DETECCIÓN Y CARTOGRAFIADO DE LOS PROCESOS DE EXPANSIÓN URBANA MEDIANTE TÉCNICAS COMBINADAS DE TELEDETECCIÓN Y S.I.G

J.A. Recio Recio, J.E. Pardo Pascual, L.A. Ruiz Fdez., A.Fdez. Sarría y P.Córcoles Tamarit
Dept. Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría
Universidad Politécnica de Valencia
jrecio@cgf.upv.es

RESUMEN

El análisis automático de la evolución de las zonas urbanas mediante imágenes de satélite y fotografías aéreas presenta problemas metodológicos relacionados con la dificultad en la identificación fiable de las diferentes estructuras urbanas y con la complejidad y variabilidad del paisaje asociada a las zonas de crecimiento y asentamiento de los núcleos residenciales e industriales. En este trabajo, a partir de imágenes Landsat ETM y ortofotografías aéreas, se combina una clasificación multiespectral y por texturas para analizar el crecimiento urbano de una zona caracterizada por una importante expansión, intentando caracterizar el tipo de unidades urbanas básicas predominantes: los núcleos urbanos densos y establecidos, las urbanizaciones residenciales y las áreas industriales. Partiendo de esta clasificación, se han estudiado además diversos índices del paisaje relativos al tamaño, la forma y la fragmentación de las distintas unidades urbanas definidas con objeto de añadir información estructural que sirva para completar un análisis objetivo sobre la evolución de estas zonas. Los resultados indican un nivel satisfactorio en la identificación de núcleos urbanos, la conveniencia de incluir el análisis de texturas para la identificación de urbanizaciones residenciales, y las limitaciones existentes para la correcta delimitación de zonas industriales. Por último, se proponen y describen varios índices estructurales para la interpretación objetiva de unidades urbanas referidas a la zona de estudio.

Palabras clave: Evolución urbana, clasificación multiespectral, texturas y estructuras de paisaje

1.- INTRODUCCIÓN

Los últimos años estamos asistiendo a una serie de cambios espaciales asociados al espectacular crecimiento urbanístico al que se está sometiendo buena parte de nuestro territorio. Este dinamismo del paisaje agudiza la necesidad de disponer de información cuantitativa y georreferenciada actualizada para poder enfrentarse a la ordenación del territorio fundamentada en criterios sólidos. Las imágenes de satélite de resolución media podrían suponer una fuente de información que permitiría una actualización de los espacios urbanizados de forma rápida, eficiente y asumible económicamente. Sin embargo, su empleo en este tipo de trabajo, ha sido poco usual debido, por una parte a la resolución geométrica de estas imágenes y por otra, a la elevado complejidad que supone el proceso de extracción automática de los datos debido a la gran heterogeneidad de estos espacios y a la dificultad de su análisis. Así, la documentación general de usos del suelo –como el programa *"Corine Land Cover"*—se resuelven

mediante técnicas de fotointerpretación asistidas por ordenador de las imágenes de satélite mejoradas (Arozamena y Del Bosque, 2001). Ello implica una inversión muy elevada en tiempo por lo que su actualización, hasta ahora, ha quedado establecida sobre un rango temporal de una década.

Dadas todas estas circunstancias, consideramos prioritario buscar herramientas que permitan realizar un trabajo de control o vigilancia sobre los cambios que se están dando de la forma más automática posible, así como la búsqueda de parámetros cuantitativos que permitan valorar numéricamente las variaciones producidas.

El objetivo, por tanto, del presente estudio es, por un lado, plantear un método que permita extraer automáticamente el área urbanizada –distinguiendo los espacios urbanos tradicionales, los polígonos industriales y las urbanizaciones residenciales de nuevo cuño—de una comarca con un grado de precisión suficiente y, por otra, la aplicación e interpretación de índices de estructura del paisaje que permitan valorar cuantitativamente no sólo los cambios superficiales en la ocupación del suelo sino también las modificaciones que se vayan dando en la configuración de la estructura física del paisaje.

Para calibrar las posibilidades de nuestra propuesta metodológica se ha tomado como zona de trabajo la comarca de l'Horta Nord de Valencia debido a que en ella coinciden una serie de rasgos que la hacen especialmente interesante. Se trata de un paisaje tradicionalmente agrario, formado por un parcelario muy dividido y con una clara dicotomía entre las partes orientales o costeras y las interiores. En las primeras, predominan los campos de hortalizas que alternan sus cubierta unas tres veces al año. En ella, asimismo, tradicionalmente ha existido un poblamiento principal agrupado en núcleos compactos y, sobre todo en el sector suroriental, un importante número de pequeños núcleos dispersos (alquerías, casas de campo, barracas, ...). La zona central y parte de la occidental está dominada por campos de naranjos y presenta un menor número de poblaciones, pero de dimensiones mayores. En las últimas décadas, en estos sectores se han ido construyendo amplias urbanizaciones.

El crecimiento urbanístico –asociado tanto al crecimiento de ampliaciones de núcleo urbano, urbanizaciones residenciales como de polígonos industriales—de la última década ha sido espectacular (Córcoles, 2003) con ampliaciones significativas en todos los municipios de la comarca, muy especialmente en aquellos que quedan junto a ciudad de Valencia y en los espacios situados junto a las principales vías de comunicación.

