

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DESAGREGACIÓN ESPACIAL DE VARIABLES SOCIODEMOGRÁFICAS CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN

DAVID COCERO MATESANZ*, FRANCISCO JAVIER GARCÍA LAZARO**
Y JOSÉ MIGUEL SANTOS PRECIADO***

Recibido: 01-11-06. Aceptado: 15-01-07. BIBLID [0210-5462 (2006-2); 39: 7-22].

PALABRAS CLAVE: Desagregación espacial. Teledetección. SIG.

KEY WORDS: Unmixing aggregate data. Remote Sensing. GIS.

MOTS-CLEFS: Desagrégation spatiale. Teledetection. SIG.

RESUMEN

La disponibilidad de información relativa a variables sociodemográficas, en formato digital, constituye una de las cuestiones básicas que deben ser previamente resueltas en el tratamiento de problemáticas sociales, mediante la utilización de las Tecnologías de la Información Geográfica. La presente comunicación sirve de presentación de una propuesta metodológica para la desagregación espacial de este tipo de variables, partiendo de datos censales, con el empleo de la técnica de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica. El procedimiento de cálculo propuesto parte de trasvasar información demográfica, distribuida de forma homogénea en las unidades administrativas correspondientes, a tramas urbanas, de diversa densidad edificatoria, mediante la técnica de la «interpolación areal» ponderada.

ABSTRACT

The availability of information relating to sociodemographics variables, in digital format, is one of the basic questions that needs to be resolved in advance in the treatment of social problematics, through the use of Geographic Information Technologies. This paper presents a methodological proposal for the unmixing aggregate data of this type of variables, starting from the information in the census, applying the technique of Remote Sensing and the Geographical Information Systems. The proposed method of calculation starts with the transfer of demographic information, distributed homogeneously, into appropriate administrative units, to urban plots of different density buildings, through the technique of weighted «insertion of areas».

* Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Educación a Distancia. dcocero@geo.uned.es

** Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid. franciscojavier.garcialazaro@upm.es

*** Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Educación a Distancia. jsantos@geo.uned.es

RÉSUMÉ

La disponibilité d'information relative à des variables sociodémographiques, dans un format numérique, constitue une des questions basiques qui doivent préalablement être résolues dans le traitement de problématiques sociales, au moyen de l'utilisation des Technologies de l'Information Géographique. La présente communication sert de présentation d'une proposition méthodologique pour la désagrégation spatiale de ce type de variables, en partant de données censales, avec l'emploi de la technique de la Télédétection et les Systèmes d'Information Géographique. La procédure de calcul proposé part de transvaser une information démographique, distribuée de manière homogène dans les unités administratives correspondantes, aux trames urbaines, d'une diverse densité edificatoria, par la technique de la « interpolation areal » ponderée.

1. INTRODUCCIÓN

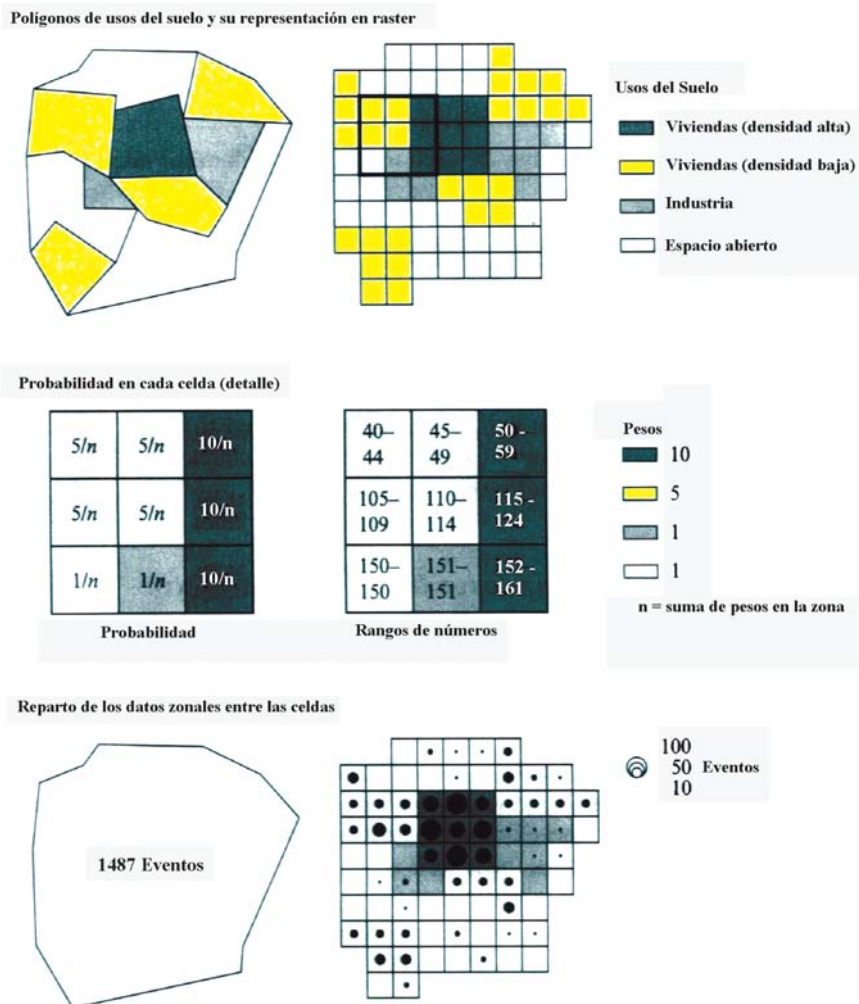
El campo de la investigación desarrollado por las nuevas Tecnologías de la Información Geográfica exige la disponibilidad de variables muy dispares, relativas a fenómenos físicos y humanos, espacialmente georreferenciadas. Sin embargo, no siempre es posible disponer de determinada información por los métodos habituales (técnica de la Teledetección, GPS, etc.), lo que nos impone concebir procedimientos indirectos de cálculo a partir de modelos de carácter geoestadístico.

