

# Los modelos de localización óptima como herramientas para la planificación territorial y urbana de instalaciones y equipamientos

A. MORENO JIMÉNEZ (1) & J. BOSQUE SENDRA (2)

(1) Catedrático de Geografía Humana, Universidad Autónoma de Madrid.

(2) Catedrático de Geografía Humana, Universidad de Alcalá.

**RESUMEN:** Se realiza una revisión de los modelos de localización óptima de instalaciones y equipamientos en cuanto a sus posibilidades de aplicación a la ordenación del territorio, para impulsar su uso. Se enumeran los modelos más importantes, los principios que buscan optimizar y las técnicas y programas disponibles para su cálculo. Finalmente, se presentan aplicaciones en temas educativos, sanitarios, de emergencias, de instalaciones no deseables y otros similares.

**DESCRIPTORES:** Modelos de localización óptima. Planificación territorial. Equipamientos.

## 1. Introducción

Los procesos de planificación y ordenación que afectan al territorio *sensu lato* han logrado constituirse a lo largo de la última centuria como unas de las actividades más conspicuas de lo que se conoce como análisis y formación de decisiones públicas. Como tales, poseen unas características y complejidad singulares, por cuanto versan sobre asuntos con implicaciones muy amplias y, a veces, profundas y perdurables, sobre aspectos de la realidad diversos (geográficos, sociales, económicos, ambientales, políticos, etc.), con múltiples agentes involucrados (*stakeholders*) e intereses no siempre coincidentes, o incluso contrapuestos. El carácter público de estos asuntos suscita que el papel del decisor último, las instituciones administrativas competentes, habrá de ejercer integradamente varias

de las funciones que son propias de la gobernanza (regulación, concertación, negociación y arbitraje, aprobación, supervisión, etc.).

A este respecto, resulta crítica la función de los expertos y técnicos que intervienen en los análisis y elaboración de propuestas de planificación, por cuanto les compete la delicada labor de diagnosticar primero el estado de cosas, para conducir luego el proceso de dar forma a las medidas o determinaciones que, avistando alcanzar los objetivos establecidos para el plan, concilien lo mejor posible los intereses; y todo ello garantizando la coherencia con los principios legal y socialmente vigentes. Sobre tales principios existe una importante literatura que ha tratado de clarificar su significado (MORENO, 2008; MORENO & VINUESA, 2009) y de establecer formas de transcribirlos operativamente para su aplicación en diagnósticos y prescrip-

ciones de ordenación espacial. No procede aquí ahondar en esa dirección, pero baste recordar, a título de ejemplo, los populares conceptos-valor de eficiencia (económica, espacial), equidad (económica, social, territorial), justicia ambiental, sostenibilidad, competitividad, calidad de vida, bienestar, cohesión (social, territorial), etc. Al planificador le concierne, no solo conocerlos, sino además dilucidar su aplicabilidad en los diferentes contenidos del planeamiento y, finalmente, manejarlos y materializarlos en sus valoraciones y proposiciones.

Sin desdoro de que ello haya sido pretendido y, en muchos casos razonablemente logrado en la práctica planificadora, lo que sí cabe reconocer también es que en ocasiones las propuestas de ordenación o las actuaciones se concilian mal con algunos de tales principios. La duda crítica que brota entonces estriba en saber si esos desajustes entre las prescripciones o intervenciones y los principios de ordenación obedecen a fallos en los mecanismos de tramitación de los planes, asociados a conductas de los agentes implicados *sensu lato*, o si pueden relacionarse con limitaciones en los métodos y técnicas empleados en la elaboración del plan (generación de propuestas), las cuales afectan (reducen) la cantidad y calidad de la información puesta a disposición de los decisores y públicos afectados, a la hora de valorar tales propuestas. Lo que sí es constatable es que ciertos procedimientos de análisis, a menudo aplicados en la planificación espacial en España, resultan elementales y se prestan poco a una generación de resultados aptos para la formación rigurosa de decisiones o que permitan la valoración cabal de su ajuste o desajuste con los principios antes reseñados.

En este sentido resulta también patente que los progresos en la investigación están generando permanentemente nuevos instrumentos para ello y que su incorporación en la práctica planificadora parece de todo punto inexcusable, por cuanto servirían para mejorar el rigor, claridad y transparencia en las actividades y procesos de planificación. A este respecto, el foco de este artículo recae en un conjunto de tales instrumentos orientados a la ayuda a las decisiones sobre instalaciones y equipamientos, conocidos como modelos de localización óptima (MLO), que se han desarrollado apoyándose en la denominada teoría de la localización. Ante la constatación de su excelente potencial aplicado y de su exigua utilización todavía, se persigue aquí propiciar su conocimiento entre los expertos, para lo cual se presentará en primer lugar y brevemente la metodología que conllevan, para después ex-

poner su lógica general, los principales modelos, las técnicas y las tecnologías para su resolución. En un amplio apartado posterior se recoge un selecto abanico de casos ilustrativos, para terminar con unas consideraciones finales sobre la contribución que pueden realizar para la toma de decisiones de planificación y gestión espacial *sensu lato*.

## 2. La planificación de equipamientos: de la aproximación tradicional a las nuevas perspectivas conceptuales y metodológicas

En la práctica del planeamiento urbano y territorial, singularmente en España, el obligado abordaje de las dotaciones para la población cristalizó tradicionalmente en unas pautas metodológicas cuyos rasgos básicos podrían resumirse así:

- a) Elaboración de los estudios del plan en dos fases:
  1. Diagnóstico espacial de la situación dotacional (déficits), en buena medida sustentado en la aplicación de indicadores simples (estándares) que relacionan la demanda potencial con la oferta existente.
  2. Formulación de propuestas en la que se concretaban:
    - Los niveles deseables (cantidad) de dotaciones por zonas (expresados como suelo a reservar), basados en estándares normativos o magistrales, que relacionan superficie con la demanda potencial zonal.
    - La localización, usando criterios simples de accesibilidad (tiempo o distancia de acceso recomendado), compatibilidad entre usos del suelo (por las externalidades) y rasgos del emplazamiento.
- b) La metodología se sustentaba y era fuertemente dependiente del grado de pericia del equipo de planificación.
- c) Se usan escasamente los instrumentos y tecnologías que los avances científicos han ido desarrollando en las últimas décadas.

Libros como los de LEAL & RÍOS (1988) y HERNÁNDEZ (1997) son representativos de esa tradición. Para ciertos servicios (educación, salud, cultura, deportes, sociales, comercio, etc.), se fueron elaborando paralelamente, ahora por

especialistas sectoriales, otras obras de indudable valor para desarrollar los estudios encaminados a la toma de decisiones.

Sin desdoro de los méritos y eficacia de esa práctica tradicional, cabe reconocer que con el tiempo se mostró limitada en varios frentes: por un lado, las modernas perspectivas en el entendimiento de los servicios colectivos, que iluminaban nuevos aspectos, apenas se habían incorporado en su discurso. La enjundiosa obra de PINCH (1985) supone en este sentido un hito fundamental, por cuanto reconocía la pluralidad de entendimientos teóricos sobre los equipamientos para la población y sus implicaciones aplicadas (al respecto véase también MORENO, 1991). Adicionalmente, las recientes doctrinas sobre análisis, evaluación de políticas públicas, formación de decisiones colectivas y marketing público/social, particularmente desde el ámbito anglosajón (por ejemplo, KNOX, 1987; CROMPTON & LAMB, 1986), iban resaltando el importante papel que dichos servicios colectivos jugaban en la política local y territorial, desbordando los límites de la planificación espacial, y sustantivando ahora también la planificación sectorial, así como las funciones de gestión. Desde algunas de tales perspectivas o paradigmas concretos, se propugnaban nuevos métodos, como los cuantitativos, que estaban logrando significativos avances en las técnicas de apoyo a las decisiones espaciales sobre servicios para la población. Las obras de MASSAM (1975 y 1993) son conspicuos ejemplos pioneros de las propuestas emanadas al respecto desde el enfoque espacial y del bienestar. Finalmente, el aprovechamiento de las potencialidades de las nuevas tecnologías de la información, en particular los SIG, también había quedado rezagado (MORENO, 1993).

Descartando por inviable aquí discutir *in extenso* tales propuestas aplicadas, nos ceñiremos a recordar algunas de las cuestiones metodológicas básicas que la perspectiva cuantitativa y del bienestar han enunciado para la toma de decisiones sobre equipamientos colectivos (BOSQUE & MORENO, 2004). Básicamente ahora, las fases de intervención del experto, según la propuesta de MORENO (1995), podrían ser:

1. clarificar y establecer los objetivos de la política o plan,
2. diagnosticar la situación y determinar los problemas dotacionales,
3. definir y estimar la necesidad / demanda espacialmente,
4. sobre las bases anteriores, diseñar propuestas de distribución y funcionamiento

- territorial de los equipamientos, considerando explícitamente objetivos y restricciones, para someterlas luego a los decisores e implicados (*stakeholders*),
5. una vez aprobada la actuación y puesta en ejecución, realizar un seguimiento periódico de los resultados o logros.

De nuevo conviene advertir al lector que, por razones de espacio, este trabajo se centrará fundamentalmente en la etapa 4, con objeto de difundir las posibilidades que los modelos de localización ofrecen al experto e ilustrar con casos ejemplares sus utilidades.

### 3. El enfoque basado en la teoría y modelos de localización óptima

#### 3.1. Los MLO: unos potentes instrumentos para ayudar a la formación de decisiones en el planeamiento

Cabe situar en la década de los sesenta de la pasada centuria el momento del despegue de esta línea de indagación sobre herramientas de ayuda a la decisión, con una trayectoria que no ha dejado de fortalecerse (DEVERTEUIL, 2001). En última instancia, la meta buscada siempre por los diseñadores de los modelos estriba en, ante unos problemas bien definidos, identificar las mejores soluciones de ordenación espacial. Ello implica que la generación de propuestas se ha de basar, explícita y fundadamente, en principios y criterios socialmente asumidos, lo cual supone un rasgo meritorio a destacar, puesto que las diversas soluciones podrán compararse y valorarse con nitidez (por ejemplo, cuantitativamente) en cuanto a su proximidad a la mejor opción o a algún escenario ideal. Al técnico planificador obviamente se le planteará el reto, no menor, de establecer el procedimiento de resolución del problema, según las circunstancias, recursos, técnicas, tecnologías e información disponibles. En todo caso, es oportuno reseñar que las técnicas y tecnologías involucradas varían desde las relativamente asequibles, hasta otras bastante más complicadas, pero que en conjunto ofrecen unas excelentes posibilidades para el analista, si bien demandan el apoyo de computadores, dada la complejidad de resolver los problemas. Otro rasgo notable de estos modelos radica en su capacidad para generar y explorar soluciones, bajo requerimiento de los decisores, modificando criterios en un proceso de tipo iterativo. Por tal razón, se prestan bastante bien a acomodar la participación de distintos actores y

grupos de interés (e.g. ciudadanos) a quienes se puede consultar y suministrar resultados provisionales, para facilitar consensos o alternativas de compromiso. Finalmente, conviene recordar que estos modelos permiten su empleo bajo diferentes supuestos de análisis, evaluación o formulación de políticas y planes: determinar la ubicación óptima de equipamientos *ex novo*, ampliar una red de equipamientos, cerrar óptimamente algunos de ellos y comparar esquemas de localización pasados o propuestos con los correspondientes óptimos, para juzgar su bondad. Este conjunto de particularidades permiten anticipar que estas herramientas pueden contribuir eficazmente a las buenas prácticas de planificación, que en sociedades democráticas, participativas y responsables deben prevalecer.

