

# Modelos de localización–asignación aplicados a servicios públicos urbanos: análisis espacial de Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS) en la ciudad de Luján, Argentina

Modelos de localização–alocação aplicados a serviços públicos urbanos: análise espacial de Centros de Atenção Primária de Saúde (CAPS) na cidade de Luján, Argentina

Location–allocation Models Applied to Urban Public Services: Spatial Analysis of Primary Care Service centers (PCSC) in the City of Luján, Argentina

**Gustavo D. Buzai\***

Universidad Nacional de Luján, Argentina

## Resumen

Las actuales tecnologías digitales y, particularmente, la asociación entre los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE) han generado importantes posibilidades para el tratamiento de la información espacial. Este trabajo aborda los adelantos que se producen en el campo de la Geografía de los servicios en relación con el uso de modelos de localización–asignación. Por lo tanto, se presentan aspectos teóricos del problema analizado; cuestiones metodológicas estandarizadas para su resolución mediante el uso de SIG+SADE; y un caso de aplicación relacionado al análisis locacional de centros de atención primaria de salud (CAPS) en la ciudad de Luján, Argentina.

**Palabras clave:** análisis espacial, modelos de localización–asignación. SADE, servicios públicos urbanos, SIG.

## Resumo

As atuais tecnologias digitais e particularmente a associação entre os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e os Sistemas de Ajuda a Decisão Espacial (SADE) têm gerado importantes possibilidades para o tratamento da informação espacial. Este trabalho aborda os avanços que se produzem no campo da Geografia dos serviços em relação com o uso de modelos de localização–alocação. Portanto apresentam-se aspectos teóricos do problema analisado, questões metodológicas estandarizadas para sua resolução mediante o uso de SIG+SADE; e um caso de aplicação relacionado à análise de locação de centros de atenção primária de saúde (CAPS) na cidade de Luján, Argentina.

**Palavras-chave:** análise espacial, modelos de localização–alocação, SADE, serviços públicos urbanos, SIG.

## Abstract

Current digital technologies and particularly the association of Geographical Information Systems (GIS) with Spatial Decision Support Systems (SDSS) have been able to generate important possibilities in the spatial treatment of information. This article discusses the advances made with respect to Location-Allocation models in the study field known as Geography of Services. It presents theoretical aspects of the analyzed problem, standardized methodological matters for its resolution with GIS+SDSS, and an application case related to the locational analysis of primary care service centers (PCSC) in the city of Luján, Argentina.

**Keywords:** spatial analysis, location-allocation models, SDSS, urban public services, GIS.

RECIBIDO: 11 DE JULIO DEL 2011. ACEPTADO: 31 DE AGOSTO DEL 2011.

Artículo de investigación sobre la aplicación de los sistemas de información geográfica (SIG) y los Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE) en el análisis locacional de centros de atención primaria de salud (CAPS) en la ciudad de Luján, Argentina.

\* Dirección postal: Universidad Nacional de Luján, Departamento de Ciencias Sociales, Programa de Estudios Geográficos (PROEG). Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG). Ruta Nacional n.º 5 y Av. Constitución (6700) Luján, Argentina.  
Correo electrónico: buzai@uolsinectis.com.ar  
Web: <http://www.gesig-proeg.com.ar>

## Introducción

La aplicación de procedimientos de análisis geográficos orientados a la planificación de servicios se presenta, en la actualidad, como un campo de investigación de gran dinamismo. Se trata del uso de los Sistemas de Información Geográfica —en adelante, SIG— y los Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial —en adelante, SADE—. Los modelos de mayor aplicación han quedado establecidos desde un punto de vista conceptual y práctico desde hace aproximadamente cuatro décadas (Revelle y Swain 1970, Austin 1974, McAllister 1976), pero solo hasta la década de 1990 han comenzado lentamente a difundirse en el ambiente digital a través de software destinado al apoyo en la toma de decisiones (Densham 1991).

La estandarización digital de procedimientos ha evolucionado a la par de los aspectos socio-económicos tanto en el aumento de la diversificación de servicios básicos a la población como en la aparición de un modelo postfordista, en el cual tienen un papel importante las pequeñas y medianas empresas proveedoras de servicios a la industria y a otras empresas de mayor envergadura. Por lo tanto, la ubicación espacial de los servicios resulta ser de gran importancia en muchos aspectos y, particularmente, en el ámbito de los servicios públicos apunta a mejorar los niveles de equidad espacial para la población.

De esta manera, el presente trabajo puede considerarse una etapa posterior a la exploración de los datos espaciales y tiene como objetivo plantear una estandarización de los aspectos teórico-metodológicos de la localización espacial a fin de apoyar, desde la geografía, el proceso de toma de decisiones al momento de instalar, reubicar o ampliar un número determinado de instalaciones de servicios públicos urbanos. En este caso se trata de la localización espacial de un servicio público, la salud, que genera externalidades positivas y al cual se debe garantizar un acceso eficiente y equitativa a través de los Centros de Atención Primaria de Salud —en adelante, CAPS— en la ciudad de Luján, Argentina.

## Aspectos conceptuales

### Modelos de localización–asignación

Los estudios geográficos cuentan con una amplia tradición en la generación de teorías y modelos generales para el análisis de las actividades humanas. Particularmente, en cuanto a las actividades terciarias, es posible

considerar como un primer referente la “teoría de los lugares centrales” propuesta por Walter Christaller en 1933; ésta funciona como un modelo de localización espacial óptima de núcleos urbanos a nivel regional. En su formulación se presentan los conceptos de “umbral” y “alcance” como base deductiva a partir de la cual pueden ser explicadas ciertas regularidades empíricas presentes en la sistematización realizada por Beavon (1980).

Desde un punto de vista modelístico, las localizaciones de los puntos de oferta y demanda potencial, de distancias ideales o reales, y de los costos de desplazamientos de fricción espacial, se presentan como los principales factores que producen diferentes configuraciones territoriales en el sistema. La línea de investigación asociada se enfoca en la actividad terciaria y, evolutivamente, avanza a un cambio de escala desde el análisis de los centros urbanos (regional) hacia los centros intraurbanos (local). Esta perspectiva se cristaliza en la consideración de una “geografía del marketing”, término presentado por Berry (1971) y ampliamente analizado en sus capacidades actuales por una serie de autores (Moreno Jiménez 1995, Moreno Jiménez 2004, Bosque Sendra 2004, Bosque Sendra y Moreno Jiménez 2004, Salado García 2004, Moreno Jiménez y Buzai 2008).

De esta manera, la teoría de la localización comienza a contemplar problemáticas en las instalaciones de servicios y genera un doble objetivo en los estudios: por un lado, encontrar la localización óptima, y por otro, determinar la asignación de demanda a dichos centros. A partir de esta doble necesidad de resolución se desarrollan los modelos de localización-asignación.

