

Propuesta metodológica para estudios de dinámica de uso urbano utilizando la teledetección: Maracay, estado Aragua-Venezuela

Methodological proposal for urban use dynamics studies by using remote sensing: Maracay, Aragua-State-Venezuela

Gladys Zuleima Molina M.*

Recibido: octubre, 2004 / Aceptado: diciembre, 2004

Resumen

La información proveniente de sensores remotos y concretamente de las imágenes de satélite posee un valor científico potencial para los investigadores en las áreas de los estudios agrícolas, urbanos, ambientales, ingenieriles, entre otras.

Su importancia en los estudios que abordan las interacciones ambiente sociedad, particularmente en los usos del suelo y los cambios a que están sujetos es muy grande. También lo es en los estudios de dinámica urbana, como componente de los usos del suelo, en las tendencias de crecimiento que muestra la población y poseen un valor práctico al proveer información predictiva acerca de los eventos socialmente significativos tales como hambrunas y enfermedades epidémicas.

En el marco de lo expuesto en el presente artículo se presentan los resultados de una investigación dirigida a dilucidar la dinámica de ocupación y transformación de los usos del suelo para la ciudad de Maracay y sus alrededores. Se enfatiza en los procedimientos metodológicos a seguir y en la forma de analizar los resultados.

Palabras clave: imágenes de satélite; usos del suelo; clasificación supervisada; dinámica de cambios; dirección de cambios.

Abstract

The information arising from remote sensing, and concretely, from satellite images has a potential scientific value for researchers in areas such as agricultural, urban, environmental, and engineering studies, among others.

It is of pivotal importance for studies dealing with environment-society interrelations, particularly for land uses and changes they are subject to. It is also important for urban dynamics studies as a component of land uses; in the growth trends shown by the population that has a practical value as it provides predictable information on socially significant events, such as famines and epidemic diseases.

* Universidad de Los Andes, Escuela de Geografía, Mérida-Venezuela, e-mail: gmolina@ula.ve

In this article's framework, the results of a research directed to elucidate the land use cover and transformation dynamics for the Maracay city and its surroundings are presented. The methodological procedures to be followed and the manner of analysing results are emphasized.

Key words: satellite images; land use; supervised classification; change dynamics; change direction.

Introducción

En las últimas décadas la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) se han convertido en herramientas muy útiles para la gestión y ordenación de los territorios, de las áreas urbanas. Este hecho cobra mayor relevancia en los países en vías de desarrollo, donde la precaria disponibilidad de información de base y de aspectos temáticos dificulta una adecuada planificación de los espacios urbanos, que se caracterizan por una continúa expansión, la mayoría de las veces de tipo espontáneo, producto, por una parte, del excesivo aumento demográfico que experimentan estos países y, por otro, a las mejores ventajas que ofrecen las ciudades, donde se concentra el capital, frente a los espacios rurales. En este sentido, estas dos herramientas permiten la generación, tratamiento, almacenamiento y seguimiento de aspectos esenciales para la gestión urbana, a costos relativamente bajos.

El objetivo de este trabajo es el de realzar una aplicación práctica de las ventajas que ofrece una de las herramientas descritas: la teledetección. Para ello, se utilizaron dos imágenes Landsat: una de 1986 y otra de 1991 que cubren la ciudad de Maracay (capital del estado Aragua-Venezuela); se realizaron clasificaciones

digitales individuales para determinar la cobertura del suelo en el área y, posteriormente, se superpusieron a fin de determinar la dinámica del crecimiento urbano, cuantificar las categorías y definir la dirección de los cambios ocurridos.

Se tomó como caso de estudio un área localizada en la depresión del lago de Valencia, en el centro-norte de Venezuela, que posee tierras de primera calidad para usos agrícolas, que han determinado que esta región haya sido tradicionalmente un área agrícola de gran importancia para la economía del país. Sin embargo, es importante señalar que desde hace algunos años, la situación viene cambiando debido al desarrollo explosivo y desordenado de varias ciudades ubicadas en esta área, especialmente Valencia y Maracay. El desarrollo urbano está generando una amplia gama de problemas, los cuales reflejan una fuerte competencia por la apropiación del espacio disponible: expansión física de las ciudades, implantación de industrias, abertura de nuevas vías de comunicación, demanda de áreas recreacionales, eliminación de desechos, demanda creciente de productos agropecuarios etc. (Terra, 1985).

En particular se seleccionó a Maracay como área de estudio debido a que esta ciudad refleja las condiciones que caracterizan a las ciudades venezolanas:

un crecimiento espacial acelerado, gran contingente de población en su interior derivado, principalmente, de migraciones internas, una industria medianamente desarrollada, importancia desmedida del sector terciario en su interior, una pseudo planificación que responde a intereses específicos de ciertos planos de la economía, desequilibrio espacial que conlleva a la proliferación de barriadas marginales, alto porcentaje de ausencia de servicios, desequilibrios ambientales, etc.

A pesar de que Maracay ha sido objeto de la elaboración de tres planes urbanos realizados por la Comisión Nacional de Urbanismo (1953, citado por MINDUR, 1982), el Ministerio de Obras Públicas (1977, citado por MINDUR, 1982) y el Ministerio de Desarrollo Urbano (1982), la aplicación de estos planes no parece del todo adecuada puesto que en ese lapso la ciudad sobrepasó las estimaciones en materia de crecimiento, ocupando la totalidad del espacio definido como área urbana desarrollable. Por esta razón, su crecimiento espacial se extiende a los centros poblados vecinos y a las áreas intermedias sobre los ejes viales regionales.

Área de estudio

“En terrenos de singular feracidad, otrora ocupados por Araguas y Tacariguas, tribus Caribes, Don Andrés Pérez de Almarza, por el año de 1697, fundó la ciudad de Maracay, a unos 445 metros de altitud sobre el nivel del mar,

en los Valles de Aragua, afamados por su asombrosa fertilidad. La privilegiada situación en que se encuentra, permite llamarla ‘encrucijada’ de todos los caminos de Venezuela” (Matute, 1967: 63).

Geográficamente la ciudad de Maracay se localiza entre los meridianos 67° 30' y 67° 40' de Longitud Oeste, y los paralelos 10° 10' y 10° 20' de Latitud Norte. Por el norte se extiende hasta las estribaciones meridionales de la serranía del Litoral; al sur sobrepasa en esa dirección al río Aragua y, más al oeste, colinda con el lago de Valencia (Figura 1). Por el este, el límite arranca en la divisoria Cola de Caballo y avanza hacia el sur por el cerro El Mácaro y el sector oriental del barrio 19 de Abril y la población de Santa Cruz; mientras al oeste, el límite desciende por el cerro el Picacho y la divisoria de la Cabrera hasta el lago de Valencia, al sur. Comprende parcialmente superficies correspondientes a los actuales municipios autónomos: Girardot, Mariño y Sucre del estado Aragua; en tanto, que debe destacarse la existencia de una franja de terreno al oeste perteneciente al actual municipio autónomo Guacara del estado Carabobo (Morales, 1990).

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. La ciudad contaba en 1971 con 255.134 habitantes; para 1990, 421.000 y según proyecciones realizadas por la Oficina Nacional del Censo se esperaban 862.000 habitantes para el año 2000.

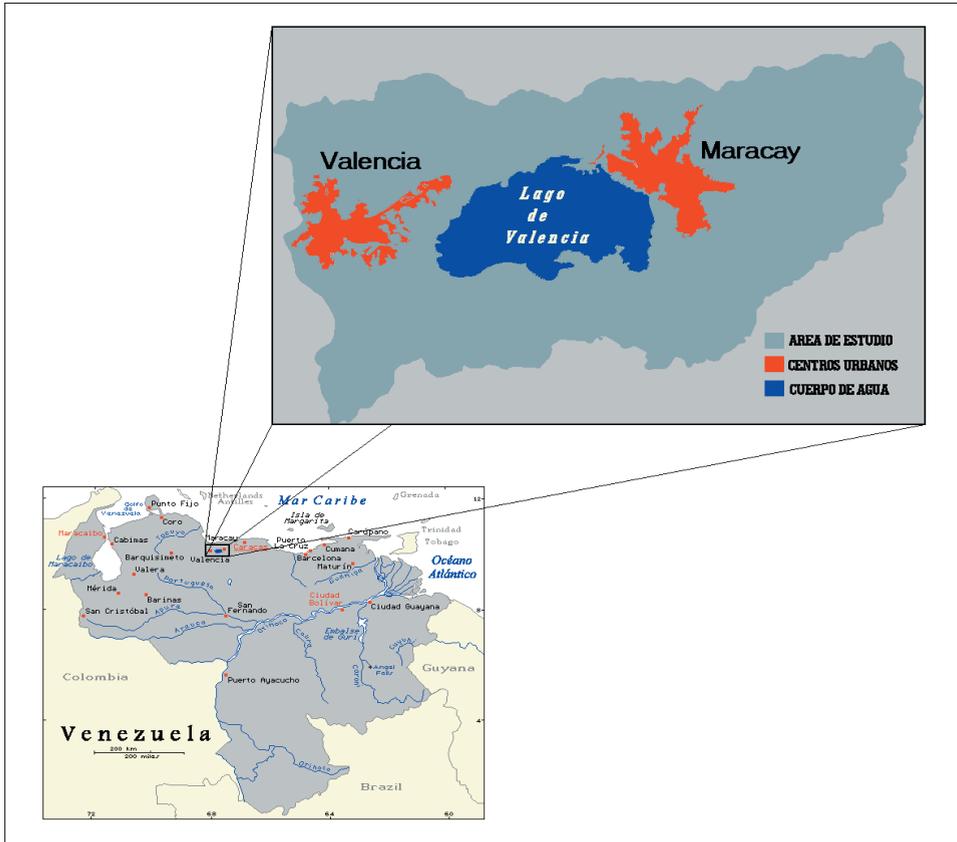


Figura 1. Maracay: Localización nacional y regional

Para 1982 el área ocupada por Maracay era de 9.643 has, con una población, para ese mismo año, de 387.652 habitantes. El espacio delimitado como zona de estudio (Maracay y Palo Negro) se encuentra ubicado en la región centro-norte-costera del territorio, concretamente en la parte central de la depresión del lago de Valencia.

Fisiográficamente está conformada por paisajes de planicie, valle, piedemonte y montaña. La planicie ocupa la mayor extensión territorial y se inicia a orillas

del lago de Valencia con deposiciones de origen lacustrino, 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, caso de los ríos Caño Colorado, Las Delicias, Güey y Limón. La planicie, al igual que los valles, entran en contacto con el piedemonte que los separa del paisaje montañoso de las estribaciones meridionales de la serranía del Litoral (Morales, 1990).

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, 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. En cuanto a 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.

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 de ese rápido desarrollo de los últimos 25 años (Botello, 1987).

Aspectos teóricos

La teledetección y los estudios urbanos

Hasta el lanzamiento de la serie de satélites Landsat, los primeros estudios con sensores remotos en áreas urbanas fueron realizados tomando como base, para la extracción de información, las fotografías aéreas con apoyo de trabajo en campo. La información era obtenida, estrictamente, a partir de interpretación visual tomando en cuenta las claves de interpretación: tono, textura, tamaño, forma y contexto. Estos estudios es-

taban dirigidos básicamente hacia la morfología y comportamiento urbano o de cobertura del suelo en general. La información generada era utilizada por geógrafos y planificadores para obtener información de los usos del suelo (Ritcher, 1969). También se utilizó y se utiliza la información exhaustiva que proporciona la fotografía aérea para recoger rápidamente, por muestreo, los datos relativos a las poblaciones urbanas, para actualizar el total de habitantes de una ciudad que ha sido anteriormente objeto de un censo de población (Dureau *et al.*, 1995).

El desarrollo de los métodos de obtención de información socioeconómica y demográfica han sido beneficiados directamente de la experiencia adquirida después de los años 50 al utilizarse las fotografías aéreas en los países desarrollados, especialmente en los EE UU. A partir de los años 60 estos métodos han tenido un campo de aplicación privilegiada en los países en desarrollo, donde frecuentemente los investigadores urbanos carecen de información actualizada de las ciudades en rápido crecimiento.

En este sentido, las principales ventajas que ofrecen las fotografías aéreas son: su alta resolución espacial, velocidad en la obtención de información para un área dada, rápida cartografía comparada con el trabajo directo de campo y un permanente registro de rasgos de uso de la tierra por comparaciones realizadas a través del tiempo (Martín, 1989).

A pesar de tan destacado papel, la fotografía aérea presenta algunos inconvenientes importantes que han hecho

buscar nuevas alternativas metodológicas. La débil cobertura espacial, el fatigoso tratamiento visual, los errores geométricos introducidos por la perspectiva cónica y el complejo procedimiento de trasladar la información al plano, son los principales problemas que presenta su aplicación. En definitiva, los costos económicos y el trabajo humano son considerables, produciéndose en la mayor parte de los casos un desfase considerable entre la fecha del vuelo y la publicación de los trabajos. Estos inconvenientes explican el creciente empleo de otras tecnologías más recientes a determinadas escalas (Chuvienco, 1985).