Un interesante problema de predicción espacial es aquel que plantea la definición de variables sociodemográficas, tradicionalmente referidas a un nivel de agregación de carácter administrativo (municipios, secciones censales, etc.), en unidades espaciales más cercanas al individuo (tramas urbanas), de forma que la nueva distribución de la población en el espacio se ajuste más a la realidad. Se trataría, por tanto, de como trasvasar la información expresada en superficies censales, de extensión relativamente mayor y sin identidad geográfica alguna, a otras más reducidas de tamaño, determinadas por la homogeneidad desde el punto de vista residencial, de densidad de población diversa, pero constante en cada una de ellas, de manera que se mantuviera el total de la población.

Entre los métodos de desagregación espacial que proponen aprovechar al máximo la información contenida en censos y otras fuentes de datos análogas, buscando modelar el patrón subyacente obscurecido por la agregación de la información, pueden citarse los de Tobler (1979), Langford y Unwin (1994) y Spiekermann y Wegener (2000). En relación con la metodología que exponemos, resulta muy adecuado este último, que plantea la utilización de los usos del suelo, como elementos auxiliares para asignar a cada celda del territorio una probabilidad de acoger eventos de algún tipo y, más en concreto, la acogida de la información de una variable sociodemográfica. Para su aplicación, cada celda o píxel debe estar caracterizado por dos atributos: la categoría del uso del suelo que la ocupa y el identificador de la unidad de agregación a la que pertenece. Para cada fenómeno, este modelo asigna, en primer lugar, un peso, en forma de número entero, a cada una de las categorías de los usos del suelo y con ello a todas las celdas asociadas con la categoría en cues-

ción. Si se divide el peso de cada celda por la suma total de los pesos de todas las celdas de la unidad de agregación a la que aquella pertenece, se obtiene la probabilidad de que la celda en cuestión sea el destino de un evento del fenómeno considerado (figura 1). En el caso del procedimiento metodológico reseñado, los autores aplicaron, posteriormente, el método de Monte Carlo, con el objeto de repartir la carga total de eventos (población total, por ejemplo) a cada una de las celdas, de forma aleatoria, de acuerdo a la probabilidad de las mismas. En consecuencia, las

Figura 1. Método de desagregación de Spiekermann y Wegener (2000)



zonas correspondientes a los usos del suelo no residenciales no recibirían ninguna carga de población (probabilidad nula), mientras que en los usos residenciales la distribución se realizaría más o menos proporcional a la probabilidad de acogida (de acuerdo con la generación de números aleatorios, ya que cada evento o carga unitaria de población sería destinada a la celda por sorteo). Finalmente, el procedimiento verifica, a través del identificador, la propiedad picnofiláctica, de manera que la suma de las cargas correspondientes a una unidad de agregación coincida con la población total de la misma.

De acuerdo a las premisas establecidas, presentamos una metodología de desagregación espacial de una variable demográfica (como el volumen total de la población), que recogería la idea primitiva del modelo de Spiekermann y Wegener, modificando alguno de sus presupuestos básicos, de forma que el procedimiento de cálculo que realice la distribución del volumen de población lo haga no de manera aleatoria, sino proporcional a la probabilidad. Esta probabilidad, cuyo método de obtención no se describe, por cierto, en el trabajo indicado, podría estar directamente relacionada con la densidad demográfica de cada una de las tramas residenciales. La metodología propuesta incluiría los siguientes pasos:

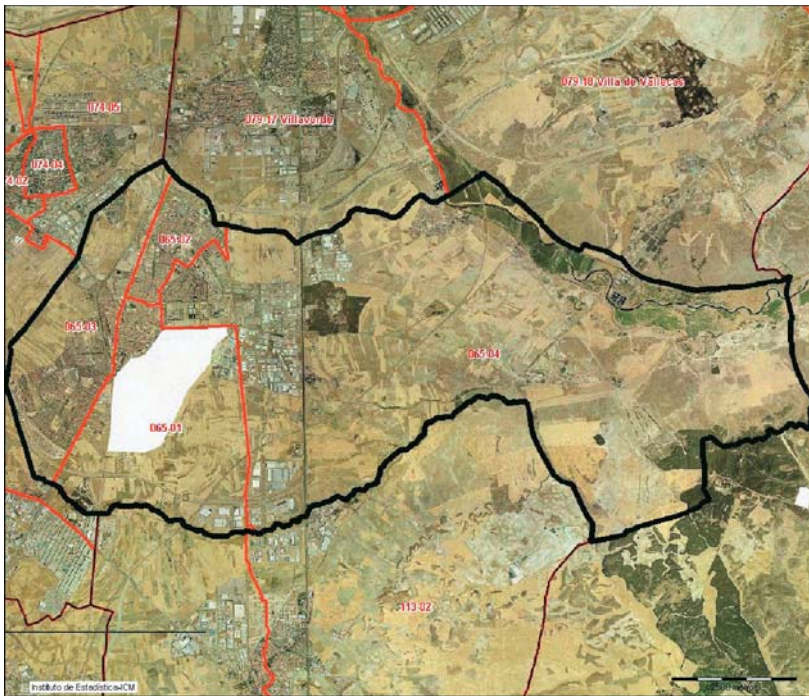
1. Identificación y delimitación de áreas residenciales homogéneas, mediante la técnica de la Teledetección.
2. Análisis de las densidades de población de las zonas resultantes: estudio teórico y empírico.
3. Aplicación de técnicas de transferencia de la población (interpolación areal, ponderada de acuerdo a la densidad de la superficie, con un SIG), desde las unidades censales (cuyo volumen se conoce) a las áreas residenciales unitarias resultantes (cuyo volumen se desconoce), conservando el volumen de población total de cada unidad censal.