### 3.2. La lógica de los MLO: cuestiones conceptuales

La cuestión de abordar decisiones atinentes a la distribución espacial de equipamientos, instalaciones, industrias, etc., es algo central en la planificación espacial, lo que explica que desde hace años se haya puesto en la agenda de los investigadores con logros fecundos. Ese trabajo ha permitido profundizar en la variada gama de procesos y cuestiones territoriales que suscitan las distintas actividades (número y tipo de objetivos a considerar en la decisión, carácter público o privado del servicio, instalaciones con función única o múltiple, conducta espacial de la demanda, limitación o no de la capacidad de los equipamientos, existencia de una estructura jerárquica de los mismos, carácter deseable o indeseable, consideración de la dimensión temporal en la búsqueda de soluciones, etc.), lo que ha permitido identificar distintos tipos de problemas de localización concretos primero, y formularlos como modelos matemáticos después, para su resolución (vid. en ese sentido DASKIN, 1995, cap. 1; PITCHER, 2000; SMITH & *al.*, 2007: 343-344).

Más en concreto, los denominados llamados modelos de localización-asignación, constituyen unas herramientas interesantes para resolver cuestiones en las que se cumplan algunas condiciones particulares, tales como las siguientes:

- Se consideran equipamientos que suministran bienes en lugares concretos del espacio.
- Ya sea la población, ya sea el proveedor, se debe realizar un desplazamiento hasta allí (o desde allí) para que se pueda prestar el servicio.

- El coste de recorrer esta separación entre instalaciones y población resulta de gran importancia en el uso del servicio.

Las instalaciones consideradas en estos modelos se puede decir que tienen dos facetas: una global: ofrecen un servicio o un bien al conjunto de la población o a un subconjunto de ella; otra local: la mera presencia de esa instalación modifica las condiciones del lugar donde se sitúa, apareciendo las denominadas externalidades positivas y/o negativas (efectos beneficiosos o perjudiciales sobre el entorno sin contrapartida económica).

Acceptando estas ideas básicas, los mencionados modelos tratan de optimizar la ubicación de estas instalaciones en relación a la población usuaria o afectada. Ahora bien, para poder hablar de óptimo, previamente es necesario considerar algunos principios fundamentales que deben guiar la búsqueda del mismo en términos de ubicación. Entre los principios que se mencionaron en la introducción han cobrado especial relevancia en los siguientes:

- La *eficiencia económica espacial*, que estaría relacionada con el mencionado papel global: ofrecer un buen servicio al conjunto de la población demandante del modo más barato posible. Con este principio se pretende minimizar los costes económicos que inciden en la prestación del servicio, y de acuerdo con lo que hemos indicado más arriba, uno de los costes más importantes es el de recorrido de la demanda hasta la oferta. Los modelos más conocidos pretenden encontrar una solución que minimice el coste de transporte global para alcanzar las instalaciones. Conviene subrayar que, indirectamente, ello converge con el principio de *sostenibilidad*, pues ello reduciría el consumo de energía, la emisión de contaminantes, el cansancio y quizá los accidentes.
- La *justicia espacial*: en este caso el tema determinante es el aspecto local que genera cada instalación; dado que aparecen externalidades de diverso tipo, parece oportuno que su reparto sea lo más equitativo entre la población, sin que unos se beneficien mucho y otros se vean perjudicados en exceso. Este principio intenta optimizar la posición de las instalaciones de modo que se repartan equitativamente las externalidades que generan.
- Finalmente la *eficiencia social espacial*: se relaciona con el hecho de que ciertas instalaciones de servicios generan claras e importantes externalidades negativas en su entorno, producen molestias y perjuicios a la población residente cerca de ellas, sin em-

bargo el papel global que tienen implica la imprescindible necesidad de crear estas instalaciones; de acuerdo con ello se plantea situarlas de manera que se optimice —en este caso, se minimicen— las molestias al conjunto de la población.

La consideración del tipo de externalidades producidas conduce a distinguir diferentes tipos de servicios e instalaciones. Una de las tipologías es la que diferencia entre instalaciones que ofrecen **servicios deseables** (es decir, que a la población no le importa, incluso le apetece, tenerlos cerca) y aquellas otras instalaciones **no deseables** que realizan una actividad que es molesta a su entorno inmediato (la población se ve perjudicada si las tiene en sus proximidades). En gran medida esta distinción responde al tipo de externalidades que genera cada instalación. Todas producen externalidades positivas (beneficios que la población recibe sin pagarlos) y negativas (perjuicios que la población sufre sin recibir compensación), pero en el caso de las instalaciones deseables las externalidades positivas superan claramente a las negativas (es el ejemplo de hospitales, escuelas, comercios, etc.). Las instalaciones no deseables son aquéllas en las que el balance de externalidades negativas supera con claridad, en su entorno próximo, a las positivas (e.g. vertederos de residuos urbanos, depuradoras de aguas, etc.).

A la hora de intentar determinar la localización óptima de un conjunto (o de una nueva instalación de servicio) el analista ha de considerar una serie de aspectos que inciden en la bondad o calidad del servicio que estas instalaciones ofrecen a la población. Algunos de los más trascendentes son:

- a) El número de instalaciones a localizar. Por ejemplo, parece claro que más instalaciones tienen mejores probabilidades de ofrecer un servicio más asequible que solo unas pocas.
- b) La posición geográfica de cada una de las instalaciones. Por supuesto, la ubicación de cada instalación determina la facilidad, mayor o menor, de acceso al servicio por parte de la población demandante.
- c) El tamaño de la oferta en cada instalación. Finalmente, puede ocurrir que un número de instalaciones amplio y bien situado no pueda ofrecer un servicio adecuado cuando, como ocurre en muchos casos, el tamaño de cada instalación no es suficiente para la demanda; de ese modo puede darse la situación de que una instalación rodeada de una amplia población demandante, que

tiene gran facilidad de acceso a la misma, no pueda ser atendida si la oferta existente es escasa para la demanda real.

Una solución puede optimizarse cambiando alguno de los tres elementos mencionados: el número, la posición o el tamaño/capacidad de acogida de cada equipamiento, asunto que el analista habrá de dilucidar con los decisores. Un procedimiento que busque una solución considerando a la vez las tres posibilidades tiene un número enorme de variaciones, lo que dificulta, imposibilita de hecho, resolverlo. Por ello es necesario plantear varios tipos más simples de problemas de localización tales como:

- A) Están dados (definidos y prefijados por el decisor) el número de instalaciones y la posición de los centros de oferta. Lo que se trata de optimizar es el tamaño de cada centro de oferta. Se trata de un problema simple de asignación. La solución es determinar a qué puntos de demanda sirve cada centro de oferta y, en función de ello, calcular su tamaño mínimo. Es una versión del problema del transporte en programación lineal. Una posible solución sencilla podría ser la siguiente: 1.º Asignar cada punto de demanda al centro de oferta más próximo, que se encuentre a menor distancia. 2.º Sumar la demanda asignada a cada centro de oferta. Esa suma es el tamaño mínimo que debe tener la instalación a colocar en ese punto. Esto resuelve el problema.
- B) Están dados (definidos por el decisor) el número de instalaciones y el tamaño de cada centro de oferta (o no existe límite superior a la oferta que se puede situar en cada centro). Se trata de optimizar la posición espacial de los equipamientos. Es el problema más clásico de localización. La solución de ese problema tendría estas dos facetas: 1.º Determinar la posición de los centros de oferta que optimice por ejemplo la eficiencia o la justicia espacial. Esta tarea es la que solventan los modelos de localización-asignación. 2.º Resolver el problema de la asignación para determinar a qué punto de demanda sirve cada uno de los centros de oferta escogidos y, de ese modo, determinar su tamaño concreto.

### 3.3. Cuestiones metodológicas

La voluntad de solucionar los problemas típicos antes mencionados ha conducido al desarrollo de una fértil línea de trabajo para construir

herramientas más o menos simples, adecuadas a cada caso; en esta línea de trabajo se han diseñado una gran variedad de modelos matemáticos de los que se pueden encontrar síntesis selectivas en OWEN & DASKIN (1998), MORENO (2004) y CARRIZOSA (2005). Relaciones más extensas de esa literatura, procedente sobre todo de la matemática, se pueden consultar, por ejemplo, en la página web de HALE<sup>1</sup>, que incluye más de tres mil referencias publicadas sobre el tema, en la del Grupo Europeo de Análisis de Localización<sup>2</sup> o en la de la Red temática española<sup>3</sup>, aparte de en *Computers and Operations Research*, revista especializada en esta parcela.

A efectos expositivos es factible clasificar muchos de los modelos generados en esta abundante bibliografía en función de los principios generales tenidos en cuenta en su formulación.

- 1.º Modelos de localización-asignación que optimizan la eficiencia económica espacial. De este tipo es uno de los primeros modelos que se formuló: el denominado Minisum/P-Mediano, su finalidad es la máxima eficiencia espacial y trata, esencialmente, de minimizar el coste de transporte total o medio existente entre oferta (instalaciones) y demanda (población) (MORENO, 2004: 149-153).
- 2.º Modelos que optimizan justicia espacial y la eficiencia económica. Otro conjunto de modelos, muy variado y numeroso, pretenden optimizar tanto la eficiencia económica, como la justicia espacial derivada del reparto de externalidades generadas por las propias instalaciones (MORENO, 2004: 156-159). Un ejemplo muy típico de este grupo serían los modelos de cobertura máxima (MORENO, 2004: 159-165); en ellos el máximo posible de la demanda se encuentra dentro de una distancia, a un lugar de oferta, fijada por el usuario, por lo tanto, si se puede establecer una distancia, a partir de la cual el uso de ese servicio no resulta rentable, dado el coste del traslado para conseguirlo (el denominado alcance espacial del bien o servicio), el modelo proporciona una solución óptima, ya que el máximo posible de la demanda estaría dentro de ese alcance espacial. Al mismo tiempo se consigue un valor bajo de coste total de transporte. El modelo tiene en cuenta de alguna manera tanto la eficiencia económica, como la justicia ya que pocos, los menos posibles, deman-

dantes se encuentran mal servidos (es decir fuera del alcance espacial del servicio). Otra variedad de este tipo de modelos, que resultan muy convenientes, son los que amplían el Minisum, añadiendo restricciones de distancia para la posición de la oferta: Modelo p-mediano con restricción de máxima distancia. Ahora ningún usuario puede estar situado a mayor distancia de un centro de oferta que una distancia prefijada por el decisor; al mismo tiempo el modelo obtiene la suma menor de los costes de transporte. Entre otras posibles, una sugestiva variante es el modelo de cobertura máxima con restricción de alejamiento: el máximo posible de la demanda se ha de encontrar dentro de una distancia fijada por el decisor, pero además ningún usuario debe estar a una distancia mayor de otro valor establecido.