2.- ANÁLISIS MULTIESPECTRAL Y DE TEXTURAS

2.1.- Clasificación Multiespectral

A partir de dos imágenes multiespectrales del sensor TM de Landsat, adquiridas en abril de 2000 y agosto de 2000 se ha iniciado un proceso de trabajo encaminado a clasificar espectralmente los diversos tipos de cubiertas que generan dispares respuestas espectrales. Las clases que se han considerado en esta clasificación, a partir de un análisis previo de las imágenes multiespectrales y de las ortofotografías de la zona, han sido 13, a saber: *bosque, matorral, secano, cítricos, huerta, marjal, movimiento de tierras, playa, mar, carreteras, núcleos urbanos consolidados, polígonos industriales* y *urbanizaciones*.

Las parcelas dedicadas al cultivo de hortalizas y que se agruparán dentro de la clase huerta, se caracterizan por la gran variabilidad temporal en cuanto al tipo de cultivo. A partir de las dos imágenes existentes (abril y agosto) se podría dar la situación de que las parcelas cultivadas en abril no lo estuviesen en agosto o viceversa, lo cual induciría a un determinado error en la clasificación. De cara a minimizar este inconveniente se ha procedido a calcular el índice NDVI sobre las dos imágenes y realizar un cruce de las imágenes de los dos índices. Del cálculo píxel a píxel de los dos índices (abril y agosto) se ha asignado como valor de NDVI el mayor de los dos, con lo que de las dos imágenes NDVI se ha obtenido una sola, fusión de las dos fechas. Ésta, unida a las 6 bandas de la imagen de abril conforma la imagen de 7 bandas a partir de la que se ha obtenido la clasificación espacial.

Se ha realizado un análisis de separabilidad de las áreas de entrenamiento previo a la clasificación para determinar aquellas clases que se diferenciarán mejor y determinar entre cuáles habrá un solape evidente. Dicho análisis ha consistido en el cálculo de las distancias de *Jeffries-Matusita.* Algunos de los resultados obtenidos, y reflejados en la tabla 1, muestran la evidencia de algunas características del área de estudio que se esperaban y que se han convertido en unos efectos a estudiar: La separabilidad más baja se produce entre *huerta* y zonas de *urbanización* (1.29). Se debe al hecho de que la tipología propia de las parcelas de cultivo de huerta (parcela de pequeña extensión, generalmente menor de 0,5 Ha) se asemeja bastante a las zonas de urbanizaciones, donde la contribución de árboles, jardines y espacios verdes genera una respuesta espectral similar al cultivo de hortalizas. Es esta combinación de clases la que nos interesa analizar con mayor detenimiento para delimitar correctamente las áreas de crecimiento urbano.

Tabla 1: Separabilidades mínimas a priori.

Combinación de clases	**Distancia *Jeffries-Matusita*** **(transformada a distancia máxima igual a 2)**
Urbanizaciones y huerta	1.29790192
Secano y matorral	1.43813138
Huerta y cítricos	1.62131523

Se ha empleado el clasificador de máxima probabilidad a partir de una serie de muestras de aprendizaje obtenidas sobre diversas combinaciones espectrales y con la ayuda de la interpretación visual de la ortofotografía de un metro de resolución espacial. A la par de la toma de áreas de entrenamiento para el clasificador probabilístico se tomaron ciertas áreas para la comprobación posterior de la clasificación (las denominadas *áreas de evaluación*).

El análisis post-clasificación de la imagen resultante y de las áreas de evaluación refleja una fiabilidad global de la clasificación del 78.22% y unas fiabilidades de productor y de usuario como las de la tabla 2:

Tabla 2: Fiabilidades del productor y del usuario.

CLASE	**Fiabilidad productor (%)**	**Fiabilidad usuario (%)**
Bosque	87.52	92.38
Secano	30.77	26.37
Urbano	84.96	75.75
Carreteras	54.15	45.51
Mov. Tierras	91.38	67.26

Matorral	55.46	50.70
Playa	44.22	17.29
Huerta	37.33	73.25
Citricos	89.15	88.46
Marjal	82.18	84.20
Mar	100.0	100.0
Urbanizaciones	62.58	50.56
Polig. Industrial	49.05	78.80

Estas dos índices son básicos para evaluar la precisión de una clasificación. El primero de ellos se calcula dividiendo el número de píxeles correctos de una clase entre el número total de píxeles de esa clase obtenido a partir de los datos de referencia. Este valor expresa la proporción de píxeles pertenecientes a una clase que han sido correctamente clasificados, dando una idea de los errores por defecto. A este índice se le conoce como **fiabilidad del productor**. El segundo se obtiene dividiendo el número total de píxeles de una clase correctamente clasificados entre el total de píxeles que fueron clasificados dentro de esa clase y da información sobre los errores por exceso. A este índice se le denomina **fiabilidad del usuario**, y expresa la probabilidad de que un píxel clasificado dentro de una clase pertenezca realmente a dicha clase.

Entre los resultados de la matriz de confusión y de las dos fiabilidades reseñadas destacan ciertas particularidades que necesitan un mínimo estudio de detalle. Algunas clases presentan porcentajes de acierto un tanto bajos, debido a la interacción o similitud entre los diferentes tipos de cubiertas (urbanizaciones con secano, matorral con secano, polígonos industriales con playa, huerta con urbanizaciones y huerta con cítricos). Cabe destacar estas dos últimas interferencias ya que son de gran importancia para lograr los objetivos generales del presente estudio. En la zona sureste del área de estudio predomina un cultivo de huerta claramente marcado y en ella se aprecia un error de exceso (casi un 50%) de píxeles asignados a la clase urbanizaciones (el error por exceso es el porcentaje complementario a la fiabilidad del usuario, expresado en %). También es marcada la interferencia entre parcelas de huerta y otras de cítricos en la zona este de la imagen.

