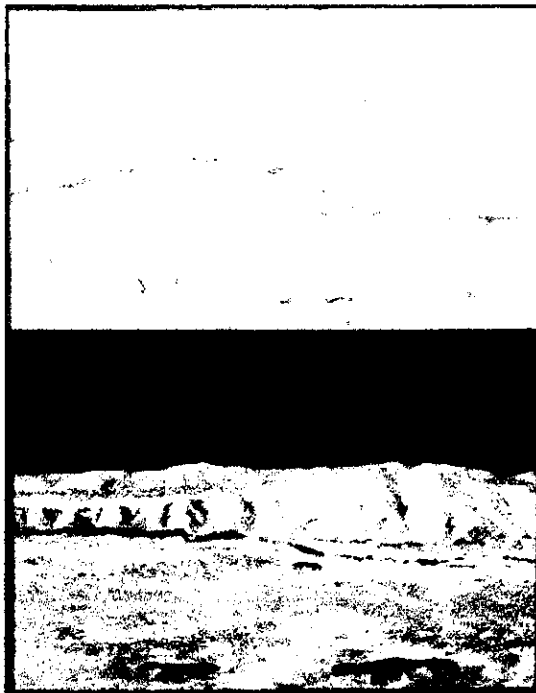


*Imágenes de la región de Ferlo, Senegal.
a) Banda TM5 (SWIR), b) Banda TM4 (NIR), c) Banda TM3 (R)
Área de cobertura aproximada 33 km por 18 km.
Satélite SPOT.*

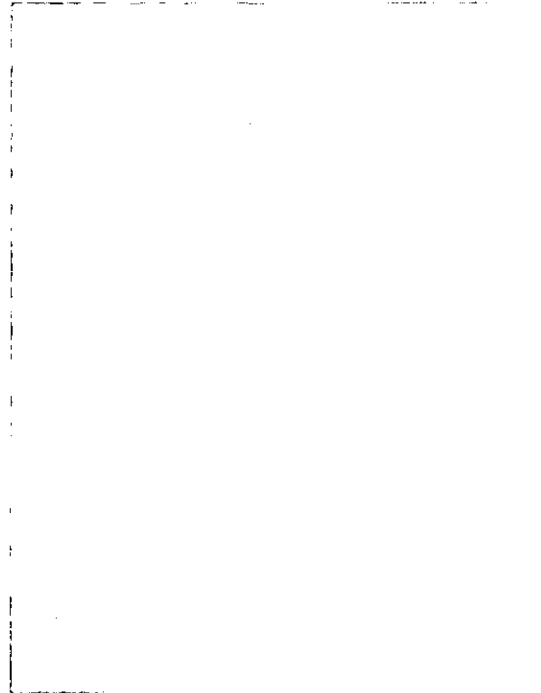


Inundaciones en China. Dongting, provincia de Hunan.
a) imagen en condiciones climáticas normales. Mayo 12, 1998.
b) imagen de las inundaciones después de las lluvias . Agosto 12, 1998.
Satélite Spot 4.

3.6.5 Imágenes de los satélites ERS



a)



b)

Imágenes SAR (ERS-1). a) Río Tanana (Alaska), vista interferométrica e imagen en 3D con datos obtenidos de la superior. b) Islas del Canario (Sahara Occidental), imagen para observar temperatura, cobertura 512 km². Octubre 19, 1992.

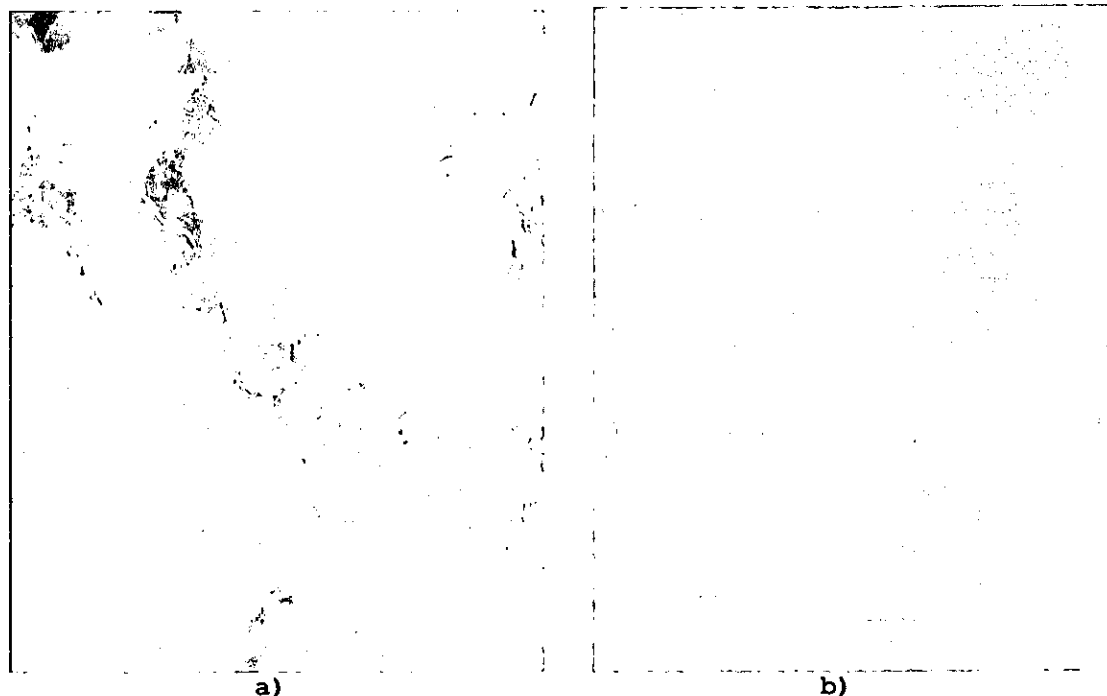


a)



b)

Imágenes SAR (ERS-1): a) Isla Adelaide (Antártida), colores artificiales, cobertura 100 km². b) Costa Antártica, foto tomada por la banda ERS-1/VLBL-X, cobertura 84 x 95 km Octubre 9, 1991.



Imágenes SAR (ERS-1): a) Río del Caimán (Australia) imagen multitemporal formada por tres imágenes (rojo Agosto 24, 1992; verde, Noviembre 2, 1992; azul Julio 5, 1993), cobertura 100 km². B) Río Teles (Brazil), cobertura 75 km², colores falsos. Abril 14, 1992.



Imágenes SAR (ERS-1): a) Southwards (capital de Austria, zona iluminada), cobertura 100 km². Diciembre 12, 1991. b) Brahmaputra y Río de Ganges (Bangladesh), multitemporal formada por dos imágenes (rojo, Julio 24, 1993; azul, Julio 28, 1993), cobertura 100 km².

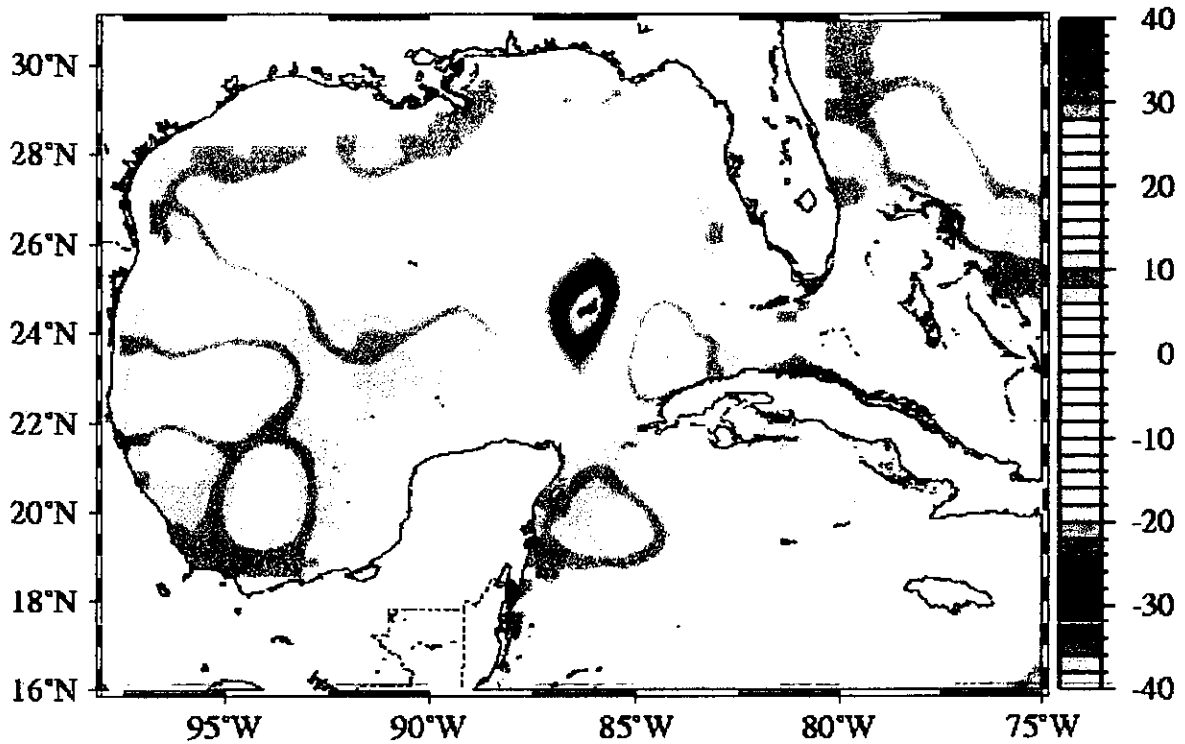


Imagen ERS-2: Golfo de México tomada por el Laboratorio de Investigación Naval NLOM sobre superficies marinas. Junio 10, 1998.

NLOM: Sea Surface Height Deviation (cm)

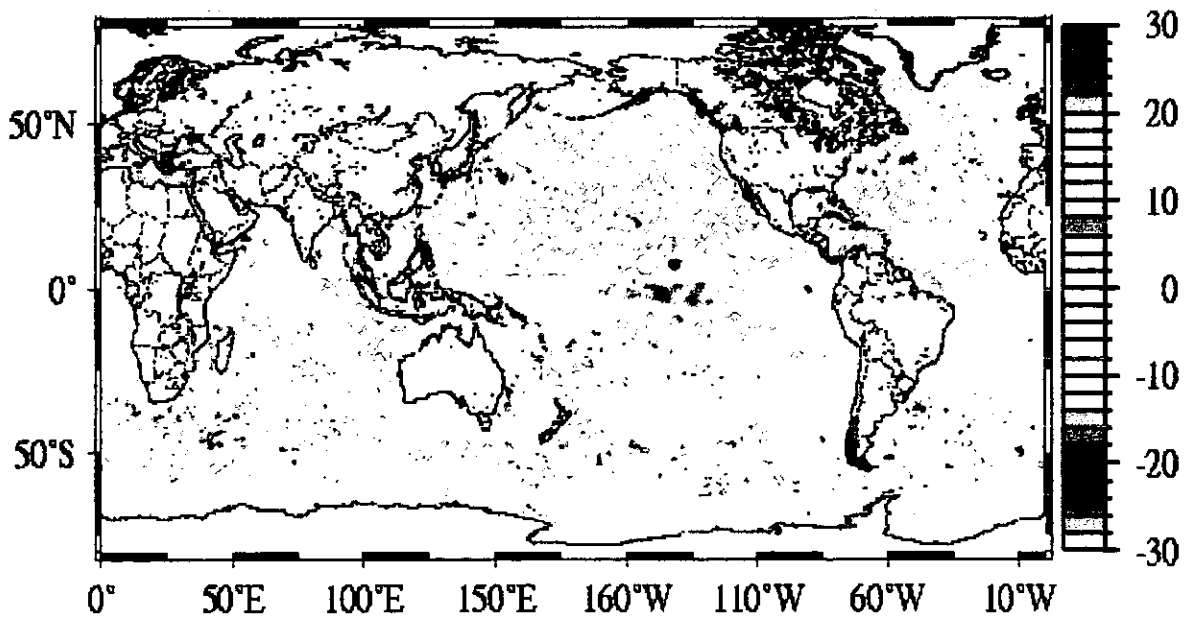
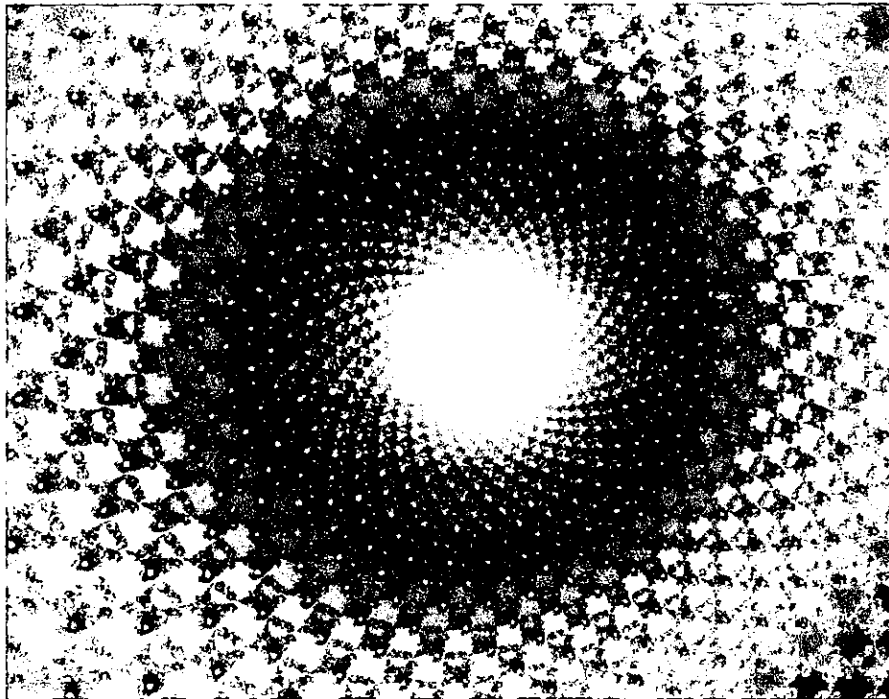


Imagen ERS-2: Planisferio, superficie marinas. Junio 10, 1998.

CAPÍTULO 4

CAMPOS ALEATORIOS DE MARKOV



4.1 Introducción al Procesamiento Digital de Imágenes

Una de las primeras aplicaciones del procesamiento de imágenes data de principios de los 20's cuando las imágenes digitalizadas de eventos noticiosos fueron transmitidas por cable submarino entre Nueva York y Londres. El problema inicial fue mejorar la calidad visual de estas imágenes.

Con el surgimiento de la tercera generación de las computadoras digitales, el procesamiento digital de imágenes se incrementó requiriendo cada vez más velocidad en los procesadores y mayor capacidad de almacenamiento. Esto motivó el diseño de nuevas computadoras con procesamiento en paralelo.

La meta de la visión computacional es el procesamiento de datos de imágenes por máquinas de percepción. Esta visión involucra un dispositivo de percepción (normalmente una cámara) y algoritmos computacionales capaces de interpretar la imagen. El término *imagen* (por ejemplo, *imagen monocromática*) hace referencia a una función de la intensidad de luz en dos dimensiones cuyo valor en cualquier punto es proporcional al brillo o nivel de gris de la imagen en ese punto; por su parte una *imagen digital* es una imagen discretizada, ambas están dadas en coordenadas espaciales y en brillo. Usualmente están representadas en una matriz de dos dimensiones; los elementos de cada arreglo digital son llamados píxeles.

Un nivel de procesamiento de imágenes es el de *bajo nivel o visión temprana*, transformando una imagen digitalizada en una forma que puede ser usada en procesos de *alto nivel*.

La visión temprana trata directamente con los datos recién obtenidos del píxel, involucrando la comprensión de la imagen, restauración, detección de bordes, segmentación, análisis de textura, detección de movimiento, flujo óptico, etc. La mayoría de estos problemas puede formularse en un trabajo general, llamado etiquetado de imágenes, donde se asocia un etiqueta a cada píxel de un conjunto finito. El significado de esta etiqueta depende del problema que se está intentando resolver; para la restauración de imágenes, esta significa niveles de gris; para la detección de bordes, significa la presencia o la dirección de un borde; para la segmentación de imágenes, significa una clase (o región); etc. El problema relevante es cómo escoger una etiqueta para un píxel el cual sea óptimo de acuerdo a la imagen real.

Las referencias contextuales son necesarias en la interpretación de información visual. Una escena se entiende en su contexto espacial y visual de los objetos en él; los objetos se reconocen en el contexto de características del objeto a una representación nivelada más baja; las características del objeto se identifican basadas en el contexto de primitivas a un nivel aun más bajo; y las primitivas se extraen en el contexto de píxeles de la imagen al nivel más bajo de abstracción. El uso de las referencias contextuales son indispensables para el estudio de visión y el análisis de escenas.

Clasificar es extraer características similares de los elementos de una imagen para efectuar una distinción entre ellos, por ejemplo, entre mar y ciudades.

La *segmentación* puede verse como nivel previo a la clasificación. El objetivo de la segmentación es dividir una imagen en regiones homogéneas; esto se hace encontrando los límites entre las regiones o las regiones directamente sin los bordes que las separan. La segunda alternativa constituye la estrategia más utilizada en Campos Aleatorios de Markov.

En el proceso de la segmentación, la división de la imagen en las distintas regiones cumple con las siguientes características:

- La segmentación debe ser completa (por ej. cada pixel debe definirse en una sola región).
- Los pixeles en una región deben conectarse.
- Las regiones deben estar separadas.

Los procesos clásicos de segmentación se basan en algoritmos de crecimiento de regiones o de división y fusión.

Los Campos Aleatorios de Markov (Markov Random Field - MRF), definidos más adelante, se basan en la segunda característica de segmentación, donde los pixeles cercanos deben pertenecer a la misma región. Para lograr una mayor precisión en la segmentación, se asocia una etiqueta a cada pixel. Esta etiqueta indica el tipo de región donde se encuentra el pixel. Entonces, se define un MRF sobre estas etiquetas, lo cuál favorece (por definición de algunas funciones potenciales), a etiquetas similares de pixeles vecinos. Sin embargo, esto puede producir una segmentación donde toda la imagen se convierte en una sola región. Es necesario entonces una condición más: una relación entre los valores de niveles de gris (en el caso de una imágenes monocromáticas) y las regiones. El modelo más natural consiste en aproximar cada clase mediante una distribución Gaussiana sobre los niveles de gris. De esta manera, las regiones se caracterizan por su valor medio y por la variación de la función de densidad normal correspondiente. Estas distribuciones pueden introducirse en el modelo MRF mediante el potencial de cliques de primer orden.

4.2 Etiquetación

Un problema etiquetado se especifica en términos de una serie de sitios (*sites*) y una serie de etiquetas.

Sea \mathbf{S} un conjunto discreto de sitios m .

$$\mathbf{S} = \{1, \dots, m\} \quad (4.1)$$

donde $1, \dots, m$ son los índices. Un sitio representa a menudo un punto o una región en el espacio Euclidiano; como un pixel de la imagen; una característica de la imagen como el punto de una esquina, un segmento de una línea, o un retoque de una superficie. Un conjunto de sitios puede categorizarse en términos de su *regularidad*. Los sitios en una malla, también llamada láctice, son considerados espacialmente como regulares. Una malla rectangular para una imagen de 2D de tamaño $n \times n$ puede denotarse de la siguiente forma:

$$\mathbf{S} = \{(i,j) \mid 1 \leq i, j \leq n\} \quad (4.2)$$

Estos elementos corresponden a las localidades donde la imagen es probada. Los sitios que no presentan regularidad espacial son considerados como irregulares como en el caso de detección de esquinas y líneas.

Normalmente se toma a los sitios en el modelo MRF como no ordenados. Para una imagen de $n \times n$, el pixel (i,j) puede ser reindexado convenientemente por un número k , donde k toma valores en un rango de $\{1, 2, \dots, m\}$, donde $m = n \times n$. La interrelación de sitios se mantiene por un Sistema denominado de Vencindades.

Ya que una etiqueta es un evento que puede corresponder a un sitio, podemos definir a \mathbf{L} como un conjunto de etiquetas, donde este conjunto se puede clasificar como continuo y discreto. En el caso continuo, un conjunto de etiquetas puede corresponder al conjunto de los números reales \mathbb{R} o a un intervalo de éste,

$$\mathbf{L}_c = [X_l, X_h] \subset \mathbf{R} \quad (4.3)$$

en el caso discreto, una etiqueta toma valores discretos de un conjunto de M etiquetas

$$\mathbf{L}_d = \{l_1, \dots, l_M\} \quad (4.4)$$

o simplemente

$$\mathbf{L}_d = \{1, \dots, M\} \quad (4.5)$$

Por ejemplo, en la detección de bordes, el conjunto de etiquetas es $\mathbf{L} = \{\text{borde}, \text{no-borde}\}$.

Con esto se ilustra la primera propiedad del conjunto de etiquetas que es la continuidad.

Otra propiedad es el ordenamiento de las etiquetas; por ejemplo, el conjunto de números reales puede ordenarse en forma creciente; también en un conjunto discreto con un rango de $\{0, \dots, 255\}$ que representa valores de intensidad, se dice que está ordenado ya que se tiene que $0 < 1 < 2 < \dots < 255$.

Para un conjunto de etiquetas ordenadas, puede definirse una medida numérica (cuantitativa) de similitud entre dos etiquetas cualquiera. Para un conjunto de etiquetas desordenadas, una medida similar es simbólica (cualitativa), sólo tomando un valor de *igual* o *diferente*.

La similitud y ordenación de etiquetas clasifican los problemas de etiquetación pero además, afectan las opciones de algoritmos de etiquetación y la complejidad en el proceso de cómputo.

El problema de etiquetación radica en asignar una etiqueta del conjunto de etiquetas \mathbf{L} a cada uno de los sitios en \mathbf{S} . Por ejemplo, en la detección de bordes se asigna una etiqueta f_i del conjunto $\mathbf{L} = \{\text{borde}, \text{no-borde}\}$ al sitio $i \in \mathbf{S}$, donde los elementos \mathbf{S} representan los pixeles en la imagen. El conjunto

$$f = \{f_1, \dots, f_m\} \quad (4.6)$$

es llamado una etiquetación de los sitios en \mathbf{S} en términos de las etiquetas en \mathbf{L} . Cuando a cada sitio se le asigna una sola etiqueta, $f_i = f(i)$ puede considerarse como una función con dominio \mathbf{S} e imagen \mathbf{L} ; y de esto se obtiene lo que se llama mapeado de \mathbf{S} a \mathbf{L} , es decir,

$$f: \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{L} \quad (4.7)$$

El mapeado de los conjuntos de etiquetas continuas y discretas se muestran en la figura 4.1.

En la terminología de campos aleatorios, un etiquetado es llamado configuración. En visión, una configuración o etiquetado corresponde a una imagen, al borde de un mapa, o a una interpretación de características de la imagen en términos de rasgos de objetos, y así sucesivamente.

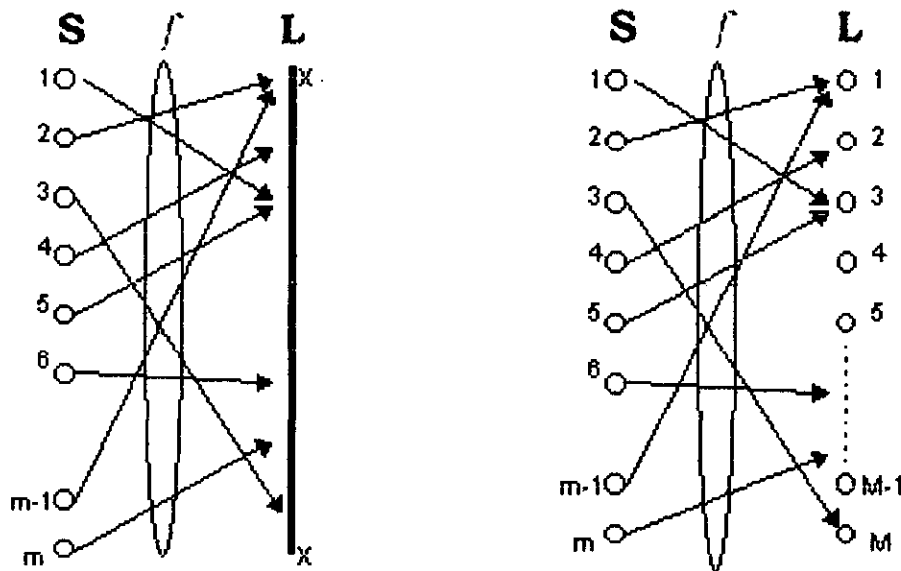


Figura 4.1: Un etiquetado de sitios pueden ser considerado como un mapeado del conjunto de sitios S a el conjunto de etiquetas L . La figura muestra mapeados con conjuntos de etiquetas continuas (izquierda) y conjuntos de etiquetas discretas (derecha).

Cuando todos los sitios tienen el mismo conjunto de etiquetas L , el conjunto de todos los posibles etiquetadores, es decir, la configuración espacial, se define mediante el siguiente producto Cartesiano

$$\mathbf{F} = \underbrace{\mathbf{L} \times \mathbf{L} \dots \times \mathbf{L}}_{m \text{ tiempos}} = \mathbf{L}^m \quad (4.8)$$

donde m es el tamaño de S . Por ejemplo, en restauración de imágenes, L contiene valores admisibles de píxeles, los cuales son comunes a todos los sitios de píxel en S , y F define todas las imágenes admisibles. Cuando $L = \mathbf{R}$ tenemos el conjunto real. Si $F = \mathbf{R}^m$ se tiene un espacio real de dimensión m . Cuando L es un conjunto discreto, el tamaño de F es combinatorial. Por ejemplo, para un problema con m sitios y M etiquetas, existe un número total de M^m posibles configuraciones en F .

4.2.1 Problemas de etiquetado en Visión

En términos de la regularidad y la continuidad, podemos clasificar un problema de etiquetado de visión en una de las siguientes categorías:

- LC1: Sitios regulares con etiquetas continuas.
- LC2: Sitios regulares con etiquetas discretas.
- LC3: Sitios irregulares con etiquetas discretas.
- LC4: Sitios irregulares con etiquetas continuas.

Las primeras dos categorías caracterizan el desarrollo en bajo nivel de procesamiento en imágenes observadas y los otros dos realizan alto nivel de procesamiento en características de muestras extraídas de imágenes.

La restauración o tratamiento de imágenes que tienen valores del píxel continuos es una categoría LC1. El conjunto S de sitios corresponde a los píxeles de la imagen y el conjunto de etiquetas L es un intervalo del conjunto de los reales. La restauración es la

estimación de las señales de la imagen real con respecto a la imagen degradada o deformada por el ruido.

