

Evaluación de procedimientos para delimitar áreas de servicio de líneas de transporte urbano con sistemas de información geográfica

Antonio Moreno y M.^a Eugenia Prieto*

RESUMEN. El presente trabajo aborda la evaluación de varios procedimientos para delimitar áreas de servicio del transporte urbano y estimar la población servida. A tal fin, se utilizan datos de un caso de estudio local y se recurre a un sistema de información geográfica (SIG). Con la adopción de dos diferentes formas de geo-referenciación de la demanda y de medición de las distancias, las distintas aproximaciones ensayadas ponen en evidencia resultados dispares y errores, los cuales permiten valorar las ventajas y limitaciones de cada una de ellas. Cabe esperar que las conclusiones alcanzadas contribuyan a elevar la exactitud de los análisis orientados a la planificación y toma de decisiones sobre el transporte público urbano.

Clasificación JEL: C81, R41.

Palabras clave: Transporte urbano, áreas de servicio, demanda potencial, sistemas de información geográfica.

ABSTRACT: This paper addresses the evaluation of several procedures for delimiting service areas of urban transport facilities and computing the served population. To this end, detailed data of a local case study and a geographical information system are used. Adopting two different georeferencing methods and two spatial metrics, the tested approaches reveal disparate results and errors, which allow to appreciate the advantages and limitations of each one. It is expected that the conclusions will contribute to increase the accuracy of analysis focused to urban public transport planning and decision taking.

JEL classification: C81, R41.

Key words: Urban transport, service areas, potential demand, geographical information systems.

* Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid. Campus de Cantoblanco. 28049 Madrid. Correo electrónico: antonio.moreno@uam.es

Recibido: 18 de junio de 2002 / Aceptado: 24 de abril de 2003.

1. Introducción

La determinación de las áreas y de la demanda que el transporte sirve, real o potencialmente, constituye un componente obligado en los estudios destinados a planificarlo o gestionarlo. Un conocimiento riguroso de las mismas por parte de los responsables de la oferta contribuye a que se pueda tanto diagnosticar mejor las situaciones reales, como anticipar las implicaciones probables derivadas de las intervenciones sobre dicha actividad. El contexto actual de disponibilidad de más datos y de mejor calidad, hace posible presumir que se derivarían decisiones más atinadas y se lograría una mayor efectividad en la consecución de las metas fijadas por los proveedores de servicios de transporte público. Adicionalmente, la disponibilidad de sofisticadas herramientas, como los SIG, hace viable abordar con aceptable eficiencia la manipulación de datos y la ejecución de análisis, de acuerdo con planteamientos metodológicos alternativos, cuya bondad relativa cabe confrontar, en aras de posibilitar una elección conveniente entre ellos.

El presente estudio toma como punto de partida esas premisas para abordar una cuestión relativa a la metodología para delimitar áreas de servicio de las redes de transporte urbano y derivar indicadores de servicio, e. g. población cubierta. Al respecto cabe recordar que el planteamiento convencional parte de establecer un alcance espacial (o una serie ellos) para cada parada o estación y averiguar luego la demanda potencial comprendida dentro de ese ámbito próximo. Al afrontar ese problema, esta investigación se sitúa en un punto de encuentro entre los análisis centrados en la accesibilidad espacial (Wachs y Kumagai, 1973; Öberg, 1976; Robinson, 1977; Pirie, 1979; Koenig, 1980; Jones, 1981; Izquierdo y Monzón, 1992; García Palomares, 2000), entendida como contornos alrededor de los puntos o lugares a los que se desea llegar (en nuestro caso serán las paradas de las líneas de transporte), y las indagaciones sobre delimitación de áreas de mercado (O'Kelly y Miller, 1989; Moreno, 2002), en la medida en que es posible concebir una parada o estación de una línea de transporte como un punto de oferta que puede dar servicio a la población que vive, trabaja, estudia, transita, etc., en sus inmediaciones.

La operacionalización de tal metodología se enfrenta a algunas disyuntivas tanto en lo concerniente a la métrica espacial adoptada, como en lo relativo a la forma de geo-referenciación de la demanda, que conviene recordar. La medición de la distancia o coste espacial puede optar entre alternativas bien conocidas ya: distancias en línea recta, distancias por vías de tráfico, tiempo de trayecto, coste económico, etc. La demanda, por ejemplo, los usuarios potenciales a servir, es susceptible también de ser geo-referenciada de varias formas: por polígonos establecidos con fines varios (zonas de transporte, secciones censales, manzanas, etc.), segmentos de calles, direcciones postales, etc. En buena medida tales formas de geo-referenciación, y las subsiguientes posibilidades de elección por parte de los expertos, vienen dictadas por decisiones de los organismos productores de datos estadísticos.

Es evidente que adoptar una métrica y forma de geo-referenciación concreta arrojará unos resultados, por ejemplo en la cifra de demanda cubierta dentro del área próxima, que pueden diferir de los obtenidos con otras. La cuestión inquietante es que no

se cuenta con una evaluación de la bondad relativa de las distintas aproximaciones; es decir, el ineludible error que conlleva cualquier análisis espacial de esta índole no ha sido cuantificado y, en consecuencia, poco se puede afirmar acerca de la exactitud y solidez de nuestras conclusiones. Si la toma de decisiones debe apoyarse en una información lo más rigurosa posible, es evidente la necesidad de disponer de una evaluación que permita apreciar los márgenes de error inherentes a ciertos procedimientos, valorando en sus justos términos el binomio coste del estudio-calidad de los resultados, en aras de optar por un estándar o nivel de rigor conveniente, según los fines perseguidos.