Estas dos consecuencias obtenidas de la clasificación espectral se han intentado corregir mediante el análisis de texturas, ya que son las que pueden alterar en mayor medida el estudio de evolución de áreas urbanizadas.

2.2.- Análisis de Texturas

El análisis de texturas suministra información sobre la distribución de niveles de intensidad en el vecindario de un píxel, por lo que su estudio sobre imágenes pancromáticas de alta resolución puede resolver el problema de la identificación de unidades urbanas espectralmente heterogéneas, como ocurre con las urbanizaciones en las que se combinan edificaciones y zonas ajardinadas.

Las 8 características o bandas de textura extraídas de la matriz de coocurrencias de niveles de gris son: media, varianza, homogeneidad, contraste, disimilaridad, entropía, segundo momento y correlación (Haralick, R.M. y otros, 1973).

En el análisis de texturas es importante seleccionar los parámetros más adecuados para cada

aplicación. En este caso se ha llevado a cabo un ensayo para comparar distintos tamaños de vecindario (3x3, 5x5, 9x9, 15x15) y varias resoluciones de digitalización de la ortofotografía (1m, 5m, 10m, 15m y 30m) (Córcoles, P. y otros, 2003). En la figura 1 se muestra un gráfico comparativo de las fiabilidades globales de los distintos ensayos.

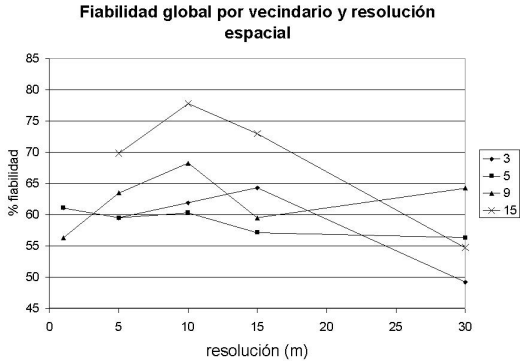

Figura 1.- Relación entre parámetros de textura y resultados de fiabilidad global para la clasificación por texturas.

La combinación óptima de los parámetros de textura es de 10 metros de resolución espacial y un vecindario para el cálculo de la matriz de coocurrencias de 15x 15 píxeles.

La clase correspondiente a urbanizaciones es la que tiene una mayor dificultad para ser caracterizada por medio de la clasificación multiespectral, confundiéndose por exceso con las zonas de cultivos hortícolas y de cítricos. Por esto, se hace necesario complementar la información espectral con la relativa a la distribución espacial de los distintos niveles de gris, es decir, la textura.

A partir de la imagen resultante de la clasificación multiespectral se generó una máscara correspondiente a las zonas clasificadas como urbanizaciones. Esta máscara se aplicó sobre las 8 bandas de textura y se realizó una clasificación por texturas con 4 clases de información: *urbanizaciones, núcleos urbanos, cítricos y huerta.* Por último, se procedió a combinar los datos obtenidos de la clasificación multiespectral con los obtenidos en la clasificación de texturas. Con las muestras de referencia definidas para la clasificación multiespectral, se ha evaluado la clasificación obtenida como combinación de los dos métodos expuestos, resultando una nueva matriz de confusión. Los resultados comparativos de las clasificaciones multiespectral y multiespectral combinada con texturas para las 4 clases citadas se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3: Comparativa de las fiabilidades de productor y usuario.

	Clasificación Multiespectral		**Clasificación Multiespectral combinada con clasificación por texturas**	
CLASE	**Fiabilidad productor (%)**	**Fiabilidad usuario (%)**	**Fiabilidad productor (%)**	**Fiabilidad usuario (%)**
Urbanizaciones	62.58	50.56	60.47	74.28
Urbano	84.96	75.75	83.52	74.09
Huerta	37.33	73.25	67.62	74.26
Cítricos	89.15	88.46	89.40	80.71

En esta tabla se puede apreciar cómo para la clase *urbanizaciones* disminuye ligeramente su fiabilidad del productor y aumenta claramente la del usuario al introducir las texturas, con lo que la probabilidad de acierto en la asignación ha aumentado. Se consigue reducir, por tanto, el error por exceso de las zonas previamente clasificadas como *urbanizaciones*, fundamentalmente en aquellos píxeles pertenecientes a huerta y cítricos que habían sido clasificados como *urbanizaciones*. La clase *urbano* no experimenta variaciones sensibles. La clase *huerta* experimenta sensibles mejorías en las dos fiabilidades con lo que el emplear texturas en su discriminación se ha demostrado como una técnica útil, ya que dadas las características de forma y tamaños de las parcelas dedicadas al cultivo de hortalizas, las variables texturales son más adecuadas para clasificarlas. Por último, la clase *cítricos* experimenta un ligero decremento de la fiabilidad del usuario, posiblemente debido a que no se pueden extraer características de texturas tan claramente diferenciables sobre parcelas de cítricos, que son de mayor extensión y sobre todo con una continuidad espacial más marcada.

En la figura 2a se aprecia claramente cómo las urbanizaciones (representadas en color magenta) están erróneamente delimitadas ya que se han clasificado como urbanizaciones zonas que en realidad son huerta o campos de cítricos. En la figura 2b se comprueba que el error por exceso en la clasificación de las urbanizaciones ha sido reducido en gran medida. Se pone de manifiesto la importancia de utilizar las características de textura para perfeccionar las clasificaciones multiespectrales en aquellos casos en los que los elementos a clasificar tienen respuestas espectrales heterogéneas.

