

**Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada**



**Análisis Comparativo de los Cuerpos de Agua y la Vegetación
Entre California, Estados Unidos y Baja California, México
Utilizando Sensores Remotos**

**TESIS
MAESTRIA EN CIENCIAS**

BERTHA AMALIA SERRATO DE LA CRUZ

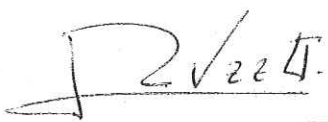
ENSENADA BAJA CFA, MEXICO AGOSTO DE 2005

APROBACION DE TESIS

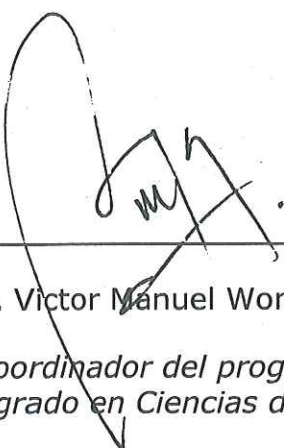
TESIS DEFENDIDA POR
BERTHA AMALIA SERRATO DE LA CRUZ
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Director del Comité


Dr. Jorge Torres Rodríguez
Miembro del Comité


Dr. Rogelio Vázquez González
Miembro del Comité

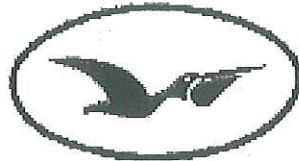

Dr. Thomas Gunter Kretschmar Steinle
Miembro del Comité


Dr. Víctor Manuel Wong Ortega
*Coordinador del programa en
posgrado en Ciencias de la Tierra*


Dr. Raúl Ramón Castro Escamilla
Director de Estudios de Posgrado

29 de Agosto del 2005

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



CICeSE

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS CUERPOS DE AGUA Y LA VEGETACIÓN
ENTRE CALIFORNIA, ESTADOS UNIDOS Y BAJA CALIFORNIA, MÉXICO
UTILIZANDO SENSORES REMOTOS**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:


BERTHA AMALIA SERRATO DE LA CRUZ

Ensenada, Baja California, México. Agosto del 2005.

RESUMEN de la tesis de **Bertha Amalia Serrato de la Cruz**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA. Ensenada, Baja California.

ANALISIS COMPARATIVO DE LOS CUERPOS DE AGUA Y LA VEGETACION ENTRE CALIFORNIA, ESTADOS UNIDOS Y BAJA CALIFORNIA, MEXICO UTILIZANDO SENSORES REMOTOS

Resumen aprobado por:



M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Director de Tesis

La franja fronteriza entre California, EUA y Baja California, México, a pesar de compartir cuencas hidrológicas, condiciones similares en la fisiografía y del clima, existe una clara diferencia en la cubierta vegetal entre ambos países vista desde la perspectiva de las imágenes satelitales, siendo más vigorosa en California. De igual manera, la diferencia en el número de embalses se hace evidente en las imágenes de satélite, con un mayor número del lado de California. Para hacer una estimación cuantitativa de éstas diferencias, se realizó un análisis comparativo de los cuerpos de agua y de la vegetación sobre una franja de 100 km a ambos lados de la frontera, aplicando técnicas de procesamiento digital a imágenes satelitales del Mapeador Temático (TM) LANDSAT tomadas en los años de 1984, 1990 y 2000.

Para detectar el agua superficial, se aprovecha la fuerte absorción del agua a la radiación infrarroja de onda corta capturada por la banda 5 del sensor TM (1.55-1.75 micrómetros). Se aplica la técnica de segmentación del histograma a la banda 5 y al cociente de ésta banda con las bandas 3, 2 y 1 del sensor, presentando los mejores resultados el cociente de bandas 5/1. Para reducir la confusión en la detección de cuerpos de agua inducida por las sombras en las zonas con alto relieve, se reforzó el método apoyándonos en un modelo digital de elevación, prediciendo las zonas sombreadas a partir de la posición del Sol (azimut y elevación) al momento de la toma de la imagen LANDSAT. Se estimó el área de los cuerpos de agua continentales en la vertiente del pacífico para las imágenes procesadas.

Para la vegetación se utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) con el fin de cuantificar la respuesta de la vegetación en zonas agrícolas y de vegetación natural de la sierra en ambos lados de la frontera. Se define para la zona de estudio y para las fechas de las imágenes analizadas, la distribución espacial del índice de vegetación y las diferencias entre ambas Californias bajo un mismo régimen de uso del suelo.

Palabras Clave:

Índices de vegetación, Cuerpos de agua, California-Baja California, Landsat TM.

ABSTRACT of the thesis presented by **BERTHA AMALIA SERRATO DE LA CRUZ** as a partial requirement to obtain the **MASTER IN SCIENCES** degree in **GEOLOGY**. Ensenada Baja California, August 2005.

COMPARATIVE ANALYSIS OF WATER BODIES AND VEGETATION IN THE CALIFORNIA-BAJA CALIFORNIA BORDER REGION USING REMOTE SENSORS.

The California-Baja California border region although they share watersheds, similar climate and landscape, there is a big contrast in the vegetation cover between the two countries as seen from remote sensors, with a stronger signature in the California side. Likewise, the water bodies can be seen from remote sensors with a larger number in the USA side. To do a quantitative estimate of these differences, a comparative analysis of vegetation and water bodies along a strip of 100 km from both sides of the border using remote sensing techniques using Landsat TM images from 1984, 1990 and 2000.

The strong absorption of water to short wave infrared radiation captured by band 5 of TM Landsat sensor (1.55-1.75 micrometers) is used to detect water bodies. The histogram segmentation technique is used with TM band 5 and with 5/1, 5/2 and 5/3 band ratios having better results with the 5/1 ratio. To mitigate the water bodies classifier confusion induced by shades from terrain relief, the method was reinforced with a shaded zones prediction technique using the sun position information when the Landsat scenes were captured and a digital elevation model. The aerial extent of detected water bodies is estimated.

The normalized difference vegetation index (NDVI) is used to estimate the vegetation greenness in the agricultural valleys and in natural vegetated areas along the mountains on both sides of the border. The spatial distribution of the NDVI and the differences between zones with the same land use regime is presented for the images analysed.

Keywords: Vegetation index, water bodies, California-Baja California, Landsat TM.

DEDICATORIA

A Paulina de la Cruz y M.C. Lourdes Serrato

por darme su apoyo incondicional en todo momento y por ser un ejemplo en mi vida
impulsandome siempre para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Al Geólogo Arturo Montiel

por su paciencia y comprensión durante en desarrollo del presente trabajo.

A mi director de Tesis, M.C. Alejandro Hinojosa por ser la segunda tesis que me dirige y por su apoyo para la conclusión de este trabajo, por su enseñanza y disciplina en todo momento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCION	1
II. ANTECEDENTES	3
<i>II.1 El agua en la zona fronteriza entre California, Estados Unidos y Baja California, México.....</i>	<i>3</i>
<i>II.2 El agua en Baja California, México</i>	<i>4</i>
<i>II.3 El Agua en California, Estados Unidos.....</i>	<i>6</i>
<i>II.3.1. Presas de almacenamiento en el Río Colorado</i>	<i>9</i>
<i>II.3.2 Presas de derivacion</i>	<i>11</i>
<i>II.3.3. Presas y recursos subterráneos de agua en la vertiente hacia el pacífico de la sierra</i>	<i>12</i>
<i>II.3.4. Presas de agua en California, USA</i>	<i>14</i>
<i>II.4. Programa LANDSAT.....</i>	<i>16</i>
III. JUSTIFICACIÓN	18
IV. OBJETIVO GENERAL	19
<i>IV.1 Objetivos Particulares</i>	<i>19</i>
V. MATERIALES Y MÉTODOS	20
<i>V.1 Materiales</i>	<i>20</i>
<i>V.1.1. Programas computacionales.....</i>	<i>20</i>
<i>V.1.2. Imágenes Landsat que cubren la zona de estudio</i>	<i>20</i>
<i>V.1.3 Información espacial utilizada</i>	<i>22</i>
<i>V.2 Métodos</i>	<i>25</i>
<i>V.2.1. Espectro electromagnético y reflectividad en la superficie terrestre</i>	<i>27</i>
<i>V.2.2. Composición y procesamiento de imágenes satelitales Multiespectrales.....</i>	<i>29</i>
<i>V.2.3. Segmentación del histograma</i>	<i>31</i>
<i>V.2.4. Cociente de bandas</i>	<i>34</i>
<i>V.2.5. Sombras producidas por el relieve del terreno ...</i>	<i>34</i>
<i>V.2.6. Índice de vegetación</i>	<i>38</i>
VI. APLICACIÓN Y RESULTADOS	41
<i>VI.1. Caracterización de cuerpos de agua</i>	<i>41</i>
<i>VI.1.1. Detección de cuerpos de agua y definición de transectos utilizando la banda 5 del sensor Landsat TM ...</i>	<i>41</i>
<i>VI.1.1.1. Selección del umbral</i>	<i>44</i>
<i>VI.1.1.2. Clasificación de cuerpos de agua con B5 de imagen Landsat TM</i>	<i>45</i>
<i>VI.1.2. Análisis de reflectividad de zonas sombreadas en B5...</i>	<i>47</i>
<i>VI.1.3. Cociente de bandas</i>	<i>49</i>
<i>VI.2. Detección de zonas productoras de sombras</i>	<i>55</i>

CONTENIDO (continuación)

	Página
<i>VI.3. Generalización del método de detección de cuerpos de agua aplicado a Imágenes Landsat TM de 1990 y 2000</i>	56
<i>VI.4. Índice de vegetación</i>	62
<i>VI.4.1. Selección de regiones de interés</i>	62
<i>VI.4.2. NDVI para zonas agrícolas en el delta del río Colorado</i>	64
<i>VI.4.3. NDVI en zonas de vegetación natural ...</i>	67
VII. CONCLUSIONES	72
BIBLIOGRAFIA	74

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Usos del agua en la región de Baja California. Fuente: Plan nacional del agua 1990	5
2	Población de California esperada para el 2020. Modificada de CWP 160-98	7
3	Principales usos del agua en California en la década de 1990. Fuente CWP bulletin 160-98	8
4	Red hidrográfica y sistema de presas en Estados Unidos a través del Río Colorado	10
5	Imagen Landsat TM 2000. Compuesto a color real que muestra las presas de agua en la vertiente del océano pacífico de Estados Unidos y México	15
6	Coordenadas en pase/renglón de las imágenes Landsat que cubren la zona de estudio según el sistema de referencia WRS2	21
7	Precipitación mensual en mm reportada por 3 estaciones en el estado de Baja California durante el período de 1980 a 2000 y la ubicación en el tiempo de las imágenes Landsat TM utilizadas en el estudio	23
8	Diagrama que muestra la metodología a seguir para el procesamiento de las imágenes Landsat TM	26
9	Curvas de reflectancia típica de materiales comunes en la superficie terrestre en función de la longitud de onda en micrometros y ventanas espectrales del sensor TM	28
10	Imagen Multiespectral	30
11	Imagen en escala de gris de la banda 5 de la presa el Carrizo y su histograma, presentando dos modas, la moda con los valores mas bajos del histograma corresponden al agua y los más altos a tierra	32
12	Elevación y azimut del sol en el momento de la toma de la imagen. La posición del sol determinará las zonas productoras de sombras. (Modificada de G. Frank, 2001)	36
13	Ubicación de transectos sobre los cuerpos de agua detectados visualmente	41
14a	Transectos para analizar la transición en los valores de la imagen en la banda 5 de Tierra-Agua-Tierra en el Mar Salton.....	42
14b	Transectos para analizar la transición en los valores de la imagen en la banda 5 de Tierra-Agua-Tierra en la presa López Zamora.....	42

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
15	Perfil de valores en la banda 5 del sensor TM a lo largo de transectos Tierra-Agua-Tierra sobre 7 cuerpos de agua de la zona de estudio. En la parte central de todas las curvas se ve claramente la baja respuesta del agua, esto debido a la gran absorción del agua en la ventana espectral de los 1.55-1.75 μm del espectro electromagnético	43
16	Valor de los pixeles en banda 5 a lo largo de los transectos en cuerpos de agua seleccionados visualmente	44
17a	Áreas donde la banda 5 detecta sombras como cuerpos de agua con un umbral de 40. Notar la orientación de las zonas con respecto a los 122 grados en azimut del sol a la hora de toma. a) Zona indicadas en blanco y que incluye los cerros Buena Vista, Animas y Soledad sur de Ensenada, B.C. México	47
17b	Zonas en la sierra de San Pedro Mártir donde se detectan las sombras como cuerpos de agua en color azul. Estas se ubican en las laderas Noreste de la Sierra, con orientación perpendicular al azimut del sol.....	47
18	Valores digitales a lo largo de transectos en agua en tonos claros y sombras en líneas oscuras en la banda 5 del sensor Landsat TM en imagen del 1984	48
19	Reflectividad media en 6 bandas de imagen Landsat TM en polígonos delineados sobre muestras de 12 cuerpos de agua en imagen de la zona de estudio de 1984	50
20	Valores medios de cocientes de bandas TM 5/1, 5/2 y 5/3 dentro de polígonos de muestreo	51
21	Resultado de Cociente 5/1 aplicando umbral ≤ 0.161 sobre un mosaico de imágenes Landsat TM de 1984 que representa las zonas de sombras en color rojo y amarillo	53
22a	Lago Morena detectado con umbral 40 en banda5	54
22b	Lago Morena detectado con umbral 0.161 en cociente 5/1	54
23	Zonas productoras de sombras calculadas a partir del MDT y para un azimut y elevación del sol de 115 y 58 grados respectivamente, parámetros representativos de las imágenes LANDSAT utilizadas. En este caso se aplico una ventana angular de Δ° de 45°	55
24	Imagen Landsat TM de 1990 cuyo mosaico en blanco y negro se sobrepone el Cociente 5/1 umbral ≤ 0.3 en color azul claro. Obtenida de usar el paso 2 del procedimiento propuesto para detectar grandes cuerpos de agua	58

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
25	Mosaico en blanco y negro del 24 de Abril del 2000 formado por los pases 40/37 y 40/38 mostrando los cuerpos de agua detectados usando umbral ≤ 0.3 en color azul claro. Usando paso 2 del procedimiento para detectar grandes cuerpos de agua .	59
26a	Imagen de 1984 con umbral 0.161 y una área estimada de 1850	61
26b	Imagen de 1990 con umbral 0.3 y una área estimada de 523	61
26c	Imagen del 2000 con umbral 0.4 y una área estimada de 1580 ...	61
27	Delimitación de polígonos sobre el paso 38 de Landsat entre California y Baja California con uso del suelo agrícola, urbano y vegetación natural en la zona fronteriza. Sobre estas zonas se calculó el índice de vegetación NDVI en ambos lados de la frontera y así poder el valor del índice bajo un mismo régimen de uso del suelo	63
28	NDVI en imagen de 1984. Tonos verdes corresponden a valores positivos de NDVI, tonos oscuros indican nula o poca vegetación con valores de NDVI cercanos a cero. En este año se presentaron flujos extraordinarios en el delta del río Colorado ...	65
29a	NDVI en Imagen de 1990. En este año en el delta del Colorado se encontraba con flujos normales, observamos el gran contraste entre Valle imperial y Valle de Mexicali	66
29b	Histograma del NDVI del Valle Imperial en 1990 y sus valores estadísticos	66
29c	Histograma del NDVI del Valle de Mexicali en 1990 y sus valores estadísticos	66
30	Imagen Landsat de 1984 que muestra las zonas de vegetación natural en ambos lados de la frontera en base al índice de vegetación, tomando únicamente valores positivos. Se muestran también valores estadísticos del NDVI	68
31	Imagen Landsat de 1990 que muestra las zonas de vegetación natural en ambos lados de la frontera en base al índice de vegetación, tomando únicamente valores positivos. Se muestran también valores estadísticos del NDVI	69
32	MDT que representa las alturas en metros en ambos lados de la frontera y su estadística	70

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Presas en el Río Colorado (Roman Calleros, 1998)	9
II	Fuentes de agua potable en la ciudad de Tecate B.C. (CESPT) ...	13
III	Fuentes de agua en la ciudad de Ensenada. B.C. en el 2003	14
IV	Bandas espectrales del sensor Landsat TM Información recopilada del Programa Earth Resources Technology Satellite (ERTS), USGS 2003	17
V	Características técnicas en las imágenes Landsat TM para la zona de estudio	24
VI	Prueba de umbrales en la banda 5 sobre la imagen TM de 1984 para la presa El Carrizo en Baja California, México y el Lago Morena en California, USA. Entre mayor es el umbral, mayor es el área detectada del cuerpo de agua	46
VII.	Valores medios de muestras de agua como resultado de la estadística de polígonos delineados en cuerpos de agua en imágenes LANDSAT de 1984	50
VIII	Resultados de los análisis de umbrales para los cocientes en base a las medias de las muestras de agua.....	52
IX	Análisis comparativo de las áreas de los cuerpos de agua detectados aplicando cociente 5/1 en los mosaicos 1984,1990 y 2000 de la zona de estudio	60

LISTA DE FORMULAS

Formula		Página
1	Interacciones de Energia	27
2	Método de Dozier y Strahler para estimar la pendiente y el aspecto del terreno.....	37
3	Método numérico para estimar derivadas	37
4	Convolución de la matriz del MDT con matrices de coeficientes direccionales	37
5	NDVI	40

ANALISIS COMPARATIVO DE LOS CUERPOS DE AGUA Y LA VEGETACION ENTRE CALIFORNIA, ESTADOS UNIDOS Y BAJA CALIFORNIA, MEXICO UTILIZANDO SENSORES REMOTOS

I. INTRODUCCION

La percepción remota se puede definir como la obtención de información a distancia, es decir, no se tiene contacto directo con la superficie del terreno. Satélites de observación de la Tierra captan imágenes de grandes áreas de terreno dentro de bandas espectrales angostas (Goetz *et al.*, 1985), en longitudes de onda diferentes a las del sistema visual humano, lo cual posibilita acceder a información diversa, antes imperceptible, y distinguir así nuevas características en los elementos y las unidades del terreno.

A través de los sensores remotos y del tratamiento digital de la información, podemos efectuar operaciones y cálculos de manera rápida y con posibilidades de discriminación mucho más allá de los límites de la percepción visual. El tratamiento digital de las imágenes de sensores remotos permite un manejo numérico, apartándose de la valoración subjetiva, propia del análisis visual clásico (Alzate, 2000). La aplicación de sensores remotos ha jugado un papel importante en la construcción de mapas, planos, interpretación de recursos y sus superficies, planificación territorial y estudios urbanos. La tendencia actual es hacia el incremento de su utilización dado el avance tecnológico, el desarrollo de la computación y los bajos costos en la obtención de imágenes.

Para estimar cuantitativamente la cubierta de la vegetación, es común utilizar el índice de vegetación de diferencia normalizada conocido como NDVI por sus siglas en inglés

(Richards,1986; Chuvieco *et al.*, 2001; Hori, 1998; Nagler *et al.*,2002; Mexicano Vargas, 2004). Con este índice es posible cuantificar lo que en las imágenes satelitales de la zona fronteriza entre California y Baja California se observa, una gran diferencia en la respuesta de la vegetación en zonas agrícolas y urbanas.

Existen varias técnicas de procesamiento digital de imágenes para estudiar cualitativa y cuantitativamente cuerpos de agua a partir de medidas espectrales obtenidas por satélites, muchas de ellas han sido analizadas y ejecutadas en distintas aplicaciones (Bava y Pierini,2003; Degioanni *et al.*, 2002;García y Pérez,1999; Lunetta y Balogh,1999; Smit, P.,2001, Frazier y Page, 2000). En el presente trabajo se utilizan técnicas para detectar cuerpos de agua en la zona fronteriza entre California, E.U.A. y Baja California, México ya que es una zona desértica cuyo desarrollo depende fuertemente de la disponibilidad de agua y de las medidas que se adopten para garantizar su abastecimiento, en especial en situaciones de sequía. Existe una fuerte dependencia de agua del río Colorado, como la principal fuente para esta región. Las cuotas asignadas entre los dos países son cuidadosamente vigiladas. Los desarrollos urbanos y la agricultura compiten por el escaso volumen disponible. El medio ambiente, como usuario del agua, es relegado con la más baja prioridad y no tiene una entidad que reclame su cuota como legítimo usuario para mantener ecosistemas que dependen de ella. El uso del agua en zonas urbanas también es muy distinto en ambos lados de la frontera. Mientras que en el lado mexicano se usa para satisfacer necesidades básicas de la mayor parte de la población, en el lado americano un alto porcentaje es destinado al riego de parques y jardines.

II. ANTECEDENTES

II.1. El agua en la zona fronteriza entre California, Estados Unidos y Baja California, México.

Las periódicas inundaciones ocasionadas por las lluvias torrenciales, cambio climático y los deshielos de primavera, que se originan en las montañas rocallosas –parte alta de la cuenca del Río Colorado-, motivó que el gobierno de Estados Unidos de América iniciara a principios del siglo XX construcciones de grandes obras de infraestructura básica en los Estados Unidos del suroeste – California, Arizona, Nevada, UTAH, Colorado, Wyoming y Nuevo México- para controlar definitivamente los torrenciales caudales de la cuenca y aprovecharlos en producir energía eléctrica, alimentos, dotación de agua, navegación y turismo.