2. Objetivos

A tenor de lo anteriormente expuesto el presente estudio avista, como objetivo general, a realizar una evaluación comparativa de diferentes procedimientos para la delimitación de áreas de servicio de líneas de transporte a escala local. Atendiendo al carácter experimental y de control de calidad metodológica, el alcance del estudio viene establecido por consideraciones de relevancia, significación estadística y coste.

En lo concerniente al modo de transporte se ha optado por el autobús, habida cuenta de su mayor presencia espacial y permeabilidad en el tejido urbano. En consecuencia, se adoptarán las paradas de las líneas existentes como transcripción espacial de la oferta a la cual es deseable tener acceso.

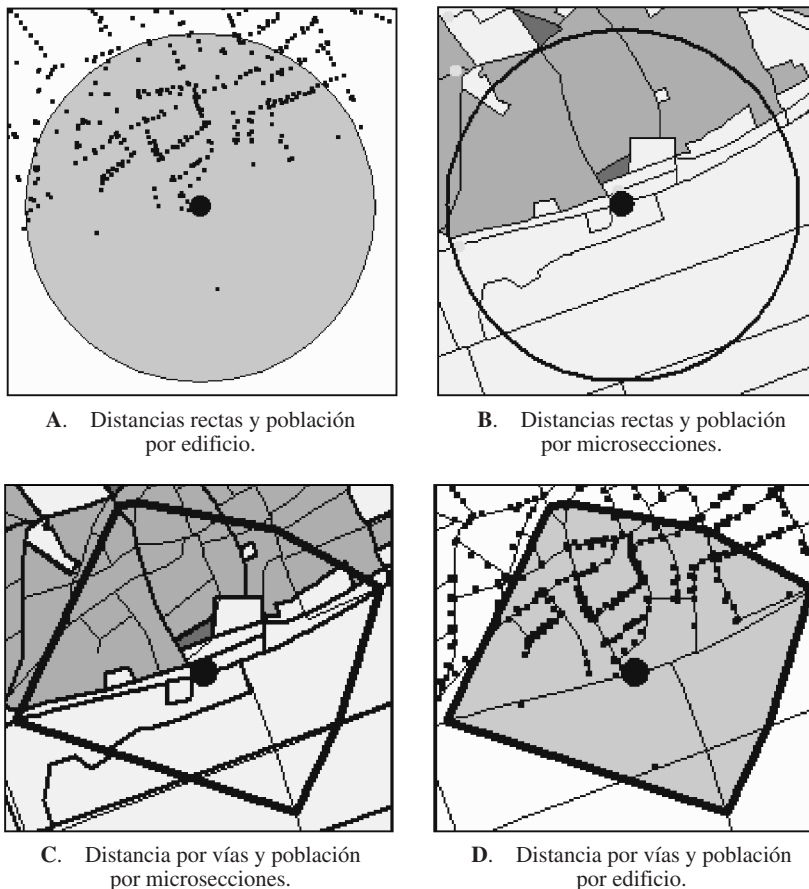
La medida de la distancia o coste contemplará dos de las principales opciones que, para tal modo de acceso a la oferta, se manejan en los estudios (Krarup y Pruzan, 1980; Gatrell, 1983): la distancia en línea recta y la distancia por vías públicas, entendiéndose que el indicador de tiempo de trayecto puede ser, en su caso, convenientemente traducido por un alcance determinado de distancia (asumiendo un desplazamiento peatonal y una velocidad constante).

En cuanto a la demanda potencial, se ha contemplado exclusivamente la población residente geo-referenciada de acuerdo a su lugar de empadronamiento. Ello supone una simplificación, por cuanto la demanda originada en los lugares de trabajo, estudio, ocio, compra, etc., no se incluye. No obstante, esta limitación no es especialmente seria, dado que aquí no se persigue una estimación exhaustiva de la demanda, sino comparar distintos enfoques de geo-referenciación (y métricas espaciales). En resumen, se consideran estas dos opciones: la distribución homogénea de la población en polígonos (microsecciones) derivados del padrón a partir de una extracción de las áreas residenciales¹ y la ubicación de los habitantes por edificio (como puntos).

En síntesis, se examinarán comparativamente las cuatro alternativas metodológicas de delimitación de áreas próximas a las paradas que se muestran en la figura 1. Procede recordar que las discrepancias observables entre las áreas trazadas por viales

¹ La metodología para delimitar microsecciones se describe en el informe elaborado por Tema, Grupo Consultor, S.A., y la Facultad de Geografía e Historia de la Universidad Complutense (2000): *Accesibilidad y cobertura de las redes de transporte y asistencia sanitaria de la Comunidad de Madrid. Tomo 2: Cobertura de la red de transporte público*. Consorcio de Transportes de Madrid. En realidad se trata de las secciones censales una vez eliminadas las zonas de uso no residencial.

Figura 1. Cuatro enfoques para la delimitación de áreas de servicio de una parada de autobús (el punto central) y cuantificación de la demanda



Los círculos (arriba) y los polígonos (abajo) alrededor de la parada muestran la diferente geometría del área próxima (< 300 m) según la métrica espacial adoptada.

Fuente: Elaboración propia.

respecto a las circulares dependen de la geometría del viario. Una configuración vial de tipo radial daría poca diferencia para una parada situada en el centro de los radios.

3. Los datos

A los efectos de una aplicación experimental de los procedimientos se ha elegido el municipio de San Sebastián de Los Reyes, sito en una posición adyacente a Madrid capital, al norte de la misma e integrado en la corona metropolitana. Su superficie es

de 59,21 km² y acogía un total de 57.632 habitantes (1996). En este espacio se distinguen dos zonas con una mayor concentración de paradas de autobús: el casco urbano (suroeste) y algunas urbanizaciones periféricas (parte central). En la figura 2 se diferencian claramente ambas zonas, del mismo modo que puede apreciarse la distribución poblacional, con una importante concentración en el casco urbano.

