

## MODELOS DE LOCALIZACIÓN-ASIGNACIÓN Y EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA LA LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES NO DESEABLES

Joaquín Bosque Sendra<sup>1</sup>  
Sergio Franco Maass<sup>2</sup>

**Resumen:** Tras un análisis de los diversos modelos de localización-asignación establecidos para situar, de modo óptimo, las instalaciones no deseables: *maxisum*, *maximin* y "complementario-anticobertura"; y de discutir el problema del transporte de los residuos tóxicos y peligrosos, se plantea un procedimiento por etapas para buscar una solución adecuada a este problema, utilizando para ello técnicas de evaluación multicriterio.

**Palabras clave:** Instalaciones no deseables. Modelos de localización-asignación. Evaluación multicriterio. SIG.

### LOCATION-ALLOCATION MODEL AND MULTICRITERIA EVALUATION IN LOCA- TION OF OBNOXIOUS FACILITY

**Abstract:** After an analysis of location-allocation models for undesirable facilities: *maxisum*, *maximin*, and "complementary anticover", and a discussion of transport problem of toxic garbage, we propose a procedure step by step to find the best solution for the location of undesirable facilities, using multicriteria methods.

**Key words:** Undesirable facilities. Location-allocation model. Multicriteria evaluation. GIS.

### INTRODUCCIÓN

La localización en el territorio de las instalaciones de los distintos tipos de servicios y equipamientos sociales es un

problema de gran importancia práctica y de fuerte contenido geográfico. Nos referimos en concreto a la cuestión de dónde situar los edificios en los que se ofertan muy diferentes servicios a la población, la cual, en unos casos, debe **desplazarse** hasta ese punto para poder usar el servicio (comercios, escuelas, hospitales, etc), en otras ocasiones, se debe distribuir el servicio desde ese punto a toda la población (estaciones de bomberos o de ambulancias, etc).

En cualquier caso, podemos esquematizar, desde un punto de vista espacial, el problema de la siguiente manera (Bosque Sendra, 1992, p. 226-227):

a) Las instalaciones donde se ofertan los servicios constituyen hechos de tamaño puntual (en términos relativos) a los cuales se debe otorgar una localización concreta en un espacio bidimensional.

b) La población reside concentrada en muchos puntos de esa superficie espacial. Existe por ello una distribución espacial irregular de la demanda del servicio en cuestión.

c) Los movimientos entre demanda y oferta se pueden producir de maneras diversas sobre el espacio, aunque lo más

---

<sup>1</sup> Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. Su actividad se realiza dentro del proyecto AMB94-1017 de la COMISIÓN INTERMINISTERIAL de CIENCIA y TECNOLOGÍA.

<sup>2</sup> Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

general es que se encaucen por la red de comunicaciones (calles, carreteras, etc).

En este contexto el problema geográfico se resume en contestar a la siguiente pregunta: ¿En qué punto o puntos se deben colocar las instalaciones para que atiendan de modo adecuado a la población demandante?. Para ello es preciso considerar, junto a otros elementos que después mencionaremos, el tipo de efecto (externalidad espacial) que cada instalación produce en su entorno inmediato. Realmente un centro de servicios produce siempre dos efectos, uno positivo: resulta más sencillo y barato usar ese servicio a los que viven cerca (externalidad espacial positiva); y otro negativo: aparición, por ejemplo, de aglomeración de personas o de congestión del tráfico rodado, las molestias que todo ello ocasionan pueden considerarse un efecto molesto y repelente para la población (externalidad espacial negativa). No obstante, podemos, sin demasiadas dificultades, clasificar las instalaciones de servicios en dos grandes tipos: a) las deseables, aquellas en que predominan las externalidades positivas: escuelas, hospitales, comercios, cines, etc y b) las no deseables, en las que las externalidades negativas son predominantes. En este último caso se encuentran, sobre todo, los lugares donde se procesan los residuos que la sociedad produce: vertederos de residuos sólidos urbanos, centros de tratamiento de residuos industriales (tóxicos y peligrosos); los centros para el tratamiento de personas con problemas (cárceles, centros contra la drogadicción, etc) o las propias centrales nucleares, etc.