En términos generales cabe indicar, de acuerdo a Ramírez y Bosque Sendra (2001), que los modelos de localización-asignación responden a las siguientes características:

- (a) son modelos matemáticos ya que se considera a este lenguaje como apto para captar la realidad;
- (b) son modelos meso-espaciales porque los aspectos a resolver se encuentran claramente delimitados en un territorio, y
- (c) son modelos normativos porque se debe buscar la mejor solución a un determinado problema.

En síntesis, estos modelos intentan evaluar las localizaciones actuales de los centros de servicio con base en la distribución de la demanda y la generación de alternativas para lograr una distribución espacial más eficiente y/o equitativa. Además, buscan las ubicaciones óptimas de localización y determinan las mejores vinculaciones de la demanda, entendida en términos de asignación.

Si bien la aplicación de modelos de localización-asignación se realiza con base en el entorno de los SIG, estos modelos han sido enmarcados en los SADE<sup>1</sup> que de acuerdo con Bosque Sendra et ál. (2000) tienen como objetivo brindar el entorno de hardware y software necesario para facilitar al usuario la toma de decisiones sobre cuestiones espaciales. En este sentido debe facilitar la exploración del problema, la generación de variadas soluciones y la evaluación de las diferentes alternativas. De otra parte, Densham (1991) presenta dos niveles bien diferenciados en cuanto a la aplicación de un SADE: el del usuario que toma decisiones a través de la generación, evaluación y elección de alternativas de solución; y el de la interfase del sistema, la cual logra una interacción multidireccional entre la base de datos y sus posibilidades de reportes numéricos y gráficos.

### Orientación de la localización-asignación

Desde un punto de vista general, la orientación brindada al modelo de localización-asignación está influenciada por la naturaleza del servicio. Si el servicio es privado, básicamente apuntará a mejorar su eficiencia espacial; en cambio, si es público, intentará mejorar su equidad espacial. Ambos se refieren al mejoramiento de parámetros globales para el acceso al servicio, los cuales son la suma del total de desplazamientos, valores de accesibilidad o diferencias entre valores extremos. Por otra parte, se presenta una notoria diferencia si los equipamientos a instalar son deseables (beneficiosos) o no deseables (perjudiciales). Mientras que los primeros generan básicamente externalidades positivas (hospitales, escuelas, centros culturales, etc.), los segundos generan externalidades negativas (cementeros, cárceles, basurales, etc.). Teniendo en cuenta las consideraciones previas, los SADE contemplan diferentes posibilidades de aplicación metodológica según sea el objetivo que deba perseguir la localización de los centros de servicio.

1 Los Sistemas de Ayuda a la Decisión (DSS, *Decision Support Systems*) han tenido un desarrollo inicial en las ciencias económicas y empresariales en las décadas de 1950 y 1960, pero solo se difundieron de manera amplia durante las dos décadas siguientes. Así mismo, el concepto de Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SDSS, *Spatial Decision Support Systems*) ha evolucionado de forma conjunta, hasta constituir el sistema *Geodata Analysis and Display Systems* (GADS) desarrollado por IBM en la década de 1970. A partir de la segunda mitad de la década de 1980 han comenzado a difundirse como herramientas para la ampliación de la capacidad de la tecnología SIG. Algunos aspectos con relación a esta línea han sido desarrollados por Malczewski (1997).

## Desarrollo metodológico

### La búsqueda de sitios candidatos y sus combinaciones

La aplicación de modelos de localización-asignación implica contar con una oferta distribuida de manera puntual, y una demanda que con motivos de simplificación puede ser asignada a un centroide de cada área, y a una red de transporte que las vincula. Sin embargo, la aplicación de métodos que tienden a la búsqueda de nuevas localizaciones de oferta deben considerar, de manera inicial, la determinación de posibles sitios candidatos, es decir, una cantidad de puntos seleccionables con la finalidad de elegir los mejores con base en el objetivo del modelo aplicado.

Existen dos posibilidades básicas para la consideración de sitios candidatos: (a) obtenerlos mediante procedimientos de superposición temática y técnicas de evaluación multicriterio (EMC) y (b) considerar cada centroide de demanda como un posible sitio para la instalación. Las técnicas EMC han sido ampliamente desarrolladas en los estudios de Buzai y Baxendale (2006), y la utilización de centroides de áreas como sitios candidatos ha sido analizada metodológicamente por Fotheringham, Densham y Curtis (1995). La segunda técnica aparece vinculada con el problema de la unidad espacial modificable (MAUP), en vista de que una variación en la cantidad de unidades espaciales hará posible la modificación de los resultados obtenidos.

Con el fin de evitar la necesidad de evaluar infinitas localizaciones, los modelos trabajan con las combinaciones de  $p$  centros en  $n$  puntos candidatos, siendo  $p < n$ , en donde  $p$  serán los mejores sitios obtenidos (Church y Sorensen 1994, Lea y Simmons 1995). Aunque se lleven a cabo las simplificaciones mencionadas, los cálculos deben ser muy grandes; por ello se buscan mecanismos heurísticos (procedimientos de prueba y error en una aproximación continua a la mejor solución) para la obtención de resultados (Densham y Rushton 1992). Uno de estos mecanismos se presenta en este trabajo. La obtención de posibles soluciones con base en la aplicación de combinatorias, brinda valores extremadamente elevados si se cambian los elementos  $n$  y  $x$  por la aplicación de la fórmula:

$$[1] \quad \frac{n!}{x!(n-x)!}$$

Para un caso sencillo, por ejemplo, al localizar, 2 entidades entre 10 sitios candidatos, el resultado es de 45

posibilidades. Si se eleva el número de entidades a 4, el resultado pasa a ser 210. Para el caso de la aplicación en Luján, la obtención de los mejores 12 sitios, dentro de 70 sitios candidatos (centroides), arroja un resultado de 10.638.894.058.520 posibilidades de elección; esta situación representa la necesidad de acudir a métodos heurísticos.<sup>2</sup>

Ante la abrumadora cantidad de cálculos, la estrategia heurística de aproximación a la mejor solución es teóricamente muy aceptable. Una propuesta apunta también a la consideración de un intercambio múltiple de dos o tres candidatos simultáneamente, sin embargo, para la sustancial mejora en los tiempos de cálculo sigue siendo fundamental el avance en las capacidades computacionales de hardware.