Para llevar a cabo la metodología propuesta, se ha seleccionado como área de estudio uno de los distritos del municipio de Getafe, en concreto el número dos (codificado por el INE como 065-02). La razón de esta elección se basa en que en él podemos encontrar toda una serie de variadas tipologías edificatorias, que comprenden desde la morfología de un casco antiguo, con un posterior ensanche, hasta tipologías más abiertas, propias de los nuevos desarrollos residenciales de la zona (figura 2).

2. IDENTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE ÁREAS RESIDENCIALES HOMOGÉNEAS, MEDIANTE LA TÉCNICA DE LA TELEDETECCIÓN

Teniendo en cuenta la gran complejidad espacial del fenómeno urbano, en donde conviven actividades muy variadas sobre un reducido espacio, la aplicación de la teledetección espacial a estos ámbitos es reciente y aún limitada, si bien se ha visto notablemente beneficiada por la puesta en órbita de los sensores de alta resolución espacial, como Ikonos o QuickBird (CHUVIECO, 2002).

Figura 2. El municipio de Getafe, con contorno negro, con sus cuatro distritos



FUENTE: Instituto de Estadística de la CAM.

Hasta el lanzamiento de estos sensores, los estudios urbanos con teledetección se habían centrado sobre áreas remotas, en donde la cartografía disponible no era muy adecuada. Algunos ejemplos son los realizados en Nigeria (OLORUNFEMI, 1987) o China (LO y Welch, 1977). Por otro lado, en países más desarrollados, la cartografía de las zonas urbanas manifiesta graves problemas de puesta al día, debido al dinamismo que habitualmente presentan este tipo de áreas, dificultad que se solventa gracias a la cobertura temporal de las imágenes espaciales, lo que facilita su utilización en tareas de actualización, ya sea de los límites censales (DIETRICH y LACHOWSKI, 1978), ya del espacio edificado (HERRERA, 2001; MOLINA y CHUVIECO, 1997). Del mismo modo, son muchas las citas bibliográficas que hacen referencia a otras aplicaciones de la teledetección en ámbitos urbanos: estimación de la población, detección de asentamientos urbanos y rurales, evaluación de impactos producidos por la actividad humana, etc. (HENDERSON y XIA, 1997; CORBLEY, 1997).

Sin embargo, cuando se realizan estudios urbanos mediante teledetección con imágenes de alta resolución espacial, el gran interrogante es decidir sobre el mejor método de análisis de la imagen, ya sea tratamiento digital o interpretación visual. En

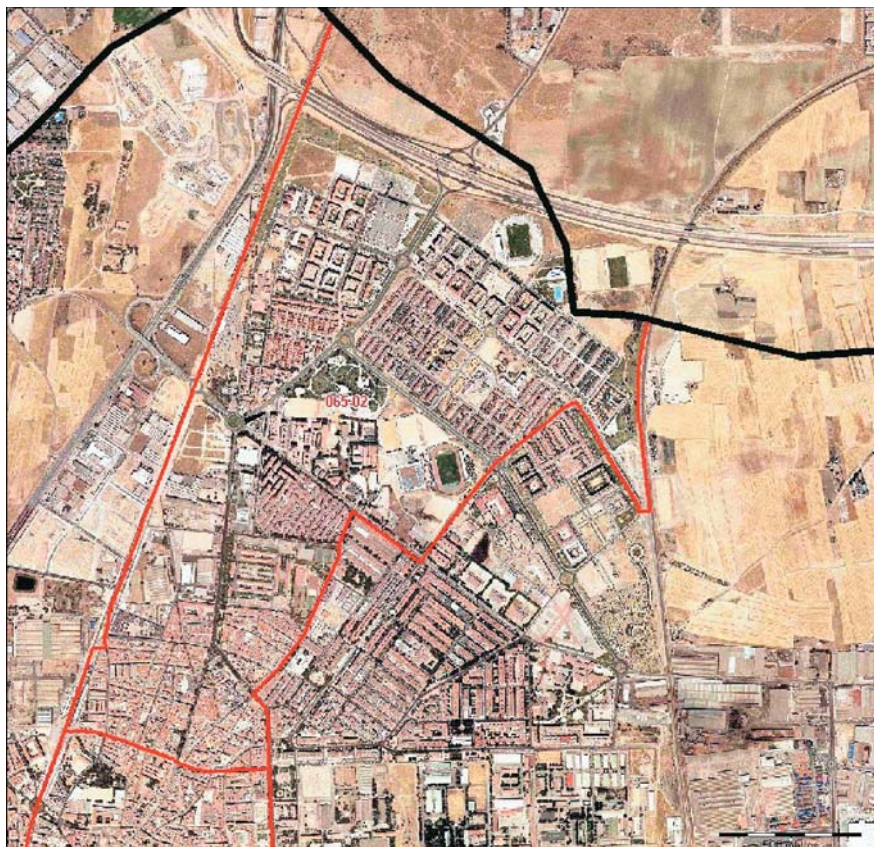
el caso del tratamiento digital, la obtención de clasificaciones de las áreas urbanas es una tarea compleja, debido a la gran diversidad de elementos que componen estas áreas. Las técnicas de clasificación tradicionales, basadas en rasgos de la imagen a nivel de píxel, presentan limitaciones que resultan especialmente problemáticas al aplicarse en este tipo de imágenes (ARROYO *et al.*, 2005). Este tipo de clasificaciones, basadas en considerar a los píxeles individuales como los elementos a clasificar, suele producir resultados insuficientes en zonas urbanas, caracterizadas por su elevada heterogeneidad y diversidad, ya que abarcan tanto áreas naturales (jardines, solares, etc.), como artificiales (edificios, puentes, carreteras, calles, etc.), a lo que hay que añadir la complejidad de las cubiertas artificiales, determinada por los distintos materiales de construcción, densidad de edificación, altura de los edificios, lo que normalmente conduce a que una misma clase pueda manifestarse de formas muy diferentes. Por estos motivos, la componente textura es determinante a la hora de realizar la clasificación, ya que un elemento de la imagen no está formado por píxeles con un valor radiométrico homogéneo, sino por una mezcla de señales inherente al tipo de cubierta (DE SANTIAGO *et al.*, 1999).