La ejecución del estudio ha implicado la obtención y conjunción de la información siguiente:

- Cartografía digital apta para uso en SIG vectorial de las paradas de autobús, así como del microseccionado.
- Datos padronales de población geo-referenciada por edificios y por microsecciones correspondientes a 1996: en el primer caso se trata de una explotación especial obtenida del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid; en el segundo se trata de un recuento por microsecciones de las anteriores cifras por edificios realizado con un SIG².
- Callejero digital de la zona de estudio.

La procedencia de tal información es doble: por un lado el Consorcio de Transportes de Madrid³ y, por otro, el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.

4. Metodología

La investigación asume, como premisa axiomática, que la delimitación de áreas de influencia sustentada en distancias por vías públicas y con la población geo-referenciada por edificios es la más exacta por cuanto:

1. Se aproxima más que las otras alternativas a los itinerarios presumibles de los usuarios.
2. Trata de acercarse de forma más detallada al origen del viaje (la vivienda) de muchos de los desplazamientos personales.
3. Ubica la población de manera más flexible y realista que la fórmula basada en secciones censales.

A tenor de ello, la investigación busca realizar un cotejo comparativo de las restantes alternativas metodológicas con la anteriormente enunciada, que actuará así como «benchmark» o referencia. En el análisis se han incluido 56 paradas que cuentan con codificación individualizada por el Consorcio de Transportes y que tenían población residente a menos de 300 m. Un corto número de paradas que sirven a zonas industriales y otros establecimientos periurbanos (pero sin habitantes empadronados) fue excluido, ya que a tenor de los datos a usar (la población residente próxima) habría arrojado cifras nulas. Para la delimitación del área próxima alrededor de cada parada de autobús se ha escogido uno de los umbrales de distancia convencionales, el de 300 m, entendiéndose que resulta conveniente y suficientemente

² Aunque se disponía de cifras de población por microsecciones más recientes, se ha partido en los dos casos de los mismos datos demográficos, al objeto de evitar cualquier error imputable a cambios temporales. Los autores agradecen la sugerencia al respecto de uno de los evaluadores anónimos.

³ Agradecemos especialmente la ayuda al efecto de R. Jiménez.

Figura 2. Distribución espacial de las paradas de autobús y de la población (densidad mediante estimador focal o «kernel») en San Sebastián de los Reyes (Madrid).



Fuente: Elaboración propia.

representativo de lo que otros, habitualmente usados, también (150, 450 y 600 m) podrían aportar.

El proceso ha conllevado los siguientes tratamientos con un SIG con capacidad para análisis de redes:

- Geo-referenciación de la población por edificios, a partir de la dirección postal.
- Recuento de la población anteriormente mencionada por microsecciones.
- Cálculo de la densidad de población en cada microsección e imputación por cuadrículas de 25 m² («rasterización»). Ello significa repartir la población de cada microsección de forma homogénea entre los píxeles que la componen.
- Delimitación de las áreas próximas a cada parada de autobús según estas dos alternativas: distancia por calles y distancias rectas.
- Cómputo de la demanda potencial (población residente) en el área próxima (300 m) de cada parada. En el caso de la geo-referenciación por direcciones postales la cifra de habitantes incluidos se obtiene directamente mediante suma. En el otro caso, geo-referenciación por microsecciones, la población se estima acumulando la cifra de habitantes asignada a los píxeles incluidos dentro del área próxima, según la fórmula (Chakraborty y Armstrong, 1997, p. 149):

$$P = \sum_{i=1}^n p_i + \sum_{j=1}^m \left(p_j \times \frac{a'_j}{a_j} \right) \quad [1]$$

Siendo:

P = Población estimada en el área próxima de una parada cualquiera,

$i \dots n$ = Microsecciones enteramente incluidas en el área próxima,

p_i = Población de la microsección i ,

$j \dots m$ = Microsecciones parcialmente incluidas en el área próxima,

p_j = Población de la microsección j ,

a'_j = Área de la microsección j que está dentro del área próxima,

a_j = Área de la microsección j .

- Análisis de los resultados de cada uno de los cuatro métodos con sistemas estadísticos (SPSS y NCSS).

5. Resultados

5.1. La población estimada dentro del área próxima según los distintos métodos

Un primer paso obligado para valorar los diferentes procedimientos consiste en confrontar los resultados que arrojan para el conjunto de paradas examinadas. Si dichos resultados fuesen sensiblemente similares estaríamos ante enfoques de parecido nivel de exactitud, sin embargo la realidad que el análisis presentó ha sido muy otra. Las cifras de población estimadas por cada método se han sintetizado mediante indicadores univariados y se recogen en el cuadro 1.

Los tratamientos basados en distancias rectas arrojan los estadísticos de posición central más elevados, así como la mayor variabilidad en sus estimaciones. En la media y mediana tales procedimientos superan en alrededor de 1.500 personas a los otros dos. Ello conduce a pensar en un sesgo sistemático al alza de tales métodos. Los valo-

res máximos y el cuartil 3 exceden en alrededor de 3.000 personas a los correspondientes a los métodos apoyados en distancias por calles, lo que supone una diferencia considerable. En general, se percibe que los cuatro métodos conforman dos claros grupos, según los estadísticos obtenidos: por un lado los sustentados en distancias rectas, por otro los que usan distancias por calles. En los primeros, todos los estadísticos de posición y variabilidad son superiores. Curiosamente, la asimetría es algo mayor en los métodos con distancias por calles. En conclusión, los métodos basados en distancias rectas, sobrestiman de forma ostensible la población del área próxima.

