

Evaluación de índices texturales para discriminar morfología urbana: análisis de la ciudad de Maracay (Venezuela)

Z. Molina y E. Chuvieco.

Universidad de Alcalá. Departamento de Geografía. Calle Colegios 2 28801 Alcalá de Henares

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúan diferentes índices texturales, con la finalidad de seleccionar los más adecuados para discriminar distintos sectores morfológicos en zonas urbanas. El estudio se ha realizado a partir de una imagen SPOT pancromática de la ciudad de Maracay (Venezuela). Los índices evaluados se basan en medidas estadísticas locales y en la matriz de concurrencia. Se calcularon 10 índices texturales. Un análisis de separabilidad promedio y para cada una de las 12 categorías definidas, permitió obtener los índices más adecuados para nuestros objetivos. También se seleccionaron los canales con mayor capacidad discriminadora, a partir de la divergencia transformada. Si bien la separación entre algunas cubiertas resulta muy problemática, los índices texturales que facilitan una mayor separación entre cubiertas son los basados en la matriz de concurrencia: media, disimilaridad y contraste.

PALABRAS CLAVE: Índices texturales. Áreas urbanas. Maracay (Venezuela)

ABSTRACT

This paper explores the use of textural bands to discriminate land cover categories in urban areas. The study is focused on the city of Maracay, in the central region of Venezuela. Texture has been computed from both moving windows and co-occurrence matrix. The roles to select the best combination of bands are the average Transformed Divergence (TD) and maximum discrimination for the selected urban categories. The optimum indices are based on the co-occurrence matrix, being the most discriminative the mean, dissimilarity and contrast.

KEY WORDS: Textural bands. Urban areas. Maracay (Central region of Venezuela).

INTRODUCCIÓN

La ciudad supone, casi por definición, un variado entramado de actividades, frecuentemente interconexiónadas en un espacio relativamente reducido. Esto origina áreas de muy variado uso y ocupación del suelo, por lo que la discriminación de coberturas resulta bastante compleja en el medio ambiente urbano (Casas y Chuvieco, 1987).

Por esta razón la cartografía de las áreas urbanas a partir de imágenes de satélite resulta bastante complicada, pues las cubiertas urbanas no presentan una respuesta espectral consistente (Harris, 1987). La heterogeneidad del elemento urbano en cuanto a formas, tamaños y materiales, supone una gran variedad de respuestas espectrales, más aún cuando se cuenta con imágenes de alta resolución espacial. La definición de zonas urbanas homogéneas es complicada, por cuanto en la mayoría de los casos un píxel representa una señal mixta, formada por tipos de material muy variados. En consecuencia, no es sencillo realizar clasificaciones en zonas urbanas tomando en cuenta únicamente las propiedades espectrales de los píxeles de

la imagen; es preciso añadir al análisis alguna variable auxiliar que permita tener en cuenta su variabilidad espacial.

En este sentido, se han desarrollado algunas técnicas basadas en el análisis de texturas que permiten, además de mejorar los niveles de precisión en clasificaciones individuales, obtener una interpretación más clara de los elementos presentes en una imagen. A diferencia de los rangos espectrales, que describen la variación tonal promedio en una o varias bandas de una misma imagen, los rasgos texturales contienen información acerca de las relaciones espaciales en una banda. En términos de interpretación visual, la textura hace referencia a la rugosidad con la que aparecen los tonos de gris en una fotografía. Los índices numéricos de textura, por su parte, se dirigen a medir la variación espacial entre los ND (niveles digitales) de los píxeles que forman la imagen. Se pueden dividir estos índices entre aquellos que operan sobre toda la imagen y los que se apoyan en ventanas móviles, que se desplazan consecutivamente afectando en cada paso al píxel central, por lo que crean nuevas imágenes de textura. Entre los primeros se pueden

citar la desviación típica a lo largo de perfiles, la dimensión fractal, autocorrelación espacial y el semi-variograma. Respecto a los métodos que se basan en ventanas móviles, se pueden citar los siguientes: desviación típica local, diferencias absolutas entre los ND máximos y mínimos de la ventana considerada, entropía, medidas sobre la matriz de co-ocurrencias y dimensión textural (Chuvieco, 1996).