El principal proyecto de infraestructura para controlar y regular la parte media y baja de la cuenca se autorizó en Diciembre de 1928, la presa Hoover con una cortina de 255 metros de altura y 35 mil millones de m³ de almacenamiento. Así surgieron en varias regiones de Estados Unidos importantes presas, embalses, centrales hidroeléctricas, distritos agrícolas, hidrovías, autopistas, ferrocarriles, etc. A grado tal, que veinte grandes obras de infraestructura se construyeron simultáneamente, las cuales fueron dirigidas por la oficina de recuperación y el cuerpo de ingenieros del ejército, transformando zonas amenazadas por incontrolables ríos, territorios agrestes e improductivos y ciudades con escasez de agua, en bien planificados desarrollos urbanos, industriales y agropecuarias.

El Sumidero Salton ubicado a 60 km al norte de Calexico y a 85 m bajo el nivel del mar, se convirtió en un mar interior de 780 km² con la inundación de 1904, y a partir de entonces se conserva siempre con agua, ya que almacena las descargas del Valle Imperial, el cual utiliza el 80% de los caudales derivados para riego creando y conservando el mar interior Salton siempre lleno. El valle Imperial es abastecido de agua del río Colorado a través del canal Todo Americano (All American canal), que desvía parte de su caudal y corre paralelo a la línea fronteriza entre México y Estados Unidos. Las presas en Estados Unidos a lo largo del Colorado eliminaron las aportaciones de agua a la laguna Salada que se ubica al suroeste de Mexicali. Esta solo recibe agua cuando ocurren deshielos y escurrimientos extraordinarios y se afecta progresivamente la planicie costera, la marisma y el delta. Esto permite entender que el sistema de presas y canales desapareció la laguna Salada del lado mexicano y formó otro de superficie similar del lado norteamericano, el mar Salton.

II.2. El agua en Baja California, México.

En 1999, Baja California era la única entidad federativa que disponía de agua suficiente, al menos en ese momento, para cubrir la demanda de toda la población, durante todos los meses del año (Roman Calleros, 2001). Esto ha sido posible, gracias a que México y los Estados Unidos de Norteamérica acordaron la firma del Tratado de Aguas Internacionales, que data desde el tres de Febrero de 1944, y con lo cual ha sido posible establecer planes de desarrollo económico de la entidad, sobre las bases de disponibilidad del Río Colorado.

A pesar de disponerse de agua segura en Baja California, en los últimos años se han originado cambios significativos en los patrones de consumo en el volumen de agua

asignado a las ciudades y por ende afectando a la agricultura lo cual se refleja en el Plan Nacional del Agua de la década 90 (Figura 1). Estos cambios se han derivado del acelerado crecimiento poblacional, el incremento en la demanda de agua, la falta de lluvias y las deficiencias de manejo, entre otros aspectos.

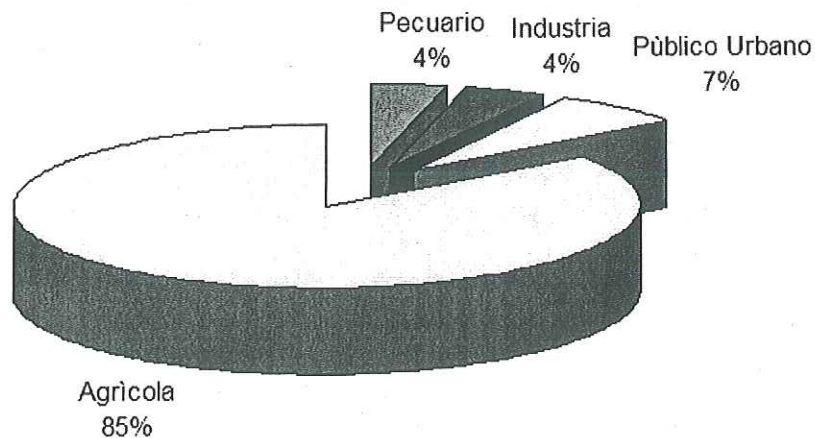


Figura 1. Usos del agua en la región de Baja California. Fuente: Plan nacional del agua 1990

Las autoridades responsables de su administración, se han visto precisados a implementar diversas medidas para contrarrestar estos consumos tan elevados, sobre todo en las ciudades de Tijuana, Tecate, Rosarito y Ensenada, por tal motivo el plan hidráulico regional creó la cultura del agua, poniendo en marcha campañas de información masiva en medios de comunicación y la incorporación en programas de educación básica, la meta es lograr una cobertura de sensibilización en el 90% de 1999 al 2020 (Programa hidráulico regional 2002-2006). En 1964 el congreso Norteamericano estableció los criterios

operativos del sistema Río Colorado, en el que se considera un escurrimiento base anual, equivalente a 20,353 millones de metros cúbicos (Mm^3) al cual también se conoce como “Escurrimiento Normal” (Román Calleros, 2001). Según este tratado (Roosevelt, *et al.*, 1944), una de las formas de entrega de agua a México, sería cuando se presentara alguna situación de excedencia al volumen anterior, y que para motivos operacionales se ha establecido como volumen máximo de entrega de excedentes a México de 2,096.934 Mm^3 de agua; otra condición de entrega sería cuando se presentara una sequía en la cuenca alta, con reducciones en el volumen de entrega a México, en la misma proporción que se realice en los usuarios de la cuenca, del lado norteamericano.

Derivado de lo anterior es preciso mencionar que hasta ahora, el desarrollo urbano de las ciudades de Baja California ha sido sustentado en la disponibilidad de tierra y agua agrícolas, lo que se ha presentado de manera inevitable, como parte de un fenómeno de crecimiento poblacional, pero utilizando los recursos que con antelación habían sido asignados a los usuarios agrícolas, es decir, los usos originales solo consideraban el uso agrícola, pero no así el uso urbano o el industrial, ya que en Mexicali en 1944, la población de la región era incipiente, por lo que lo más importante era asegurar una fuente de agua a los usuarios agropecuarios.

II.3. El Agua en California, Estados Unidos

Se espera que el crecimiento de la población conduzca a incrementar la demanda del agua. Para poner a la población de California en perspectiva, alrededor de uno de cada 8

residentes de Estados Unidos vive en California. Durante el período de 1995-2020 se pronostica que la población de California se incremente en más de 15 millones, el equivalente de sumar la población actual de Arizona, Nevada, Oregon, Idaho, Montana, Wyoming, Nuevo México, y Utah a California (CWP 1998) como vemos en la Figura 2.

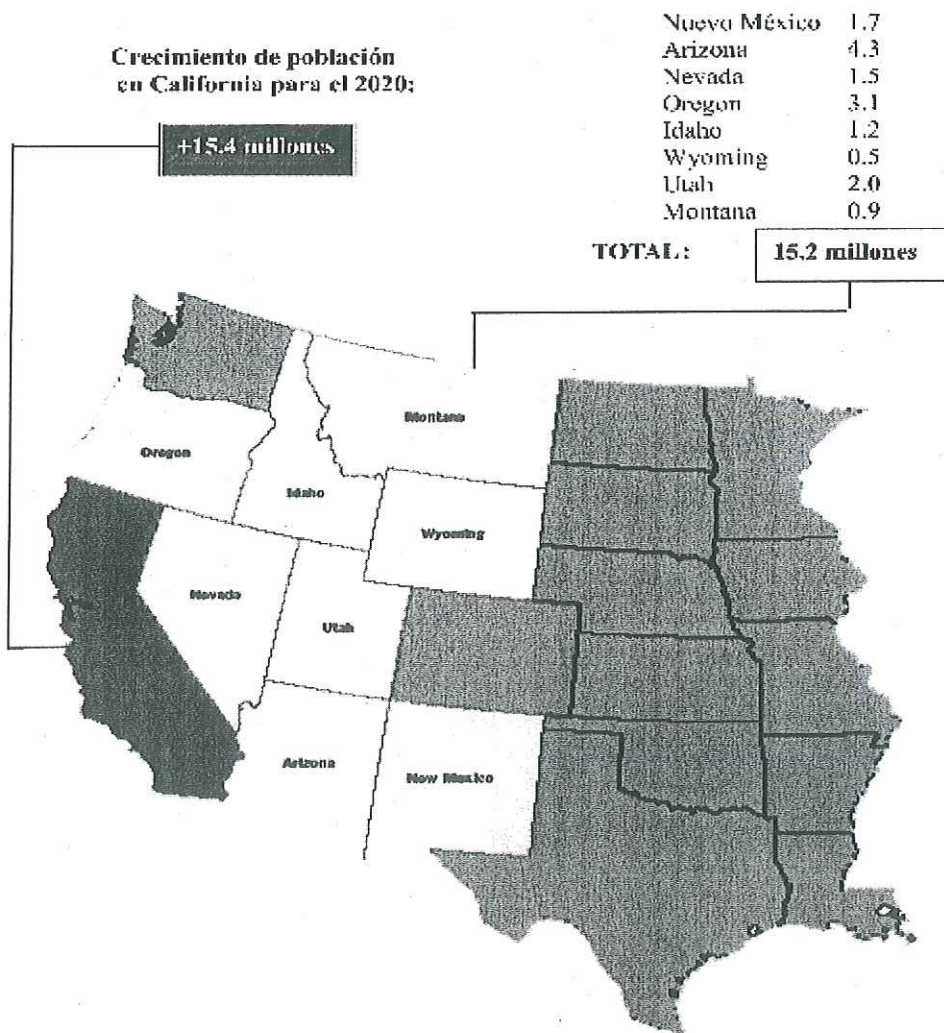


Figura 2. Población de California esperada para el 2020. Modificada de CWP 160-98

En la Figura 3 se muestran los principales usos del agua en el estado de California en la década de los 90. El uso urbano incluye el uso del agua residual, comercial e industrial, mientras que ciertas cantidades de agua han sido apartadas o manejadas de otro modo para propósitos del medio ambiente, y no pueden usarse para otros propósitos en localidades donde el agua se ha reservado.

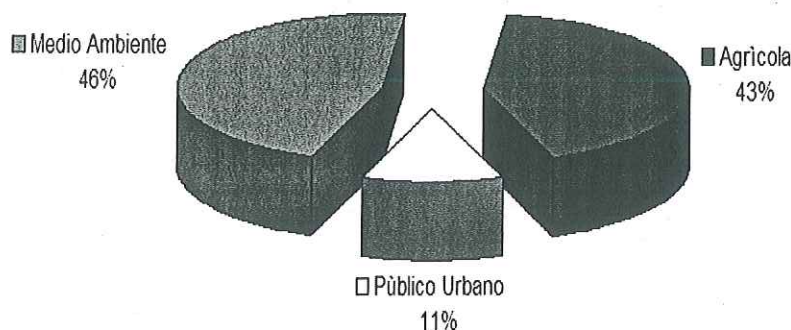


Figura 3. Principales usos del agua en California en la década de 1990. Fuente CWP bulletin 160-98.

El uso del agua del medio ambiente puede cuantificarse de diferente manera que la del agua de uso urbano y agrícola, la mayoría del uso del agua del medio ambiente es llevada por legislativos o procesos regulatorios. Desde 1968 el acta de “ National Wild and Scenic Rivers “ se encarga de preservar ríos de flujo libre que tengan un notable valor como recurso natural, prohibiendo a las agencias federales la construcción, autorización o creación de proyectos con recursos de agua que tengan un efecto adverso sobre los valores

para los cuales el río fue designado. En 1972, el acta “ California Wild and Scenic Rivers “ prohíbe la construcción de cualquier presa, reservorio o sitio de diversión en ciertos ríos protegidos.

II.3.1. Presas de almacenamiento en el Río Colorado

En la Figura 4 se observa la red hidrográfica y el sistema de presas en Estados Unidos a través del Río Colorado y en la Tabla I se describen algunas de ellas.

Tabla I. Presas en el Río Colorado (Roman Calleros, 2001).

Lago	Formado por la presa (longitud-capacidad)	Comentarios
Powell	Glen Canyon 375,000 Mm ³	Es la cuarta mas alta de EU. Consta de un vertedero en cada respaldo, el cual consiste en un canal de aproximación a las estructuras de toma y un túnel de inclinación hacia el deflector para dirigir el agua hacia el centro y aguas abajo.
Mead	Hoover 35,000 Mm ³	Provee la mayor parte del almacenamiento y control del Río Colorado junto con la Presa Glen Canyon, se genera la mayor parte de la electricidad que se consume en el oeste norteamericano
Mohave	Davis 107 km 2,270 Mm ³	Se construyó por el gobierno Norteamericano como parte de los acuerdos del tratado de 1944, donde también se acordó la construcción de la presa derivadora Morelos en México. Durante los niveles altos de agua, este embalse se extiende al canal de descarga de la presa Hoover..
Havasu	Parker 72.4 km 700 Mm ³	Surge el sistema de acueductos que conducen las aguas hacia las ciudades de Los Ángeles y San Diego, además de sus respectivas áreas metropolitanas (vía el acueducto del Río Colorado) y hacia Arizona, (mediante el acueducto central de Arizona).

En suma, la capacidad de almacenamiento de estas presas es del orden de los 77,477 Mm³ es decir, tan solo estas cuatro presas que tienen la capacidad de almacenar el volumen

equivalente al escurrimiento base anual del Río Colorado, por cuatro años seguidos, eso sin considerar los pequeños volúmenes que puedan ser almacenados en otras estructuras adicionales del sistema (Roman Calleros, 2001).

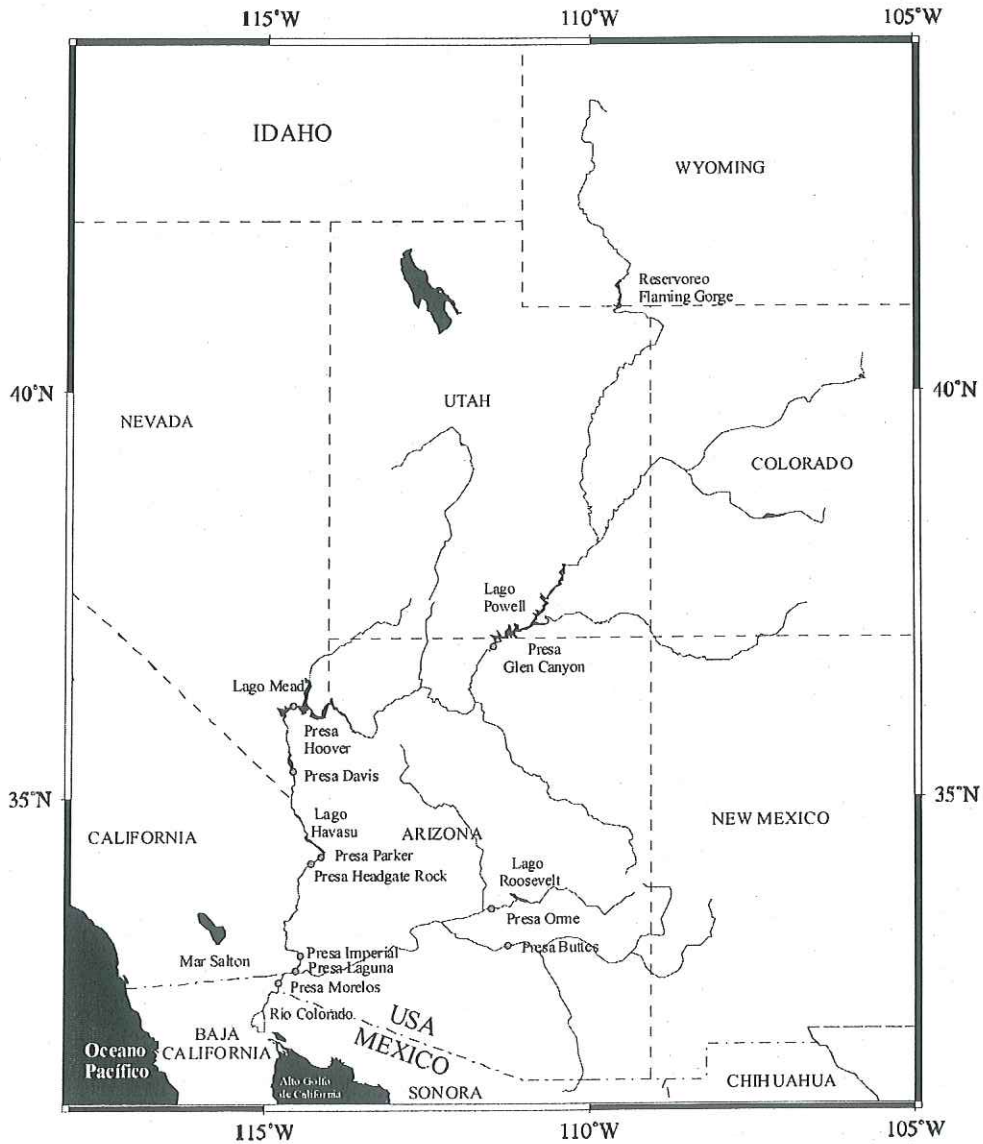


Figura 4. Red hidrológica del Río Colorado y sistema de presas en Estados Unidos a lo largo de su cauce.

II.3.2 Presas de derivación

Se distinguen de las anteriores, en que las obras hidráulicas no cuentan con ninguna capacidad de almacenamiento, ya que desde el punto de vista técnico hidráulico, son estructuras que solo se utilizan para controlar el flujo del cauce y derivar y/o desviar volúmenes excedentes en diferentes direcciones (Román Calleros, 2001).

La presa Imperial es la principal estructura derivadora hacia productos de riego agrícola en las áreas de Valle Imperial y Yuma, donde precisamente nace el canal Todo Americano que abastece a los valles de Imperial y Coachella, y el canal principal Gila Gravity, que abastece al valle de Yuma, Arizona (Roman Calleros, 2001).

La Presa Morelos es la estructura hidráulica más al sur del sistema Río Colorado, y se ubica precisamente en la línea limítrofe entre los estados de Baja California, México y el Estado de Arizona, Estados Unidos. La Presa Morelos entrega agua al Distrito de Riego 014 del Río Colorado, a las ciudades de Mexicali, B.C. y San Luis, río Colorado, Sonora además de sus áreas suburbanas. Asimismo, envía agua a las ciudades de Tecate y Tijuana, a través del acueducto Río Colorado – Tijuana (Diccionario Enciclopédico de Baja California, 1989). Lograr que el vital líquido llegue hasta los hogares tijuanaenses requiere conducirlo a través de aproximadamente 100 km de canales del distrito de riego del valle de Mexicali y, posteriormente, por 140 km de tubería pertenecientes al acueducto río Colorado- Tijuana. Esto implica el vencer 1060 metros de carga, cruzando la Sierra de La

Rumorosa, ocasionando altos costos de operación, principalmente en energía eléctrica (CESPTE).

II.3.3 Presas y recursos subterráneos de agua en la vertiente hacia el pacífico de la sierra.

La presa Abelardo L. Rodríguez (1937-1938) ubicada en la ciudad de Tijuana, capta el agua producida por las lluvias, cuando estas son copiosas, permitiendo que la presa la almacene en cantidades importantes; sin embargo, estas aguas no han sido aprovechadas en su totalidad para beneficio de la comunidad, debido a la falta de infraestructura hidráulica.

La falta de seguridad para retener el agua que ocasionaban las prominentes lluvias, determinó que las fuentes locales de abastecimiento eran insuficientes; por tal motivo, desde los años 60 se iniciaron los estudios correspondientes al proyecto del acueducto Río Colorado-Tijuana, concluyendo su construcción en 1975, alcanzando en 1992 un gasto nominal de 4m^3 por segundo, agua que es transportada desde el Río Colorado (CESPT).

Probablemente la amenaza más grande para el suministro local de aguas subterráneas de Baja California es la contaminación que proviene de fuentes puntuales y no puntuales de las actividades urbanas y agrícolas. El acuífero del Río Tijuana, en la sección urbana de Tijuana, ofrece un ejemplo de los efectos negativos de la contaminación según Guzmán (1998), más de 100 pozos se abastecen de este acuífero y rinden un promedio de 6.16Mm^3 de agua por año. El suministro total de agua del acuífero en Tijuana es el 20 por ciento del

consumo de agua de la ciudad. En Tecate, esta cifra es mucho más elevada, ya que esa ciudad depende más de su acuífero local que Tijuana (Michael y Graizbord, 2002).

La Presa el Carrizo se terminó de construir en 1978 y se ubica en el municipio de Tecate B.C. Cuenta con una capacidad de 40 Mm³. Las fuentes de abastecimiento de agua potable para esta ciudad se presentan en la Tabla II

Tabla II. Fuentes de agua potable en la ciudad de Tecate B.C. (CESPT).

Fuentes	Capacidad de producción (lps)	Comentarios
30 Pozos	78	Solo operan 15 debido a los bajos niveles freáticos ocasionados por la escasez de lluvia.
Acueducto las Auras	175	Derivación del Acueducto Río Colorado y con destino a la planta potabilizadora La Nopalera.
Acueducto Carrizo-Cuchumá	100	Consiste en una toma de agua de la Presa el Carrizo, con destino a la planta potabilizadora Cuchumá

Según datos de la Comisión Estatal de Servicios Públicos en la ciudad de Ensenada (CESPE), se tiene una precipitación promedio anual (1951-2004) de 262.6 mm. Se cuenta con la Presa reguladora *Emilio López Zamora* la cual no logra llenarse nunca ya que la captación para abastecer las necesidades de agua urbana es muy baja. Exceptuando la presa López Zamora, las fuentes de agua en el 2003 provienen de pozos y se muestran en la Tabla III (Solís Alba, 2003).

Tabla III. Fuentes de agua en la ciudad de Ensenada. B.C. en el 2003.

Fuentes de Agua	Producción (lps)
Mandadero (15 pozos)	220
Valle de Guadalupe	150
Ciudad	190
Misión	180
Total Pozos	740
Planta Potabilizadora en la Presa <i>López Zamora</i>	50
Total	790

II.3.4 Presas en California, USA

Como medidas adicionales para garantizar el suministro de agua en el vecino país, se ha recurrido a la construcción de sistemas de presas para (retener) almacenar el líquido en la vertiente del océano pacífico en el área de las zonas montañosas en el estado de California, Estados Unidos. Sin embargo, como se muestra en la Figura 5, éste no ha sido un proceso comparable en ambos países, es más prolífico en el lado norteamericano, lo que le permite prepararse mejor para enfrentar condiciones de sequía y aminorar su dependencia del agua importada del río Colorado.