Al objeto de valorar más fundadamente las diferencias de los tres métodos respecto al de referencia, se ha aplicado el test de la T de Student al supuesto de diferencias entre las medias de dos muestras dependientes (*vid.* Amón, 1980), puesto que se trata de las mismas unidades estadísticas (las paradas), pero sometidas a tratamientos distintos (los procedimientos de delimitación de áreas próximas). Las conclusiones son reveladoras: para los dos métodos que usan distancias rectas la diferencia entre sus medias y la del procedimiento de referencia es significativamente distinta de cero al nivel de confianza del 99,9 por 1.000. Por el contrario, la diferencia con la media del método de distancia por calles y población por microsección no puede afirmarse que sea nula al nivel de confianza del 95%. En otras palabras, cabe esperar que las medias de la demanda computada con la métrica por calles sean las mismas (usando tanto población por edificio, como por microsecciones).

Otro aspecto a valorar es el grado de similitud o discrepancia en la población estimada, cuando se considera la totalidad de las paradas. Es decir, la fusión espacial de todas las áreas próximas delimitadas con cada procedimiento arroja un polígono ca-

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de la población en el área próxima a las paradas

Estadístico	Método			
	Distancia recta y población por edificio	Distancia recta y población por microsección	Distancia por calles y población por edificio	Distancia por calles y población por microsección
N (paradas)	56	56	56	56
Media	4.503,45	4.511,23	2.938,63	2.901,04
Mediana	3.846,00	3.649,00	2.487,50	2.413,50
Desviación típica	3.993,67	3.961,29	2.756,87	2.687,13
Asimetría	0,32	0,33	0,56	0,46
Mínimo	10	0	0	0
Máximo	11.947	11.651	9.284	8.691,00
Percentil 75	8.468,25	8.528,25	5.354,00	5.402,5
Población total cubierta	54.021	54.289	49.464	49.420
Test de la T de Student para diferencia de medias	8,26**	8,09**	(Método de referencia)	-0,86*

* Diferencia no significativa al nivel de 95 por ciento.

** Diferencia significativa al nivel del 99,9 por mil.

Fuente: Elaboración propia.

racterizado por el hecho de que cualquier punto interior tiene a menos de 300 m como mínimo una parada. El cuadro 1 permite constatar que las cifras de población total cubierta según los procedimientos con distancias rectas superan en más de 4.500 habitantes a los obtenidos con los métodos sustentados en distancias por calles.

5.2. Errores de los distintos procedimientos

Habiendo asumido que los resultados obtenidos con la delimitación del área próxima mediante distancias por calles en combinación con una geo-referenciación por edificios de la población son los más exactos, se han obtenido las discrepancias o errores (absolutos y relativos) respecto a aquél.

A) Errores absolutos

Se han calculado mediante sustracción simple de esta forma:

$$E_i = P_i - R_i \quad [2]$$

Siendo E_i = Error para el área próxima i ; P_i = Población estimada dentro del área i por el método P ; R_i = Población estimada dentro del área i por el método de referencia R . Como resultado se obtuvieron tres columnas de diferencias, una para cada uno de los otros tres métodos, que fueron sometidas a un análisis univariado. El cuadro 2 y la figura 3 recogen los resultados.

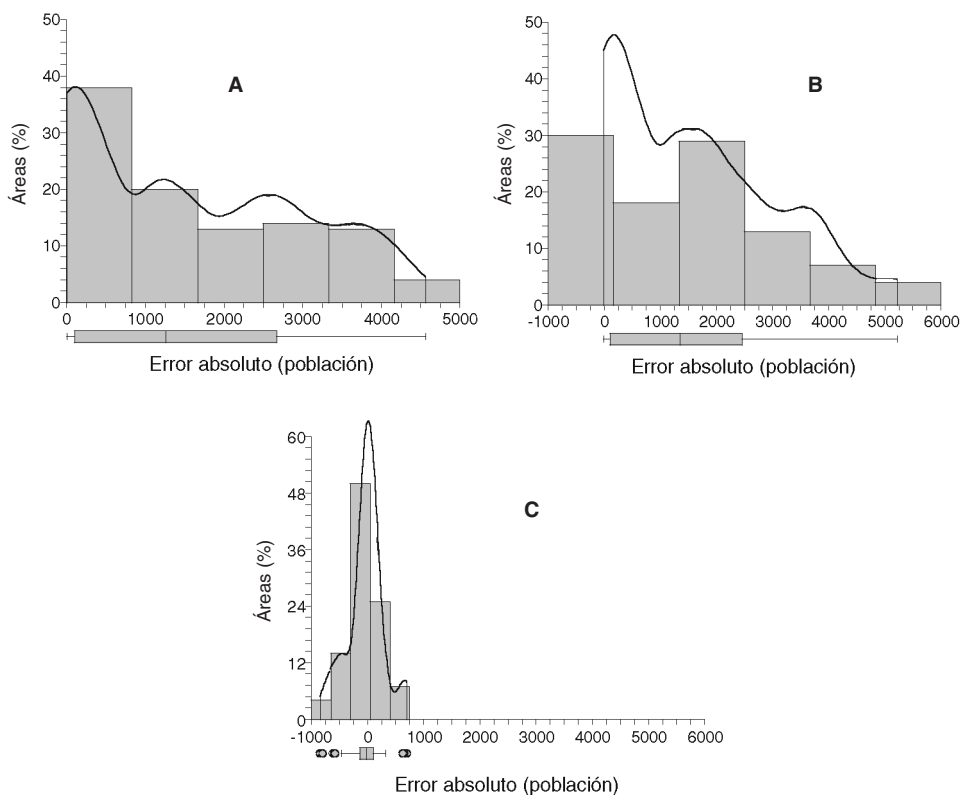
Los métodos basados en líneas rectas arrojan sobrestimaciones medias y medianas importantes, pudiendo superar en ciertos casos las 4.500 personas. Su variabilidad (desviación típica) es también alta, denotando además inconsistencia. El tercero de los métodos (distancia por calles y población por microsección) muestra siempre indicadores de error bastante menores, aflorando incluso subestimaciones.