Análisis de textura aplicados a clasificaciones en ámbitos urbanos, con la finalidad de incrementar la precisión de clasificaciones individuales han sido discutidos en diversos trabajos (Jensen, 1978; Jensen, 1982; Baraldi y Parmiggiani, 1990; Marceau, 1990). Las metodologías propuestas por los autores son variadas. Por ejemplo, Gong y Howarth (1990) proponen una metodología basada en el uso de una imagen de densidad de bordes, creada a partir de un filtro de paso alto. Esta imagen es incluida como una banda adicional en la clasificación. Jensen (1990) propone una metodología de clasificación de imágenes usando un sistema experto que incorpora información espectral, de textura y de contexto para obtener la cartografía del uso del suelo en áreas urbanas. Weber y Hirsch (1992), demuestran cómo el uso integrado de la información proveniente de una imagen SPOT e información del censo permite caracterizar y cartografiar información sobre la calidad del paisaje urbano en la ciudad de Estrasburgo (Francia), con un detalle que no es posible obtener al usar sólo información del censo. En este caso a la imagen SPOT le fue aplicado un análisis textural para acentuar su variabilidad espectral y poder diferenciar con mayor precisión algunas categorías de cobertura del suelo. En esta misma línea, pero analizando la expansión urbana, se tienen los trabajos realizados por Fung (1992), Liu (1993) y Ridd et al. (1993), que usan de manera integrada información TM y SPOT -HRV para desarrollar un grupo de algoritmos que incluyen filtros, análisis de textura y umbrales, para incrementar los niveles de precisión en clasificaciones digitales cuyo objetivo es separar las tierras construidas de las no construidas en la ciudad de Salt Lake.

OBJETIVOS

Este trabajo tiene como objetivo principal realizar un análisis de diferentes índices texturales para ser aplicados a un análisis morfológico de la ciudad de Maracay (Venezuela). Este objetivo forma parte de un proyecto más amplio, donde se pretende analizar la morfología urbana, la calidad de vida y la dinámica de ocupación del suelo para la ciudad de Maracay mando de manera integrada imágenes de satélite e información auxiliar almacenada en una base de datos creada con este proposito.

MÉTODOS

Area de estudio

La ciudad de Maracay está localizada entre las coordenadas: 67°30' y 67° 40' de longitud oeste, y los 10° 10' y 10°20' de latitud norte. Dentro del país está ubicada en la región centro norte costera, concretamente en la parte central de la depresión del Lago de Valencia (Figura 1).

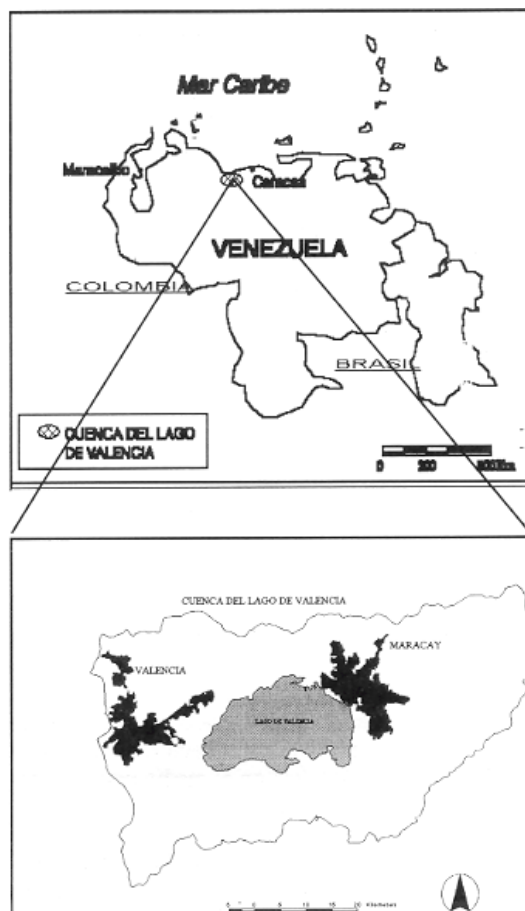


Figura 1. Maracay: Localización Nacional y Regional.