Una alternativa a estas técnicas de tratamiento digital pasa por un proceso previo de segmentación de la imagen, lo que permite el trabajo a nivel de objeto. Esta clasificación orientada a objetos, que tiene en cuenta, entre otros aspectos, las formas, las texturas y la información espectral presentes en la imagen, ha demostrado la mejoría del nuevo concepto sobre los clasificadores tradicionales (ARROYO *et al.*, 2006). El algoritmo de segmentación localiza pequeños grupos de píxeles vecinos con niveles digitales similares a los que progresivamente va incorporando píxeles circundantes, siempre que éstos se hallen dentro del criterio de homogeneidad fijado por el usuario (por ejemplo, una determinada distancia espectral). Cuando el algoritmo detecta píxeles vecinos que no son lo suficientemente homogéneos, se crea una frontera. La imagen resultante aparecerá entonces segmentada en áreas homogéneas. Para cada una de ellas se calculan las estadísticas, generalmente la media aritmética, y finalmente se asignan a una categoría temática mediante cualquier clasificador tradicional de los utilizados para las clasificaciones por píxel (DE SANTIAGO *et al.*, 1999). Por tanto, a las distintas categorías no se asignan píxeles individuales, sino las áreas resultantes de la segmentación, lo que reduce considerablemente los errores de asignación.

A pesar de que el tratamiento digital resulta la opción de análisis más inmediata, varios autores han comprobado la complejidad de clasificar digitalmente cubiertas que ofrecen una gran heterogeneidad espacial, y el caso de las áreas urbanas es el más claro a este respecto (TOLL, 1984). Al tratarse de zonas en donde se mezclan tejados, aceras, asfalto, jardines y espacios abiertos o deportivos, su complejidad puede identificarse visualmente gracias a criterios muy difícilmente traducibles a la clasificación digital: localización, textura, tamaño, formas, etc., por lo que la interpretación visual ofrecerá, en este caso, mayor exactitud que la digital (CHUVIECO, 2002).

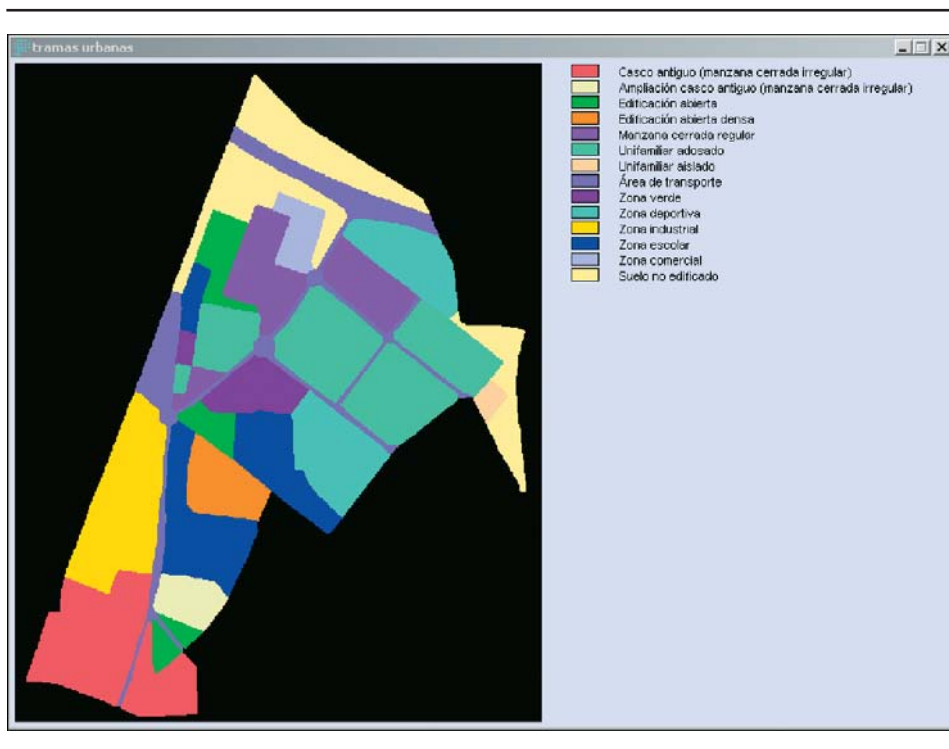
Teniendo en cuenta todo lo indicado anteriormente, para este trabajo, se ha optado por una interpretación visual de la imagen de satélite para llevar a cabo la identificación y delimitación de las áreas residenciales homogéneas presentes en el área de estudio. Para efectuar esta identificación, hemos empleado una ortoimagen realizada a partir de imáge-