La población reacciona con protestas y oposición a qué estas últimas instalaciones se sitúen en sus proximidades; es decir, las instalaciones no deseables producen numerosas reacciones de la población

ante su proximidad espacial: desde la oposición a que tales servicios se instalen en las cercanías de su domicilio, reacciones sintetizadas en las expresiones "No en mi patio trasero" (NIMBY en las siglas inglesas, 'Not in My Backyard') o "Uso del suelo localmente indeseable" (LULU, 'Locally Unwanted Land Use'), hasta la negativa absoluta a la creación de tales centros en ningún lugar, al considerar, por ejemplo, que es necesario llevar a adelante políticas de reciclado absoluto y nula producción de residuos (BANANA, 'Build Absolutely Nothing at All Near Anybody'). Lo cierto, en cualquier caso, es la importancia cada vez mayor de las reacciones y resistencias de la población a este tipo de instalaciones, no solo en los países anglosajones (de lo que son buena prueba las mencionadas siglas de uso común en estos países) sino, igualmente, las actitudes cada vez más manifiestas en España de protestas frente a estos temas, la prensa diaria muestra ejemplos evidentes de ello (una pequeña muestra son las noticias publicadas los siguientes días: EL PAÍS, miércoles 1 de noviembre de 1995; ABC, viernes 12 de agosto de 1994, entre otros muchos).

Existe una amplia literatura que trata de diversas formas estas cuestiones, en este texto se analiza una parte de ella, la que se refiere a los modelos matemáticos de localización-asignación que se han ido construyendo para tratar de buscar una posición "óptima" para este tipo de instalaciones. En Moon y Chaudhry (1984) y Erkut y Neuman (1989) se pueden encontrar dos revisiones detalladas sobre el tema. Por otra parte, se ofrece un planteamiento metodológico concreto para el análisis de la cuestión usando los mencionados modelos de localización-asignación y técnicas de evaluación multicriterio (Barredo, 1996; Barredo y Bosque, 1995)

## LOS MODELOS DE LOCALIZACIÓN-ASIGNACIÓN

Los Modelos de localización-asignación son un conjunto de procedimientos matemáticos que intentan buscar soluciones al problema de donde situar centros de servicios (en sentido amplio) de manera que se optimicen ciertos valores considerados importantes a la hora de que los usuarios utilicen dichos servicios (Bosque y Moreno, 1990). Esto implica, por lo tanto, definir primero las magnitudes que son relevantes para el empleo de las instalaciones por la población y después formular una expresión matemática de dichas magnitudes, de tal manera que el modelo obtenga un óptimo de su valor, mínimo o máximo, dependiendo del tipo de servicio a localizar.

La mayoría de los modelos han sido diseñados para determinar la localización óptima de una o varias instalaciones deseables (usualmente idénticas), de tal manera que se obtenga su mejor distribución espacial a partir de minimizar los costos o tiempos totales de transporte (Bosque y Moreno, 1990). Más recientemente se ha abierto una línea de investigación dedicada a determinar la óptima ubicación para aquellas instalaciones que, a pesar de su carácter imprescindible, son consideradas no-deseables ya que, como hemos indicado, representan riesgos a la salud o, más en general, inciden en el deterioro de la calidad de vida de la población localizada en sus proximidades (Stevens, 1985).

La localización de instalaciones no-deseables, tales como reactores nucleares o plantas de tratamiento de residuos, es una tarea compleja que implica tomar en consideración aspectos de muy diversa índole: el impacto real y percibido que dichas instalaciones ejercen sobre la pobla-

ción; la eficiencia espacial para garantizar los menores costos económicos, sociales y ambientales y la justicia espacial en su emplazamiento con respecto a la población afectada, así como a los sectores de la sociedad que demandan los servicios.

### **Criterios a considerar: eficiencia y justicia espacial**

Los modelos de localización-asignación hasta ahora definidos consideran dos magnitudes: la eficiencia espacial de la localización de los centros de servicio y la justicia espacial de su distribución en el territorio (Bosque Sendra, 1992, p. 227).

La **eficiencia espacial** se refiere al volumen global de desplazamientos que el conjunto de la demanda debe efectuar para utilizar las instalaciones y trata de medir el coste, en tiempos de recorrido o distancias, que la población se verá obligada a recorrer para poder utilizar los servicios (Bosque Sendra, 1992, p. 227). Esta distancia evidentemente tiene un coste monetario, más o menos fácil de medir, y que se busca reducir lo más posible. La eficiencia puede medirse también en función de los beneficios netos y, en términos de economías de escala, será mayor en la medida en que se logre el tamaño y emplazamiento que maximice el consumo del servicio (McAllister, 1976).