La utilización de sensores espaciales en aplicaciones terrestres comienza en 1972 con el lanzamiento del primer satélite de la serie ERTS, y específicamente a través del sensor MSS que posee una resolución espacial de 79 x 57 metros y cuatro bandas espectrales. A partir de 1984 se han utilizado los datos provenientes del sensor TM que posee una resolución espacial de 30 x 30 metros y siete bandas espectrales; desde 1986, los datos provenientes del satélite francés SPOT, cuya resolución espacial en modo multiespectral es de 20 x 20 metros y en modo pancromático de 10 x 10 metros y, recientemente (años 1999-2000), los datos del sensor ETM de la serie Landsat que incorpora una banda pancromática de 15 x 15 metros y los datos del satélite IKONOS que posee 4 bandas en modo multiespectral con resolución de 4 x 4 metros, y una banda pancromática de 1 x 1 metro de resolución.

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 dificultad estriba en la heterogeneidad del elemento urbano en cuanto a formas, tamaños y materiales, lo cual supone una gran variedad de respuestas espectrales en la imagen, que en muchos casos se agrava con la escasa resolución espacial de los sensores. La definición de zonas urbanas homogéneas es complicada, por cuanto en la mayoría de los casos un píxel representa una proporción tanto de la información que lo define como de la proveniente de otros píxeles vecinos.

A pesar de las dificultades que conlleva un estudio urbano a partir de imágenes satelitarias, varias razones pueden justificar su empleo (Molina, 1995):

- Posibilidad de actualizar información en cortos períodos de tiempo.
- Al tratarse de un formato digital el tratamiento es más ágil y rápido.
- Considerando el costo por unidad de área, la información es más barata y asequible.
- Al ser automatizados los procesos, hay más objetividad en los tratamientos.
- Da la posibilidad de comparar con otros ámbitos, pues el mismo sensor proporciona información similar sobre otras ciudades.
- Permite crear nueva información dado su carácter multiespectral, lo cual no es posible en otros documentos (fotografías aéreas o mapas).

En el contexto de los estudios urbanos, Casas y Chuvieco (1987) revisan dos grupos de aplicaciones bien diferenciadas en el medio urbano utilizando como base el sensor MSS. En el primero, se encuentran aquellos intentos de delimitar exactamente el área ocupada por la ciudad, tanto con vistas a actualizar los límites censales (Dietrich y Lachoswsky, 1978), como para estudiar el crecimiento urbano (Carter y Stow, 1979; Jensen y Toll, 1982). Los problemas más importantes surgen aquí de las zonas residenciales suburbanas, por cuanto acogen respuestas intermedias entre el substrato vegetal y los materiales en construcción. Este problema conduce a utilizar otros sensores auxiliares al MSS, como sería el caso del radar (Henderson, 1983) o de imágenes térmicas (Ormsby, 1982). En ocasiones se emplea asimismo la fotografía aérea, ya como elemento adicional de la información (Jensen, 1979), ya como fuente de referencia para contrastar los resultados (Bruijn, 1978).

Un segundo grupo de trabajos se conduce hacia el cálculo de volumen de población urbana. Para ello, normalmente, se correlaciona la población con la superficie edificada, deduciendo un modelo de regresión que pueda servir para estimaciones intercensales. Es el método seguido por Ogrosky (1975), a partir de imágenes del Skylab, que posteriormente refinarían Welch (1980) y, sobre todo, Iisaka y Hegedus (1982), que emplean la información digital proporcionada por el MSS. En esta misma línea se encuentran los trabajos realizados por Dureau *et al.* (1995), utilizando imágenes SPOT y TM.

Aun cuando el uso de imágenes MSS ha sido amplio en estudios urbanos, su escasa resolución espacial (79 metros), no permitía captar en su totalidad la complejidad característica de estos espacios. Usando imágenes MSS se han abordado estudios de dinámica urbana con tratamientos digitales (Charbonneau y Royer, 1993) o de dinámica urbana con análisis visual (Martin y Howarth, 1989).

A partir de las experiencias alcanzadas con el sensor MSS y con la disponibilidad de imágenes de mayor resolución espacial, como es el Landsat-TM o ETM, SPOT-XS-HRV e IKONOS se ha logrado enriquecer el rango de aplicaciones. En este sentido, la cantidad y calidad de los estudios urbanos, así como las líneas de aplicación han avanzado notablemente en la última década. A partir del sensor TM se han abordado estudios de morfología urbana (Casas y Chuvieco, 1987; Solé y Serra, 1991); ocupación del suelo (Goward y Wharton, 1984; Wang, 1984; Wheeler, 1985 y Quattrochi, 1994), detección de cambios (Gong y Howarth, 1992 y Wang, 1993), densidad de población (Anglugino *et al.*, 1988); Deprats y Dutartre, 1995). Con el satélite SPOT, cuya resolución espacial mejora considerablemente con respecto al Landsat-TM, se cuentan los trabajos realizados por Martín y Howarth (1989), Chung (1989), Baraldi y Parmiggiani (1990), Harrison y Richards (1988) y Baudot *et al.* (1988) que realizan clasificaciones automatizadas en áreas urbanas; Alwashe *et al.* (1988) y Baudot *et al.* (1988) realizan clasificaciones digitales de usos urbanos, pero mezclando imágenes SPOT -HRV y

XS mediante la técnica HSI (Intensidad; Brillo y Saturación) o el trabajo realizado por Cheng y Thiel (1995) donde se calculan alturas de los edificios a partir de imágenes SPOT pancromáticas.

También son frecuentes los trabajos que utilizan de forma integrada las imágenes MSS, TM y SPOT, de manera que se aprovecha la resolución espacial de unas y la espectral de otras. Buenos ejemplos de ello son los trabajos elaborados por el NRSC (1986), Martín (1989) y Gastellu (1990), donde se utilizan de forma integrada imágenes MSS y SPOT para definir los límites de la frontera urbano-rural. En esta misma línea, pero analizando la expansión urbana, se cuentan 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, de cara a incrementar los niveles de precisión en clasificaciones digitales dirigidas a separar las tierras construidas de las no construidas en Salt Lake City.

Se han realizado importantes progresos en la estimación de variables socioeconómicas a partir de imágenes de satélite, como: el ingreso medio por familia, la edad de las construcciones y la densidad de construcción. En un estudio sobre Sidney, Froster (1993) demostró que el valor promedio de las construcciones puede ser predecible a partir de datos MSS. En la misma línea Dudley-Murphy (1990) encontró que se podía obtener información de niveles de ingreso usando imágenes SPOT; para ello estableció co-

rrelaciones entre los diferentes tipos de residencias y el ingreso medio de la población residente en éstas, para la ciudad de México.

Weber y Hirsch (1992) utilizan de manera integrada imágenes SPOT HRV y XS, información cartográfica de los usos del suelo e información censal (población, empleo y vivienda) en ocho pueblos de la comunidad urbana de Estrasburgo, para obtener algunos índices relacionados con la calidad de vida de la población. De esta manera, demostraron que la calidad del paisaje urbano puede ser caracterizada y cartografiada con un detalle que no es posible utilizando únicamente información del censo. Integrando la mencionada información y aplicando tratamientos de análisis multivariante (correlación, regresión y análisis factorial) lograron obtener los siguientes índices: características de la edificación, atracción de las áreas residenciales en función de la proporción de áreas verdes y de repulsión en función de la proporción de áreas industriales y comerciales.

Lo (1995), desarrolla varios métodos para extraer información de unidades de población y vivienda utilizando de manera integrada información proveniente de imágenes multispectrales SPOT y técnicas de SIG. Los métodos fueron desarrollados para la ciudad de Hong Kong, caracterizada por una alta densidad de población y usos urbanos mezclados en estructuras multifuncionales. Los métodos incluyen diferentes formas de modelos de regresión comparando los valores de radiancia de los pí-

xeles de las imágenes con densidades de población y vivienda. Los resultados demostraron que es posible establecer relaciones directas entre estos dos elementos a nivel general. Sin embargo, a nivel de detalle, la precisión de los modelos es menor debido a la dificultad de discriminar, con imágenes, los usos residenciales de los no residenciales en las estructuras multifuncionales.

A pesar de los beneficios que se logran al integrar información proveniente de varios sensores, no es menos cierto que la mayoría de los algoritmos de clasificación multispectrales píxel a píxel son incapaces de producir la precisión requerida para la planificación urbana y local, tal y como lo demuestran los trabajos realizados por Forster (1980), Milazzo y DeAngelis (1984), Toll (1985) Barnsley *et al.* (1989) y Barnsley y Sadler (1990). En este sentido, las tendencias recientes integran información proveniente de imágenes de satélite con la derivada de un SIG, a fin de lograr clasificaciones más precisas. El uso de la información contenida en un SIG permite guiar las clasificaciones digitales con mayor exactitud.

Con lo visto anteriormente y siguiendo lo establecido por Dureau y Weber (1995) se puede concluir que el uso de fotografías aéreas y de imágenes de satélite de forma alterna ha contribuido al desarrollo de, al menos, tres familias de métodos.

- El primero reposa sobre la relación existente entre la superficie de la mancha urbana y la población total

de una ciudad. Estos métodos están basados sobre la aplicación de modelos matemáticos, en los cuales se relaciona superficie y población. Los trabajos realizados por Lo y Welch (1977), Welch (1980) y Lo (1995) en las grandes ciudades chinas son buenos ejemplos de la aplicación de ese método.

- Una segunda familia de métodos, los semi-globales, toma en cuenta las diferencias internas de la ciudad. En ellos los análisis se realizan, por ejemplo, de acuerdo a los tipos de barrios, definidos según criterios morfológicos. Las fotografías aéreas y las imágenes de satélite son utilizadas de forma alterna para determinar la superficie ocupada por cada tipo de barrio. El trabajo de Deprats y Dutartre (1995) se inscriben en este método. En él se utiliza una imagen SPOT, completada con información proveniente de una encuesta sociológica, para estimar la población de los barrios periféricos de Ouagadougou (Burkina Faso), con el fin de programar las necesidades de alimentación y agua en cada uno de ellos.
- Una tercera familia de métodos descansa sobre la hipótesis de que existen relaciones entre las características morfológicas del medio urbano y las características demográficas y socioeconómicas de sus habitantes. Estos métodos utilizan de forma exhaustiva la información proveniente de las imágenes para obtener, por muestreo, las características relativas a las poblaciones urbanas. La idea

principal es utilizar la imagen de satélite como base de sondeo y explotar la información sobre la morfología urbana, a fin de establecer las áreas muestra sobre las cuales aplicar una encuesta con objetivos demográficos y socioeconómicos. El método así expuesto ha sido aplicado por la ORSTOM en un programa de investigación iniciado en 1985, con un equipo multidisciplinario conformado por geógrafos, urbanistas, estadísticos y especialistas en teledetección. Este programa fue aplicado inicialmente sobre Marsella y, posteriormente, en Quito. En vista de los buenos resultados obtenidos, la ORSTOM abordó en 1992 una aplicación completa del método en Yaodué (Camerún). Por último, en el marco de un proyecto de investigación en cooperación con la Universidad de Los Andes (Bogotá-Colombia), en 1993 se procedió a la aplicación del método sobre esta ciudad a fin de obtener datos sobre la población urbana (Durreau y Weber, 1995).

La imagen puede servir, igualmente, como un procedimiento adicional para mejorar información ya existente. Por la información que aporta sobre la morfología de una ciudad, la imagen de satélite permite distribuir espacialmente los datos socioeconómicos y demográficos de origen censal u administrativo conocidos previamente según las unidades geográficas ordinarias. También puede ser igualmente utilizada para resolver

el problema de la incompatibilidad de unidades geográficas, obstáculo para integrar información proveniente de orígenes diversos.

A partir de 1999, con la liberación tecnológica promovida en 1994 por el gobierno de los Estados Unidos de América, comienzan a ser utilizadas, en el campo de las aplicaciones urbanas, imágenes de satélite de muy alta resolución, tal es el caso de IKONOS (1 metro de resolución espacial en modo pancromático y 4 metros en modo multiespectral), Landsat 7 con su sensor ETM (15 metros de resolución espacial en modo pancromático), el satélite francés SPOT 4 (4 metros de resolución) y sensores aerotransportados hiperespectrales, entre otros. Estas imágenes han permitido, en los últimos años, el desarrollo de nuevas fuentes de información, tecnologías y teorías en el campo de los sensores remotos y los sistemas de información geográfica, que han provisto a los investigadores de invalorables visiones en el campo del medio urbano.

Ejemplo de lo mencionado se evidencia en trabajos recientes donde se han abordado investigaciones dirigidas a: -la utilización de imágenes de alta resolución espacial, o fuentes alternativas provenientes de SAR o LIDAR para la caracterización de paisajes urbanos; -el desarrollo de nuevas técnicas de procesamiento digital de imágenes como: redes neuronales, métodos orientados a objeto, medidas texturales, análisis lineal de mezclas espectrales que conllevan a incrementar la consistencia de la infor-

mación contenida en los atributos urbanos tomados desde sensores remotos; - desarrollo de técnicas analíticas y metodológicas para producir indicadores de condiciones sociales y económicas que prevalecen en el paisaje urbano y - desarrollo de nuevas tecnologías de modelos de simulación y predicción del comportamiento de los paisajes urbanos (Cowen y Jensen, 1998; De Sherbinin *et al.*, 2002; Lo y Yang, 2002; Longley, 2002; Yang y Lo, 2003; Crosseto *et al.*, 2003; Sutton *et al.*, 2003 y Weng, 2003).