#### Modelos para equipamientos deseables

##### Modelo p-mediano

El modelo p-mediano es el inicial y más sencillo procedimiento modelístico de localización-asignación. Su objetivo es el de minimizar la suma de los productos de los desplazamientos poblacionales de los puntos de demanda (centroides que agrupan la demanda dispersa) a los puntos de oferta. La función objetivo es:

$$[2] \text{ Minimizar } \left\{ F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_i d_{ij} x_{ij} \right\}$$

Donde  $a_i$  es el peso asociado a cada punto de demanda,  $d_{ij}$  es la distancia entre el punto de demanda  $i$  y el punto de oferta potencial  $j$ ,  $x_{ij}$  es el factor de asignación que vale 1 si el centro de oferta  $j$  es el más cercano al punto de demanda  $i$  y 0 en caso contrario,  $n$  es la can-

tidad total de puntos de demanda y  $m$  los potenciales puntos de oferta (considerando las existentes). El modelo se llama *p-mediano* pues se considera que  $p$  es el número de instalaciones a ubicar. El objetivo de este modelo es el de encontrar el valor mínimo de la función objetivo  $F$ , y con ello la mayor eficiencia espacial respecto del total de desplazamientos efectuados desde los centros de demanda hacia los  $p$  puntos de oferta. El modelo p-mediano puede ampliarse a partir de la incorporación de una restricción de distancia. Tiene similar objetivo que el anterior, pero en este caso también considera que ninguno de los valores de  $d_{ij}$  supere un valor determinado de alcance ( $S$ ).

$$[3] \text{ Si } d_{ij} \leq S \Rightarrow x_{ij} = 1$$

[4] Si  $d_{ij} > S \Rightarrow x_{ij} = 0$ , aunque  $d_{ij}$  sea el menor valor para ambos puntos.

Por un lado, se intenta actuar sobre el costo global de desplazamientos (eficiencia), y por otro se intenta minimizar las distancias máximas de traslado (equidad). Con la aplicación de esta restricción es posible que la solución no aparezca a partir de la cantidad de puntos de oferta solicitados, lo cual genera la necesidad de ampliarlos.

##### Modelo de cobertura máxima

El modelo de cobertura máxima tiene como objetivo maximizar los valores totales de la demanda dentro de un radio de cobertura ( $R$ ) prefijado para los puntos de oferta. Dentro de estas superficies deberá quedar asignada la mayor cantidad de demanda.

$$[5] \text{ Maximizar } \left\{ F = \sum_{i \in I} a_i x_i \right\}$$

En la fórmula,  $I$  representa el conjunto de puntos de demanda (indexados por  $i$ ),  $a_i$  la población en el nodo de demanda  $i$ , y  $x_i$  vale 1 si el centro de demanda  $i$  se encuentra dentro del área de cobertura ( $x_i \leq R$ ) y 0 en caso contrario.

##### Modelo de cobertura máxima con restricción de alejamiento

El modelo de cobertura máxima puede ampliarse a partir de la incorporación de una restricción de distancia, cuyo objetivo es el de maximizar los valores totales de la demanda dentro de un radio de cobertura prefijado para los puntos de oferta; lo anterior solo es posible si se considera que toda la demanda se encuentra dentro de un radio  $S$ , mayor que el alcance del bien o servicio.

2 El principal método heurístico utilizado para las resoluciones de localización-asignación es el formulado por Teitz y Bart, el cual básicamente cumple los siguientes pasos: (a) selecciona aleatoriamente una solución inicial, (b) asigna la demanda a la solución, (c) calcula los valores de solución de la función objetivo, (d) sustituye aleatoriamente un sitio candidato por otro, (e) calcula los valores de solución de la función objetivo, (f) si el segundo valor es mejor, sustituye esta solución por la otra, si es peor se queda con la primera, (g) vuelve a realizar el procedimiento hasta que no encuentre un valor mejor en la solución, y (h) el algoritmo corre hasta que no puede encontrarse una mejor solución, pero como ésta quizá no sea la mejor global, generalmente el procedimiento se repite 10 veces partiendo de 10 distribuciones aleatorias. Finaliza cuando se repite tres veces una misma solución, pero si luego de los diez procedimientos se encuentran diez soluciones diferentes, solo se elige la mejor, es decir, aquella que se aproxima más a la función objetivo.

En el presente estudio no serán desarrolladas las fórmulas utilizadas en la búsqueda de localizaciones óptimas para equipamientos no deseables, presentes en Buzai y Baxendale (2011). Conceptualmente, estas buscan el efecto inverso a los presentados.

### Modelado para el cálculo de distancias

En la aplicación de modelos de localización-asignación la realización de cálculos de distancia desde los puntos de demanda y los puntos de oferta ( $d_{ij}$ ) constituye un procedimiento importante, es decir, desde los centroides de áreas con demanda agrupada hacia las instalaciones existentes o hacia los puntos candidatos. A partir de las coordenadas de cada localización, en un espacio absoluto, pueden ser calculadas diferentes medidas de distancia, denominadas métricas<sup>3</sup>.

La distancia en línea recta, o distancia euclidiana, surge ante la consideración de un espacio ideal a partir del cual no existen limitaciones para transitar en cualquier sentido, y se obtiene mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$[4] d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

La distancia *Manhattan*, o *city block*, asumida por un desplazamiento a través de una grilla regular está dada por:

$$[5] d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$$

En ambos casos, los resultados se obtienen a partir de la consideración de coordenadas absolutas sobre el espacio geográfico. Mientras que para el primero el resultado está dado por la resolución pitagórica del cálculo de la hipotenusa de un triángulo, para el segundo, se obtiene de la suma de las unidades de medida para ambos catetos.

La métrica  $L_p$  ha sido propuesta con la finalidad de generar posibilidades de cálculo más flexibles que tiendan a superar la métrica *Manhattan*, ante los problemas de subestimación provocados por localizaciones entre bloques o la aparición de barreras o de sobreestimación a partir de la aparición de calles en diferente di-

3 Una métrica, en cuanto función matemática que permite calcular la distancia entre puntos, según ha quedado expresado en Bosque Sendra (1992), debe cumplir una serie de condiciones: Positividad ( $d_{ij} \geq 0$ ), Identidad, si  $d_{ij} = 0$  entonces ambos puntos se ubican en el mismo lugar del espacio, Simetría ( $d_{ij} = d_{ji}$ ) y Desigualdad Triangular ( $d_{ij} \leq d_{ik} + d_{kj}$ ).

rección de la cuadrícula de circulación básica (Hodgson et ál. 1995).

$$[6] d_{ij}^\beta = (|x_i - x_j|^p + |y_i - y_j|^p)^\beta$$

Aquí aparece un parámetro  $\beta$  que indica una modificación de los costos de desplazamientos con la distancia. Nótese que, cuando  $\beta=1$ , se tiene la distancia *Manhattan* con  $p=1$  y euclidiana con  $p=2$ . La métrica  $L_p$  fue propuesta por Love y Morris (1972), y resulta ser una excelente alternativa de aplicación cuando no es posible la realización de cálculos sobre la red de calles y sin embargo se conoce la estructura vial urbana.