La **justicia espacial** se refiere a la accesibilidad diferencial de un servicio a los distintos grupos de la población, es decir, al grado de igualdad en la distribución de los servicios que presta cada instalación entre la población. La justicia espacial depende en este caso de la mayor o menor facilidad de acceso y depende de la variabilidad de las distancias que separan a cada individuo de la instalación más próxima, del tamaño de la oferta existente en

dicha instalación y de la disponibilidad temporal de los servicios (Bosque, 1992, págs. 223 y 227). La justicia espacial tiene especial relevancia en el caso de servicios ofertados por la Administración Pública, es decir, que son financiados por toda la población que, por lo tanto, tiene iguales derechos a usarlos en las mismas condiciones de acceso.

### **Eficacia y justicia espacial en las instalaciones no deseables**

¿Cómo se expresan estos criterios en el caso de las instalaciones no deseables?. La manera concreta de establecer las magnitudes anteriores de eficiencia y justicia espacial es muy diferente si nos referimos a instalaciones deseables o no deseables. Para el caso de las segundas el problema se puede plantear en estos términos:

La **eficiencia espacial** de ciertas instalaciones no deseables, como las plantas de tratamiento de residuos, depende de dos tipos de distancias: la que separa las instalaciones citadas de los productores de residuos, que los deben transportar hasta allí y que, evidentemente, estarán interesados en que los costes de transportes sean reducidos (al margen de que cuanto más largos sean los transportes más fácil es la aparición de accidentes que pueden ser muy peligrosos en algunos tipos de residuos); y, por otra parte, la distancia que separa las instalaciones de la población, que, tal como ya se ha indicado, desearía estar cuanto más lejos mejor de dichas emplazamientos. En este tipo de problemas, por lo tanto, la eficiencia es una cuestión multicriterio que debe buscar una solución de compromiso entre la minimización de las distancias entre productores e instalaciones y la maximización de las distancias entre la población y las instalaciones.

La búsqueda de la eficiencia espacial no es únicamente un problema de distancias sino que implica considerar la magnitud de las instalaciones. Maximizar la eficiencia espacial, tomando en consideración criterios de economías de escala, significaría, generalmente, el establecimiento centralizado de grandes instalaciones con menores costos relativos de construcción y operación. Existe, sin embargo, una importante tendencia a plantear la localización dispersa de instalaciones no deseables de menores dimensiones que, con una distribución más justa aunque menos eficiente, permitan hacer frente a toda una serie de problemas: la complejidad de manejo de una instalación intensiva de grandes dimensiones; las consecuencias de eventos catastróficos a gran escala, a pesar de sus bajas probabilidades de ocurrencia; los riesgos, reales y percibidos, implícitos en el transporte a grandes distancias de residuos tóxicos y peligrosos y la inequidad en el emplazamiento (Ratick y White, 1988).

La **justicia espacial** en la localización de instalaciones no-deseables se mide, básicamente, por el grado en que la población de una región determinada comparte los riesgos y molestias que dichas instalaciones representan. La localización más justa es aquella en que existan las menores diferencias en la forma en que los diversos sectores de la población se ven afectados por el emplazamiento de una instalación.

A pesar de su indiscutible relevancia en el proceso de localización de instalaciones no-deseables, la justicia espacial es un concepto difícil de medir y más complicado de aplicar. Aunque generalmente tiende a estimarse mediante estándares mínimos socialmente impuestos (distancias críticas entre la población y las instala-

ciones) o mediante la maximización de la distancia entre la población y las instalaciones (Morrill y Symons, 1977), es necesario profundizar en el desarrollo de nuevos procedimientos que lo consideren adecuadamente.

Un aspecto importante a considerar, en la localización de centros de tratamiento de residuos, es el problema del transporte de los residuos lo que genera el establecimiento de una red no-deseable de comunicaciones y que afecta tanto la eficiencia como la justicia espacial. Las rutas de transporte de residuos producen un riesgo importante a la población, que puede ser incluso mayor que el producido por los propios centros de tratamiento. Esto implica buscar la máxima eficiencia en términos de la menor distancia y la mayor facilidad de acceso entre centros productores e instalaciones, así como la máxima justicia espacial en términos del menor riesgo a la población a lo largo del recorrido.