Métodos y técnicas

A continuación se describen los procesos metodológicos utilizados con el fin de lograr el objetivo propuesto: obtener la dinámica del crecimiento urbano de la ciudad de Maracay y su caracterización, utilizando dos imágenes del satélite Landsat TM.

Es importante mencionar que este objetivo se enmarca dentro de la segunda familia de métodos descritos; es decir, los métodos semi-globales que toman en cuenta las diferencias internas de la ciudad. La escala aproximada de trabajo fue 1: 25.000

A continuación se realiza una breve conceptualización de los aspectos metodológicos reseñados en la figura 2:

$$S \sum_{j=0,m} \sum_{k=0,m-j} a_{j,k} X^j Y^k$$

Correcciones geométricas

Debido a que las imágenes digitales contienen distorsiones geométricas, que impiden su directa superposición a un mapa, es necesario obtener una perfecta correspondencia geométrica, previo a la utilización integrada de varias imágenes de satélite.

Las fuentes de estas distorsiones pueden deberse a: variaciones en la altitud, posición y velocidad de la plataforma que sustenta al sensor o a otros factores como distorsión panorámica y curvatura de la tierra (Lillesand y Kiefer, 1994).

El concepto de corrección geométrica incluye cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles de la imagen y puede abordarse con dos orientaciones: orbitales o puntos de control. En el primer caso, a partir de la información disponible sobre las características orbitales del sensor se pueden corregir los errores sistemáticos, modelando teóricamente su influencia sobre la imagen final. Este método es idóneo para áreas que posean escasa cartografía base. El segundo método parte de una cartografía básica o de otra imagen corregida a la que se pretende ajustar la imagen original. En ese caso, la corrección se realiza en tres fases: i) localización de los puntos entre la imagen a ser corregida y el documento de referencia; ii) cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y el documento de referencia, y iii) transferencia de los niveles digitales (ND) originales a la nueva posición, definida por la transformación previa (Chuvieco, 1996).

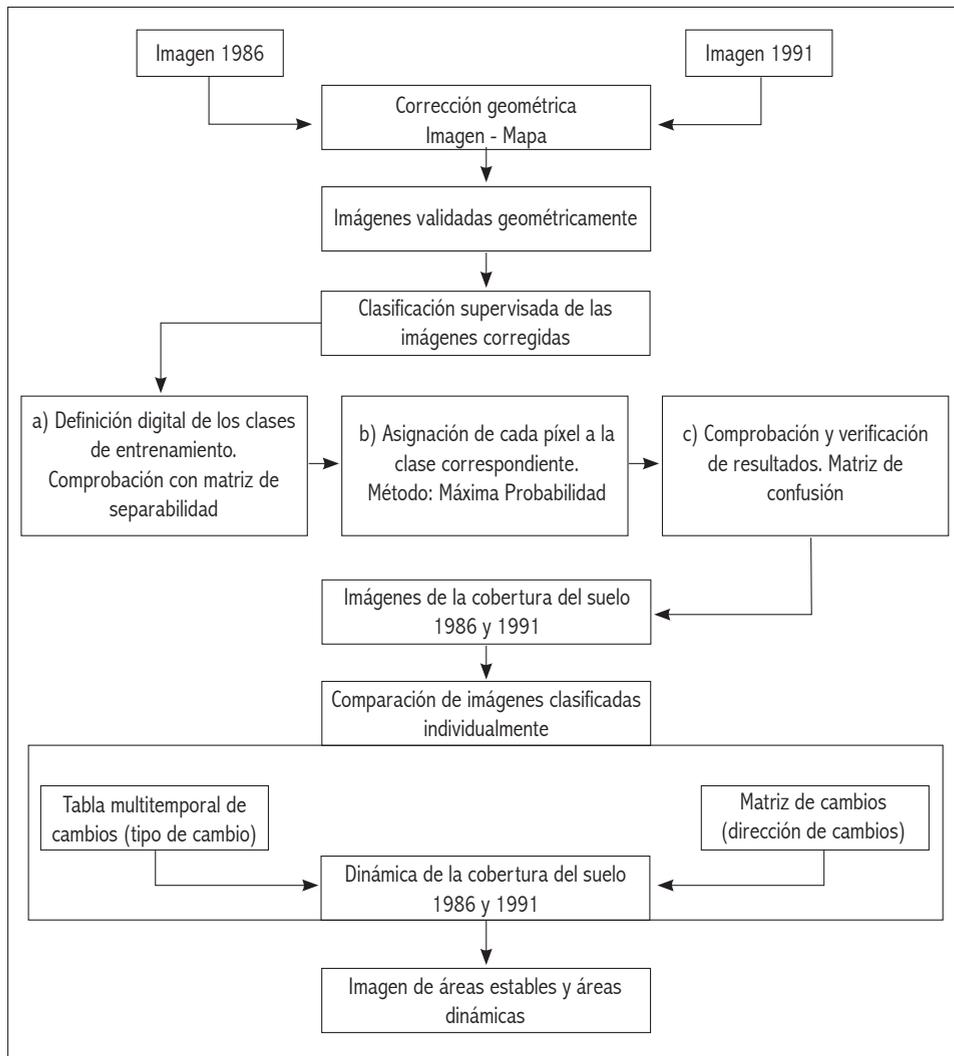


Figura 2. Esquema metodológico

i) Localización de los puntos entre la imagen a ser corregida y el documento de referencia

Para calcular cualquier función entre dos o más variables es necesario contar con una serie de observaciones comunes a todas ellas. De la misma forma, las fun-

ciones que permiten transformar coordenadas entre la imagen y el mapa precisan localizar una serie de puntos comunes que reciben el nombre de puntos de control. A partir de las coordenadas imagen y mapa de esos puntos, se calculan las funciones de ajuste, cuyos resultados

van a depender del número de puntos, su localización y distribución.

Así, el número ideal de puntos va a depender del tamaño, complejidad de la imagen y grado del polinomio de transformación utilizado. Matemáticamente se precisa de 3 puntos de control para un polinomio de primer grado, 6 para uno de segundo y 10 para uno de tercer grado. Sin embargo, conviene superar estas cantidades de puntos a fin de lograr una mejor cobertura de los mismos y, por ende, una mayor precisión; algunos autores sugieren la utilización de 100 a 120 puntos para una imagen TM.

En cuanto a la localización, se recomienda que sean puntos claramente identificables entre la imagen y el mapa, preferiblemente deben ser elementos no sujetos a cambios en el tiempo. Finalmente, en cuanto a la distribución conviene que estos puntos se localicen uniformemente en todo el espacio geográfico abarcado por la imagen.

ii) Cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y el documento de referencia

La corrección digital de la geometría de una imagen se realiza estableciendo unas funciones que ponen en relación las coordenadas de la imagen con las del mapa. Así, a partir de las coordenadas X, Y del mapa puede estimarse qué columna y qué línea de la imagen corresponde a esa localización. Esquemáticamente esta transformación puede expresarse como:

$$S \sum_{j=0,m} \sum_{k=0,m-j} a_{j,k} X^j Y^k$$

Donde **S** indica la coordenada estimada de la imagen corregida, que se obtiene a partir de las coordenadas del mapa X e Y. El subíndice **m** indica el grado del polinomio de ajuste.

La bondad del grado de ajuste se mide a partir de los residuales, donde el residual es la diferencia obtenida entre el valor observado y el estimado, para cada uno de los puntos empleados en el proceso. Cuanto mayor es este valor menor es el ajuste y viceversa. El promedio de los residuales se conoce como Error Medio Cuadrático (EMC), que se calcula como la raíz cuadrada de las desviaciones entre los valores estimados y los observados por la regresión.

iii) Transferencia de los niveles digitales originales a la posición corregida

Si se pretende crear una imagen que se corresponda con las coordenadas obtenidas en la fase anterior, resulta necesario trasladar de alguna forma los niveles digitales de esa imagen a la nueva posición. Las funciones de ajuste permiten calcular la posición correcta de cada pixel, pero no suponen su traslado.

Para cumplir con esta última fase existen tres métodos: a) el vecino más próximo, b) interpolación bilineal y, c) convolución cúbica.

El primer método se denomina vecino más próximo por situar en cada celdilla de la imagen corregida el nivel digital del pixel más cercano en la imagen original. El principal inconveniente es que produce distorsiones en los elementos lineales, los cuales aparecen en la imagen final como quebrados.

El segundo método interpolación bilineal promedia el valor de los 4 píxeles más cercanos al original. Este promedio se pondera según la distancia del píxel original al corregido. El inconveniente de su uso es que tiende a difuminar los contrastes espaciales de la imagen original.

El tercer método convolución cúbica considera los niveles digitales de los 16 píxeles más cercanos. El efecto visual en la imagen final es más adecuado, pero necesita un mayor volumen de cálculo.

Cualquier programa de tratamiento digital de imágenes posee los procedimientos señalados en cada fase de la corrección.

Clasificación digital de imágenes de satélite

Fruto de una clasificación digital se obtiene una cartografía e inventario de elementos localizados sobre la superficie analizada. *“La imagen multibanda se convierte en otra imagen, del mismo tamaño y características de las originales, con la importante diferencia de que el nivel digital que define cada píxel no tiene relación con la radiancia detectada por el sensor, sino que se trata de una etiqueta que identifica la categoría asignada a ese píxel”* (Chuvieco, 1996: 370).

Al clasificar imágenes se pretende categorizar automáticamente todos los píxeles de la imagen, convirtiéndolos en clases que definen rasgos de interés de la superficie terrestre (rasgos geomorfológicos, geológicos, vegetación, cobertura, etc.). Habitualmente, la clasificación se realiza sobre la información presente en

la imagen, siendo usado el patrón espectral presente en la información de cada píxel, como la base numérica para la categorización (Lillesand y Kiefer, 1994).

Una clasificación digital no busca una definición absoluta de cada cubierta, que pudiera ser aplicable a cualquier imagen, sino más bien una caracterización particular, válida para una determinada imagen y un territorio concreto (Rovinobe, 1981).

Una clasificación digital se realiza en tres fases:

- a) Definición digital de las clases o categorías (Fase de entrenamiento).
- b) Asignación de cada uno de los píxeles de esa imagen a una de las categorías (Fase de asignación).
- c) Comprobación y verificación de resultados (Fase de validación).

a) Fase de entrenamiento

Una clasificación digital se inicia definiendo cada una de las categorías que se pretenden discriminar (leyenda). Esta definición es numérica, ya que se trata de obtener el ND o rango de ND, que identifica cada categoría, para todas las bandas que intervienen en la clasificación.

Existe una cierta dispersión en torno al ND que define cada categoría; por ello, la fase de entrenamiento resulta compleja dado que se trata de definir con precisión cada una de estas categorías, teniendo en cuenta su propia variabilidad en la zona de estudio.

La fase de entrenamiento constituye la parte fundamental del proceso de clasificación dado que, los resultados de la clasificación están más influidos por la

definición previa de estas áreas, que por el criterio con el que éstas son posteriormente discriminadas (Lillesand y Kiefer, 1994; Hixson *et al.*, 1980; Story y Congalton, 1986 y Chuvieco, 1996).

Tradicionalmente, de acuerdo a la forma en que son obtenidas las estadísticas de entrenamiento, los métodos de clasificación se han dividido en dos grupos: el supervisado y el no supervisado. En el método supervisado el analista “*supervisa*” el proceso de categorización de los píxeles, especificando el algoritmo utilizado y los descriptores numéricos de cada uno de los diferentes tipos de cobertura presentes en la imagen; esto es, lugares test de tipos de cubierta conocidos, llamados “*campos de entrenamiento*”, que describe el atributo espectral de cada clase de interés. Cada píxel es entonces para cada categoría comparado numéricamente con la clave de interpretación y asignado (identificado) a la categoría que más se parece.

Por su parte, el método no supervisado se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen. No implica ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación, que en la consecución de los resultados.

En esta estrategia, se asume que los ND de la imagen forman una serie de conglomerados (clusters), más o menos nítidos según los casos. Estos grupos equivaldrían a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían definir clases temáticas de interés (Chuvieco, 1996). Las clases que resultan de una clasificación no su-

pervisada son clases espectrales, porque están basadas solamente en el agrupamiento natural de los valores presentes en la imagen, la identidad de estas clases no se conoce de partida, de manera que el analista puede comparar la imagen clasificada con otra información de referencia y determinar la identidad de la clase espectral (Lillesand y Kiefer, 1994).

Para obtener resultados aceptables en la clasificación, los campos de entrenamiento deben ser representativos de la categoría que se quiere discriminar. Los campos de entrenamiento no deben ser tomados en zonas de transición, ya que al tratarse de un área heterogénea (puede involucrar dos o más categorías), sus medidas estadísticas serían un cierto promedio de los distintos componentes presentes en la imagen. El error contrario sería seleccionar campos de entrenamiento sólo donde la categoría es muy homogénea, sin tomar en cuenta su variación real (Chuvieco, 1996).