Por otro lado, cuando los cálculos de distancia se realizan con base geométrica, a partir de una estructura de capas temáticas *raster*, es posible también establecer inicialmente una correspondencia con las métricas analizadas. Un avance que va desde el espacio absoluto al espacio relativo se produce cuando las distancias entre dos localizaciones se calculan en otras unidades de medida (tiempo o cualquier otro tipo de costo), lo cual se basa en la realización de un mapa de fricción que incorpora en cada píxel un valor relativo al esfuerzo necesario para poder atravesarlo. De esta manera, desde cada entidad puntual puede generarse una superficie de costo que corresponde al costo (esfuerzo) acumulado en cada píxel del área de estudio para llegar a dicha entidad. La presente aplicación incorpora la capa temática de la red vial del área de estudio. Los cálculos de distancia han sido realizados sobre ella.

## Aplicación

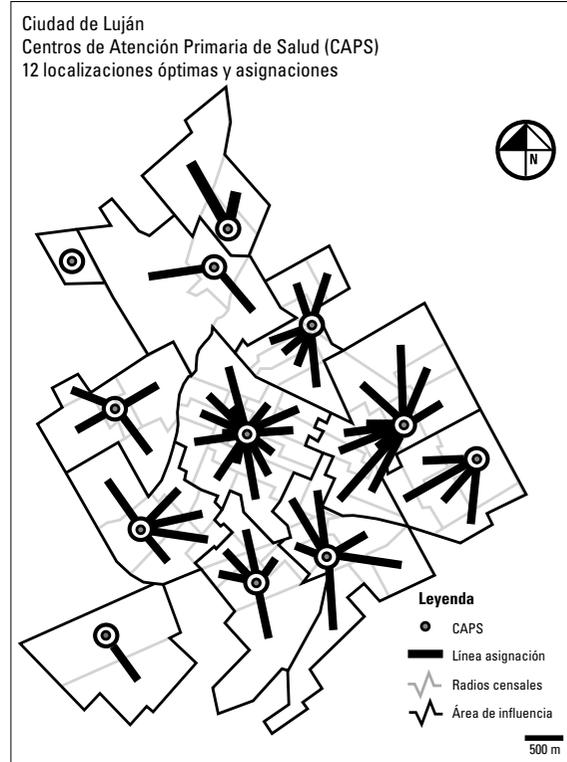
### Modelo de localización-asignación aplicado a los CAPS en la ciudad de Luján<sup>4</sup>

La aplicación realizada toma como base los aspectos teóricos y metodológicos desarrollados con anterioridad y presenta un análisis basado en la estructura espacial vectorial compuesta por puntos, arcos (líneas) y polígonos (áreas). La aplicación se centra en el análisis de la justicia espacial de los servicios de salud como

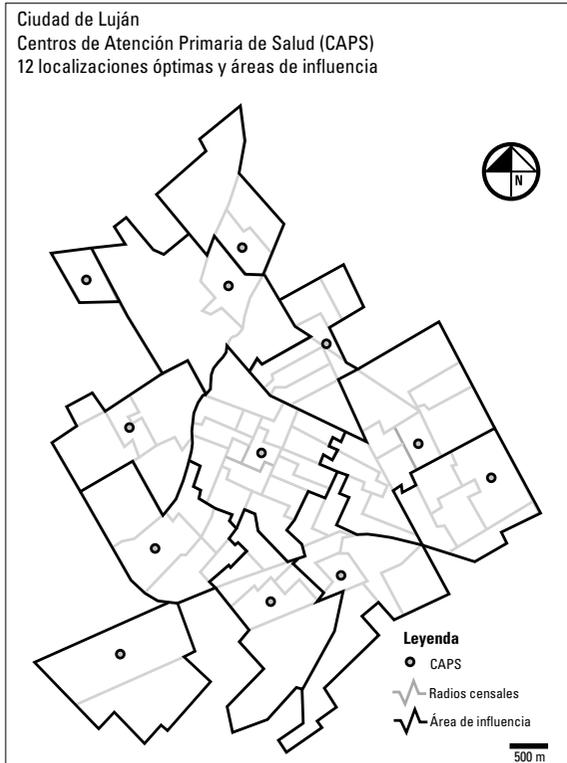
4 Las capas temáticas (*layers*) utilizadas en la aplicación corresponden a: (1) 70 radios censales de la ciudad de Luján 2010, (2) centroides de radios censales como puntos de demanda y sitios candidatos para la localización de la oferta de servicios, (3) 12 CAPS como puntos de oferta, y (4) red vial como mapa de fricción. Los datos numéricos contemplados son: (5) población de 6 a 14 años por radio censal como valor de demanda potencial. Software utilizado: FlowMap © Utrecht University (Holanda).



**Figura 1.** Ciudad de Luján. Radios censales y CAPS.  
Fuente: elaboración propia con cálculo del software FlowMap.



**Figura 3.** Ciudad de Luján. Asignación de demanda potencial.  
Fuente: elaboración propia con cálculo del software FlowMap.



**Figura 2.** Ciudad de Luján, 12 CAPS obtenidos y áreas de influencia obtenidos por modelo de cobertura con solución de 1.500 metros.  
Fuente: elaboración propia con cálculo del software FlowMap.

tema fundamental de desarrollo procedimental con SIG en el marco de los estudios de Geografía de la Salud (Buzai 2009, Fuenzalida 2010).

En esta estructura, los puntos corresponden a los CAPS existentes y centroides de radios censales que actúan como puntos de demanda (al asignarle los valores poblacionales de demanda potencial) y, al mismo tiempo, como sitios candidatos para la localización de nuevos centros. Las líneas corresponden a las calles como vías de circulación mediante las cuales se vincularán espacialmente los puntos de oferta y demanda, y los polígonos son áreas con diversos valores poblacionales de utilidad potencial.

La figura 1 presenta algunos de los componentes mencionados en el área de estudio: red de calles, límites de radios censales y localización de los 12 CAPS existentes, los cuales, con una finalidad de modelización, fueron asignados al centroide del radio censal correspondiente.

El primer cálculo realizado logró determinar la mejor ubicación para un total de 12 CAPS, considerando que cada uno de los 70 radios censales, a través de su centroide, se presenta como sitio candidato para la localización. El resultado presenta la configuración espacial de 12 puntos seleccionados de un total de 70,

es decir, una única solución de la inmensa cantidad de posibilidades de combinación de acuerdo a [1]:

$$[7] \frac{70!}{12!(70-12)!} = \frac{1.1979e+100}{479001600 \times 2.35056e+78} = \frac{1.1979e+100}{1.12592e+87} = 10.638.894.058.520$$

Para obtenerla se ha utilizado un modelo de cobertura máxima de la demanda, una de las orientaciones prácticas que ofrece grandes posibilidades en el ámbito de los SIG (Spaulding y Cromley 2007). En este modelo se han seleccionado los sitios candidatos que pueden capturar la totalidad de la población de demanda, teniendo en cuenta que ningún habitante del área de estudio se ubique a más de 1.500 metros del CAPS más cercano ya que, mediante un análisis exploratorio previo, se pudo determinar que con esta restricción de distancia se obtendrían la misma cantidad de CAPS existentes, lo cual permitiría su perfecta comparación.