- 3.º Modelos que optimizan la eficiencia social espacial. La mayoría de las aplicaciones usuales de los modelos mencionados hasta ahora se refieren a bienes/servicios deseables, como escuelas, hospitales, etc. Para las instalaciones no deseables, sin embargo, los modelos más usuales se plantean minimizar las molestias y daños que estas instalaciones generan, es decir se centran en optimizar el principio de eficiencia social (BOSQUE & FRANCO, 1995; MORENO, 1999a). Un buen ejemplo es el modelo denominado Maxisum, en este caso el objetivo radica en maximizar la suma de las distancias entre instalaciones y todos los centros poblados, justamente a la inversa del modelo Minisum. Existen otras variantes de esta misma idea, por ejemplo, el modelo Maximin, que pretende la maximización de la distancia mínima entre cada instalación y el centro poblado más próximo, lo cual responde al principio de justicia espacial. Un enfoque con parecida pretensión, pero distinta concreción, es el de los modelos de localización basados en "límites mínimos" o de anticobertura: la población debe estar situada, en su totalidad o en su mayor parte, fuera de una distancia prefijada en torno a cada instalación.
- 4.º Modelos que tienen en cuenta las dos eficiencias (económica y social): Otro enfoque es el de los modelos que simultáneamente optimizan las dos formas de eficiencia que se han mencionado, tanto la económica como la social. Nuevamente este tipo de modelos son adecuados

<sup>1</sup> [www.uhd.edu/~halet](http://www.uhd.edu/~halet)  
<sup>2</sup> <http://ewgla.fc.ul.pt/>

<sup>3</sup> <http://www-eio.upc.es/~elena/indexRL.html> (consultado en agosto de 2010).

para instalaciones no deseables, en concreto aquéllas que deben recibir productos (por ejemplo, residuos urbanos), cuyo coste de transporte es importante y se debe intentar minimizarlo, pero, simultáneamente, producen molestias y riesgos a la población cercana, que también se debe intentar minimizar. En esta línea un ejemplo sencillo sería el modelo Minmaxsum, que busca soluciones que, a la vez, minimicen las distancias desde los productores de residuos y maximicen la separación a la población afectada (BOSQUE & al., 2006).

La formulación de modelos de localización es un campo abierto y que continuamente produce nuevos resultados; no es tampoco muy difícil, para usuarios experimentados, formular su propia versión del modelo que se ajuste de manera precisa al caso que necesita resolver; los modelos descritos son únicamente una muestra pequeña de las posibilidades que el tema ofrece y en la abundante literatura se puede encontrar inspiración para desarrollos propios.

### 3.4. Las herramientas de resolución: algoritmos y software disponibles

El enunciado del modelo es sólo el primer paso, para luego tratar de resolverlo, cuestión ésta que comentaremos sucintamente ahora. En primer lugar, es necesario indicar que lo usual es formular modelos de tipo discreto, lo que quiere decir que el modelo debe seleccionar, de entre un conjunto de lugares candidatos preestablecido, aquéllos que cumplen el óptimo de acuerdo con el objetivo de dicho modelo. En segundo lugar, las posibilidades de resolución de este tipo de modelos son muy variadas y las podemos clasificar en varios grupos:

A) Enumeración exhaustiva de todas las soluciones posibles. Ello sólo es viable en caso de un problema de tamaño reducido (un conjunto no muy grande de lugares candidatos y de instalaciones a localizar) en el que el número de soluciones a explorar no sea grande, pues en otro caso los cálculos serían inabordable. Para bastantes ejemplos es posible usar esta posibilidad, que es muy fácil de organizar usando, por ejemplo, una simple hoja de cálculo en un ordenador.

B) Técnicas matemáticas de programación. Otra posibilidad más potente es el uso de las capacidades de la programación lineal entera, que ahora es fácilmente asequible de diversas formas y que también permite resolver problemas relativamente grandes. En CARRIZOSA (2005) se puede encontrar una revisión detallada de la cuestión.

C) Algoritmos heurísticos y metaheurísticos. Por último otra posibilidad, para casos de problemas muy grandes y que no pueden ser resueltos, por el excesivo tiempo de cálculo que requerirían, es el empleo de algoritmos heurísticos que no conducen necesariamente a la solución óptima, aunque sí eventualmente. En general se trata de ejecutar una secuencia sistemática de cambios en una solución inicial provisional hasta alcanzar otra mejor, mediante búsqueda de tipo prueba y error. Se suele tratar de búsquedas "locales", porque se constriñen a un espacio solución "próximo" al de la solución actual. Con ellos es factible abordar problemas de gran tamaño y en un tiempo de ejecución razonable. Las metaheurísticas, por su parte, aluden a algoritmos algo más complejos que desbordan la búsqueda local, en aras de lograr el óptimo global. También en este terreno existe una amplia variedad de desarrollos, uno de los más antiguos pero que sigue teniendo una importante calidad es el denominado algoritmo de intercambio (TEITZ & BART, 1968), que se describe con detalle en MORENO (2004). En esa misma referencia se discuten otros algoritmos heurísticos de resolución, con sus ventajas y sus inconvenientes. En la página WEB de *Library of Location Algorithms*<sup>4</sup> se puede encontrar una amplia lista de este tipo de algoritmos y las herramientas informáticas para su resolución. Otras panorámicas sintéticas recientes de estas técnicas algorítmicas se hallan en las obras de COLOMÉ (2002: 107-113) y SMITH & al. (2007: 345-354 y 369-379).

Los diversos procedimientos mencionados se pueden encontrar ya, más o menos elaborados, en herramientas informáticas asequibles con facilidad, por ejemplo, las hojas de cálculo (EXCEL y similares), facilitan obtener la enumeración exhaustiva de soluciones, incluso pueden incluir una rutina de programación lineal (el SOLVER de EXCEL, por ejemplo), que también es fácil de emplear para encontrar soluciones con esta técnica matemática para casos sencillos. Por otra parte, se cuenta con los denominados optimizadores matemáticos, del que un buen ejem-

<sup>4</sup> <http://www.mathematik.uni-kl.de/~lola/>

plo sería CPLEX y el lenguaje de modelado AMPL (CARRIZOSA, 2005; AMPL, s.f.). Todas estas técnicas son muy versátiles y con un poco de conocimiento y de experiencia se pueden usar para resolver los modelos más clásicos y también los propios que un usuario elabore.

Existen, además, diversos programas informáticos que resuelven algunos de los modelos antes comentados y otros similares: por ejemplo, en el libro de DASKIN (1995) se adjunta un programa informático SITATION que permite tratar un número importante de los modelos descritos en el citado texto (SITATION, 1995)<sup>5</sup>; otro ejemplo, mucho más amistoso, es el programa FLOWMAP que, junto a otras interesantes capacidades de análisis espacial, resuelve diferentes modelos de localización recibiendo los datos del formato SHP de ARC/VIEW. Este programa y sus posibles aplicaciones se describen en MORENO & BUZAI (2008).

Finalmente, otra posibilidad es partir de un SIG general y ampliar sus funciones para añadirle capacidades de resolución de modelos de localización-asignación obteniendo la información necesaria de la base de datos del SIG y empleando las funciones cartográficas y gráficas del SIG para elaborar mapas de resultados. En esta línea se puede mencionar el programa LOCALIZA, construido a partir de la versión IDRISI for WINDOWS de este conocido software SIG (BOSQUE & al., 2007; PALM, 2004) o las funciones de resolución de algunos modelos de localización que fueron añadidas en una de las últimas versiones del SIG ARC/INFO. Otra posibilidad en este sentido es la herramienta disponible en la página Web de Library of Location Algorithms (LoLA, s.f.), que permite conectar las herramientas de este sitio al programa ARC/VIEW.

El programa LOCALIZA ha sido elaborado dentro de la perspectiva de construir, a partir de un SIG, un verdadero sistema de ayuda a la decisión espacial en cuestiones de localización óptima de instalaciones. Este planteamiento es, consideramos, el futuro más prometedor del desarrollo de software para tratar los problemas de localización óptima (vid. BOSQUE & al., 2000).

Ahora bien, resuelto el modelo ¿qué resultados de interés arroja el análisis? En general, se suele obtener una serie de datos numéricos y gráficos, que permiten entender y valorar la solución al problema planteado; básicamente son los siguientes:

- A) Indicadores numéricos del grado de optimización alcanzado en el objetivo establecido, por ejemplo si se trataba de la eficiencia económica, el valor global de la distancia que toda la demanda debe recorrer para poder obtener el servicio/bien estudiado. También se obtienen valores de la variabilidad de esa magnitud (i. e. de la distancia entre cada punto de población y el centro de oferta más próximo) entre los distintos lugares donde reside la población, lo que permite valorar la justicia espacial de la solución encontrada. Un ejemplo se muestra en la tabla de la FIG. 1, donde la solución encontrada es más eficiente y más justa: supone un ahorro significativo para la administración y una situación más equitativa para los diversos profesores afectados.
- B) El mapa que muestra la ubicación de los lugares seleccionados por el modelo como solución óptima (FIG. 2).

FIG. 1/ Comparación de la situación real y un escenario óptimo para los Colegios Rurales Agrupados en Guadalajara

| Indicador   | Solución óptima Minisum             | Situación actual |
|---|-------------------------------------|------------------|
| Costes totales (metros recorridos)                              | 343.362<br>(6% menos que el actual) | 362.167          |
| Desviación típica de los desplazamientos de profesores (metros) | 41.215<br>(6% menos que el actual)  | 43.472           |

Fuente: LUZ, 2004

## MINISUM: Cartografía de las instalaciones seleccionadas

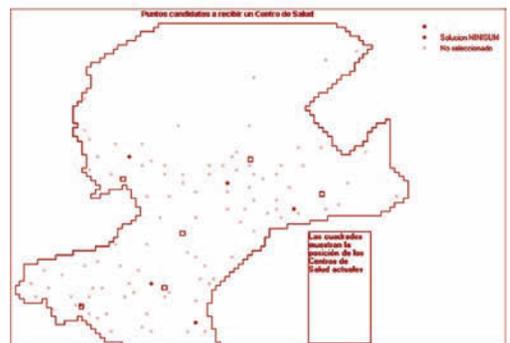


FIG. 2/ Ejemplo de solución Minisum de un problema obtenida con LOCALIZA

Fuente: Elaboración propia

<sup>5</sup> [http://sitemaker.umich.edu/msdaskin/software#SITATION\\_Software](http://sitemaker.umich.edu/msdaskin/software#SITATION_Software) (consultado en agosto de 2010).