Cuadro 2. Estadísticos descriptivos de los errores absolutos en la población estimada dentro del área próxima a la parada

Estadístico	Método		
	Distancia recta y población por edificio	Distancia recta y población por microsección	Distancia por calles y población por microsección
N	56	56	56
Media	1.564,82	1.572,61	-37,59
Mediana	1.276,00	1.367,00	-1
Desv. típ.	1.411,67	1.454,29	326,90
Asimetría	0,46	0,68	-0,20
Mínimo	9,00	-4,00	-845
Máximo	4.562,00	5.217	700
Percentil 75	2.678,00	2.454,00	110,75

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Distribución de los errores absolutos (población estimada) de cada procedimiento respecto al método de referencia



A) Distancia recta y población por edificio. B) Distancia recta y población por microsección.
C) Distancia por calles y población por microsección.

Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, los errores absolutos de los métodos con distancias rectas resultan elevados y en general positivos, a diferencia del tercer método que arroja errores bastante inferiores, menos heterogéneos, repartidos además entre positivos y negativos y con menor asimetría.

B) Errores porcentuales

La magnitud relativa, en porcentaje, de los errores se ha obtenido relacionando el error absoluto de cada procedimiento respecto al resultado del método de referencia, según la fórmula:

$$EP_i = (P_i - R_i) \times 100/R_i \quad [3]$$

Siendo EP_i = error porcentual para el área próxima i .

Los cálculos se han aplicado sólo a 54 casos, ya que para dos paradas la estimación de población según el método de distancia por calles y población por edificio era nula, por lo que los cocientes respecto a dicho valor resultaban inviables (*vid.* cuadro 3 y figura 4).

Cuadro 3. Estadísticos descriptivos de los errores porcentuales en la población estimada dentro del área próxima a la parada

Estadístico	Método		
	% Error distancia recta y población por edificio	% Error distancia recta y población por microsección	% Error distancia calle y población por microsección
N Válidos	54	54	54
Perdidos	2	2	2
Media	66,13	75,63	-2,25
Mediana	48,55	58,42	-0,91
Desv. típ.	50,76	72,64	27,36
Asimetría	2,57	2,86	-0,16
Mínimo	14,49	-1,74	-100
Máximo	309,09	451,52	87,1
Percentil 75	81,46	104,03	9,33

Fuente: Elaboración propia.

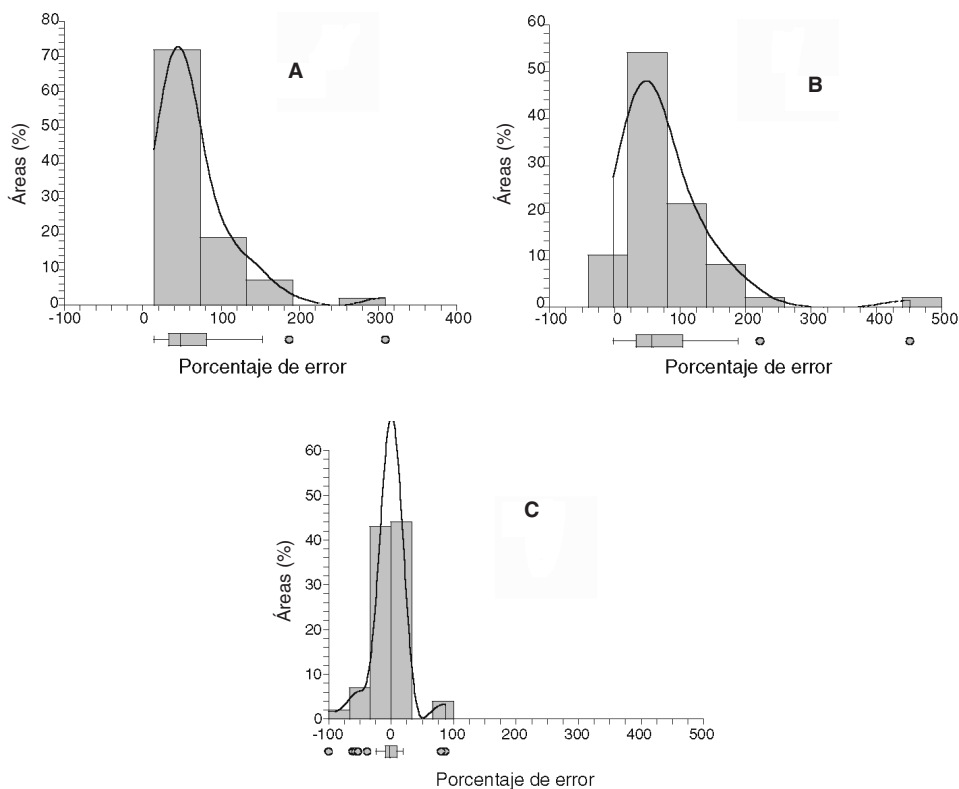
El examen de los estadísticos denota de nuevo una divergencia ostensible entre los enfoques basados en distancias rectas frente al de distancia por calles. Los primeros muestran un promedio de errores positivo y superior al 65%, lo que les confiere un nivel de fiabilidad escaso. Asimismo, exhiben una variabilidad mayor, es decir, la estimación puede ser muy errática e inconsistente (particularmente el método de distancias rectas y población por microsección llega a un caso extremo de sobrestimación del 452%). La distribución de los errores porcentuales de ambos métodos (figura 4) revela que entre ambos hay también una calidad desigual.