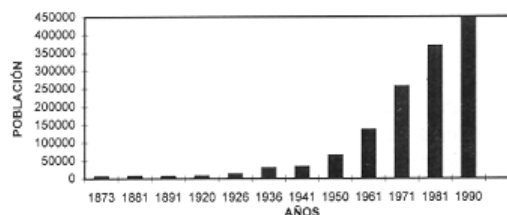


Figura 2. Evolución de la población en Maracay.

Maracay es la primera ciudad en importancia del estado Aragua tanto desde el punto de vista económico como de su población, además ocupa la décima posición en la jerarquía de ciudades venezolanas.

Físicamente está conformada por paisajes de planicie, valle, piedemonte y montaña. La planicie ocupa la mayor extensión territorial y se inicia en la orilla del Lago de Valencia con deposiciones de

origen lacustre, que en dirección Norte y Este entran en contacto con materiales de origen aluvial que, a la vez, ocupan la mayor extensión de este paisaje. Hacia el norte, la planicie pasa gradualmente hacia el paisaje de valle como el de los ríos Caño Colorado, Las Delicias, Güey y Limón, entrando en contacto con el piedemonte que los separa del paisaje montañoso de las estribaciones meridionales de la Serranía del Litoral (Morales, 1990).

De acuerdo a la clasificación climática de Koepen, el clima de Maracay es tropical de sabana. La temperatura media anual es de 25°C, con una máxima anual de 31 °C y una mínima de 19°C. La precipitación es del tipo subhúmedo con un promedio entre 900 y 1200 mm; la estación seca comienza en diciembre y se extiende durante cuatro meses, y la lluviosa se inicia en mayo y se prolonga durante seis meses.

La ciudad contaba en 1990 con 421.000 habitantes, y según proyecciones realizadas por la Oficina Nacional del Censo, se esperan 862.000 habitantes para el año 2.000. La Figura 2 muestra la evolución de la población de Maracay desde 1873 hasta 1990.

Maracay con sus 295 años de estructuración oficial como centro poblado (1701-1987) ha logrado un vertiginoso crecimiento. Pasó de humilde pueblecito para viajeros en tránsito por el "camino de la gobernación", a un inusitado progreso que la hace figurar hoy como capital del estado Aragua, abigarrada de habitantes, con un cúmulo de problemas, la mayor parte derivados del rápido desarrollo experimentado en los últimos 25 años.

El acelerado crecimiento de Maracay es producto, principalmente, de su función industrial. Su crecimiento es bastante uniforme espacialmente, aunque tiene mayor importancia hacia el sur y el oeste, que viene a ser la expansión natural en virtud de la existencia de tierras disponibles (Botello, 1987).

En vista de los problemas que conlleva el realizar un estudio urbano con imágenes de satélite y de lo heterogéneo de la ciudad a estudiar, se consideró importante realizar un trabajo directo de campo que permitiera, por una parte, recopilar la información tanto bibliográfica como cartográfica necesaria y, por otra, familiarizarse con la ciudad, tratar de entender su estructura física y precisar algunos elementos que la caracterizan. A este respecto fueron visitados 71 barrios sobre los que se tomó información referida a tipo de edificaciones, material de construcción en los techos, jardines, densidad de edificación, densidad de población, servicios (cloacas, teléfono, venta de periódicos, zonas deportivas) y tipo, ancho y material del viario.

La visita a la ciudad permitió constatar, como ya se veía en las imágenes de satélite, la heterogeneidad característica de esa ciudad (considerable variación en los tonos de gris y tamaño, distribu-

ción y arreglo de parcelas). Una zona centro donde coexisten áreas comerciales, industriales, recreativas y residenciales de tipo unifamiliar y multifamiliar (Figura 3), gran variedad en los materiales de construcción, áreas residenciales en su mayoría muy desorganizadas espacialmente, predominio casi absoluto de viviendas unifamiliares con áreas verdes asociadas, que en unos casos son jardines pero en otros huertos de diversos tamaños (Figura 4), presencia de espacios verdes que en su mayoría pertenecen a terrenos militares y una gran cantidad de barriadas marginales de creación reciente (Figura 5), asentadas en áreas de baja calidad ambiental bien sea por su proximidad a terrenos sujetos a inundación o a las industrias. Por su parte, las zonas industriales se localizan, en unas ocasiones, en grandes zonas destinadas a este fin, pero en otras diseminadas en diferentes puntos de la ciudad.