- C) El mapa de las áreas de servicio, indicando qué lugares de demanda son atendidos por cada equipamiento óptimo seleccionado por el modelo (FIG. 3).

### Mapa de la relación entre oferta y demanda: Mapa araña

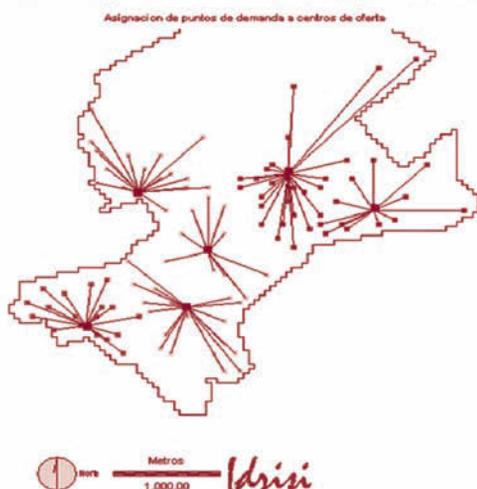


FIG. 3/ Ejemplo de mapa "araña" de áreas de servicio obtenido con LOCALIZA

Fuente: Elaboración propia

## 4. Aplicaciones de los modelos de localización en la planificación urbana y territorial de equipamientos

Con la finalidad de dar a conocer la contribución y utilidades de los MLO en el planeamiento, en los apartados siguientes se ha seleccionado y resumido un amplio número de trabajos ejemplares, relativos a una variada gama de servicios, de suerte que se valore la polivalencia de estas herramientas.

### 4.1. Equipamientos educativos

En este tipo de servicios las iniciativas para impulsar el uso de modelos de optimización espacial en labores de planificación son relativamente amplias y antiguas, habiéndose abordado así mismo los diversos niveles educativos. PITARCH (2000) ofrece una breve panorámica sobre aplicaciones en este campo.

En el nivel preescolar, FATFAT-VAN BOXEL & PEETERS (1982) trataron el caso de las guarderías infantiles en Sambreville (Bélgica), utilizando el modelo p-mediano. En enseñanza primaria, BAHRENBERG (1981) formuló un modelo de dispersión máxima de la oferta, que intentaba conseguir la máxima difusión territorial de los centros de primaria en ámbitos rurales en declive de la zona de Rotemburg/Wümme (Baja Sajonia, Alemania), sujeta a una serie de condiciones (entre ellas, un número mínimo de alumnos —umbral— y una distancia máxima a la escuela de 10 km). MORENO (1988) y MORENO & LÓPEZ (1989) por su parte, en sendos estudios sobre la parte N y SE de la Comunidad Autónoma de Madrid, abordaron una potencial reordenación territorial de los centros de enseñanza general básica (EGB). En el primero de ellos se utilizó el modelo p-mediano (para definir varios escenarios, posteriormente comparados mediante evaluación multicriterio), en el segundo se aplicó un total de seis conocidos modelos (FIG. 4), para comparar después las distintas soluciones alcanzadas mediante diversos indicadores de eficiencia y equidad espacial. LUZ (2004) investigó la organización espacial de la enseñanza primaria en una provincia de demanda escasa y dispersa (Guadalajara, España) para evaluar (mediante los modelos p-mediano y de cobertura máxima) en qué medida la distribución actual de los colegios rurales agrupados (CRA) padecía de baja eficiencia y también de desigualdad. Otras aplicaciones sobre enseñanza primaria se hallan en DEKEERSMAECKER & THOMAS (1982) para la ciudad de Etterbeek (Bélgica) y en BRUNO & ANDERSEN (1982) para el distrito Southern California (Estados Unidos) y BUZAI & BAXENDALE (2008) para Luján (Argentina).

En la enseñanza secundaria, HALL (1973) abordó un pionero y minucioso estudio para rediseñar las "high schools" en una parte de la ciudad de Chicago, para lo cual formuló un modelo de localización-asignación que buscaba minimizar los desplazamientos de los alumnos, pero a la vez incorporando restricciones alusivas a la capacidad de los centros y al equilibrio interracial (porcentaje de estudiantes negros y blancos). SUTCLIFFE & al. (1984) adoptaron la técnica de la programación por objetivos ("goal programming"), buscando optimizar con seis criterios (ponderados) las áreas de servicio para los centros de enseñanza secundaria en Reading (Berkshire, Reino Unido) y TEWARI & JENA (1987) estudiaron la ubicación óptima de los centros de enseñanza secundaria en el distrito Bellary del estado de Karnataka (India) mediante el modelo de cobertura máxima (dentro de un radio de 8 km).

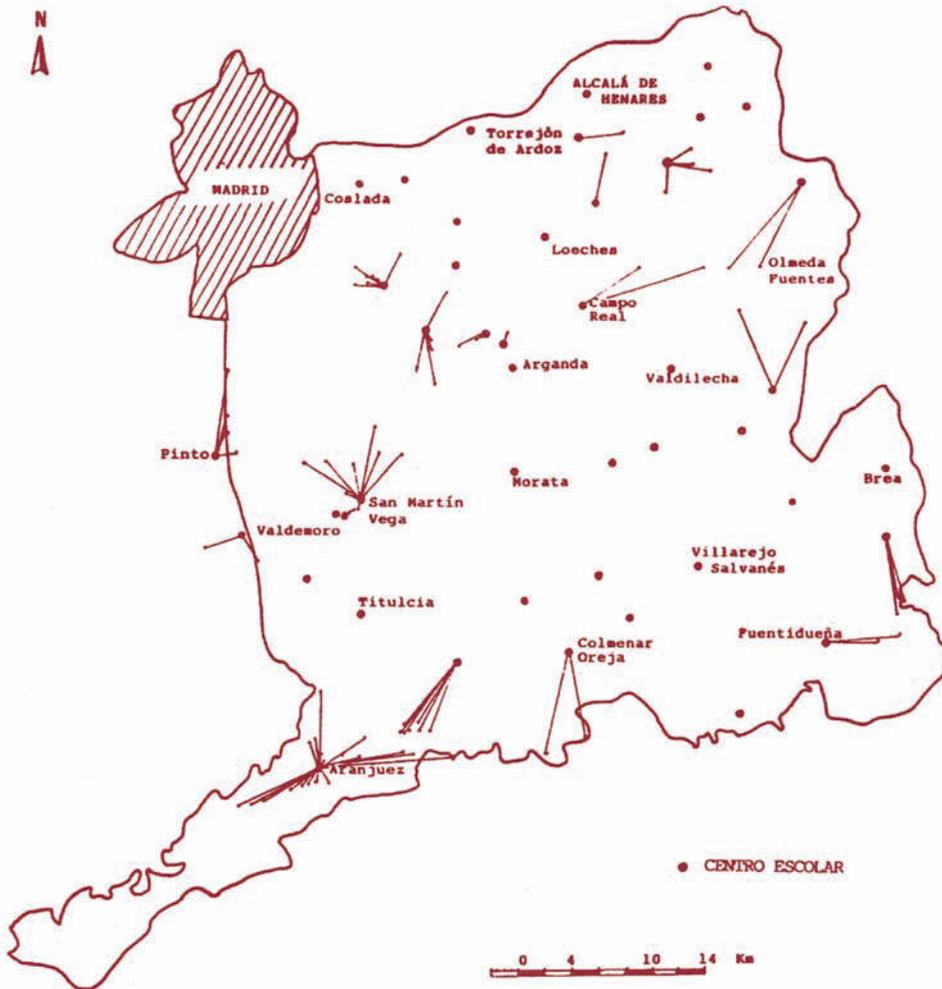


FIG 4/ Ejemplo de escenario que minimiza el número de centros de EGB, con cobertura dentro de 11 km y movilidad supralocal similar a la existente, para el SE de Madrid

Fuente: MORENO & LÓPEZ, 1989

En equipamientos universitarios cabe mencionar el trabajo de MORRILL & BEYERS (1991) quienes, tras identificar zonas metropolitanas infradotadas y demanda universitaria latente en el estado de Washington (EEUU), investigaron y determinaron la ubicación de dos nuevos campus, recurriendo al modelo p-mediano. Otra aplicación interesante es la de KOROGLU (1992) para proponer nuevas sedes universitarias en Turquía.

#### 4.2. Equipamientos de salud

La trascendencia social de este tipo de dotaciones explica que haya sido otro de los campos preferentes y antiguos (vid. FRIES, 1976) en el que se han focalizado los esfuerzos para

aplicar modelos de localización, de cara a ayudar a una toma de decisiones más acertada y rigurosa. Diversos autores han realizado revistas panorámicas al respecto, mereciendo citarse a CLARKE & WILSON (1986), THOMAS (1992: 258-266) Y SERRA & RAMALHINHO (1998); se cuenta también con obras monográficas, tales como el número especial de la revista *Sistemi Urbani* (1986: 1) o el libro de SERRA (1999); el *International Journal of Health Geographics* (<http://www.ij-healthgeographics.com/>) publica frecuentes artículos en esta línea.