El tercero de los métodos, que combina distancias por calles y población por microsección, tiene un comportamiento en general mejor: el error porcentual promedio es bastante bajo y su variabilidad también inferior. No obstante, un hecho algo incómodo estriba en que exhibe un cierto sesgo hacia la subestimación, que en algún caso llega al 100%.

5.3. Distribución espacial de los errores

El análisis de la distribución de los errores en el área de estudio permite detectar las relaciones existentes entre los distintos valores (absolutos y porcentuales) y el espacio en el que se manifiestan, al que se ha caracterizado mediante la densidad de población. Ello ayuda a valorar mejor a los diferentes métodos.

Figura 4. Distribución de los errores porcentuales respecto al método de referencia

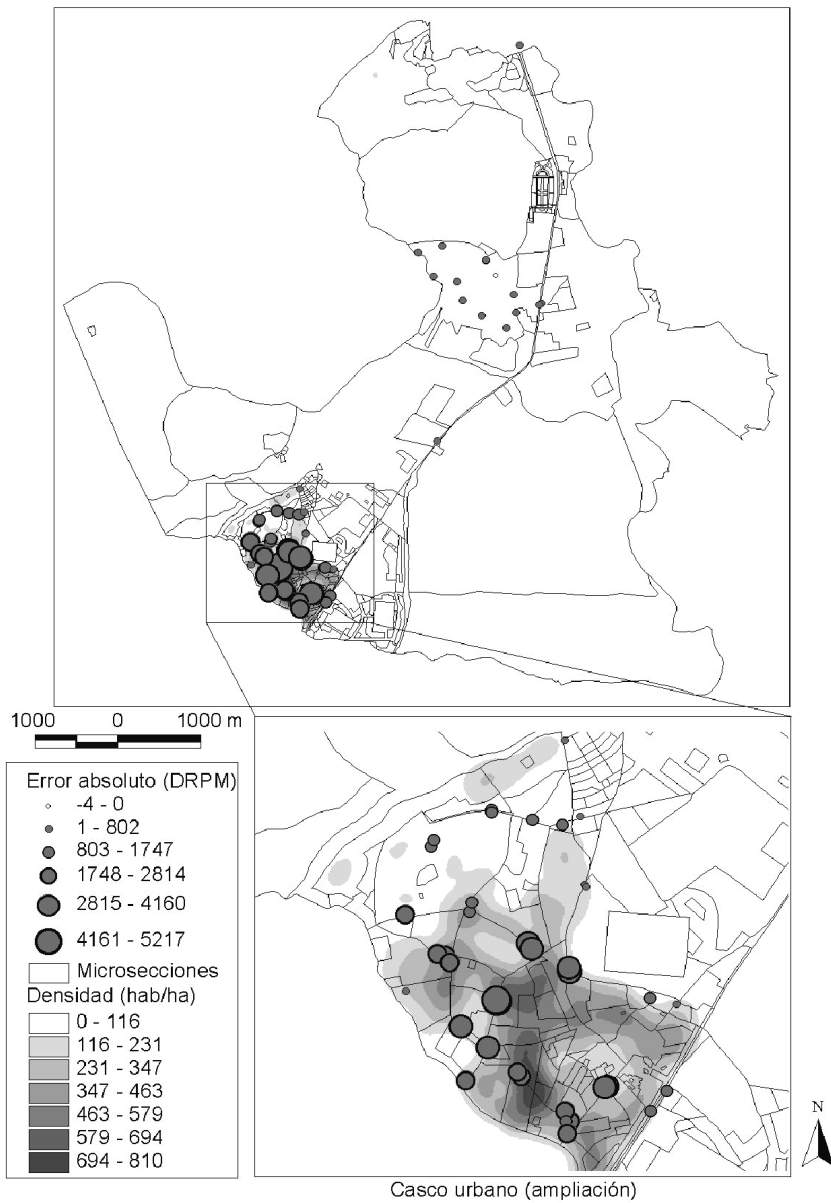


A) Distancia recta y población por edificio. B) Distancia recta y población por microsección.
C) Distancia por calles y población por microsección.

Fuente: Elaboración propia.

Las partes de San Sebastián de los Reyes con un número notable de paradas de autobús corresponden al casco urbano y a una zona de urbanizaciones periféricas, según se vio en la figura 1. En el cuadro 4 se han cualificado también según la densidad poblacional. Se constata que los dos métodos basados en distancias rectas tienen un comportamiento similar en la distribución espacial de los errores. En general, cuanto mayor es la densidad de habitantes (el casco urbano tradicional), mayores son los errores absolutos, ocurriendo lo contrario en las zonas de bajas densidades (*vid.* figuras 5 y 6). Los errores porcentuales muestran un comportamiento inverso, pues disminuyen en los ámbitos densos y en cambio se mantienen o aumentan con las bajas densidades. Los menores errores absolutos se encuentran en las urbanizaciones periféricas, donde la densidad de población es baja, sin embargo, los porcentajes de error de ambos procedimientos son variados en este sector.

Figura 5. Distribución espacial de los errores absolutos en la estimación de la población en el área próxima, según el método de distancia recta y población por microsección



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Distribución espacial de los errores en la estimación de la población en el área próxima, según el método de distancia recta y población por edificio



Fuente: Elaboración propia.

El método de distancias por calles y microsecciones merece un párrafo aparte, pues muestra un comportamiento marcadamente diferente en sus resultados respecto a los dos tratamientos anteriores. Los errores son menores y se manifiestan tanto del lado positivo como negativo, es decir, en algunos casos se produce una sobreestimación de la población cubierta por cada parada y en otros una subestimación. En el cuadro 4 se aprecia un claro predominio de errores más bajos, absolutos y porcentuales, en las áreas del casco urbano (tanto las de mayor, como de menor densidad de habitantes). Puede observarse en la figura 7 que los errores absolutos generan allí un patrón espacial bastante aleatorio. En las urbanizaciones periféricas del N los errores absolutos son inferiores, mientras que los porcentuales, con valores de bajos a medios, son allí los mayores de este método.