Figura 3. Vista de la zona céntrica de Maracay.



Figura 4. Viviendas unifamiliares consolidadas.



Figura 5. Barriadas marginales.

Definición de medidas texturales

Para cumplir el objetivo planteado se utilizaron algunos índices texturales propuestos en dos programas de tratamiento digital de imágenes, y una

imagen SPOT pancromática adquirida en enero de 1991.

Los índices de textura utilizados en este trabajo se basan en ventanas móviles de 3*3 píxeles y en la matriz de co-ocurrencia. Entre los primeros están:

1.- Distancia Media Euclidiana (DME):

$$DME = \frac{\sum \left[\sum (X_c - X_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{N-1}$$

Donde:

Xc = Valor del ND para el pixel central de una ventana.

Xij = Valor del ND para el pixel (ij) de la ventana.

N = Número de píxeles en una ventana.

2.- Varianza (VAR):

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - M)^2}{N-1}$$

3.Sesgo (SES):

$$S = \frac{|\sum_{i=1}^n (X_{ij} - M)^3|}{(N-1)(V)^{3/2}}$$

Donde:

Xij = Valor del ND del pixel (i,j).

N = Número de píxeles en la ventana.

M = Media de la ventana móvil.

V = Varianza

Como antes se indicó otra manera de medir la textura se basa en la matriz de co-ocurrencia de los niveles de gris. La matriz de co-ocurrencia muestra la relación (arriba, abajo, derecha, izquierda) existente entre un pixel y sus vecinos especificados. La textura de una imagen está relacionada con la distancia de los elementos de la matriz de co-ocurrencia a la diagonal de la matriz, pues cuanto más elementos haya en la diagonal indicará que los tonos espacialmente cercanos lo son también tonalmente. La dispersión que los elementos de la matriz tienen respecto de la diagonal, pueden medirse estadísticamente a partir de diferentes índices.

La Figura 6 muestra un ejemplo gráfico de ventana de una imagen de 5*5 expresada en ND y la matriz de co-ocurrencia producida para cada pixel de referencia y su inmediato inferior.



Figura 6. Ejemplo de matriz de co-ocurrencia (adaptado de PCI 1996).

Los índices texturales a partir de la matriz de co-ocurrencia que hemos utilizado en este trabajo son los siguientes:

1.- Homogeneidad (HOM):

$$H = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (p_{i,j})}{(1+IR_i) - IC_j^2}$$

2.- Contraste (CON):

$$C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (p_{ij})(IR_i) - IC_j^2$$

3.- Disimilaridad (DIS):

$$D = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (p_{ij}(\overline{IR_i}) - IC_j)$$

4.- Media (MED):

$$M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (IR_i)(p_{ij})$$

5.- Desviación Estándar (DE):

$$D.E = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (p_{ij})(IR_i) - \text{mean}^2}$$

6.- Segundo Momento Angular (SMA):

$$SMA = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (p_{ij})^2$$

7.- Correlación (COR):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (p_{ij})(IR_i - IR_m)(IC_j - IC_m)}{\sqrt{(\sum_{i=1}^m (p_{ij})(IR_i - IR_m))^2} * \sqrt{(\sum_{j=1}^n (p_{ij})(IC_j - IC_m))^2}}$$

$$IR(m) = \frac{\sum_{i=1}^m (p_{ij}) * IR_i - p_{ij}}{\sum_{i=1}^m (p_{ij})}$$

$$IC(m) = \frac{\sum_{j=1}^n (IC_j * p_{ij})}{\sum_{j=1}^n (p_{ij})}$$

$\sum_{i=1}^n$ Suma de elementos de la matriz de co-ocurrencia para una columna dada de la matriz
 P_{ij} = Elemento de la matriz de co-ocurrencia.
 $IR_i = i - 1$ = Nivel de gris para una fila.
 $IC_j = j - 1$ = Nivel de gris para una columna.