Hace ya años, FISHER & RUSHTON (1979) resumieron varios estudios de caso en países menos desarrollados (India e Indonesia), realizados usando modelos de localización-asignación, en

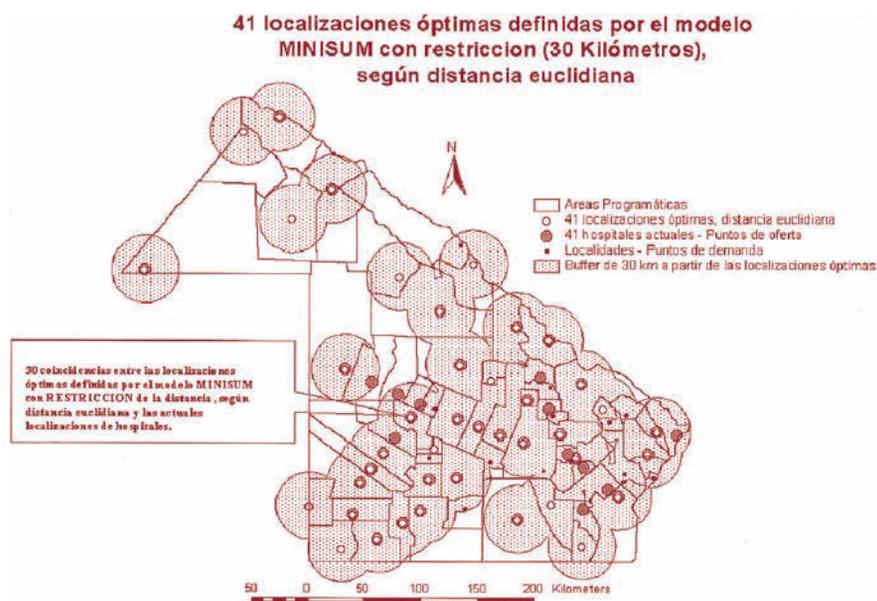


FIG. 5/ Posición óptima de los hospitales en El Chaco, Argentina

Fuente: RAMÍREZ, 2004

los que se contemplaron diversos servicios, entre ellos los de salud, de cara a proponer una regionalización funcional más eficiente en el marco de los planes para el desarrollo territorial. El ámbito igualmente regional, y para ordenación de hospitales sobre todo, se ha tratado en trabajos más recientes de RAMÍREZ (2002) sobre El Chaco, Argentina (FIG. 5), de MESSINA & *al.* (2006) sobre Michigan (EEUU) y de FUENZALIDA (2009) y FUENZALIDA & MORENO (2010) sobre la región de Valparaíso (Chile); en todos ellos se adoptó el modelo de cobertura máxima. PRAT & *al.* (2009) modelaron y evaluaron la accesibilidad espacial para la organización sanitaria territorial en Cataluña.

Las aplicaciones relevantes en el campo de la salud también conciernen al caso de servicios especializados concretos, con cuya distribución espacial se busca lograr el mejor acceso, eficiencia económica y efectividad de la prestación. En ese sentido cabe citar el trabajo de BACH & HOBERG (1985) quienes, en los albores de la difusión de los tomógrafos para el diagnóstico radiológico (TAC), propusieron un modelo de localización óptima, considerando costes de transporte y costes de operación, para su despliegue en la región de Baden-Württemberg (Alemania). En una línea similar, ROSS & *al.* (1994) evaluaron la distribución espacial de los servicios de mamografía para la prevención del cáncer de mama en la parte este de Ontario (Canadá) y formularon pro-

puestas correctoras para las zonas infradotadas y más inaccesibles.

Un tipo de servicios especialmente sensibles, los de urgencia, fueron objeto de atención por parte de NEVEN (1982), en un estudio centrado sobre la provincia de Luxemburgo (Bélgica), que buscaba comparar la situación actual con la óptima; ésta fue definida con ayuda del modelo p-mediano. Por su parte, HALSETH & ROSENBERG (1991) trataron con el modelo de cobertura máxima la organización territorial del servicio de ambulancias en el área de Kingston (Ontario, Canadá),

SCHWEIKHART & SMITH-DANIELS (1993), diseñaron un modelo para dilucidar la localización de las instalaciones y el "mix" de servicios de salud (atención primaria y especialidades), de acuerdo con la estrategia de una organización privada, que buscaba minimizar costes y maximizar la cuota de mercado en un entorno competitivo.

En Polonia un grupo de investigadores han aplicado varios modelos de optimización espacial multiobjetivo al campo de los servicios de salud, usando un software allí desarrollado (DINAS). Entre tales trabajos cabe referir uno sobre reorganización de las áreas de salud (MALCZEWSKI & OGRYCAK, 1988), considerando como objetivos la minimización de la distancia media de los desplazamientos de los pacientes a los hospitales (eficiencia), la minimización la distancia

máxima recorrida (equidad) y la homogeneización de las áreas de los diferentes servicios (simplicidad en gestión). En otro caso el problema versó sobre el incremento del número de hospitales pediátricos en Varsovia (MALCZEWSKI & OGRYCZAK, 1990), de acuerdo con cinco objetivos a optimizar (costes de viaje de la población, satisfacción de los usuarios, costes de inversión, costes de operación y polución en los emplazamientos elegibles).

### 4.3. Equipamientos comerciales

Sin lugar a dudas, los equipamientos destinados a la distribución al por menor de bienes son otros de los que históricamente han concitado más interés de los investigadores, por lo que se cuenta con una amplia bibliografía y experiencia aplicada en diversos frentes: localización de establecimientos, delimitación de áreas de mercado, evaluación de la competencia espacial, conducta espacial de los consumidores, etc., que en conjunto suponen un riquísimo corpus teórico, metodológico y técnico, que cubre tanto la perspectiva de la ordenación urbano-territorial, como la puramente empresarial. Las contribuciones de los modelos matemáticos espaciales en estas parcelas se han revelado ya como decisivas para ayudar a una toma de decisiones más acertada, sin desdoro de las limitaciones, también conocidas, de los mismos.

En una época como la actual, en la que las estrategias empresariales son extraordinariamente competitivas, algunas instalaciones comerciales (o mixtas) son enormes y las implicaciones e impactos de la inserción de los comercios en el urbanismo y la economía urbana, en la conducta espacial y movilidad de los consumidores y en las infraestructuras de transporte (y por extensión en la sostenibilidad) son así mismo profundas, resulta evidente la necesidad de que la planificación espacial pública aborde el tema con los mejores instrumentos de diagnóstico y previsión.

Desde hace tiempo se cuenta con obras y manuales de referencia que identifican y sistematizan los planteamientos y métodos que incorporan sustantivamente modelos de localización comercial, tales como los de GHOSH & MCLAFFERTY (1987), FIELD & MACGREGOR (1987: 103-125), WRIGLEY (1988), ESPAÑA, MINISTERIO DE COMERCIO Y TURISMO (1995), MENDES & THEMIDO (2004) y CLIQUET (2006: 137-186). Remitimos a ellos, pues siguen siendo recomendables para el planificador, por exponer de manera formalizada muchas claves de la lógica

territorial del comercio, de suerte que puedan realizarse predicciones y simulaciones espaciales, bien definidas y con una sustentación sólida, en las tareas de formación de decisiones.

Entre las aplicaciones mencionaremos solo algunas para fines de ilustración. Hace ya años GOODCHILD & NORONHA (1987), tras la fusión de dos empresas de gasolineras en London (Canadá), abordaron la reordenación de la red para optimizarla. Tras estimar la demanda espacial (considerando la población y el tráfico), aplicaron un modelo de localización-asignación para simular diversos escenarios óptimos, según diferentes estrategias de marketing. BERRY & PARR (1988: 186-198) estudiaron el impacto previsible de un nuevo centro comercial en Chicago. Tras calibrar el modelo, se estimó el gasto que se captaría por el nuevo centro en cada subzona, en detrimento de los otros centros, y se predijo las nuevas áreas de mercado de forma probabilista (FIG. 6). CHASCO & VICÉNS (1998) resumen el trabajo desarrollado desde hace tiempo en la elaboración desde 1992 del *Atlas de áreas comerciales de España*, usando varios conocidos modelos, con los que se logra definir y cartografiar esos ámbitos funcionales que desvelan una organización del territorio de notable trascendencia. En su tesis doctoral, COLOMÉ (2002) ha investigado el caso de los supermercados en dos ámbitos urbanos (Milton Keynes, Reino Unido, y Barcelona, España), empleando modelos

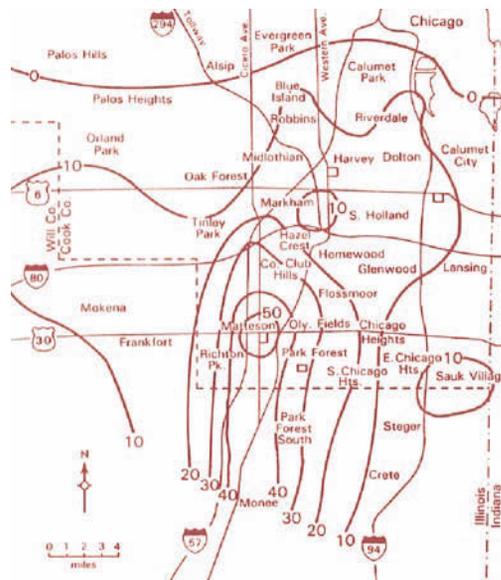


FIG. 6/ Tasas de penetración (%) en el mercado previstas para el nuevo centro Lincoln Mall, Chicago

Fuente: BERRY & PARR, 1988



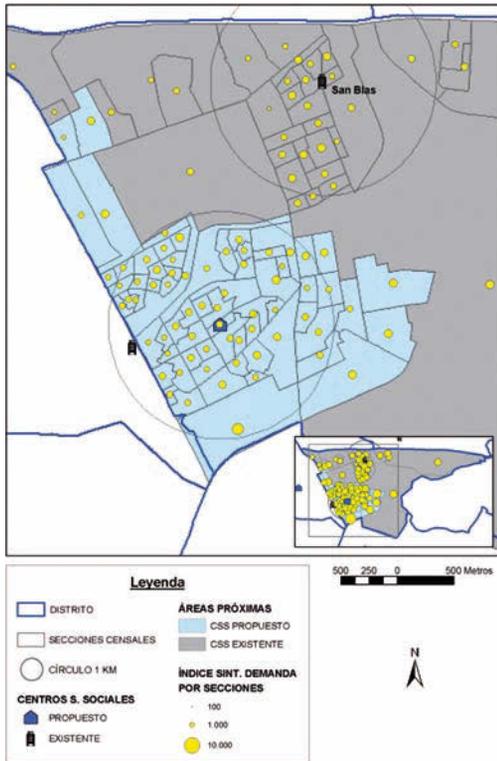


FIG. 8/ CSS existente y nuevo propuesto, círculos próximos de un km, indicador de demanda por secciones censales y áreas de servicio para los CSS, distrito de San Blas, Madrid

Fuente: MORENO, 2003



FIG. 9/ Localización óptima de dos zonas refugio, con los edificios asignados (en color) y las rutas primaria (continua) y secundaria (discontinua) de acceso a las mismas en Coimbra

Fuente: ALÇADA-ALMEIDA & al., 2009b

rial constituye una prioridad para la salvaguarda de bienes y personas. Junto con la preocupación por la eficiencia, de cara a maximizar los logros en el acceso a los lugares con algún incidente o emergencia, cabe subrayar que también el principio de sostenibilidad (i. e. preservación de recursos valiosos y vidas) resulta significativo y ha de invocarse a la hora de planificarlos. Existen estudios desde hace tiempo sobre la localización de servicios de incendios, que aplican modelos de optimización. Puede mencionarse al respecto el de RICHARD (1982) sobre los servicios contra incendios en la provincia de Luxemburgo (Bélgica); el autor generó un amplio conjunto de escenarios, buscando, de acuerdo con las directrices legales, configurar grupos de municipios para una organización de dichos servicios. A tal fin se adoptó el modelo p-mediano y el supuesto de incrementos en el número de grupos (de 10 a 20), cada uno de los cuales tendría una sede central del servicio. COBES & COMPANYS (1991) han abordado otro caso de servicios de incendios en

una zona de Barcelona. En materia de servicios de seguridad, THOMAS (1991) esbozó un ensayo con el modelo p-mediano para comprobar la bondad de la división en unidades territoriales operativas de la gendarmería belga comparándola con la partición obtenida con dicho modelo. La detección de los desajustes permitiría propiciar medidas para corregirlos, en aras de mejorar la eficacia en el funcionamiento del servicio policial. En la definición de lugares refugio y rutas de evacuación urgente ante catástrofes cabe reseñar el reciente trabajo de ALÇADA-ALMEIDA & al. (2009b) sobre la ciudad de Coimbra (FIG. 9).