La restauración de imágenes binarias o multinivel es categoría LC2. Similar a la restauración continua, el objetivo principal es estimar la señal de la imagen real de la imagen de entrada. La diferencia es que cada pixel en la imagen resultante asume un valor discreto y así L en este caso es un conjunto de etiquetas discretas.

La segmentación de regiones es un LC2. Esta divide una imagen en regiones mutuamente exclusivas, cada una tiene propiedades homogéneas y uniformes por lo que sus valores son diferentes de las regiones vecinas. Por ejemplo, las propiedades pueden ser tonos de gris, color o textura. Los pixeles dentro de cada región son asignados a una única etiqueta.

El forzar a un pixel a pertenecer a una clase en los problemas anteriores es debido a que la señal es defectuosa o el pixel de prueba no esta bien definido. Esto es complementario al forzamiento debido a cambios abruptos hechos por la detección de bordes.

La detección de bordes o contornos también es un LC2. A cada sitio de borde, localizado entre dos pixeles vecinos, se le asigna una etiqueta en { borde, no-borde } si hay diferencia es significativa entre los dos pixeles. La restauración de etiquetación continua con discontinuidades puede verse como una combinación de LC1 y LC2.

La detección de grupos es una categoría LC3. Los sitios usualmente corresponden a características iniciales de segmentación (puntos, líneas y regiones) que son colocadas irregularmente. Las características fragmentarias pueden ser organizadas dentro de características perceptuales mas significantes. Entre cada par de las características es asignada una etiqueta en {conectada, desconectada}, indicando si los dos rasgos pueden ser ligados o unidos.

El emparejamiento y reconocimiento de objetos basados en características es un LC3. Cada sitio representa una característica de la imagen en cada punto, segmento de la línea o región. Las etiquetas son discretas en la naturaleza y cada uno de los indices es una característica del modelo. La configuración resultante es un mapeo de las características de la imagen o de un objeto modelo.

La estimación de la colocación de un conjunto de correspondencia de puntos es una categoría LC4. Un sitio esta dado como una correspondencia. Una etiqueta representa una transformación admisible (ortogonal, afinidad o perspectiva). Un forzamiento anterior (unario), es que la etiqueta de transformación debe ser ortogonal, similar o perspectiva. Un forzamiento mutuo es que las etiquetas f_1, \dots, f_m puedan ser encerradas en otra etiqueta cualquiera para formar una transformación consistente.

Para un problema de etiquetación discreto de m sitios y M etiquetas, existe un número total de M^m posibles etiquetas. Para un problema de etiquetación continua, existe un número infinito de etiquetas. Sin embargo, entre éstos, hay sólo uno que es óptimo en términos de medición de criterios adecuados (o inversamente, el costo) de soluciones. Éste es el acercamiento de optimización a la etiquetación visual.

4.2.2 Etiquetando con Referencias Contextuales

El uso de información contextual es indispensable en el entendimiento del análisis de una imagen y manejo de datos en reconocimiento de patrones. El reconocimiento de caracteres es considerado como un problema de decisión estadística. Una dependencia más cercana entre vecindades de pixeles en una malla ó látice de la imagen es obtenida más allá de una independencia estadística. Se usa información sobre la vecindad más cercana para calcular probabilidades condicionales. Ese sistema también incluye

estimación de parámetros de caracteres de prueba; el reconocimiento de la muestra se realiza usando los parámetros estimados.

En términos de probabilidad, las referencias contextuales pueden expresarse localmente en términos de probabilidades condicionales $P(f_i | \{f_{i'}\})$, donde $\{f_{i'}\}$, denota el conjunto de etiquetas de otros sitios $i' \neq i$, o globalmente como la probabilidad de unión $P(f)$. Porque la información local es observada más directamente, normalmente una inferencia global se realiza basada en propiedades locales.

En situaciones donde las etiquetas son independientes de otras (no contextuales), la probabilidad de unión es el producto de probabilidades de los sitios externos

$$P(f) = \prod_{i \in \mathcal{S}} P(f_i) \quad (4.9)$$

lo anterior implica una independencia condicional.

$$P(f_i | \{f_{i'}\}) = P(f_i) \quad i' \neq i \quad (4.10)$$

Por consiguiente, un etiquetado global f puede ser procesado considerando cada etiqueta f_i localmente. Esto presenta una ventaja para resolver el problema.

4.3 Sistema de Vecindades y Cliques

La noción de Sistema de Vecindad es el concepto central del modelo MRF. Los sitios en \mathcal{S} se relacionan entre si por un Sistema de Vecindades, el cuál está definido como:

$$\mathcal{V} = \{\mathcal{V}_i | \forall i \in \mathcal{S}\} \quad (4.11)$$

donde \mathcal{V}_i es el conjunto de sitios del Sistema de Vecindades y cumple con las siguientes propiedades:

- Un sitio no es vecino de si mismo: $i \notin \mathcal{V}_i$
- La relación de vecindades es mutua: $i \in \mathcal{V}_{i'} \Leftrightarrow i' \in \mathcal{V}_i$

Esto significa que un sitio i en la malla o látice Λ no pertenecen a su propio conjunto de vecinos y que si i_1 es un vecino de i_2 , el último debe pertenecer a la vecindad de i_1 , y viceversa.

Para una malla regular \mathcal{S} , el conjunto vecino de i esta definido como un conjunto de sitios cercano dentro de un radio r

$$\mathcal{V}_i = \{i' \in \mathcal{S} | [\text{dist}(\text{pixel}_{i'}, \text{pixel}_i)]^2 \leq r, i' \neq i\} \quad (4.12)$$

donde $\text{dist}(A,B)$ muestra la distancia Euclidiana entre A y B, y r toma un valor integral.

Se pueden tener diferentes *vecindades* (de primer orden, segundo orden, etc.). En un Sistema de Vecindad de primer orden, llamado Sistema de Vecindad 4, cada sitio (interior) tiene cuatro vecinos, como se muestra en Fig.4.2(a) donde X marca el sitio considerado y 0 sus vecinos. En un sistema de segundo orden, llamado Sistema de Vecindad 8, hay ocho vecinos para cada sitio, como se muestra en la Fig. 4.2(b). Los números $n = 1, \dots, 5$ mostrados en la Fig.4.2(c) indican los vecinos extremos en el Sistema de Vecindades de n-orden.

Cuando el orden de los elementos en \mathcal{S} se especifica, el conjunto de vecinos puede determinarse más explícitamente. Por ejemplo, cuando $\mathcal{S} = \{1, \dots, m\}$ es un conjunto ordenado de sitios y su índice de elementos de pixeles de una imagen 1D, un sitio interior $i \in \{2, \dots, m-1\}$ tiene dos vecinos más cercanos, $\mathcal{V}_i = \{i-1, i+1\}$, y un sitio en los bordes (los dos extremos) tiene un vecino cada uno, $\mathcal{V}_1 = \{2\}$ y $\mathcal{V}_m = \{m-1\}$. Cuando los sitios en

una malla rectangular regular $S = \{ (i,j) \mid 1 \leq i, j \leq n \}$ corresponden a pixeles de una imagen $n \times n$ en el plano 2D, un sitio interior (i,j) tiene cuatro vecinos más cercanos como $V_{i,j} = \{ (i-1, j), (i+1, j), (i, j-1), (i, j+1) \}$, un sitio en un borde tiene tres y un sitio a las esquinas tiene dos.

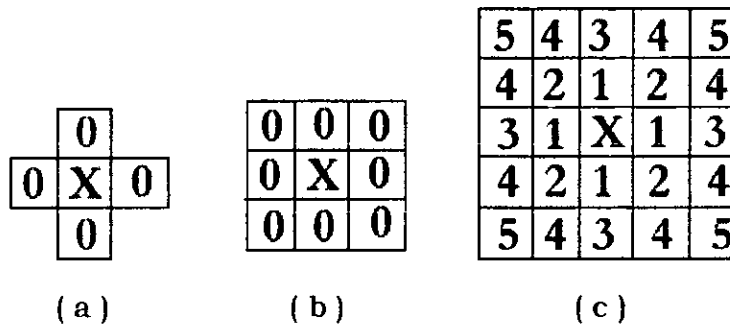


Figura 4.2. Vecindades en una malla de sitios regulares

Para un S irregular, el conjunto vecino V_i de i se define de la misma manera que (1) para comprender los sitios cercanos dentro de un radio r

$$V_i = \{ i' \in S \mid [\text{dist}(\text{característica}_r, \text{característica}_i)]^2 \leq r, i' \neq i \} \quad (4.13)$$

La función $\text{dist}(A,B)$ necesita ser definida apropiadamente para una característica no puntual.

El conjunto de vecindades V_i para un S irregular tiene diferentes formas y tamaños. Se ilustran sitios irregulares y sus vecindades en la Fig.4.3(a). Las áreas vecinas para los sitios i y j son marcados por los círculos punteados. Los tamaños de los dos conjuntos vecinos son $\# V_i = 3$ y $\# V_j = 2$.

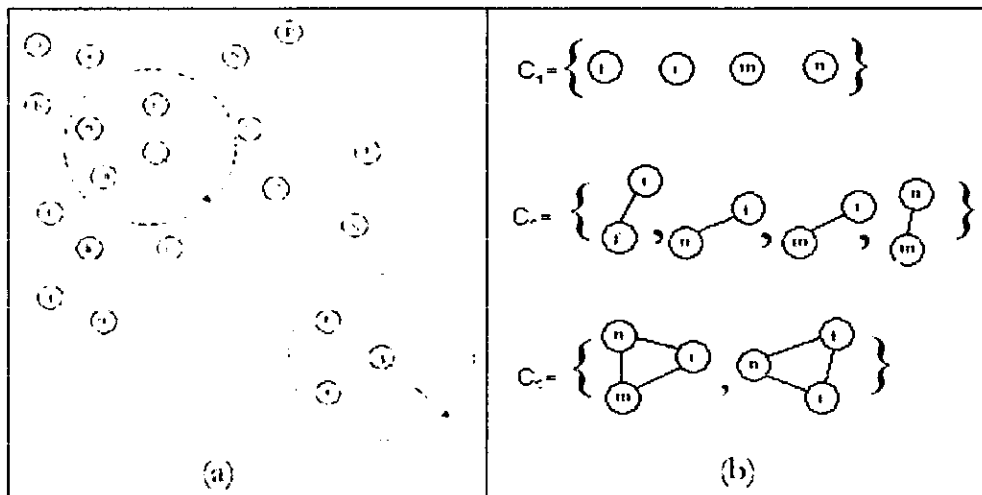


Figura 4.3. Vecindades y cliques en un conjunto de sitios irregulares.

El par $(S, V) \cong G$ constituye un gráfico en el sentido usual donde S contiene los nodos y V determina las uniones de éstos de acuerdo a la relación de vecindades.

Por otra parte podemos definir a un *clique* como un subconjunto de sitios de forma que todos están conectados con todos, es decir, un clique c en (S, V) es un subconjunto de sitios en S .

Un clique puede ser de un solo sitio $c = \{i\}$, o un par de sitios $c = \{i, i'\}$, o sitios vecinos triples $c = \{i, i', i''\}$, y así sucesivamente. La colección de cliques de sitio sencillo, doble y triple se denota a través de C_1, C_2, C_3 respectivamente; donde

$$C_1 = \{i \mid i \in S\} \tag{4.14}$$

$$C_2 = \{\{i, i'\} \mid i' \in V_i, i \in S\} \tag{4.15}$$

y
$$C_3 = \{\{i, i', i''\} \mid i, i', i'' \in S \text{ son vecinos entre sí}\} \tag{4.16}$$

La colección de todos los cliques para (S, V) es

$$C = C_1 \cup C_2 \cup C_3 \dots \tag{4.17}$$

donde muestra posibles conjuntos de cliques largos.

El tipo de un clique para (S, V) de una malla regular es clasificado según su tamaño, forma y orientación. La Figura 4.4 de (a) - (e) muestra tipos de cliques para los sistemas de vecindad de primer y segundo orden para una malla. Los cliques de sitio sencillo y los de sitio par en horizontal y vertical se muestran en (a) , (b) y son todos aquellos para el Sistema de Vecindades de primer orden (Fig 4.2a). Los tipos de cliques para el Sistema de Vecindades de segundo orden no sólo incluye aquellos en (a) y (b) sino también los cliques de pares diagonales (c) los cliques del sitio triple (d) y el sitio cuádruplo (e). Cuando el orden del Sistema de Vecindades aumenta, el número de cliques crece rápidamente así como los costos computacionales.

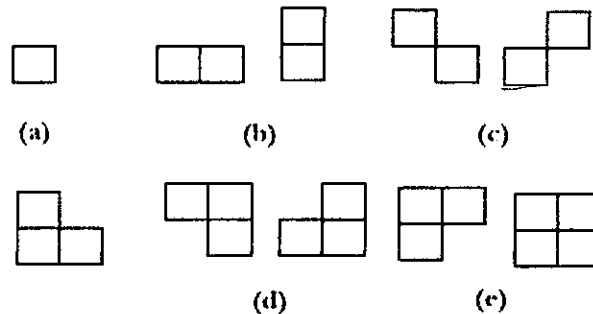


Figura 4.4. Cliques en una malla de sitios regulares

Los cliques de vecindades irregulares no tienen formas arregladas como los de malla regular, por lo que sus tipos son clasificados esencialmente por el número de sitios que envuelven. Considere los cuatro sitios f, i, m y n dentro del círculo en Fig. 4.3(a) en que se suponen m y n para ser vecinos uno de otro y así para n y f . Entonces los cliques del sitio sencillo, par y triple asociados con el conjunto de sitios se muestran en Fig. 4.3(b). El conjunto $\{m, i, f\}$ no forma un clique porque f y m no son vecinos.

4.4 Campos Aleatorios de Markov

Los Campos Aleatorios de Markov (Markov Random Field - MRF) es una rama de la Teoría de Probabilidad para el análisis de dependencias contextuales (probabilidad de dependencia de un pixel con respecto a otro) o espaciales de fenómenos físicos. Apareció en la década de los 20's, inspirado principalmente por el modelo Ising, y se convirtió rápidamente en una herramienta ampliamente usada en una gran variedad de problemas.

El modelo MRF permite una introducción al contexto espacial en problemas de píxeles. El uso práctico de los MRF se atribuye a la equivalencia entre estos y la Distribución de Gibbs establecida en 1971¹.

La mayoría de los modelos de MRF han sido dedicados a la solución de problemas de bajo nivel. Éstos incluyen restauración y segmentación de imágenes, reconstrucción de superficies, detección de bordes, análisis de textura, flujo óptico, contornos activos, plantillas deformables, fusión de datos, integración visual, y organización perceptual. El uso del MRF en visión de alto nivel, como identificación y reconocimiento de objetos, ha sido propuesto en los últimos años.

La Teoría de MRF proporciona un camino conveniente y consistente de las entidades dependientes de contexto modelado como píxeles de la imagen y otras características correlacionadas espacialmente. Esto se logra a través de caracterizar influencias mutuas. Esta teoría proporciona los fundamentos para establecer una probabilidad *a priori* de modelos dependientes contextuales, como una clase de texturas y un arreglo de características del objeto. Esta teoría se usa a menudo junto con la decisión estadística y teorías de estimación, para formular funciones objetivas en términos de principios óptimos. La Probabilidad Máxima Aposteriori (MAP - Maximum Aposteriori Probability) es uno de los criterios estadísticos más populares de optimización. La propiedad local del MRF lleva a algoritmos que pueden implementarse de manera local y multi paralela, además, también puede aplicarse a esquemas multiresolución.

Un Campo Aleatorio es una colección de variables aleatorias indexadas por sitios, lo cuál forma una malla ó látice regular. Si consideramos un conjunto de variables aleatorias $\mathbf{A} = \{A_1, \dots, A_m\}$, asociadas a cada sitio del sistema \mathbf{S} , y si cada variable A_i toma un valor f_i del conjunto \mathbf{L} . Entonces \mathbf{A} se considera un campo aleatorio. La notación $A_i = f_i$ denota al evento donde A_i toma el valor f_i , y $(A_1 = f_1, \dots, A_m = f_m)$ denota al evento unión. Simplificando, el evento unión se abrevia como $\mathbf{A} = f$.

Para un conjunto de etiquetas discretas \mathbf{L} , la probabilidad de que la variable aleatoria A_i tome el valor f_i se indica por $P(A_i = f_i)$ y se abrevia $P(f_i)$; la probabilidad de unión se expresa $P(\mathbf{A} = f) = P(A_1 = f_1, \dots, A_m = f_m)$ y se abrevia $P(f)$. Para un conjunto continuo \mathbf{L} tenemos la probabilidad de las funciones de densidad llamadas pdf's, $P(A_i = f_i)$ y $P(\mathbf{A} = f)$.

Se dice que \mathbf{A} es un Campo Aleatorio de Markov en \mathbf{S} con respecto a un Sistema de Vecindades \mathbf{V} si y sólo si se cumplen las siguientes condiciones:

- positivismo:

$$P(f) > 0, \forall f \in \mathbf{F} \quad (4.18)$$

- Markovianidad:

$$P(f_i | f_{\mathbf{S}-\{i\}}) = P(f_i | f_{\mathbf{V}_i}) \text{ para cada } i \in \mathbf{S} \text{ y } f \in \mathbf{A} \quad (4.19)$$

La primera condición especifica que todas las posibles realizaciones de campos aleatorios no deben tener probabilidad igual a cero. En la segunda condición $\mathbf{S} - \{i\}$ es el conjunto diferencia, $f_{\mathbf{S}-\{i\}}$ denota al conjunto de etiquetas de los sitios en $\mathbf{S} - \{i\}$ y $f_{\mathbf{V}_i}$ a los vecinos de f_i de acuerdo a cierto Sistema de Vecindad, esto significa que la probabilidad condicional de un sitio i depende de los valores del campo aleatorio en la vecindad del sitio i , es decir:

$$f_{\mathbf{V}_i} = \{f_{i'} | i' \in \mathbf{V}_i\} \quad (4.20)$$

¹ S.Z. Li. "Markov Random Field Modeling in Computer Vision". p 14. Markov-Gibbs Equivalence

El positivismo se asume por algunas razones técnicas y puede comprobarse en práctica. Por ejemplo, cuando la condición de positivismo se cumple, la probabilidad de unión $P(f)$ de cualquier campo aleatorio es únicamente determinado por su probabilidad condicional local. La Markovianidad describe las características locales de Λ . La etiqueta a un sitio es dependiente solo de los sitios vecinos. En otras palabras, sólo las etiquetas vecinas tienen interacciones directas entre ellas.

Esto siempre es posible para elegir vecindad suficientemente grande V_i para la Teoría Markoviana. La vecindad más grande consiste en todos los otros sitios. Cualquier Λ es un MRF con respecto a cada Sistema de Vecindad.

Un MRF puede tener otras propiedades como homogeneidad e isotropía. Esto es dicho para ser homogéneo si $P(f_i | f_{V_i})$ es indiferente la posición relativa del sitio i en S . La isotropía se puede explicar con cliques potenciales.

El concepto de MRF es una generalización del Proceso de Markov (MP) que se usa ampliamente en análisis de secuencia. Un MP se define sobre un dominio de tiempo más que de espacio. Ésta es una secuencia (cadena) de variables aleatorias $\dots \Lambda_1, \dots, \Lambda_m, \dots$ definido en el tiempo indicado $\{\dots, 1, \dots, m, \dots\}$. Un MP unilateral de orden n cumple que

$$P(f_i | \dots, f_{i-2}, f_{i-1}) = P(f_i | f_{i-1}, \dots, f_{i-n}) \quad (4.21)$$

Un MP bilateral o no-causal no sólo depende del pasado sino también del futuro. Un MP bilateral de orden n cumple que

$$P(f_i | \dots, f_{i-2}, f_{i-1}, f_{i+1}, f_{i+2}, \dots) = P(f_i | f_{i+n}, \dots, f_{i+1}, f_{i-1}, \dots, f_{i-n}) \quad (4.22)$$

Se generaliza en MRFs cuando los índices de tiempo son considerados como índices espaciales.

Hay dos acercamientos por especificar un MRF en términos de las probabilidades condicionales $P(f_i | f_{V_i})$ y en términos de la probabilidad de unión $P(f)$. El autor Besag (1974) opina con respecto a la aproximación de probabilidad de unión y tomando en cuenta las desventajas de la aproximación de probabilidad condicional; en primer lugar, ningún método obvio está disponible para deducir la probabilidad de unión de las probabilidades condicionales asociadas. En segundo lugar, las propias probabilidades condicionales están sujetas a algunas condiciones consistentes no-obvias y muy restrictivas. En tercer lugar la especificación natural de un equilibrio en un proceso estadístico se define en términos de la probabilidad de unión en lugar de la distribución condicional de las variables. Afortunadamente, un resultado teórico sobre la equivalencia entre Campos Aleatorios de Markov y distribución de Gibbs proporciona un medio matemáticamente sencillo para especificar la probabilidad de unión de un MRF.

4.4.1 Segmentación y reconstrucción de imágenes usando Campos Aleatorios de Markov

Los Campos Aleatorios de Markov fragmentan una imagen en áreas de textura similar. La segmentación proporciona una base para la detección de líneas, clasificación de la imagen y reconocimiento de patrones. Otra aplicación de la segmentación de imágenes es la restauración de imágenes degradadas bajo alguna forma de ruido.

Se considera que una imagen consiste de varios objetos distintos y que estos objetos completan una imagen objeto. La manera en la que estos objetos interactúan entre sí (ocultando, sombreando, etc.), además de los elementos con textura de la superficie, se combinan para darnos la imagen visual, o la imagen de cómo esos objetos aparecen ante nosotros. Cuando esta imagen visual viaja a través de algún medio de la transmisión antes de que pueda ser observado realmente, se involucra ruido en esta etapa, lo que significa que la imagen final observada incluye alguna cantidad de ruido.

En general se asume que la imagen observada \mathbf{G}' es el resultado de algo de ruido agregado a la imagen visual \mathbf{G} :

$$\mathbf{G}' = (\mathbf{G} * b) + e \quad (4.23)$$

donde b es el punto manchando (o función de punto spread) y e es ruido (para propósitos prácticos, e es normalmente asumido como ruido blanco Gaussiano). Esta expresión describe el proceso avanzado de cómo la imagen visual se observa. Para encontrar la imagen original, el proceso inverso tiene que ser encontrado.

El propósito de segmentar la imagen es obtener la imagen \mathbf{G}_o objeto de la imagen observada dada \mathbf{G}' . Para la restauración de la imagen, la imagen \mathbf{G}' se usa junto con la imagen objeto \mathbf{G}_o para derivar la imagen visual \mathbf{G} .

4.4.2 Otras aplicaciones de los Campos de Markov

Los campos de Markov se utilizan para realizar diversas operaciones sobre imágenes dependiendo de la forma de las funciones de energía:

- Eliminación de ruido
- Filtros de diferentes tipos
- Segmentación de texturas
- Visión estereoscópica (recuperación de profundidad)
- Reconocimiento de objetos
- Integración de niveles visión

4.5 Distribución de Gibbs

La Distribución de Gibbs es una exponencial que expresa a través de los cliques potenciales ciertas propiedades estructurales deseadas. Un Campo Aleatorio de Gibbs describe las propiedades globales de una imagen en términos de un conjunto de pdf's para todas las variables en el campo aleatorio considerado. Los MRF's se expresan en términos de los pdf's locales condicionales.

Un conjunto de variables de aleatorias \mathbf{A} se dice que es un Campo Aleatorio de Gibbs (GRF) en \mathbf{S} con respecto a \mathbf{V} si y sólo si, sus configuraciones obedecen una Distribución de Gibbs.

Una Distribución de Gibbs es una medida de probabilidad P sobre \mathbf{F} que toma la siguiente forma:

$$P(f) = (1/Z) e^{-U(f)/T} \quad (4.24)$$

donde

$$Z = \sum_{f \in \mathbf{F}} e^{-U(f)/T} \quad (4.25)$$

es una constante normalizada llamada la función de partición, T es una constante llamada temperatura que se asumirá que es 1, y $U(f)$ es la función de energía. La energía

$$U(f) = \sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{V}_c(f) \quad (4.26)$$

es una suma de cliques potenciales $\mathbf{V}_c(f)$ sobre todos los posibles cliques \mathbf{C} . El valor de $\mathbf{V}_c(f)$ depende de la configuración local en el clique c . La distribución Gaussiana es un miembro especial de la familia de distribuciones de Gibbs.

De acuerdo a este planteamiento, la solución óptima a un problema de visión corresponde a encontrar la energía mínima o el MRF de mayor probabilidad.

La función de energía de una Distribución de Gibbs se puede expresar en términos de cliques de los diversos ordenes:

$$U(f) = \sum_{\{i\} \in \mathbf{C}_1} \mathbf{v}_1(f_i) + \sum_{\{i, i'\} \in \mathbf{C}_2} \mathbf{v}_2(f_i, f_{i'}) + \sum_{\{i, i', i''\} \in \mathbf{C}_3} \mathbf{v}_3(f_i, f_{i'}, f_{i''}) + \dots \quad (4.27)$$

Lo anterior implica una Distribución de Gibbs homogénea porque \mathbf{V}_1 , \mathbf{V}_2 y \mathbf{V}_3 son independientes de las localizaciones de i , i' e i'' . Para distribuciones Gibbs no-homogéneas, la función clique debe escribirse como $\mathbf{V}_1(i, f_i)$, $\mathbf{V}_2(i, i', f_i, f_{i'})$, y así sucesivamente.

Un caso especial es una vecindad de primer orden, es decir cliques de tamaños dos:

$$U(f) = \sum_{i \in \mathbf{S}} \mathbf{v}_1(f_i) + \sum_{i \in \mathbf{S}} \sum_{i' \in \mathbf{V}} \mathbf{v}_2(f_i, f_{i'}) \quad (4.28)$$

Se dice que un GRF es homogéneo si $\mathbf{V}_c(f)$ es independiente de la posición relativa del clique \mathbf{c} en \mathbf{S} . Es isotrópico si \mathbf{V}_c es independiente de la orientación de \mathbf{c} . Esto es considerablemente simple para especificar una distribución GRF si ésta es homogénea o isotrópica que uno sin tales propiedades. La homogeneidad es supuesta en la mayoría de los modelos de visión MRF para matemáticas y computación. La isotropía es una propiedad de dirección independiente blob-like de regiones.