### **MODELOS DE LOCALIZACIÓN-ASIGNACIÓN, PARA INSTALACIONES NO-DESEABLES, QUE SOLO CONSIDERAN LA DISTANCIA**

En la literatura sobre estos temas es posible encontrar diversas formulaciones de procedimientos matemáticos para encontrar la localización óptima de instalaciones no-deseables. La mayoría de los modelos, sin embargo, consideran exclusivamente la distancia entre centros poblados y sitios candidatos a recibir una instalación no-deseable, y parten del supuesto de que "cuanto más lejos se localice una instalación con respecto a la población, mejor". Dichos modelos se caracterizan por utilizar únicamente una definición simplificada de eficiencia espacial que considera la maximización de la distancia a la población pero que omite el objetivo de minimizar la dis-

tancia a los centros productores de residuos. Desde el punto de vista de maximizar la distancia a la población, existen dos variantes principales:

. Modelos que establecen límites mínimos de distancia, denominados modelos anti-cobertura. Permiten definir la alternativa de localización que incluye, dentro de un radio prefijado alrededor de cada instalación no-deseable, a la menor población posible.

. Modelos de maximización. Buscan maximizar las distancias, mínimas o promedio, entre la población y las instalaciones no-deseables. Los modelos de maximización pueden ser, a su vez, modelos maximin o anti-centro que buscan maximizar la distancia mínima entre población e instalaciones y modelos maxisum o maxian que pretenden maximizar la distancia total entre población e instalaciones. Estos modelos parten de considerar la distancia entre la población y un conjunto de sitios candidatos para la localización de instalaciones, pero también pueden considerar la distancia entre instalaciones ya existentes y los sitios candidatos a recibir nuevos centros de tratamiento de residuos, con lo que pueden utilizarse como una medida, muy aproximada, de la justicia espacial.

### **Modelos de localización-asignación basados en "límites mínimos" o de cobertura/anticobertura**

Parten de establecer "zonas prohibidas" para el emplazamiento de instalaciones alrededor de cada lugar de residencia de la población. Estos modelos han sido desarrollados a partir del concepto "*set covering*" o conjunto de zonas que cubren la demanda de la población de un servicio deseable sin que sea necesario recorrer para ello una distancia mayor a un límite máxi-

mo, normalmente coincidente con el valor del "alcance espacial" del bien o servicio en cuestión (Bosque, 1992, p. 224). En el caso de instalaciones no-deseables, se aplica el concepto inverso, es decir, el planteamiento anti-cobertura, donde la población debe estar situada, en su totalidad o en su mayor parte, fuera de una distancia en torno a cada instalación. Dicha distancia se considera que establece la existencia o no de un riesgo o molestia para la población derivado de la actividad de la instalación no-deseable. Es posible plantear el mismo concepto formulando un umbral de distancia en torno a cada lugar de residencia de la población (ver figura 1).

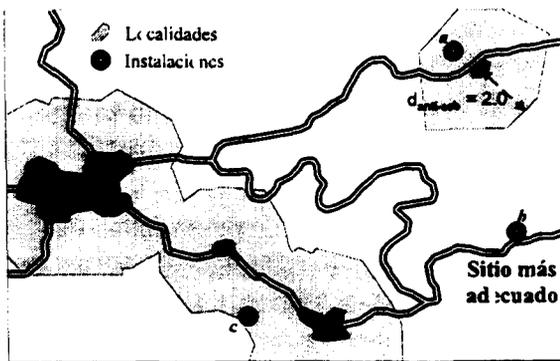


Figura 1

### Modelos de localización-asignación basados en la maximización de la distancia

La mayoría de los modelos para el emplazamiento de instalaciones no-deseables buscan optimizar un valor conjunto de la distancia (entre instalaciones y la población).