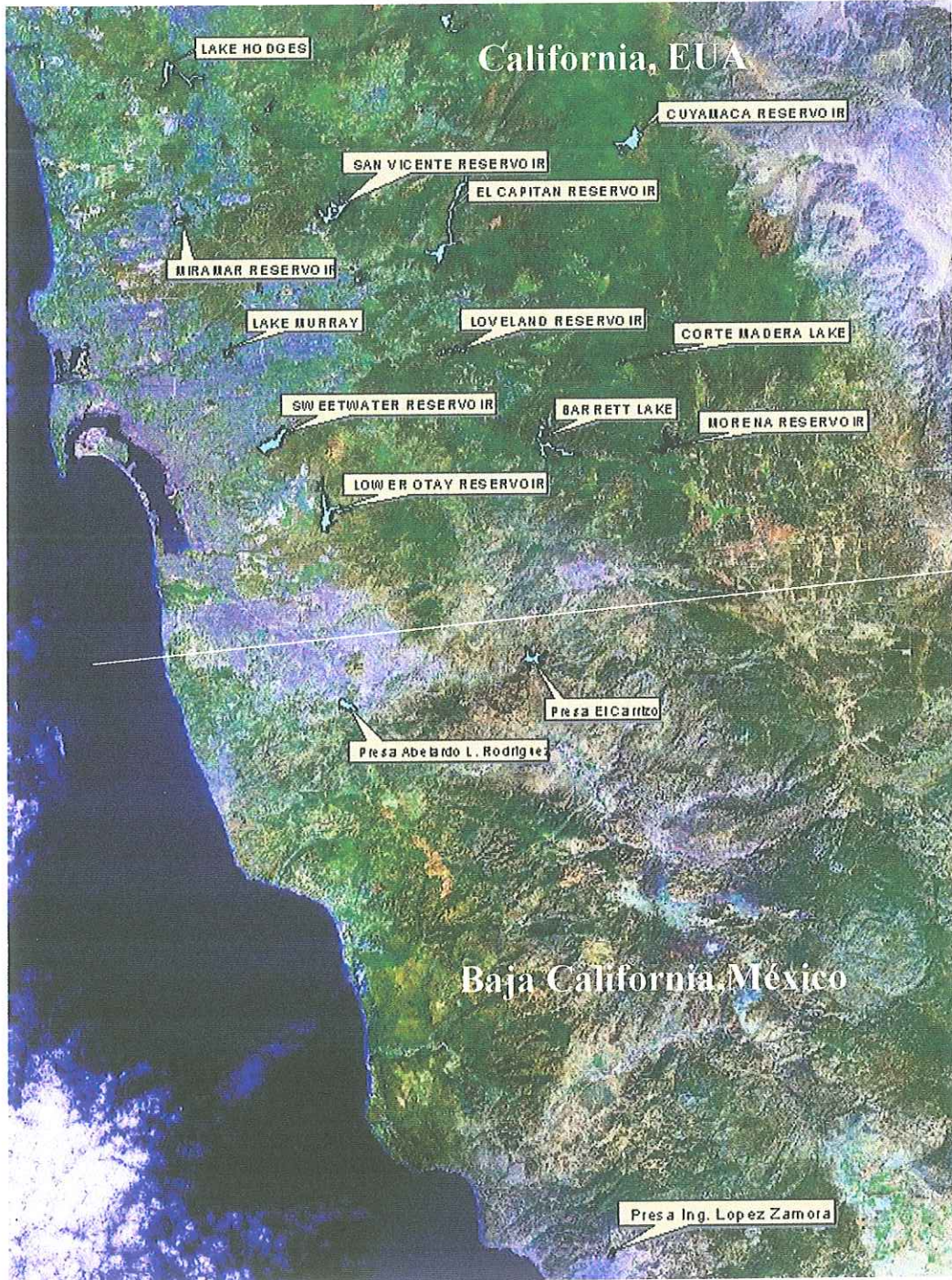


Figura 5. Imagen Landsat TM 2000. Compuesto a color real que muestra las presas de agua en la vertiente del océano pacífico de Estados Unidos y México.

Tabla IV. Bandas espectrales del sensor Landsat TM Información recopilada del Programa Earth Resources Technology Satellite (ERTS), USGS 2003.

BANDAS ESPECTRALES S	Resolución espectral μm Y resolución espacial nominal (m)	APLICACIÓN
	TM	
1 azul	0.45-0.52 (30)	Mapeo de aguas costeras, diferenciación entre suelo y vegetación, diferenciación entre vegetación conífera.
2 verde	0.52-0.60 (30)	Uso del suelo, vegetación, áreas urbanas, calidad del agua, mapeo de vegetación.
3 rojo	0.63-0.69 (30)	Absorción de la clorofila, diferenciación de especies vegetales, áreas urbanas, uso del suelo, agricultura, calidad de agua.
4 Infrarrojo cercano	0.76-.90 (30)	Delineamiento de cuerpos de agua, mapeo geológico, geomorfológico, agricultura, áreas de incendios, áreas húmedas
5 infrarrojo medio	1.55-1.75 (30)	Detección cuerpos de agua, uso del suelo, agricultura, vegetación, medidas de humedad de la vegetación, diferenciación entre nubes y nieve
7 infrarrojo medio	2.08-2.35 (30)	Identificación de minerales, mapeo hidrotermal
6 infrarrojo térmico	10.4-12.5 (120)	Mapeo de stress térmico en plantas, corrientes marinas, propiedades termales del suelo, mapeos térmicos.

III. JUSTIFICACIÓN

El eficiente aprovechamiento de recursos hidráulicos en zonas áridas es un tema de suma importancia para el desarrollo de sus comunidades. Las técnicas basadas en sensores remotos permiten tener una perspectiva de las condiciones de la vegetación y de cuerpos de agua superficiales en grandes extensiones de terreno. El vigor de la vegetación es un indicador de la disponibilidad de agua y de su aprovechamiento en zonas agrícolas. La zona fronteriza entre California y Baja California es una zona de contrastes en muchos sentidos, incluyendo la manera en que aprovechamos y administramos el agua. Este contraste se puede observar mediante imágenes satelitales y es el objeto de estudio del presente trabajo. Se propone explorar métodos para detectar cuerpos de agua utilizando el sensor multiespectral Landsat TM y las propiedades de reflectividad del agua. Se cuantificarán los contrastes en el vigor de la vegetación en ambos lados de la frontera.

IV. OBJETIVO GENERAL

- Realizar un análisis comparativo en la zona fronteriza entre California, EUA y Baja California, México de cuerpos de agua e índices de vegetación por medio de la utilización y manejo multiespectral de sensores remotos Landsat TM.

IV.1. Objetivos Particulares

- Analizar la reflectividad de los cuerpos de agua de la zona de estudio captada en imágenes del sensor Landsat TM.
- Desarrollar una metodología, utilizando algoritmos para Banda 5 del sensor Landsat TM, para detectar cuerpos de agua a través de técnicas de clasificación de imágenes como segmentación del histograma y cociente de bandas.
- Realizar un análisis comparativo de la extensión de cuerpos de agua detectados en imágenes Landsat TM de los años 1984, 1990 y 2000.
- Diseñar una metodología que permita disminuir los efectos de las sombras del relieve en la detección de cuerpos de agua.
- Realizar el cálculo de índices de vegetación comparando el vigor de la vegetación en ambos lados de la frontera bajo un mismo régimen de uso del suelo.

V. MATERIALES Y METODOS

V.1. Materiales

V.1.1. Programas computacionales

- Sistema de procesamiento de imágenes ER MAPPER 6.4
- Sistema de información geográfico ARC VIEW 3.2 para el manejo de datos vectoriales y despliegue de información espacial.

V.1.2. Imágenes Landsat que cubren la zona de estudio

Los datos de los satélites Landsat son recolectados continuamente en una órbita casi vertical polar cuando el satélite se mueve de norte a sur, los datos son divididos en forma arbitraria en escenas con 24 segundos de separación. La designación compuesta por el número de la órbita y el número del renglón es conocida como Sistema Mundial de Referencia (*World Reference System, WRS*), y es utilizado para localizar la imagen del área de estudio. En el WRS, el número de la órbita se refiere a la órbita base a que pertenece la escena del área de estudio, y el número del renglón es asociado a una latitud de referencia. Los renglones han sido posicionados en tal forma que el renglón sesenta coincide con el Ecuador, este sistema de referencia es diferente para los Landsat 1-3 y Landsat 4-7 a causa de la diferencia en altitud y ángulo de inclinación de los satélites, esto afecta el espaciamiento de las órbitas, Landsat 1-3 tiene 251 órbitas y Landsat 4-7 tiene 233 órbitas. La designación de los renglones es similar para cada grupo de satélites (Sheffner, 1994). Se conoce como WRS1 el Sistema asignado a satélites Landsat 1-3 y WRS2 el sistema asignado a los Landsat 4-7. En la Figura 6 se muestra la huella de las imágenes

que cubren la región fronteriza entre California y Baja California, en el sistema de referencia WRS2, propio para las imágenes Landsat TM.

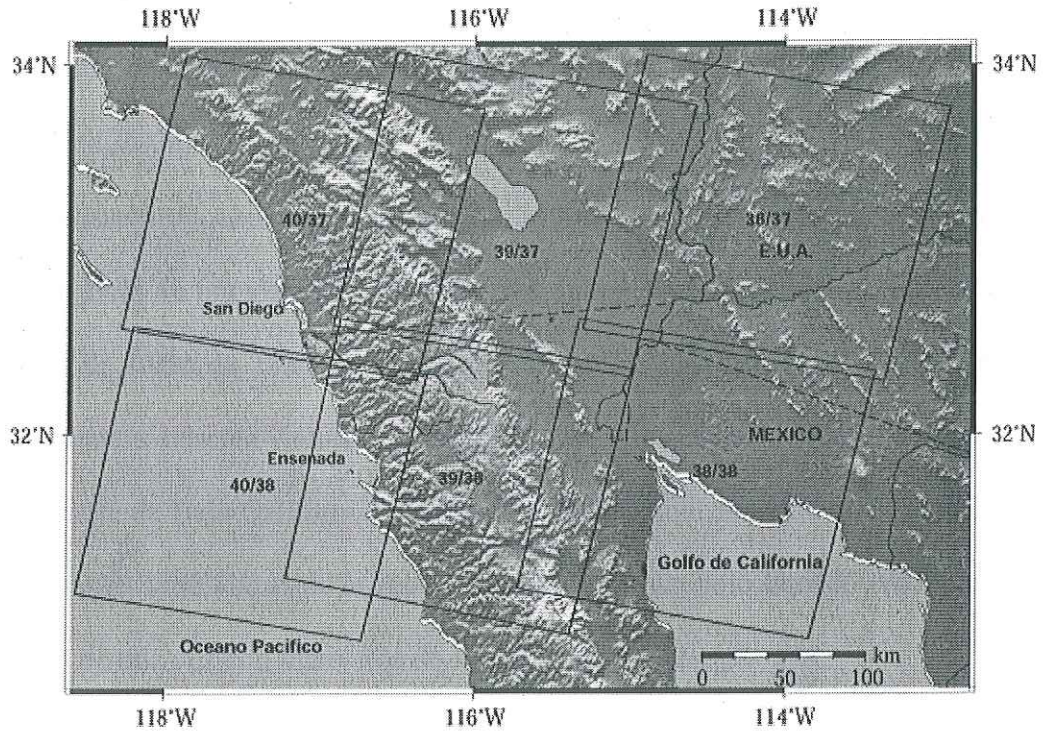


Figura 6. Coordenadas en pase/renglón de las imágenes Landsat que cubren la zona de estudio según el sistema de referencia WRS2.

En el sistema WRS1, la zona es cubierta por los pases 41 y 42, mientras que el WRS2 son los pases 38, 39 y 40. Los renglones 37 y 38 son los mismos en ambos sistemas. Es posible obtener imágenes de la misma fecha a lo largo de la misma órbita (pase).

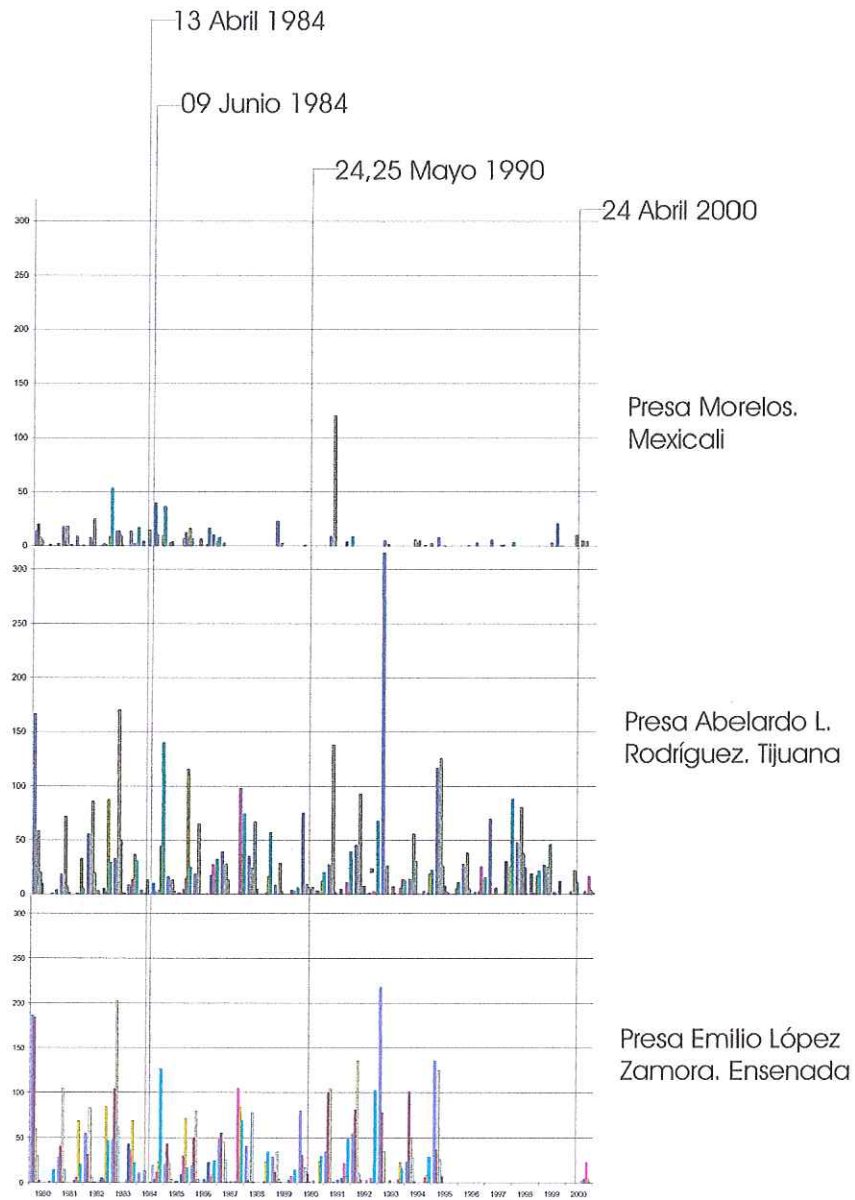


Figura 7. Precipitación mensual en mm reportada por 3 estaciones en el estado de Baja California durante el período de 1980 a 2000 y la ubicación en el tiempo de las imágenes Landsat TM utilizadas en el estudio.

Tabla V. Características técnicas en las imágenes Landsat TM para la zona de estudio.

Número de Identificación de la imagen	Fecha de Adquisición	Satélite Landsat	Pase	Renglón	Cobertura de nubes	Elevación del sol	Azimut del sol
5038038008416110	1984/06/09	5	38	38	0	62.38030185	101.06993554
5038037008416110	1984/06/09	5	38	37	0	62.31635773	104.0067242
5039038008410410	1984/04/13	5	39	38	1	54.16325256	122.15258869
5039037008410410	1984/04/13	5	39	37	0	53.58019214	124.12901222
5038038009014510	1990/05/25	5	38	38	0	60	104
5038037009014510	1990/05/25	5	38	37	0	60	106
4039038009014410	1990/05/24	4	39	38	0	62	106
4039037009014410	1990/05/24	4	39	37	0	62	109
7040038000011550	2000/04/24	7	40	38	7	61.6643944	125.7068634
7040037000011550	2000/04/24	7	40	37	0	60.9966125	128.2286835

V.2. Métodos

Se realizó un análisis de reflectividad en todas las bandas del sensor Landsat TM para seleccionar las más significativas y realizar el cociente de bandas tomando como pivote B5 y encontrar un valor de umbral que nos permita clasificar cuerpos de agua y estimar el área para realizar análisis comparativos entre los cuerpos de agua detectados en imágenes de 1984, 1990 y 2000.

Se utilizó el MDET para calcular aspecto y pendiente. Además se usaron metadatos originales de las imágenes como azimut y elevación del sol para predecir zonas productoras de sombras en la imagen clasificada de cuerpos de agua.

Para los índices de vegetación se vio en la necesidad de establecer un mismo régimen de uso del suelo para México y Estados Unidos, seleccionando regiones de interés exclusivas para realizar el cálculo de NDVI con el objetivo de realizar un análisis comparativo de la vegetación en ambos lados de la frontera.

En la Figura 8 podemos observar a detalle la secuencia metodológica utilizada en la realización del presente trabajo.

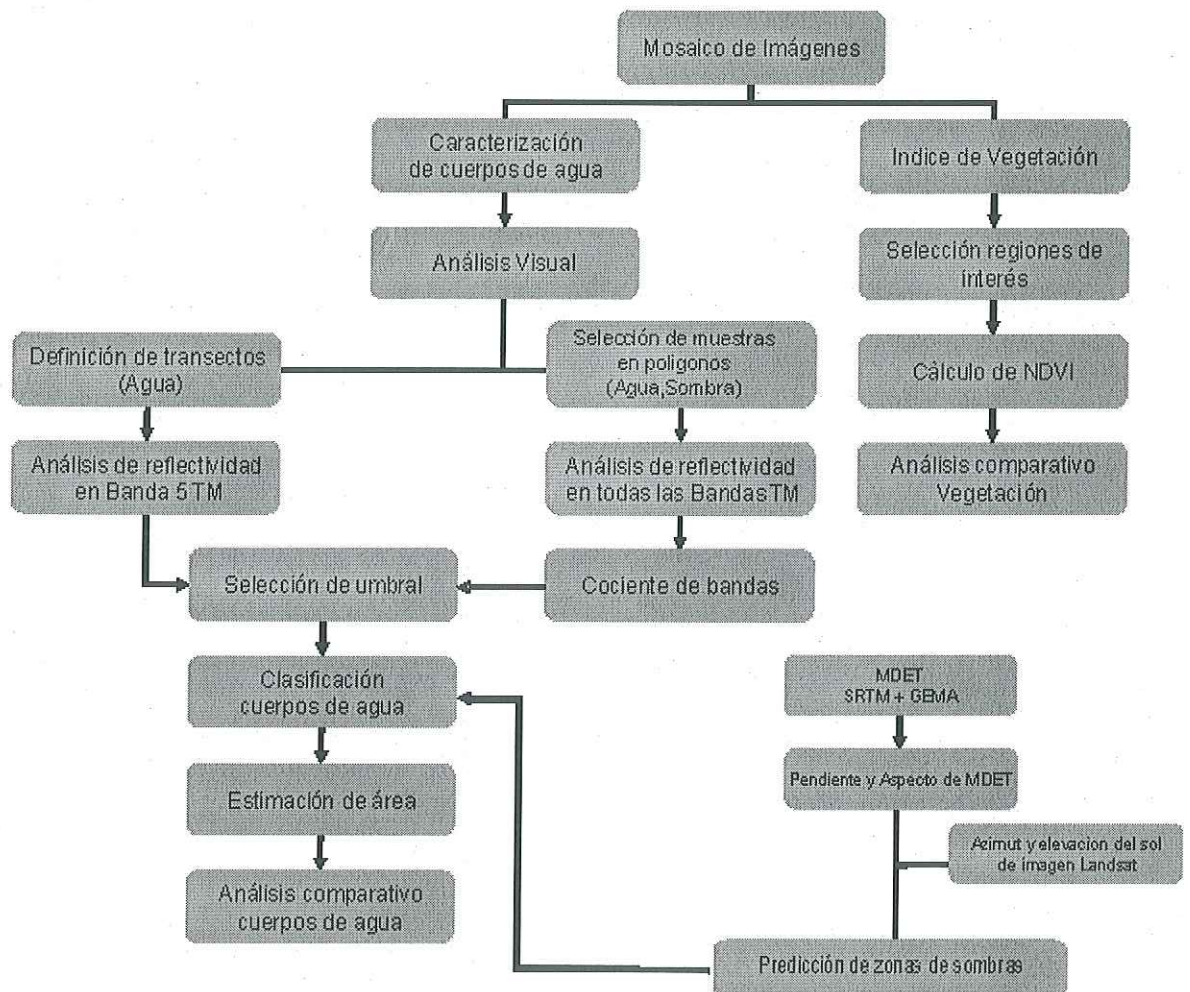


Figura 8. Diagrama que muestra la metodología a seguir para el procesamiento de las imágenes Landsat TM.

V.2.1. Espectro electromagnético y reflectividad en la superficie terrestre.