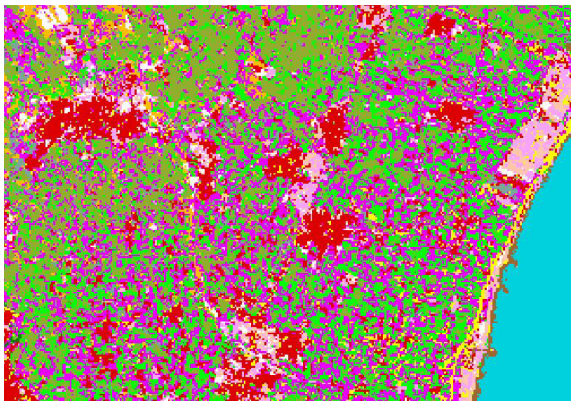

Fig. 2a Fragmento de la clasificación multiespectral

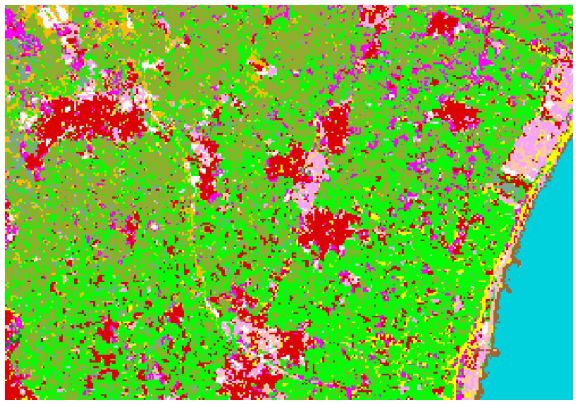

Fig. 2b Fragmento de la combinación de la clasificación multiespectral y textural

La clasificación combinada de usos de suelo para toda el área de trabajo queda tal y como muestra la figura 3.

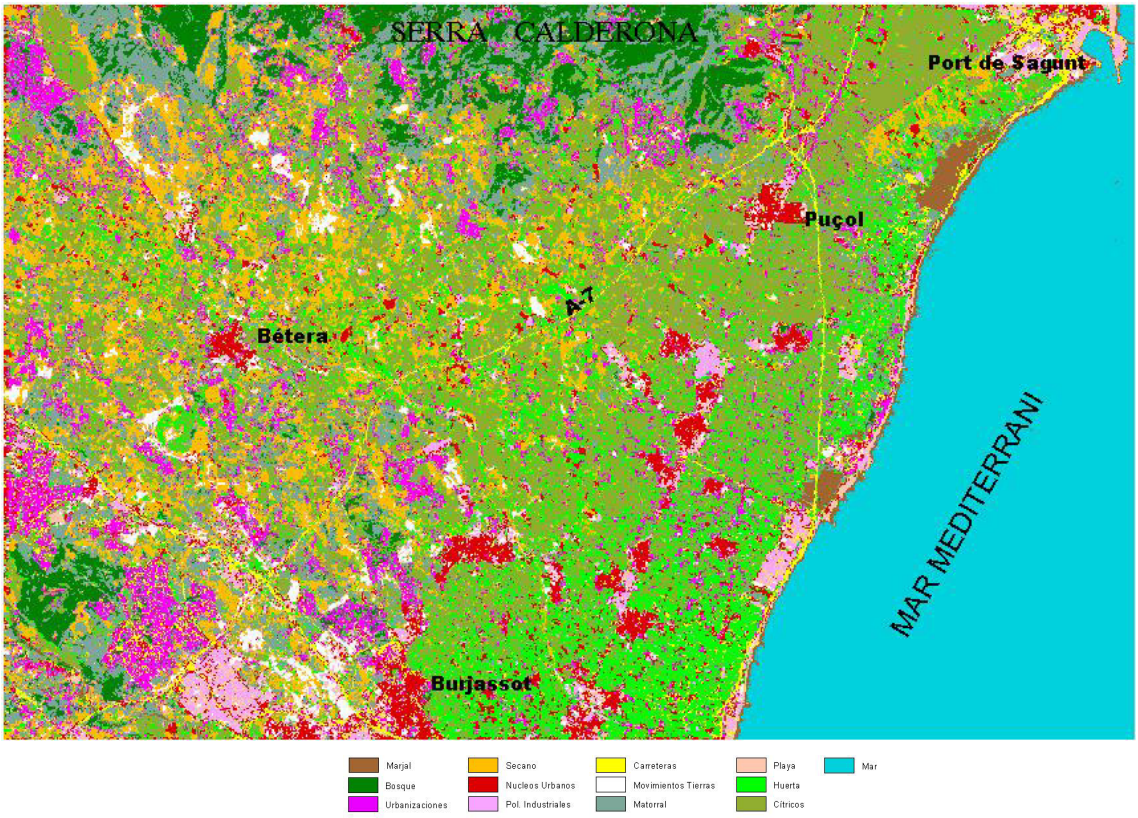

Fig. 3 Clasificación de usos del suelo resultante

2.3.- Tratamiento Post-Clasificación

La imagen de usos del suelo (figura 3) se reclasificó en tres clases correspondientes a *suelo no urbano, urbanizaciones y núcleos urbanos-polígonos industriales.* Con el objeto de homogeneizar la clasificación se aplicó un filtro de mediana de 7 x 7. Esta imagen (figura 4) es la que se utiliza para el cálculo de los índices de estructura del paisaje.