Figura 3. Ortoimagen de satélite que contiene la trama urbana del distrito dos de Getafe



nes de satélite de muy alta resolución, cedida por la empresa Aurenis (www.aurenis.com). Se trata de un mosaico de la Comunidad Autónoma de Madrid, realizado con imágenes del satélite Spot-5, denominado «MRMadrid-10»: una imagen de satélite ortorectificada, a escala 1:10.000. Constituye una composición en color natural simulado, con un tamaño de píxel de 2,5 m. y con una proyección UTM ED50 (figura 3).

Una vez obtenida la imagen, se procedió al proceso de fotointerpretación, que se ha basado en la identificación de las áreas residenciales sobre la misma, de acuerdo con la leyenda que podemos observar en la figura 4. Esta tipificación de las tramas urbanas se ha apoyado en criterios clásicos de brillo, color, forma, tamaño, textura, emplazamiento, tonalidad, asociación contextual, etc., sin tener en cuenta, en una primera fase, la altura de la edificación, obteniéndose como resultado la delimitación de una serie de polígonos de información a los que se atribuye un código de información coincidente con las

Figura 4. *Tramas urbanas del distrito dos de Getafe*

clases de la leyenda. Durante el proceso de fotointerpretación, nos hemos servido de una serie de documentos auxiliares, como la cartografía digital del Mapa Topográfico 1:5000 del Sistema de Información Territorial del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, planos y callejeros proporcionados por el Ayuntamiento de Getafe y el imprescindible trabajo de campo que nos permitió un mejor conocimiento del terreno a estudiar. Hay que indicar que la fotointerpretación se realizó de manera directa sobre la ortofoto del área de estudio, estableciéndose como criterio principal a la hora de definir las diferentes áreas residenciales, el que tuvieran la misma tipología, o una predominante, y estuvieran separadas por el viario principal.

Con estos criterios, se han obtenido, para el conjunto de la zona de estudio, un total de catorce categorías de usos del suelo, que se han digitalizado en pantalla con el programa ArcMap 8.3 de ESRI. Los polígonos obtenidos han sido exportados al Sistema de Información Geográfica Idrisi 3.2, con el fin de poder calcular las áreas de los polígonos generados. Dichas categorías son las siguientes: casco antiguo (manzana cerrada irregular), ampliación casco antiguo (manzana cerrada irregular), edificación abierta, edificación abierta densa, manzana cerrada regular, unifamiliar adosado, unifamiliar aislado, área de transporte, zona verde, zona deportiva, zona industrial, zona escolar, zona comercial y suelo no edificado.

3. DEFINICIÓN DE LAS DENSIDADES DEMOGRÁFICAS DE LAS PRINCIPALES TIPOLOGÍAS EDIFICATORIAS EXISTENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO

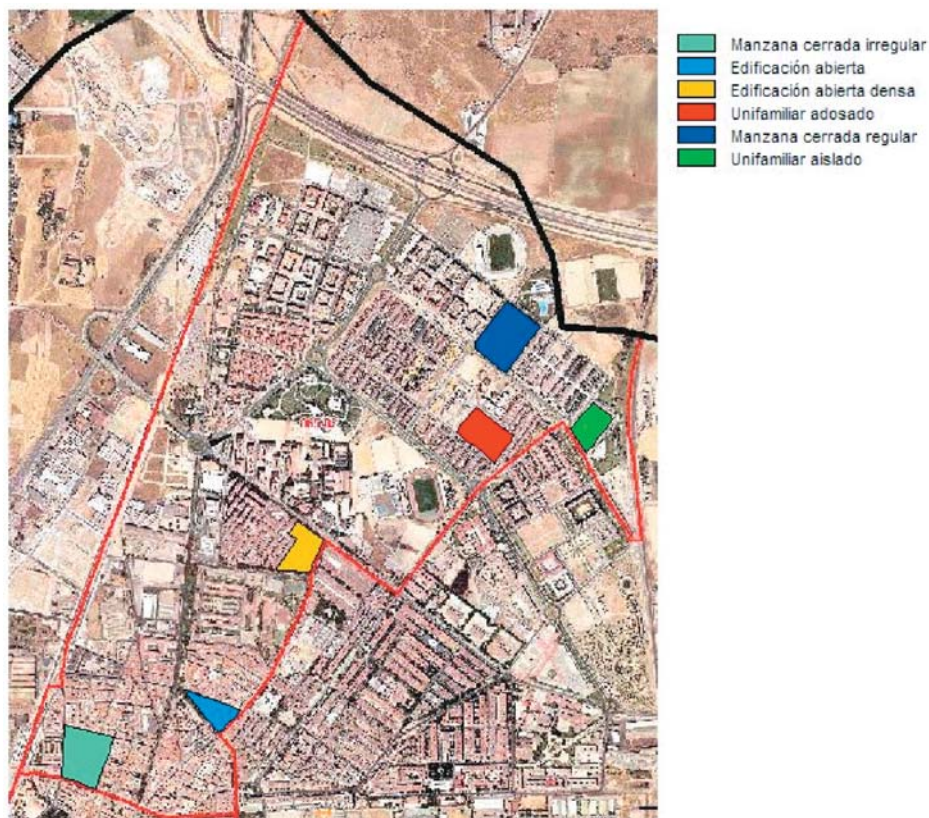
En un primer análisis, en relación con la determinación de la densidad demográfica relativa entre las diferentes tipologías edificatorias existentes en el distrito seleccionado, puede apreciarse la diferenciación existente entre el núcleo urbano tradicional y los desarrollos urbanos más recientes. Mientras que en la trama más antigua predominan los edificios en manzana cerrada con las líneas de edificación delimitando el espacio público y los cuerpos construidos formando manzanas compactas con patios interiores, en las áreas de expansión más reciente destacan las tipologías uniformes de manzana cerrada regular o de edificación en bloque abierto, resultado del planeamiento que ha guiado el desarrollo urbano del municipio durante los últimos años. Así mismo, es preciso destacar las tipologías edificatorias de menor densidad, donde sobresalen los unifamiliares aislados o adosados en hilera.