La figura 2 presenta el mapa con los doce centros óptimos obtenidos y la figura 3 el mapa de araña (también llamado de deseo, *desire map*) realizado a partir de los centros y la asignación de demanda desde los radios censales incluidos dentro de cada área de influencia.

Los datos alfanuméricos correspondientes a esta configuración espacial pueden verse en la tabla 1 de la cual se presenta la siguiente información:

Columna 1 – LABEL: número de radio censal / centroide

Columna 2 – CAPS-1: centros existentes

Columna 3 – CAPS-2: centros óptimos (resultado obtenido)

Columna 4 – DEMANDA\*: demanda potencial a cada centro óptimo en términos de la población con Necesidades Básicas Insatisfechas —en adelante, NBI—

Columna 5 – CENTRO\*: centroide al cual se asignan los datos del radio censal

Columna 6 – DISTANCIA\*: distancia de centroide a centroide

Columna 7 – NBI: población con NBI en cada radio censal (\* dentro de los 1.500 metros de distancia)

**Tabla 1.** Resultados de la solución de asignación.

LABEL	CAPS-1	CAPS-2	Demanda	Centro	Distancia	NBI
1	-	-	0	59	1.156,43	1
2	-	-	0	59	858,08	16
3	-	-	0	36	1.000,76	28
4	-	-	0	36	1.178,04	54
5	-	-	0	36	1.342,81	15
6	-	-	0	36	1.409,72	32
7	-	-	0	49	1.449,77	36

8	-	-	0	59	776,50	10
9	-	-	0	59	808,25	4
10	-	-	0	59	1.030,10	12
11	-	-	0	49	1.275,07	7
12	-	-	0	49	442,75	44
13	-	-	0	59	1.355,58	25
14	-	-	0	48	1.241,13	98
15	-	-	0	48	1.161,43	133
16	-	-	0	48	719,14	26
17	-	-	0	51	1.288,40	54
18	X	-	0	20	1.123,14	366
19	-	-	0	20	725,80	427
20	-	X	1320	20	0,00	527
21	X	X	467	21	0,00	253
22	-	-	0	21	1.340,49	139
23	-	-	0	21	1.095,67	75
24	X	-	0	26	662,02	174
25	-	-	0	26	1.031,66	91
26	X	X	568	26	0,00	106
27	X	-	0	26	702,79	10
28	-	-	0	26	656,45	60
29	-	-	0	26	869,44	43
30	-	-	0	42	1.094,01	57
31	-	-	0	26	1.184,07	84
32	-	-	0	36	1.037,71	36
33	-	-	0	36	1.411,08	209
34	-	-	0	36	1.071,01	419
35	X	-	0	36	724,51	332
36	-	X	1552	36	0,00	164
37	-	-	0	36	724,31	42
38	-	-	0	36	603,73	47
39	-	-	0	42	1.280,13	59
40	-	-	0	42	853,03	138
41	X	-	0	36	991,11	174
42	-	X	535	42	0,00	281
43	X	-	0	49	1.387,81	68
44	-	-	0	49	706,16	109
45	-	-	0	49	1.490,86	164
46	-	-	0	51	914,01	224
47	-	-	0	52	936,32	23
48	-	X	664	48	0,00	63
49	-	X	506	49	0,00	78
50	-	-	0	48	1.286,38	213
51	X	X	951	51	0,00	264
52	-	X	72	52	0,00	49
53	-	-	0	48	458,37	131
54	-	-	0	59	1.286,35	32
55	-	-	0	59	653,28	14
56	-	-	0	59	613,87	2
57	-	-	0	65	902,74	124
58	-	-	0	59	685,21	7
59	-	X	319	59	0,00	5
60	X	-	0	59	466,56	33
61	-	-	0	59	958,29	66
62	X	-	0	51	1.296,78	64
63	-	-	0	59	1.136,41	62
64	-	-	0	65	898,86	121

LABEL	CAPS-1	CAPS-2	Demanda	Centro	Distancia	NBI
65	X	X	773	65	0,00	124
66	-	-	0	65	925,70	167
67	-	-	0	59	1.043,33	28
68	-	-	0	59	485,96	2
69	-	-	0	51	962,81	136
70	-	-	0	51	1.398,99	209
71	-	X	84	71	0,00	84
72	-	-	0	65	1.282,49	237

Fuente: elaboración propia.

Los 12 CAPS existentes se encuentran en los centroides de los radios censales 18, 21, 24, 26, 27, 35, 41, 43, 51, 60, 62 y 65, mientras que los CAPS de localización óptima con cobertura máxima de 1.500 metros estarían ubicados en 20, 21, 26, 36, 42, 48, 49, 51, 52, 59, 65 y 71. Al ser coincidentes los centroides de radios censales 21, 26, 51 y 65, se presenta un 33% de correspondencia espacial entre la configuración espacial real y la óptima.

Los datos de la población de demanda potencial fueron ajustados a los habitantes con NBI. La localización 36 tiene el valor mayor de demanda potencial con NBI, 1.552 habitantes, y la localización 52 el valor menor con 72 habitantes, en sus respectivas áreas de influencia. La totalidad de valores resulta de utilidad para realizar los cálculos de distancia y la asignación de población a la localización de los 12 CAPS óptimos. Los cálculos realizados sobre los valores totales brindan los siguientes resultados (tabla 2).

**Tabla 2.** Estadísticas de datos de la tabla 1.

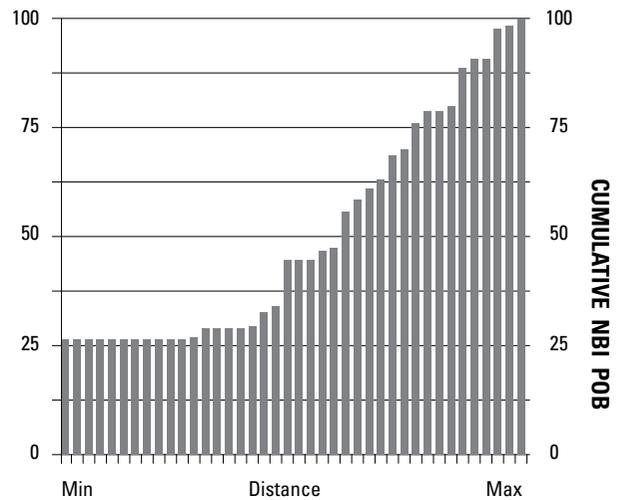
Cálculos	Metros
Distancias a centroides	59.853,63
Distancias a población	5.961.586,44
Promedio de distancias a centroides	831,30
Promedio de distancias a población	83.949,72
Distancia mínimo	0
Distancia máxima	1.490,86
Desvío Estándar de las distancias a centroides	453,11
Desvío Estándar de las distancias a población	104.409,02

Fuente: elaboración propia.