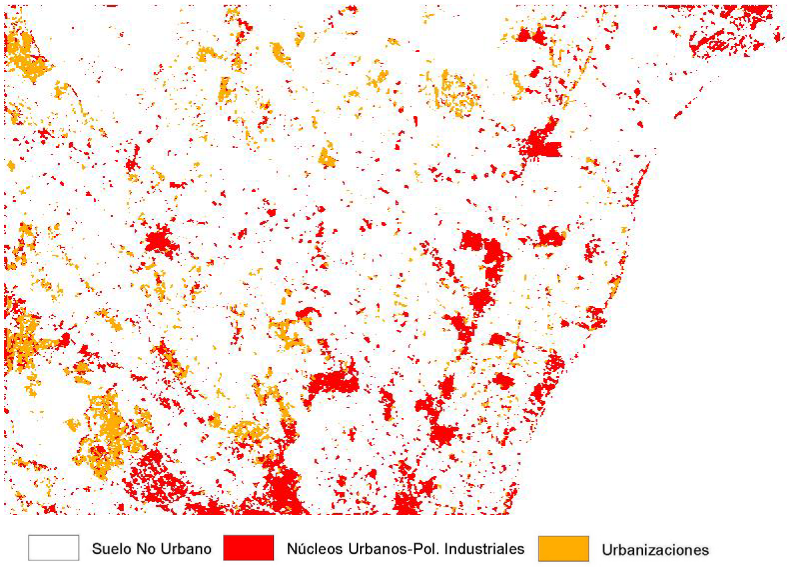

Fig. 4 Clasificación simplificada de zonas urbanas

Sobre esta imagen filtrada y reclasificada según las tres clases anteriormente señaladas se han determinado las fiabilidades del productor y del usuario según las áreas de referencia fotointerpretadas y los resultados son los mostrados en la tabla 4.

Tabla 4: Fiabilidades del productor y del usuario para las clases de edificaciones y restantes.

	Clasificación Multiespectral combinada con clasificación por texturas	
CLASE	**Fiabilidad productor (%)**	**Fiabilidad usuario (%)**
Urbanizaciones	82.71	81.13
Urbano	96.17	68.86
Polig. Industrial	29.54	98.89
Resto	98.20	94.71

Las fiabilidades de las clases *urbanizaciones* y *urbano* son bastante buenas, lo cual expresa la validez del método de trabajo empleado para discriminar entre tipologías de construcción y a su vez entre ellas y el resto de las cubiertas de una superficie. También se observa que la fiabilidad del productor de la clase *polígono industrial* es muy reducida, lo que ratifica la necesidad de su agrupación con la clase urbano dada la similitud de respuesta espectral y similar comportamiento de cara al estudio de estructuras de paisaje.

3.- ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DEL PAISAJE

Una vez realizada la clasificación en la que se ha conseguido discriminar los principales tipos de ocupación urbana del espacio se ha realizado un análisis sobre las diferencias en las configuraciones de las unidades espaciales urbanizadas. Para ello se han utilizado conceptos y métodos provenientes de los estudios de ecología del paisaje. En concreto, se ha utilizado la extensión *Patch Analyst*[1] para *ArcView® GIS* programa desarrollado por un equipo dirigido por el Dr. Rob Rempel del *Centre for Northern Forest Ecosystem Research (OMNR)* de Canadá, que facilita el análisis espacial de las manchas del paisaje. Este tipo de análisis se fundamenta en considerar las manchas del paisaje –en nuestro caso agrupaciones de píxeles que están en contacto entre ellas y que conforman una unidad espacial - como unidades a partir de las cuales se puede estudiar numéricamente la estructura del paisaje. Dicha extensión incorpora, para estudios sobre modelos ráster, el programa *Fragstats Spatial Pattern Analyst* (McGarigal y Marks, 1994)

Para nuestro trabajo, se ha pensado realizar el análisis de estructuras sobre áreas suficientemente grandes del territorio y de dimensiones parecidas para que las comparaciones fueran razonables. Para ello, se ha dividido el área de estudio en 48 polígonos hexagonales con una superficie de 1000 ha cada uno de ellos (excepto los que se sitúan en el borde que presentan dimensiones variables). Sobre cada uno de estos polígonos se han calculado 29 índices o variables referidas a la estructura del paisaje, en concreto se han analizado dos grandes clases: las áreas urbanas e industriales (clase 1) que

[1] La extensión Patch Analyst puede ser descargada gratuitamente en http://flash.lakeheadu.ca/~rrempel/patch/

incluye núcleos urbanos tradicionales y los polígonos industriales y las áreas de urbanizaciones residenciales (clase 2).

3.1.- Selección de variables del paisaje

Para el análisis e interpretación de la estructura del paisaje definido por las clases *'núcleos urbanos + zonas industriales'*, por un lado, y *'urbanizaciones residenciales'*, por otro, se calcularon 29 índices o variables para cada una de las 49 zonas en las que quedó dividida la superficie. Estos índices reflejan la estructura del paisaje a través de varias propiedades estructurales básicas, como son la *dispersión* o *fragmentación* y *proximidad* de los núcleos; el *tamaño*, medido a partir del número de núcleos o manchas, su tamaño y su área; y la *forma*.