De esta manera, y con los algoritmos anteriormente descritos fueron calculados sobre la imagen SPOT origina 11 índices-texturales.

Definición de criterios de selección de los índices texturales

Para evaluar los índices texturales y obtener los más adecuados a ser incluidos en un posterior proceso de clasificación, se procedió a definir 12 campos de entrenamiento correspondientes a cubiertas tanto urbanas como no urbanas, tomando en consideración algunos elementos morfológicos para describirlas. Las categorías se han definido teniendo en cuenta el fin último de este trabajo, orientado a determinar zonas de calidad de vida dentro de la ciudad. En este sentido, presentan notables variaciones con las categorías habitualmente definidas en mapas de uso o cobertura del suelo, pero se estima que estarían mejor relacionadas con el tipo de variables que definen en entorno ambiental en una zona urbana. Las clases finalmente seleccionadas son las siguientes:

- A- Unifamiliares ajardinadas, poco densas, con techos de teja y desordenadas espacialmente.
- B- Viviendas unifamiliares no ajardinadas, densamente construidas, desordenadas espacialmente.
- C- Viviendas unifamiliares poco ajardinadas, con trazado geométrico.
- D- Viviendas unifamiliares con grandes huertos, sin arreglo geométrico.

- E- Viviendas unifamiliares con huertos pequeños, desorganizadas espacialmente.
- F- Edificación mixta (viviendas unifamiliares, multifamiliares y comerciales).
- G- Viviendas unifamiliares densamente construidas, con heterogeneidad en el material de construcción (Barrios de la zona centro).
- H- Viviendas unifamiliares no consolidadas (barriadas marginales).
- I- Zonas verdes intraurbanas.
- J- Viario.
- K- Almacenes.
- L- Agua.

Una vez definidos los campos de entrenamiento, se generaron las estadísticas correspondientes a la banda original y cada una de las bandas texturales definidas previamente.

Posteriormente, a partir de los resultados estadísticos obtenidos y para evaluar la capacidad discriminadora de cada banda, se realizó un análisis de separabilidad basado en la Divergencia Transformada (DT), que parte del supuesto de que los ND en una imagen siguen una distribución normal, asumiéndose la separabilidad como medida de solape entre categorías vecinas. En la DT los resultados están acotados entre 0 y 2, donde 0 indica un solape absoluto entre las firmas de dos clases y 2 una separación completa entre éstas. El análisis de separabilidad permitió obtener las clases que mejor se separaron en cada uno de los índices texturales aplicados y la banda original, y las que mejor se separaban tomando en cuenta los valores promedio de las bandas analizadas.

En último lugar se aplicaron tres reglas de decisión para seleccionar los canales óptimos a ser incluidos en un posterior proceso de clasificación. Los algoritmos utilizados en cada caso fueron los siguientes:

1.- IDV (Divergencia Promedio entre Clases) Se obtiene como el promedio del valor de la divergencia entre todas las categorías. Esta medida considera que todas las clases son igualmente importantes.

$$IDV = \frac{1}{(N_{class} * (N_{class} - 1)) * \sum [D_{ij}]}$$

donde D_{ij} indica el valor de la divergencia entre las categorías i y j .

2.- TDV (Divergencia Transformada Promedio). Idéntico cálculo, pero considerando la divergencia transformada, que permite estandarizar el peso de las distintas categorías en el cálculo final. Reduce la dominancia de las clases que tienen la más alta divergencia.

$$TDV = \frac{1}{(N_{class} * (N_{class} - 1)) * \sum \left[2 * \frac{(1 - \exp(-D_{ij}))}{8} \right]}$$

3.- PDV (Divergencia Mínima entre Pares) es la divergencia más pequeña para todos los pares en un conjunto. Este criterio maximiza la precisión de la clasificación para el peor de los casos. Esto es, el subconjunto resultante podría ser óptimo para las dos clases con la mayor confusión entre ellas.

$$PDV = \text{Min}(D(i,j)) \quad \text{Para } i < j$$

RESULTADOS

Al tomar en consideración el valor promedio de separabilidad para cada banda se obtuvo que los mayores valores fueron asignados a los índices texturales basados en la matriz de co-ocurrencia, caso de la media, desviación estándar, contraste, disimilaridad y correlación. La Tabla 1 muestra los valores promedio obtenidos para cada uno de los índices analizados.