La luz visible es solo una de las muchas formas de la energía electromagnética. Cuando ésta incide sobre los cuerpos situados en la superficie terrestre (distintos tipos de suelos, cuerpos de agua, vegetación, etc.), éstos absorben y reflejan radiación de una parte del espectro electromagnético, dando una firma distinguible de radiación electromagnética reflejada (dentro de la región visible del espectro) a la cual se le denomina *reflectancia espectral* y transmitida (dentro de la región infrarroja) (Bava y Dogliotti, 2000). La energía incidente (E_I) puede descomponerse en tres términos: uno de reflexión (E_R), de absorción (E_A), y otro de transmisión (E_T). Así pues, aplicando el principio de conservación de la energía podemos establecer la relación existente entre estas tres interacciones de energía:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (1)$$

Siendo todas dependientes de la longitud de onda λ . (Lillesand y Kiefer, 1994).

La energía reflejada y emitida es captada remotamente por un sensor utilizando dispositivos electrónicos (detectores) sensibles a la radiación y almacenan la información como una imagen multispectral (Verbyla, 1995). En la Figura 9 se observa la reflectividad del espectro electromagnético captada por las 7 bandas del sensor Thematic Mapper (TM) a bordo del satélite Landsat. Este sensor fue diseñado para captar las firmas espectrales de las principales cubiertas de terreno: agua, suelo y vegetación (Campbell, 1996).

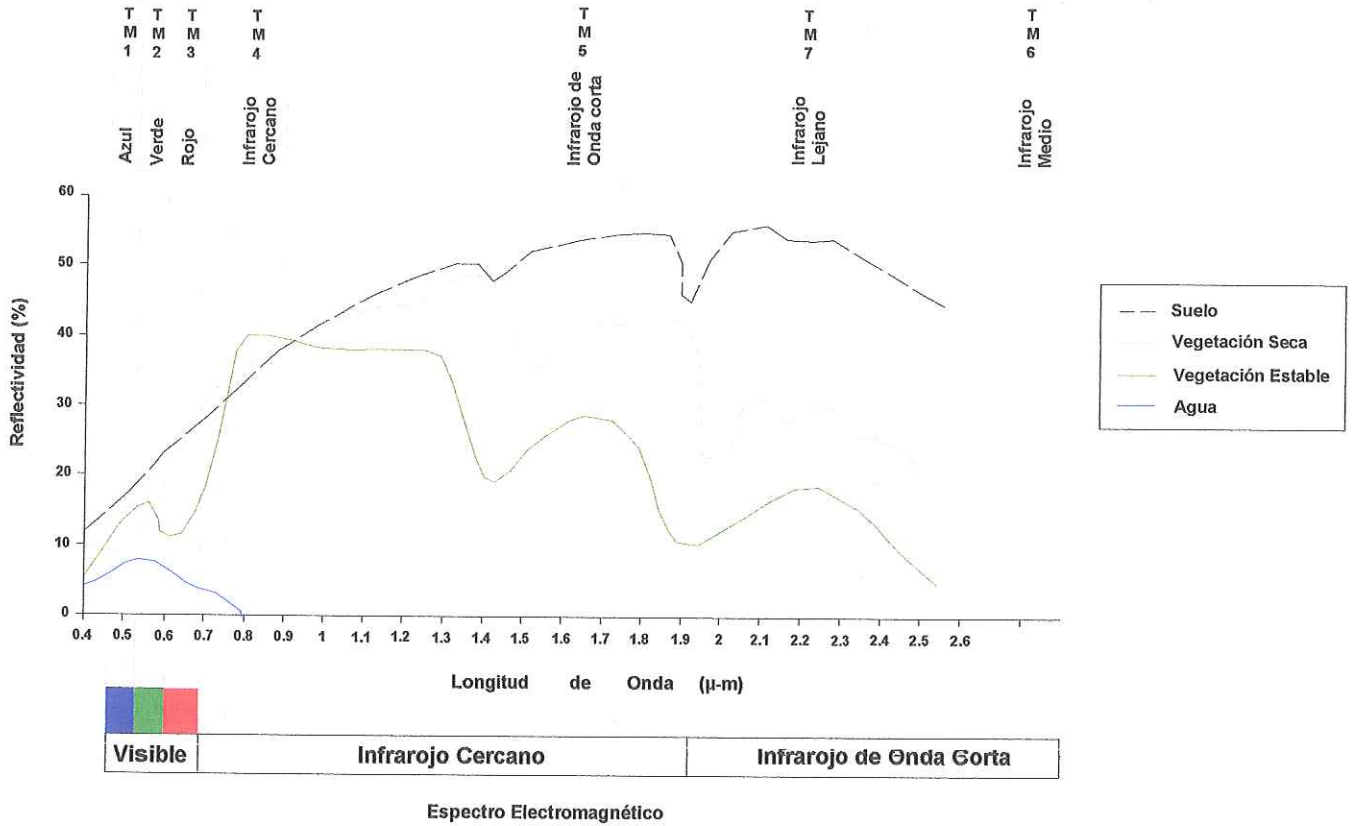


Figura 9. Curvas de reflectancia típica de materiales comunes en la superficie terrestre en función de la longitud de onda en micrómetros (μm) y ventanas espectrales del sensor TM.

V.2.2 Composición y procesamiento de imágenes satelitales multiespectrales.

Cada detector capta solo la radiación de una porción del espectro electromagnético. Es por ello que para cubrir un intervalo amplio de longitudes de onda se necesitan varios detectores. Debido a que cada detector puede captar de manera diferente la misma escena, un sensor con z detectores puede formar z imágenes diferentes correspondientes a la misma región. Al conjunto de estas z imágenes, denominadas bandas o canales espectrales, se le llama *imagen multiespectral*. La naturaleza multiespectral o multidimensional de la escena obtenida por sensores remotos permite conceptualizar la imagen multiespectral como una matriz de vectores o como un conjunto de matrices cuyas filas y columnas (x,y) identifican un punto en la imagen. Los elementos de tal arreglo digital son llamados *elementos de imagen o pixeles* y el valor de cada elemento de la matriz almacena la reflectancia electromagnética registrada por el sensor, asignándole un valor numérico digital que representa un valor de brillo (el nivel gris en ese punto) en una escala que por lo general varía entre 0 y 255, donde el valor 0 corresponde al mínimo de brillo y 255 al máximo, para cada una de las bandas del sensor TM. La Figura 10 esquematiza una imagen espectral captada por los 7 detectores del sensor Landsat TM como un conjunto de 7 bandas apiladas una sobre otra.

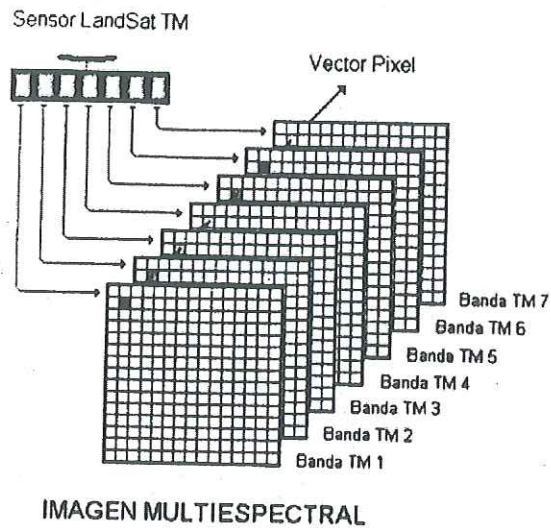


Figura 10. Imagen Multiespectral.

Una vez almacenada en forma de matriz una imagen digital, es susceptible de serle aplicada cualquier transformación que conduzca a mejorar su calidad. El *Procesamiento de imágenes digitales* (PDI) es el término usado para denominar las operaciones desarrolladas sobre un conjunto de datos de imagen para mejorarlas de alguna forma, con la finalidad de ayudar a su interpretación o para extraer algún tipo de información útil de ella (Alzate, 2000), de tal forma que sea revelada información que no pueda ser reconocida inmediatamente en su forma original. En el presente trabajo se utilizan las técnicas de análisis de reflectividad, segmentación del histograma e índices de vegetación, las cuales se describen en la siguiente sección.

V.2.3. Segmentación del histograma.

El histograma de una imagen consiste en la distribución de frecuencias de sus valores digitales, de modo que el histograma es la definición radiométrica de la imagen. Nos dice para los distintos canales o bandas que constituyen la imagen, del número de píxels asociados a cada DN (Digital Number) por sus siglas en inglés, es decir a cada valor de píxel (Folch y Paris, 1997).

La segmentación del histograma es una técnica muy sencilla, pero muy efectiva; en especial para cubiertas terrestres como el agua, que tiene una firma espectral muy distintiva. En la Figura 9 podemos ver como el agua absorbe la mayor parte de la energía que recibe, tanto más según nos situemos en longitud de ondas mayores (Richards, 1986). La curva de reflectancia es regularmente decreciente desde el visible hasta el infrarrojo cercano, donde el valor de la reflectancia es muy débil y puede anularse. Si el agua está cargada con partículas en suspensión, la curva presenta la misma forma pero las reflectancias son menores. Otros factores que influyen en la respuesta espectral del agua son: la temperatura (en el infrarrojo térmico), coloración, pureza, etc. (Martínez Casanovas, 1995).

En la reflectancia espectral del agua, la característica más distintiva probablemente es la absorción de energía en la longitud de onda del infrarrojo reflejado. El agua absorbe energía en estas longitudes de onda, ya sea que estemos hablando de características *per-se*

cuerpos de agua con datos de sensores remotos se ha hecho mas fácilmente en la longitud de onda del infrarrojo reflejado por esta propiedad de absorción. La interacción energía/materia en estas longitudes de onda son mucho mas complejas y dependen de varios factores interrelacionados.

La segmentación consiste en partir el histograma de la imagen en los valores medios entre modas claramente distinguibles, lo cual podemos apreciar en la Figura 11, donde se observa la presa El Carrizo en el municipio de Tecate, B.C. y su histograma en la banda 5 (infrarrojo medio) cuyos valores DN para el agua son menores a 10 mientras que para la moda de tierra éstos se encuentran arriba de 100.

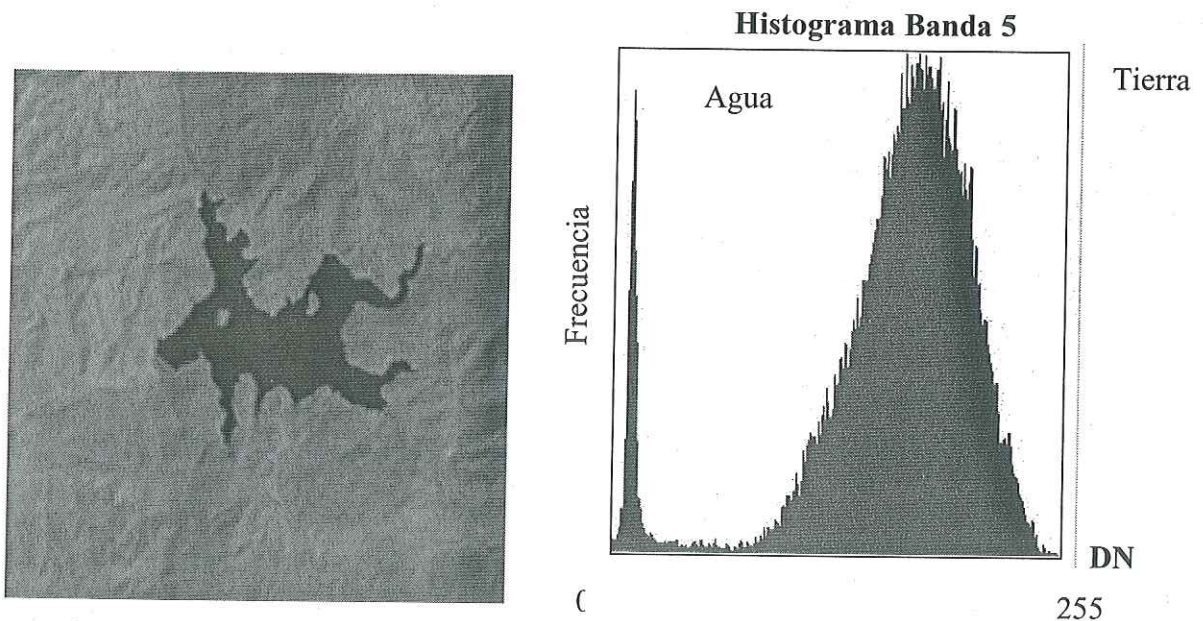


Figura 11. Imagen en escala de gris de la banda 5 de la presa el Carrizo y su histograma, presentando dos modas, la moda con los valores mas bajos del histograma corresponden al agua y los más altos a tierra.

La banda 5 del sensor Landsat TM, en la ventana del infrarrojo medio (1.55-1.75 μm), es sensible a variaciones de contenido de agua, ya sea en acumulaciones superficiales, en la vegetación o como humedad en el suelo. La reflectividad de un cuerpo de agua puede provenir de una interacción con la superficie, con material suspendido en el agua o con el fondo del cuerpo de agua. Se considera como agua todo aquello cuyo valor en la banda 5 de TM es menor a un cierto umbral. La clasificación por umbrales consiste en probar cada pixel y decidir si éste pertenece a una clase o a otra. La decisión se hace al comparar el valor numérico $P(x,y)$ del pixel de interés contra el valor del umbral debidamente escogido. Si el valor del pixel es menor que el valor umbral, el píxel pertenece a la clase agua.

El pseudo código de la clasificación por umbral la podríamos sintetizar como:

Si $\text{Píxel}(x,y) \leq \text{umbral}$ entonces $\text{Pixel}(x,y)$ es agua

sino $\text{Píxel}(x,y)$ no es agua.

El problema a resolver es la selección de un buen valor para el umbral. Una forma simple de seleccionar el umbral es utilizar transectos a lo largo de zonas con la clase de interés, en este caso el agua, éstos muestran los valores de las celdas de la imagen a lo largo de una línea transversa específica.

V.2.4 Cociente de bandas

Las operaciones entre bandas proporcionan información adicional a la existente. El cociente de bandas consiste en una división del valor de un píxel de una banda entre el valor del píxel correspondiente en otra banda (Sabins, 1997; Vincent, 1997). Las bandas seleccionadas para el cociente espectral usualmente están en diferentes rangos de longitud de onda. Los valores radiométricos pueden sufrir variaciones debido a los cambios de la pendiente del terreno, a la dirección de exposición de las pendientes (aspecto), las sombras o los cambios estacionarios en la iluminación del sol. Estas variaciones en los valores radiométricos captados por el sensor para un mismo tipo de cubierta terrestre puede tener efectos no deseados en la clasificación de tipos de cubierta terrestre. Los cocientes de bandas pueden reducir los efectos de esas condiciones ambientales, ayudando a reducir el efecto del relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas.

Los cocientes entre imágenes son útiles para poner en evidencia pequeñas diferencias entre ellas, ejemplos clásicos son los realizados entre los distintos planos espectrales para resaltar los píxeles que están menos correlacionados entre sí o que están inversamente correlacionados.

V.2.5. Sombras producidas por el relieve del terreno

La búsqueda de cuerpos de agua a partir de la segmentación del histograma en la banda 5 del sensor Landsat TM puede ser obstaculizada por las sombras generadas por el relieve

del terreno. Estas zonas, al igual que el agua, presentan una baja respuesta en la banda 5 y pueden confundir al clasificador. Este efecto se puede minimizar con el cociente de bandas como se discutió en la sección anterior, pero también podemos reforzar el método si pudiéramos predecir las zonas que generan sombras y así descartarlas como posibles cuerpos de agua. Para predecir las zonas sombreadas, necesitamos conocer la posición de la fuente de iluminación al momento de la toma y la geometría del cuerpo sobre la que incide la radiación. La familia de satélites Landsat tienen órbitas heliosíncronas, esto implica que toman las imágenes a la misma hora local para el mismo punto, siendo las 10:45AM tiempo local del Ecuador (Sabins, 1997). La variación en elevación y azimut del sol dependerá de la fecha en el año. En la tabla V se muestra la elevación y azimut del sol para cada una de las imágenes utilizadas. La elevación describe el ángulo vertical desde un plano horizontal. El azimut se refiere al ángulo horizontal medido en sentido de las manecillas a partir del norte desde cualquier meridiano de referencia como se muestra en la Figura 12.

Existen trabajos que analizan diferentes métodos para el cálculo de la pendiente del terreno y orientación de ésta a partir de modelos digitales del terreno (MDT) organizados en rejillas regulares (Raaflaub y Collins, 2005; Jones K. H., 1998).

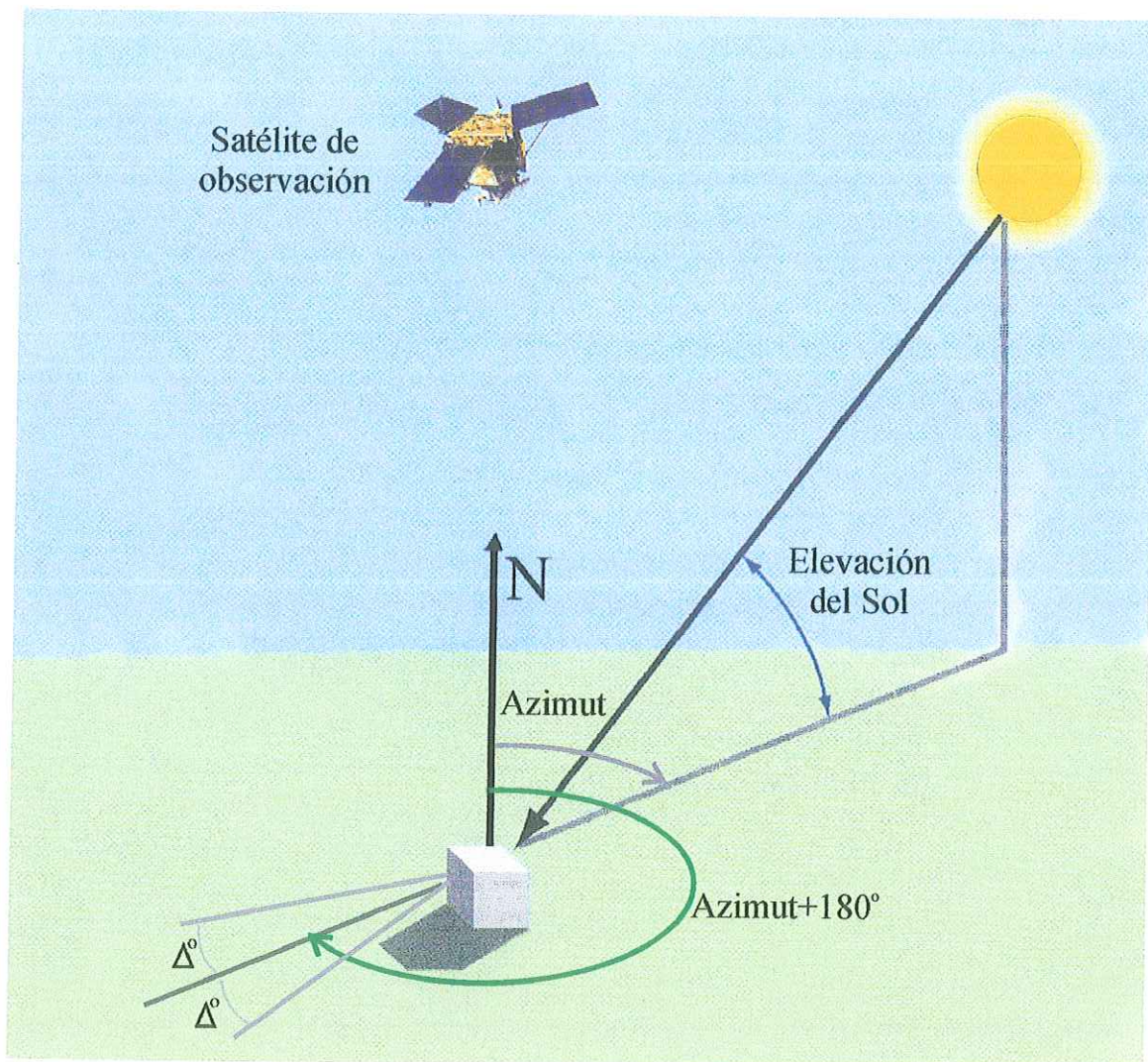


Figura 12. Elevación y azimut del sol en el momento de la toma de la imagen. La posición del sol determinará las zonas productoras de sombras. (modificado de G. Frank, 2001).

Uno de los métodos para estimar la pendiente y el aspecto del terreno, es el de método de Dozier y Strahler (1983), que proponen la siguiente fórmula:

$$\tan(\text{pendiente}) = \sqrt{(\delta z / \delta x)^2 + (\delta z / \delta y)^2} \quad (2)$$

$$\tan(\text{aspecto}) = \frac{\delta z / \delta x}{\delta z / \delta y}$$

donde $\delta z / \delta x$ y $\delta z / \delta y$ son las derivadas parciales de la altura en las direcciones Oriente-Poniente y Norte-Sur respectivamente. Horn (1981) desarrolló un método numérico para estimar las derivadas que se puede formular como:

$$\begin{aligned} [\delta z / \delta x]_{y,x} &= (z_{y-1,x-1} + 2z_{y,x-1} + z_{y+1,x-1} - z_{y-1,x+1} - 2z_{y,x+1} - z_{y+1,x+1}) / 8\Delta x \\ [\delta z / \delta y]_{y,x} &= (z_{y-1,x-1} + 2z_{y-1,x} + z_{y-1,x+1} - z_{y+1,x-1} - 2z_{y+1,x} - z_{y+1,x+1}) / 8\Delta y \end{aligned} \quad (3)$$

donde $z_{y,x}$ es el valor de la altura en el MDT en el renglón y y la columna x , Δx es la dimensión de la celda en la dirección Este-Oeste (columna) y, Δy es la dimensión de la celda en la dirección Norte-Sur (renglón). Este método puede implantarse a través de la convolución de la matriz del MDT con matrices de coeficientes direccionales:

$$\delta_z / \delta_x = \frac{\begin{matrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{matrix}}{8\Delta x} \quad \delta_z / \delta_y = \frac{\begin{matrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{matrix}}{8\Delta y} \quad (4)$$

Conociendo la posición del sol al momento de la toma de la imagen Landsat y la pendiente y la orientación de cada celda a partir del MDT, se puede calcular las zonas que producirán sombras y que potencialmente podrían confundirse con los cuerpos de agua. El algoritmo en pseudo código para predecir las zonas sombreadas sería:

Si pendiente es $>$ umbral pendiente
 y aspecto en intervalo de $(\text{Azimut} + 180^\circ) \pm \Delta^\circ$
 Entonces zona productora de Sombra

Se requiere que la pendiente sea mayor a un cierto umbral para considerarla como potencialmente generadora de sombra, además la orientación de la superficie tiene ser opuesta a la dirección de iluminación (azimut del sol). La máxima sombra ocurrirá cuando la orientación de la pendiente (aspecto) sea opuesta a la dirección de iluminación. Por eso se considera una ventana angular de $\pm \Delta^\circ$ alrededor de la dirección de sombra máxima (azimut del sol + 180°).