Para calcular una Distribución de Gibbs, es necesario evaluar la función de partición Z que es la suma de todas las posibles configuraciones en \mathbf{F} . Desde que hay un número combinacional de elementos en \mathbf{F} para un \mathbf{L} discreto, la evaluación es prohibitiva incluso para los problemas de tamaños moderados.

$P(f)$ proporciona la probabilidad de ocurrencia de una configuración particular, o "patrón" f . La configuración más probable es aquella con baja energía. La temperatura T controla la fineza de la distribución. Cuando la temperatura es alta, toda la configuración tiende a distribuirse equitativamente. Cerca de la temperatura cero, la distribución se concentra alrededor de la mínima energía global. Dado T y $U(f)$, podemos generar una clase de "patrones" muestreando la configuración espacial \mathbf{F} de acuerdo a $P(f)$.

Para los problemas de etiquetado discretos, un clique potencial $\mathbf{V}_c(f)$ puede ser especificado por un número de parámetros. Por ejemplo, permitiendo que $f_c = (f_i, f_{i'}, f_{i''})$ sea la configuración local de un clique triple $\mathbf{c} = \{i, i', i''\}$, f_c toma un número finito de estados y por consiguiente $\mathbf{V}_c(f)$ toma un número finito de valores. Para los problemas de etiquetado continuo, f_c puede variar continuamente. En este caso, $\mathbf{V}_c(f)$ es una (posiblemente sitio o área de prueba) función continua de f_c .

Se puede demostrar que un MRF y el Campo de Gibbs son equivalentes. Esto permite que se pueda expresar la probabilidad de unión especificando los cliques potenciales. En la práctica se seleccionan los potenciales de acuerdo al comportamiento deseado. Es decir, con los potenciales se expresa el conocimiento *a priori* del problema.

4.5.1 Equivalencia entre Gibbs y MRF

Considerando la probabilidad condicional

$$P(f_i | f_{\mathbf{s}-(i)}) = \frac{P(f_i, f_{\mathbf{s}-(i)})}{P(f_{\mathbf{s}-(i)})} = \frac{P(f)}{\sum_{f_i \in \mathbf{L}} P(f)} \quad (4.29)$$

donde $f = \{f_1, \dots, f_{i-1}, f_{i+1}, \dots, f_m\}$ es una configuración dada. Si sabemos que

$$P(f) = Z^{-1} * e^{-\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{v}_c(f)} \quad (4.30)$$

la nueva ecuación queda:

$$P(f_i | f_{\mathbf{s}-(i)}) = \frac{e^{-\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{v}_c(f)}}{\sum_{f_i} e^{-\sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{v}_c(f)}} \quad (4.31)$$

La ecuación 4.30 también puede calcular la probabilidad condicional $P(f_i | f_{\mathbf{v}_i}) = P(f_i | f_{\mathbf{s}-(i)})$ de las funciones potenciales.

Dividiendo \mathbf{C} en dos conjuntos A y B con A lleno de cliques que contienen a i y B a cliques que no contienen i . Entonces lo anterior puede escribirse como

$$P(f_i | f_{\mathbf{s}-(i)}) = \frac{\left[e^{-\sum_{c \in A} \mathbf{v}_c(f)} \right] \left[e^{-\sum_{c \in B} \mathbf{v}_c(f)} \right]}{\sum_{f_i} \left\{ \left[e^{-\sum_{c \in A} \mathbf{v}_c(f)} \right] \left[e^{-\sum_{c \in B} \mathbf{v}_c(f)} \right] \right\}} \quad (4.32)$$

Porque $\mathbf{v}_c(f) = \mathbf{v}_c(f)$ para cualquier clique c que no contiene i , $e^{-\sum_{c \in B} \mathbf{v}_c(f)}$ cancela al numerador y denominador. Por consiguiente, esta probabilidad sólo depende de los potenciales de los cliques que contienen i ,

$$P(f_i | f_{\mathbf{s}-(i)}) = \frac{e^{-\sum_{c \in A} \mathbf{v}_c(f)}}{\sum_{f_i} e^{-\sum_{c \in A} \mathbf{v}_c(f)}} \quad (4.33)$$

es decir, que depende de las etiquetas de los vecinos de las i 's. Esto demuestra que un Campo Aleatorio de Gibbs es un Campo Aleatorio de Markov.

El valor del teorema es que proporciona la especificación de la probabilidad de unión. Se puede especificar la probabilidad de unión $P(\mathbf{A} = \mathbf{f})$ por la especificación de la función potencial $\mathbf{v}_c(f)$ y escoge funciones potenciales apropiadas para conducta deseada del sistema. De esta manera, se introduce un conocimiento *a priori* o preferencial en las interacciones entre etiquetas.

El modelo MRF trata de buscar las formas y parámetros de las funciones potenciales para una codificación apropiada. Las formas de éstas funciones determinan la forma de la Distribución de Gibbs y ésta distribución se define completamente cuando se especifica que todos los parámetros se involucran en la función potencial. Para calcular la probabilidad de unión de un MRF la cuál es una distribución de Gibbs, es necesario evaluar la función de partición (4.25) que es la suma sobre un número combinatorio de configuraciones en \mathbf{F} .

4.6 Otras Teorías de Campos Aleatorios

Existen otras teorías similares y que inclusive fueron la base para el desarrollo del MRF. A continuación se presenta un resumen de las más importantes herramientas que también están ligadas a MRF.

4.6.1 Modelo Ising

El Modelo de Ising es una teoría para captar la relación entre el orden y desorden de la materia, es decir, es un modelo bidimensional usado para modelar el comportamiento de imágenes sencillas.

El Modelo consiste en un conjunto de giros magnéticos ordenados (spin) sobre una malla magnética regular. Cada giro puede estar en uno o dos estados que pueden interpretarse como arriba (up) y abajo (down). La energía del sistema es determinada por la suma de interacciones elementales entre un giro y su vecinos en la malla ó látice.

A temperaturas muy bajas el sistema se encuentra en su estado de energía más bajo en el que todos los giros son, por ejemplo, hacia arriba; esto favorece a la alineación coherente y el sistema es forzado a asumir dos orientaciones opuestas pero equivalentes en conjunto. Cuando el sistema está con niveles de energía altos los giros empiezan a moverse aleatoriamente y el resultado de los movimientos es complicado. La transición entre temperaturas o el paso de alineaciones aleatorias a coherentes es muy fina. La meta estadísticas no es predecir todos estos movimientos detallados, si no calcular medias adecuadas de estos movimientos, por ejemplo, cuántos giros en promedio están apuntando hacia arriba, lo que es la energía media, etc..

Los giros tienen sólo dos estados, $+1(\uparrow)$ o $-1(\downarrow)$. La energía se determina por

$$E = -J \sum_{i,j} S_i S_j \quad (4.34)$$

S_i = giro al sitio i de malla cristalina

(i,j) = los vecinos más cercanos en la malla

J = fuerza de interacción, conocida también como constante de acoplamiento

$\uparrow\uparrow, \downarrow\downarrow$ giros alineados $E = -J$

$\uparrow\downarrow, \downarrow\uparrow$ giros no alineados $E = +J$

Si $J > 0$, el estado de energía más baja es cuando todos los giros se alinean en el mismo sentido (ferromagnético puro).

$J < 0$ se presenta en estados de alta energía, cuando los giros vecinos poseen orientaciones opuestas (caso de repulsión).

Por otra parte el Modelo Ising en su configuración antiferromagnética, la energía es más baja cuando los giros vecinos son diferentes. En el estado de energía más bajo una malla cuadrada es por consiguiente similar a un tablero. Sin embargo en una malla triangular, es imposible para todos los vecinos tener giros opuestos.

4.6.2 Distribución de Bayes y MAP

Bayes proporciona una teoría de fundamental importancia en estimación y toma de decisiones. De acuerdo a esta teoría, deben conocerse la distribución *a priori* y la función de probabilidad de los patrones, para obtener el etiquetado de Bayes. La aproximación Máxima a posteriori (Maximum a posteriori - MAP), en la estructura de Bayes, se utiliza en muchos trabajos de visión.

Lo que se construye primero es un Estimador Bayesiano de un campo de etiquetas, utilizando la probabilidad de unión y la probabilidad condicional en términos de las distribuciones *a priori* y *a posteriori*. La representación de la función de energía de la distribución *a priori* se observa en la ecuación 4.24. La Estimación trata de minimizar el riesgo de no obtener una estimación óptima. El riesgo Bayesiano de la estimación f^* se define como:

$$R(f^*) = \int_{f \in \mathcal{F}} C(f^*, f) P(f | d) df \quad (4.35)$$

donde d es la observación, $C(f^*, f)$ es una función de costo y $P(f | d)$ es la distribución *a posteriori*. Según la regla de Bayes, la probabilidad *a posteriori* puede ser calculada utilizando la distribución *a priori*, y la probabilidad condicional en la siguiente fórmula

$$P(f | d) = \frac{P(d | f) P(f)}{P(d)} \quad (4.36)$$

donde $P(f)$ es la probabilidad *a priori* del etiquetado f ; $p(d | f)$ es la condicional p.d.f. de las observaciones d , también llamada la función de probabilidad de f para el arreglo d , y $P(d)$ es la densidad de d que es una constante cuando d se conoce.

La función del Costo, también llamada de Energía $C(f^*, f)$ determina el costo de estimación f cuando en verdad es f^* . La función de costo se representa por dos formas

$$C(f^*, f) = \|f^* - f\|^2 \quad (4.37)$$

donde el $\|a - b\|$ es una distancia entre a y b , y $\delta(0-1)$ la función de costo

$$C(f^*, f) = \begin{cases} 0 & \text{si } \|f^* - f\| \leq \delta \\ 1 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.38)$$

donde $d > 0$ es cualquier constante pequeña.

El riesgo de Bayes que emplea la función de costo cuadrático mide la varianza de la estimación

$$R(f^*) = \int_{f \in \mathcal{F}} \|f^* - f\|^2 P(f | d) df \quad (4.39)$$

Permitiendo que $\frac{\partial R(f^*)}{\partial f^*} = 0$ obtenemos la estimación de varianza mínima

$$f^* = \int_{f \in \mathcal{F}} f P(f | d) df \quad (4.40)$$

Lo anterior es el significado de la probabilidad *a posteriori*.

Para la función de costo δ , el riesgo de Bayes es

$$R(f^*) = \int_{f: \|f^* - f\| > \delta} P(f | d) \, d f = 1 - \int_{f: \|f^* - f\| \leq \delta} P(f | d) \, d f \quad (4.41)$$

Cuando $\delta \rightarrow 0$, lo anterior se aproxima por

$$R(f^*) = 1 - k P(f | d) \quad (4.42)$$

donde k es el volumen del espacio que contiene a todos los puntos f en donde $\|f^* - f\| \leq \delta$. Minimizando lo anterior es equivalente a maximizar la probabilidad *a posteriori*. Por consiguiente, la estimación de riesgo mínima es

$$f^* = \arg \max_{f \in \mathbb{F}} P(f | d) \quad (4.43)$$

que es conocido como la estimación MAP. Porque $P(d)$ en (4.35) es una constante para un d fijo, $P(f | d)$ es proporcional a la distribución de conjunta

$$P(f | d) \propto P(f, d) = p(d | f)P(f) \quad (4.44)$$

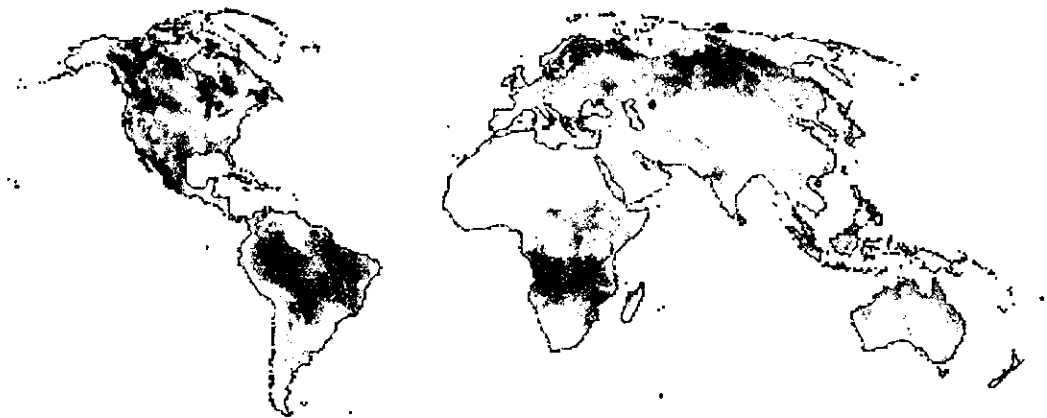
Entonces la estimación MAP es equivalente

$$f^* = \arg \max_{f \in \mathbb{F}} \{p(d | f)P(f)\} \quad (4.45)$$

Obviamente, cuando la distribución anterior, $P(f)$, es lisa, MAP es equivalente a la probabilidad máxima.

CAPÍTULO 5

SEGMENTACIÓN DE ESCENAS URBANAS



5.1 Introducción

A partir de este capítulo, se desarrolla el núcleo central de esta tesis, donde se presenta un nuevo método de segmentación de los elementos que componen las zonas urbanas en imágenes SAR. Este método toma como base los Campos Aleatorios de Markov y el Recocido Simulado. El objetivo del presente estudio es proponer el uso de Vecindades Adaptables dentro del modelo Markoviano, que contribuyan a la conservación de estructuras finas y a mejorar la detección de bordes de las regiones pequeñas. Para mostrar el desarrollo de este método se utilizaron imágenes SAR de los satélites ERS y, adicionalmente, fotoimágenes aéreas. Los resultados obtenidos se compararon con otros métodos clásicos de segmentación para comprobar la eficiencia de nuestra propuesta.

El uso de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) se hace cada vez más popular, debido a su capacidad de obtener imágenes precisas sin importar las adversidades meteorológicas. Desafortunadamente la baja calidad de éstas hace muy difícil la extracción de información y, por consiguiente, no garantiza una buena detección de los elementos.

Las principales desventajas en la segmentación de imágenes SAR utilizando el modelo Markoviano, es que las estructuras pequeñas, por ejemplo aquellas representadas en segmentos lineales de uno a tres píxeles, usualmente desaparecen y los bordes de las regiones no son detectados correctamente. Esto se debe principalmente a que el método de Markov es eficiente con zonas de textura homogénea, como pueden ser las zonas agrícolas. La conservación de estructuras finas aumentaría la eficacia del modelo Markoviano, por ejemplo, aquellos estudios que utilizan los datos de las imágenes SAR para la cartografía, planificación urbana y análisis de sitios agrícolas.

Éstos inconvenientes en el Modelo de Markov, se deben principalmente a dos razones. La primera es que el modelo estadístico de la imagen no es suficientemente preciso; ya que causa confusión en las fronteras de las regiones, así como también en estructuras finas que se encuentren muy cerca una de la otra. La segunda razón es que la propiedad Markoviana es comúnmente simplificada mediante una configuración de píxeles adyacentes, es decir, las combinaciones que forman los cliques, cuya forma se fija y predefine para una imagen completa. Para tratar de solucionar este problema, o al menos reducirlo, se plantea una modificación al modelo Markoviano mediante el uso de Vecindades Adaptables, el cual se ha utilizado en la extracción de líneas costeras, límites polares y zonas agrícolas, pero no se ha trabajado en la detección de elementos que componen una escena urbana.

La detección de elementos que componen una escena urbana es crucial cuando se busca una descripción en estas zonas, sobre todo cuando se desea detectar pequeños elementos que forman parte de ella. Este es un problema sobre todo cuando se trabaja con imágenes SAR, dado que la resolución de ellas es aproximadamente de 12.5 m por píxel. Considerando por ejemplo, el tamaño de una calle de 2 carriles es aproximadamente de 6m, en una imagen SAR esta no sería representada ni siquiera por un píxel, por lo tanto en este tipo de imágenes solo se apreciarían las estructuras más grandes, en el caso de toda la zona de casas y edificios es muy difícil detectar las cuadras ya que aparecen como una sola estructura.

En la siguiente sección presentamos una pequeña remembranza de las bases teóricas utilizadas y finalmente se presenta la descripción detallada del método Markoviano utilizando Vecindades Adaptables.

5.2 Recocido Simulado

El Recocido Simulado (Simulated Annealing) presentado entre 1982 y 1985 por Cerny y Kirkpatrick *et. al*, es un poderoso algoritmo estocástico para una optimización combinatorial. Este método simula un procedimiento físico aplicado en algunos sólidos como metales y cerámicas, el cual consiste en calentarlos a una temperatura muy elevada y después dejarlos enfriar lentamente, para darles el temple que necesitan, es decir, que obtengan una configuración de baja energía. Si el enfriamiento se efectúa demasiado rápido, el sólido puede llegar a estados meta-estables en lugar de llegar al estado de equilibrio, en el cual las partículas forman retículas perfectas y el sistema está en su más bajo nivel de energía, mientras en los meta-estables existen defectos en forma de estructuras de alta energía.

Para cada temperatura la simulación puede necesitar mucho tiempo para que el sistema pueda alcanzar un estado de equilibrio, esto es conocido como termalización. La secuencia de temperatura y el número de iteraciones utilizadas para termalizar el sistema a cada temperatura comprende una parte esencial del Recocido.

Este método es aplicado a una amplia gama de problemas de distintas áreas, ya que se enfoca en los métodos de búsqueda local para resolver el problema de mínimos locales, asegurándonos (respetando sus fundamentos) la convergencia hacia un óptimo global del problema.

El fundamento del Recocido Simulado es el algoritmo de Metrópolis, en el cual un sistema es inicializado con una configuración particular; a partir de ella se construye un nuevo esquema utilizando un desplazamiento aleatorio. Si la energía de este nuevo estado es más baja que el estado anterior, el cambio es aceptado incondicionalmente y el sistema se actualiza. Si la energía es mayor, la nueva configuración es aceptada probabilísticamente. Este procedimiento permite al sistema moverse de forma consistente hacia los estados de mas baja energía, incluso "saltar" fuera del mínimo local debido a la aceptación probabilística de algunos movimientos ascendentes. Si la temperatura es decrementada logarítmicamente, el Recocido Simulado garantiza una solución óptima.

En trabajos de visión con MRF, el Recocido Simulado emplea un esquema de temperatura variable para minimizar la función de energía *a posteriori* $U(Y | X)$, donde X representa la imagen original e Y representa la imagen segmentada. La optimización consiste en encontrar un elemento $\Omega_0 = \omega \in \Omega$, donde ω es de energía mínima.

5.2.1 Planteamiento para minimizar la función de energía.

1. Sea U^* la energía máxima en todas las configuraciones y U_* la energía mínima, la diferencia entre las dos energías es $\Delta U = U^* - U_*$.
2. Al emplear un muestreador de Gibbs con una temperatura T_n , que varia después de cada barrido, la variación de la temperatura cumple:

$$T_n \rightarrow 0 \text{ cuando } n \rightarrow \infty$$

$$T_n \geq \frac{N_s \Delta U}{\log n} \text{ para } n \geq 2, \text{ donde } N_s \text{ es el número de sitios en la imagen}$$

3. Para toda configuración inicial Γ de la imagen, y para toda configuración de una iteración cualquiera ω , se tiene:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(Y^{(n)} = \omega | Y^{(0)} = \Gamma) = P(\omega)$$

donde $P(\omega)$ corresponde a la medida de probabilidad de Gibbs [Ec. 4.36]. Así existe una convergencia hacia una realización dada con una probabilidad que sigue la distribución de Gibbs global.

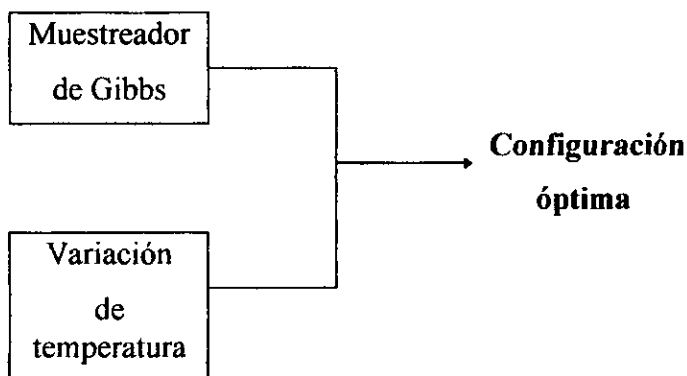


Figura 5.1 Esquema de configuración óptima.

5.2.2 Algoritmo de Recocido Simulado

1. Inicialización

- Determinación aleatoria de la solución $Y^{(0)}$ (la clase de cada pixel debe determinarse mediante un generador de números aleatorios, con distribución uniforme, en el rango de número de clases).
- Escoger una temperatura inicial T_0 suficientemente elevada

2. Iniciar una etiquetación f

- Para todas las iteraciones: desde $N_{it} = 0$ hasta $N_{it} = n$
 - Barrer secuencialmente la imagen y en cada etapa (n):
 - escoger un sitio $r = i^n$, su valor es Y_r^n y su configuración de vecindad es \mathbf{V}_r^n .
 - efectuar el sorteo de una variable aleatoria (Clase "elección") con distribución uniforme: $\xi \in \Omega$.

3. Criterio de Metrópolis

- Calcular la variación de la energía local asociada al sitio i :

$$\Delta U = U(\xi | \mathbf{V}_r^n, X) - U(Y_r^n | \mathbf{V}_r^n, X)$$

- Dos eventualidades pueden surgir:

$$\text{si } \Delta U \leq 0, \quad Y_r^{n+1} = \xi$$

$$\text{si } \Delta U > 0, \quad Y_r^{n+1} = \xi \quad \text{con probabilidad } \Pi(Y_r^{n+1} \rightarrow \xi) = \exp \cdot \frac{\Delta U}{T_n}$$

4. Continuar con el punto 2 hasta que el equilibrio sea alcanzado.

5. Serie de temperaturas decrecientes hacia 0, por tanto: $\lim_{n \rightarrow \infty} T_n = 0$

5.2.3 Energía y ley de temperatura

La aplicación del Recocido Simulado en la optimización de la función de energía *a posteriori* $U(Y | X)$ asegura la convergencia hacia el mínimo global (punto C, figura 5.2) y evita la convergencia a los mínimos locales (punto B). El cambio de la clase del pixel analizado a la clase propuesta es aceptado incondicionalmente solo cuando $\Delta U < 0$ (punto A).

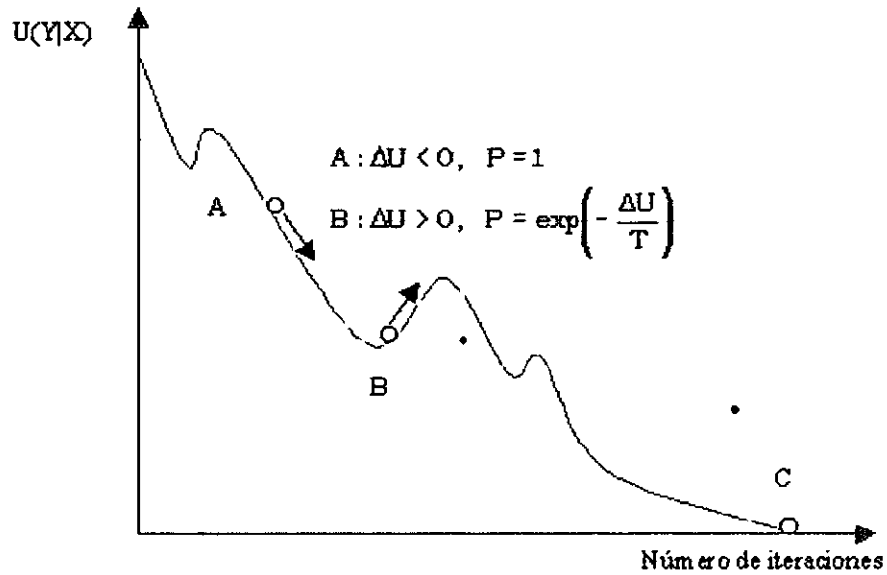


Figura 5.2 Gráfica de la función de energía

Dos esquemas surgen, dependiendo de la etapa donde se aplica el decremento en temperatura, ellos son:

Recocido Homogéneo (Homogeneous Annealing)	Recocido No Homogéneo (Inhomogeneous Annealing)
1. Inicialización aleatoria	1. Inicialización aleatoria
2. Introducir una perturbación mínima	2. Introducir una perturbación mínima
3. Criterio de Metrópolis	3. Criterio de Metrópolis
4. Volver al punto 2 hasta alcanzar un equilibrio	4. Volver al punto 2 hasta barrer toda la imagen
5. Decrementar Temperatura	5. Decrementar Temperatura

Es conocido que el Recocido Simulado converge con probabilidad unitaria hacia el óptimo global si la ley de temperatura T_k decrece menos rápidamente que $\frac{C}{\ln(k)}$, para una cierta constante C independiente de k . Debido a la lentitud en convergencia del esquema $\frac{C}{\ln(k)}$, en la práctica, la ley de temperatura se aproxima por una ley exponencial. A causa de esta aproximación, la convergencia hacia el óptimo global no esta garantizada.

La temperatura inicial T_0 debe ser escogida tal que todas las transiciones pueden ser aceptadas con una probabilidad diferente a cero. Es muy difícil determinar tal valor ya que se encuentra ligado a los valores máximos y mínimos de la función de energía. En la práctica se escoge un valor T_0 relativamente bajo para asegurar una convergencia rápida. Así por ejemplo, un valor de 2 resulta generalmente adecuado.

5.3 Modelo de Potts

La finalidad del modelo de Potts es asociar a cada pixel una etiqueta de un conjunto finito. Denotemos por X la imagen de datos originales y por Y la imagen segmentada, el proceso de segmentación consiste de maximizar la probabilidad condicional $P(Y/X)$ que, de la regla de Bayes (ecuación 4.36):

$$P(Y | X) \approx P(X | Y)P(Y) \quad (5.1)$$

$P(Y)$ esta referido como el modelo *a priori* mientras que $P(X/Y)$ esta referida como el termino de manejo de datos. En estudios prácticos, el modelado probabilístico se basa en el análisis de energía de los cliques. Esto produce funciones de energía relacionadas a la llamada función potencial de la ecuación 4.30. El primer término probabilístico (el modelo *a priori*) esta a menudo compuesto de un modelo de potts. La función de energía asociada con este modelo es la siguiente:

$$U(Y) = - \sum_{c=\{i,j\}} \beta \delta_{y_i y_j} \quad (5.2)$$

Los cliques tienen dos elementos, definiendo interacciones estrechamente pares. El coeficiente β define la propiedad de homogeneidad de la solución, esto es, el mayor de estos términos, el mas probable de los dos pixeles adyacentes que pueden tener la misma etiqueta.