Otro aspecto a tomar en cuenta en la selección de los campos de entrenamiento es su tamaño. A este respecto, el número mínimo de píxeles que deben estar contenidos en un campo de entrenamiento es de $N+1$, siendo N el número de bandas espectrales. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este número de píxeles dificulta la evaluación de la varianza y la covarianza de los píxeles involucrados en una categoría. Por esta razón, algunos autores recomiendan usar un número entre $N*10$ y $N*100$ píxeles.

b) Fase de asignación

En esta etapa los patrones espectrales de la imagen son evaluados usando reglas de decisión para determinar la identidad de cada píxel. Han sido desarrollados numerosos enfoques matemáticos para el reconocimiento de patrones espectrales. Sin embargo, los más empleados en el contexto de la teledetección son: el clasificador de mínima distancia, clasificador de paralelepípedos y el clasificador de máxima probabilidad.

Desde el punto de vista estadístico, todos ellos definen un área de dominio, en torno al centro de cada categoría a analizar, mediante un conjunto de funciones discriminantes. Estas ecuaciones pueden considerarse, por tanto, como las fronteras que definen cada categoría. El píxel es asignado a una clase i , si sus ND se encuentran dentro del área de dominio asignado a dicha clase (Chuvieco, 1996).

El criterio de clasificación que se utiliza con más frecuencia es el de máxima probabilidad. Este método considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. El cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el píxel a aquella que maximice la función de probabilidad. Aunque este clasificador es muy complejo, es también el más empleado en teledetección por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos (Chuvieco, 1996).

Para el caso de que se empleen varias bandas en el proceso de clasificación, el cálculo de la función de probabilidad viene dado por:

$$p(x / A) = (2 \pi)^{-m/2} |V_A|^{-0.5} \exp \left\{ -0.5 (M_x - M_A)^T V_A^{-1} (M_x - M_A) \right\}$$

donde m indica el número de bandas, $|V_A|$ la determinante de la matriz de varianza-covarianza para la clase A ; M_x el vector de ND asociado con el píxel x ; M_A , el vector de ND medios de la categoría A , y los superíndices T y $^{-1}$, la traspuesta y la inversa de las matrices a las que afectan, respectivamente.

c) Fase de validación

La estimación de la exactitud alcanzada por el mapa puede realizarse por diversos criterios: (i) comparando el inventario de la clasificación con el obtenido con otras fuentes convencionales; (ii) estudiando la fiabilidad obtenida al clasificar las áreas de entrenamiento y, (iii) seleccionando unas áreas de verificación para las que se cuenta con la cubierta realmente presente en el suelo (Chuvieco, 1996).

Análisis de la dinámica urbana

Existen diversos métodos para analizar los cambios ocurridos en un área en diferentes períodos. Entre ellos destacan: las composiciones multitemporales, diferencias entre imágenes, cocientes multitemporales, componentes principales, regresión, vectores multitemporales y el análisis multitemporal de imágenes categorizadas (Chuvieco, 1996). En este

trabajo sólo se describirá el de comparación entre imágenes clasificadas individualmente, ya que en un trabajo de investigación previo (Molina, 1995), se analizaron los cambios ocurridos en la ocupación del suelo para la ciudad de Maracaibo, utilizando imágenes MSS y TM a través de cinco métodos utilizados con frecuencia en la detección de cambios en zonas urbanas. Allí se llegó a la conclusión que el método más efectivo, en virtud de los niveles de precisión obtenidos y de la facilidad para analizar los resultados, era la comparación de imágenes clasificadas independientemente.

Comparación entre clasificaciones individuales

Este método consiste en realizar una clasificación de cada imagen por separado; el método utilizado puede ser supervisado o no supervisado, se debe cuidar, eso sí, en cada caso de mantener la misma leyenda temática, con el propósito de que puedan compararse posteriormente. A continuación, se genera una tabla multitemporal de cambios, en donde se muestra la dinámica producida entre las dos fechas. En la diagonal de esa tabla aparecen los píxeles estables (que cuentan con la misma categoría en las dos fechas), mientras los cambios se detectan en el resto de las celdillas. El gran interés de esta tabla es ofrecernos las transiciones que se han producido. En otras palabras, no sólo obtenemos las zonas estables y dinámicas, sino la cobertura original y la actual, lo que nos permite determinar las tendencias de cambio en la zona de estudio (Chuvienco, 1996).

Resultados

Corrección de las imágenes TM

En nuestro caso la corrección de las imágenes involucradas en este estudio (*TM 1986*, *TM 1991*) se abordó como se detalla a continuación.

En primer lugar, fue corregida la imagen TM de fecha enero de 1991 a partir de las hojas topográficas de la Cartografía Nacional Venezolana escala 1:25.000. Para ello, se compararon los dos documentos fuente con la finalidad de tomar puntos que fuesen claramente identificables tanto en la imagen como en los mapas de referencia. Cada punto identificado en la imagen, ofrece un valor de fila y columna, mientras que ese mismo punto identificado en el mapa, ofrece un valor de X e Y en coordenadas UTM.

Para la imagen de 1986 el procedimiento seguido para tomar los puntos de control fue el de identificar en esa imagen los mismos puntos tomados en la imagen de 1991, de manera que fuera posible utilizar los mismos puntos calculados en las hojas de Cartografía Nacional. Se estimó conveniente utilizar, como documento fuente para la corrección de la imagen de 1986, el mapa topográfico y no la imagen en virtud de no agregar los errores permitidos en la imagen de 1991 a la de 1986.

Los puntos identificados tanto para la imagen de 1991 como para la de 1986 (fila y columna) y los obtenidos en la cartografía (coordenadas UTM) se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Puntos de control

MAPA (Coordenadas UTM)	TM-1991 (X, Y)	TM-1986 (X, Y)
656525, 1136925	1063, 1371	1535,2635
651950, 1135875	882, 1415	1384, 2696
654450, 1133700	982, 1500	1480,2757
656400, 1124325	1059, 1876	1593, 3073
658500, 1126400	1144, 1794	1656, 2992
658075, 1124625	1125, 1866	1649, 3055
656525, 1130800	1063, 1619	1565, 2848
659500, 1130125	1183, 1646	1673,2856
659825, 1131600	1195, 1586	1677, 2804
652200, 1132025	890, 1140	1410, 2828
650975, 1137625	842, 1344	1340, 2638
648100, 1133700	727, 1501	1259, 2788
650150, 1134275	809, 1478	1327, 2758
643662, 1137300	548, 1356	1709, 2683

Una vez obtenidos los puntos de control, la siguiente fase del proceso de corrección consistió en calcular las ecuaciones de transformación, que permiten convertir las coordenadas de imagen a coordenadas de mapa; en este caso se optó por una ecuación de segundo grado, debido a los fuertes contrastes topográficos existentes en el área de estudio. Estas ecuaciones son funciones matemáticas que ponen en relación las coordenadas de la imagen con las del mapa, siendo posible a partir de las coordenadas columna y línea de cada píxel calcular las coordenadas UTM: X e Y, en la imagen de salida.

Habida cuenta que las deformaciones que presenta la imagen obedecen a numerosas causas, no siempre bien determinadas muchas de ellas, las desviaciones de los puntos de control no siguen

una ley matemática simple. Por ello, la generalidad de los casos exige encontrar unas funciones de ajuste que no proporcionan una solución exacta para la corrección de todas esas posiciones, sino que a lo sumo definen lo mejor posible los cambios de posición. La función encontrada será aquella que satisfaga al máximo las posiciones de todos los puntos de control, estableciendo un compromiso entre ellos, de tal modo que los cuadrados de las desviaciones sean mínimos. El indicador más utilizado para medir la bondad del ajuste es el error medio cuadrático (EMC).

Para el caso de la imagen TM 1991 el EMC obtenido fue de:

$$X= 0,60992 \quad Y= 0,62059$$

EMC total 0,87013 píxel, que equivale a 26,10 metros.

Para la imagen TM 1986, el EMC obtenido fue de:

$$X = 0,60634 \quad Y = 0,70666$$

EMC total = 0,93114 píxel, que equivale a 27,93 metros.

Para cada una de las dos imágenes el EMC obtenido se consideró adecuado a los propósitos de este trabajo, por cuanto en ambos casos el mismo está por debajo del tamaño de un píxel (30 metros), que suele considerarse el umbral de error máximo permitido. Por tal razón, se procedió a la siguiente fase, que consiste en la transferencia de los ND a su nueva posición.

Las funciones de transformación antes calculadas, permiten traducir coordenadas del mapa a la imagen. Ahora bien, si pretende crearse una imagen que corresponda adecuadamente con esas coordenadas, resulta necesario trasladar, de alguna forma, los ND de esa imagen original a la nueva posición.

Las funciones de ajuste permiten calcular la posición correcta de cada píxel, pero no originan una nueva imagen, puesto que suponen sólo un traslado de coordenadas y no de ND. Dicho de otro modo, con estas funciones de transformación puede crearse una nueva matriz, correctamente posicionada, pero vacía. El llenado de esta matriz es, precisamente, el objetivo de la última fase de la corrección geométrica (Chuvieco, 1996).

Existen varios métodos para realizar este traslado (vecino más próximo, interpolación bilineal y convolución cúbica). En este caso, fue utilizado el del vecino más próximo. *“En este método se sitúa en cada celdilla de la imagen corregida*

el ND del píxel más cercano en la imagen original. Ésta es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los ND originales” (Chuvieco, 1996: 272).

La última fase dentro del proceso de corrección consiste en verificar los resultados. En este caso, para cada una de estas imágenes fue realizado un proceso de verificación de la corrección, que fue llevada a cabo tomando las coordenadas de 4 puntos visibles, tanto en las imágenes como en las hojas de Cartografía Nacional a escala 1:25.000, pero diferentes a los tomados como puntos de control. Se compararon ambos resultados, obteniéndose que la desviación entre los puntos de la imagen y los puntos del mapa fue, en todos los casos de las imágenes TM, menor a 30 metros (cuadro 2). Como el error no excede el mínimo establecido de un píxel, estos resultados se consideraron aceptables.

A partir de las imágenes corregidas se crearon subimágenes que, para cada uno de los casos, contienen y exceden el área urbana de Maracay. Las imágenes TM quedaron definidas por las coordenadas superior izquierda 663733,1143256 e inferior derecha 664838,1123141 que corresponden a un tamaño de 670 filas y 703 columnas, ocupando un área de 41.727,6 has.

Clasificación supervisada de las imágenes

Para el caso de la clasificación supervisada de las dos imágenes TM, los campos de entrenamiento utilizados fueron obtenidos por digitalización directa en

Cuadro 2. Puntos de verificación de las imágenes TM

Puntos	Mapa	TM 1991	Desviación (mts)	TM 1986	Desviación (mts)
1	655850	655824	26	655822	28
	1128875	1128870	5	1128871	4
2	657900	657929	29	657923	23
	1127800	1127815	15	1127810	10
3	662349	662350	1	662351	2
	1131470	1131475	5	1131473	3
4	6656462	666445	17	656443	19
	1131270	1131250	20	1131247	23

pantalla. En primer lugar fue necesario evaluar visualmente ambas imágenes para definir las áreas que se mantuvieron relativamente constantes entre las dos fechas. Sobre estas áreas fueron tomados los campos de entrenamiento. Para esto, se visualizaron las imágenes TM en una composición coloreada de tres bandas. Se utilizaron las bandas 4(IRC), 5 (IRM) y 3 (R), las cuales permiten diferenciar claramente muchos de los tipos de cobertura presentes.

El trabajo de campo realizado permitió la familiarización con la ciudad y comparar la respuesta de los diferentes elementos de la ciudad en una imagen TM ampliada. Por esta razón, la definición de campos entrenamiento fue relativamente sencilla. Para los casos en que se tenía dudas en la identificación, se usó la cobertura de la ocupación del suelo para Maracay de fecha 1987 incluida en una base de datos.

Evaluación de campos de entrenamiento con las bandas originales

En principio se definieron las siguientes 14 clases de entrenamiento:

1. Viviendas unifamiliares ajardinadas
2. Viviendas unifamiliares no ajardinadas
3. Viviendas unifamiliares no consolidadas (marginales)
4. Viviendas unifamiliares con huerto
5. Viviendas mixtas (unifamiliares heterogéneas y multifamiliares)
6. Vialidad
7. Zonas comerciales y residenciales
8. Herbazales
9. Bosques
10. Espacios verdes intraurbanos
11. Galpones industriales
12. Agua
13. Espacios descubiertos
14. Agrícola

Un análisis posterior de estas clases llevó a la conclusión de que eran demasiados campos de entrenamiento, había confusión, y las características espectrales de algunos de ellos eran muy parecidas, lo cual dio lugar a fuertes solapes entre categorías espectralmente similares. Especial confusión se observó entre las categorías viviendas unifamiliares ajardinadas con las viviendas unifamiliares con huerto, y entre viviendas unifamiliares no consolidadas con los galpones industriales. Por este motivo, se procedió a redefinir las categorías, fusionando algunas aunque se perdiera detalle en la información resultante de las imágenes clasificadas. Una vez realizadas las fusiones quedaron las siguientes categorías:

1. Urbano ajardinado (viviendas unifamiliares o multifamiliares con jardines) (U.a).
2. Urbano no ajardinado (viviendas unifamiliares o multifamiliares con ausencia de jardines) (U.n.a).
3. Urbano no consolidado (viviendas marginales “*ranchos*”, generalmente no ajardinados) (U.n.c).
4. Parques y jardines (espacios verdes destinados a la recreación y esparcimiento) (Par).
5. Pastizales (vegetación herbácea no sometida a riego) (Pas).
6. Bosques (vegetación arbórea y matorrales) (Bos).
7. Agrícola (campos de cultivos vegetales) (Agr).
8. Descubierta (suelo desprovisto de cobertura) (Des).
9. Agua (Agu).