V.2.6. Índice de vegetación

Con el objeto de mejorar la discriminación entre suelo y vegetación se crean bandas artificiales, a partir de las originales, mediante la combinación de los números digitales almacenados en dos o más bandas de la misma imagen.

El empleo de los cocientes para discriminación de vegetación tiene su fundamento en el hecho de que la respuesta espectral característica de la vegetación sana muestra un claro

contraste entre las bandas visibles, especialmente la banda roja (0.6 a 0.67 μm), y las comprendidas en el infrarrojo cercano (0.76 a 0.9 μm), lo cual podemos observar en la Figura 9. La baja reflectividad que se presenta en la porción visible se debe a la absorción de los pigmentos de la hoja, principalmente clorofila, xantofilas y carotenos. Las reflectancias más bajas se dan en las bandas azul y roja de la región visible del espectro. El efecto absorbente es menor en la banda verde, fenómeno que genera el color con el que percibimos la vegetación “vigorosa” en plena foliación (Chuvienco, 1996). La elevada reflectividad que se presenta en el infrarrojo cercano se debe a la estructura celular de la hoja sana, en plena madurez. Debido a que la estructura de las hojas es diferente de acuerdo a las especies, ésta banda puede ser utilizada para discriminar especies o agrupaciones vegetales. La reflectividad de la vegetación en el infrarrojo se reduce notablemente debido a que la absorción de agua que ocurre en esta porción del espectro, siendo de gran interés su observación debido a que permite conocer el estado de vigor de la hoja en función de su contenido de humedad. (Lillesand y Kiefer, 1994).

La vegetación vigorosa presenta un contraste con la vegetación senescente, el cual es evidente en estas dos bandas, la banda roja del visible (banda 3 de TM) y la banda infrarroja cercana (banda 4 de TM). Los suelos presentan una menor variación espectral a distintas longitudes de onda, mostrando una curva mucho más plana.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI por sus siglas en inglés, explota las propiedades de la respuesta espectral de la vegetación en la banda roja (banda 3) e infrarrojo del sensor TM.

El NDVI se expresa como:

$$\text{NDVI} = (\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R}) \quad (5)$$

Donde IR es la banda infrarroja y R la banda roja, y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{NDVI} = (\text{Banda 4} - \text{Banda 3}) / (\text{Banda 4} + \text{Banda 3})$$

Entre mayor sea el valor del índice, mayor vigor vegetal presenta la zona observada. El índice tiene un rango de valores que va de -1 a 1. Las nubes, agua y nieve presentan una mayor reflectancia en la región visible del espectro que en la región del infrarrojo cercano, por lo que los valores de NDVI para éstos elementos son negativos y se les asigna valores menores a cero. Roca y suelo desprovisto de vegetación tienen reflectancias aproximadamente iguales, de manera que sus NDVI correspondientes se acercan a cero. En áreas con vegetación el NDVI varía de 0.1 a 0.6; los valores más altos corresponden a una mayor densidad y verdor del dosel de la vegetación (Weier J., 2000).

APLICACIÓN Y RESULTADOS

VI.1. Caracterización de cuerpos de agua.

VI.1.1. Detección de cuerpos de agua y definición de transectos utilizando la banda 5 del sensor Landsat TM.

Primero se realizó una selección visual de los cuerpos de agua en la zona de estudio apoyándonos en un compuesto en falso color 321 en RGB de las imágenes de Mayo y Junio de 1984, que presentan la inundación del delta del Río Colorado. Se utilizaron cartas topográficas y materiales de apoyo para ubicar los cuerpos de agua en Baja California y California, para saber su nombre y así obtener más información sobre su ubicación. La Figura 13 muestra los transectos sobre los cuerpos de agua seleccionados en la imagen Landsat de 1984.

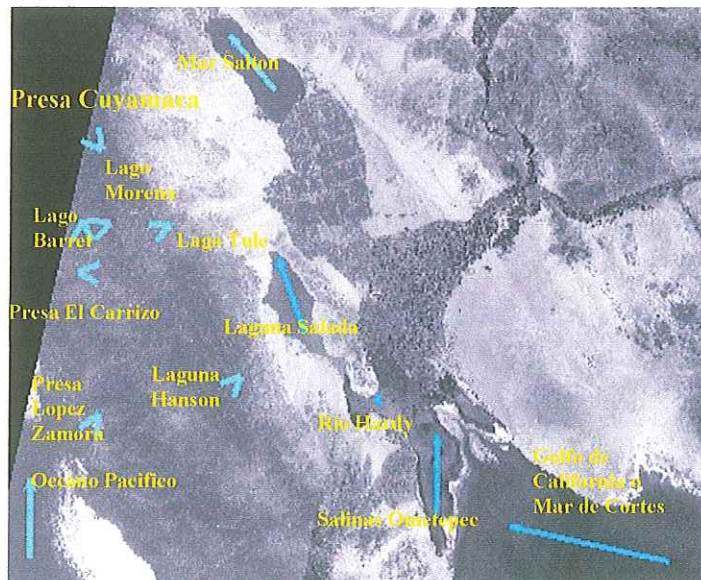
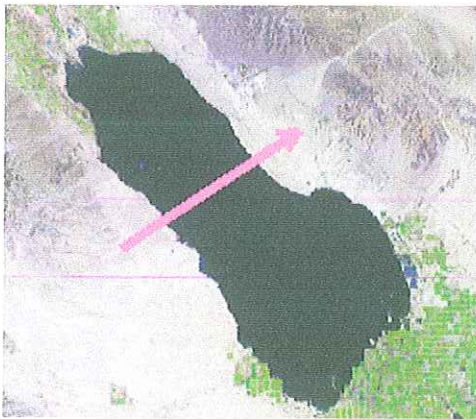


Figura 13. Ubicación de transectos sobre los cuerpos de agua detectados visualmente.

Tomando como base el concepto de la segmentación del histograma, se utilizó la extracción de un perfil transversal para determinar los valores de reflectividad de tierra y agua sobre un mosaico de la banda 5 de Landsat TM. A través de dichos transectos se obtuvo información sobre el número digital correspondiente a una posición (x,y) sobre la imagen digital. En la Figura 14 se muestran dos ejemplos de transectos de tierra-agua-tierra.



14 a. Transecto en el Mar Salton



14 b. Transecto en la Presa López Zamora

Figura 14a. Transectos para analizar la transición en los valores de la imagen en la banda 5 de Tierra-Agua-Tierra en el Mar Salton
 Figura 14b. Transectos para analizar la transición en los valores de la imagen en la banda 5 de Tierra-Agua-Tierra en la Presa Lopez Zamora

En la Figura 15 observamos claramente la transición tierra-agua-tierra; los valores mas bajos corresponden al cuerpo de agua. Para los siete transectos graficados observamos un comportamiento similar, con valores menores a 20, sin embargo vemos que la reflectividad de tierra presenta valores más altos con una gran variabilidad. Algunos de los factores que

afectan la reflectancia del suelo son contenido de humedad, textura del suelo (proporción de arena y arcilla), superficie rugosa, la presencia de oxido de hierro y contenido de materia orgánica (Lillesand and Kiefer, 1987)

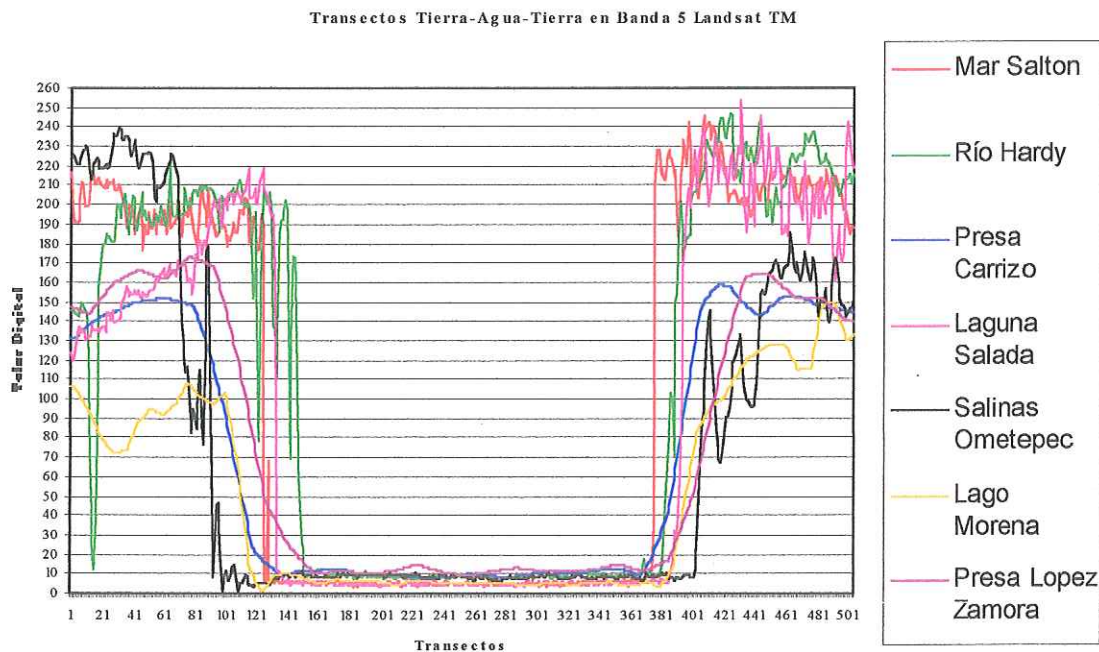


Figura 15. Perfil de valores en la banda 5 del sensor TM a lo largo de transectos Tierra Agua-Tierra sobre 7 cuerpos de agua de la zona de estudio. En la parte central de todas las curvas se ve claramente la baja respuesta del agua, esto debido a la gran absorción del agua en la ventana espectral de los $1.55-1.75\mu\text{m}$ del espectro electromagnético.

VI.1.1.1. Selección del umbral.

Como se menciona anteriormente la banda 5 del sensor Landsat TM es sensible a variaciones de contenido de agua, por este motivo se utilizó un mosaico de imágenes que contienen únicamente esta banda, con el fin de identificar valores digitales de los cuerpos de agua a lo largo de los transectos indicados en la Figura 13. Los transectos se muestran en la Figura 16.

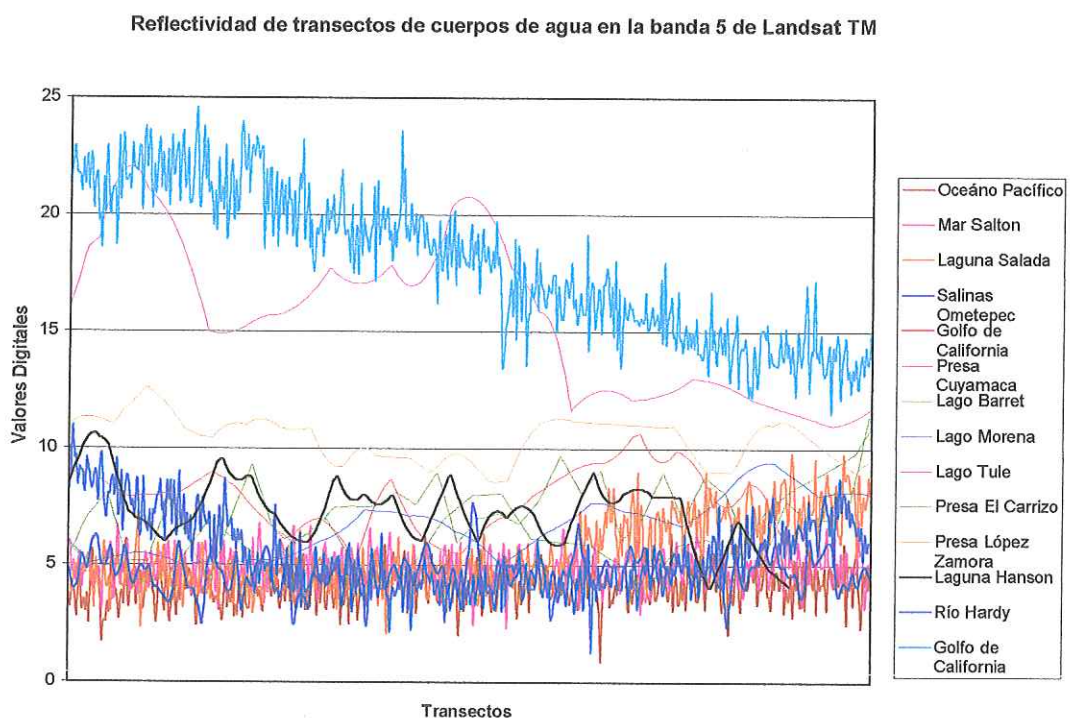


Figura 16. Valor de los píxeles en banda 5 a lo largo de los transectos en cuerpos de agua seleccionados visualmente.

Esta gráfica es importante para determinar el valor del umbral en la clasificación de cuerpos de agua con la técnica de segmentación del histograma. Las variaciones en

amplitud que se observan en cada uno de los transectos corresponden al estado del cuerpo de agua, es decir, algunos de ellos contienen aguas turbias con algún tipo de sólido suspendido. Existen otros cuerpos de agua con aguas más claras. Observamos que el umbral en la banda 5 de TM para discriminar cuerpos de agua se encuentra entre los valores de 10 y 25.

VI.1.1.2. Clasificación de cuerpos de agua con B5 de imagen Landsat TM

Tomando los resultados obtenidos en los transectos sobre agua, se probaron tres umbrales: 10, 25 y 40. Si comparamos el resultado de clasificar la banda 5 de las imágenes de 1984 utilizando el umbral de 10, se logra definir en forma irregular en lo que a área se refiere (Tabla VI). Utilizando el umbral 25 se detectaron igualmente los cuerpos de agua, definiéndose mejor el límite del lago. Este umbral detecta más superficie, incluyendo zonas cerca de las orillas donde se encuentran sólidos suspendidos, vegetación y aguas turbias. En general, a nivel mosaico seguimos observando que no muestra algunas zonas de ciertos cuerpos de agua, como es la desembocadura del Río Colorado, en el río Hardy.

En base a esta observación se aumentó el umbral en la banda 5 hasta 40, detectándose todos los cuerpos de agua delineando mejor sus contornos que con los dos umbrales anteriores. Además vemos como este umbral incorpora a las aguas turbias en la clasificación, es decir, las zonas mencionadas anteriormente como zonas de descargas o con una mayor concentración de sólidos suspendidos son detectadas perfectamente. El inconveniente es la aparición de pequeñas zonas con sombras ubicadas en las laderas de los cerros que atraviesan la zona de estudio y que se muestran en la Figura 17. Existe una confusión en la clasificación al identificar pequeñas zonas de sombras cuyo valor es menor al umbral. En

la Tabla V, se indica el azimut y elevación del sol a la hora de la toma de las imágenes Landsat TM utilizados en este análisis. Con estos valores se puede inferir las zonas productoras de sombras. Para los resultados presentados en la tabla VI, el azimut y elevación del sol son 122 y 54 grados respectivamente y corresponde a la imagen con coordenadas de pase 39 renglón 38 tomada el 13 de abril de 1984.


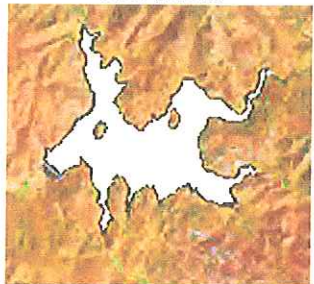
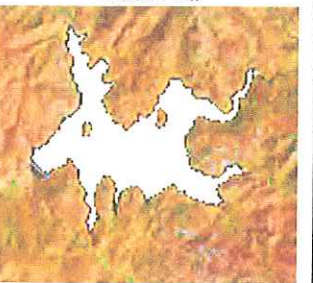
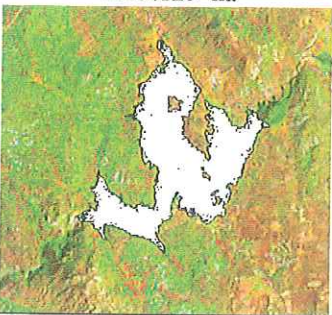


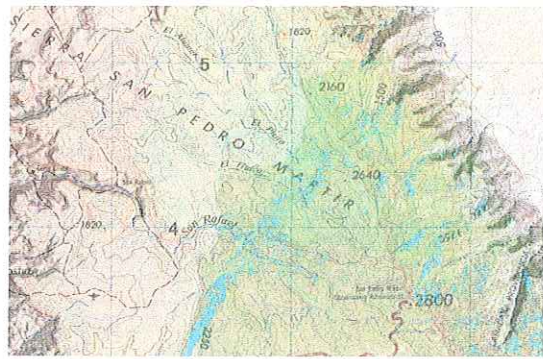
Umbrales en cuerpo de agua de 1984		
10	25	40
Presa El Carrizo en Tecate Baja California, México		
904.500 ha	960.438 ha	990.34 ha
		
Lago Morena en California, USA		
1969.125 ha	2162.250 ha	2665 ha
		

Tabla VI. Prueba de umbrales en la banda 5 sobre la imagen TM de 1984 para la presa El Carrizo en Baja California, México y el Lago Morena en California, USA. Entre mayor es el umbral, mayor es el área detectada del cuerpo de agua.

Esto nos indica que si utilizamos el umbral 40 en un lugar con topografía plana, entonces sería un buen valor para detectar la mayor parte de un cuerpo de agua, incluso con la presencia de sólidos suspendidos, los cuales siempre producirán una reflectividad mayor que las aguas claras. La investigación sobre el tipo y la concentración de los sólidos suspendidos en el agua está fuera del alcance de este trabajo y no será abordado.



17a



17b

Figura 17. Areas donde la banda 5 detecta sombras como cuerpos de agua con un umbral de 40. Notar la orientación de las zonas con respecto a los 122 grados en azimut del sol a la hora de toma. a) Zona indicadas en blanco y que incluye los cerros Buena Vista, Animas y Soledad sur de Ensenada, B.C. México. B) Zonas en la sierra de San Pedro Mártir donde se detectan las sombras como cuerpos de agua en color azul. Estas se ubican en las laderas Noreste de la Sierra, con orientación perpendicular al azimut del sol.

VI.1.2. Análisis de reflectividad de zonas sombreadas en B5

Sobre las regiones que se detectaron como cuerpos de agua, y que corresponden a sombras, se delinearon polígonos que las circunscriben para analizar su reflectividad en la B5. Se delinearon también tres polígonos en cada cuerpo de agua con el objetivo de conocer su

reflectividad y así poder discriminar áreas de sombras de los cuerpos de agua usando un umbral de 40. También se realizaron transectos a lo largo de las zonas de sombra con valores digitales menores a 40. En la Figura 18 se muestra los valores digitales de la B5 a lo largo de transectos en zonas de sombras y de cuerpos de agua, donde se nota claramente un traslape en valores. Lo cual indica que con el umbral de 40 en zonas donde existe relieve que generen sombras, habrá confusión en la discriminación entre agua y sombra. En la siguiente sección se presentan los resultados al utilizar otro método para discriminar cuerpos de agua de zonas sombreadas.

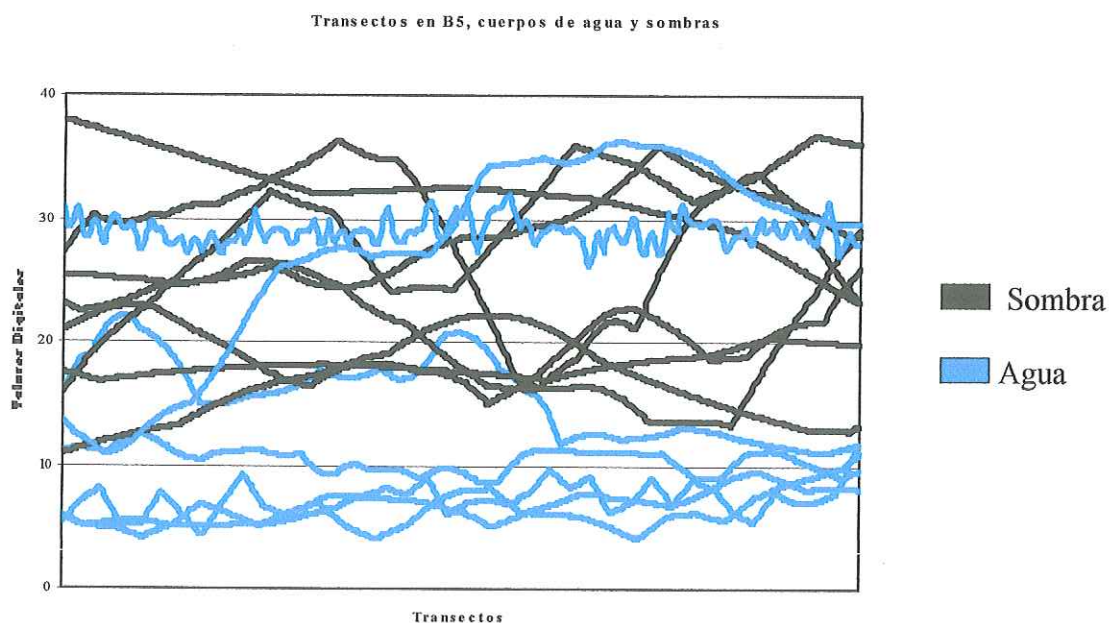


Figura 18. Valores digitales a lo largo de transectos en agua en tonos claros y sombras en líneas oscuras en la banda 5 del sensor Landsat TM en imagen del 1984.