Los términos de manejo de datos están definidos por las funciones de costeo dependiendo de la etiqueta l y denotada por f^l . Los parámetros inducidos son directamente extraídos de los datos. El potencial asociado, aplicado a los cliques de primer orden se define como:

$$U(X | Y) = \sum_{c=\{i\}} \sum_l f^l(x^i) \delta_{y_i} = 1 \quad (5.3)$$

donde x_i y y_i son los datos y los valores de las etiquetas respectivamente en el sitio i .

El problema de segmentación consiste en minimizar la energía global:

$$U(X | Y) + U(Y) \quad (5.4)$$

En la estructura del MAP, el proceso de minimización esta desarrollado por un técnica estocástica como el Recocido Simulado (convergiendo próximamente con un mínimo global). Remarcando la minimización puede incluso ser desarrollada por técnicas determinísticas como lo Modos de Iteración Condicional (rápido, pero converge solo aproximándose al mínimo local).

5.4 Método de Segmentación de Vecindades Adaptables.

En una estructura probabilística, nuestra aproximación consiste en definir un modelo MRF a través de cliques potenciales y seleccionar la etiqueta mas probable mediante un estimador MAP.

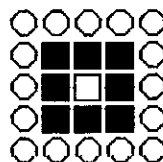
Esta aproximación se apoya en la teoría del modelo de Potts, el cual nos indica que un pixel tiene la misma probabilidad de pertenecer a la misma clase que la mayoría de los pixeles vecinos, incluso si estos están distantes.

A partir de esta teoría, proponemos dos configuraciones tomando como base una configuración clásica de conectividad ocho y adicionalmente configuraciones de pixeles en pequeñas áreas de conexión.

La Primer Propuesta esta conformada por la vecindad de conectividad ocho, más cuatro vecindades que tienen una configuración lineal de un número “Ψ” de pixeles de largo con las siguientes formas: /, \, | y —, donde “Ψ” debe ser siempre impar, en nuestro caso practico utilizamos dos valores distintos, Ψ=3 y Ψ=5 (ejemplificado en las figuras). Las funciones de energía correspondientes a cada configuración de cliques están dadas a continuación:

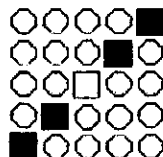
Configuración 1 :

$$U_1(Y) = - \sum_{c_1=\{i,j\}} \beta_1 d_{i,j}$$



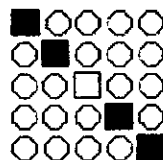
Configuración 2 :

$$U_2(Y) = - \sum_{c_2=\{i,j\}} \beta_1 d_{i=j}$$



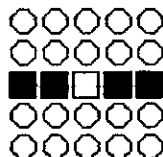
Configuración 3 :

$$U_3(Y) = - \sum_{c_3=\{i,j\}} \beta_1 d_{i=-j}$$

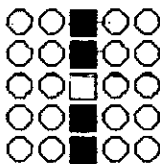


Configuración 4 :

$$U_4(Y) = - \sum_{c_4=\{i,j\}} \beta_1 d_{0,j}$$



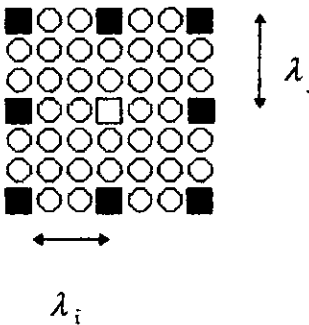
Configuración 5 :

$$U_5(Y) = - \sum_{c_5=\{i,j\}} \beta_1 d_{i0}$$


donde $d_{i,j}$ representan los pixeles en el sitio i, j y el coeficiente β_1 es el factor de homogeneidad y C_N representa la configuración de cada una de las vecindades. Las figuras anteriores muestran una región de pixeles, donde el cuadro gris representa el pixel de prueba, los cuadros negros representan la vecindad acorde a cada función de energía y los círculos corresponden a los pixeles no involucrados en la vecindad.

La segunda propuesta esta conformada por las cinco configuraciones anteriores, con un valor de $\Psi=3$, y adicionalmente ocho vecinos colocados a cierta distancia, cuya configuración de energía se describe a continuación:

Configuración 6:

$$U_6(Y) = - \sum_{c_6=\{i,j\}} \beta_2 d_{\lambda_i \lambda_j}$$


donde λ representa la distancia entre el pixel de prueba y el pixel distante.

El mínimo global de estas configuraciones de energía se obtiene a través de un procedimiento de Recocido Simulado. De acuerdo a la configuración de refresco, la temperatura final se obtiene mediante:

$$T_n = \tau T_{n-1} \tag{5.5}$$

donde T_n representa la temperatura del estado actual, τ representa el factor de decremento y T_{n-1} representa la temperatura del estado anterior.

5.4.1 Segmentación de la imagen.

a) El primer paso de la segmentación es identificar las clases típicas que componen una escena (agua, sombras, vegetación, etc.), a partir de esto, el siguiente paso es definir los parámetros estadísticos necesarios en los métodos de segmentación, tales como la media y la desviación estándar.

b) Asignación de la clase a un pixel. Aproximar las probabilidades conjuntas del numerador de la regla de Bayes (ecuación 4.36) mediante las reglas mostradas en la figura 5.2. Ellas indican la probabilidad condicional de que un pixel dado pertenezca a la clase W_i .

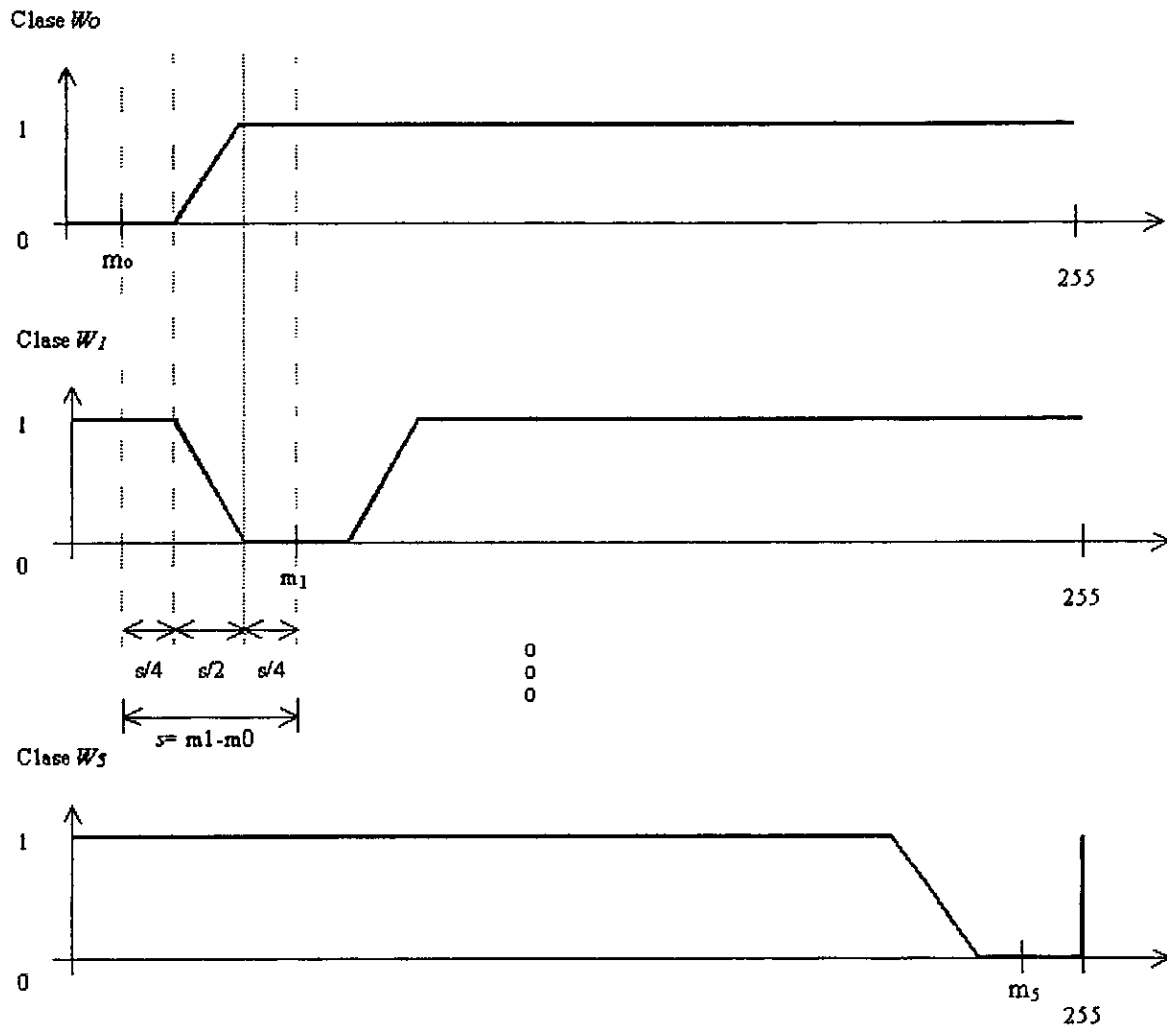


Figura 5.3 Términos de energía $U(X | W_i)$

Tomemos como ejemplo las clases W_0 y W_1 para explicar la forma de definir los rangos de cada clase. Primeramente se calcula la distancia "s" entre el valor de las medias de las clases W_0 y W_1 , este valor "s" se divide en cuatro partes iguales. Consideremos el valor de 1 como "no pertenece" y el valor 0 como "pertenece", a partir de esta definición, podemos calcular el umbral de pertenencia de una clase. Si observamos la gráfica de la clase W_0 , podemos identificar la ubicación del valor de m_0 y m_1 y las 4 divisiones de "s", para todos los pixeles que caigan dentro del rango de $(0, m_0 + \frac{s}{4}]$ pertenecen exactamente a la clase W_0 . El rango de $(m_0 + \frac{s}{4}, m_1 - \frac{s}{4}]$ se considera como el umbral de transición de una clase a otra, aquí el pixel puede pertenecer con la misma probabilidad a la clase W_0 ó a la clase W_1 , en este caso se opta por que el pixel pertenezca a la clase con el menor valor, quedando entonces la frontera entre una clase y otra en el punto $m_0 + \frac{3s}{4}$ equivalente a $m_1 - \frac{s}{4}$, a partir de este punto y hasta $m_1 + \frac{s}{4}$, los pixeles pertenecen exactamente a la clase W_1 , para la subsecuentes clases se sigue el mismo procedimiento.

e) Clasificación de la imagen X.

- Emplear la ecuación 5.1 para calcular la energía *a posteriori*:

$$U(W_i | X) \approx U(X | W_i)U(W_i) \quad (5.6)$$

- Analizar pixel por pixel la imagen X, clasificando al aplicar el algoritmo de Recocido Simulado:

Para explicar mejor la simulación del algoritmo de Recocido Simulado, nos apoyaremos en la figura 5.4. Denotemos a Y como la imagen segmentada (por ejemplo en 5 clases). Inicialmente se toman como datos a X, una imagen aleatoria $Y^{(0)}$, una temperatura inicial elevada y un número n de iteraciones; cabe señalar que para efectos prácticos, $Y^{(0)}$ toma los valores de las clases en que la imagen se va a segmentar, es decir, si la imagen se va a etiquetar en cinco clases, $Y^{(0)}$ tomara únicamente cinco valores los cuales estarán distribuidos de forma aleatoria en toda la imagen, la justificación de esto es disminuir considerablemente el tiempo que necesitara el sistema para converger hacia la solución optima.

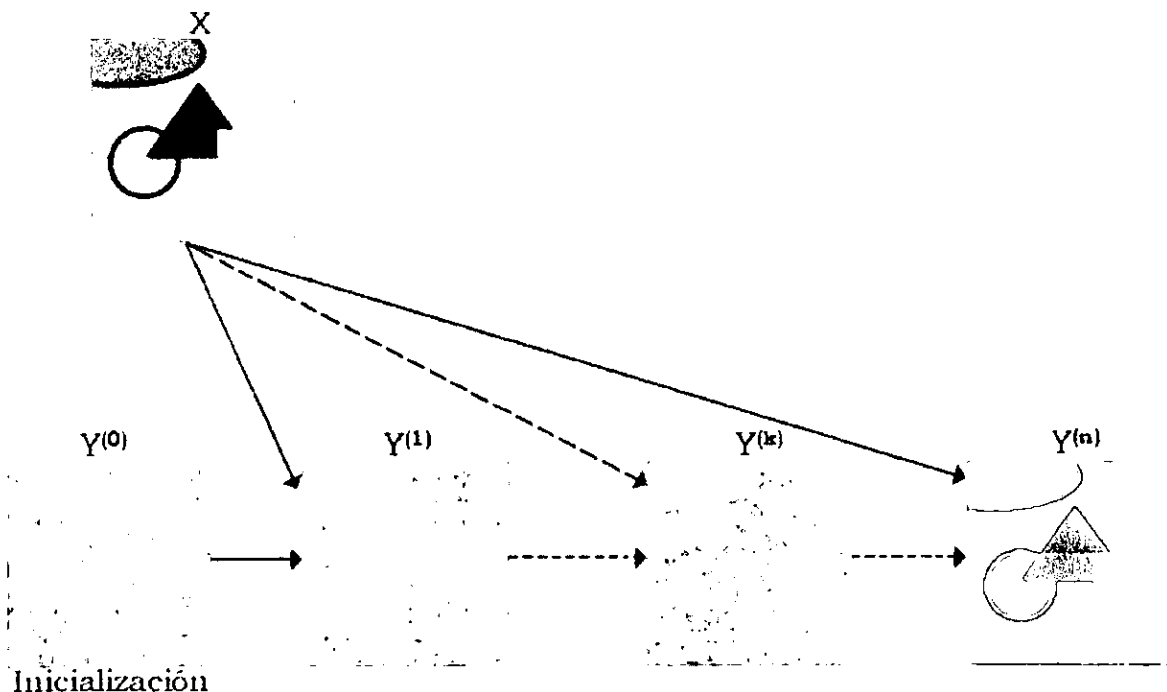


Figura 5.4 Simulación del Recocido Simulado en la segmentación de una imagen.

Para que el sistema llegue a la configuración optima son necesarias "n" iteraciones, en cada iteración se etiquetan los pixeles y se disminuye la temperatura gradualmente. $Y^{(k)}$ e $Y^{(n)}$ nos muestra como se va dando el procedimiento de segmentación, la primera muestra la imagen después de "k" iteraciones y en la segunda se observa la imagen cuando ya alcanzo su configuración optima después de "n" iteraciones que es cuando la simulación llega a su fin.

A continuación se describirá detalladamente la simulación:

1.- Inicialización

- determinación aleatoria de la imagen inicial $Y^{(0)}$, en esta imagen el valor de cada pixel se determina a través de un generador de números aleatorios con distribución uniforme, dentro del rango de número de clases.
- escoger una temperatura inicial $T^{(0)}$ suficientemente elevada (por ejemplo, $T^{(0)}=2$).

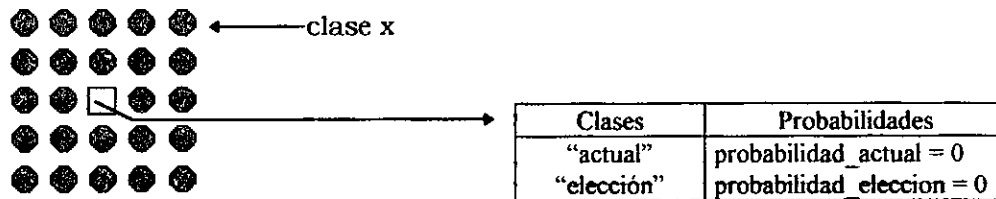
2.- Desde $N_{iter}=1$, hasta $N_{iter}=n$

2.1 Barrer secuencialmente la imagen

En cada etapa (n),

- escoger un sitio: $r=s^{(n)}$, su valor es $Y_r^{(n)}$ y su configuración de vecindad es $V_r^{(n)}$.
- efectuar el sorteo de una variable aleatoria (clase "elección") con distribución uniforme: $\xi \in \Omega$, donde Ω representa el vector de clases.

2.2 Criterio de Metrópolis y Modelo de Vecindades Adaptables.



Para el caso de la Primer Propuesta de Vecindades Adaptables:

Análisis en 8-conexidad y Vecindades Adaptables:

- si "actual" = "x": $prob_actual_m = prob_actual_m - \beta_1[actual]$
 si "elección" = "x": $prob_elección_m = prob_elección_m - \beta_1[elección]$

donde " $m=0,1,2,3,4$ ", representando

- 0 el caso de conectividad 8
- 1 el caso de la vecindad adaptable de forma /
- 2 el caso de la vecindad adaptable de forma \
- 3 el caso de la vecindad adaptable de forma —
- 4 el caso de la vecindad adaptable de forma |

Para el caso de la segunda propuesta, tenemos adicionalmente $m=5$, que representa el caso de 8-conexidad distante, en este caso

- si "actual" = "x": $prob_actual_m = prob_actual_m - \beta_2[actual]$
 si "elección" = "x": $prob_elección_m = prob_elección_m - \beta_2[elección]$

- 2.3 - Calcular la variación de la energía local asociada al sitio r:

$$\text{probabilidad_actual_m} = \text{probabilidad_actual_m} + \text{potencial}[\text{actual}][i][j]$$

$$\text{probabilidad_elección_m} = \text{probabilidad_elección_m} + \text{potencial}[\text{elección}][i][j]$$

donde $\text{potencial}[i][j]$ representa la energía condicional $U(X|Y)$ e $[i][j]$ son las coordenadas del pixel analizado.

- Obtener el valor mínimo de todos los valores obtenidos de $\text{probabilidad_actual_m}$ y asignarlo a $\text{probabilidad_actual}$.

- Obtener el valor mínimo de todos los valores obtenidos de $\text{probabilidad_elección_m}$ y asignarlo a $\text{probabilidad_elección}$.

Si $\text{probabilidad_elección} \leq \text{probabilidad_actual}$: $Y[i][j] = \text{"elección"}$

En caso contrario:

$$p = \exp - [(\text{probabilidad_elección} - \text{probabilidad_actual}) / T^{(n)}]$$

sorteo de una variable aleatoria x_2 , uniformemente distribuida en el rango $[0, 1]$

si $x_2 < p$, entonces $Y[i][j] = \text{"elección"}$

3. Regresar al punto 2.1 hasta terminar un barrido

4. Decrementar la temperatura a través de la ecuación 5.7:

$$T(n) = 0.95 * T(n-1)$$

5. Regresar al punto 2 hasta terminar el número de iteraciones fijadas

5.5 Imágenes de Prueba y Áreas de Estudio.

Para probar el método de Vecindades Adaptables, se utilizaron dos imágenes PRI⁴ de los satélites ERS de la zona del Valle de México, una del 28 de Diciembre de 1995 y la otra del 19 de Septiembre de 1997; adicionalmente se utilizó una fotografía aérea de la zona de la Ciudad Deportiva de la Ciudad de México.

La altura orbital del satélite le permite detectar grandes espacios proporcionando una visión amplia de los hechos geográficos. Una fotografía aérea, nos muestra una área menor de la superficie que nos muestra una imagen de satélite. Es importante notar que esta basta superficie es detectada casi instantáneamente y por el mismo sensor. Sobre imágenes de satélite resulta mas fácil la detección de algunas fallas, fracturas o contactos litológicos, lo que puede guiar en la localización de algunos recursos minerales. Gracias a las características orbitales del satélite podemos obtener imágenes repetitivas de la mayor parte de la tierra, incluso de áreas inaccesibles por otros medios, como es el caso de las zonas polares o desérticas.

⁴ Apéndice

5.5.1 Imágenes de satélite

La figura 5.5 muestra la imagen SAR adquirida por los satélites ERS, abarca un área aproximada de 9489 Km², dentro del recuadro azul se muestra enmarcada la zona de la Ciudad de México y el área Metropolitana.

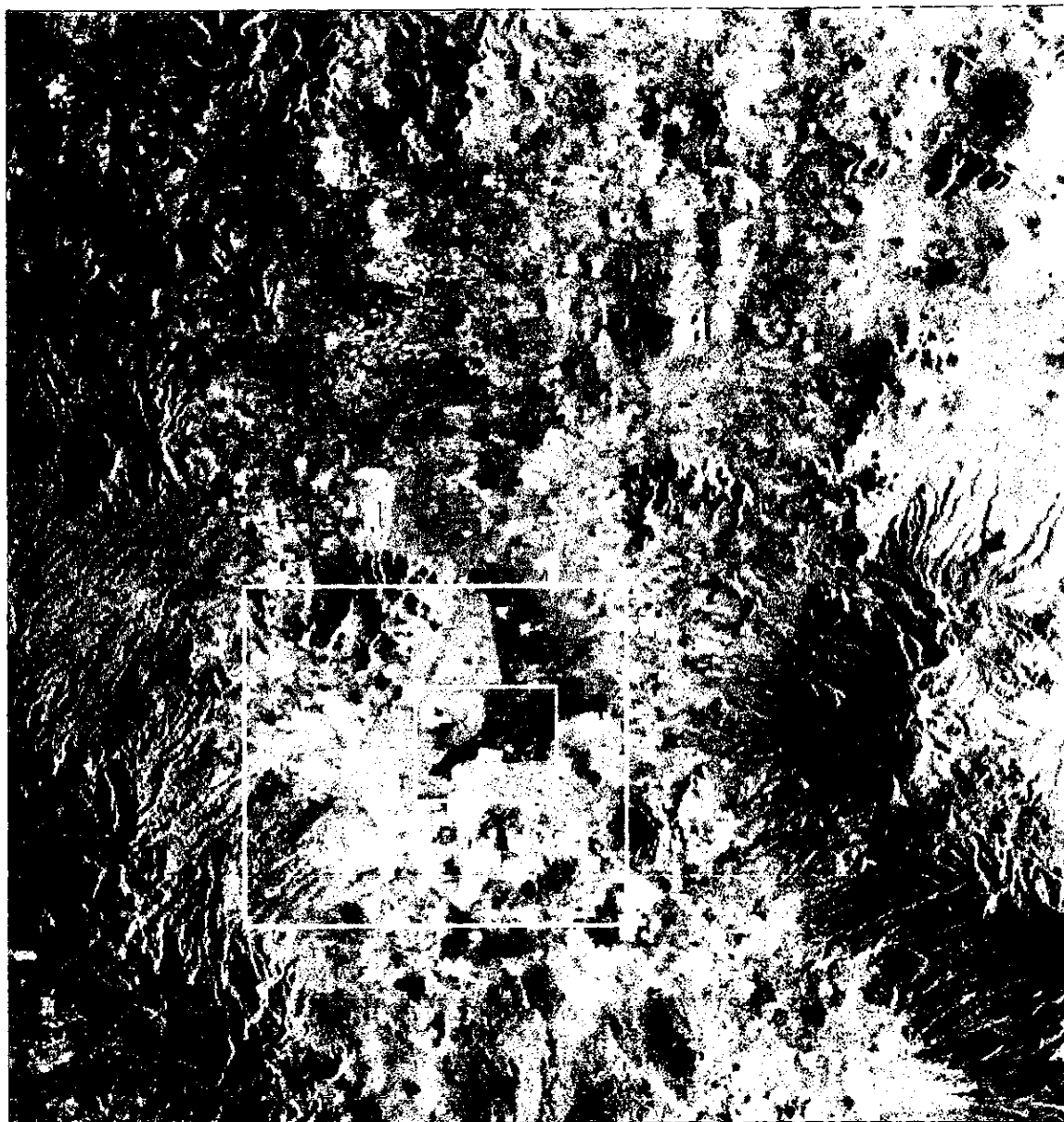
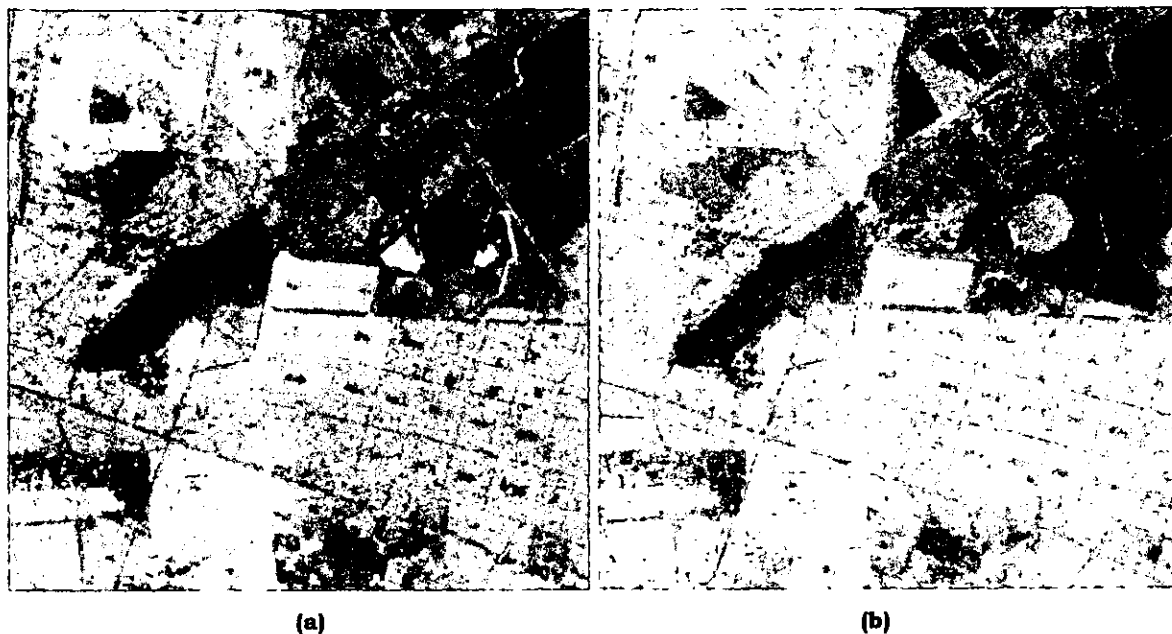


Figura 5.5 Imagen SAR. ERS-1. Valle de México. 1995

El recuadro verde muestra nuestra sección de estudio, tiene dimensiones de 1024 x 1024 pixeles, abarca el Aeropuerto Internacional "Benito Juárez", la Ciudad Deportiva, el bosque de Aragón, Ciudad Nezahualcóyotl, el lago Nabor Carrillo y parte del Valle de Chalco. En la figura 5.6 se observan con mas detalle los elementos de esta escena. La figura 5.7 muestra un mapa cartográfico que sirvió para interpretar los elementos contenidos en la escena.