A estas clases de entrenamiento se les calcularon, en primer lugar, sus estadísticas elementales sobre las bandas originales. El resultado permitió realizar un análisis de separabilidad para analizar el grado de confusión presente entre estas clases. Para ello fue utilizada la Divergencia Transformada. Esta medida fluctúa entre 0 y 2. Un valor de 0 indica que existe una confusión absoluta entre las clases comparadas y un valor 2 una completa separabilidad. Los cuadros 3 y 4 muestran la matriz de separabilidad obtenida para cada imagen estudiada.

Tal y como se observa, los resultados de aplicar la Divergencia Transformada revelan que existe una muy buena separabilidad entre las clases definidas. Sin embargo, existe un valor crítico entre las categorías urbano no ajardinado y urbano no consolidado. Este resultado era, en parte, esperado debido a la similitud espectral de algunos elementos existentes en las dos categorías. A pesar de ello, se consideraron los resultados aceptables y se procedió a la siguiente fase del proceso de clasificación.

Fase de asignación

Clasificación supervisada con las bandas originales TM

El proceso de clasificación, utilizando el clasificador de máxima probabilidad, fue llevado a cabo sobre las 6 bandas originales TM (se excluye la térmica), tanto para 1986 como para 1991. La clasificación se realizó tomando en cuenta los campos de entrenamiento definidos a partir de las estadísticas de las bandas originales

Cuadro 3. Matriz de separabilidad de campos de entrenamiento. TM 1991

	U.a	U.n.a	U.n.c	Par	Pas	Bos	Agr	Des	Agu
U.a	-								
U.n.a	1,59	-							
U.n.c	1,61,	0,63	-						
Par	1,60	1,89	1,83	-					
Pas	1,97	1,99	1,99	1,84	-				
Bos	2,00	2,00	2,00	2,00	1,99	-			
Agr	1,49	1,99	1,99	1,74	1,99	1,98	-		
Des	1,99	1,96	1,81	1,86	1,99	2,00	2,00	-	
Agu	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	-

Separabilidad promedio = 1,88 Mínima separabilidad = 0,63 Máxima separabilidad = 2,00

Cuadro 4. Matriz de separabilidad de campos de entrenamiento. TM 1986

	U.a	U.n.a	U.n.c	Par	Pas	Bos	Agr	Des	Agu
U.a	-								
U.n.a	1,47	-							
U.n.c	1,44	0,64	-						
Par	1,63	1,92	1,87	-					
Pas	1,84	1,99	1,99	1,60	-				
Bos	1,99	2,00	2,00	1,99	1,94	-			
Agr	1,18	1,97	1,94	1,65	1,90	1,99	-		
Des	1,91	1,91	1,69	1,56	1,93	2,00	1,91	-	
Agu	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	-

Separabilidad promedio = 1,83 Mínima separabilidad = 0,64 Máxima separabilidad = 2,00

y evaluados en la fase de entrenamiento. Los resultados para las imágenes clasificadas, tanto para 1991 como para 1986, se muestran en el cuadro 5.

Al visualizar los resultados de la clasificación y asignarle a cada categoría un color, se observó en la pantalla de visualización un comportamiento coherente

en la asignación de las diferentes categorías; sin embargo, se observaron en ellas píxeles aislados de agrupación impropio, efecto denominado comúnmente “*de sal y pimienta*”. Para suavizar este efecto se aplicó sobre cada imagen clasificada un filtro modal con una ventana de 3*3 píxeles. Los resultados de las

Cuadro 5. Datos de la clasificación con bandas originales

CATEGORÍAS	Código	TM 1991		TM 1986	
		Píxeles	% imagen	Píxeles	% imagen
Urbano ajardinado	1	48487	10,32	50084	10,66
Urbano no ajardinado	2	38426	8,18	30371	6,47
Urbano no consolidado	3	29331	6,24	24398	5,19
Parques	4	58388	12,43	47058	10,02
Pastizales	5	103762	22,09	89112	18,97
Bosques	6	34825	7,41	43014	9,16
Agrícola	7	47346	10,08	69841	14,87
Descubierto	8	32641	6,95	32378	6,89
Agua	9	76584	16,30	83498	17,77
Total		469754	100	469754	100

clasificaciones mejoraron considerablemente al aplicarles el filtro.

Para el caso de este estudio, la validación de los resultados se realizó con el tercer método propuesto en la metodología; es decir, seleccionando y analizando unas áreas de verificación.

Para comprobar los resultados obtenidos en las clasificaciones se procedió a delimitar unos nuevos polígonos, distintos a los definidos en la fase de entrenamiento, pero comunes entre ambas imágenes, de manera que sirviesen para verificar los resultados de ambas fechas. Para verificar cada categoría fueron tomados, al menos, dos polígonos.

Una vez definidos los polígonos de las categorías de verificación, se procedió a crear dentro del archivo de cada imagen una banda vacía, de dimensiones idénticas a las imágenes clasificadas y con un valor de fondo de 0. Sobre esta banda fueron rasterizados los polígonos de veri-

ficación. Posteriormente se calculó una matriz de confusión utilizando la banda que contiene los polígonos de verificación y las imágenes clasificadas y filtradas. De esta manera fue posible evaluar el grado de coincidencia existente entre las clases asignadas en la clasificación y los polígonos de verificación. Este proceso, además, incluye un análisis de las relaciones múltiples entre categorías, incluyendo una de las medidas del análisis categórico multivariante, que permite el estudio global de las matrices de confusión. En este caso, se emplea el estadístico Kappa (K) que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar. En definitiva, el estadístico intenta delimitar el grado de ajuste debido sólo a la clasificación, prescindiendo de aquel causado por factores aleatorios. La estimación de K se obtiene a partir de la siguiente fórmula (Hudson y Ramm, 1987).

$$K = \frac{N \sum_{i=1,n} X_{ij} - \sum_{i=j,n} X_{ii} + X_{+i}}{N^2 - \sum_{i=j,n} X_{ii} + X_{+i}}$$

En donde X_{ij} indica el acuerdo observado, y el producto de los marginales ($X_{i\cdot}$, $X_{\cdot j}$) el acuerdo esperado en cada categoría i . Este último nos sirve para calcular el ajuste entre mapa y realidad que puede deberse al azar. La estimación de K sirve para conocer el grado de significación de este estadístico, y por tanto, si el acuerdo observado se aleja o no significativamente del acuerdo esperado al azar. En definitiva el test pretende evaluar si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con una precisión significativamente mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria (Chuvieco, 1996).

La matriz de confusión obtenida para cada imagen clasificada se observa en los cuadros 6 y 7.

Al analizar las matrices correspondientes a cada clasificación se observa una buena separabilidad entre las clases. Sin embargo, aunque los porcentajes de precisión son altos, tanto el promedio como el global y el índice Kappa, existen algunas clases cuya confusión es alta. Para el caso de la imagen clasificada de 1991, las categorías urbana no consolidada, parques y pastizales se presentan subestimadas (todas están en torno al 50% de precisión). Estas categorías presentan confusión con las categorías descubiertas, las otras categorías urbanas y entre ellas. La imagen del 86, por su parte, dio resultados de precisión, tanto promedio como global y del índice Kappa, inferiores a la

imagen del 91. En este caso, los mayores problemas están dados entre las categorías urbano no consolidado, parques y agrícola que no superan el valor de 50% de coincidencias. Las categorías urbanas tienden a confundirse entre ellas, mientras las no urbanas (exceptuando el agua) se confunden, principalmente con categorías de su misma naturaleza (Figuras 3 y 4).

En definitiva, las categorías de ocupación están definidas para cada fecha, tomando estos últimos resultados, como se muestra en el cuadro 8.

Para las dos fechas analizadas se observa un claro ajuste en la distribución de las diferentes categorías a la realidad (Figura 5):

- la categoría urbano ajardinado se localiza principalmente en los dos ramales norte (Vía El Limón y las Delicias) y en la parte sureste de la imagen, que se corresponde con la localidad de Palo Negro. En unos y otros sitios, aunque se muestre un comportamiento similar, las categorías definidas no son de la misma naturaleza. En El Limón y Las Delicias la vegetación que rodea a las viviendas se corresponde, en general, con jardines bajo riego, mientras que en Palo Negro se tiene una mezcla de vegetación típica de jardines con cultivos de huerta familiar (tanto frutales como hortícolas). Para este caso concreto no fue posible separar ambos tipos de vegetación, razón por la cual el tratamiento se realizó de forma integrada.

Cuadro 6. Matriz de confusión TM-1991 a partir de las bandas originales (porcentaje)

Categoría	Píxeles	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1085	85,7	0,3	3,0	3,8	1,4	0,0	5,7	0,1	0,0
2	620	3,7	84,8	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0
3	561	56,1	5,3	56,7	18,2	18,2	0,0	0,0	13,5	0,0
4	228	6,6	39,0	0,0	44,3	0,0	0,0	0,0	10,1	0,0
5	539	0,0	3,0	0,0	21,0	54,4	0,0	0,0	21,7	0,0
6	587	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	98,8	0,2	0,0	0,0
7	819	3,5	0,5	0,0	8,2	0,6	0,0	86,7	0,0	0,0
8	590	0,8	0,0	18,0	11,4	0,2	0,0	0,5	69,2	0,0
9	460	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100

Precisión Promedio = 75,62% Precisión Global = 78,83% Índice Kappa = 0,758

Cuadro 7. Matriz de confusión TM-1986 a partir de las bandas originales (porcentaje)

Categoría	Píxeles	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1085	64,2	5,4	9,4	6,5	1,5	2,4	9,9	0,6	0,0
2	620	11,1	69,7	15,2	2,3	0,0	0,0	0,2	1,5	0,0
3	561	0,9	28,3	26,7	26,0	0,0	0,0	2,5	5,5	0,0
4	228	7,9	31,5	5,7	45,2	5,3	0,0	3,1	1,3	0,0
5	539	0,7	0,0	0,4	1,5	92,0	3,5	1,9	0,0	0,0
6	587	8,7	3,5	0,0	1,7	9,7	69,5	6,6	0,2	0,0
7	819	12,6	0,0	1,2	12,9	16,1	4,3	47,0	5,9	0,0
8	590	1,2	0,2	3,2	2,7	1,5	0,0	21,4	69,8	0,0
9	464	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100

Precisión Promedio = 64,91% Precisión Global = 64,57% Índice Kappa = 0,597

- La categoría urbano no ajardinado se localiza, principalmente, en la zona centro y en su periferia. El hecho de que esta categoría se concentre en esta zona obedece a la alta demanda de suelo urbano, al alto precio del suelo y al nivel de renta de las personas que allí viven. Esto condiciona la

tipología residencial, puesto que al ser muy caro el suelo y al existir una fuerte demanda del mismo, las áreas ajardinadas son pocas y las que existen presentan una clara tendencia a disminuir. En esta zona se encuentra la mayor cantidad de viviendas multifamiliares. Estas viviendas, aunque