Indic.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Prom.	0.96	0.71	0.47	0.70	0.55	0.88	0.82	1.07	0.90	0.78	0.88

Tabla 1. Separabilidad promedio por índice textural

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	-											
B	0.84	-										
C	0.51	0.44	-									
D	0.13	0.34	0.22	-								
E	0.50	0.05	0.22	0.12	-							
F	1.96	0.97	1.78	1.78	1.35	-						
G	0.52	0.04	0.35	0.14	0.01	1.25	-					
H	1.24	0.10	0.88	0.70	0.28	0.46	0.21	-				
I	0.25	1.33	0.58	0.56	0.99	1.98	1.12	1.66	-			
J	0.51	1.75	1.16	0.09	1.53	1.99	1.62	1.91	0.17	-		
K	1.72	0.53	1.47	1.29	0.83	0.07	0.71	0.19	1.91	1.98	-	
L	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	-

Tabla 2. Matriz de separabilidad con el índice textural - Media

Separabilidad promedio = 1,06
Mínima separabilidad = 0,013 - Máxima separabilidad = 2,00

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	-											
B	0.00	-										
C	0.40	0.41	-									
D	0.00	0.00	0.53	-								
E	0.00	0.00	0.42	0.00	-							
F	0.01	0.01	0.57	0.00	0.01	-						
G	0.08	0.08	0.89	0.04	0.08	0.03	-					
H	0.03	0.03	0.20	0.06	0.03	0.08	0.22	-				
I	1.98	1.98	1.27	1.99	1.98	1.99	1.99	1.91	-			
J	1.37	1.40	0.33	1.54	1.41	1.59	1.82	1.04	0.25	-		
K	0.14	0.15	1.07	0.08	0.14	0.07	0.01	0.31	1.99	1.90	-	
L	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.99	2.00	2.00	-

Tabla 3. Matriz de separabilidad con el índice textural . Contraste

Separabilidad promedio = 0,881
Mínima separabilidad = 0,000 Máxima separabilidad = 2,00

El valor de separabilidad para cada par de categorías se obtuvo a partir de la matriz de divergencia. Las Tablas 2, 3, 4, y 5 muestran estos valores para las bandas que mayor promedio de separabilidad mostraron (la media, el contraste, la disimilaridad y la banda original). Se destacaron en gris los valores que superan la separabilidad promedio.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	-											
B	0.04	-										
C	0.51	0.34	-									
D	0.02	0.00	0.44	-								
E	0.09	0.01	0.26	0.03	-							
F	0.03	0.00	0.47	0.00	0.03	-						
G	0.05	0.12	0.89	0.07	0.20	0.06	-					
H	0.16	0.05	0.11	0.10	0.02	0.11	0.36	-				
I	1.56	1.47	0.64	1.56	1.38	1.60	1.86	1.10	-			
J	1.18	1.05	0.30	1.17	0.96	1.21	1.60	0.68	0.06	-		
K	0.24	0.48	1.50	0.36	0.66	0.36	0.11	0.88	1.98	1.91	-	
L	2.00	2.00	1.99	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.77	1.95	2.00	-

Tabla 4. Matriz de separabilidad con el índice textural . Disimilaridad

Separabilidad promedio = 0,8245
Mínima separabilidad=0,00072- Máxima separabilidad=2,0000

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	-											
B	0.39	-										
C	0.32	0.28	-									
D	0.06	0.14	0.17	-								
E	0.25	0.02	0.15	0.06	-							
F	1.04	0.38	1.20	0.72	0.55	-						
G	0.28	0.07	0.48	0.10	0.09	0.32	-					
H	0.69	0.05	0.53	0.35	0.14	0.23	0.16	-				
I	0.49	1.31	0.46	0.70	0.95	1.89	1.36	1.51	-			
J	0.79	1.66	0.98	1.17	1.45	1.98	1.74	1.84	0.15	-		
K	1.29	0.99	1.79	1.08	1.12	0.40	0.56	0.87	1.99	1.99	-	
L	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	-

Tabla 5. Matriz de separabilidad con la imagen original

Separabilidad promedio = 0,96976
Mínima separabilidad=0,02330-Máxima separabilidad = 2,0000

Un análisis de los valores de separabilidad promedio entre clases, para cada uno de los índices permitió obtener las cinco primeras clases que mejor se discriminan en cada índice textural, observándose la presencia de algunas clases urbanas bastante heterogéneas y, por tanto, difícilmente separables. (Tabla 6).