#### 4.7. Instalaciones y equipamientos indeseables

Junto con los anteriores tipos de dotaciones y servicios, en la ordenación del territorio se ha de afrontar también el reto de encontrar lugares que acojan a actividades que, siendo necesarias, generan un importante cúmulo

de externalidades negativas. Tales actividades conflictivas, por razones varias (imagen negativa, polución emitida, riesgo, degradación generada en el entorno, etc.), resultan de difícil ubicación, lo que supone un problema de gestión compleja por las administraciones públicas. Ese problema ha concitado la atención de no pocos investigadores desde los años setenta del siglo pasado, los cuales, con aproximaciones varias, han explorado la manera de formalizar el proceso de determinar localizaciones aceptables u óptimas para ese tipo de instalaciones. Junto con la conocida evaluación multicriterio, otra de las líneas metodológicas ensayadas para ayudar a las decisiones ha sido la de los MLO. Referencias más amplias y revisiones de las aplicaciones en ese campo se pueden hallar, entre otros, en MURRAY & *al.* (1998) y MORENO (2004: 80-85).

Frente a las contribuciones más antiguas que consideraban un objetivo simple y centrado en la reducción de las externalidades negativas, por ejemplo, minimizar la población expuesta, maximizar la distancia mínima, etc. (vid. MORENO, 1999a), las recientes aportaciones sobre el particular están adoptando un enfoque multiobjetivo, considerando un mayor número de aspectos y criterios a optimizar. Entre éstas cabe reseñar, como ejemplos representativos, las siguientes: MEDINA & CERDA (2008) han elaborado un modelo para la ubicación de plantas de tratamiento de residuos urbanos en el área metropolitana de Santiago (Chile). En el trabajo de ALÇADA-ALMEIDA & *al.* (2009a) se presenta una metodología para desarrollar análisis de localización de instalaciones indeseables, como los incineradores de materiales peligrosos. Ante el problematismo y conflictividad suscitados en Portugal para construir dos de tales instalaciones, elaboraron un modelo multiobjetivo que contempla estos criterios: minimizar los costes de inversión total, minimizar los costes totales de operación, minimizar el impacto total (medio por persona), minimizar el impacto medio máximo en las parroquias (*"freguesias"*, divisiones administrativas intramunicipales) y minimizar el máximo impacto individual (FIG. 10). La difusión espacial de la polución atmosférica fue estimada con un modelo gaussiano. Como se aprecia, los principios de eficiencia y equidad están explícitamente incorporados en el modelo. Otro ejemplo es el caso de las plantas de tratamiento de residuos peligrosos en la región de Madrid, analizado por GÓMEZ (2004), la FIG. 11 muestra la solución obtenida.

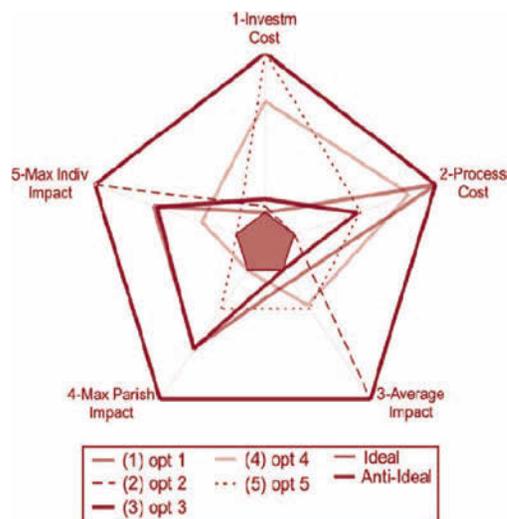


FIG. 10/ Diagrama mostrando los logros de cinco alternativas respecto a los valores mínimos ideales (pentágono gris interior) y a los máximos o peores (pentágono exterior), obtenidas con un modelo de optimización multiobjetivo

Fuente: ALÇADA-ALMEIDA & *al.*, 2009a

#### 4.8. Otros servicios

Las dotaciones que han merecido la atención de la comunidad, académica sobre todo, como campo de aplicación de los modelos de localización no se agotan con la relación previa, sino que también lo han sido algunos otros, y generalmente de forma bastante rigurosa. Así por ejemplo, la distribución espacial de los conocidos servicios de correos y sus oficinas fueron objeto de análisis en trabajos desarrollados hace años en el Institute de Géographie de la Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Bélgica). PAR-TOUNE y PEETERS (1980) investigaron la ubicación óptima de las oficinas de correos en Lieja, recurriendo al modelo p-mediano con restricción de distancia máxima, pero incorporando la particularidad de que la demanda fue ponderada según la frecuencia empírica de utilización del servicio. Por su parte, THOMAS (1986) abordó la organización espacial del servicio postal en Namur (Bélgica), mediante una amplia investigación en la que primero se analizó y modeló la conducta espacial de la demanda (estableciendo incluso segmentos en ella) y luego se acometió la determinación de las ubicaciones óptimas, tanto de las oficinas de correos, como de la central, recurriendo principalmente al modelo p-mediano, con y sin restricción de distancia máxima.

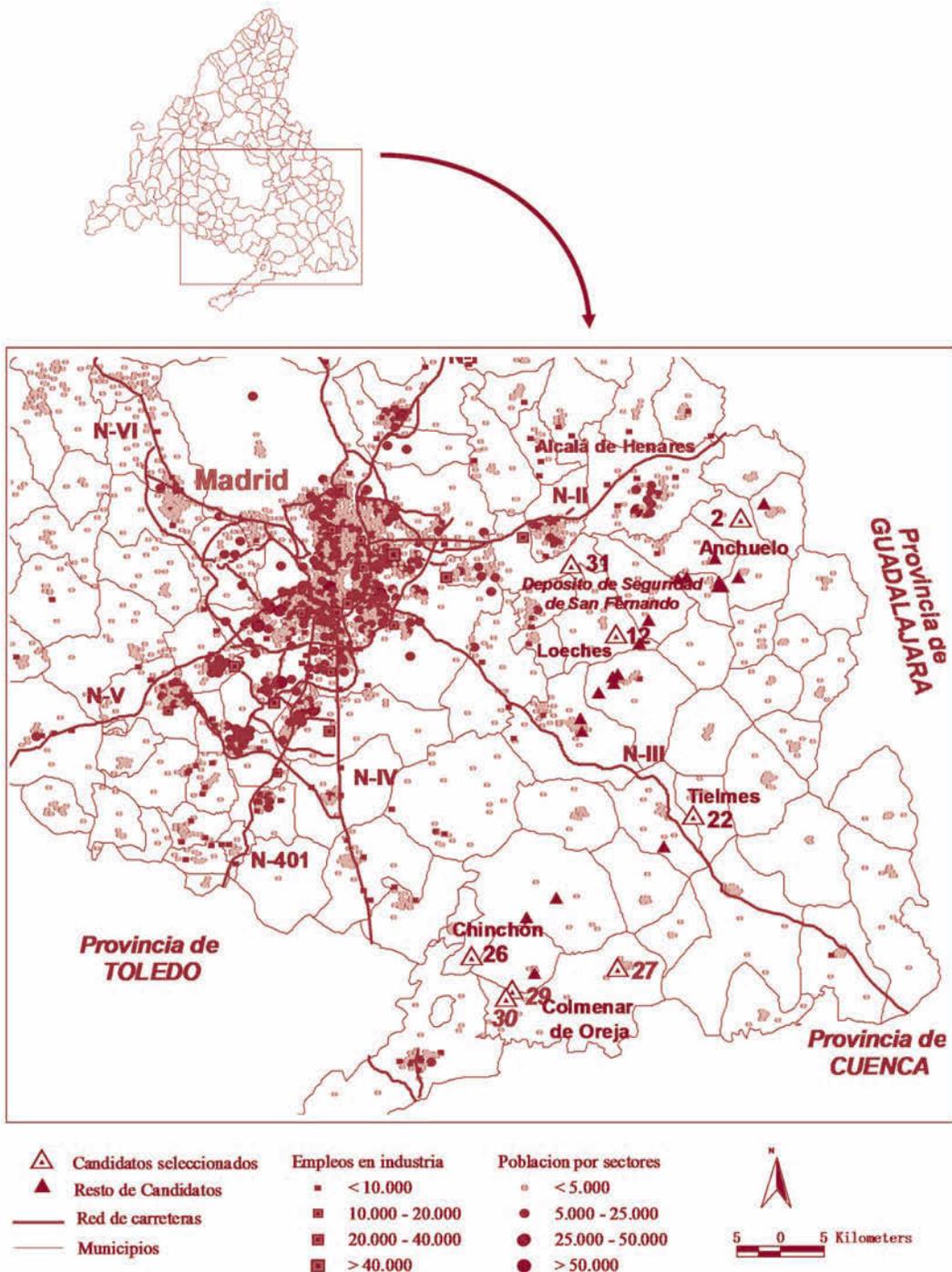


FIG. 11/ Soluciones con los modelos Maxisum y Minmaxsum para instalaciones no deseables en Madrid

Fuente: GÓMEZ, 2004

## 5. Consideraciones finales

Los esfuerzos de investigación metodológica versando sobre herramientas de ayuda a las decisiones territoriales han ido produciendo avances muy positivos en las últimas décadas, cuya transferencia a la práctica planificadora resulta insoslayable y prioritaria. En este artículo se ha tratado uno de esos frentes, atingente a los modelos de localización, en el que se han desarrollado técnicas de indudable potencia y herramientas informáticas eficaces y capaces de tratar problemas antaño inabordables.

Los MLO ofrecen unas excelentes potencialidades para generar escenarios ágilmente, lo que abre la puerta a explorar alternativas de manera flexible y bajo demanda de los decisores. En esencia, hacen posible formular diseños con criterios explícitos y controlables, facilitando, por ejemplo, la confrontación y evaluación de la situación real o de determinadas propuestas con los esquemas óptimos. Procede advertir que, aunque no pocos de estos modelos en realidad usan solo uno o unos pocos criterios para determinar el óptimo (de manera, pues, algo simple), los hay también con capacidad multiobjetivo, y por tanto más completos y realistas.