La zona correspondiente al casco antiguo puede considerarse bastante homogénea, ya que la primitiva edificación de carácter rural existente en el municipio fue sustituida globalmente por edificios entre medianerías de cuatro plantas, debido a la normativa legal existente que limitaba la construcción en altura, como consecuencia de la proximidad del aeródromo de la localidad. Únicamente, podríamos diferenciar, dentro de esta trama unitaria, la zona de primera expansión del municipio que tuvo lugar siguiendo los cánones de este tipo de construcción, aunque con unos estándares de edificabilidad un poco más elevados. Del mismo modo, determinadas áreas del casco fueron demolidas por completo y en su lugar aparece una tipología en bloque abierto, poco común en este espacio central, de mayor densidad edificatoria.

La zona residencial de edificación abierta de alta densidad corresponde al barrio de Las Margaritas, construido en Getafe durante la expansión metropolitana que tuvo lugar en la proximidad de Madrid en los años sesenta del pasado siglo. Esta área fue desarrollada según el Plan Parcial de El Gurullero, de acuerdo a una actuación unitaria llevada a cabo por la empresa Pryconsa, dirigida a una población de bajo nivel de renta que mayoritariamente trabajaba en la industria local. La tipología de edificación es el bloque abierto con apenas espacios libres entre bloques y ausencia total de servicios, lo que incrementó sobremedida la densidad edificatoria.

El resto del área edificada está concentrada en el barrio denominado Getafe Norte, surgido durante los últimos años, tras la revalorización del suelo urbano municipal como consecuencia del nuevo proceso de urbanización de la aglomeración madrileña y el salto de la construcción masiva de viviendas a los municipios de la segunda corona metropolitana. Este hecho trascendental explica las nuevas tipologías edificatorias que pueden apreciarse, de bloques lineales, que originan manzanas cerradas regulares o viviendas unifamiliares de chalets adosados de diversas tipologías de conjunto e, incluso, alguna de chalets aislados.

Resulta fundamental, en la aplicación de la metodología propuesta, la evaluación de la capacidad de cada zona para albergar diferente volumen de población, ya que constituye la base del procedimiento definido para valorar la probabilidad o peso de la desagregación, relativa. En general, podemos considerar cada una de estas zonas des-

Figura 5. *Espacios muestrales pertenecientes a las seis tramas diferenciadas*

critas como homogéneas, tanto desde el punto de vista de su trama urbana, como de las alturas construidas, por lo que presuponemos que se puede apreciar, sin grave riesgo de error, que la densidad de población es semejante.

Más que calcular con exactitud la densidad de población de cada zona, interesa disponer de algún índice capaz de medir o comparar las distintas tramas residenciales existentes respecto a esta variable fundamental. En este sentido, hemos seleccionado determinados espacios muestrales, pertenecientes a las seis tramas diferenciadas (figura 5), con objeto de comprobar, empíricamente, la cantidad de viviendas construidas. De esta manera, pretendemos deducir, para el total de cada zona, la densidad de viviendas por unidad de superficie, como medida que nos permita cotejar su potencialidad relativa.

Los resultados obtenidos, por recuento directo «in situ», vienen reflejados en el cuadro 1, donde se indica, para cada muestra, las viviendas existentes, la superficie

Cuadro 1. *Características de la densidad edificatoria obtenida sobre las muestras de espacio residencial*

<i>Trama</i>	<i>Número de celdas</i>	<i>Superficie (Ha)</i>	<i>Número de viviendas</i>	<i>Número de viviendas /Ha</i>	<i>Peso agregativo relativo</i>
Manzana cerrada irregular	2.448	2,20	303	137,60	3,59
Manzana cerrada regular	2.597	2,33	233	99,54	2,60
Edificación abierta	999	0,89	246	273,15	7,12
Edificación abierta densa	1.417	1,27	406	318,40	8,30
Unifamiliar adosado	1.680	1,51	61	40,29	1,05
Unifamiliar aislado	1.140	1,02	39	38,35	1,00

ocupada en Ha (deducida del número de celdas ocupada por cada zona y de la resolución de las mismas), el índice de viviendas por Ha y, finalmente, el valor relativo de la capacidad agregativa de cada trama respecto a la de valor inferior que definimos como la unidad.

4. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE LA TRANSFERENCIA DE LA INFORMACIÓN DESDE LAS UNIDADES CENSALES A LAS ÁREAS RESIDENCIALES UNITARIAS

Una de las principales propiedades de los SIG es la de facultar el cruce de informaciones contenidas en la base de datos de referencia. Los lazos existentes entre las características geométricas y temáticas de los objetos geográficos permiten selecciones de subconjuntos a partir, ya sea de requerimientos relativos a atributos estadísticos, ya sea, de requerimientos denominados espaciales. Los cruzamientos verticales, es decir, referidos a diferentes capas de información, son los más clásicos y funcionan con operadores geométricos. Así, la superposición (overlay) de diferentes coberturas geográficas admite poner en relación informaciones extraídas de fuentes muy variadas y a priori incompatibles (censos, imágenes de teledetección, etc.) o de naturaleza diferente (unidades administrativas, parcelas, zonas edificadas, etc.).

Una operación de superposición de polígonos un poco especial es la denominada interpolación areal. Su fundamento se basa en el conocimiento previo de la distribución de una variable en una de las dos capas a intersectar, deduciendo los valores de dicha variable en una segunda capa vacía, con una partición del espacio diferente. Habitualmente, el procedimiento de cálculo se ejecuta, valorando, proporcionalmente, la superficie ocupada por cada una de las zonas fruto de la intersección. Así, en el caso de trasvasar la información procedente de unidades censales a otras zonas morfológicas de la ciudad, la aplicación del método de interpolación areal se efectuaría, de acuerdo a las siguientes fases:

1. Realizar la superposición de las capas de polígonos administrativos y las áreas urbanas de morfología uniforme.
2. Hallar la intersección espacial de ambas capas de polígonos.
3. Obtener la proporción superficial de cada uno de los nuevos polígonos de la intersección, respecto al total de cada una de las unidades primitivas.
4. Distribuir el valor de la variable en las unidades espaciales resultado de la intersección, de acuerdo al porcentaje de superficie que representan.
5. Integrar los valores parciales de la variable en las nuevas unidades homogéneas.

El problema que se nos plantea, en nuestro caso, es diferente, ya que el trasvase de información entre capas viene determinado por la desigual densidad de población que afecta a cada una de las áreas destino. Esta circunstancia supone modificar la proposición anterior, distribuyendo el volumen de población, no de forma proporcional a la superficie, sino ponderada a la densidad demográfica de cada zona, de acuerdo al tipo de la trama urbana correspondiente.

La disponibilidad de la base espacial urbana (obtenida en el apartado anterior) en formato raster nos facilita concebir la resolución del problema de manera diferente. El mecanismo de emulación ráster de un vector permite incorporar todas las utilidades ráster a las capas vectoriales y trabajar de forma más sencilla. El formato raster posee la ventaja, respecto al vectorial, de poder medir la intersección entre capas por el número de celdas o píxeles que satisfacen unas determinadas condiciones. Así, la resolución del problema conllevaría obtener, dentro de cada polígono administrativo unitario, el número de celdas correspondiente a cada trama urbana homogénea, comprobando que la definición de densidades de población en cada una de ellas (realizada en el apartado anterior) es la correcta. Para ello, deberíamos verificar que el volumen total de población de dicha unidad administrativa es la suma de los productos parciales de la superficie de cada trama por su densidad demográfica.

Con este nuevo planteamiento, deberíamos, de manera general, seguir el proceso de cálculo que describimos a continuación. Supongamos que disponemos de un conjunto a de unidades administrativas que identificamos como A_i y un conjunto t de tramas urbanas homogéneas (definidas en los dos apartados anteriores) que identificamos como T_j . Las operaciones necesarias para la realización del trasvase de población de unas unidades a otras serían las siguientes:

1. Obtención del cruce de las categorías de A_i y las correspondientes a T_j . Denominamos AT_{ij} al resultado.
2. Determinación del número de celdas o píxeles de los cruces AT_{ij} . Denominamos N_{ij} al resultado.
3. Los valores de las densidades de vivienda (de cada trama urbana) D_j deberían satisfacer las ecuaciones que manifiestan la condición picnofiláctica de correspondencia entre la población de cada unidad administrativa P_i y la de la suma de las poblaciones de las tramas urbanas que la integran (suponemos que sea S

la superficie de cada píxel y k_j el valor medio de habitantes por vivienda en cada trama de vivienda):

$$P_i = \sum_{j=1}^{j=t} N_{ij} D_j k_j S \quad (1)$$

4. La resolución teórica del problema de manera analítica es difícil de conseguir, ya que presupone la existencia de una solución única al sistema de ecuaciones lineales representado por la ecuación propuesta. Por este motivo, puede resultar más operativo la búsqueda de una solución por tanteo. En este sentido, resulta útil la toma de decisión respecto a las densidades residenciales de cada una de las t tramas urbanas homogéneas T_j , a partir del conocimiento empírico del terreno. Sería preciso establecer unos estándares relativos de densidad de población entre las diversas tramas urbanas, deducidos del tipo de edificación establecido sobre las mismas, tal como realizamos en el apartado tercero.

En nuestro caso, hemos aplicado el procedimiento de cálculo descrito en una única unidad censal (el distrito municipal de referencia en la investigación), de manera que la constante k fuera considerada la misma en cada una de las tramas. La resolución del problema se centraría en como distribuir la población total del mismo (33.981 habitantes, en el caso que nos ocupa), de acuerdo a los pesos relativos obtenidos en la tabla 1, conociendo la superficie total ocupada por cada una de las tramas residenciales existentes (cuadro 2).