Finalmente, se abordó un análisis de selección de canales óptimos, basado en los tres criterios arriba indicados: Divergencia Promedio entre Clases, Divergencia Transformada Promedio y Divergencia Mínima entre Pares. En cada una de estas reglas se extrae, en primer lugar, el canal que maximiza la separación entre las categorías de nuestra leyenda de trabajo, A continuación, se seleccionan los dos con mayor capacidad de discriminación, y así sucesivamente hasta llegar a los doce considerados (la original más once índices de textura)". Como se puede observar en la Tabla 7, los índices seleccionados con mayor preferencia son los basados en la matriz de co-ocurrencia, principalmente el valor medio (MED), la disimilaridad (DIS), la desviación estándar y el contraste. También la imagen SPOT original se considera un canal óptimo para la separación.

BANDA TEXTURAL MEDIA	BANDA TEXTURAL CONTRASTE	BANDA TEXTURAL DISIMILARIDAD	BANDA ORIGINAL
L	L	L	L
J	I	I	K
I	J	J	J
F	K	K	I
K	G	G	F

Tabla 6. Mejores clases discriminantes

(Las letras se refieren a la relación previa de categorías)

Número de bandas	Criterio de decisión		
	IDV	TDV	PDV
1	8	11	8
2	7,8	9,11	6,8
3	1,7,8	8,9,11	1,6,8
4	1,7,8,11	6,8,9,11	1,6,7,8

Tabla 7. Índices texturales óptimos

Cada número indica un índice textural como sigue: 1-ORIG; 2-DME; 3-SES; 4-VAR; 5-HOM; 6-CON; 7-DIS; 8-MED; 9-DE; 10-SMA; 11-COR

De los resultados obtenidos en los análisis realizados (separabilidad entre clases y entre bandas) se concluye que las mejores bandas a ser incluidas en un posterior proceso de clasificación son 8 (media), 7 (disimilaridad), 1 (original) y 6 (contraste).

A continuación se incluyen 4 figuras que permiten tener una impresión visual de los elementos que caracterizan a la ciudad de Maracay, y de los resultados obtenidos en algunos de los índices aplicados, sobre una porción de la ciudad.

En este sentido, la Figura 7 muestra la banda original SPOT. En ella son fácilmente identificables el espacio urbano y el no urbano. El espacio urbano, a su vez, nos da una idea de la heterogeneidad espacial y espectral que caracteriza a la ciudad. La diversidad de patrones, tamaños y tonalidades son indicadores de la coexistencia en un espacio relativamente pequeño de múltiples tipos de cobertura del suelo.



Figure 7. Imagen SPOT original.



Figure 8. Ventana de la imagen original mostrando algunos sectores morfológicos de la ciudad de Maracay.

La Figura 8 muestra una ventana ampliada de la banda original. En ella se destacan algunos elementos de la estructura urbana; tal es el caso de diferentes formas de organización residencial (urbanizaciones, barrios, barriadas), espacios verdes, zonas industriales y red viaria, cada una de las cuales posee características propias que permiten diferenciarla de las demás. Estas características se observan en esta imagen a través del tono, la forma, el patrón y la estructura.

En las Figuras 9a y 9b se han construido mosaicos sobre una porción magnificada de la zona centro de la ciudad, de 8 de los 11 índices texturales aplicados a la imagen. Los tres restantes no se incluyeron debido a la baja calidad de los resultados.



Figure 9a. Comparación de la imagen original e índices texturales sobre la zona centro de la ciudad.

En la figura 9b se observan los índices que mejor resultados dieron. Así, los índices basados en la disimilaridad y el contraste resaltan, en mayor o menor medida, los elementos que son muy diferentes entre sí (áreas construidas, áreas industriales y espacios verdes), pero a la vez tienden a agrupar los que más se parecen (formas de organización residencial).