La figura 4 representa los valores acumulativos de población con NBI en relación con la distancia a los centros óptimos en conjunto.

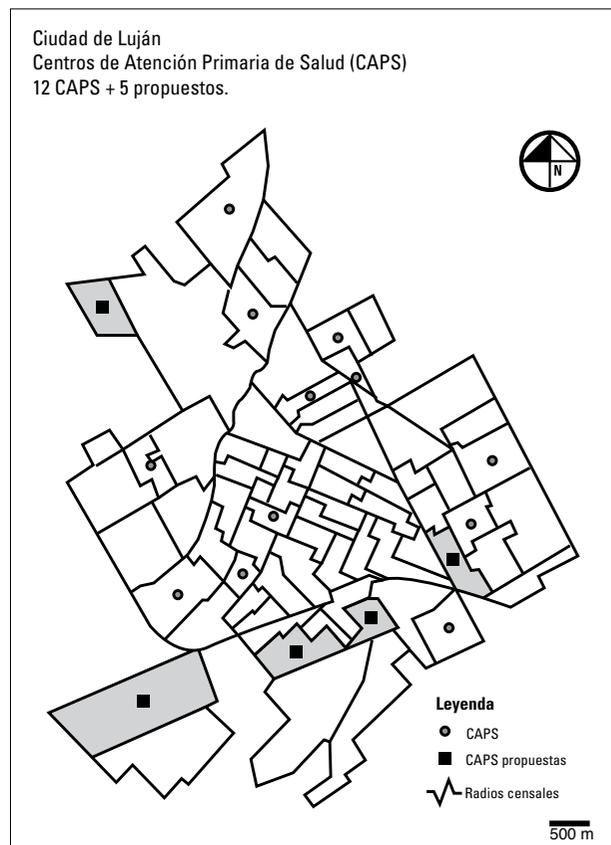
La figura 5 presenta la ampliación del cálculo al considerar los 12 CAPS existentes y, calcula la localización de 5 CAPS potencialmente ubicados en localizaciones óptimas.<sup>5</sup>

5 El mapa social de la ciudad de Luján presenta una configuración típica del modelo de ciudad intermedio de América Latina



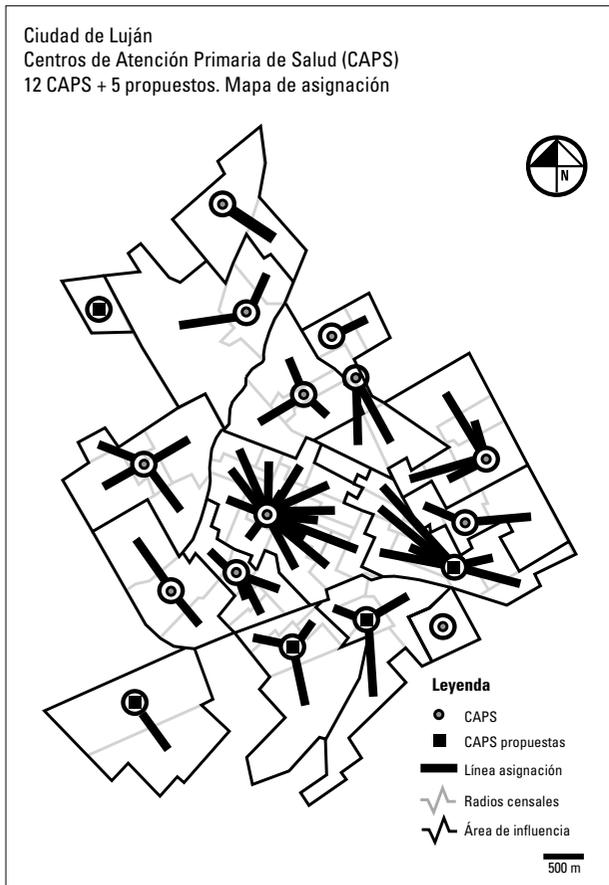
**Figura 4.** Gráfico de frecuencias acumuladas cubrimiento de la demanda potencial.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.** Ciudad de Luján. 12 CAPS + 5 CAPS propuestos.

Fuente: elaboración propia usando software FlowMap.



**Figura 6.** Ciudad de Luján. Asignación de demanda potencial a la solución de 17 CAPS.

Fuente: elaboración propia con cálculo del software FlowMap.

Efectivamente, los cinco sitios seleccionados corresponden a radios censales periféricos: tres en el sur, uno en el norte y uno en el sector este. La asignación de demanda potencial (figura 6) genera menores desplazamientos.

Los datos alfanuméricos correspondientes a esta configuración espacial pueden verse en la tabla 3, compuesta por la siguiente información:

Columna 1 – LABEL: número de radio censal / centroide

Columna 2 – CAPS-1: centros existentes

Columna 3 – CAPS-3: centros óptimos (resultado obtenido considerando CAPS-1)

Columna 4 – DEMANDA\*: demanda potencial a cada centro óptimo en términos de la población con NBI.

Columna 5 – CENTRO\*: centroide al cual se asignan los datos del radio censal

Columna 6 – DISTANCIA\*: distancia de centroide a centroide

Columna 7 – NBI: población con NBI en cada radio censal

(\* Dentro de los 1.500 metros de distancia)

**Tabla 3.** Resultados de la solución de asignación.

Label	CAPS-1	CAPS-3	Demanda	Centro	Distancia	NBI
1	-	-	0	27	1.368,54	1
2	-	-	0	60	1.247,07	16
3	-	-	0	39	1.449,72	28
4	-	-	0	39	1.395,17	54
5	-	-	0	39	733,11	15
6	-	-	0	39	1.099,96	32
7	-	-	0	60	1.363,27	36
8	-	-	0	60	1.165,49	10
9	-	-	0	60	899,70	4
10	-	-	0	60	636,11	12
11	-	-	0	60	1.256,18	7
12	-	-	0	49	442,75	44
13	-	-	0	60	959,74	25
14	-	-	0	62	734,39	98
15	-	-	0	62	813,39	133
16	-	-	0	48	719,14	26
17	-	-	0	62	603,54	54
18	X	X	793	18	0,00	366
19	-	-	0	18	994,75	427
20	-	-	0	21	757,82	527
21	X	X	919	21	0,00	253
22	-	-	0	21	1.340,49	139
23	-	-	0	27	626,24	75
24	X	X	265	24	0,00	174
25	-	-	0	24	527,85	91
26	X	X	226	26	0,00	106
27	X	X	221	27	0,00	10
28	-	-	0	27	322,62	60
29	-	-	0	27	579,61	43
30	-	-	0	39	1.434,59	57
31	-	-	0	26	1.184,07	84
32	-	-	0	26	1.374,13	36

(Buzai 2003), en el cual las áreas favorecidas tienen localización central y las áreas desfavorecidas se ubican en la periferia. Para el año 2010 Luján presenta 20 radios censales periféricos; por lo tanto, se consideró la posibilidad de elección (y de incorporación) de  $\frac{1}{4}$  de las unidades espaciales con vacancia de CAPS.