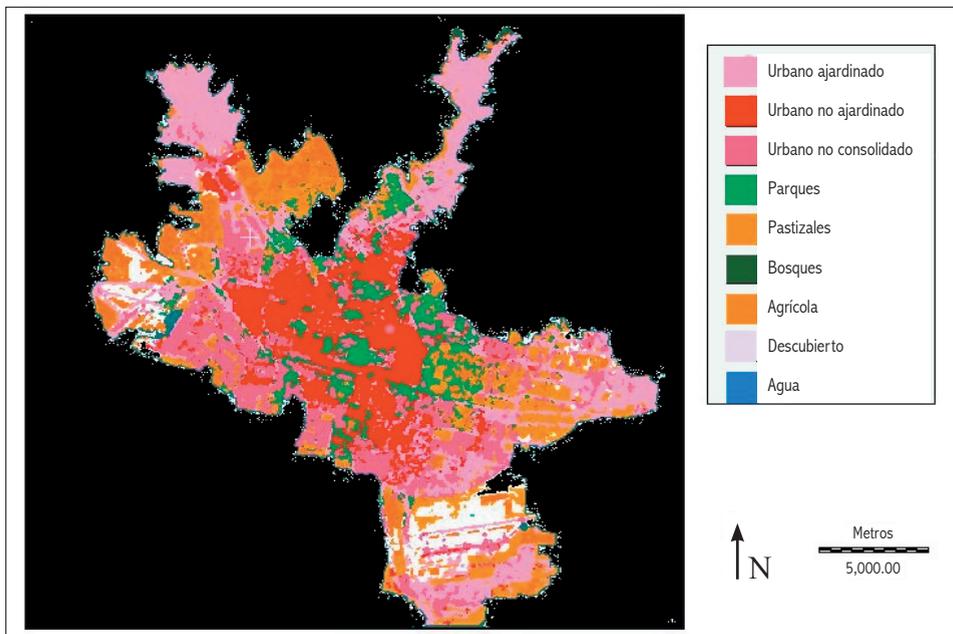


Figura 3. Imagen de Maracay, 1986

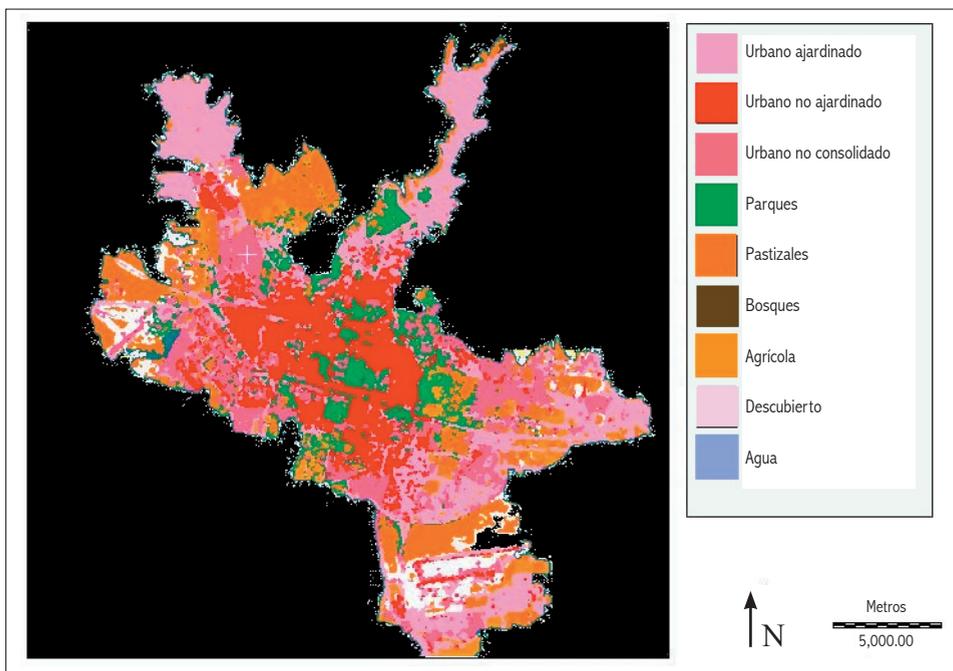


Figura 4. Imagen de Maracay, 1991

Cuadro 8. Imágenes clasificadas finales

Categorías	Cód.	TM 1986		TM 1991	
		Hectáreas	% de imagen	Hectáreas	% de imagen
Urbano ajardinado	1	4057,1	9,71	4934,6	11,81
Urbano no ajardinado	2	2164,4	5,18	2548,8	6,10
Urbano no consolidado	3	2561,3	6,13	2954,2	7,07
Parques	4	1546	3,70	1688	4,04
Pastizal	5	12740,1	30,51	14503	34,71
Bosques	6	3994,3	9,56	3489	8,35
Agrícola	7	6593,4	15,78	3902,9	9,34
Descubierto	8	1115,6	2,67	919,2	2,20
Agua	9	7011,3	16,78	6839	16,37
Total		41783,5	100	41783,5	100

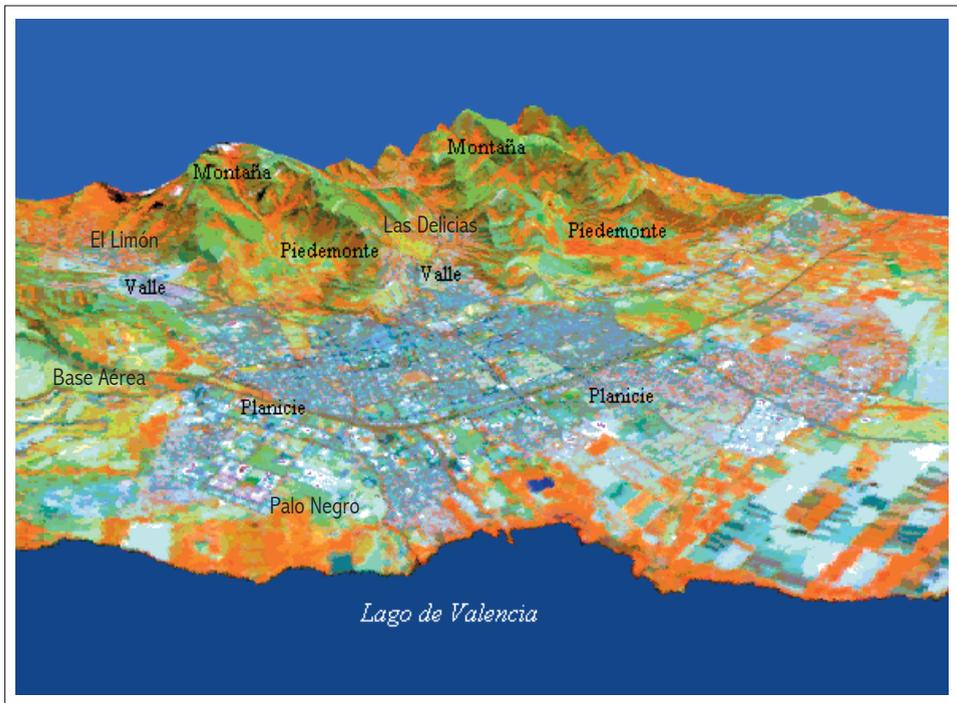


Figura 5. Ciudad de Maracay

no son la tipología residencial más abundante en Maracay, en la actualidad tienden a sustituir a las viviendas unifamiliares, sobre todo en la zona centro. Es importante destacar aquí que en el pasado esta zona tenía un predominio de áreas ajardinadas, hecho que le confirió a esta ciudad el título de ciudad jardín.

- La categoría urbano no consolidado que se corresponde con las áreas de creación reciente, se localizan principalmente en las áreas aledañas a los parques industriales, en los alrededores de Palo Negro, en el extremo este de la ciudad y, ocupando menor superficie, en algunos sectores periféricos al centro de la ciudad. Es importante aclarar que esta categoría incluye las cubiertas industriales, dado que la respuesta espectral de ambas categorías es muy parecida debido a la semejanza de los materiales utilizados en la construcción, tanto de las viviendas como de los galpones industriales, de manera que fue imposible su separación.
- La categoría parques incluye todas las áreas verdes intraurbanas, destacando tanto plazas como jardines públicos. Éstos se localizan, casi en su mayoría, en la zona centro y centro-oeste, así como en el sector Las Delicias. Destaca la inexistencia casi absoluta de áreas verdes en el sector centro-este y El Limón.
- La categoría pastizal, muy bien definida en ambas clasificaciones, se localiza fuera de la ciudad y concretamente al norte, noreste y noroeste de

la imagen. Esta categoría se corresponde con extensas áreas de gramíneas y en algunos puntos una mezcla de gramíneas con matorral bajo.

- Los bosques se concentran en su casi totalidad dentro del parque Nacional Henri Pittier, localizado en las áreas de más alta pendiente, al norte de la imagen. Debido a las restricciones que actualmente operan en esta zona, se observa en los datos obtenidos un aumento significativo de la categoría entre ambas fechas, lo cual coincide con los planteamientos apuntados por varios autores en la revisión bibliográfica realizada.
- Los suelos descubiertos en ambas imágenes muestran una localización muy parecida, aunque con ligeras variaciones. En general, tienden a concentrarse dentro y en los alrededores de las bases aéreas Mariscal de Sucre y Escuela de Aviación, la primera al sudeste y la segunda en el sector sudoeste de la imagen.
- La última categoría, agua, corresponde enteramente al sector del lago de Valencia presente en la imagen.

Dinámica de uso

Partiendo de las imágenes ya clasificadas y evaluadas en el epígrafe anterior, para la determinación de la dinámica de uso se procedió de la siguiente manera:

- a. Se procedió al cálculo de las variaciones en la superficie ocupada por cada categoría. Este procedimiento permite tener una primera aproximación de las áreas que han cambiado entre las dos fechas analizadas. La idea

parte de obtener una diferencia con el porcentaje de área contenido en cada clase, para cada imagen clasificada independientemente. El cuadro 9 muestra el porcentaje de área para cada clase y su respectiva diferencia (91-86).

Este procedimiento permite observar marcadas diferencias entre las dos imágenes analizadas. Destaca el hecho de que en las primeras cinco categorías (tres urbanas, parques y pastizal) la proporción de área asignada a unas y otras ha aumentado entre los dos períodos, mientras que las cuatro restantes (bosque, agrícola, descubierto y agua) perdieron parte del área ocupada por ellas en el mismo período.

Las categorías urbano ajardinado y urbano no ajardinado experimentan un crecimiento entre las dos fechas,

887 has. y 392 has, respectivamente. Este crecimiento es muy marcado hacia los municipios Santa Rita y Samán de Güere y en la localidad de Palo Negro, al este y sur del área de estudio. Esta expansión era de esperar puesto que, según el Plan de Desarrollo Urbano de 1990, la construcción de nuevas áreas residenciales se ha visto disminuida en el municipio capital por falta de espacios edificables en estas zonas. Por otra parte, la presión gubernamental para que se cumplan las normativas que regulan el uso del espacio en el Parque Nacional Henri Pittier, dada la incompatibilidad entre el uso residencial y la figura de Parque Nacional, ha surtido efecto. Por esta razón no se observa una expansión residencial en el sentido norte de la ciudad. Las zonas que podrían optar al desarrollo urbano

Cuadro 9. Diferencias TM 1991 y TM 1986

CATEGORÍAS	TM 1991 (has)	TM-1986 (has.)	Diferencia en has. (1991-1986)	Diferencia % (1991-1986)
Urbano ajardinado	4934,6	4057,1	887	2,1
Urbano no ajardinado	2548,8	2164,4	384,4	0,92
Urbano no consolidado	2954,2	2561,3	392,9	0,94
Parques	1688	1546	142	0,34
Pastizal	14503	12740,1	1762,9	4,2
Bosque	3489	3994,3	-505,3	-1,21
Agrícola	3902,9	6593,4	-2690,5	-6,44
Descubierto	919,2	1115,6	-196,4	-0,47
Agua	6839	7011,3	-172,5	-0,41
	41783,5	41783,5		

en este sector de la ciudad, han sido asignadas a otras actividades, tal es el caso de las educativas, ejemplo la Universidad Central de Venezuela (Núcleo Maracay), que absorbe franjas muy amplias de terreno en sus actividades agropecuarias. La presencia de áreas militares en las cercanías del casco central también es un factor que limita al crecimiento urbano en esta zona. Por último, los terrenos de propiedad privada destinados a usos distintos de los residenciales. Esto ha conllevado al crecimiento de la ciudad fuera de su perímetro urbano y en pueblos aledaños, razón por la cual, en la actualidad, se conformará más allá de los límites el Área Metropolitana de Maracay.

En el caso de la categoría urbano no consolidado, se registra un aumento de 392, 9 has., lo que se explica por la aparición de nuevos barrios marginales en la zona sur, cercana a las áreas industriales y en el sector oeste, vía Turmero. Estos nuevos barrios o barriadas están construidos sin ningún tipo de planificación y en terrenos que generalmente no reúnen las condiciones de habitabilidad necesarias para la edificación, y que con frecuencia son invadidos.

La categoría parques aumentó 142 has. en el período analizado. Esto puede deberse a la creación de nuevos barrios y urbanizaciones que cuentan con este servicio.

La categoría pastizal registra el mayor aumento entre las categorías analizadas. Así, 1762,9 has. de esta categoría

han sido añadidas al espacio estudiado. El bosque presenta una disminución de 505,3 has.

La categoría agrícola es la que presenta el mayor decremento entre las dos fechas; 2690,5 has. de esta cobertura han desaparecido en el período analizado. En este caso, la diferencia puede deberse por una parte a la pérdida real de superficie asignada a esta cobertura en 1986, a favor de la expansión de otras y, por otro lado, a los diferentes estadios de crecimiento de la vegetación entre una y otra fecha, o a cambios en el tipo de cultivos.

En las imágenes originales se observa que existe mayor cantidad de cultivos vigorosos en el año 1986, aunque es evidente que áreas de cultivos poco vigorosos localizados al este de Palo Negro fueron asignadas a la categoría pastizal en 1991.

Las categorías descubierto y agua presentan un ligero decremento en la superficie asignada en el período analizado.

El procedimiento seguido en el punto anterior (a) permite detectar de manera muy aproximada los cambios ocurridos; sin embargo, no se aprecia con precisión la evolución exacta de dichos cambios.

- b. Una forma de conocer la dirección de los cambios ocurridos es a través del cálculo de una matriz de cambios o matriz de coincidencias. En esta matriz la primera imagen de entrada (en nuestro caso la imagen clasificada de 1986) especifica las columnas, mientras la segunda especifica las filas. El

archivo de salida contiene valores de clase que indican cómo y cuántos valores se superponen entre los datos originales; es decir, permite conocer el cambio ocurrido y su dirección.