En general, en cada uno de los índices seleccionados se identifican de manera separada el espacio



Figure 9b. Idem

urbano del no urbano, con una tendencia clara de texturas más gruesas y heterogéneas en el primero. Se observa una clara separación entre las áreas residenciales densamente construidas no ajardinadas y las áreas menos densas con jardines o huertos, así como las áreas residenciales de nuevo desarrollo. Los espacios verdes intraurbanos, la red vial y las áreas industriales también son fáciles de identificar.

CONCLUSIONES

Las imágenes SPOT pancromáticas al poseer una mayor resolución espacial permiten obtener mayor detalle de los diferentes elementos que integran el espacio urbano, con lo cual resultan una herramienta idónea para extraer información referida a la morfología de una ciudad. Sin embargo, es preciso seguir estudiando la aplicación de índices texturales, que permitan mejorar la discriminación de algunos sectores de cubierta muy heterogénea.

De acuerdo a los tres criterios de decisión vistos en este trabajo (separabilidad promedio entre índices, separabilidad de las diferentes clases en cada índice, y selección de canales óptimos basado en tres medidas de divergencia), los mejores índices de textura son los basados en la matriz de co-ocurrencia y especialmente los denominados de media, disimilaridad y contraste. Cada uno de estos índices, de una u otra manera, destaca información morfológica. Así por ejemplo, el índice textural basado en la media permite obtener más claramente la vialidad mientras que el basado en la disimilaridad destaca los grandes conjuntos residenciales y el contraste permite obtener una mayor y más clara separación entre los espacios verdes y las áreas construidas.

A partir de estos resultados, se incorporarán estos índices para mejorar la información textural en la clasificación de sectores urbanos del área de estudio.

BIBLIOGRAFIA

BARREDO, J.I. 1996. Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio. Madrid. Ra-ma.

- BARALDI, A. Y PARMIGGIANI, S. 1990. Urban area classification by multispectral SPOT images. IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing. 4: 674-680.888
- BOTELLO, O. 1987. Historia de Maracay. Tomo I. Editorial Miranda. Maracay, Venezuela.
- CASAS, J. Y CHUVIECO, E. 1987. Análisis visual de imágenes "Thematic Mapper" para el estudio urbano. El caso de la ciudad de Madrid. Anales de Geografía de la Universidad Complutense, 7.
- CHUVIECO, E. 1996. Fundamentos de Teledetección Espacial. RIALP Madrid. 38 Edición.
- ERDAS Inc. 1995. ERDAS Imagine. References Guide, Atlanta (USA).
- GONG, P. Y HOWARTH, P. 1990. The Use of Structural Information for Improving Land Cover Classification Accuracies at the Rural-Urban Fringe. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 56, 1: 67-73.
- HARALICK, M., SHANMUGAN, K. y DINSTEIN, J. 1973. Textural features for image classification. IEEE Trans. Systems Man and Cybernetics. 6: 610-621.
- JENSEN, J. R. 1979. Spectral and Textural Features to classify Elusive Land Cover at the urban Fringe. The Professional Geographer. 31, 4: 629-643.
- JENSEN, J. R. Y TOLL, D. L. 1982. Detecting Residential Land-Use Development at the Urban Fringe. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 48, 4: 629-643.
- JENSEN, L. M. 1990. Knowledge-Based Classification of an Urban Area Using Texture and Context Information in Landsat TM Imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 56, 6: 899-904.
- MARCEAU, D.; HOWARTH, P.; DUBOIS, J. y GRATTON, D. 199b. The evaluation of the grey level co-occurrence method for land cover classification using SPOT imagery. IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing. 4: 513-518.
- MORALES, F. M. 1990. El rastrojo social en la depresión del lago de Valencia. Casos de Valencia y Maracay.. Academia Nacional de Ciencias Económicas. Caracas.
- PCI Inc. 1996. Using PCI software, (Versión 6.0), Ontario (Canadá).
- WEBER, C. y HIRSCH, J. 1992. Some urban measurements from SPOT data: Urban life quality indices. Int. Journal Remote Sensing. 13,17: 32513261.