Dada las elevadas correlación y covarianza que existen entre algunos de estos índices, es preciso seleccionar los más significativos adecuados a nuestro problema y que proporcionen, además, información relativa a las tres propiedades básicas mencionadas. Esto se realizó mediante un análisis preliminar de componentes principales. De esta forma, representando las 29 variables originales según los 4 factores o componentes principales más relevantes, los cuales representan más del 87% de la variabilidad total de los datos, se han estudiado las agrupaciones de variables (índices de estructura) por afinidades semánticas. A partir de estas afinidades se han elegido los índices más representativos de cada grupo. La figura 5 muestra la representación gráfica de los coeficientes calculados para cada variable en el espacio definido por los dos primeros factores o componentes principales. De ella se pueden deducir ciertas agrupaciones, así como la superposición de aquellas variables muy correlacionadas entre sí. Como resultado de tales agrupaciones se seleccionó una variable del paisaje por cada una de ellas (tabla 5).

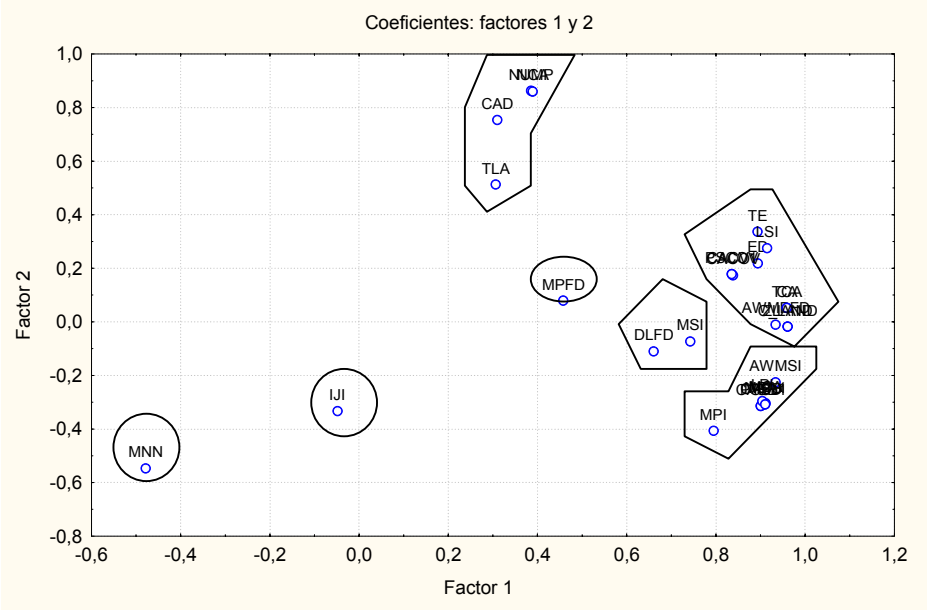

Figura 5: Distribución de los valores medios de las 29 variables estructurales calculadas en el espacio definido por los 2 primeros componentes principales. Se indican las agrupaciones de variables según su correlación en la información explicada.

Tabla 5: Variables de paisaje seleccionadas

INDICE	DESCRIPCION	PROPIEDAD
TE	Suma del perímetro total	TAMAÑO (PERIMETRO)
CAD	Densidad de áreas centrales (d=2) disjuntas	TAMAÑO / DISPERSIÓN
MSI	Relación perímetro/área	FORMA
MPFD	Mide la complejidad de la forma media	FORMA
MNN	Distancia media al vecino más próximo: homogeneidad de distribución	DISPERSIÓN, FRAGMENTACIÓN
MPI	Grado de aislamiento, fragmentación	DISPERSIÓN, FRAGMENTACIÓN
IJI	Dispersión/adyacencia de una clase respecto al resto	DISPERSIÓN, FRAGMENTACIÓN

3.2.- Análisis de los resultados de los índices seleccionados.

Se han estudiado tres tipos de características para las dos clases seleccionadas: (a) relacionadas con el tamaño, (b) con la forma de las manchas y (c) con su grado de dispersión o fragmentación.

(*a) Tamaño*

TE (suma de perímetro total): Este índice muestra el total de perímetro de cada clase de manera que, en cierta medida es expresivo del grado de ocupación. Así, el mapa de la clase *urbana/industrial* evidencia una mayor nivel de urbanización conforme nos acercamos a la ciudad de Valencia y a las principales vías de comunicación, presentando valores más bajos en la zona noroccidental. La clase *urbanizaciones residenciales* presenta valores más altos en la zona occidental, en la que se concentra el grueso de las mismas (muy especialmente en el sector surocciental), mientras que los sectores orientales presentan valores más bajos.

(b) Forma

MSI (índice medio de forma) y **MPFD (dimensión fractal media de la mancha)**. Se trata de dos índices que miden la complejidad morfológica. El MSI es la suma de todos los perímetros de las manchas divididas por la raíz cuadrada del área de las manchas para cada clase (McGaril y Marks, 1994) y el valor aumenta por encima de la unidad según la forma se aparta más del cuadrado o del círculo. En el segundo, análogamente, las formas simples presentan valores que se aproximan a la unidad y aquellos con perímetros complejos se aproximan a dos. Las áreas urbanas/industriales presentan valores altos de MSI (formas muy distintas al cuadrado) en las conurbaciones que se desarrollan en los núcleos urbanos cercanos a la antigua carretera nacional 340 (Valencia-Barcelona). Así mismo, aparecen valores muy altos en algunos espacios industriales adyacentes a las urbanizaciones situadas en la zona suroccidental. En estos lugares los valores de MPFD (figura 6) también son altos, mientras que los núcleos urbanos del sector oriental presentan formas menos complejas. En las zonas de urbanizaciones las formas más complejas se dan en los sectores suroccidentales, si bien el índice fractal distingue con valores elevados áreas con mayor dispersión de las manchas.