*Figura 5.6 Detalle de la escena del Oriente de la Ciudad de México.
 (a) 28 de Diciembre de 1995; (b) 19 de Septiembre de 1997.*

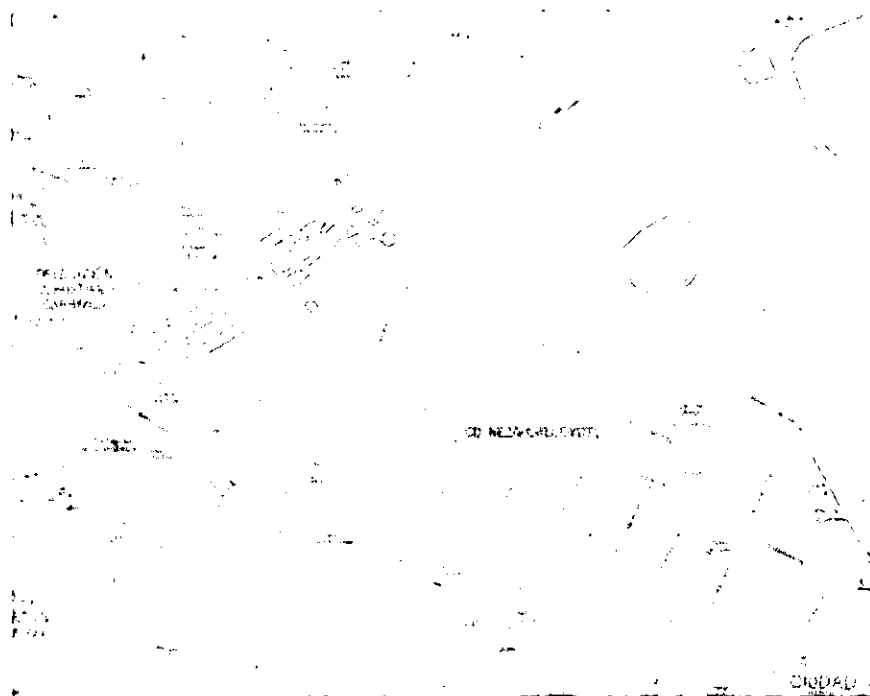


Figura 5.7 Mapa Cartográfico del Oriente de la Ciudad de México

Dentro de esta escena se detectaron cinco elementos predominantes (definidos por sus niveles de gris), estos son presentados en la siguiente tabla:

Imágenes de Satélite. Diciembre de 1995 y Septiembre de 1997	
1.	Zonas acuosas
2.	Grandes estructuras hechas por el hombre (pista del aeropuerto)
3.	Zonas de vegetación abundante y calles
4.	Zonas habitacionales con estructuras no homogéneas
5.	Zonas habitacionales

Estas zonas son mostradas en la figura 5.8 y cada una de ellas representa una clase para la segmentación de la imagen.



Figura 5.8 Principales zonas de estudio.

Para cada una de estas áreas, se utilizó una región de entrenamiento; para las zonas 1, 3, 4 y 5 se utilizaron ventanas de 70 x 70 píxeles; para la zona 2, que es un caso especial, se utilizó la franja que ocupa la pista del aeropuerto que tiene un tamaño lineal de aproximadamente 3 píxeles de ancho. Las cinco ventanas de entrenamiento se muestran en la figura 5.9.

La utilidad de las ventanas de entrenamiento es que representan las principales características de cada una de las zonas de estudio, si esto lo proyectamos a la Teoría de Probabilidad, nos representa la muestra de una población; por tanto, a partir de esta podemos estimar los principales parámetros estadísticos de una población, tales como la media y la desviación estándar, los cuales, son necesarios en el procedimiento de segmentación.



Figura 5.5 Regiones de entrenamiento.

La figura 5.9 muestra las áreas de entrenamiento que se usaron para calcular las estadísticas de la imagen de prueba. Los resultados obtenidos de este análisis son los siguientes:

Imagen de Diciembre de 1995			Imagen de Septiembre de 1997		
Región	Media (μ)	Desviación Estándar (σ)	Región	Media (μ)	Desviación Estándar (σ)
1	16.7	6.61	1	16.75	6.38
2	25.7	9.1	2	28.34	9.02
3	48.1	15.4	3	55.1	21.06
4	95.3	45.3	4	122.67	47.2
5	146.4	67.4	5	197.12	53.14

5.5.2 Fotoimágenes Aéreas.

La figura 5.10(a) muestra una fotoimagen aérea, tiene una resolución aproximada de 30 cm por pixel. Nos muestra la zona de la Ciudad Deportiva, el Palacio de los Deportes, el Autódromo "Hermanos Rodríguez" y las estaciones "Ciudad Deportiva" y "Puebla" de la línea nueve del Metro. En la figura 5.10(b) se muestra una sección de un mapa cartográfico que nos sirvió como referencia para ubicar los elementos de la imagen.



(a)



(b)

Figura 5.10 Zona de la Ciudad Deportiva "Magdalena Mixhuca". Ciudad de México.
(a)Fotoimagen; (b) Mapa Cartográfico.

Dentro del recuadro verde se muestran el área seleccionada para realizar el estudio. Nos muestra un segmento de la Ciudad Deportiva y la estación del Metro "Puebla", tiene dimensiones de 1024 x 1024 píxeles y se muestran a detalle en las figuras 5.7 y 5.8.

Para esta imagen se seleccionaron cinco elementos característicos para su estudio, estos son presentados en la siguiente tabla, y mostrados en la figura 5.11.

Imagen de la Ciudad Deportiva	
1.	Sombras
2.	Zona de árboles
3.	Zonas de avenidas o calles
4.	Zonas de tierra
5.	Techos de las casas



Figura 5.11 Principales zonas de estudio. Sección de la Ciudad Deportiva.

Para cada una de las regiones se seleccionaron las siguientes ventanas de entrenamiento:

Imagen de la Ciudad Deportiva. Elementos característicos	Dimensiones de las ventanas de entrenamiento (en pixeles)
1. Sombras	25 x 25
2. Zona de árboles	60 x 60
3. Zonas de avenidas y calles	40 x 30
4. Zonas de tierra	67 x 60
5. Techos de las casas	90 x 50



Figura 5.12 Detalle de la zonas elegidas de la fotoimagen de la Ciudad de México.
Sección de la Ciudad Deportiva.

Los parámetros estadísticos obtenidos de las anteriores ventanas de entrenamiento son los siguientes:

Imagen de la Ciudad Deportiva		
Región	Media (μ)	Desviación Estándar (σ)
1	60.12	5.18
2	65.1	10.7
3	76.51	9.82
4	175	18
5	219.3	16.5

5.6 Resultados

A fin de obtener más conocimiento del éxito o fracaso del método propuesto, se compararon los resultados obtenidos por las vecindades Adaptables propuestas, con otros métodos clásicos de segmentación como: Bayes, Potts, K-means y Mahalanobis. Todas las pruebas fueron realizadas en una máquina con procesador Intel Pentium MMX a 200 MHz., utilizando como sistemas operativos Linux v.5.1 y Windows 98; como lenguajes de programación se utilizaron "Ansi C" y Matlab.

En todos los métodos utilizados se aplicaron los datos estadísticos obtenidos en las ventanas de entrenamiento descritas en el apartado 5.5, esto nos permite establecer un buen parámetro de comparación entre los mismos.

Las imágenes resultantes se presentan en colores falsos, a fin de identificar con mayor facilidad cada una de las clases segmentadas. A continuación se presenta una relación de los colores utilizados en las cinco regiones de estudio en cada imagen:

Imágenes de Satélite.	
Diciembre de 1995 y Septiembre de 1997	
Región de Estudio	Color
1. Zonas acuosas.	Azul
2. Pista del aeropuerto.	Negro
3. Zonas de vegetación y calles.	Verde
4. Zonas habitacionales con estructuras no homogéneas.	Rojo
5. Zonas habitacionales.	Blanco

Fotoimagen aérea	
Región de Estudio	Color
1. Sombras	Negro
2. Zona de árboles	Verde
3. Avenidas y calles	Gris
4. Zona de tierra	Café
5. Techos de las casas	Blanco

Para el caso de los métodos de Potts y vecindades Adaptables, en los cuales se utilizó el Recocido Simulado, todas las pruebas se efectuaron utilizando los siguientes valores de inicialización:

Método de Potts y Vecindades Adaptables (Primer Propuesta)	
Temperatura Inicial ($T^{(0)}$)	2.0
Valor de β_1	0.3
Número de iteraciones	250

Vecindades Adaptables (Segunda Propuesta)	
Temperatura Inicial ($T^{(0)}$)	2.0
Valor de β_1	0.3
Valor de β_2	0.1
Número de iteraciones	250

A continuación se mostrarán las imágenes segmentadas, obtenidas por los programas de cómputo realizados para cada uno de los métodos. Inicialmente se mostraran las imágenes completas con dimensiones de 1024 X 1024 pixeles y posteriormente se mostraran regiones mas pequeñas a fin de detallar los resultados.

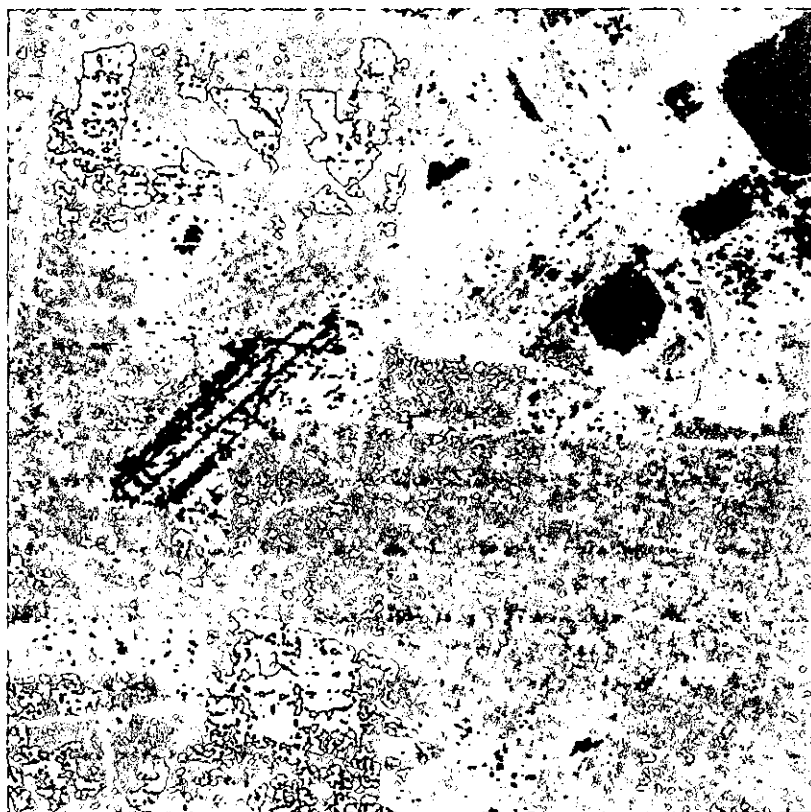


Figura 5.13 Imagen segmentada utilizando método de vecindades Adaptables. Primer Propuesta. Configuración lineal de la vecindad para $\Psi=3$. (colores falsos, Imagen de satélite, Diciembre 1995)

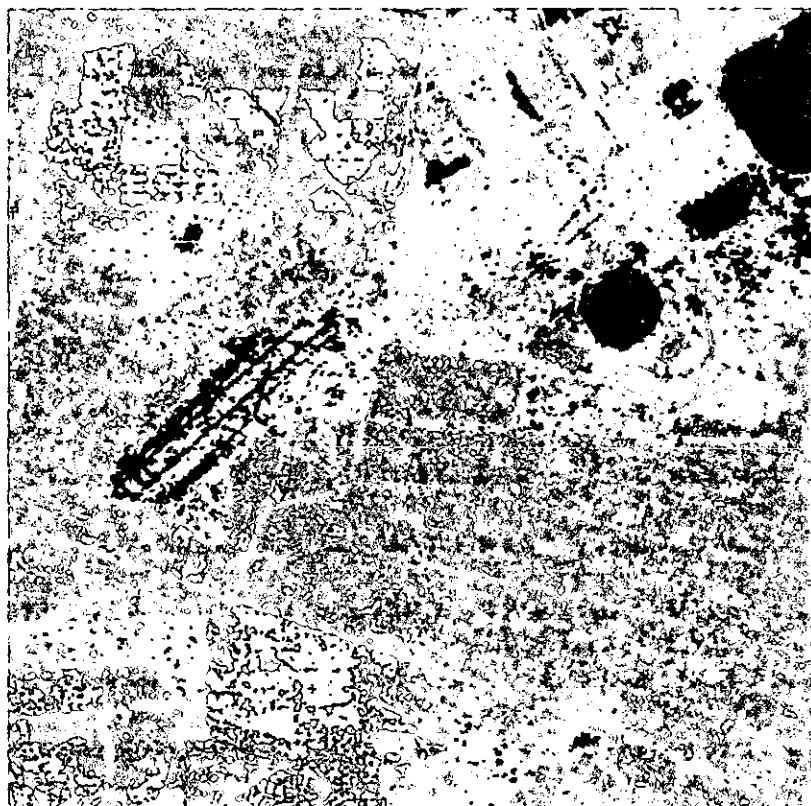


Figura 5.14 Imagen segmentada utilizando método de vecindades Adaptables. Primer Propuesta. Configuración lineal de la vecindad para $\Psi=5$. (colores falsos, Imagen de satélite, Diciembre 1995)

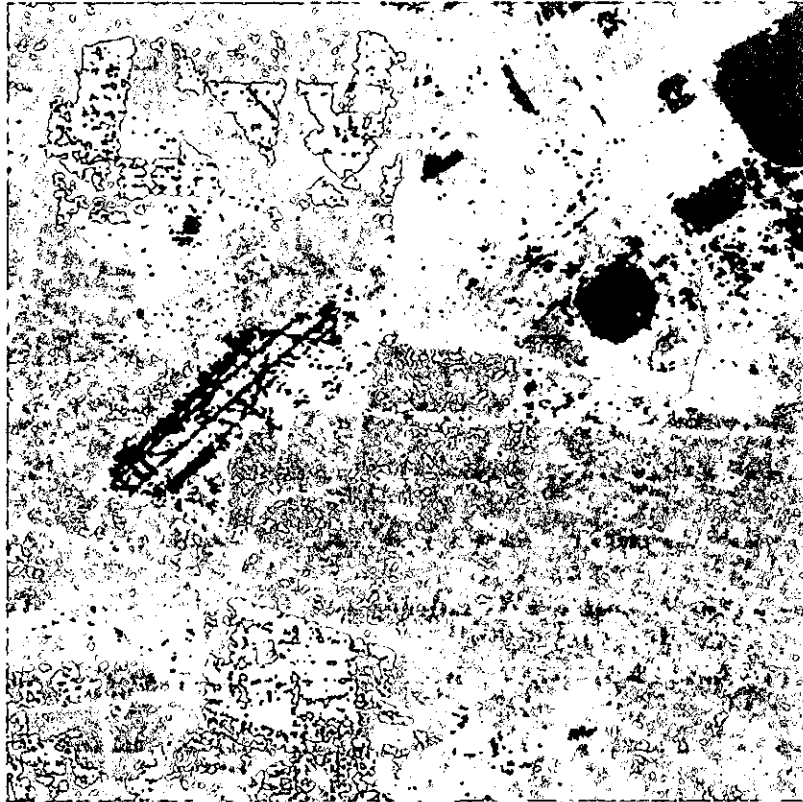


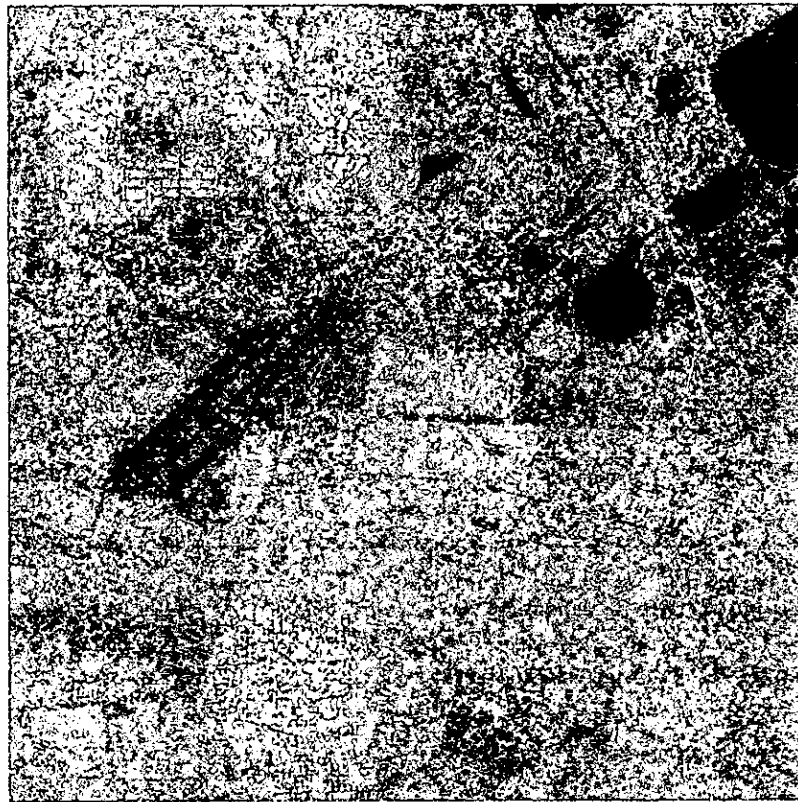
Figura 5.15. Imagen segmentada utilizando método de vecindades Adaptables Segunda Propuesta (colores falsos, Imagen de satélite, Diciembre 1995)



Figura 5.16. Imagen segmentada utilizando método de Potts (colores falsos, Imagen de satélite, Diciembre 1995)



*Figura 5.17. Imagen segmentada utilizando método de Bayes
(colores falsos, Imagen de satélite, Diciembre 1995)*



*Figura 5.18. Imagen segmentada utilizando método de Mahalanobis.
(colores falsos, Imagen de satélite, Diciembre 1995)*

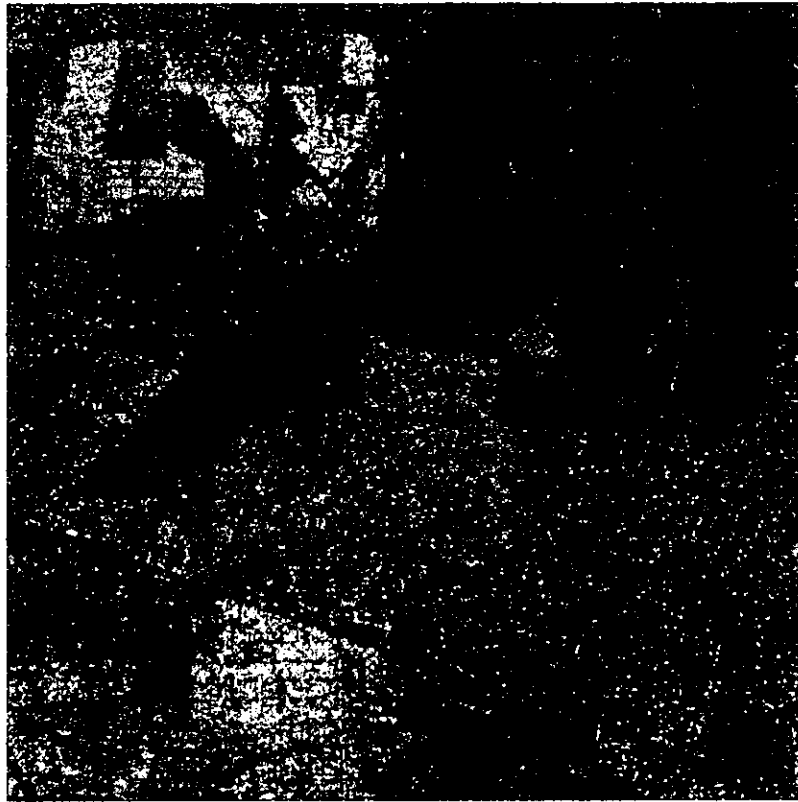


Figura 5.19. Imagen segmentada utilizando método de K-means (colores falsos, Imagen de satélite, Diciembre 1995)

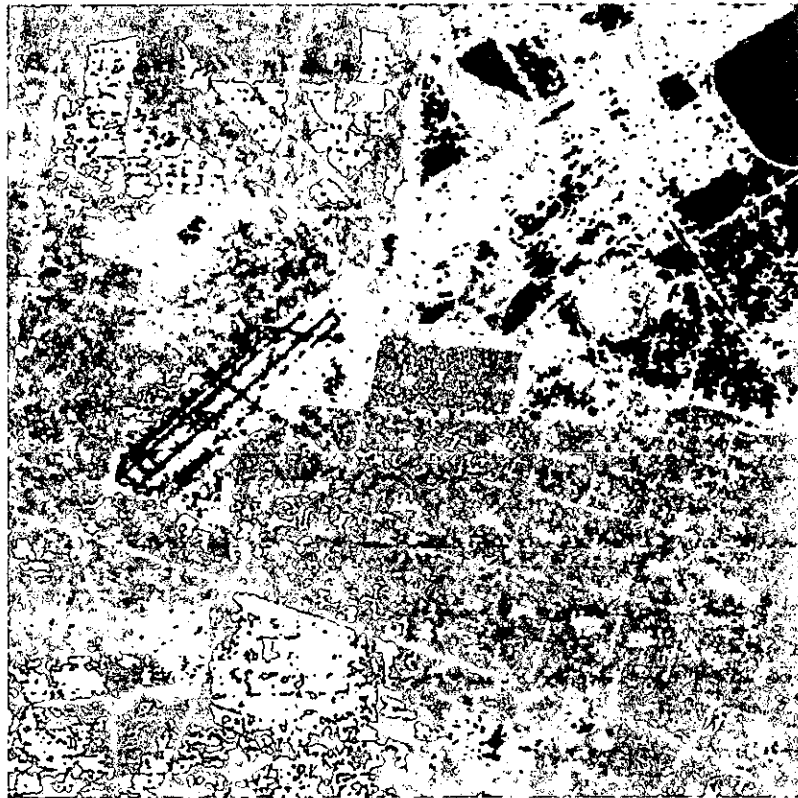


Figura 5.20. Imagen segmentada utilizando método de vecindades Adaptables. Primer Propuesta. Configuración lineal de la vecindad para $\Psi=3$. (colores falsos, Imagen de satélite, Septiembre 1997)



Figura 5.21. Imagen segmentada utilizando método de vecindades Adaptables. Primer Propuesta. Configuración lineal de la vecindad para $\Psi=5$. (colores falsos, Imagen de satélite, Septiembre 1997)



Figura 5.22. Imagen segmentada utilizando método de vecindades Adaptables Segunda Propuesta (colores falsos, Imagen de satélite, Septiembre 1997)



*Figura 5.23. Imagen segmentada utilizando método de Potts
(colores falsos, Imagen de satélite, Septiembre 1997)*



*Figura 5.24. Imagen segmentada utilizando método de Bayes
(colores falsos, Imagen de satélite, Septiembre 1997)*

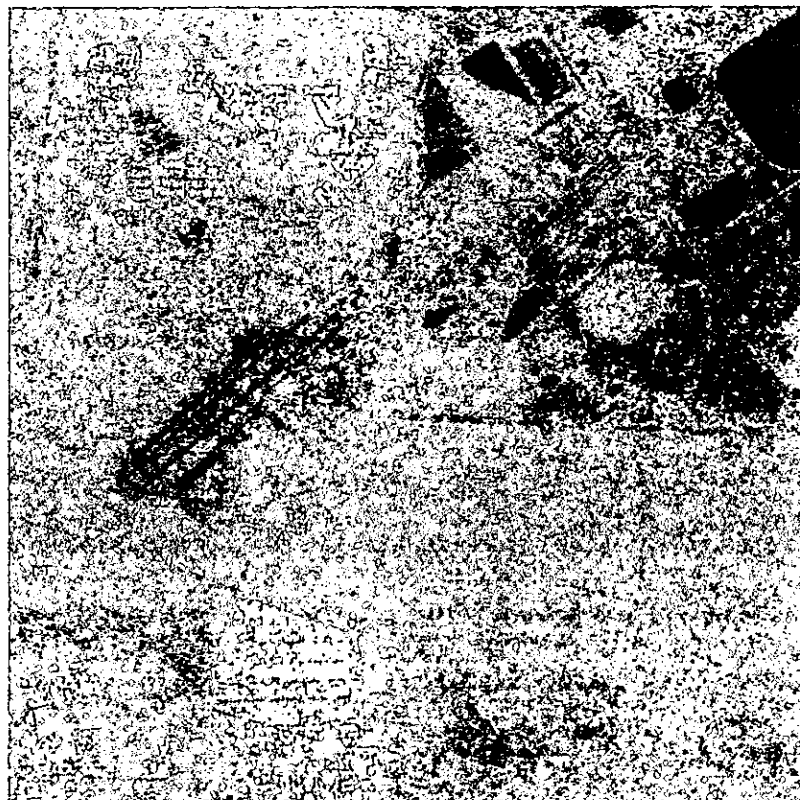


Figura 5.25. Imagen segmentada utilizando método de Mahalanobis (colores falsos, Imagen de satélite, Septiembre 1997)