No obstante, es importante aclarar que en las clasificaciones se detectaron algunas áreas de asignación errónea, principalmente en los alrededores de la ciudad, donde áreas de cobertura nubosa y algunos suelos descubiertos fueron asignados como urbanos; se pensó que era necesario aislar la información referida sólo a la ciudad, y sobre estas coberturas analizar la dinámica urbana. Esto es importante, dado que el objetivo final de los procesos aplicados anteriormente era obtener las áreas que habían cambiado y, según fuera el cambio registrado, se obtendría las posibles tendencias de crecimiento de la ciudad.

La comparación anterior (sobre toda la imagen clasificada) permite tener una idea general del comportamiento de la dinámica urbana y de los otros elementos presentes en los alrededores de Maracay. Sin embargo, la matriz de cambios que se generará incluyendo sólo la ciudad de Maracay y Palo Negro permitirá tener una valoración más concreta de los cambios ocurridos en las categorías propiamente urbanas.

Como se observa en los datos contenidos en la tabla de diferencias entre las dos fechas (cuadro 10), existen ciertas diferencias con respecto a los resultados alcanzados con el análisis de las imágenes que contienen Maracay y sus

Cuadro 10. Diferencias 1991-1986

Categorías	Diferencia 1991 – 1986 (has)
Urbano ajardinado	292,68
Urbano no ajardinado	187,83
Urbano no consolidado	-258,84
Parques	691,66
Pastizales	812,43
Bosques	-4,95
Agrícola	-981,45
Descubierto	-118,17
Agua	0,81

alrededores. Así, destaca la categoría urbano no consolidado que experimenta un decrecimiento en el período analizado. Sin embargo, aunque este comportamiento llama la atención, también es cierto que gran parte de las nuevas áreas de expansión urbana tienden a localizarse más allá del perímetro establecido como área de estudio. El Plan de Desarrollo Urbano para 1990 comenta a este respecto la importancia que están adquiriendo centros poblados como Santa Cruz y Turmero, al absorber parte de la población que labora en Maracay. También ocurre que parte de esta cobertura, presente en 1986, ha evolucionado a otras categorías como la urbano ajardinado o urbano no ajardinado, las cuales sí experimentan un incremento en el período analizado. Las demás categorías mantienen el mismo sentido en ambas comparaciones. El cuadro 11 muestra la matriz multitemporal de coincidencias comentada, expresada en porcentajes.

Cuadro 11. Matriz multitemporal de coincidencias en porcentajes

					1986					
		U. a.	U.n.a.	U.n.c.	Parq.	Past.	Bosq.	Agríc.	Des.	Agu.
	U. a.	78	3	9	3	1	0	2	3	0
	U. n.a	10	81	5	3	0	0	0	1	0
1991	U. n.c.	8	14	62	9	4	0	2	1	0
	Parq.s	1	2	11	62	15	0	3	6	0
	Past.	0	0	0	7	67	0	16	10	0
	Bosq.	0	0	0	0	67	31	2	0	0
	Agríc.	0	0	1	7	51	0	23	17	0
	Des.	0	2	7	2	31	0	11	47	0
	Agu.	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Un análisis de la matriz de coincidencias revela que la dinámica en la ocupación del suelo en el período analizado es alta. Esto se observa claramente en la diagonal de la matriz, al ver que los porcentajes de coincidencias entre algunas categorías son bajos. Este comportamiento es más acusado en las categorías bosque, agrícola y descubierto, lo cual confirma lo que actualmente ocurre en la ciudad: sustitución de terrenos con tradición agrícola o con vegetación natural, especialmente los localizados al sur y oeste de la ciudad, evolucionando a pastizales o descubierto para posteriormente ser ofertados como terrenos urbanizables. Otros espacios, que presentaban en el pasado estas coberturas, ya han sido incorporados a actividades netamente urbanas. Para el caso de las categorías residenciales se tienen unos resultados que se aproximan a la realidad; sin embargo, la matriz de cambios revela aspectos incongruentes en la dinámica

de cambio, tal es el caso de áreas urbanas ajardinadas que evolucionan a urbano no consolidado. Se aceptan estos casos como errores en la asignación de los píxeles a determinadas clases, derivado de la misma complejidad urbana y del algoritmo de clasificación utilizado.

- Para la categoría urbano ajardinado existe un 78 % de coincidencia entre las dos fechas; es decir, que este porcentaje de área se mantiene relativamente invariable. Del 27% restante, un 9% era, en 1986, urbano no consolidado, y 3% urbano no ajardinado. El restante 9% pertenecía, en 1986, a las categorías vegetación, bien fuera natural (1% pastizal, 3% parques y jardines), o agrícola (2%) y un 3% a suelos descubiertos.
- Para la categoría urbano no ajardinado se observa que un 81% de cobertura permanece estable entre las dos fechas. Un 5% era en 1986 urbano no

consolidado y un 10% urbano ajardinado. El restante 4% pertenecía a parques (3%) y descubierto (1%).

- La categoría urbano no consolidado presenta un 62% de estabilidad entre las dos fechas. Para 1986, parte del espacio que en 1991 ocupa esta categoría estaba conformado por un 8% de urbano ajardinado y 14% urbano no ajardinado, un 9% eran parques, 4% pastizales, 2% áreas agrícolas y 1% descubierto.
- Para el caso de la categoría parques, existen entre las dos fechas un 60% de coincidencias. El restante porcentaje de esta categoría estaba ocupado, en 1986, por las categorías: urbano ajardinado (1%), urbano no ajardinado (2%), urbano no consolidado (11%), pastizal (15%), agrícola (3%) y descubierto (6%).
- La categoría pastizal presenta un 67% de coincidencias entre ambas fechas. El 33% restante estaba ocupado, en 1986, por las categorías: agrícola (16%), bosque (7%) y descubierto (10%).
- La categoría bosque revela, para el período analizado, un 31% de coincidencias. Un 67% de lo que es actualmente esta categoría era en 1986 pastizal y un 2% agrícola.
- La categoría agrícola presenta entre ambos años el más bajo porcentaje de coincidencia (23%). Los resultados de la matriz revelan que un 51% de lo que para el 91 es agrícola, en el 86 era pastizal. Un 7% eran parques y un 17% suelos descubiertos.
- La categoría descubierto también presenta un porcentaje muy bajo

de coincidencia entre ambas fechas (47%). Para 1986, un 31% del espacio ocupado en 1991 por esta categoría, estaba ocupado por pastizales, 11% por la categoría agrícola, 2% por la categoría urbano no ajardinado y 7% por la categoría urbano no consolidado y un 2% por parques.

A partir de la información obtenida fue posible obtener una imagen (Figura 6) que muestra las áreas que se han mantenido estables y las dinámicas.

En la figura anterior es posible observar como las áreas de mayor dinamismo se localizan principalmente en los extremos este, oeste y sur de la imagen, quedando las áreas que presentan estabilidad entre las dos fechas analizadas localizadas al norte y centro de la ciudad.

La imagen producto de este proceso está distribuida en un rango de valores que va de 0 a 81. Este rango representa la cantidad de posibles cruces entre clases provenientes de una matriz entre pares de 9*9 categorías, donde los valores 1, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71 y 81 representan las áreas estables y los demás las áreas que han cambiado entre las dos fechas analizadas.

Es válido suponer que haya habido cambios en las categorías estables, pero que no sean identificables pues no suponen grandes transformaciones morfológicas, sino transformaciones entre categorías urbanas similares o que ocupan un mismo espacio (residencial-comercial), que no fue posible separar en este análisis por la escala de trabajo y la fuente de extracción de información utilizada.

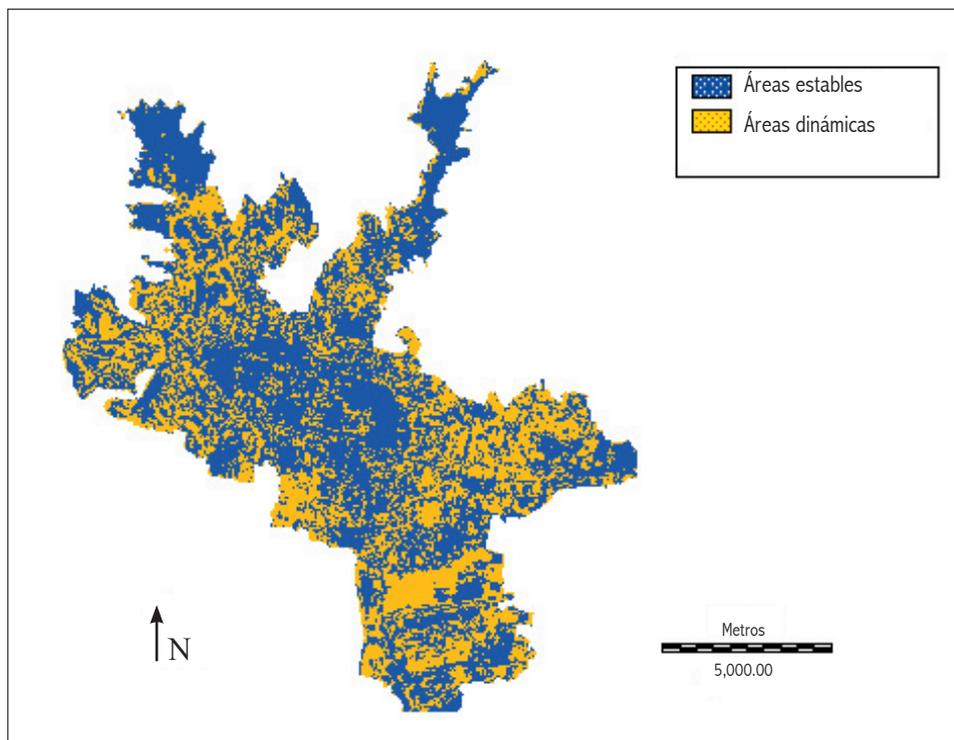


Figura 6. Maracay: Áreas dinámicas y estables entre 1986 y 1991

Conclusiones

Las técnicas de tratamiento digital utilizadas para la generación de información primaria permiten concluir lo siguiente:

- 1) El uso de imágenes de satélite y su tratamiento digital permite obtener imágenes categorizadas que representan, en este caso, la cobertura del suelo. Las imágenes resultantes pueden ser evaluadas para conocer los niveles de precisión obtenidos.
- 2) A partir de estos datos, considerados información primaria, y aplicando

técnicas estadísticas contenidas en los paquetes informáticos de tratamiento digital de imágenes es posible obtener la dinámica de la ocupación del suelo, evaluando los cambios acaecidos y la dirección de éstos.

Parece evidente que la ocupación del espacio en Maracay y sus alrededores estará totalmente condicionada por el crecimiento urbano-industrial y por los usos asociados no agrícolas. En este sentido, pueden realizarse algunos comentarios generales de interés que se desprenden de los diferentes aspectos analizados en este trabajo.

- a. Existe una clara tendencia a la concentración de la urbanización en las tierras planas. En este sentido, se piensa que mientras existan áreas disponibles en esta posición topográfica o en la ligeramente inclinada no habrá urbanización en el paisaje montañoso circundante. Hasta el presente este comportamiento ha estado condicionado por los elevados costes que supone el aterrazado de las áreas montañosas y a las facilidades de acondicionamiento con fines de edificación que presentan las áreas de origen aluvial.
 - b. Existen tendencias al establecimiento de urbanizaciones residenciales en pleno espacio rural, en algunos casos bastante alejados de las ciudades. Para el caso de Maracay, esta situación ha sido muy marcada en los espacios agrícolas que hace poco existían entre la ciudad y Palo Negro, lo que en la actualidad hace difícil separar espacialmente estas dos localidades. Más recientemente se observa la misma situación en terrenos agrícolas existentes al este de Maracay, vía Turmero.
 - c. Hasta la actualidad la táctica frecuentemente aplicada consiste en crear primero zonas industriales y edificar, posteriormente, las áreas residenciales requeridas por la población que en éstas laboran. Esta situación ha contribuido a que en la ciudad se den formas residenciales poco adecuadas, sin estudios previos de urbanismo que han contribuido a darle una configuración poco organizada a la ciudad.
 - d. El incremento poblacional conjugado con factores vinculados al costo de la tierra urbana y escasez de tierras urbanizables, está favoreciendo la expansión vertical, hecho de aparición relativamente reciente en la ciudad de Maracay, donde (hasta hace poco tiempo) el predominio era de un crecimiento horizontal, lo que favorecía las bajas densidades.
 - e. El mantenimiento de las extensas áreas militares y educativas experimentales que hasta el presente han funcionado como freno a la expansión urbana, hacen previsible un crecimiento de la ciudad muy marcado en sentido este, sur y sureste, donde estos usos no están presentes.
 - f. De acuerdo con las tendencias mostradas es de prever que de no ser aplicados planes de ordenamiento territorial adecuados, el eje Valencia-Maracay-Caracas, podría convertirse en una nebulosa urbana de una magnitud casi inimaginable, con las consecuentes secuelas de problemas derivados: deficiencia en la prestación de servicios básicos, deterioro ambiental, dificultad de enlace en las redes de transporte, etc. Por esta razón, es necesario crear incentivos económicos (para, por ejemplo, la instalación de industrias) y condiciones sociales atractivas en otras regiones, para que éstas sirvan de desahogo a la ya desbordada Región Central.
- Como comentario final se plantea que para la ciudad de Maracay, la inadecuación de un marco normativo que de-

limite los usos del suelo conforme a su potencial y necesidades, el acelerado crecimiento económico, la acumulación demográfica, el deterioro ambiental y la ya deficiente prestación en algunos servicios básicos, constituyen una serie de factores que hasta el momento actual han configurado física y socialmente la dinámica de crecimiento de la ciudad.