Erkut y Newman (1989), presentan una lista general de criterios de clasificación de los modelos de localización. Dicho esquema considera diversos criterios entre los que es posible destacar:

- . **El número de instalaciones a localizar**
  - Una instalación
  - Varias instalaciones
- . **El tipo de interacciones consideradas**
  - Únicamente interacciones entre la población (V) y nuevas instalaciones (X):  $D(V,X)$
  - Únicamente interacciones entre nuevas instalaciones (X):  $D(X,X)$
  - Interacciones  $D(V,X)$  y  $D(X,X)$
- . **El tipo de objetivos planteados**
  - Objetivo único
  - Multiobjetivo

A pesar de que se han formulado un gran número de modelos, la mayoría pueden considerarse como casos particulares de modelos más generales de maximización basados en la solución de problemas de tipo **maximin** y **maxisum**:

- A. El problema **maximin** busca definir la máxima distancia mínima entre la población y la o las instalaciones a ubicar.
- B. El problema **maxisum** busca encontrar el valor máximo de la suma de las distancias entre la población y la o las instalaciones a ubicar.

### Modelos maximin para la localización de una o varias instalaciones

El problema **maximin** busca determinar la ubicación óptima de una o varias instalaciones, mediante maximizar la distancia mínima entre cada lugar de residencia de la población y la instalación no-deseable más próxima (Drezner y Wesolowsky, 1983; ver figura 2). El modelo maximin puede considerar interacciones entre la población y nuevas instalaciones (V,X) o interacciones entre las nuevas

instalaciones  $(X, X)$ . Estos modelos se pueden expresar matemáticamente:

A. Encontrar uno o varios puntos de una región, de tal manera que se maximicen las distancias mínimas  $(d)$  ponderadas  $(w_i)$  por la población residente en el punto  $i$ , entre el conjunto de puntos de residencia de la población  $(v_i)$  y las nuevas instalaciones  $(X)$ , donde  $i = 1, 2, \dots, n$ , son los puntos de residencia de la población.

Maximizar la función objetivo  $z$ :

$$z \leq \left[ \min_{1 \leq i < n} w_i d(v_i, X) \right]$$

Este problema, también conocido como *p-anti-center* (Moon y Chaudry, 1984), puede considerarse como la versión maximin del problema *p-center* en los modelos minimax utilizados para la localización de instalaciones deseables.

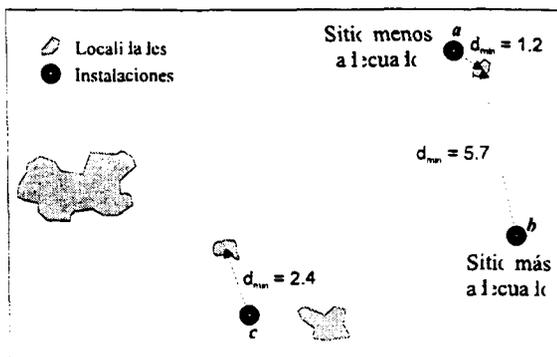


Figura 2

Una segunda variante es la siguiente:

B. Encontrar uno o varios puntos en una región, de tal manera que se maximicen las distancias mínimas  $(d)$  entre cada punto  $(x_i)$  del conjunto de posibles instalaciones  $(X)$ , donde  $i = 1, 2, \dots, n$ , son los lugares candidatos a recibir una instalación.

Maximizar la función objetivo  $z$ :

$$z \leq \left[ \min_{1 \leq i < n} d(x_i, X) \right]$$

Este problema, conocido como *p-maximin-min* con términos  $D(X, X)$  o *p-dispersion*, parte de considerar que no existen instalaciones y busca encontrar la óptima localización en el emplazamiento de un conjunto de nuevas instalaciones no deseables. Dado que se busca maximizar el número de instalaciones a localizar en forma dispersa en una región determinada, como una medida de justicia espacial, sería recomendable incluir el manejo de límites mínimos en distancia, es decir, aplicar conjuntamente el problema *anti-cover*.

### Modelos maxisum para la localización de una o varias instalaciones

El problema maxisum busca determinar la localización óptima de una o varias instalaciones, mediante el cálculo de la máxima distancia total, mínima o promedio, entre un conjunto de sitios alternativos y el conjunto de centros de población (ver figura 3). Al igual que en el problema maximin, el modelo maxisum puede considerar tanto interacciones entre la población y las nuevas instalaciones  $(V, X)$  como interacciones entre las nuevas instalaciones  $(X, X)$ . Estos modelos se pueden expresar matemáticamente:

A. Encontrar uno o varios puntos en una región, que maximice la suma de las distancias  $(d)$ , mínimas o promedio, ponderadas  $(w_i)$ , población residente en el lugar  $i$ , entre el conjunto de puntos de residencia de la población  $(v_i)$  y las nuevas instalaciones  $(X)$ , donde  $i = 1, 2, \dots, n$ , son los centros de residencia de la población.