Cuadro 2. *Superficie total ocupada por las diversas tramas residenciales en el distrito de estudio*

<i>Trama</i>	<i>Número de celdas</i>	<i>Superficie (Ha)</i>
Manzana cerrada irregular	28.820	25,94
Manzana cerrada regular	18.307	16,48
Edificación abierta	10.338	9,30
Edificación abierta densa	7.487	6,74
Unifamiliar adosado	37.510	33,74
Unifamiliar aislado	1.318	1,19

Por tanto, se trataría de obtener el valor medio k (número medio de personas residente en cada vivienda) que satisficiera la ecuación (1), con el objetivo de obtener, posteriormente, la densidad media demográfica (número de habitantes por hectárea) de cada trama urbana:

$$33.981 = k (25,94*137,60 + 16,48*99,54 + 9,30*273,15 + 6,74*318,40 + 33,74*40,29 + 1,19*38,35)$$

$$33.981 = 11.301k$$

$$k = 33.981/11.301 = 3,007 \text{ habitantes por vivienda}$$

En consecuencia, las densidades demográficas para cada una de las tramas sería la correspondiente al cuadro 3, que mostramos a continuación:

Cuadro 3. *Densidades de población de las diversas tramas residenciales en el distrito de estudio*

<i>Trama</i>	<i>Número de habitantes/Ha</i>
Manzana cerrada irregular	413,76
Manzana cerrada regular	299,31
Edificación abierta	821,36
Edificación abierta densa	957,43
Unifamiliar adosado	121,15
Unifamiliar aislado	115,31

El resultado final de la investigación, relativo a la distribución del volumen de población por unidad de superficie puede observarse en la figura 6.

Figura 6. *Volumen de población por unidad de superficie (Hab/Ha)*



5. CONCLUSIONES

La metodología propuesta pone de manifiesto la posibilidad de desagregar variables censales sociodemográficas, a partir del empleo de los usos del suelo, en general, y de la diferenciación de tramas residenciales, en particular, mediante la aplicación de la técnica de la teledetección y el manejo de los Sistemas de Información Geográfica. Una utilización más afinada del procedimiento de cálculo expuesto exigiría la generalización del mismo a un conjunto más amplio de unidades censales (no sólo a un único distrito), de forma que los valores de las densidades edificatorias resultaran más ajustados a la realidad y se disminuyeran, de esta manera, los errores cometidos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ARROYO, L.; COCERO, D.; MANZANERA, J. A.; GARCÍA, L.G. y PASCUAL, C. (2005): «El empleo de clasificadores de contexto para la obtención de cartografía en la interfase urbano forestal», *GeoFocus*, n.º 5, págs. 115-128.
- ARROYO, L.; HEALEY, S. P.; COHEN, W. B.; COCERO, D. y MANZANERA, J. A. (2006): «Using object-oriented classification and high-resolution imagery to map fuel types in the Mediterranean region», *Journal of Geophysical Research*, en prensa.
- CHUVIECO, E. (2002): *Teledetección ambiental*, Barcelona, Ariel.
- CORBLEY, K. P. (1997): «Details, distinctive and descriptive: applications of high-resolution imagery». *Geo Info Systems*, vol. 7, n.º. 5, págs. 36-40.
- DE SANTIAGO LÓPEZ DE URALDE, M., ESCUDERO ACIAGA, J. C. y OZCÁRIZ SALAZAR, J. (1999): «La Teledetección espacial en la caracterización de tramas urbanas», *Mapping Interactivo Revista Internacional de Ciencias de la Tierra*, Centro de Estudios Ambientales, Vitoria.
- DIETRICH, D. L. y LACHOWSKI, H. M. (1978): «Identification and delineation of urbanized areas using Landsat data», *12th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, págs. 1083-1090.
- HENDERSON, F. M. y XIA, Z.G. (1997): «SAR applications in human settlement detection, population estimation and urban land use pattern analysis: a status report», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, n.º 1, págs. 79-85.
- HERRERA, V. (2001): «Estudio del crecimiento urbano de la ciudad de Valdivia (Chile) a través del uso integrado de imágenes de satélite, SIG y equipos GPS», *Revista Española de Teledetección*, n.º 15, págs. 69-78.
- LANGFORD, M. y UNWIN, D. J. (1994): «Generating and mapping population density surfaces within a Geographical Information System» *Cartographic Journal*, n.º 31, págs. 49-53.
- LO, C. P. y WELCH, R. (1977): «Chinese urban population estimates», *Annals Association of American Geographers*, n.º 47, págs. 246-253.
- MOLINA, G.Z. y CHUVIECO, E. (1997): «Detección del crecimiento urbano en la ciudad de Maracaibo (Venezuela) mediante análisis multitemporal de imágenes MSS y TM», *Teledetección: usos y aplicaciones* (editado por J. L. Casanova y J. Sanz), Valladolid, Universidad de Valladolid, págs. 361-368.

- OLORUNFEMI, J. F. (1987): «Identification and measurement of the areal extent settlements from Landsat», *International Journal of Remote Sensing*, n.º 8, págs. 1839-1843.
- SPIEKERMANN, K. y WEGENER, M. (2000): «Freedom from de tyranny of zones: towards new GIS-based spatial models», en Fotheringham, Stewart y Wegener (Ed.): *Spatial Models and GIS*, Londres, Taylor and Francis, págs. 45-61.
- TOBLER, W. R. (1979): «Smooth Pycnophilactic Interpolation for Geographical Regions». *Journal of the American Statistical Association*, vol. 74, n.º 367, págs. 519-529.
- TOLL, D. L. (1984): «An evaluation of simulated Thematic Mapper data and Landsat MSS data for discriminating suburban and regional land use and land cover», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, n.º 50, págs. 1713-1724.