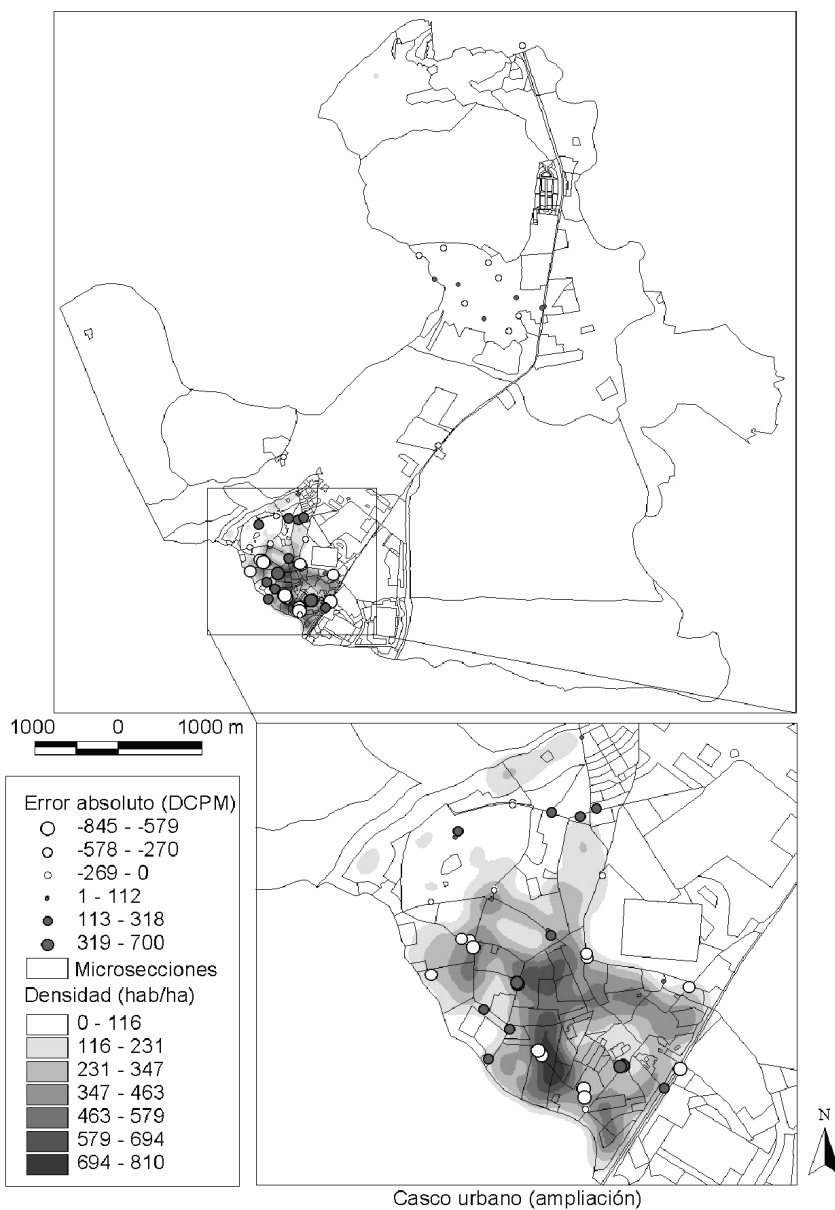
Cuadro 4. Características de la distribución espacial de los errores (población estimada)⁴

Zona		Método					
		Distancia recta y población por edificio (errores)		Distancia recta y población por microsección (errores)		Distancia por calles y población por microsección (errores)	
		Absolutos	Porcentuales	Absolutos	Porcentuales	Absolutos	Porcentuales
Casco urbano	Alta densidad de población	Altos y medio altos	Medio bajos y medios	Altos y medio altos	Medios y medio bajos	Medios y medio bajos (positivos y negativos)	Bajos (positivos y negativos)
	Baja densidad de población	Medios y medio bajos	Medios y altos	Medios	De medio bajos a altos	Bajos y medio bajos (positivos y negativos)	Bajos (positivos y negativos)
Urbanizaciones periféricas	Baja densidad de población	Bajos	De medio bajos a altos	Bajos y medio bajos	De medio bajos a altos	Bajos (positivos y negativos)	De bajos a medios (positivos y negativos)

Fuente: Elaboración propia.

⁴ Los intervalos correspondientes a los valores absolutos, tanto negativos, como positivos, son: bajos (0 a 100), medio bajos (0 a 500), medios (500 a 1500), medio altos (1500 a 2500), altos (más de 2500). Y para los valores porcentuales, negativos y positivos: bajos (0-25), medio bajos (25-50), medios (50-100), medio altos (100-150) y altos (más de 150).

Figura 7. Distribución espacial de los errores absolutos en la estimación de la población en el área próxima, según el método de distancia por calles y población por microsección



Fuente: Elaboración propia.

6. Conclusiones

En este estudio se ha partido del principio de que la estimación de la población incluida dentro del área próxima de una parada de transporte público, por ejemplo de autobús, resulta más exacta conjugando la métrica de distancia por calles con una geo-referenciación de la población por edificios. Si se dispone de la información apropiada (callejero digital y población por edificio) el coste de aplicación resulta asequible, por lo que debería ser la opción metodológica preferente. Sin embargo, cumplir tales requisitos resulta aún inusual, por lo que tal método puede ser inviable. En su defecto, habría que optar por alguna otra alternativa.