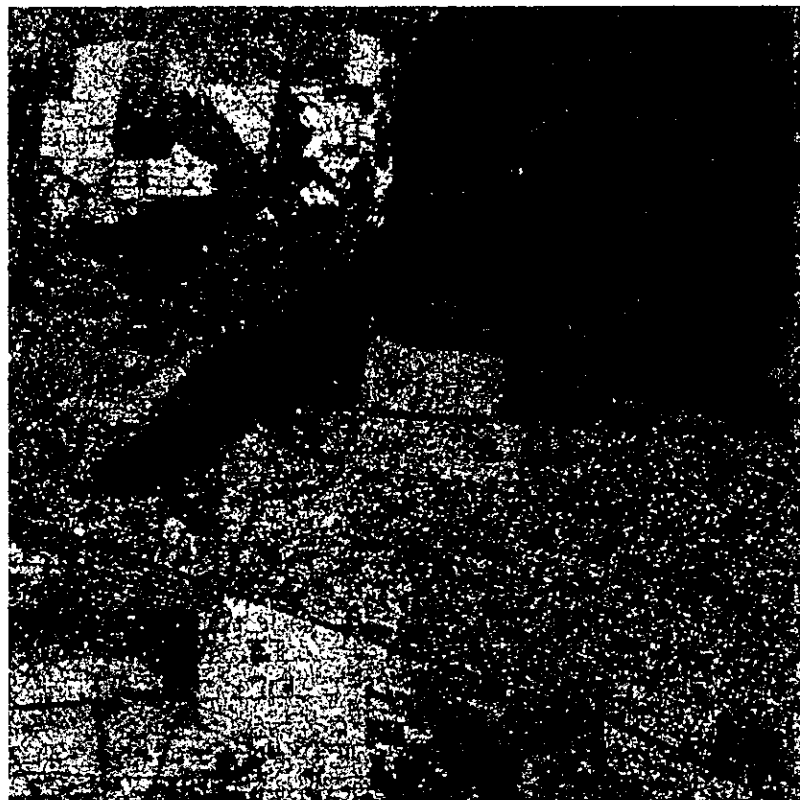


Figura 5.26. Imagen segmentada utilizando método de K-means (colores falsos, Imagen de satélite, Septiembre 1997)



Figura 5.27. Imagen segmentada utilizando método de vecindades Adaptables Primer Propuesta. Configuración lineal de la vecindad para $\Psi=3$ (colores falsos)



Figura 5.28. Imagen segmentada utilizando método de vecindades Adaptables Primer Propuesta. Configuración lineal de la vecindad para $\Psi=5$ (colores falsos)



Figura 5.29. Imagen segmentada utilizando método de vecindades Adaptables Segunda Propuesta (colores falsos)



Figura 5.30. Imagen segmentada utilizando método de Potts (colores falsos)



Figura 5.31. Imagen segmentada utilizando método de Bayes (colores falsos)



Figura 5.32. Imagen segmentada utilizando método de Mahalanobis (colores falsos)

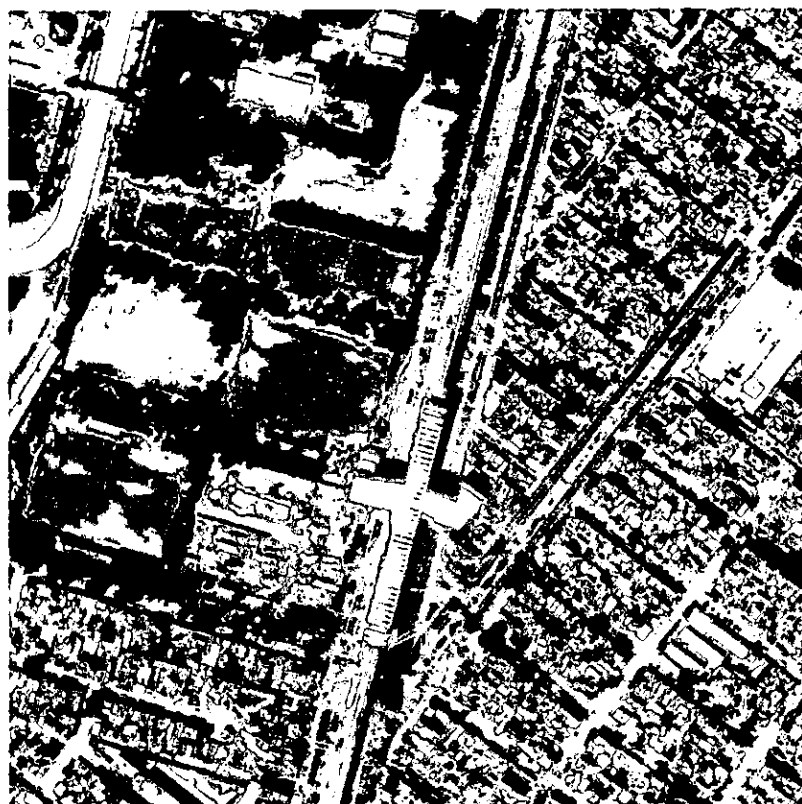


Figura 5.33. Imagen segmentada utilizando método de K-means (colores falsos)

Las siguientes tablas muestran un resumen de los resultados obtenidos por los diferentes métodos, presentan el número total de píxeles asignados a cada clase.

Número de Píxeles asignados a cada clase. Imagen Satélite, Diciembre de 1995.					
Método de Segmentación	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Vecindades Adaptables (Primer Propuesta) Distancia lineal =3	38602	30487	331146	518826	129155
Vecindades Adaptables (Primer Propuesta) Distancia lineal =5	39616	30832	323580	522488	132060
Vecindades Adaptables (Segunda Propuesta)	37936	30620	315368	534220	130432
Potts	36960	30864	314928	534064	131760
Bayes	78952	36564	415896	385400	131764
Mahalanobis	103752	39776	321104	439660	144284
K-means	364584	382632	75180	190656	35524

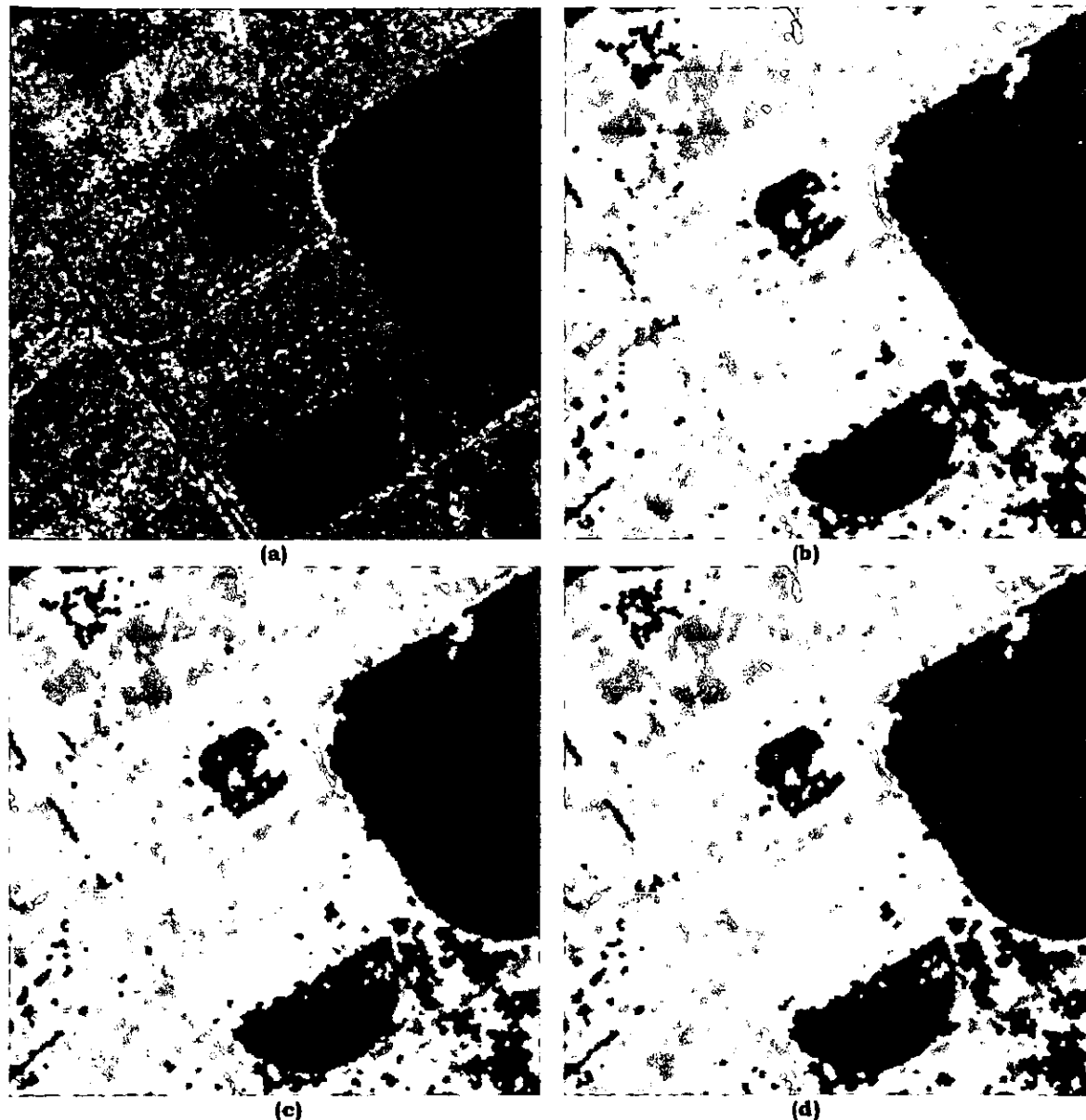
Número de Píxeles asignados a cada clase. Imagen Satélite, Septiembre de 1997.					
Método de Segmentación	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Vecindades Adaptables (Primer Propuesta) Distancia lineal =3	67223	27469	362444	435715	155725
Vecindades Adaptables (Primer Propuesta) Distancia lineal =5	67604	27576	367740	433092	152564
Vecindades Adaptables (Segunda Propuesta)	69208	27372	377648	424588	149760
Potts	67908	27376	354816	443388	155088
Bayes	86596	29896	391592	368428	172064
Mahalanobis	113256	34104	327340	406728	167148
K-means	315028	327164	111164	207276	87944

Número de Píxeles asignados a cada clase. Fotoimagen aérea					
Método de Segmentación	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Vecindades Adaptables (Primer Propuesta) Distancia lineal =3	181508	262136	66784	414500	123648
Vecindades Adaptables (Primer Propuesta) Distancia lineal =5	183246	260201	63535	416951	124643
Vecindades Adaptables (Segunda Propuesta)	181988	259740	64224	418652	123972
Potts	183276	261508	62900	417064	123828
Bayes	181372	295648	77552	371792	122212
Mahalanobis	164856	261592	105948	384408	131772
K-means	361448	164840	251068	152036	119184

De los resultados obtenidos en las imágenes de satélite, podemos observar que en los dos métodos propuestos de Vecindades Adaptables existe una mejor detección de los elementos y sus contornos, una mejor definición de las fronteras entre elementos y una mejor agrupación de píxeles, logrando que la imagen segmentada sea más homogénea. Los métodos clásicos tienen problemas con las características anteriores; por la naturaleza de las imágenes SAR hay conflictos en la agrupación de píxeles y por la forma de clasificar de éstos métodos, no crea homogeneidad entre las clases, como se muestra en las figuras subsecuentes, existen zonas que contienen píxeles de diferentes clases que no están bien agrupados, por lo mismo, la detección de contornos no es muy precisa. Esto es más notorio al realizar acercamientos en diferentes zonas de la imagen.

En el caso de la fotoimagen, en la cual, las regiones son más homogéneas, todos los métodos obtuvieron buenos resultados, aunque todavía es notorio en los métodos clásicos la existencia de una gran cantidad de píxeles no agrupados.

A continuación presentaremos detalles de las imágenes segmentadas para ejemplificar lo comentado previamente. Para poder mostrar las imágenes de un tamaño adecuado y debido a la cantidad de métodos de segmentación empleados, se muestran en grupos de cuatro imágenes por página y están ordenadas del inciso (a) al inciso (h).



*Figura 5.34 Región del Lago Nabor Carrillo. Imagen SAR. Diciembre 1995. Sección: 300x300 píxeles.
 (a) Sección original. (b) Método de Vecindades Adaptables, Primer Propuesta, $\Psi=3$
 (c) Método de Vecindades Adaptables, Primer Propuesta, $\Psi=5$.
 (d) Método de Vecindades Adaptables, Segunda Propuesta.*

La figura 5.34 muestra una de las secciones más homogéneas de la imagen SAR adquirida en 1995. Se pueden identificar claramente tres regiones acuosas y una gran sección de vegetación. La imagen 5.34 (a) es la región original en niveles de grises y las imágenes 5.34 (b), (c) y (d) nos muestran los resultados obtenidos de las dos propuestas de Vecindades Adaptables, las imágenes 5.34 (e), (f), (g) y (h), nos muestran los resultados de los métodos de Potts, Bayes, Mahalanobis y K-means respectivamente.

Como se puede observar los resultados de las imágenes 5.34 (b), (c), (d) y (e) son muy similares, lo mismo sucede con las imágenes 5.34 (f) y (g); en el caso de la imagen 5.34 (h) se puede observar notoriamente que el método realizó una mala clasificación de los elementos, ya que la mayor parte de la imagen fue clasificada como una región acuosa.

En todas las imágenes se obtuvo una buena detección de contornos de las zonas acuosas, aunque en 5.34 (h) fue extremadamente baja y en 5.34 (e) no tuvo una buena detección en el semicírculo (planta tratadora de agua). En la zona del lago Nabor Carrillo, en 5.34 (c), (d), (e) y (h) se realizó una buena clasificación, en 5.34 (b) se puede observar una pequeña región (4 píxeles) clasificada erróneamente y en las imágenes 5.34 (f) y (g) se encuentra una gran cantidad de píxeles mal clasificados.

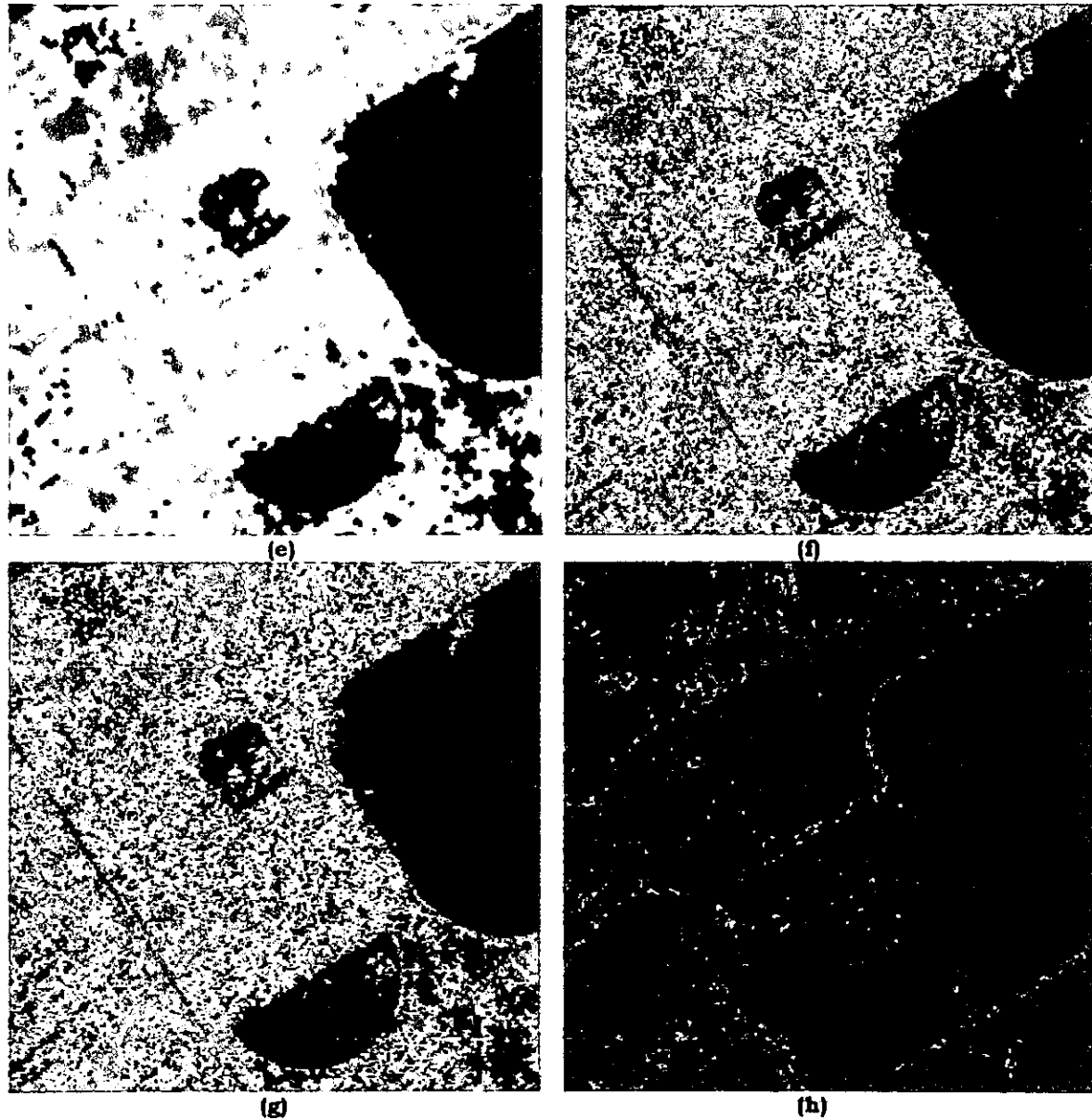


Figura 5.34 Región del Lago Nabor Carrillo. Imagen SAR. Diciembre 1995. Sección: 300x300 píxeles.

(e) Método de Potts. (f) Método de Bayes.

(g) Método de Mahalanobis. (h) Método de K-means.

Es evidente, que debido a la gran variedad de niveles de grises que presenta la imagen en la zona de vegetación, hay secciones que no están bien clasificadas, este problema es notorio en las imágenes 5.34 (f) y (g), en donde se observa una gran cantidad de píxeles dispersos que pueden ser considerados como mal clasificados, a diferencia de 5.34 (b), (c), (d) y (e) en las que se puede observar una zona más homogénea. De éstas, en la imagen 5.34 (d) se observa el mejor resultado ya que esta región presenta una menor cantidad de píxeles clasificados erróneamente, sin embargo detalles como la calle que se puede observar en el esquina inferior izquierda de la imagen 5.34 (a) y el camino de color blanco a un lado del lago Nabor Carrillo no son bien detectados.

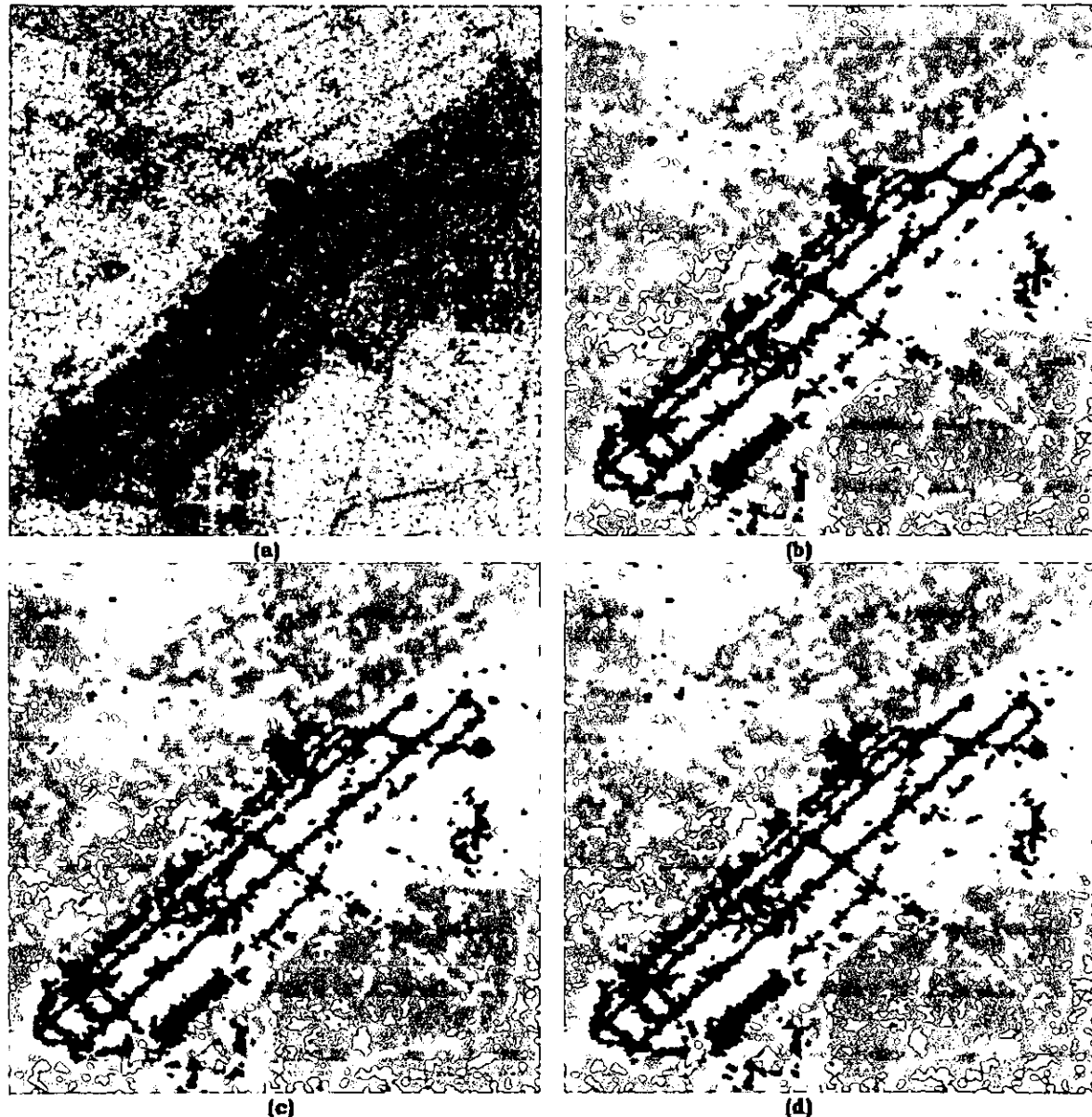


Figura 5.35 Aeropuerto "Benito Juárez". Imagen SAR. Septiembre 1997. Sección: 340x340 píxeles.
 (a) Sección original. (b) Método de Vecindades Adaptables, Primer Propuesta, $\Psi=3$.
 (c) Método de Vecindades Adaptables, Primer Propuesta, $\Psi=5$. (d) Método de Vecindades Adaptables, Segunda Propuesta.

La zona de la pista del Aeropuerto es una de las más difíciles de extraer, debido principalmente a lo delgado de la pista y a la gran cantidad de píxeles con nivel de gris similar que existen alrededor de ella; esto se observa claramente en la figura 5.35 (a).

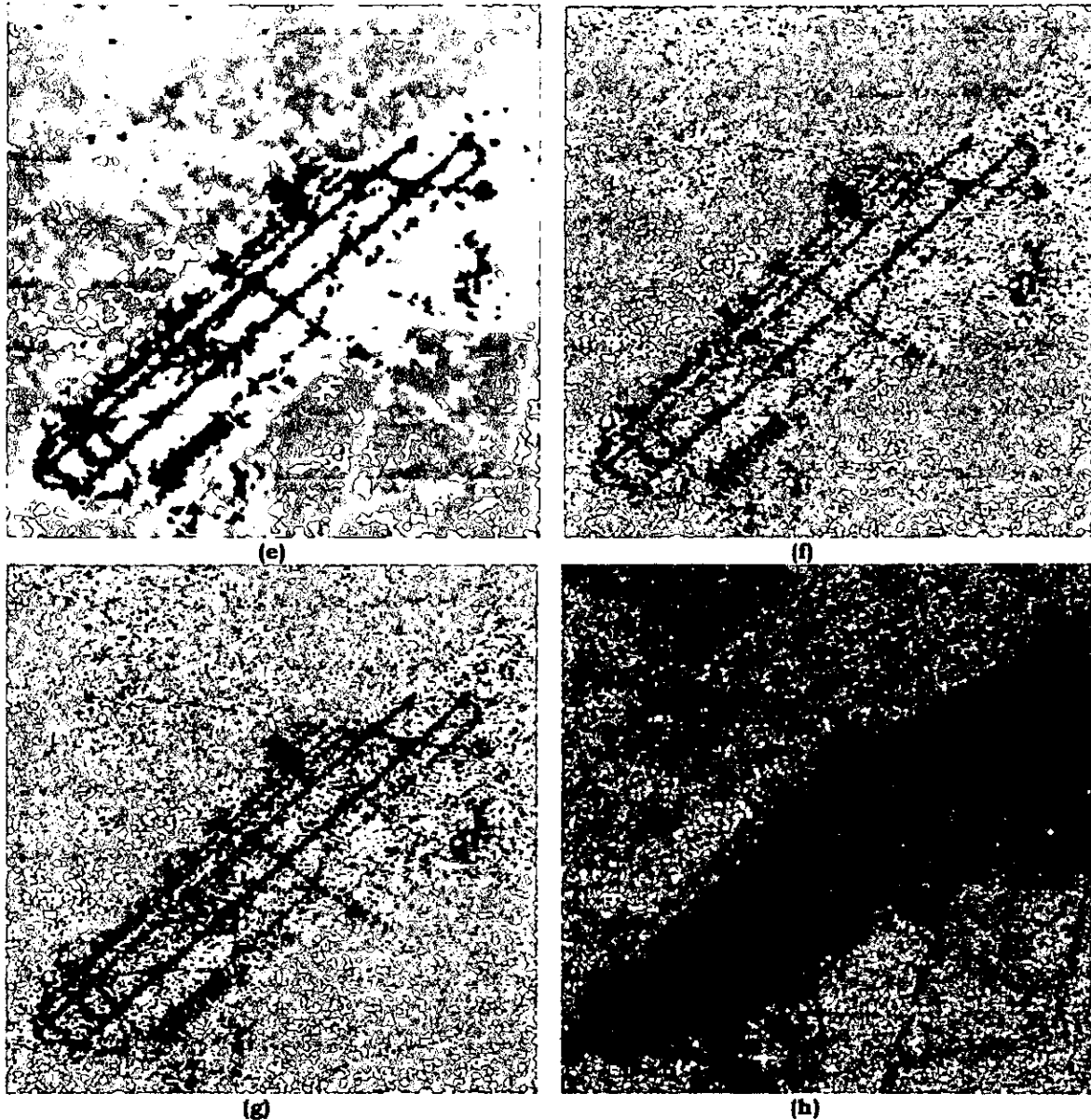


Figura 5.35 Aeropuerto "Benito Juárez". Imagen SAR. Septiembre 1997. Sección: 340x340 píxeles.

(e) Método de Potts. (f) Método de Bayes.

(g) Método de Mahalanobis. (h) Método de K-means.

Los resultados que se observan en 5.35 (b), (c), (d) y (e), la región de vegetación es más homogénea y la pista del Aeropuerto contiene una menor cantidad de píxeles de la clase representativa del agua, en 5.35 (f) y (g) la detección de la pista presenta una gran cantidad de píxeles de la clase de agua y la zona de vegetación interna de la pista contiene píxeles de diferentes clases lo que muestra una zona no homogénea, en el caso de 5.35 (h) la detección de la pista y la vegetación es totalmente deficiente. De las imágenes 5.35 (b), (c) y (d); en 5.35 (d) se observa que tiene mejor recuperación de la clase de la pista y tiene menos píxeles de agua, sin embargo, 5.35 (c) presenta mejor recuperación en la estructura de la pista pero una mayor cantidad de píxeles de agua.