En general, estas herramientas cuantitativas, ineludiblemente vinculadas a los SIG, ofrecen notorias ventajas, entre ellas: a) ponen a disposición del experto los recursos técnicos más

sobresalientes para elaborar los planes, b) generan un conocimiento más amplio, riguroso y de calidad, mejorando así la información a disposición de los agentes implicados en el proceso de planificación y, por ende, ayudando a acertar más en las decisiones, c) permiten controlar mejor el papel de los expertos, y d) pueden contribuir eficazmente a acercarse a un proceso de planificación más participativo, como hace tiempo se postuló sin ambages.

Naturalmente los MLO no están exentos de limitaciones y dificultades, entre ellas: son técnicas y tecnologías a veces de cierta complejidad, lo que obliga a formar recursos humanos en esa parcela; la comunicación de los expertos con los decisores precisará de una labor pedagógica explicativa para su correcta comprensión; los modelos siempre simplifican, por lo que, en muchos casos, deben usarse para identificar óptimos parciales y no entenderse como garantes indiscutibles de óptimos globales.

En todo caso, las muchas experiencias de aplicación ya existentes permiten recomendar inequívocamente la utilización de los mismos, siempre que sean pertinentes. Pero si aún ese aval no convenciese, podríamos preguntarnos: ¿admitiríamos, como pacientes, que los médicos no utilizaran las mejores herramientas para el diagnóstico, previsión y seguimiento de nuestras dolencias? La respuesta, obvia, no podría ser sino la misma... también para los problemas y decisiones territoriales y ambientales.

## 6. Bibliografía

- ALÇADA-ALMEIDA, L. & J. COUTINHO-RODRIGUES & J. CURRENT (2009a): "A multiobjective modeling approach to locating incinerators", *Socio-Economic Planning Sciences*, 43: 111-120.
- ALÇADA-ALMEIDA, L. & L. TRALHÃO & L. SANTOS & J. COUTINHO-RODRIGUES (2009b): "A multiobjective approach to locate emergency shelters and identify evacuation routes in urban areas", *Geographical Analysis*, 41 (1): 9-29.
- AMPL (s. f.): [www.ampl.com](http://www.ampl.com).
- BACH, L. & R. HOBERG (1985): "A planning model for regional systems of CT scanners", *Socio-Economic Planning Sciences*, 19 (3): 189-199.
- BAHRENBURG, G. (1981): "Providing an adequate social infrastructure in rural areas: an application of a maximal supply dispersion model to elementary school planning in Rotenburg/Wümme (FRG)", *Environment and Planning A*, 13: 1515-1527.
- BERRY, B. & J. PARR (1988): *Market centers and retail location*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- BOSQUE SENDRA, J. (2004): "El uso de los SIG para localizar equipamientos e instalaciones", en J. BOSQUE SENDRA & A. MORENO JIMÉNEZ (coords.): 103-120, Editorial RA-MA, Madrid.
- BOSQUE SENDRA, J. & S. FRANCO MAASS (1995): "Modelos de localización-asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables", *Serie Geográfica*, 5: 97-114. [http://oaimadrono.cs.urjc.es/madrimasd/single\\_page.jsp?id=oa:dSPACE.uah.es:10017/1042&currentSession=917601778](http://oaimadrono.cs.urjc.es/madrimasd/single_page.jsp?id=oa:dSPACE.uah.es:10017/1042&currentSession=917601778).
- BOSQUE SENDRA, J. & M. GÓMEZ DELGADO & A. MORENO JIMÉNEZ & F. DAL POZZO (2000): "Hacia un sistema de ayuda a la decisión espacial para la localización de equipamientos", *Estudios Geográficos*, 241: 567-598. [http://www.geogra.uah.es/joaquin/pdf/SADE\\_LOCALizacion.pdf](http://www.geogra.uah.es/joaquin/pdf/SADE_LOCALizacion.pdf)
- BOSQUE SENDRA, J. & M. GÓMEZ DELGADO & F. PALM ROJAS (2006): "Un nuevo modelo para localizar instalaciones no deseables: ventajas derivadas de la integración de modelos de localización-asignación y SIG", *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, 39: 53-68. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2372290>
- BOSQUE SENDRA, J. & A. MORENO JIMÉNEZ (coords.) (2004): *Sistemas de información geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*, RA-MA, Madrid.

- BOSQUE SENDRA, J. & F. PALM & M. GÓMEZ (2007): "LOCALIZA: una herramienta SIG para resolver problemas de localización óptima", en *I Jornadas de SIG libre*, SIGTE, Girona, 16 p. <http://www.sig-te.udg.es/jornadassiglibre2007/comun/2pdf/9.pdf>
- BRUNO, J. E. & P. ANDERSEN (1982): "Analytical methods for planning educational facilities in an era of declining enrollments", *Socio-Economic Planning Sciences*, 16 (3): 121-131.
- BUZAI, G. D. & C. A. BAXENDALE (2008): "Modelos de localización-asignación aplicados a servicios públicos urbanos: análisis espacial de escuelas EGB en la ciudad de Luján", en A. MORENO JIMÉNEZ & G. D. BUZAI (coords.): <http://www.gesigproeg.com.ar/documentos/libros/Moreno-Buzai-2008.rar>
- CARRIZOSA, E. (2005): "Algunas aportaciones de la investigación operativa a los problemas de localización", *GeoFocus (artículos)*, 5: 268-277. [http://geofocus.rediris.es/2005/Articulo14\\_2005.pdf](http://geofocus.rediris.es/2005/Articulo14_2005.pdf)
- CHASCO YRIGROYEN, C. & J. VICÉNS OTERO (1998): "Spatial interaction models applied to the design of retail trade areas", *38th Congress of the European Regional Science Association*. <http://ideas.repec.org/p/wiw/wiwsa/ersa98p81.html>
- CLARKE, M. & A. G. WILSON (1986): "Developments in planning models for health care policy analysis", en M. PACIONE (ed.): *Medical geography: progress and prospects*, Croom Helm, Beckenham: 248-283.
- CLIQUET, G. (ed.) (2006): *Geomarketing: Methods and strategies in spatial marketing*, ISTE, Newport Beach (CA).
- COBES, A. & R. COMPANYS (1991): "Modelo de localización de servicios de extinción de incendios", *Qüestió*, 15 (2): 199-210. <http://www.raco.cat/index.php/Questio/article/view/26578/26412>
- COLE, K. J. & A. C. GATRELL, (1986): "Public libraries in Salford: a geographical analysis of provision and access", *Environment and Planning A*, 18: 253-268.
- COLOMÉ PERALES, R. (2002): *Consumer choice in competitive location models*, Universitat Pompeu Fabra, Barcelona. [http://www.tdr.cesca.es/TE-SIS\\_UPF/AVAILABLE/TDX-0227103-135727/trcp1de1.pdf](http://www.tdr.cesca.es/TE-SIS_UPF/AVAILABLE/TDX-0227103-135727/trcp1de1.pdf)
- CROMPTON, J. & CH. LAMB (1986): *Marketing government and social services*. John Wiley & Sons, Nueva York.
- DASKIN, M. S. (1995): *Network and discrete location. Models, algorithms and applications*, John Wiley & Sons, Nueva York.
- DEKEERSMAECKER, M. L. & I. THOMAS (1982): "Un modèle de localisation des écoles primaires en milieu urbain: l'exemple d'Etterbeek (Belgique)", *Récherches Economiques de Louvain*, 48 (3-4): 283-300.
- DEVERTEUIL, G. (2001): "Reconsidering the legacy of urban public facility location theory in human geography", *Progress in Human Geography*, 24, 1: 47-69.
- ESPAÑA. MINISTERIO DE COMERCIO Y TURISMO (1995): *Análisis territorial del comercio minorista, viabilidad e impacto de la implantación de establecimientos minoristas (pautas para el pequeño comerciante)*, Dirección General de Comercio Interior, Madrid.
- FATFAT-VAN BOXEL, A. & D. PEETERS (1982): "Quelques propositions pour l'implantation d'un service communal de garde d'enfants de 0-3 ans à Sambreville (Belgique)", *Récherches Economiques de Louvain*, 48 (3-4): 265-281.
- FIELD, B. & B. MACGREGOR (1987): *Forecasting techniques for urban and regional planning*, Hutchinson, Londres.
- FISHER, H. B. & G. RUSHTON (1979): "Spatial efficiency of service locations and the regional development process", *Papers of the Regional Science Association*, 42: 83-97.
- FRIES, B. (1976): "Bibliography of operations research in health-care systems", *Operations Research*, 24 (5): 801-814.
- FUENZALIDA, M. A. (2009): *Análisis de desigualdades territoriales desde principios de equidad y eficiencia. Metodología y aplicación a la región de Valparaíso (Chile)*, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid. [http://digitool-uam.greendata.es/exlibris/dtl/d3\\_1/apache\\_media/21972.pdf](http://digitool-uam.greendata.es/exlibris/dtl/d3_1/apache_media/21972.pdf)
- & A. MORENO JIMÉNEZ, A. (2010): "Diseño con SIG de la localización óptima de centros de atención primaria de salud, discriminando según estatus socioeconómico", *XIV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, Universidad de Sevilla y Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica, 13 p.
- GHOSH, A. & S. L. MCLAFFERTY (1987): *Location strategies for retail and service firms*, Lexington Books, Lexington.
- GÓMEZ DELGADO, M. (2004): "Localización óptima de plantas de tratamiento de residuos peligrosos en la comunidad de Madrid", en J. BOSQUE SENDRA & A. MORENO JIMÉNEZ (coords): RA-MA, Madrid: 307-333.
- GOODCHILD, M. F. & P.J. BOOTH (1980): "Location and allocation of recreation facilities: public swimming pools in London, Ontario", *Ontario Geography*, 15: 35-51.
- GOODCHILD, M. & V. NORONHA (1987): "Location allocation and impulsive shopping: the case of gasoline retailing", en A. GHOSH & G. RUSHTON (eds.): *Spatial analysis and location-allocation models*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York: 121-136.
- HALL, F. (1973): *Locational criteria for high schools*, Dep. of Geography, The University of Chicago, Chicago.
- HALSETH, G. & M. ROSENBERG (1991): "Locating emergency medical services in small town and rural settings", *Socio-Economic Planning Sciences*, 25 (4): 295-304.
- HERNÁNDEZ AJA, A. (dir.) (1997): *La ciudad de los ciudadanos*, Ministerio de Fomento, Dirección General de la Vivienda, la Arquitectura y el Urbanismo, Madrid.
- KNOX, P. (1987): "Collective consumption and socio-spatial change", en M. PACIONE (ed.): *Social geography. Progress and prospects*, Croom Helm, Londres: 164-200.
- KOROGLU, D. (1992): "Possible locations for new universities in Turkey", *Socio-Economic Planning Sciences*, 26 (1): 27-42.
- LEAL, J. & J. RIOS (1988): *Los espacios colectivos en la ciudad. Planificación de usos y servicios públicos*, MOPU-ITUR, Madrid.