33	-	-	0	35	1.178,16	209
34	-	-	0	35	521,75	419
35	X	X	1166	35	0,00	332
36	-	-	0	35	724,51	164
37	-	-	0	35	1.291,02	42
38	-	-	0	41	852,10	47
39	-	X	383	39	0,00	59
40	-	-	0	39	618,73	138
41	X	X	502	41	0,00	174
42	-	-	0	41	1.013,56	281
43	X	X	68	43	0,00	68
44	-	-	0	49	706,16	109
45	-	-	0	49	1.490,86	164
46	-	-	0	51	914,01	224
47	-	-	0	52	936,32	23
48	-	X	433	48	0,00	63
49	-	X	395	49	0,00	78
50	-	-	0	48	1.286,38	213
51	X	X	697	51	0,00	264
52	-	X	72	52	0,00	49
53	-	-	0	48	458,37	131
54	-	-	0	27	889,29	32
55	-	-	0	60	991,48	14
56	-	-	0	60	927,30	2
57	-	-	0	65	902,74	124
58	-	-	0	60	990,64	7
59	-	-	0	60	466,56	5
60	X	X	329	60	0,00	33
61	-	-	0	60	502,41	66
62	X	X	485	62	0,00	64
63	-	-	0	60	684,59	62
64	-	-	0	65	898,86	121
65	X	X	773	65	0,00	124
66	-	-	0	65	925,70	167
67	-	-	0	60	1.348,76	28
68	-	-	0	60	523,24	2
69	-	-	0	62	750,62	136
70	-	-	0	51	1.398,99	209
71	-	X	84	71	0,00	84
72	-	-	0	65	1.282,49	237

Fuente: elaboración propia.

Los 12 CAPS de Luján se encuentran seleccionados en la tabla 3 (CAPS-1). A ellos se les suman las localizaciones 39, 48, 49, 52 y 71 (CAPS-2). La configuración

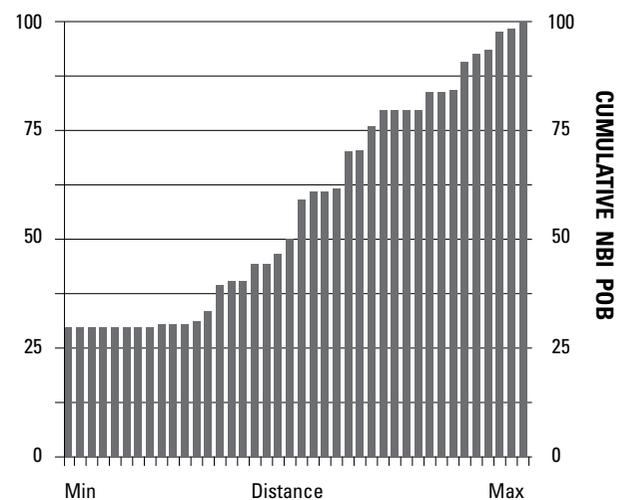
se amplía a 20 CAPS. Los valores de demanda potencial asignada bajan notablemente a nivel general, aunque la localización 35 mantiene un valor elevado de 1.166 habitantes, con lo cual, la localización 43 adquiere el menor valor, con 68 habitantes con NBI en su área de influencia. La totalidad de valores resultan de utilidad para realizar los cálculos de distancia y la asignación de población a la localización de los 20 CAPS óptimos. Los cálculos realizados sobre los valores totales brindan los siguientes resultados (tabla 4):

**Tabla 4.** Estadísticas de datos de la tabla 3.

Cálculos	Metros
Distancias a centroides	51.505,01
Distancias a población	5.091.082,05
Promedio de distancias a centroides	715,34
Promedio de distancias a población	71.686,11
Distancia mínimo	0
Distancia máxima	1.490,86
Desvío estándar de las distancias a centroides	485
Desvío estándar de las distancias a población	101.211,81

Fuente: elaboración propia.

La figura 7 presenta los valores acumulativos de población con NBI en relación con la distancia a los centros óptimos.



**Figura 7.** Gráfico de frecuencias acumuladas de cobertura de la demanda potencial.

Fuente: elaboración propia.

Si se comparan los datos arrojados por las estadísticas presentadas en las tablas 2 y 4, puede verse que existe una disminución en los siguientes valores: distancias a la población de 5961586,44 a 5091082,05; distancias de recorridos ida y vuelta de 11923172,88 a 10182164,10; y desvío Estándar de las distancias a población: de 104409,02 a 101211,81. Esto indica que, con la segunda solución, los parámetros de eficiencia espacial (distancias) y el de equidad espacial (desvío estándar) mejoran considerablemente.

### Consideraciones finales

En el presente trabajo ha quedado ejemplificada la capacidad de los modelos de localización-asignación basados en el cálculo de cobertura para la búsqueda de eficiencia y equidad espacial de los CAPS en la ciudad de Luján. Así mismo, la obtención de soluciones que ingresan en el proceso de verticalización (Eastman 2007) a través de los SIG y de los SADE, brindan importantes posibilidades para el correcto apoyo a la toma de decisión en materia locacional.

Las preguntas respondidas fueron las siguientes: ¿cuál es el grado de correspondencia entre la ubicación real de los puntos de oferta y la ubicación ideal que tendrán en base a la distribución espacial de la población de demanda? ¿De qué manera se modifica la eficiencia

espacial y la equidad espacial de acuerdo a la reubicación de estos puntos? Y, finalmente, ¿dónde deberían ser ubicadas nuevas instalaciones para satisfacer con mayor capacidad la demanda distribuida?