Para analizar profundamente las zonas habitacionales y calles se eligió una sección de la colonia "El Sol" en Ciudad Nezahualcóyotl (figura 5.36).

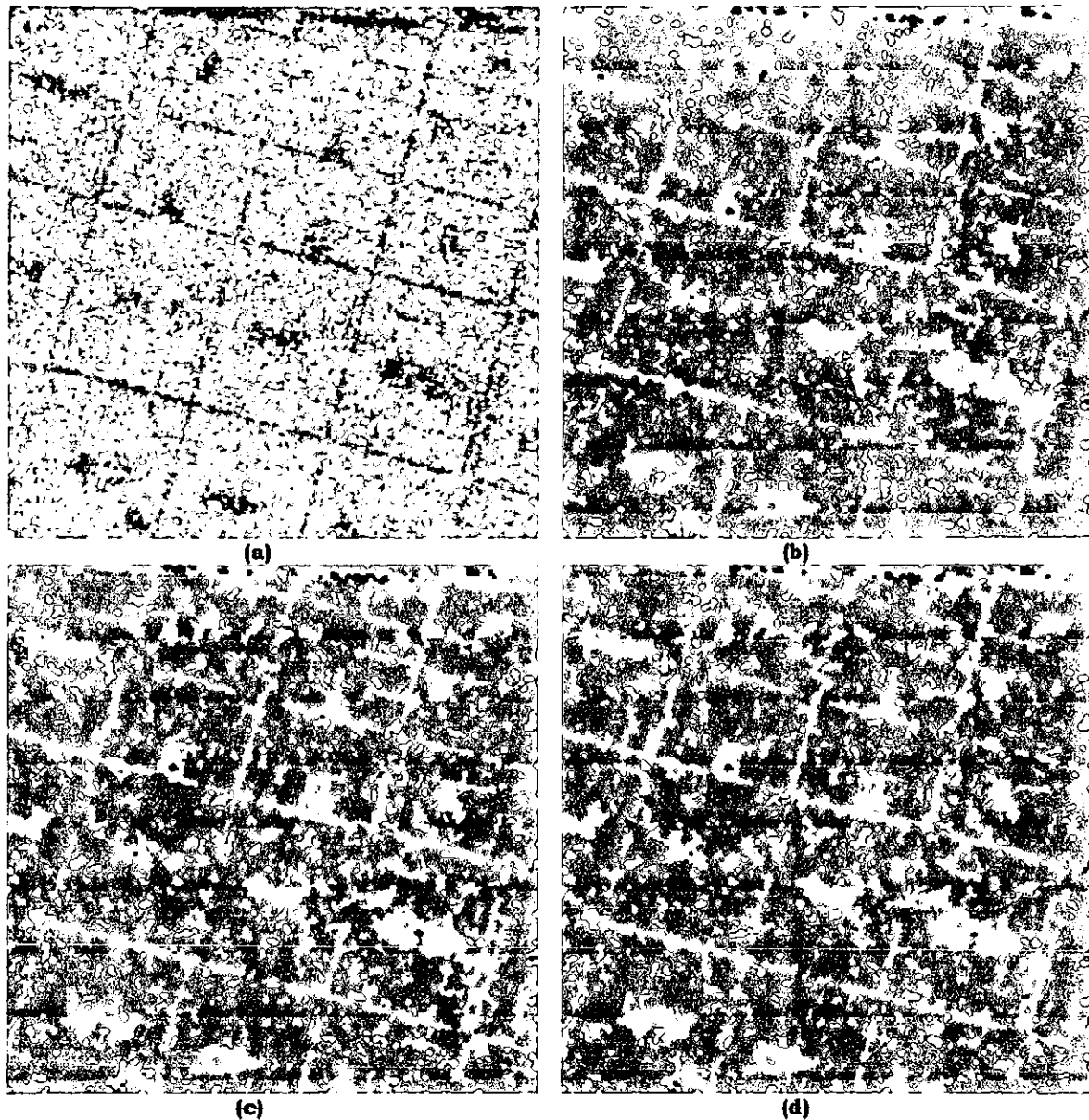


Figura 5.36 Región de Ciudad "Nezahualcóyotl". Imagen SAR. Septiembre 1997.

Sección: 300x300 píxeles.

- (a) Sección original. (b) Método de Vecindades Adaptables, Primer Propuesta, $\Psi=3$
 (c) Método de Vecindades Adaptables, Primer Propuesta, $\Psi=5$. (d) Método de Vecindades Adaptables, Segunda Propuesta.

Como se muestra en la imagen 5.36 (a), los lugares donde se concentra un gran número de viviendas presentan una gran variedad de niveles de gris en zonas muy pequeñas, debido principalmente a los diferentes tamaños y tipos de estructura y al color de pintura que presentan las construcciones, lo que dificulta enormemente la detección homogénea de estas zonas. En el caso de las calles, se puede observar que debido a su tamaño no se encuentran bien definidas, si agregamos a esto que muchas viviendas tienen un nivel de gris similar, detectar los contornos de las calles resulta una tarea complicada para cualquier método de segmentación.

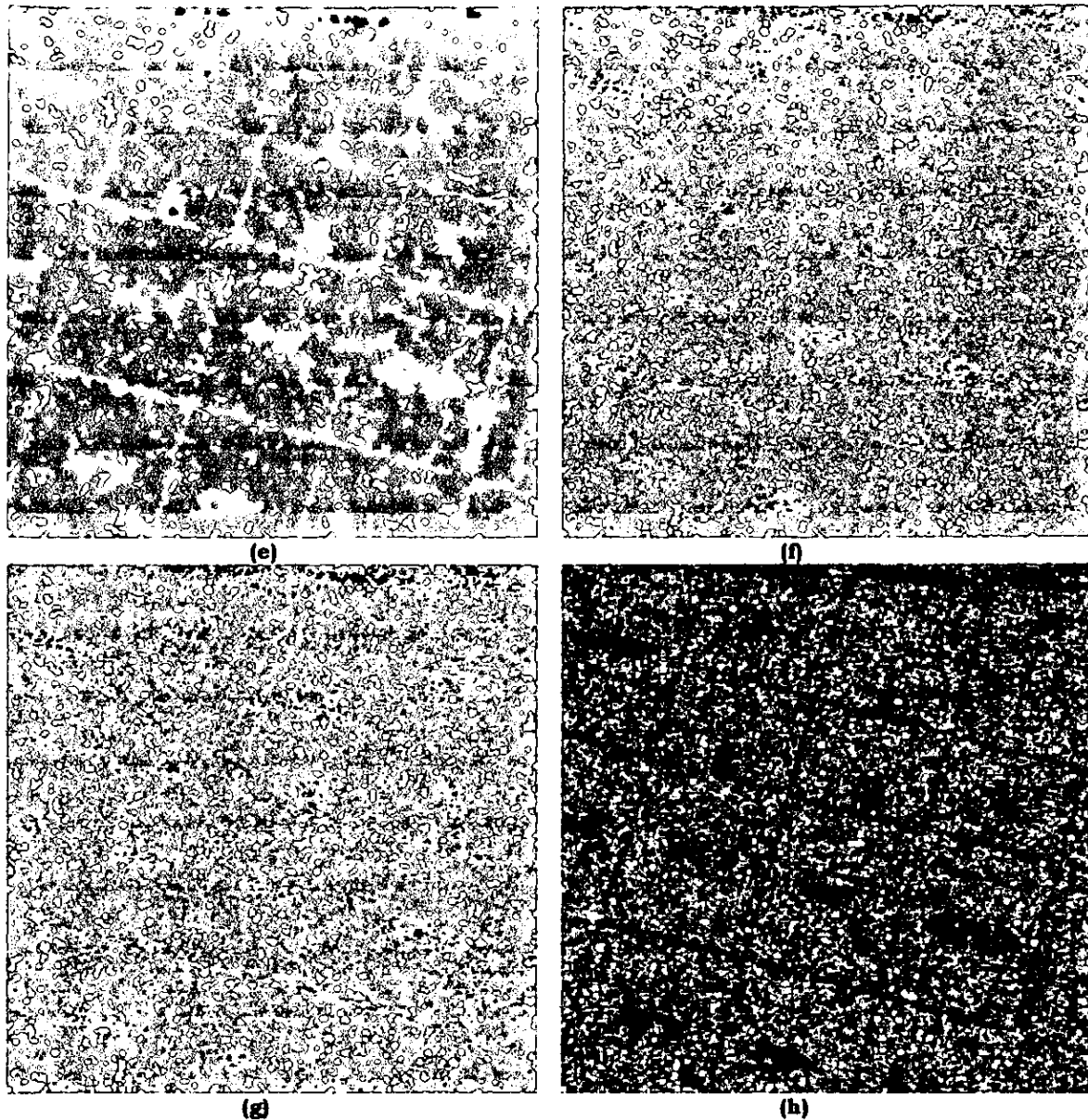


Figura 5.36 Región de Ciudad "Nezahualcōyotl". Imagen SAR. Septiembre 1997.
Sección 300x300 píxeles.

(e) Método de Potts. (f) Método de Bayes.
(g) Método de Mahalanobis. (h) Método de K-means.

En las figura 5.36 (b), (c), (d) y (e) se puede observar que las zonas de vivienda son mas homogéneas, aunque muchas se detectaron como zonas de vegetación y algunas pequeñas zonas como techos claros. Las calles mostraron un nivel de gris similar al de vegetación, aunque los contornos no fueron detectados a la perfección se obtuvieron mejores resultados con respecto a las figuras (f) y (g) en donde no se tiene buena definición en ninguno de los elementos. En el caso de la figura 5.36 (h) las calles fueron clasificadas con la clase de agua y presentan una definición aceptable, para la zona de viviendas los resultados no son buenos. De los resultados obtenidos el que presenta una mejor definición de las zonas de vivienda es la figura 5.36 (d) ya que define mejor las calles y los bloques de viviendas.

La figura 5.37 (a) muestra una sección de la fotoimagen aérea, aquí podemos observar el funcionamiento del método de Vecindades Adaptables en áreas mas homogéneas.

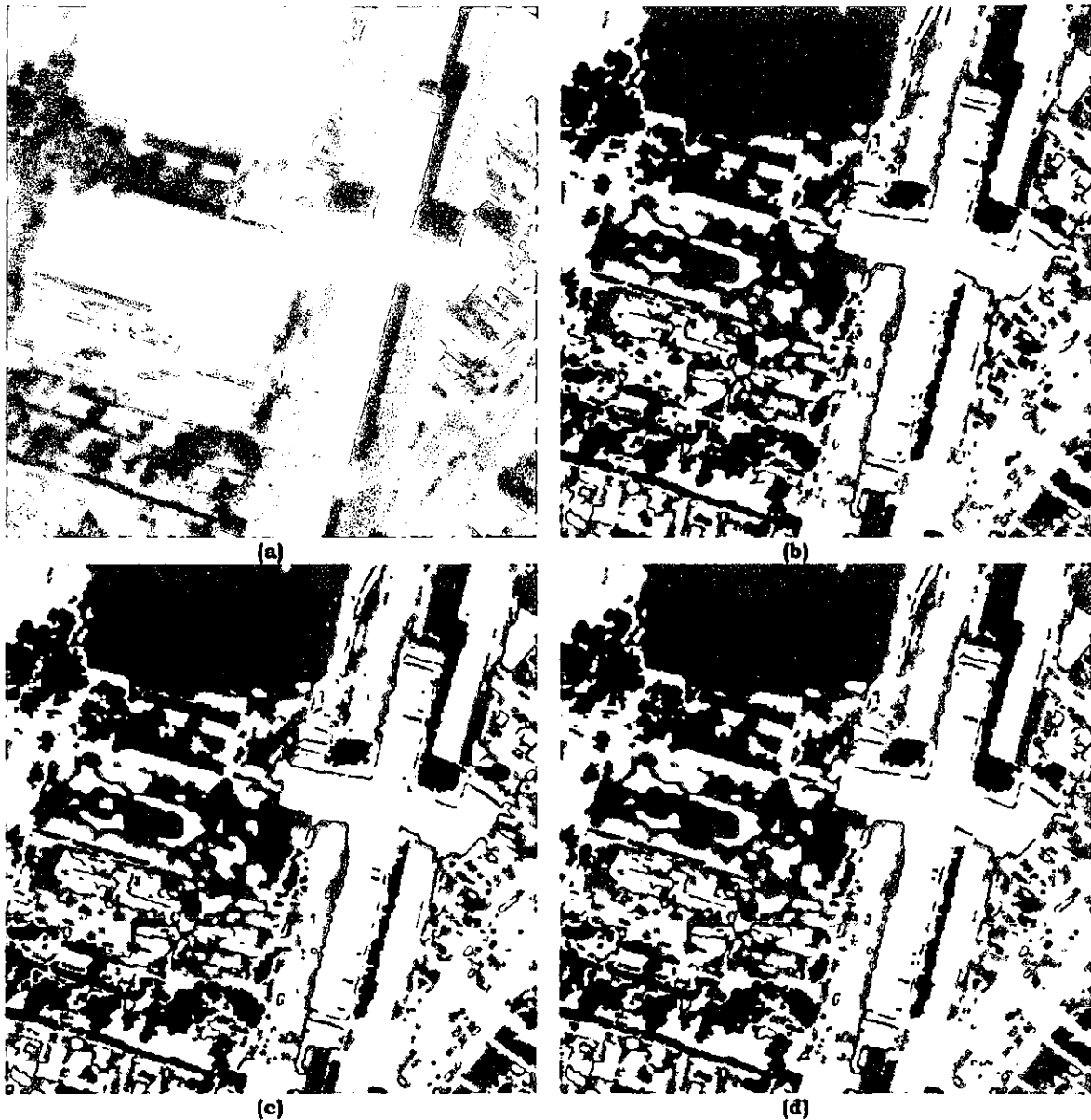


Figura 5.37 Región de la Ciudad Deportiva y estación del metro "Puebla". Sección: 410x410 píxeles. Fotoimagen aérea. (a) Sección original. (b) Método de Vecindades Adaptables, Primer Propuesta, $\Psi=3$ (c) Método de Vecindades Adaptables, Primer Propuesta, $\Psi=5$. (d) Método de Vecindades Adaptables, Segunda Propuesta.

Podemos observar que todos los métodos obtuvieron buenas detecciones de los elementos, aunque hay detalles a resaltar. Los métodos clásicos siguieron presentando una gran dispersión de píxeles, como se puede observar notablemente en la zona del campo de Fútbol, en donde, las figuras 5.37 (f) y (g) presentan una gran cantidad de píxeles dispersos de la clase de techos, en el caso de la figura 5.37 (h) se observa que la zona del área de la portería fue clasificada con la clase de calle y también se observan píxeles dispersos de la clase de techos en el centro del campo. Para esta misma zona las figuras 5.37 (b), (c), (d) y (e) muestran el campo de Fútbol como un área más uniforme aunque alcanzan a detectar unas pequeñas zonas con la clase calles y techos.

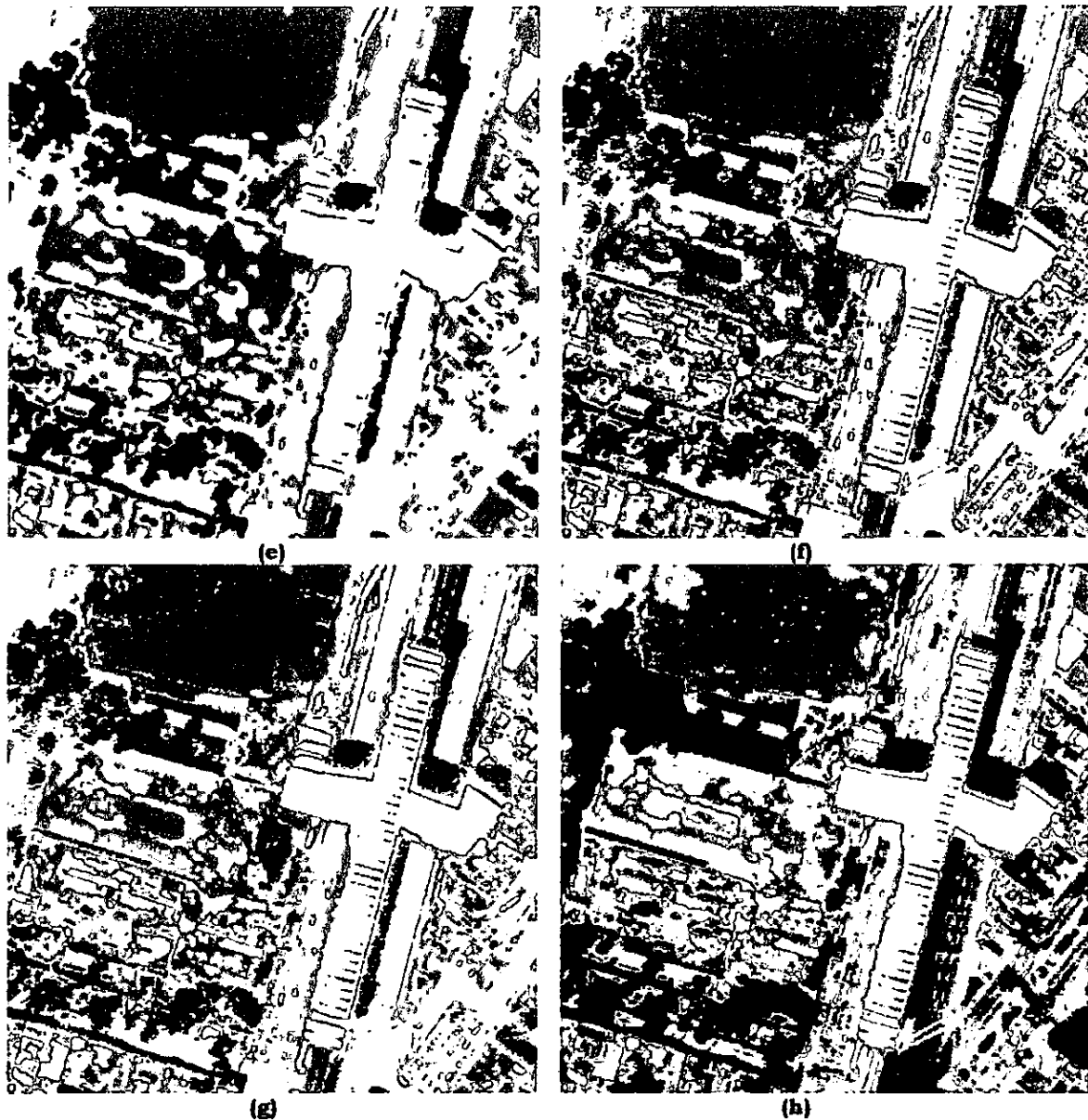


Figura 5.37 Región de la Ciudad Deportiva y estación del metro "Puebla". Sección: 410x410 píxeles.
 Fotoimagen aérea. (e) Método de Potts. (f) Método de Bayes.
 (g) Método de Mahalanobis. (h) Método de K-means.

En general la detección de los contornos de techos fué buena en todos métodos, en especial, los métodos clásicos mostraron algunos detalles como es el caso de las líneas que se encuentran en el techo de la estación del metro, las cuales los métodos de Potts y Vecindades Adaptables no alcanzaron a detectar en su totalidad. En el caso de las calles, Bayes y Mahalanobis (figuras 5.37 (f) y (g), respectivamente) presentan una mejor detección de contornos, sin embargos ambos métodos tienen la desventaja de presentar píxeles dispersos pertenecientes a otras clase como por ejemplo la de zonas verdes, en contra parte, los métodos de Potts y Vecindades Adaptables presentan pequeñas fallas en la detección de contornos pero muestran regiones más homogéneas.

De igual forma, se puede observar en la zona vegetación que se encuentra a las orillas del campo de Fútbol, fueron mejor clasificadas por los modelos Potts y Vecindades Adaptables, a diferencia de los métodos clásicos que siguen presentando muchos pixeles dispersos. En el caso de las sombras que se observan con mayor exactitud en la estación del metro, se obtuvieron regiones mas uniformes con los modelos de Potts y Vecindades Adaptables.

El circulo de la figura 5.38 muestra de forma mas clara el lugar de donde se extrajo la región que utilizaremos para mostrar la dispersión de pixeles en los métodos clásicos. Como se comentó anteriormente, las zonas de viviendas presentan una gran variedad de pixeles con diferentes niveles de gris en pequeñas regiones, lo que hace difícil segmentarlas. Esta área resulta idónea para observar como los métodos agrupan los pixeles en cada clase.



Figura 5.38 Ampliación sobre la región de Ciudad Nezahualcóyotl. Colonia "El Sol". Sección.

Al hacer un acercamiento mayor en esta sección, podemos observar que la imagen de la figura 5.39 (a) se puede distinguir varios elementos, entre los que se encuentran dos grandes avenidas y una pequeña calle, dos bloques de viviendas y en el interior del mayor de ellos un parque de forma rectangular. Hablemos primero de las zonas de las casas; el método de Vecindades Adaptables y Potts, obtuvieron una mayor cantidad de elementos que pertenecen a las dos clases de techos (pixeles de color rojo y blancos) y en esa zona existe una menor cantidad de pixeles de la clase de vegetación. Los métodos clásicos en la zona de las casas no definieron bien la región y se puede observar que existen una gran cantidad de pixeles que pertenecen a la clase de agua y de la pista del Aeropuerto, además muchos de estos pixeles están totalmente aislados, es decir, estos pixeles tienen a su alrededor pixeles de otras clases, creando en esta parte un efecto de moteado, lo que nos dificulta la interpretación de los resultados.

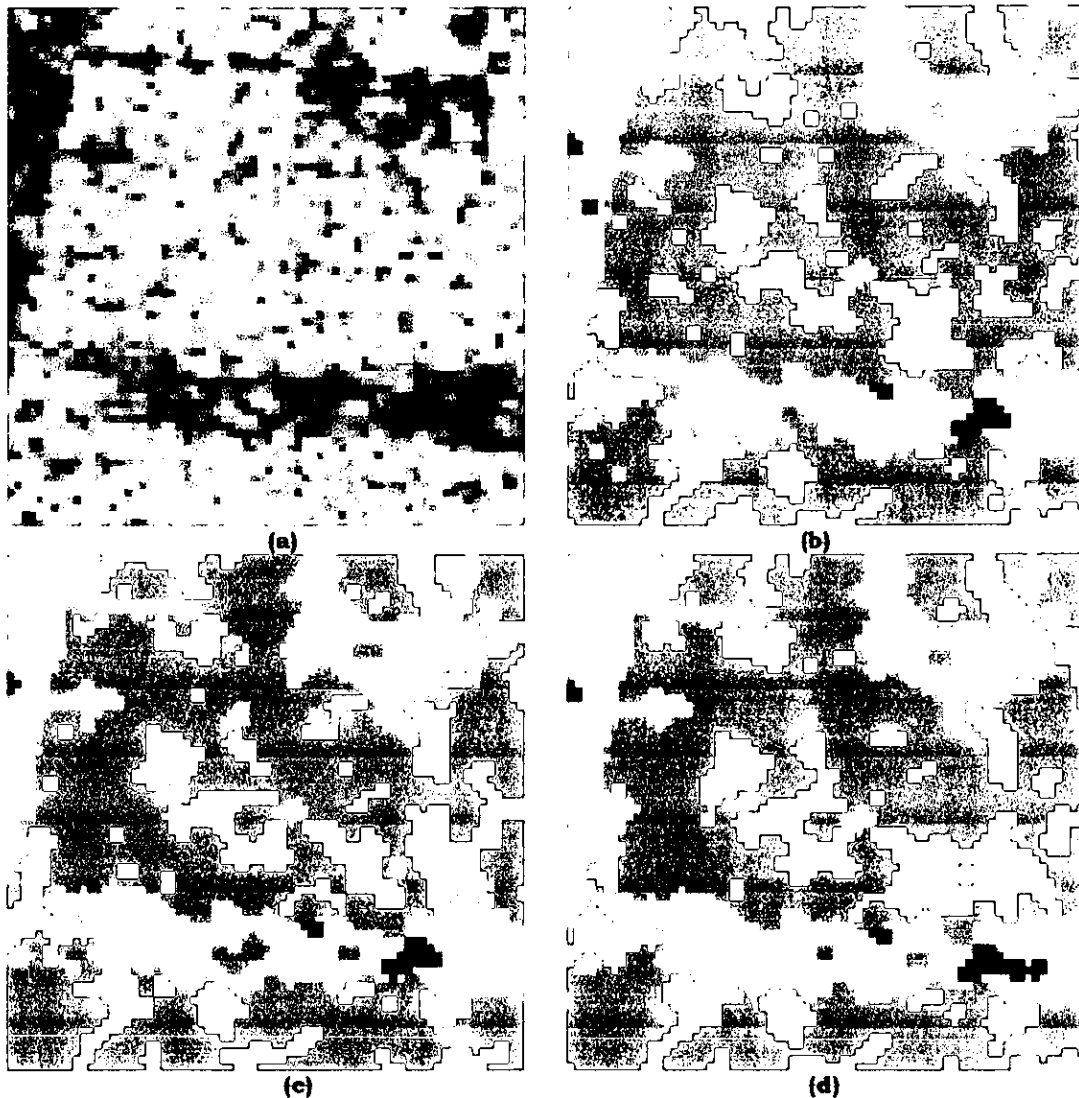


Figura 5.39 Colonia "El Sol". Sección: 70x70 píxeles. (a) Sección original. (b) Método de Vecindades Adaptables, Primer Propuesta, $\Psi=3$ (c) Método de Vecindades Adaptables, Primer Propuesta, $\Psi=5$. (d) Método de Vecindades Adaptables, Segunda Propuesta.

En cuanto a la definición de calles, los métodos clásicos presentan también píxeles aislados, por lo que la interpretación de las mismas se vuelve complicado, como se puede observar en las imágenes 5.39 (f) y (g) existe una gran cantidad de pequeños bloques de píxeles de clase de la pista del Aeropuerto, de la clase de agua y de la clase de techos; en el caso de la imagen 5.39 (h) la calles fueron clasificadas como agua y presenta el mismo problema de píxeles aislados. En el caso de Potts y de Vecindades Adaptables el problema se limita a unos cantos bloques bien definidos de píxeles, a pesar de esto, la definición de esta avenida es más clara. En las imágenes 5.39 (b), (d) y (e) se puede ver una mejor definición de la continuidad de la calle, aunque en 5.39 (d) se define de una forma mas clara el contorno de la misma.