VI.1.3 Cociente de Bandas

Los cocientes de bandas se han utilizado para clasificar distintas coberturas terrestres como los reportados por Bava y Pierini (2003), en donde utilizan cocientes para separar clases agua de tierra. Una característica importante de la zona de estudio es que presenta zonas con un alto relieve que producen sombras, los cocientes de bandas nos ayudan a reducir sus efectos. Se realizó el análisis espectral en cuerpos de agua para observar la variabilidad de éstos en todas las bandas del sensor TM y de esta manera decidir cuales usar para el cociente (Figura 19). Se buscan contrastes en los valores, en una de las bandas debe presentar las reflectividades mas altas mientras en otra las mas bajas y así resaltar lo que es diferente en dos imágenes y al mismo tiempo minimizar lo que es igual utilizando como foco o pivote la banda 5.

En la imagen Landsat de 1984, se delinearon 3 polígonos en cada cuerpo de agua con el fin de calcular su estadística. Observamos de la Tabla VII, que la diferencia entre los valores de las medias en las bandas 5 y 4 no es significativa, por tal motivo se descartó la realización del cociente con estas bandas, lo mismo pasa con las bandas 5 y 7. En las demás bandas, se nota una diferencia mayor entre los valores medios con respecto a la banda 5, por esta razón se realizaron los cocientes 5/1, 5/2 y 5/3. La banda 1 es la que representa las reflectividades más altas.

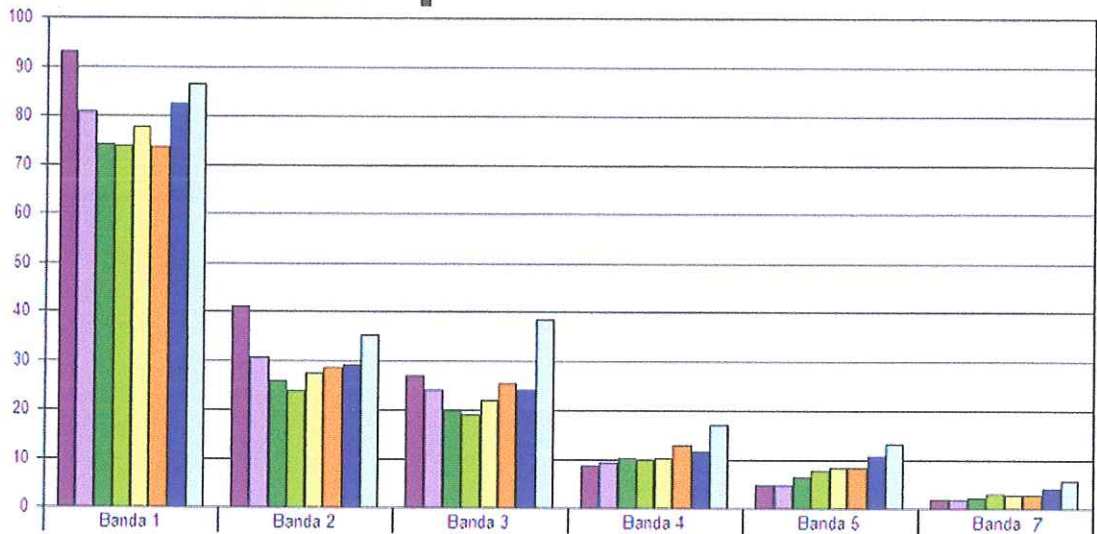


Figura 19. Reflectividad media en 6 bandas de imagen Landsat TM en polígonos delineados sobre muestras de 12 cuerpos de agua en imagen de la zona de estudio de 1984.

	Bandas del Sensor TM					
	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
■ Laguna Salada	93.093	41.178	27.047	8.676	4.706	1.795
□ Mar Salton	80.796	30.756	24.101	9.329	4.848	1.886
■ Lago Morena	74.171	25.929	19.729	10.1	6.457	2.186
■ Lago Barret	73.783	23.848	18.957	9.761	7.63	3.022
□ Presa El Carrizo	77.583	27.438	22	10.188	8.375	2.625
■ Presa Cuyamaca	73.542	28.434	25.386	12.831	8.301	2.795
■ Presa Lopez Zamora	82.378	29.111	24.133	11.378	10.711	4.022
□ Tule	86.4	35.3	38.3	17.2	13.2	5.5

Tabla VII. Valores medios de muestras de agua como resultado de la estadística de polígonos delineados en cuerpos de agua en imágenes LANDSAT de 1984

En base a los valores medios de los cocientes 5/1, 5/2 y 5/3 que se muestran en la Figura 20, se realizó un análisis para buscar un valor de umbral para cada uno de ellos que detecte apropiadamente los cuerpos de agua a través de la segmentación del histograma. En la Tabla VIII se muestran las características sobresalientes del mosaico de cocientes de 1984 para distintos umbrales.

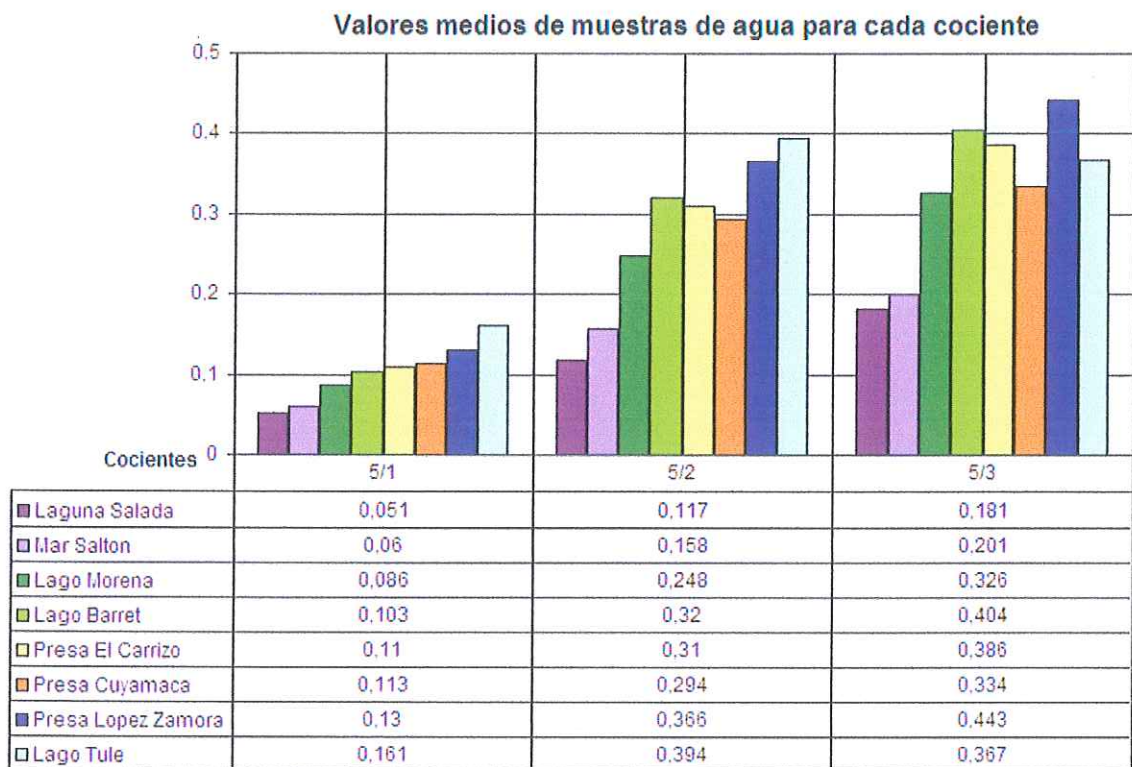


Figura 20. Valores medios de cocientes de bandas TM 5/1,5/2 y 5/3 dentro de polígonos de muestreo.

Tabla VIII Resultados de los análisis de umbrales para los cocientes en base a las medias de las muestras de agua en imágenes de 1984.

Cociente	Umbral, corresponde a	Resultado
5/3	0.443, Presa <i>López Zamora</i>	En general, se observa un mínimo de sombras. En el Valle de Mexicali se detectan a nivel píxel terrenos con humedad. Para el caso de cerro prieto se detecta la condensación del vapor de agua del subsuelo en todo el terreno de la planta. Detecta el canal Todo Americano en forma dispersa, las condiciones de humedad del terreno haya o no agua.
5/2	0.394, Lago <i>Tule</i>	De igual forma detecta la presencia de cuerpos de agua y humedad en el terreno con mayor precisión que el umbral 5/3
5/1	0.161, Lago <i>Tule</i>	Es la mejor opción ya que la detección se da con alta precisión

Aunque en los cocientes 5/2 y 5/3 se detectan casi las mismas cosas que nos interesan (cuerpos de agua) y se minimizan aquellas que nos preocupaban (sombras), las diferencias entre estos cocientes radican principalmente en la proporción. Así que en base a estos resultados el mejor cociente sin duda es el 5/1 que se muestra en la Figura 21 con un umbral de 0.161. Las sombras más representativas detectadas se muestran en color rojo, las sombras no se pueden ver a simple vista, ya que su representación es mínima a nivel píxel. En la Figura 22 podemos ver una comparación de usar banda5 y cociente 5/1 para clasificar los cuerpos de agua, observamos como en esta zona las sombras desaparecen al utilizar el cociente con umbral 0.161.

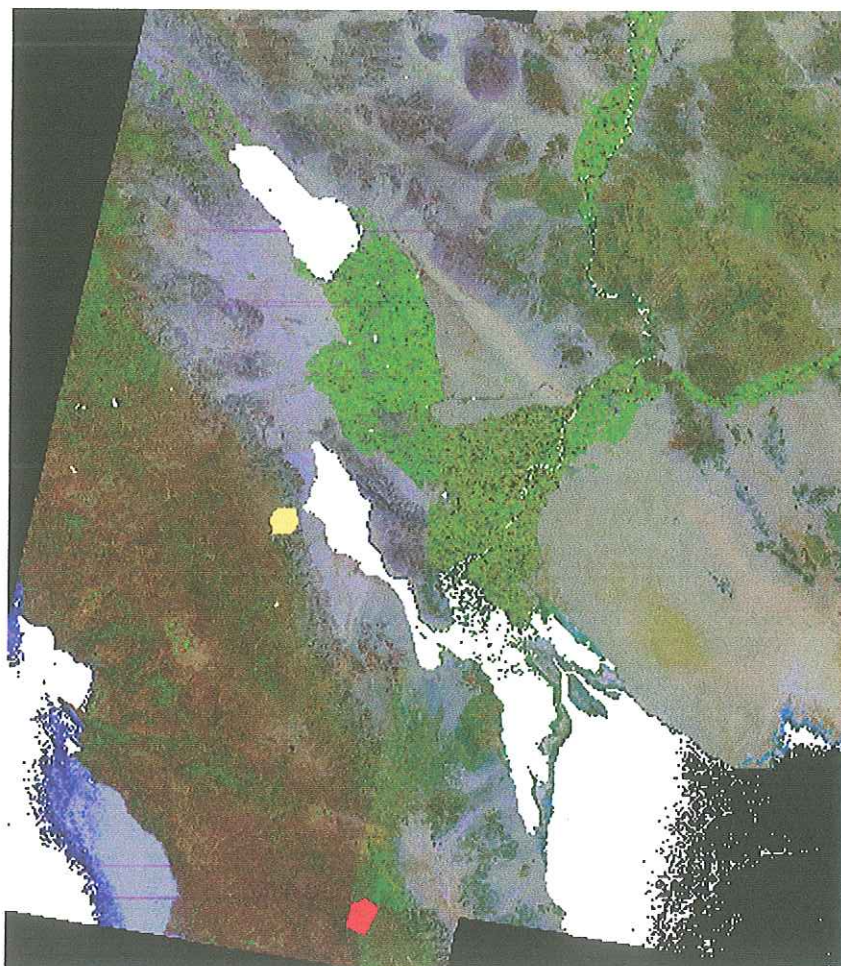


Figura 21. Resultado de Cociente 5/1 aplicando umbral ≤ 0.161 sobre un mosaico de imágenes Landsat TM de 1984 que representa las zonas de sombras en color rojo y amarillo.

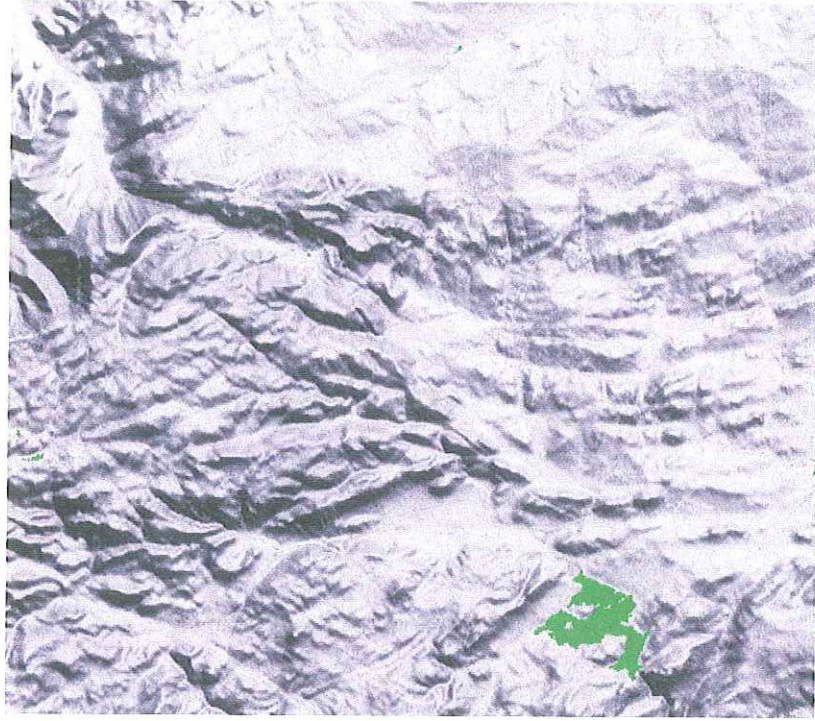


Figura 22b. Lago Morena detectado con umbral 0.161 en cociente 5/1.

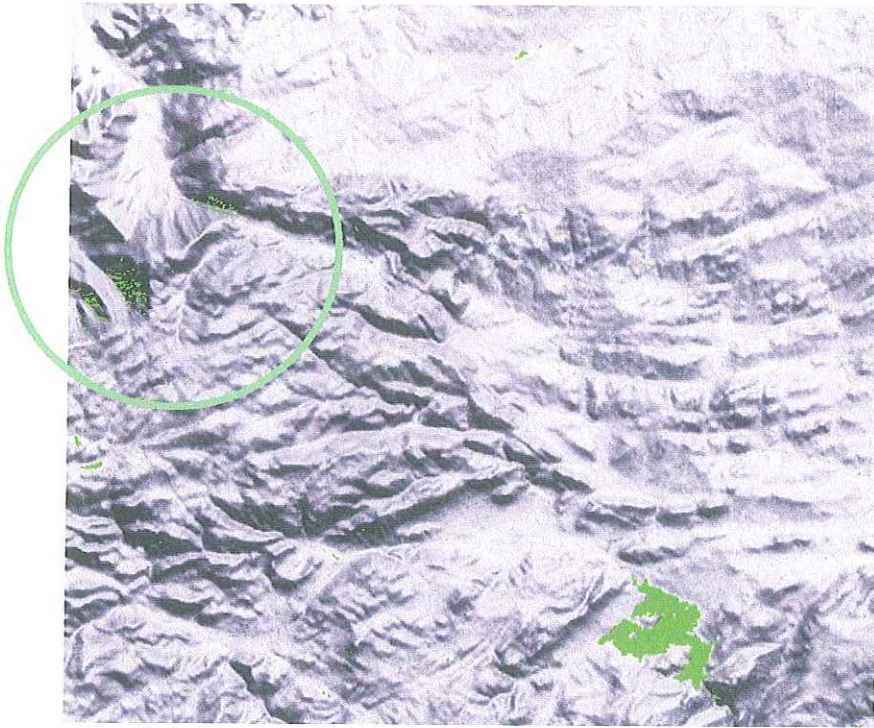


Figura 22a. Lago Morena detectado con umbral 40 en banda 5

VI.2. Detección de zonas productoras de sombras.

Se calcularon las zonas sombreadas por una iluminación ubicada a 115 y 58 grados de azimut y elevación respectivamente partir de un modelo digital de elevación SRTM por sus siglas en inglés (Shuttle Radar Topography Mision) con 3 segundos de arco, proyectado al mismo contexto cartográfico que las imágenes Landsat utilizadas. Los valores seleccionados para azimut y elevación son representativos de los valores indicados en la tabla V para las imágenes procesadas. Se aplicó una ventana angular Δ° de 45° . Un ejemplo de las zonas detectadas como sombras en la región de San Pedro Mártir se muestra en la Figura 23.

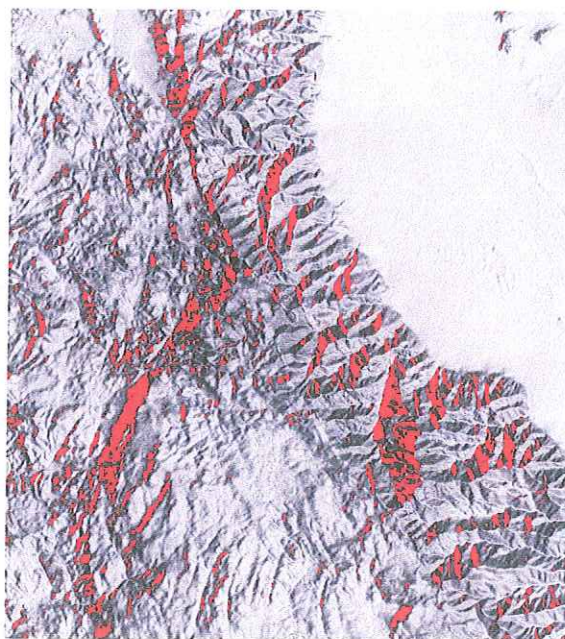


Figura 23. Zonas productoras de sombras calculadas a partir del MDT para un azimut y elevación del sol de 115 y 58 grados respectivamente, parámetros representativos de las imágenes LANDSAT utilizadas. En este caso se aplicó una ventana angular de Δ° de 45°

VI.3. Generalización del método de detección de cuerpos de agua aplicado a Imágenes Landsat TM de 1990 y 2000.

Después de haber analizado las imágenes Landsat de 1984 y 1990 con los métodos descritos anteriormente, se llega al siguiente procedimiento para detectar cuerpos de agua

MATERIALES:

- Imagen Landsat TM de la zona de estudio georeferida y tener un apoyo cartográfico en el mismo contexto espacial como cartas topográficas para ubicarnos los cuerpos de agua.
- MDT para calcular pendiente y aspecto.
- Elevación y azimut del sol al momento de la toma de la imagen.

PROCEDIMIENTO:

- 1- Si la zona de estudio no presenta pendientes clasificar B5 variando umbral $\leq (10 \dots 40)$. Ir paso 3.
- 2- Si la zona de estudio presenta pendientes hacer cociente de bandas 5/1 e iniciar la clasificación de cuerpos de agua variando umbral $\leq (0.161 \dots 0.5)$ e ir a paso 3.

Si ésta detecta sombras como cuerpos de agua inferir zonas con sombra:

Si pendiente es $>$ umbral pendiente

y aspecto se encuentra en intervalo $(\text{Azimut} + 180^\circ) \pm \Delta^\circ$

Entonces es zona productora de SOMBRA

Descartar de la siguiente manera:

Si cociente 5/1 $<$ umbral de cociente y

NO es SOMBRA

Entonces es agua

3- Verificar resultado usando información de apoyo a través de un análisis visual.

Siguiendo el procedimiento obtenido en este trabajo, nos ubicamos en el paso número 2, así que para detectar grandes cuerpos de agua, partimos del cociente 5/1 con umbral 0.161 éste se aplicó a las imágenes de 1990, el cual arroja un resultado en donde no detecta algunos cuerpos de agua, por este motivo se varió el umbral hasta llegar a un umbral 0.3, como se mencionó en un principio éste es un escenario de sequía extrema en Delta del Colorado. Se aplicó una máscara de Tierra-Agua para dejar en la imagen únicamente los cuerpos de agua continentales lo cual observamos en la Figura 24.