Los hallazgos obtenidos a partir de la aplicación de otros métodos y la comparación de sus resultados permiten apreciar su respectiva bondad y propiedades. El tratamiento basado en distancias rectas y población por edificio muestra una marcada diferencia en relación con el procedimiento más idóneo, aunque no parece ser el peor de los comparados aquí. Como se ha podido comprobar en el análisis estadístico de los errores, los valores de población en torno a las paradas de autobús superan significativamente a los del método de referencia. En cuanto a su distribución espacial, se produce una relación directa entre la densidad de población y el grado de error absoluto, mientras ocurre lo contrario en la mayor parte de los valores porcentuales. Este tratamiento tiene la ventaja de no depender del callejero (la métrica espacial requerida es la distancia recta), pero la geo-referenciación de la demanda potencial por edificio podría ser imposible por carencia de datos. Finalmente, el cálculo de la población cubierta para cada parada de autobús es relativamente rápido en tiempo, pese a que en nuestro experimento se haya realizado una a una, es decir, eludiendo el desarrollo de una aplicación «ad hoc» que automatizase el procesamiento.

El método basado en distancias rectas y población por microsección es el que más se aleja del de referencia (con distancia por calles y la población por edificios), ocasionando errores altos, evidenciados por una importante sobreestimación del número de habitantes incluido en las áreas de influencia. Los errores se distribuyen en el área de estudio de manera similar al procedimiento anteriormente descrito. La información es la menos exacta, aunque goza de la mayor disponibilidad y difusión, por lo que su utilización es muy común. Por último debe destacarse, como ventaja, que tras una serie de pasos preparatorios los resultados se obtienen con el SIG, de forma ágil, en una sola operación y para todas las paradas.

El tercero de los tratamientos analizados, distancias por calles y población por microsección, supera a los dos anteriores en rigor. Los errores de este método se reparten de forma bastante simétrica entre sobre y subestimaciones y alcanzan una cuantía moderada; además la variabilidad de los mismos es inferior, todo lo cual denota una exactitud superior. La mayor limitación puede provenir de la disponibilidad de callejeros aptos para análisis de redes con SIG. El tiempo necesario para este tratamiento es similar al del segundo caso (distancias rectas y población por microsección): los valores de población en torno a las paradas pueden ser calculados de forma simultánea y de una sola vez para todas ellas.

En conclusión, a tenor de los resultados de este estudio y, dejando a un lado el método más exacto (áreas próximas trazadas con distancia por calles y demanda computada por edificio), procede recomendar como segundo procedimiento en cuanto a calidad el que adopta la distancia por calles y la población por microsecciones, aunque su uso requiere cierta cautela, debido a que puede subestimar algo la población cubierta. Como tercera opción se posicionaría el método con distancias rectas y población por edificio, quedando en último lugar el procedimiento basado en distancias rectas y población por microsección que, sin embargo, por la facilidad de aplicarlo con SIG y la mayor disponibilidad de datos, ha gozado de mucho predicamento hasta el presente.

Bibliografía

- Amón, J. (1980): «Probabilidad/Estadística inferencial». *Estadística para psicólogos*, vol. 2. Pirámide, Madrid.
- Chakraborty, J. y Armstrong, M. (1997): «Exploring the use of buffer analysis for the identification of impacted areas in environmental equity assessment». *Cartography and Geographic Information Systems*, 24(3):145-157.
- García Palomares, J. C. (2000): «La medida de la accesibilidad». *Estudios de Construcción y Transportes*, 88:95-110.
- Gatrell, A. (1983): *Distance and space. A geographical perspective*. Clarendon Press, Oxford.
- Izquierdo, R. y Monzón, A. (1992): «La accesibilidad a las redes de transporte como instrumento de evaluación de la cohesión económica y social». *TTC*, 56:33-56.
- Jones, S. (1981): *Accessibility measures: a literature review*. Transport and Road Research Laboratory. Department of Transport, Report 967, Crowthorne.
- Koenig, J. (1980): «Indicators of urban accessibility: Theory and application». *Transportation*, 9:145-172.
- Krarup, J. y Pruzan, P. (1980): «The impact of distance on location problems». *European Journal of Operational Research*, 4:256-269.
- Moreno Jiménez, A. (2002): «Delimitación y predicción del área de mercado para establecimientos de servicios a los consumidores con sistemas de información geográfica». *Estudios Geográficos*, 247:279-302.
- Öberg, S. (1976): «Methods for describing physical access to supply points». *Lund Studies in Geography, Ser. B Human Geography*, 43, 141 págs.
- O'Kelly, M. y H. Miller (1989): «A synthesis of some market area delimitation models». *Growth and Change*, 3(20):14-33.
- Pirie, G.H. (1979): «Measuring accessibility: a review and proposal». *Environment and Planning A*, 11:299-312.
- Robinson, R. (1977): *Ways to move. The geography of networks and accessibility*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Tema, Grupo Consultor, S.A., y Facultad de Geografía e Historia de la Universidad Complutense (2000): *Accesibilidad y cobertura de las redes de transporte y asistencia sanitaria de la Comunidad de Madrid. Tomo 2: Cobertura de la red de transporte público. Ámbito: Corredor N-II*. Consorcio de Transportes de Madrid.
- Tema, Grupo Consultor, S.A., y Facultad de Geografía e Historia de la Universidad Complutense (2000): *Accesibilidad y cobertura de las redes de transporte y asistencia sanitaria de la Comunidad de Madrid. Tomo 3: Análisis de la accesibilidad. Ámbito: Corredor N-II*. Consorcio de Transportes de Madrid.
- Wachs, M. y Kumagai, T. (1973): «Physical accessibility as a social indicator». *Socio-Economic Planning Sciences*, 7:437-456.