Referencias citadas

- ALWASHE, M. A.; JUTZ, S. and ZILGER, J. 1988. Integration of SPOT and Landsat thematic mapper data for land-use and urban mapping of At'taif, Saudi Arabia. *Int. Geoscience & Remote Sensing Symp.* 629. Edinburgh, UK.
- ANGLUGINO, R; MAZZOCATO, M.; TORRUSIO, S. y RIVERA, A. 1988. Utilización de imágenes Landsat en la determinación de la densidad poblacional en el conurbano Bonaerense. Centro de Análisis y Procesamiento Digital de imágenes Satelitarias (C.A.P.D.I.S.) Buenos Aires. *Int. Geoscience & Remote Sensing Symp.* (IGARSS'88). 629. Edinburgh, UK.
- BARALDI, A. and PARMIGGIANI, F. 1990. *Urban area classification by multispectral SPOT images.* **IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.** 4: 674-680.
- BARNESLEY, M. J. and SADLER, G. J. 1990. Use of population density data to improve classification accuracies in remotely sensed images of urban areas. *Paper present at the First European Conference on Geographical Information Systems.* Amsterdam, The Netherland.
- BARNESLEY, M. J.; SADLER, G. J. and SHEPHERD, J. W. 1989. Integrating remotely sensed images and digital map data in the context of urban planning. *Paper present at the 15th Annual Conference of Remote Sensing Society.* University of Bristol.
- BAUDOT, Y.; NADASDI, I. and DONNAY, J. 1988. Towards and urban land-use classification using textural and morphological criteria. *Int. Geoscience & Remote Sensing Symp.* 211-212. (IGARSS'88), Edinburgh, UK.
- BOTELLO, O. 1987. **Historia de Maracay.** Tomo I. Editorial Miranda. Maracay-Venezuela.
- BRUIJN, C. A. 1978. Delineation urban areas from Landsat images using digital processing: A comparison with grid-based photo-interpretation, *Proc. International Symposium on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endagered Environment.* 903-916. Freiburg.
- CARTER, P. and STOW, B. 1979. Clean-up of digital thematic maps of urban growth extracted from Landsat imagery. En: Allan Harris (Eds). **Remote Sensing and National Mapping.** 27-40. Reading.
- 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.** N° 7, pp 399-412.
- CHENG, F. and THIEL, K. H. 1995. *Delimiting the building heights in a city from the shadow in a panchromatic SPOT image-Part 1. Test of forty-two buildings.* **International Journal and Remote Sensing,** vol. 16 (3):409-415.

- CHARBONNEAU, D. and ROYER, A. 1993. *Analysis of different methods for monitoring the urbanization process*. **Geocar-to International**, 7 (1): 17-25.
- CHUNG, J. J. 1989. *Spot pixel analysis for urban ecosystem study in Salt Lake city, utah*. Unpublished Master Thesis. Department of Geography, University of Utah.
- CHUVIECO, E. 1985. *Aportaciones de la teledetección espacial a la cartografía de la ocupación del suelo*. **Anales de Geografía de la Universidad Complutense**. N° 5, pp. 29-48.
- CHUVIECO, E. 1996. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid, Rialp.
- CROSETTO, M; CASTILLO, M. and ARBIOL, R. 2003. *Urban subsidence monitoring using radar interferometry: Algorithms and validation*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 69 (7): 775-784.
- COWEN, D. J. and JENSEN, J. R. 1998. Extraction and modelling of urban attributes using remote sensing technology. En: D. Liverman, E. F Moran, R.R Rindufs, y P.C Stern, Editors. **People and Pixels: Linking Remote Sensing and social sciences**. 164-188. National Academy Press, Washington, D.C.
- DEPRATS, J. F. et DUTARTRE, P. 1995. **Teledetección et système d'information urbains**. Ed. Economic, collection villes, Coordiné par Françoise Dureau y Christiane Weber, Paris.
- DE SHERBININ, A; BALK, D; JAITEH, M; POZZI, F; GIRI, C. and WABBEBO, A. 2002. A CIECIN thematic guide to social science applications of remote sensing, URL. Columbia University, New York.
- DIETRICH, D.L. and LACHOWOSKY, H. M. 1978. Identification and delineation of urbanized areas using Landsat data. *Proc. 12th International Symposium on Remote Sensing and National Mapping*. 1083-1090. Reading.
- DUDLEY-MURPHY, E. 1990. *Monitoring urban growth change in México City with merged TM and SPOT data*. Unpublished PhD dissertation, Department of Geography, University of Utah.
- DUREAU, F; LORTIC, B; MICHEL, A y SOURIS, M. 1995. *Informática, teledetección y observación de las poblaciones urbanas. Una investigación vigente en Quito (Ecuador)*. ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération).
- DUREAU, F. et WEBER, CH. (coord). 1995. **Teledetección et systèmes d'information urbains** Ed. Economica, collection villes, Paris.
- FROSTER, B. 1980. *Urban residential ground over using Landsat digital data*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 46: 1547-1553.
- FROSTER, B. 1993. *Satellite remote sensing for land information in developing countries*. **Geocarto International**, 46: 545-555.
- FUNG, T. 1992. *Land use and land cover change detection with Landsat MSS and SPOT HRV data in Hong Kong*. **Geocar-to International**, 3.
- GASTELLU, J. P. 1990. *An assessment of SPOT XS and Landsat MSS data for digital classification of near urban land cover*. **International Journal and Remote Sensing**, vol. 11 (82) pp.225-235.

- GONG, P. and HOWARTH P.J. 1992. *Land use classification of SPOT HRV data using a cover frequency method*. **International Journal of remote Sensing**, Vol. 13 (8): 1459-1471.
- GOWARD, S. N. and WARTON, S. W. 1984. Use of de TM tasseled cap transform for interpretation of spectral contrast in an urban scenes. *Tenth International Symposium, Machine Processing Sensed Data*, West Lafayette (Indiana), Purdue University.
- HARRIS, R. 1987. **Satellite Remote Sensing: An introduction**. Routledge and Kegan Paul, London.
- HARRISON, A. R. and RICHARDS, T. R. 1988. Multispectral classification of urban land use using SPOT HRV data. *Int. Geoscience & Remote Sensing Symp.* (IGARSS'88). 205-206. Edinburgh, UK.
- HENDERSON, R. M. 1983. *A comparison of SAR brightness levels and urban land cover classes*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 48: 629- 643.
- HIXON, M; SCHOLZ, D; FUHS, N. and AKIYAMA, T. 1980. *Evaluation of several schemes for classification of remotely sensed data*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 46: 1547-1553.
- HUDSON, W. D. and RAMM, C. W. 1987. *Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 53: 421-422.
- IISAKA, J. and HEGEDUS, E. 1982. *Population estimation from Landsat imagery*. **Remote Sensing of Environment**, 12: 259-272.
- JENSEN, J.R 1979. *Spectral and textural features to classify elusive land cover at the urban fringe*. **The Professional Geographer**, vol. 31 (4): 629-643.
- JENSEN, J. R and TOLL, D. L. 1982. *Detecting residential land use development at the urban frange*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 48: 629-643.
- LIU, J. 1993. *Creating a method for optimal threshold determination for change detection in urban environment*. Unpublished Master Thesis, Department of Geography, University of Utah.
- LILLESAND, T. M. and KIEFER, R. W. 1994. **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley and Sons (3 edc), New York.
- LO, C. P. 1995. *Automated population and dwelling unit estimation from high resolution satellite images. A GIS approach*. **Int. Journal Remote Sensing**, 16 (1): 17-34.
- LO, C. P. and WELCH, R. 1977. *Chinese urban population estimates*. **Annals Association of American Geographers**, 67, pp 246- 253.
- LO, C. P. and YANG, X. 2002. *Drivers of land – use / land – cover changes and dynamic modeling for the Atlanta, George Metropolitan Area*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 68 (10): 1073-1082.
- LONGLEY, P. A. 2002. *Geographical information systems: Will developments in urban remote sensing and GIS lead to “beter” urban geography?* **Progress in Human Geography**, 26 (2): 231-239.
- MARTIN, L. R. G. 1989. *Accuracy Assessment of Landsat - Based Visual Change Detec-*

- tion Methods Applied to the Rural-Urban Fringe. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(2): 209-215.
- MARTIN, L. R. G. and HOWARTH, P. J. 1989. *Change Detection Accuracy Assessment Using SPOT Multispectral Imagery of the Rural - Urban Fringe. Remote Sensing of Environment*, 30 (1): 55-56.
- MATUTE, A. 1967. *Estado Aragua: Orígenes históricos geográficos*. Publicaciones de la Asamblea Legislativa del Estado Aragua. (3^{ra} Edición). Maracay - Venezuela.
- MILAZZO, U.D. and DEANGELIS, R. H. 1984. Application of simulated SPOT data to mapping land cover patterns and changes in an urban fringe environment. *SPOT simulation Symposium, American Society of Photogrammetric*. 177-186. Fall Church, Virginia.
- MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO (MINDUR). 1982. *Plan rector de desarrollo urbano, Área Metropolitana de Maracay. Diagnóstico*. Caracas-Venezuela.
- MOLINA, G. Z. 1995. *Detección de cambios para Maracaibo y sus alrededores (Venezuela) en el período 1973- 1986, a través de imágenes del satélite Landsat*. Trabajo de Investigación, Universidad de Alcalá de Henares (España), 150 Pág.
- 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-Venezuela.
- NATIONAL REMOTE SENSING (NRSC). 1986. *Monitoring change at the urban-rural boundary from Landsat TM and SPOT satellite imagery*. Space Department Royal Aircraft establishment Frantborough, Hampshire.
- OGROSKY, C. E. 1975. *Population estimation from satellite imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 41: 707-712.
- ORMSBY, J. 1982. *The Use of Landsat-3 thermal data to help differentiate land covers. Remote Sensing of Environment*, 12: 97-105.
- QUATTROCHI, D. A. 1994. Analysis of Landsat 4 – Thematic mapper data for classification of the mobile, Alabama Metropolitan Area. *Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*. 84-93. Environmental Research Institute of Michigan.
- RIDD, M.K; NASH, G.D; LIU, J. and CARD, D. H. 1993. *Remote sensing implementation research project: Salt Lake Urbanized Area*, CRSC Report. 93-95. Center of Remote Sensing and Cartography, University of Utah.
- RITCHER, D. M. 1969. *Sequential Urban Change. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 35: 764-770.
- ROVINOBE, C. 1981. *The logic of multispectral classification and mapping the land. Remote Sensing of Environment*, 11: 231-244.
- SUTTON, P; ELVIDGE, CH. and OBREMSKI, T. 2003. *Building and evaluating models to estimate ambient population density. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69 (5): 545-554.
- SOLÉ, L. y SERRA, P. 1991. *Morfología urbana del área metropolitana de Barcelona en dos imágenes thematic mapper. Estudios Territoriales*. Instituto del Territorio y Urbanismo, Barcelona - España, 36: 215- 242.

- STORY, M. and CONGALTON, R. C. 1986. *Accuracy assessment: A users perspective*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 46: 397- 399.
- TERRA. 1985. *Potencialidad, conflictos de uso y modelo de ordenamiento de tierras en la depresión del Lago de Valencia*. Publicación del Instituto de Geografía y Desarrollo Regional y de los postgrados en Geografía, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- TOLL, D. L. 1985. *Effect of Landsat thematic mapper sensor parameters on land cover classifications*. **Remote Sensing of Environment**, 52: 397-399.
- WANG, F. 1993. *A knowledge - based vision system for detecting land changes at the urban fringes*. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 31(1): 13-25
- WANG, S. C. 1984. Analysis methods for TM data of urban regions, *Symposium in Machine Processing of Remotely Sensing Data, West Lafayette*. 134- 143. (Indiana), Purdue University.
- WEBER, C. and HIRSCH, J. 1992. *Some urban measurements from SPOT data: Urban life quality indices*. **International Journal and Remote Sensing**, vol 13, pp. 3251-3261.
- WELCH, R. 1980. *Monitoring urban population and energy utilization from satellite data*. **Remote Sensing of Environment**, 3: 1-9.
- WHEELER, D. J. 1985. *Evaluation of Thematic Mapper data for determining urban land cover*, inpublished PhD dissertation, Departament of Geography, University of Utah, Salt Lake City.
- WENG, Q. 2003. *Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect*. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 69 (5): 555-564.
- YANG, X. and LO, C. P. 2003. *Modelling urban growth and landscape change in the Atlanta Metropolitan Area*. **International Journal of Geographical Information Science**, 17 (5): 463-488.