Siguiendo el mismo método se prosiguió a utilizar el pase 40 del año 2000 en el cual se detectaron los cuerpos de agua mostrados en la Figura 25 con un umbral de 0.3

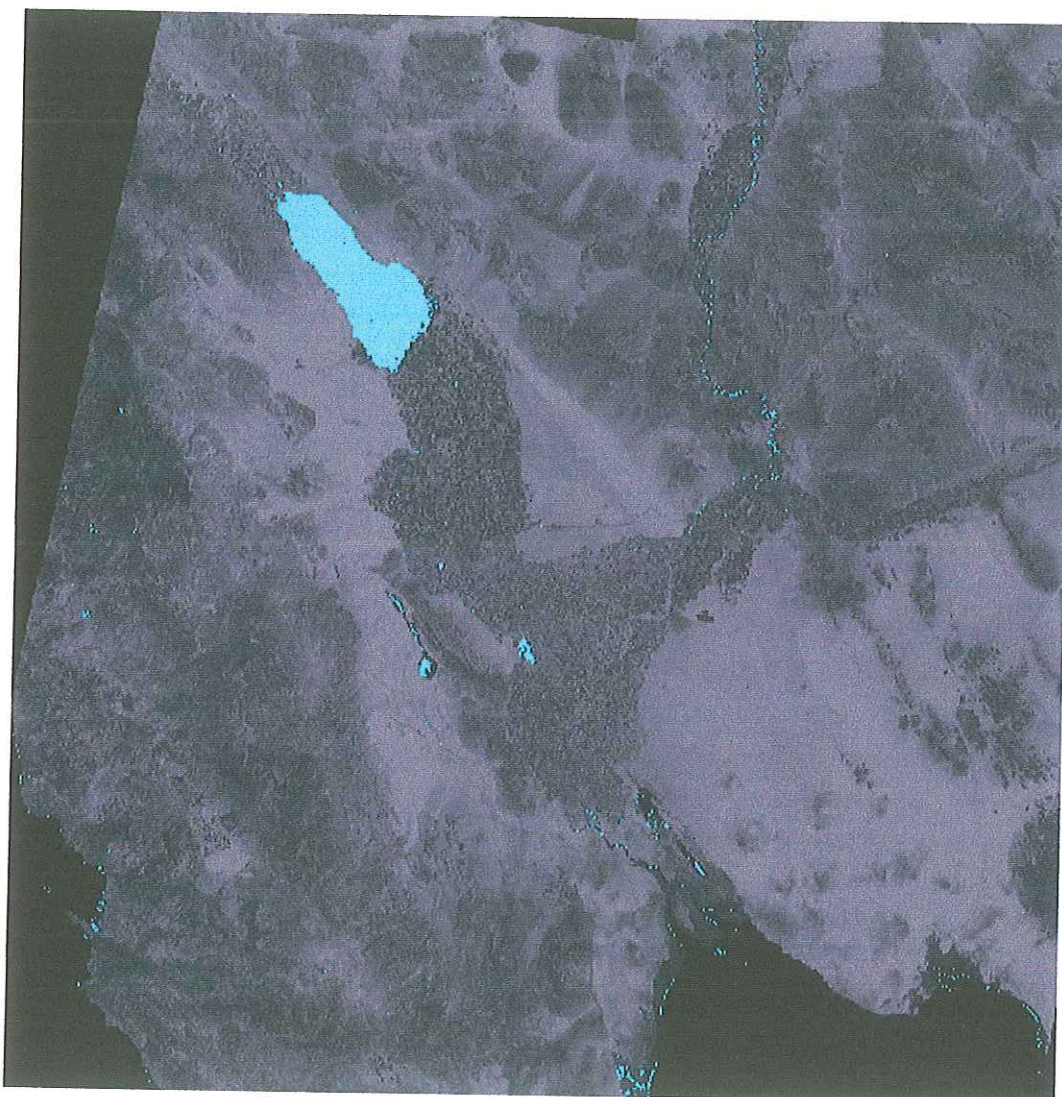


Figura 24. Imagen Landsat TM de 1990 cuyo mosaico en blanco y negro se sobrepone el Cociente 5/1 umbral ≤ 0.3 en color azul claro. Obtenida de usar el paso 2 del procedimiento propuesto para detectar grandes cuerpos de agua.

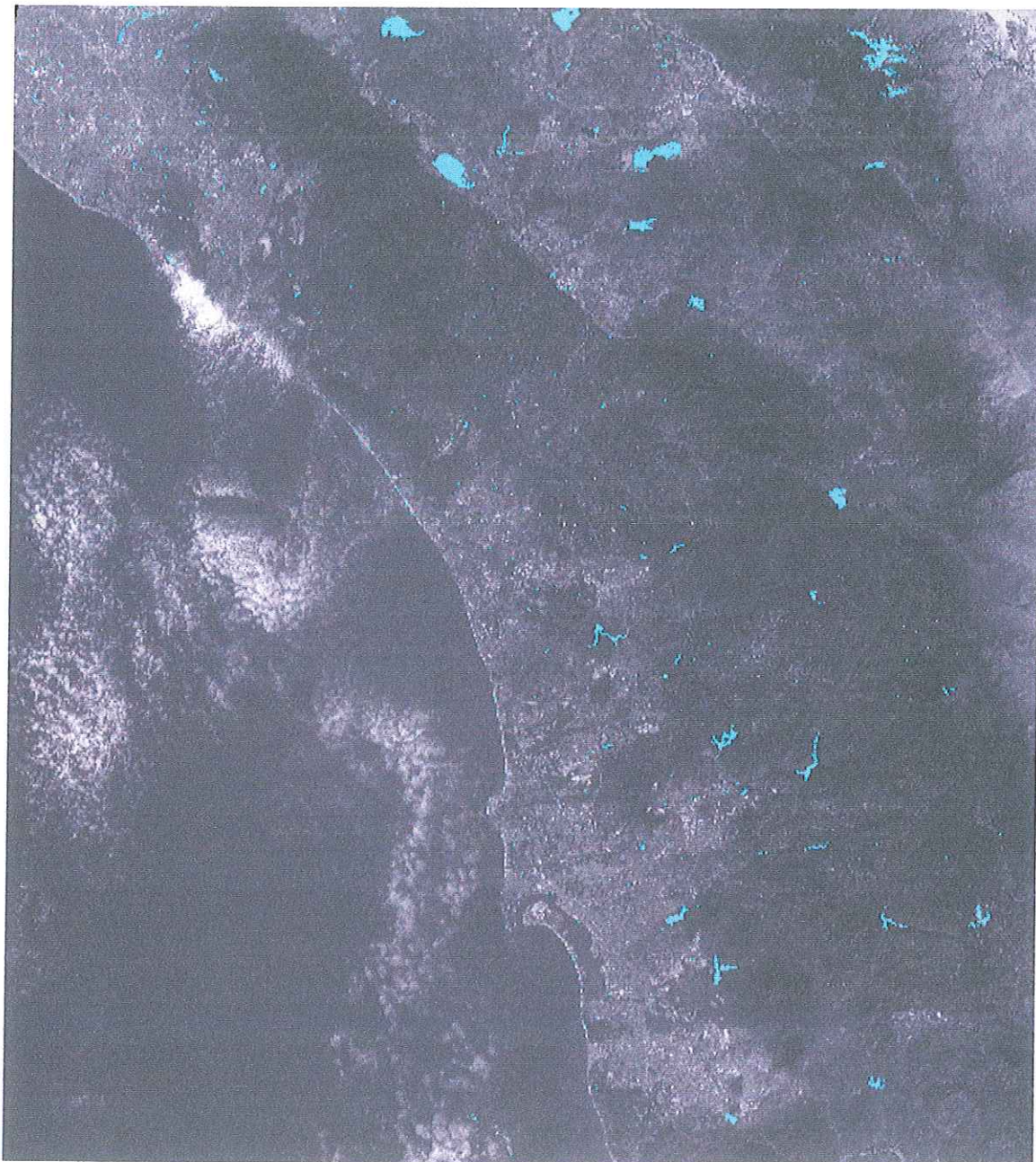


Figura 25. Mosaico en blanco y negro del 24 de Abril del 2000 formado por los pases 40/37 y 40/38 mostrando los cuerpos de agua detectados usando umbral ≤ 0.3 en color azul claro. Usando paso 2 del procedimiento para detectar cuerpos de agua.

A continuación se presenta la Tabla IX que incluye un análisis comparativo del cociente 5/1 de cuerpos de agua entre California, Estados Unidos y Baja California, México.

Tabla IX. Análisis comparativo de las áreas de los cuerpos de agua detectados aplicando cociente 5/1 en los mosaicos 1984,1990 y 2000 de la zona de estudio. NIM significa que no hubo imagen para esa fecha.

Cuerpo de Agua-Ubicación	Área Hectáreas		
	1984 Umbral 0.242	1990 Umbral 0.3	2000 Umbral 0.4
Lago Morena CA,USA	1849.875	522.938	1580.151
Lago Barret CA,USA	1773.875	928.688	1911.143
Lago Tule CA,USA	27.125	31.125	NIM
Presa López Zamora Ensenada BC,MX	146.063	103	NIM

NIM. No Incluida en el Mosaico

En la Figura 26 se muestra el área del lago Morena, en California, Estados Unidos, para tres escenarios 1984, 1990 y 2000. Observamos como los cambios en las áreas son muy notables, para 1984 se tenía un área de 1849.875 hectáreas, para 1990 disminuyó el área casi al triple, teniendo 522.938 hectáreas y finalmente para el año 2000 el área del lago subió considerablemente. No es objeto de estudio en esta tesis averiguar los factores que dieron lugar a estos cambios.

Áreas estimadas a partir de cociente 5/1 en Ha para el lago Morena en Ca, USA



Figura 26a. Imagen de 1984 con umbral 0.161 y una área estimada de 1850

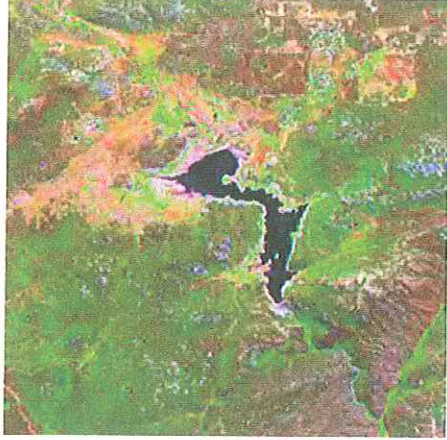


Figura 26b. Imagen de 1990 con umbral 0.3 y una área estimada de 523



Figura 26c. Imagen del 2000 con umbral 0.4 y una área estimada de 1580

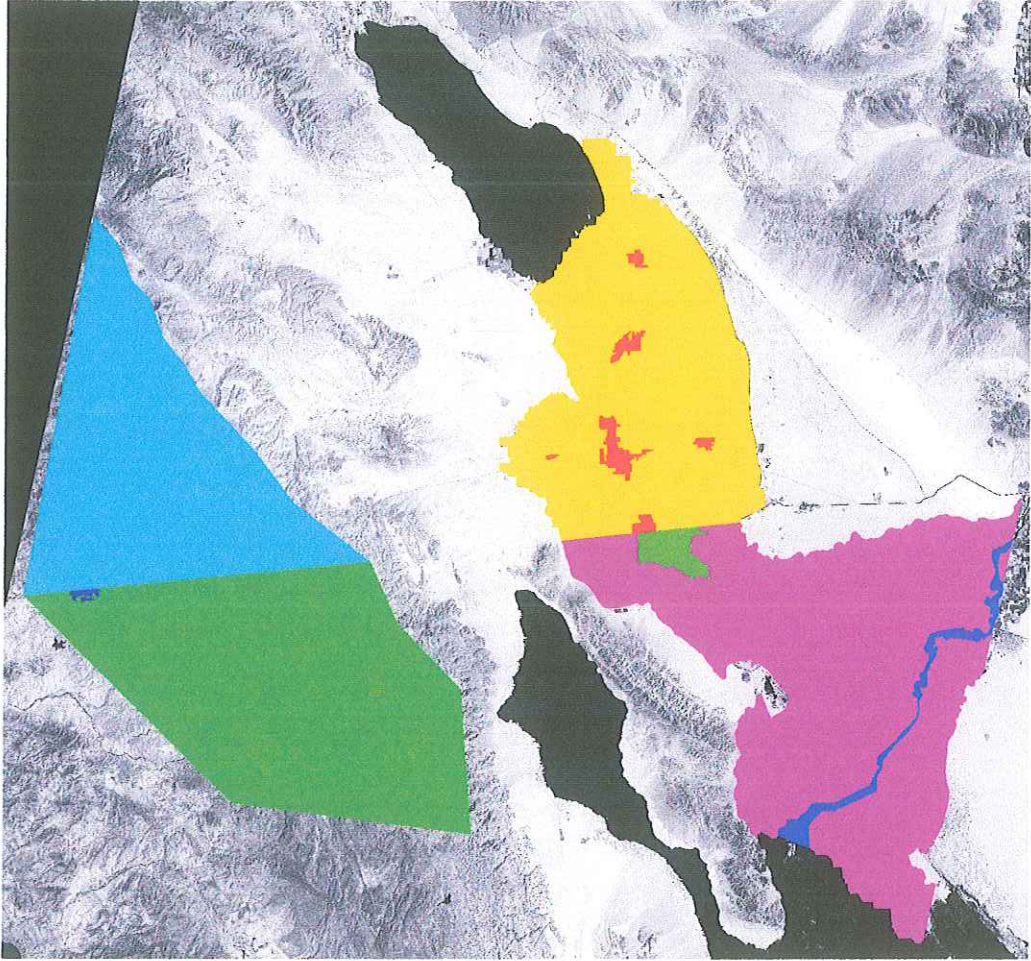
VI.4. Índice de vegetación

VI.4.1. Selección de regiones de interés

Con el objetivo de comparar cuantitativamente zonas con vegetación agrícola y zonas con vegetación natural en ambos lados de la frontera, se tomó como punto de partida un mosaico de imágenes Landsat en color natural de la zona de estudio y con información cartográfica de apoyo (INEGI y USGS) se delimitaron regiones de interés las cuales se muestran en la Figura 27, basándose principalmente en:

1. Lugares donde es evidente el cambio en la abundancia de vegetación tanto agrícola como natural en la zona fronteriza.
2. Asentamientos urbanos.

La mayor parte de la superficie analizada en las imágenes del satélite del pase 39 tiene como uso del suelo predominante la agricultura. Las zonas con asentamientos urbanos se excluyeron de estas regiones al momento de calcular su NDVI.



Leyenda








	Vegetación natural en CA-USA
	Vegetación natural en BC-MX
	Tecate BC-MX
	Valle Imperial CA-USA
	Zona Urbana en Valle Imperial
	Valle de Mexicali BC-MX
	Zona urbana Mexicali BC-MX
	Río Colorado BC-MX

Figura 27. Delimitación de polígonos sobre el pase 39 de Landsat entre California y Baja California con uso del suelo agrícola, urbano y vegetación natural en la zona fronteriza. Sobre estas zonas se calculó el índice de vegetación NDVI en ambos lados de la frontera y así comparar el índice en áreas bajo un mismo régimen de uso del suelo.

Como se explicó en la metodología, los valores de NDVI que nos interesan son los positivos ya que estos representan una respuesta de vegetación vigorosa en la cubierta terrestre, entre mayor sea su valor mayor vigor vegetal presenta la zona observada. Se calculó el NDVI a las imágenes Landsat TM de 1984 y 1990 teniendo especial interés en vegetación agrícola y vegetación natural.

VI.4.2. NDVI para zonas agrícolas en el delta del río Colorado.

Para el análisis del NDVI en las zonas agrícolas en el delta del río Colorado, se presentan dos escenarios, uno de flujos extraordinarios los cuales ocurrieron en 1984 y se muestran en la Figura 28 y otro en una condición de sequía en la Figura 29a.

En ambas figuras, al índice NDVI se asignó una paleta de colores que va del café al verde, en donde los tonos verdosos corresponden a valores altos del NDVI indicando un vegetación mas vigorosa, mientras que los tonos café indican valores cercanos a cero con nula o escasa vegetación. En la Figura 28, tanto el Valle Imperial en California como el Valle de Mexicali en Baja California tienen valores de NDVI parecidos, con semejantes tonalidades verdes indicando vegetación vigorosa en ambos lados. Esto es debido a la disponibilidad de agua para las plantas por los flujos extraordinarios. Ahora observemos la Figura 29a, aquí el escenario cambia completamente para la misma zona, observamos como el Valle de Mexicali, BC tiene tonos mas oscuros, esto quiere decir que los valores de NDVI son muy cercanos a cero y lo podemos analizar a través del histograma de la Figura 29c en donde se tiene una mediana de 0.059 en comparación con el valle Imperial, CA que tiene una mediana de 0.309 como se muestra en la Figura 29b.

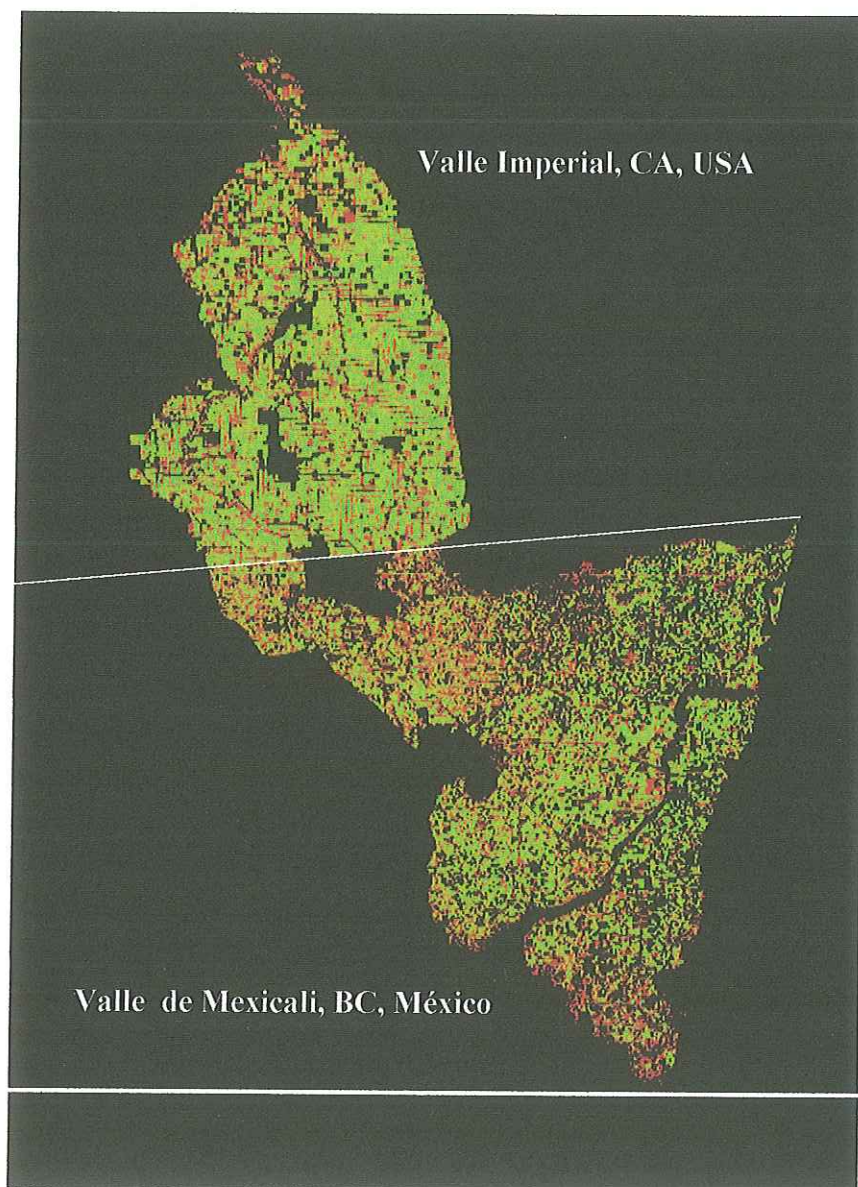
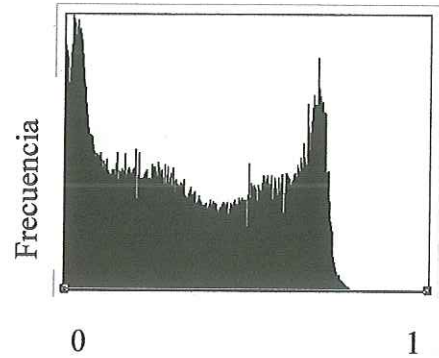


Figura 28. NDVI en imagen de 1984 sobre valles de Mexicali e Imperial. Tonos verdes corresponden a valores positivos de NDVI, tonos oscuros indican nula o poca vegetación con valores de NDVI cercanos a cero. En este año se presentaron flujos extraordinarios en el delta del río Colorado.

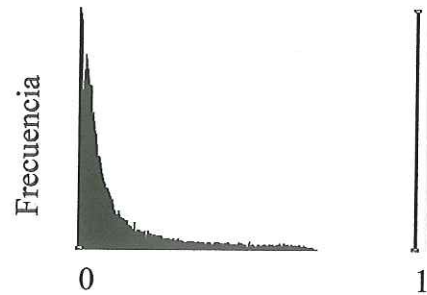


Figura 29a



$$\begin{aligned}\mu &= 0.339 \\ M &= 0.309 \\ \sigma &= 0.237\end{aligned}$$

Figura 29b



$$\begin{aligned}\mu &= 0.129 \\ M &= 0.059 \\ \sigma &= 0.163\end{aligned}$$

Figura 29c

Figura 29a. NDVI de Imagen en el delta del Colorado en 1990, cuando prevalecía una condición de sequía, se observa un gran contraste entre Valle imperial y Valle de Mexicali. 29b. Histograma del NDVI del Valle Imperial con sus valores estadísticos (μ = media, M =mediana, σ =desviación estándar) . 29c. Histograma del NDVI del Valle de Mexicali en 1990 y sus valores estadísticos.

VI.4.3. NDVI en zonas de vegetación natural.