- LUZ MEDEL, C. DE (2004): "El problema de las escuelas rurales en Guadalajara (España). Uso de los modelos de localización-asignación para tratar los colegios rurales agrupados", en J. BOSQUE SENDRA & A. MORENO JIMÉNEZ (coords.): *Sistemas de información geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*, RA-MA, Madrid: 247-278.
- MALCZEWSKI, J. & W. OGRYCZAK (1990): "An interactive approach to the central facility location problem: Lpediatric hospitals in Warsaw", *Geographical Anal.*, 22: 244-258.
- MALCZEWSKI, J. & W. OGRYCZAK (1988): "A Multi-objective Approach to the Reorganization of Health Services Areas: A Case Study", *Environment and Planning, A*, 20: 1461-1470.
- MASSAM, B. (1975): *Location and space in social administration*, Edward Arnold, Londres.
- (1993): *The right place. Shared responsibility and the location of public facilities*, Longman, Harlow.
- MEDINA TAPIA, M. & J. CERDA TRONCOSO (2008): "Modelo de localización óptima de actividades no deseables aplicado a los residuos sólidos de la región metropolitana", *Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería*, 16 (2): 211-219.
- MENDES, A. B. & I. H. THEMIDO (2004): "Multi-outlet retail site location assessment", *International Transactions in Operational Research*, 11: 1-18.
- MESSINA, J. P. & A. M. SHORTRIDGE & R. E. GROOP & P. VARNAKOVIDA & M. J. FINN (2006): "Evaluating Michigan's community hospital access: spatial methods for decision support", *International Journal of Health Geographics*, 5 (42). <http://www.ij-healthgeographics.com/content/5/1/42>
- MORENO JIMÉNEZ, A. (1988): "Una metodología de planificación de equipamientos educativos en medio rural: aplicación al nordeste de la Comunidad de Madrid", *Ciudad y Territorio*, 75: 119-129.
- (1991): "Una panorámica de las perspectivas teóricas sobre los servicios colectivos", *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 12: 33-58. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1317531>
- (1992): "Los sistemas de información geográfica en la planificación de servicios municipales", 1.º Congreso. *Los sistemas de información geográfica en la gestión territorial*, AESIGYT, Madrid: 377-391.
- (1993): "Evaluación de políticas y gestión de servicios locales con sistemas de información geográfica", *Tecnimap-93, III Jornadas sobre Tecnologías de la Información para la Modernización de las Administraciones Públicas*, vol. I: 379-388. MAP, etc., Granada.
- (1995): "Planificación y gestión de servicios a la población desde la perspectiva territorial: algunas propuestas metodológicas", *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 20: 115-134. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1318497>
- (1999a): "En busca de la localización óptima para instalaciones perjudiciales: propuesta de modelos y resolución con SIG", *Boletín de la AGE*, 27: 99-116. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1319316>
- (1999b): "La información y el análisis geodemográfico al servicio de la planificación de servicios para la población mayor", en A. MORENO & N. GÓMEZ & C. VÁZQUEZ: Madrid, Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid: 163-188. [http://www.madrid.org/iestadis/gazeta/publicaciones/mono\\_t4no.htm](http://www.madrid.org/iestadis/gazeta/publicaciones/mono_t4no.htm)
- (dir.) (2003): *La distribución geográfica de los centros de servicios sociales en el municipio de Madrid: diagnóstico y recomendaciones*, UAM, Madrid (policopiado).
- (2004): "Modelos de localización óptima de instalaciones y equipamientos", en J. BOSQUE SENDRA & A. MORENO JIMÉNEZ (coord.): RA-MA, Madrid: 147-198.
- (2008): "Los servicios colectivos y el desarrollo territorial: una reconsideración conceptual y metodológica actual", en A. MORENO JIMÉNEZ & G. D. BUZAI (coord.): Universidad Autónoma de Madrid y Universidad Nacional de Luján, Madrid: 5-22. <http://www.gesig-proeg.com.ar/documentos/libros/Moreno-Buzai-2008.rar>
- MORENO JIMÉNEZ, A. & G. D. BUZAI (coords.) (2008): *Análisis y planificación de servicios colectivos con sistemas de información geográfica*, UAM-UNLU, Madrid: 158 p. <http://www.gesig-proeg.com.ar/documentos/libros/Moreno-Buzai-2008.rar>
- MORENO JIMÉNEZ, A. & N. GÓMEZ & C. VÁZQUEZ (2008): *Población y espacio en la Comunidad de Madrid. Análisis y aplicaciones a nivel microgeográfico*, Madrid, Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid. [http://www.madrid.org/iestadis/gazeta/publicaciones/mono\\_t4no.htm](http://www.madrid.org/iestadis/gazeta/publicaciones/mono_t4no.htm)
- MORENO JIMÉNEZ, A. & M. A. LÓPEZ DE LOS MOZOS (1989): "Organización espacial del sistema de centros de enseñanza general básica en el suroeste de Madrid. Un análisis comparativo de modelos de localización-asignación", *Revista de Educación*, 290: 407-442.
- MORENO JIMÉNEZ, A. & J. VINUESA ANGULO (2009): "Desequilibrios y reequilibrios intrametropolitanos: principios de evaluación y metodología de análisis", *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, LXI, 160: 233-262.
- MORRILL, R. & W. BEYERS (1991): "Locating branch campuses for the University of Washington", *Journal of Geography in Higher Education*, 15 (2): 161-171.
- MURRAY, A. T. & R. L. CHURCH & R. A. GERRARD & W. S. TSUI (1998): "Impact models for siting undesirable facilities", *Papers in Regional Science: The Journal of the RSAI*, 77 (1): 19-36.
- NEVEN, D. (1982): "La localisation des services d'urgence dans la province de Luxembourg", *Recherches Economiques de Louvain*, 48 (3-4): 247-264.
- OWEN, S. H. & M. S. DASKIN (1998): "Strategic facility location: A review", *European Journal of Operational Research*, 111 (3): 423-447.
- PALM, F. (2004): "La estructura general del programa LOCALIZA", en J. BOSQUE SENDRA & A. MORENO JIMÉNEZ (coords.): *Sistemas de información geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*, RA-MA, Madrid: 123-152.

- PARTOUNE, CH. & D. PEETERS (1980): "Un modèle de localisation des bureaux de poste", *Annales d'Economie Publique, Sociale et Coopérative*, 68 (1-2): 53-68.
- PINCH, S. (1985): *Cities and services. The geography of collective consumption*, Routledge and Kegan Paul, Londres.
- PITARCH GARRIDO, M. D. (2000): "Los modelos de planificación espacial de los servicios públicos. El caso de los servicios educativos", *Cuadernos de Geografía*, 67-68: 119-136. [http://www.uv.es/cuadernosgeo/CG67\\_68\\_119\\_136.pdf](http://www.uv.es/cuadernosgeo/CG67_68_119_136.pdf)
- PRAT, E. & L. PESQUER & M. OLIVET & J. ALOY & J. FUSTE & X. PONS (2009): "Metodología para el análisis de accesibilidad a los recursos sanitarios: el caso de Cataluña", *GeoFocus (Artículos)*, 9: 250-269. [http://geofocus.rediris.es/2009/Articulo12\\_2009.pdf](http://geofocus.rediris.es/2009/Articulo12_2009.pdf)
- RAMÍREZ, L. (2002): "¿Dónde localizar hospitales públicos? Las nuevas tecnologías —SIG— como herramientas de apoyo a la planificación territorial. Un caso de estudio aplicado a la provincia del Chaco-Argentina", *Serie Geográfica*, 10: 21-130. <http://www.geogra.uah.es/inicio/revista/pdfrevista10/OK-08-Revista-Articulo-Liliana%20Hospitales-Argentina%20-121%20a%20130.pdf>
- (2004): "Localización de equipamientos deseables. Los hospitales de la provincia de Chaco (Argentina)", en J. BOSQUE SENDRA & A. MORENO JIMÉNEZ (eds.): *Sistemas de información geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*, RA-MA, Madrid: 207-245.
- RICHARD, D. (1982): "La localisation des services d'incendie dans la province de Luxembourg: un rapport préliminaire", *Recherches Economiques de Louvain*, 48 (3-4): 219-246.
- ROBERTSON, I. M. L. (1978): "Planning the location of recreation centres in an urban area: a case study of Glasgow", *Regional Studies*, 12: 419-427.
- ROSS, N. & M. ROSENBERG & D. PROSS (1994): "Siting a women's health facility: a location-allocation study of breast cancer screening services in Eastern Ontario", *The Canadian Geographer-Le Géographe Canadien*, 38 (2): 150-161.
- SERRA, D. (1999): *Métodos cuantitativos para la toma de decisiones, con aplicaciones en el ámbito sanitario*, Documenta, Fundación BBV, Madrid.
- & H. RAMALHINHO (1998): "La contribución de la investigación operativa a la mejora de la eficiencia en el ámbito sanitario", *Papeles de Economía*, 76: 216-227.
- SMITH, M. DE & M. GOODCHILD & P. LONGLEY (2007): *Geospatial analysis. A comprehensive guide to principles, techniques and software tools*, 2.<sup>a</sup> ed., Matador, Leicester.
- SCHWEIKHART, S. B. & V. L. SMITH-DANIELS (1993): "Location and service mix decisions for a managed health care network", *Socio-Economic Planning Sciences*, 27 (4): 289-302.
- SUTCLIFFE, CH. & J. BOARD & P. CHESHIRE (1984): "Goal programming and allocating children to secondary schools in Reading", *Journal of the Operational Research Society*, 35 (8): 719-730.
- TEITZ, M. & P. BART (1968): "Heuristic methods for estimating the generalized vertex median of a weighted graph", *Operations Research*, 16: 955-961.
- TEWARI, V. K. & S. JENA (1987): "High schools decision making in rural India and location-allocation models", en A. GHOSH & G. RUSHTON (eds.): *Spatial analysis and location-allocation models*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York: 137-162.
- THOMAS, I. (1986): *La localisation optimale des services publics. Une méthode opérationnelle et son application au service postal*, Libraire-Editeur, Louvain-la-Neuve, Cabay.
- (1991): "Science régionale et aide à la décision en matière de gestion policière", *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 1: 7-22.
- THOMAS, R. (1992): *Geomedical systems: Intervention and control*, Routledge, Londres.
- WRIGLEY, N. (ed.) (1988): *Store choice, store location and market analysis*, Routledge, Londres.