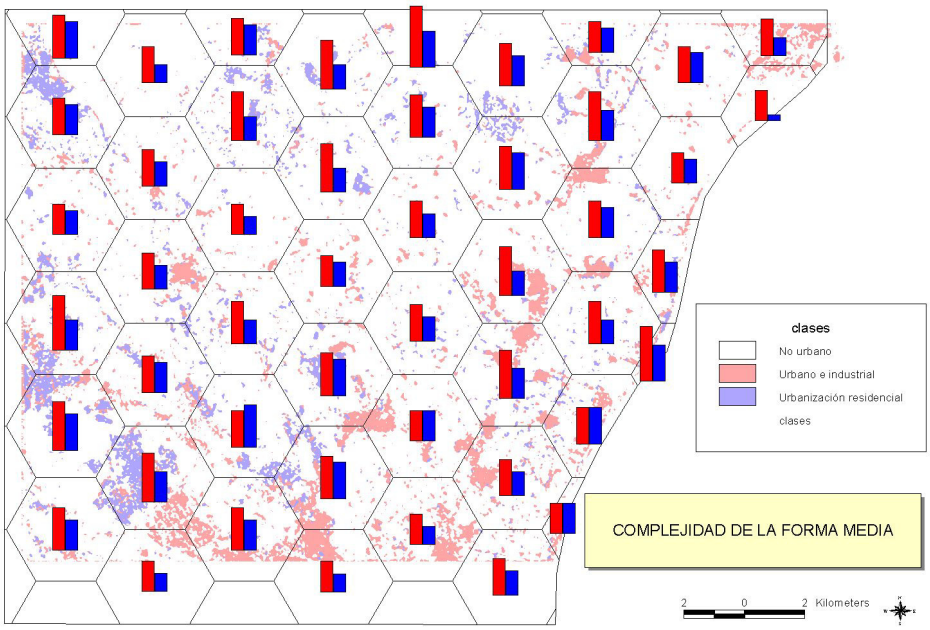

Fig. 6. En el fondo del mapa aparecen los dos tipos de clases analizados. Las columnas son gráficos proporcionales a los valores del MPFD de la clase urbano/industrial (en rojo) y de la clase urbanización (en azul).

(c) Dispersión y fragmentación

Para reconocer estas características se han empleado cuatro índices que presentan distintos matices de la estructura de las dos clases consideradas sobre los polígonos hexagonales utilizados como base espacial de análisis.

MNN (Distancia media al vecino más próximo): Es un índice de proximidad, fundamentalmente. Se calcula a partir de las distancias individuales que hay entre cada mancha de paisaje. Posteriormente, para evaluar el valor de MNN de cada clase de paisajes (en nuestro caso *urbano/industrial* y *urbanizaciones*) se calcula el valor medio de todas las distancias. En las áreas urbanas e industriales los valores son relativamente bajos oscilando entre 17 y 187 m, mientras que la clase urbanización presenta valores más altos (entre 62 y 378 m). Todo ello indica un espacio fuertemente urbanizado, a nivel global, y en ocasiones, intensamente urbanizado. Asimismo, permite apreciar que el sistema de urbanización tradicional así como el asociado a los polígonos industriales presenta una estructura más compacta, en que las parcelas están más cercanas unas a otras, mientras que las urbanizaciones, muchas de ellas con función de segunda residencia, presentan una estructura más dispersa. Como se ha visto en la fase de clasificación automática, en muchos casos resulta especialmente complejo distinguir los distintos tipos de modelos de áreas urbanizadas. El empleo de índices como el MNN pueden ayudar a mejorar la clasificación original. El estudio de la distribución de los valores de MNN en la clase urbana/industrial (y en la de urbanizaciones evidencia algunas características que ya se habían detectado con los índices de forma: las de la clase 1 presenta valores bajos (elevada proximidad)

en las áreas cercanas a la ciudad de Valencia y a las principales vías de comunicación, mientras que en la clase 2 los valores que indican mayor cercanía aparecen en las zonas topográficamente más elevadas.

MPI (**índice proximidad media**): mide el grado de aislamiento y fragmentación. Paisajes con valores reducidos indican que se encuentran más fragmentados y aislados que paisajes con valores altos. El estudio de la clases urbano/industrial muestra valores altos (poco aislados) en la zona suroriental en la que se encuentran la mayoría de los núcleos urbanos tradcionales y en las zonas inmediatas a Valencia y junto a la A7 en las que se han instalado numerosos polígonos industriales. La clase *urbanizaciones residenciales* presenta valores altos (poco aislados) en la zonas en que encontramos las principales urbanizaciones. Llama la atención cómo mediante este índice se pueden detectar variaciones en las estructuras de las distintos modelos de urbanización. Así, los de las zona de la Serra Calderona presentan valores algo más bajos (mayor fragmentación) que los del sector suroccidental.

CAD (**densidad de áreas centrales):** Mide la distribución relativa de las áreas centrales calculando el número de áreas centrales disjuntas por hectárea de área total de paisaje. Con este índice se puede mostrar también la fragmentación de las clases, lo separadas que se encuentran respecto al total del área. Así, los valores más bajos se corresponden con las zonas con escasa urbanización. Sin embargo, en áreas como el sector suroccidental, con escasa ocupación areal de las zonas urbanas/industriales los valores de CAD son muy altos debido a la elevada fragmentación de éstos.