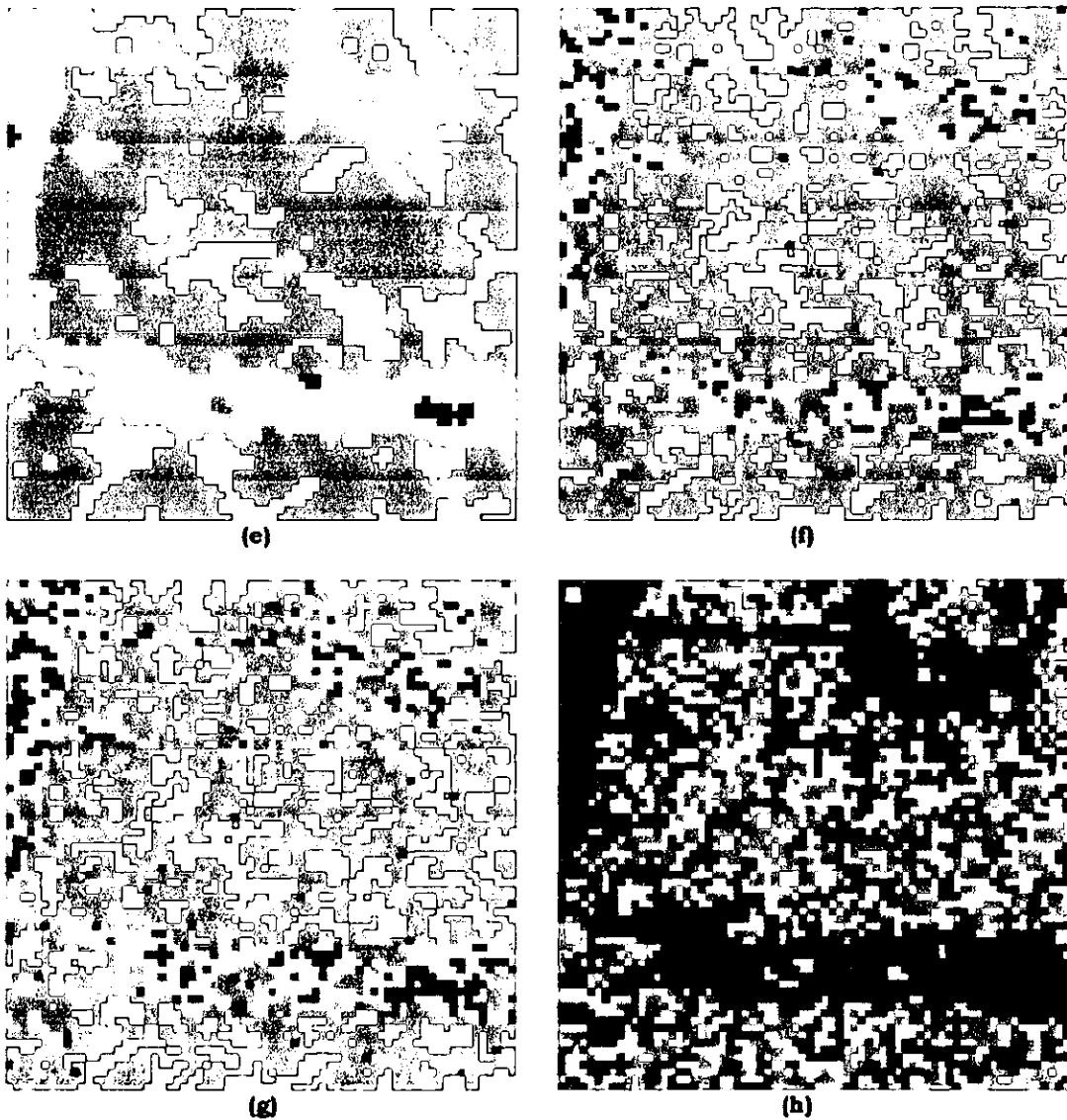


Figura 5.39 Colonia "El Sol". Sección: 70x70 píxeles. (g) Método de Mahalanobis.
(h) Método de K-means. (e) Método de Potts. (f) Método de Bayes.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES



La Percepción Remota moderna tiene su principal soporte en los sensores electrónicos y cámaras capaces de medir la radiación visible y no visible con gran sensibilidad, precisión y resolución. Las imágenes obtenidas por los sensores montados en los satélites, proveen de datos espaciales para la investigación y el desarrollo científico; estos datos son analizados con la ayuda de avanzados equipos y programas de cómputo para obtener información sobre las condiciones de los elementos en la Superficie Terrestre.

El manejo de datos espaciales con el uso de eficientes programas de cómputo llamados Sistemas de Información Geográfica (SIG). Su principal objetivo es reunir, combinar y analizar estadísticamente los datos espaciales de una misma área geográfica.

Una de las zonas geográficas más complicadas para su estudio, son las áreas urbanas, ya que los datos de las imágenes proporcionadas por el satélite no han arrojado suficiente información detallada de estas áreas. Las razones de esto son:

- Los objetos que componen las áreas urbanas son muy complejos, debido más a las características de sus estructuras que a sus propiedades de reflexión espectral.
- La resolución espacial de los datos de las imágenes del satélite no es óptima actualmente, por ejemplo, las imágenes SAR de mayor resolución son de 12 mts por pixel, lo que dificulta la interpretación de las estructuras, principalmente las más pequeñas.
- Las condiciones meteorológicas imperantes en el momento de tomar la imagen, generan ruido atmosférico que es detectado por las cámaras y sensores ocasionando una degradación en los datos originales.

Evidentemente, estos factores han influido a que no se haya encontrado un método totalmente óptimo para realizar una clasificación de las principales estructuras que componen una escena urbana, convirtiéndose este en uno de los principales problemas.

Con el fin de proponer nuevas soluciones al problema anterior, se trabajó con un método de segmentación de aproximación jerárquica basado en la Teoría de los Campos Aleatorios de Markov (MRF) y en el algoritmo de Recocido Simulado. La novedad de este método es la utilización de varias configuraciones de energía denominadas Vecindades Adaptables.

Se plantearon dos propuestas de Vecindades Adaptables, ambas propuestas tuvieron como base el modelo de Potts. La primera propuesta, tuvo la variante en el parámetro " Ψ ", con el objetivo de poder observar los resultados de segmentar una imagen con diferentes distancias lineales de las vecindades propuestas. En la segunda propuesta se utilizaron las mismas configuraciones de energía de la primera propuesta y se agregó una configuración de ocho vecinos colocados a cierta distancia " λ " equidistante del pixel de prueba.

Para probar el Método de Vecindades Adaptables se utilizó una escena de la ciudad más grande del mundo: "La Ciudad de México", Los datos utilizados fueron proporcionados por dos imágenes PRI-SAR adquiridas por los satélites ERS y una imagen aérea. Se extrajeron principalmente las áreas acuosas, casas, áreas verdes y grandes estructuras hechas por el hombre en la ciudad.

El Método de Vecindades Adaptables (MVA) presentó mejores resultados en la segmentación de imágenes SAR que el Método de Potts y los Métodos Clásicos, debido a que estos últimos presentaron grandes problemas en el agrupamiento de pixeles y la detección de contornos y elementos.

El "agrupamiento de pixeles" puede ser ejemplificado claramente en la zona del lago y en la zona de vegetación, los MVA y Potts obtuvieron regiones más homogéneas,

mientras que los Métodos Clásicos presentaron una gran dispersión de píxeles creando un efecto visual de "moteado".

En cuanto a la "detección de contornos", los Métodos Clásicos no tuvieron problemas cuando éstos estaban definidos claramente, pero en el caso de secciones más complejas como el área de zonas habitacionales y la pista del Aeropuerto, debido principalmente a su mala agrupación de píxeles, presentaron resultados bastante deficientes. En el caso de los MVA la detección de contornos en las zonas habitacionales mostró buenos resultados en la definición de las manzanas y las calles, aunque estos no fueron definidos con total exactitud nos dan una idea muy clara de lo que representan.

En la "detección de elementos", como es el caso de la pista del Aeropuerto, los MVA y Potts obtuvieron una mejor definición en esta zona, además presentaron una menor cantidad de píxeles de otras clases en la franja de la pista. En el caso de los Métodos Clásicos, algunos definieron la pista claramente, sin embargo, la gran cantidad de píxeles pertenecientes a otras clases dispersos tanto en la franja de la pista como alrededor de ella, provocan que la definición de la pista se pierda totalmente.

En el caso de imágenes con mayor definición, como las fotoimágenes, los resultados obtenidos por todos los métodos de segmentación fueron buenos, aunque todavía es notoria la mejor agrupación de píxeles y definición de contornos que presentan los MVA y se pudo corroborar la eficiencia del método con mejores condiciones.

En general podemos concluir que los MVA son un buen método para ser usados en detección de contornos y un mejor agrupamiento de píxeles. Los resultados obtenidos por los MVA en las imágenes SAR superan por mucho a los métodos clásicos. Con respecto al método de Potts, a pesar de haber obtenido buenos resultados, fué superado por los MVA en la definición de elementos.

En comparación de las dos propuestas del MVA, se observó que en la Primera Propuesta, al momento de extender la distancia de la configuración lineal de la vecindad, se presentan mejores resultados en la definición de elementos, pero presenta el problema de dejar una mayor cantidad de píxeles mal agrupados. En el caso de la Segunda Propuesta, la β_2 debe ser menor que la β_1 , para evitar que la imagen sea sobreesegmentada, el problema de esta propuesta es definir la distancia de la vecindad extendida ya que se puede presentar una mala segmentación, lo mas recomendable es no alejar tanto esta vecindad del píxel de prueba. Con respecto a los resultados presentados por estas dos propuestas, se notó una mejor segmentación por parte de la Segunda Propuesta, aunque cabe señalar que su tiempo de cómputo fué mucho mayor.

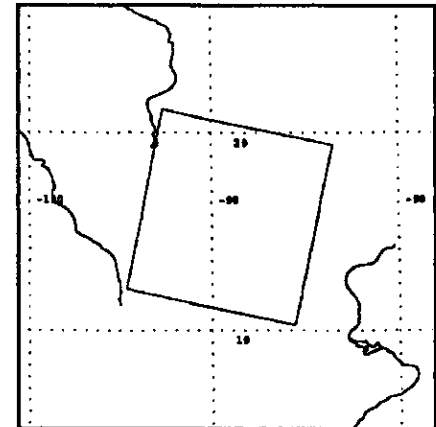
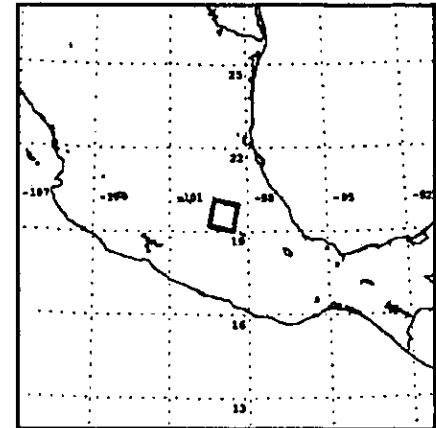
Los resultados obtenidos por estos métodos son de gran utilidad para la cartografía, en el estudio de los cambios que puedan presentar las regiones a lo largo del tiempo y en la planeación más consiente del área conurbada de las ciudades.

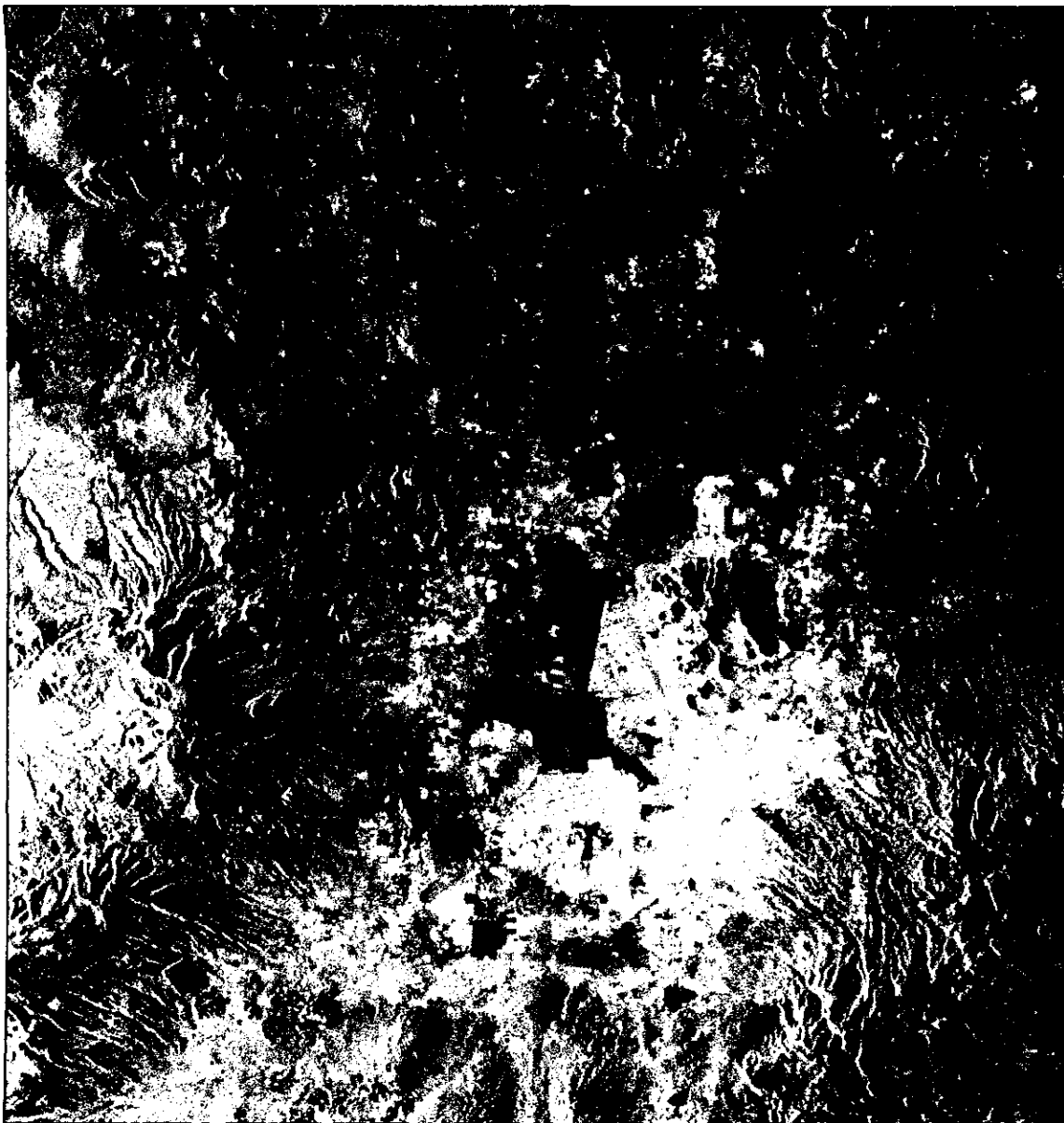
La exactitud de los resultados obtenidos en las imágenes SAR aún pueden ser mejorados utilizando algunos procesos de filtrado del ruido speckle, pero se demostró que el Método de Vecindades Adaptables puede ser considerado como una de las mejores alternativas en la extracción de elementos que componen las escenas urbanas, con los datos originales de las imágenes SAR.

APÉNDICE

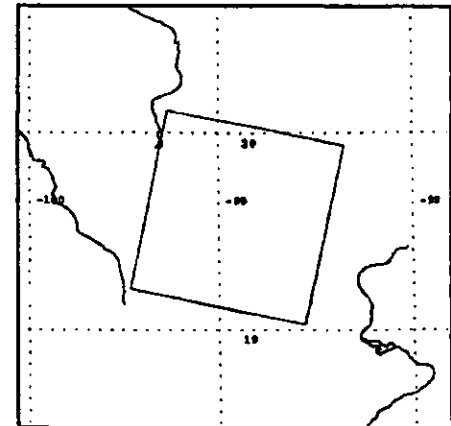
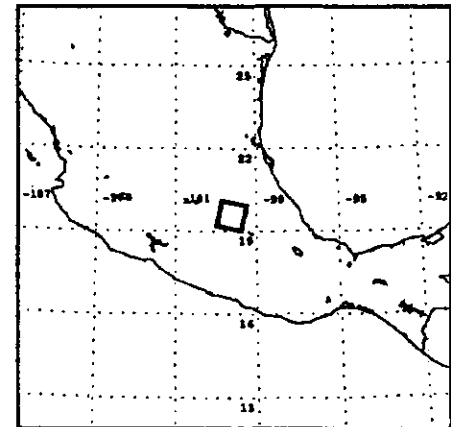


Spacecraft	ERS-1
Product Type	PRI
Orbit	23289
Frame	3213
Requested Start Time	28-dic-1995 17:06:31.697
Number of Product Lines	8237
Valid Pixels per Line	8000
Processing Time	22-jan-1999 10:41:14.980
Image Location	México
Latitude	19.57
Longitude	261.08
Pass Direction	Descending





Spacecraft	ERS-2
Product Type	PRI
Orbit	12634
Frame	3213
Requested Start Time	19-sep-1997 17:06:24.622
Number of Product Lines	8240
Valid Pixels per Line	8000
Processing Time	15-jul-1998 23:33:02.690
Image Location	México
Latitude	19.57
Longitude	261.09
Pass Direction	Descending



GLOSARIO

Banda Espectral. Este termino es referido a una selección de longitudes de onda con comportamientos electromagnéticos similares.

Color Falso. Es una representación visual donde la información se despliega en tres bandas asignado a cada una de ellas tonos de los colores rojo, verde y azul.

Energía Electromagnética. Energía propagada a través del espacio o de otro medio material en un modelo armónico ondulatorio con un componente magnético y otro eléctrico.

Espectro Electromagnético. Se trata de la agrupación de la radiación electromagnética en distintas bandas, definidas por la longitud de onda o la frecuencia, que presentan un comportamiento radiométrico similar.

Frecuencia. Número de ondulaciones de un movimiento vibratorio en la unidad de tiempo. Para una vibración determinada, está en razón inversa de la longitud de onda. Su unidad es el *ciclo*, que es un periodo por segundo.

Imagen. Cualquier forma de representación pictórica de los datos no obtenida por medios fotográficos.

Micro-ondas. Porción del espectro electromagnético comprendido entre 1 mm y 1m.

Nivel de gris. Es una representación visual donde la información se despliega en una sola banda, es decir un elemento de pixel. Generalmente se asigna un tono oscuro a un valor "0" y un valor claro al "255".

Pixel. Picture Element. Es el elemento más pequeño de una imagen que puede ser procesado.

Plataformas de observación. Se entiende por plataformas de observación a los vehículos, tripulados o no, en los que se instalan los sensores destinados a la observación de la superficie de la Tierra. Las características de la plataforma determinan fundamentalmente la periodicidad de observación (resolución temporal) y en menor medida la resolución espacial de las observaciones. Las plataformas de observación pueden ser de tipo esporádico, como aviones, helicópteros o naves espaciales, o de tipo semipermanente como los satélites de observación de la tierra situados en órbitas polares o ecuatoriales.

Radar. Sistema activo de micro-ondas que emite un haz energético sobre la superficie terrestre para luego recoger su reflexión sobre ella. Existen dos tipos de radar: el lateral, y el de apertura sintética.

Radiación. El proceso en que la energía electromagnética es propagada a través del espacio libre.

Radiómetro. Instrumento de medición de la energía radiada por las superficies con una longitud de onda de milímetros o centímetros.

Resolución. Es la medida de la habilidad de un sistema sensor para discriminar información dentro de la imagen. Refiere al tamaño de la mínima unidad de información en el terreno (espacial), al número de bandas disponibles (espectral), a los niveles de codificación (radiométrica) o a la frecuencia de cobertura (temporal).

Ruido Atmosférico. Son interferencias imprevistas y mas o menos aleatoria que introduce una degradación en los datos originales.

Ruido de la Escena. Concepto que refiere a la variabilidad espectral hallada en el interior de las distintas clases temáticas.

Segmentación. Partición de una imagen en regiones que pueden o no tener un significado relativo a la escena respectiva.

Sensor. Cualquier instrumento que detecte energía electromagnética, la convierte en una señal y la presenta de forma susceptible de ser aprovechada para su estudio.

Sistema Activo. Se habla de sensores activos, cuando son capaces de emitir sus propias ondas electromagnéticas, y grabar posteriormente el haz reflejado por el objeto bajo estudio.

Sistema de Información Geográfica. Conjunto de programas que permiten almacenar, recuperar, modificar y combinar cualquier tipo de variables georeferenciadas.

Sistema Pasivo. Un sistema sensor que detecta la radiación emitida desde el objetivo o reflejada por él.

Transponder. Es un rango de frecuencia para la transmisión de un satélite. Los satélites actuales operan a una frecuencia de entre 4-6 GHz. Aunque otros alcancen frecuencias de hasta 12 GHz.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

1. *Chuvieco, Emilio.*
"Fundamentos de Teledetección Espacial"
Editorial RIALP
Tercera edición. Diciembre de 1996.
Pags. 23-144
2. *Li, S. Z.*
"Markov Random Field Modeling in Computer Vision"
Editorial Springer.
Pags. 1-21, 30-35, 207-209
3. *Kernighan, Brian W., et. al.*
"El Lenguaje de Programación C"
Segunda Edición. México 1991.
Pags. 103-134, 266-270
4. *Trackett, Jack Jr., et. al.*
"LINUX"
Editorial Prentice Hall.
Segunda Edición. 1996.
5. *Mensa, D. L. :*
"High resolution radar cross-section imaging",
Editorial Artech House.
1991

Direcciones Electrónicas

Teledetección.

- www.grupoatlas.com/atlas/castillo/index.html
- www.ran.es/personal/felix/camara.html#c1A3
- www.uco.es/~infoscit/teledeteccion/
- www.urc.es/pagines/sats/sateli1_cas.htm
- www.pmel.noaa.gov/data_rescue/satellite/intro.html
- www.ija.csic.es/tele/rsweb/sensor.htm
- www.ija.csic.es/tele/rsweb/indice1.htm
- www.uco.es/docinv/invest/ayudas/apoyo_invest/scit/teledeteccion/teledeteccion.htm
- hp.fciencias.unam.mx/revista/soluciones/30s/No34/telecom2.html
- asd-www.larc.nasa.gov/SCOOL/Spanish/definition-sp.html
- gias720.dis.ulpgc.es/Doctorado/B18.html

NASA

- www.nasa.com.gov
- www.netins.net/showcase/scg/nasa.html
- www.ksc.nasa.gov/
- webhead.com/wwwvl/astronomy/nasa.html
- www.okstate.edu/aesp/AESP.html
- www2.bc.edu/~lazarewi/nasa.html
- www.idb.com.au/dcottle/pages/nasa_link.html

ESA

- www.esrin.esa.it/
- www.esa.int/gallery/pag0.html
- www.cnes.fr/
- helio.estec.esa.nl/ulysses/
- www.esa-search.com/

Organización NOAA

- www.pmel.noaa.gov/
- www.ccrs.nrcan.gc.ca/
- www.qcom.com/
- www.noaa.gov/
- www.history.noaa.gov/
- www.nesdis.noaa.gov/
- psbgsi1.nesdis.noaa.gov:8080/noaasis.html
- pegasus.nesdis.noaa.gov/pathfinder.html
- www.noaa-news.noaa.gov/stories/s178.htm
- www.publicaffairs.noaa.gov/grounders/satellites.html

Satélites SPOT

- www.spotimage.fr/
- www.nma.embrapa.br/projetos/cana/spot.html
- spot4.cnes.fr/spot4_gb/index.htm
- www.dgi.inpe.br/html/spot.htm
- www.spotimage.fr/home/system/welcome.htm
- www.spotimage.fr/satellite-imagery.htm
- www.csrnr.ncu.edu.tw/english.ver/service/resource/spot/spot.html

Satélites GOES

- www.ssec.wisc.edu/
- www.vas-das.com/Goes8/realtime8.htm
- www.ngdc.noaa.gov/stp/GOES/goes.html
- rsd.gsfc.nasa.gov/goes/text/goes8results.html
- rsd.gsfc.nasa.gov/goesb/chesters/web/goesproject.html
- [ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/rs/sat/goes/home.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/rs/sat/goes/home.rxml)
- www.powerplace.com/weather/goes.html
- goes1.gsfc.nasa.gov/nq_docs.htm

Satélites LANDSAT

- observe.ivv.nasa.gov/
- ls7pm3.gsfc.nasa.gov/
- daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAIGN_DOCS/LAND_BIO/
- www.ltid.inpe.br/selper/image/espanhol/
- gromit.mcc.ac.uk/chestdocs/nrsc.html
- biobulletin.amnh.org/biobulletin/story654.html
- www.cct.mcan.gc.ca/ccrs/tekrd/satsens/sats/landsatf.html
- joy.gsfc.nasa.gov/missions/landsat.html
- ltpwww.gsfc.nasa.gov/landsat7/lesson1.html
- www.gallaudet.edu/~msellswo/satellites/landsat.brk.html
- fdd.gsfc.nasa.gov/missions/landsat7.html

Satélites ERS

- www.deos.tudelft.nl/ers/
- www.deos.tudelft.nl/ers/ers2info.html
- www.deos.tudelft.nl/ers/operorbs/
- www.asf.alaska.edu/dataset_documents/ers1_and_ers2_sar_complex_images.html
- earth1.esrin.esa.it/eeo/lft/eeo2.100/pgerssarpri
- earth1.esrin.esa.it/eeo/fr/eeo4.63/eeo4.80
- earth1.esrin.esa.it/eeo4.12
- esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet85/dow85.htm
- www.gfz-potsdam.de/pb1/ERS/ERS.html
- www.met.nps.navy.mil/~canorhei/
- dutlru8.lr.tudelft.nl/ers/

Teoría de Markov

- www.dcs.warwick.ac.uk/pub/reports/rr/316.html
- www.rma.ac.be/dirc/DEMOS/MRF.html
- www.ece.ucdavis.edu/ispg/3D_seg_demo/gibbs-markov.html
- scorpions.ifqsc.sc.usp.br/ifsc/ffi/grupos/instrum/visao/courses/markov/mark1.htm
- ftp-sophia.inria.fr/pastis/theses/theseKato

Mapas de la Ciudad de México

- www.guiaroji.com.mx
- www.inegi.gob.mx