La aplicación realizada a la ciudad de Luján ha respondido estos aspectos con claridad al presentar elementos clave para la planificación territorial del área de estudio. Con la obtención de resultados concretos que permiten responder a estas preguntas, se observa que las pautas teórico-metodológicas desarrolladas actualmente al interior de las tecnologías SIG+SADE permiten una aproximación válida a la solución de problemas de localización compleja. El análisis espacial automatizado contribuye a apoyar con bases teórico-metodológicas geográficas los procesos de toma de decisión en materia de planificación urbana y, de esta manera, permite adelantar acciones orientadas a disminuir aspectos centrales en las desigualdades socio-espaciales de la población.

### Agradecimientos

Expreso mis agradecimientos a Antonio Moreno Jiménez (Universidad Autónoma de Madrid, España) y Manuel Fuenzalida (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile) por el apoyo brindado en la resolución metodológica de la aplicación.

#### Gustavo D. Buzai

Licenciado en Geografía por la Universidad de Buenos Aires (1991) y Doctor en Geografía por la Universidad Nacional de Cuyo (1998). Actualmente es profesor de la Universidad de Luján, docente-investigador categoría 1 SPU-UNLU. Investigador independiente de CONICET y director del programa de Estudios Geográficos de la Universidad de Luján, Argentina.

## Referencias

- Austin, C. Murray. 1974. The evaluation of urban public facility location: An alternative to benefit-cost analysis. *Geographical Analysis* 6 (2): 135-145.
- Beavon, Keith. 1980. *Geografía de las actividades terciarias. Una reinterpretación de la teoría de los lugares centrales*. Barcelona: Oikos-tau.
- Berry, Brian J. L. 1971. *Geografía de los centros de mercado y distribución al por menor*. Barcelona: Vicens-Vives.
- Bosque Sendra, Joaquín. 1992. *Sistemas de información geográfica*. Madrid: Rialp.
- Bosque Sendra, Joaquín. 2004. El uso de SIG para localizar equipamientos e instalaciones. En *Sistemas de información geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*, eds. Joaquín Bosque Sendra y Antonio Moreno Jiménez, 103-120. Madrid: Ra-Ma.
- Bosque Sendra, Joaquín, Montserrat Gómez Delgado, Antonio Moreno Jiménez y Francesco Dal Pozzo. 2000. Hacia un sistema de ayuda a la decisión espacial para la localización de equipamientos. *Estudios Geográficos* 61 (241): 567-598.
- Bosque Sendra, Joaquín y Antonio Moreno Jiménez. 2004. La localización óptima como problema: cuestiones teóricas y metodológicas. En *Sistemas de información geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*, eds. Joaquín Bosque Sendra y Antonio Moreno Jiménez, 3-16. Madrid: Ra-Ma.
- Buzai, Gustavo D. 2003. *Mapas sociales urbanos*. Buenos Aires: Lugar.
- Buzai, Gustavo D. 2009. Sistemas de información geográfica en Geografía de la salud. En *Salud y enfermedad en Geografía*, ed. Jorge A. Pickenhayn, 111-134. Buenos Aires: Lugar.
- Buzai, Gustavo D. y Claudia A. Baxendale. 2006. *Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica*. Buenos Aires: Lugar.
- Buzai, Gustavo D. y Claudia A. Baxendale. 2011. Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica. En *Tomo 1: Perspectiva Científica/temáticas de base raster*. Buenos Aires: Lugar.
- Church, Richard L. y Paul Sorensen. 1994. *Integrating Normative Location Models into GIS: Problems and Prospects with the p-median models*. Santa Barbara: NCGIA, Technical Report 94-95.
- Densham, Paul J. 1991. Spatial Decision Support Systems. En *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, eds. David Maguire, Michael Goodchild y David Rhind, 403-412. London: Logman.
- Densham, Paul J. y Gerard Rushton. 1992. Strategies for solving large location-allocation problems by heuristic methods. *Environment and Planning A*. 24: 289-304.
- Eastman, J. Ronald. 2007. La verticalización del SIG. En *Memorias de la XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica*, ed. Gustavo D. Buzai, 283-195. Luján: Universidad Nacional de Luján.
- Fotheringham, A. Stewart, Paul J. Densham y Andrew Curtis. 1995. The zone definition problem in location-allocation modeling. *Geographical Analysis* 27 (1): 60-77.
- Fuenzalida, Manuel. 2010. Análisis de desigualdades territoriales en la oferta de equipamientos públicos: el caso de los hospitales en la red asistencial del sistema público de salud en Chile. *Geografía y sistemas de información Geográfica (GeosIG)* 2 (2): 111-125.
- Hodgson, M. John, A. Leontien y G. Storrier 1995. Functional error in geographical analysis: the case of spatial separation in location-allocation. *Geographical Systems* 2: 59-82.
- Lea, Anthony C. y Simmons, Jim. 1995. *Location-Allocation Models for Retail Site Selection: The N Best Sites in the Toronto Region*. Toronto: Ryerson Polytechnic University, Centre for the Study of Commercial Activity (Research report n.º 1).
- Love, Robert y J. Morris. 1972. Modelling inter-city Road Distances by Mathematical Functions. *Operational Research Quarterly* 23 (1): 61-71.
- Malczewski, Jacked. 1997. Spatial Decision Support Systems. *NCGIA Core Curriculum GIScience*. <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u127/u127.html> (consultado en mayo del 2011).
- McAllister, Donald M. 1976. Equity and efficiency in public facility location. *Geographical Analysis* 8 (1): 47-63.
- Moreno Jiménez, Antonio. 1995. Planificación y gestión de servicios a la población desde la perspectiva territorial: algunas propuestas metodológicas. En *Boletín de la Asociación de geógrafos españoles* 20: 115-134.
- Moreno Jiménez, Antonio. 2004. Modelos de localización óptima de instalaciones y equipamientos. En *Sistemas de información geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*, eds. Joaquín Bosque Sendra y Antonio Moreno Jiménez, 53-101. Madrid: Ra-ma.
- Moreno Jiménez, Antonio y Gustavo D. Buzai. (eds.). 2008. *Análisis y planificación de servicios colectivos con sistemas de información geográfica*. Madrid: UAM-ABCID-UNLU.
- Ramírez, Liliana y Joaquín Bosque Sendra. 2001. Localización de hospitales: analogías y diferencias del uso del

- modelo *p*-mediano en SIG raster y vectorial. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* 21: 53-79.
- Revelle, Charles y Ralph Swain. 1970. Central Facility Location. *Geographical Analysis* 2 (1): 30-42.
- Salado García, María Jesús. 2004. Localización de los equipamientos colectivos, accesibilidad y bienestar social. En *Sistemas de información geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*, eds. Joaquín Bosque Sendra y Antonio Moreno Jiménez, 17-51. Madrid: Ra-ma.
- Spaulding, Benjamin D. y Robert G. Cromley. 2007. Integrating the maximum capture problem into a GIS framework. *Journal of Geographical Systems* 9: 267-288.