En la Figura 30 y Figura 31 se muestran las imágenes correspondientes al pase 39 de 1984 y 1990 respectivamente especificadas en la tabla V, a las que se les ha sobrepuesto el índice $NDVI > 0$ para la zona delimitada con vegetación natural en California, EU y Baja California México. Los tonos verdes representan los valores más cercanos a 1 y los cafés corresponden a valores de NDVI cercanos a cero, es decir, con nula o poca vegetación.

El índice NDVI de zonas con vegetación natural para el año de 1990 se muestra en la Figura 30 donde tenemos un valor medio de 0.188, una mediana 0.172 y una desviación estándar de 0.115 en California, mientras que para Baja California se tiene valores más bajos con una media de 0.093, mediana de 0.074 e incluso una dispersión menor con una desviación estándar de 0.094, los valores más altos de NDVI predominan en la zona de California. En la Figura 31 observamos una situación similar, con valores más altos de NDVI en California donde se obtuvo una media de 0.191, mediana de 0.160 y desviación estándar de 0.138, mientras que para Baja California una media de 0.071, mediana de 0.056 y desviación estándar de .06.

La zona de vegetación natural se definió como una franja a lo largo del pase 39 de las imágenes Landsat que cubriera la zona montañosa del batolito peninsular en la región fronteriza entre California y Baja California con condiciones similares de altitud.

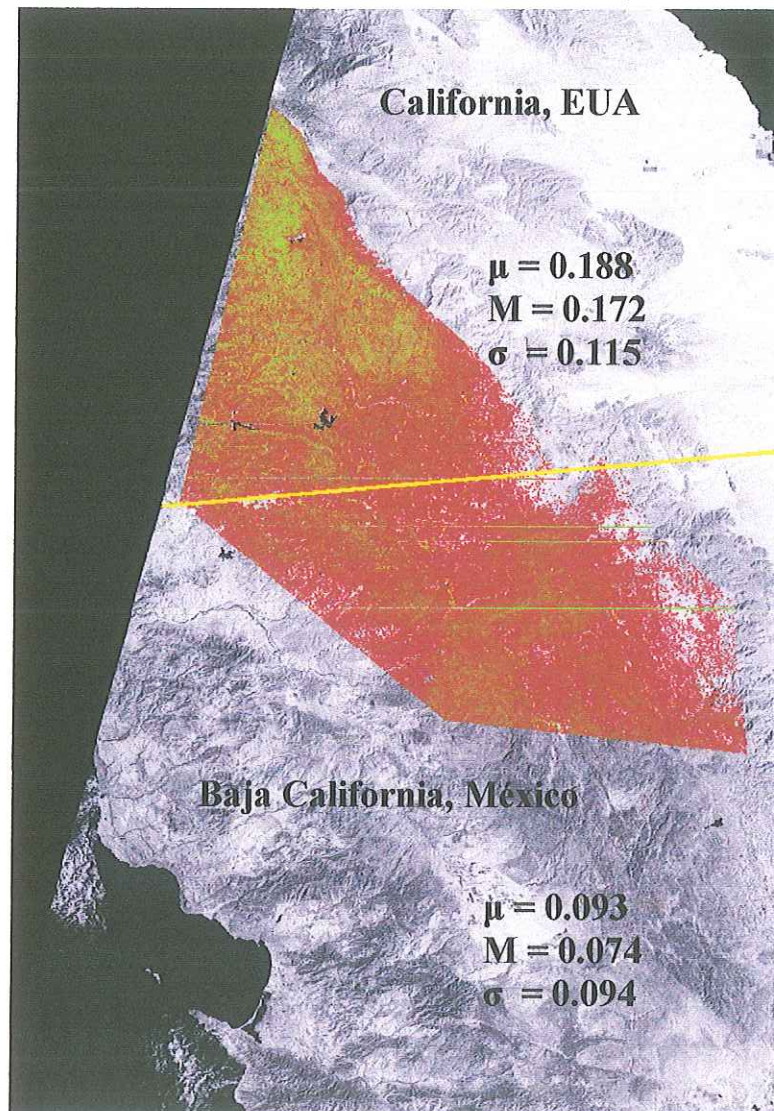


Figura 30. Imagen Landsat de 1984 que muestra las zonas de vegetación natural en ambos lados de la frontera en base al índice de vegetación, tomando únicamente valores positivos. Se muestran también valores estadísticos del NDVI (media, mediana y desviación estándar).

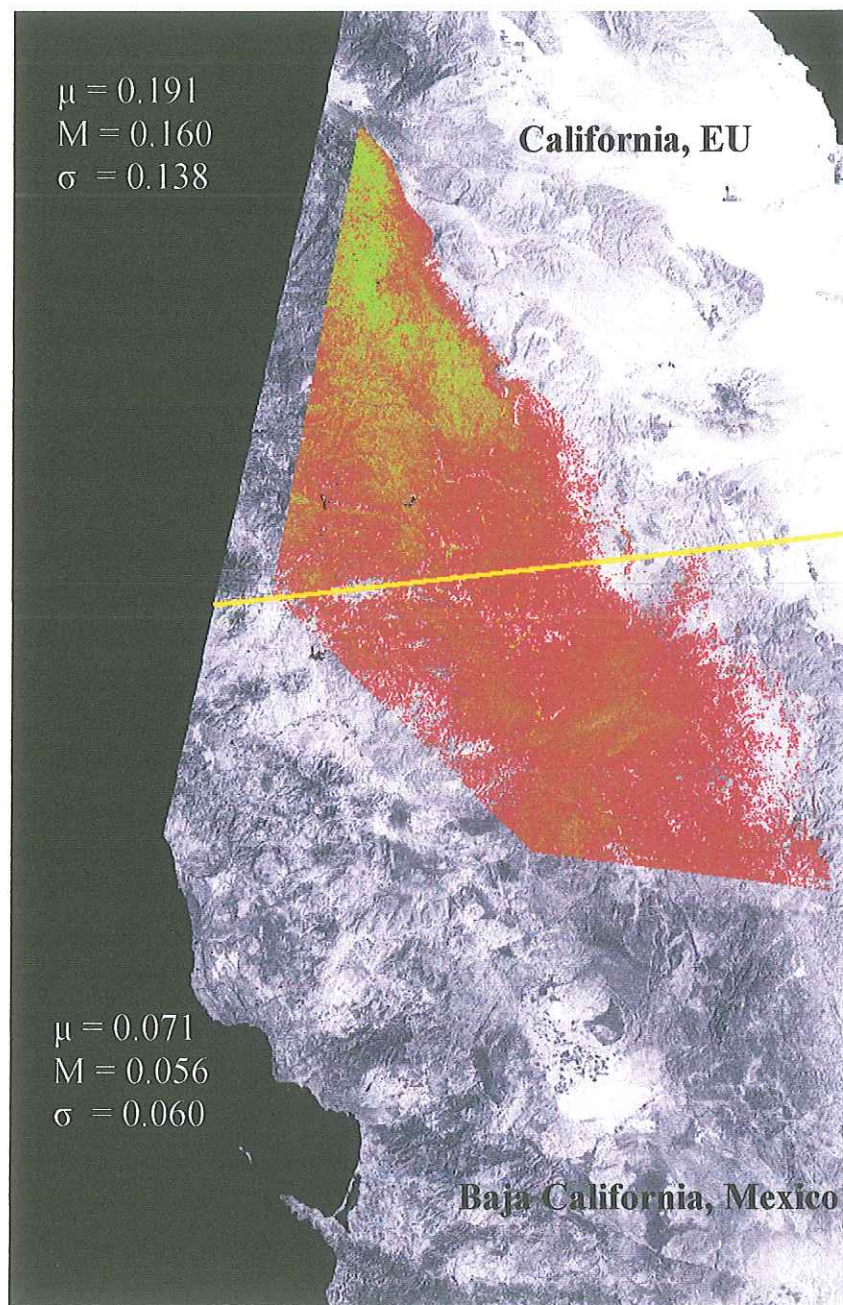


Figura 31. Imagen Landsat de 1990 que muestra las zonas de vegetación natural en ambos lados de la frontera en base al índice de vegetación, tomando únicamente valores positivos. Se muestran también las estadísticas del NDVI.

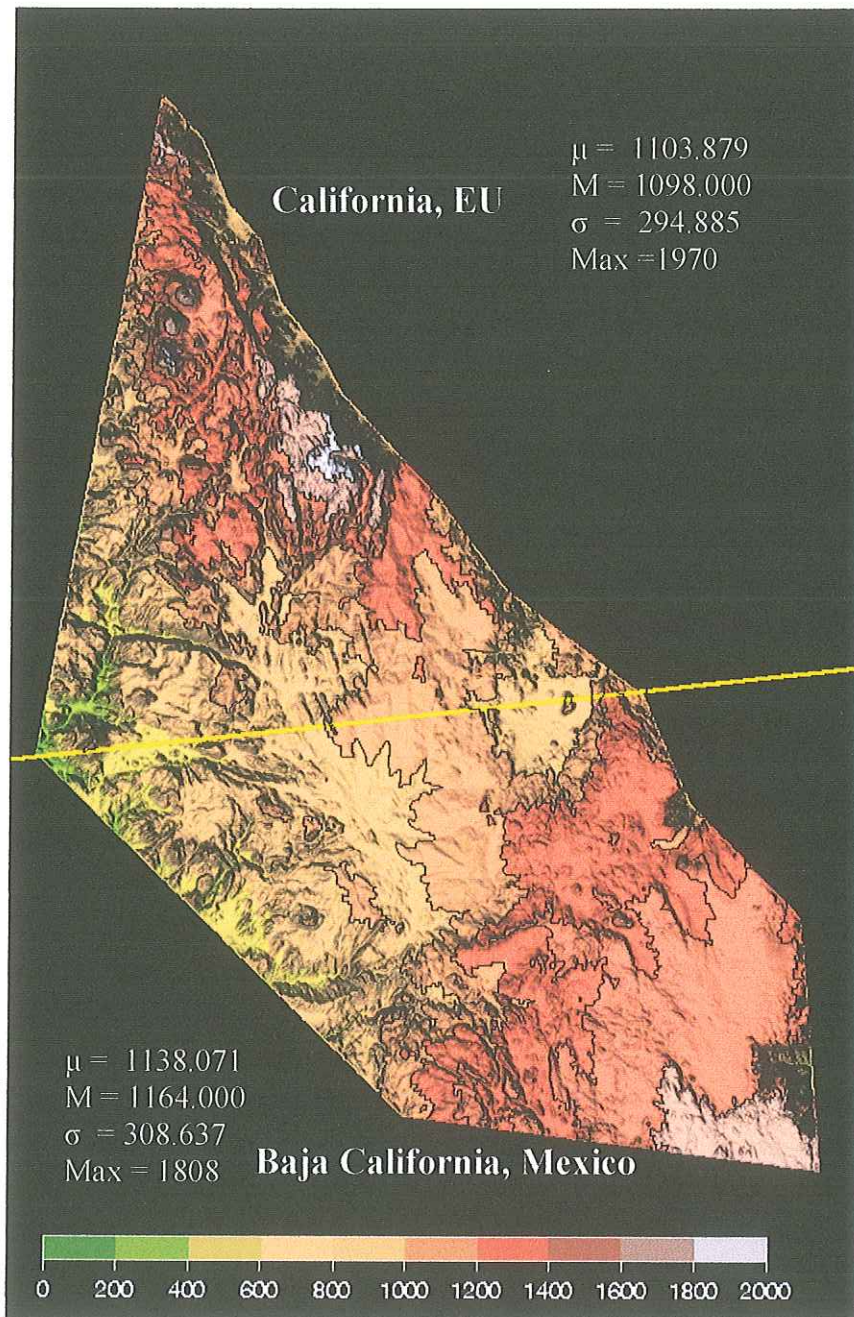


Figura 32. Representación sombreada y texturizada del MDT para la zona delimitado como vegetación natural donde se presenta las alturas en metros en ambos lados de la frontera y su estadística.

En la Figura 32 se muestran las elevaciones de la misma zona mostrada en la Figura 30 y Figura 31, vemos como la altura máxima en California, Estados Unidos es de 1970 metros, y para Baja California, México la altura máxima es de 1808, no hay mucha diferencia en los valores de la media, mediana y desviación estándar, indicando condiciones similares del relieve y paisaje, sin embargo los resultados en los índices de vegetación son distintos.

VI. CONCLUSIONES

- La fuerte absorción de energía por el agua en la ventana espectral de los 1.55- 1.75 μm (banda 5 TM) permite detectarla segmentando el histograma de la imagen objetivo, sin embargo puede confundirse con otros cuerpos oscuros como sombras inducidas por el relieve.
- En las imágenes Landsat TM analizadas se encontraron umbrales que varían entre las 10 y 40 cuentas para la banda 5. Los valores altos corresponden a aguas turbias con mayor concentración de sólidos suspendidos. El umbral puede ajustarse interactivamente bajo inspección visual. Entre mayor sea el umbral, mayores las áreas detectadas como agua con un mejor cubrimiento, sin embargo mayor será la detección de otros objetos oscuros que no son cuerpos de agua.
- El cociente de la banda 5 TM con otras bandas atenúa el efecto de las sombras en la detección de cuerpos de agua, obteniendo mejores resultados el cociente 5/1. Los umbrales encontrados para el cociente 5/1 varían entre .15 y .5.
- Con un modelo digital del terreno de resolución espacial similar a la imagen objetivo, es posible predecir las zonas sombreadas bajo las condiciones de iluminación de la imagen objetivo y así descartarlas en la clasificación.

- Un flujo automatizado de datos que permita determinar el área de los cuerpos superficiales a partir de imágenes de sensores remotos sería de utilidad para un mejor aprovechamiento de los recursos hidráulicos.
- El monitoreo del índice de vegetación normalizado NDVI permite medir indirectamente el agua disponible asimilada por las plantas.
- En las imágenes de 1984 y 1990, el valor promedio del índice de vegetación en zonas agrícolas siempre fue mayor en el Valle Imperial que en el de Mexicali. El valor promedio en 1984 fue 1.2 veces mayor en el valle Imperial con un contraste menor que en 1990 debido a mayor disponibilidad de agua por los flujos extraordinarios del Río Colorado (RC).
- En la imagen de 1990, que representa condiciones de sequía y de entregas normales de cuotas de agua acordadas en los tratados internacional del RC de EUA a México, existe un notable contraste del índice de vegetación, con un razón de 2.63 veces en el valor promedio entre los valles de Mexicali y el Imperial.
- El índice calculado para la vegetación natural en la zona montañosa de la Rumorosa y Tecate en México incluyendo el parque nacional Cleveland y montañas Laguna en California, también presenta valores promedios más altos en California que en Baja California para los dos años analizados, a pesar de que el promedio de altitud es similar en ambos lados de la frontera.
- El índice aumentó ligeramente de 1984 a 1990 en la porción de California, sin embargo para Baja California fue lo contrario, con un pequeño descenso en los valores promedio.

BIBLIOGRAFIA

- Alzate, B.E. 2000 Introducción al procesamiento de imágenes digitales. Instituto de astronomía y física del espacio. Grupo de teledetección. Argentina. <http://www.iafe.uba.ar> consultado en Marzo 2005.
- Bava, J. y Dogliotti, A. I. 2000. Teledetección con Imágenes Satelitales: Generalidades. Grupo de Teledetección IAFE. CONICET Argentina.
- Bava, J. y Pierini, J., 2003. Extracción de la línea de separación tierra-agua mediante imágenes LANDSAT y generación de mapas batimétricos en el estuario de Bahía Blanca (38.7°S 62.2°W). V jornadas Nacionales de Ciencias del Mar. Mar de Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Campbell, 1996. Introduction to Remote Sensing. Guilford Press. New Cork. 622 pp.
- CESPE. Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada <http://www.cespe.gob.mx> consultado en Nov 2004.
- CESPT. Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana. Cultura del agua <http://www.cespt.gob.mx/cultura/histagua.htm>, consultado en Nov 2004.
- CESPTE. Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tecate. <http://www.cespte.gob.mx>, consultado en Nov 2004.
- Chuvienco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus*, 1: 1-16.
- Chuvienco, Y. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. 3a Edición revisada, Ediciones Rialp, S A. Madrid, España, 568 pp.
- CWP, 1998 California Water Plan Update Bulletin, (1)11:160-98.
- Degioanni A., Reynero M.A., Cisneros J. y Cantero Gutierrez A. 2002. Servicio de Conservación y Ordenamiento de Tierras (SECYOT). Asociación Española de Teledetección. 17:83-95.
- Diccionario Enciclopédico de Baja California. 1989. Instituto de Cultura de Baja California. 484 pp.
- Dozier, J., y Strahler, A. H. 1983. "Ground investigations in support of remote sensing". Manual of remote sensing. American Society of Photogrammetry (1):1232 p.

- Farr, T.G. y M. Kobrick, 2000, Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data, *Amer. Geophys. Union EOS*, 81:583-585.
- Folch, R. y París, A., 1997. Estudio de la estructura del territorio y del paisaje mediterráneos Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), Institut Català de la Mediterrània (ICM), ERF Gestió i Comunicació Ambiental, S.L., Multicriteria Consulting (MCRIT). 220 pp.
- Frazier, P.S., y Page, K.J. (2000) Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(12):1461-1467.
- García M. y Pérez. M., 1999, Estudio mediante imágenes TM del entorno de Villacañas (Toledo). *Teledetección* 11(7): 13-22.
- Giddings, L. E. y Coria, R. 1984. Índices para ilustrar los cambios de vegetación en México. *Biótica*, 9:367-378.
- Gerlack F. 2001. How Collection Geometry Affects Image Tonality. *Imaging Notes*, 16(1) 6-7.
- Gerlack F. 2001. How Collection Geometry Affects Specular Reflections. *Imaging Notes*, 16(2) 6-7.
- Guzmán, S. 1998. "La contaminación del acuífero del Río Tijuana". Tesis de maestría, El colegio de la Frontera Norte, Tijuana, México. 108 pp.
- Goetz, A. F. H., Vane, G., Solomon, J.E., y Rock, B.N. 1985. Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science* 228(4704): 1147-1153.
- Horn, B. K. P. 1981. Hill Shading and the Reflectance Map, *Proceedings of the IEEE*, 69(1):14-47.
- Hori Ochoa, C., 1998. Variabilidad de las respuestas espectrales de acuerdo a los cambios fonológicos de la vegetación del anticlinorio de Arteaga, Coahuila y Nuevo Leon, México. Tesis de Maestría en ingeniería Ambiental. División de ingeniería y arquitectura. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey. 146 pp.
- Jones, K. H. 1998. A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM. *Computers & Geosciences* 24 (4): 315-323.
- Lillesand, T.M., y Kiefer, 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley and Sons, New York, N.Y., 721 pp.

- Lunetta, R. y Balogh, E. 1999. Application of multi-temporal Landsar 5 Tm imagery for wetland identification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 65(11):1303-1310.
- Mexicano L., 2004. Análisis retrospectivo de los humedales del Delta del Río Colorado por medio de sensores remotos y su relación con el flujo a través de la frontera México-E.U.A. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C. 78 pp.
- Michael, S., y Graizbord C., 2002. Los ríos urbanos de Tecate y Tijuana: Estrategias para ciudades sustentables. Institute for Regional Studies of the California. San Diego State University. 45 pp.
- Nagler, L.P., Glenn, E. P., Huete, A. R. 2002. Assessment of spectral vegetation indices for riparian vegetation in the Colorado River Delta, México. *Journal of Arid Environments* 49:91-110.
- NASA, 2003. <http://samadhi.jpl.nasa.gov/msl/Programs/landsat.html> Consultada 12/Abril/2004.
- Plan nacional del agua 2001-2006. Comisión Nacional del Agua. 76 p. http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Organismos/Central/Publicaciones/ProgNacHid_01_06_CNA.htm Consultada 4/Mayo/2005.
- Programa Hidráulico Regional 2002-2006. Hacia una Nueva Visión. Región II Noroeste. Comisión Nacional del Agua. ISBN: 9688175439.
- Raaflaub L. D. y Collins M. 2005. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. *Environmental Modeling & Software*, In Press, Corrected Proof, Consultado 27 Abril 2005.
- Richards, J. A. 1986. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Alemania. 334 pp.
- Román, C. J. 2001. El Delta del Río Colorado: Impacto del Desarrollo Urbano sobre la Agricultura Regional. Instituto de Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma de Baja California. 151 pp.
- Roosevelt F. D. y M. Ávila Camacho, 1944. *Tratado Internacional de Límites y Aguas* <http://www.ibwc.state.gov/Files/1944Treaty.pdf> Consultada 11/Nov/2004.
- Sabins, F. F. 1997. "Remote Sensing: Principles and Applications". New Cork, W.H. Freeman and Co, 494 pp.

- Sheffner, E. J. 1994, The Landsat Program: Recent History and Prospects. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 735 pp.
- Smit, P. 2001. Maximizing information content of landsat imagery for coastal zone applications. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 67(7): 769-771.
- Solís Alba R. 2003. Problemática del agua en Ensenada. Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada. Departamento de Planeación. Comunicación personal.
- USGS, 2003. Earth Resources Technology Satellite (ERTS), página de internet: http://eosims.cr.usgs.gov:5725/DATASET_DOCS/landsat_dataset.html Consultada 6/Marzo/2005.
- Verbyla, D.L.,1995. "Satellite Remote Sensing of Natural Resources". Lewis publishers, Inc., florida, USA. 224 pp.
- Vincent, R. K. 1997. "Fundamentals of geological and environmental remote sensing". New Jersey, Prentice Hall. 370 pp.
- Weier John and David Herring (2000). Measuring Vegetation (NDVI & EVI). Earth Observatory, NASA. <http://earthobservatory.nasa.gov/Library/MeasuringVegetation>. 6/Junio/2004.