IJI (índice de dispersión/adyacencia de una mancha respecto al resto). Se trata de otro índice de dispersión que presenta valores más altos cuando la dispersión entre las distintas manchas es más homogénea. Así, en las zonas con escasa ocupación de áreas urbanas/industriales los valores salen elevados, mostrando que en ellas, las manchas están, en su mayoría, muy separadas (figura 7). Por el contrario, en los lugares en que la ocupación es elevada, la adyacencia entre las distintas manchas es mucho más desigual (unas cerca y otras más lejos), mostrándose esta características con valores bajos. Si se analiza esta característica sobre la clase *urbanizaciones residenciales* los resultados son especialmente interesantes ya que permite discriminar dos modelos de urbanizaciones: el de la zona suroccidental con valores de IJI altos (dispersión homogénea) y el de la zona de las estribaciones de la Serra Calderona con valores bajos (dispersión heterogénea).

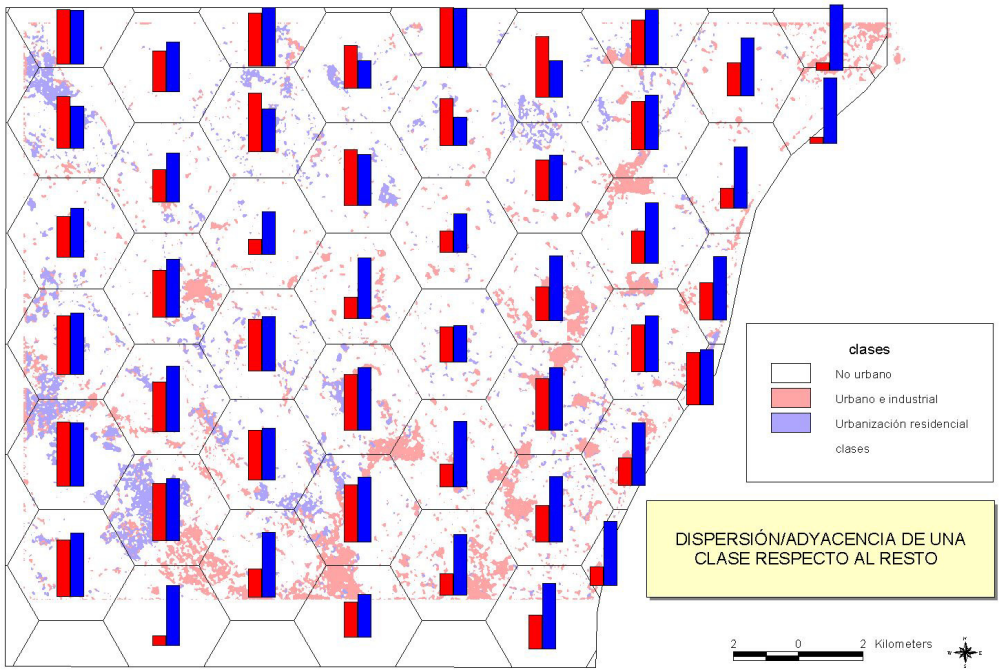

Fig. 7. En el fondo del mapa aparecen los dos tipos de clases analizados. Las columnas son gráficos proporcionales a los valores del IJI de la clase urbano/industrial (en rojo) y de la clase urbanización (en azul).

4.- CONCLUSIONES

La extracción de información espectral a partir de imágenes Landsat y el análisis de texturas de imágenes pancromáticas provenientes de fotografías aéreas son técnicas que permiten la clasificación de zonas de expansión urbana con un grado de fiabilidad adecuado para el estudio de evolución y crecimiento urbano.

El análisis de texturas permite incrementar la discriminación de áreas con urbanizaciones residenciales caracterizadas por su heterogeneidad espectral. No obstante, la metodología no permite identificar adecuadamente las zonas industriales, debido a su baja especificidad espectral como textural.

Los índices seleccionados para el análisis estructural del paisaje permiten introducir una interpretación objetiva adicional para el estudio de áreas de crecimiento y evolución urbano.

5.- BIBLIOGRAFÍA

Arozamena Villar, A. y Del Bosque González, I. (2001): *La ocupación del suelo "Corine Land Cover" Proyecto de Actualización I&CLC2000 de la Unión Europea,* en **Teledetección,medio ambiente y cambio global,** Universitat de Lleida y Asociación Española de Teledetección, pp. 633-638.

Córcoles Tamarit, P. (2003): **Anàlisi del procés d'urbanització de l'Horta Nord**, PFC Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Geodèsica, Cartogràfica i Topogràfica, Universitat Politècnica de València, 97 pp. + anexes.

Córcoles, P, Pardo, J.E., Recio, J.A. y Ruiz, L.A. (2003) *Propuesta metodológica para la optimización de la clasificación de áreas urbanizadas*, **X Congreso Nacional de Teledetección**, en prensa.

Haralick, R.M., K Shanmugam y Dinstein (1973): *Texture features for image classification*. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cibernetics**, 610-622.

McGarigal y Marks. (1994): **Fragstats: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Reference manual**. For. Sci. Dep. Oregon State University. Corvallis Oregon 62 p.+ Append.

6.- AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente con el proyecto de investigación BTE2002-04552-C03-01 del Ministerio de Ciencia y Tecnología, titulado *Extracción automática de las características geomorfológicas de las plataformas carbonatadas de las Baleares y Valencia.*