Maximizar la función objetivo  $z$ :

$$z \leq \left[ \sum_{i=1}^n w_i d(v_i, X) \right]$$

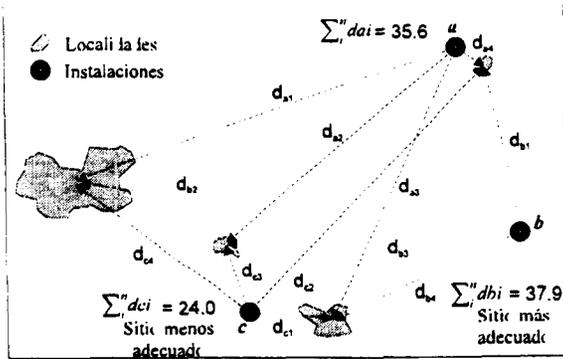


Figura 3

El modelo más conocido es el  $p$ -maxian (Moon y Chaudry, 1984), que puede considerarse la versión maxisum del modelo  $p$ -mediano (Bosque Sendra, 1992, p. 227), originalmente desarrollado para localizar un determinado número de instalaciones deseables ( $p$ ) en una red, de tal manera que se minimice el promedio ponderado de las distancias de recorrido de la población a la instalación más cercana.

Una variante del anterior es el modelo siguiente, que considera las distancias entre las propias instalaciones:

B. Encontrar los puntos en una región, de tal manera que se maximice la suma de las distancias ( $d$ ), entre cada instalación ( $x_i$ ) y el conjunto de instalaciones existentes ( $X$ ), donde  $i = 1, 2, \dots, n$  son las instalaciones.

Maximizar la función objetivo  $z$ :

$$z \leq \left[ \sum_{i=1}^n d(x_i, X) \right]$$

Este modelo  $p$ -maxisum-sum, también conocido como  $p$ -defense, permite determinar el patrón de localización que maximice la dispersión promedio entre instalaciones.

### Modelos combinados basados en la maximización de varias distancias

Kuby (1987), realizó un estudio comparativo entre los criterios maximin ( $p$ -dispersion) y maxisum ( $p$ -defense). De dicho estudio se desprende que el modelo  $p$ -dispersion, más fácil de resolver y de aplicabilidad general, provee una solución con los puntos regularmente distribuidos en la región, permite pensar en una mayor justicia espacial para la localización de instalaciones no-deseables. El modelo  $p$ -defense, más complejo y de aplicabilidad muy especializada, genera una solución en que los puntos tienden a distribuirse hacia la periferia de la región considerada (frecuentemente en forma agrupada) y tiene la ventaja de considerar todas las distancias y no únicamente las distancias mínimas.

Es evidente que todo modelo ideal de dispersión de instalaciones debería considerar ambos problemas en un enfoque combinado que permita preservar la distancia maximin al tiempo que maximiza la distancia promedio entre instalaciones.

Si se parte de considerar simultáneamente los modelos anti-cover, maximin y maxisum, es posible plantear una serie de modelos combinados. Los más relevantes mencionados en la literatura son: el modelo *anti-center-maxian* que busca maximizar la suma de las distancias ponderadas, minimizando la proximidad entre localidades e instalaciones y; el modelo *dispersion-defense*, que busca localizar las instalaciones maximizando las distancias, mínima y promedio, entre ellas (Moon y Chaudry,

1984). A pesar de su evidente relevancia, estos no han sido suficientemente desarrollados y existen muy pocos ejemplos de aplicación.

### MODELOS MULTICRITERIO EN RELACIÓN A LA EFICIENCIA ESPACIAL: DISTANCIAS A LOS PRODUCTORES Y A LA POBLACIÓN POTENCIALMENTE AFECTADA

Un tipo diferente de modelos son aquellos que planteándose como único objetivo optimizar la eficiencia espacial de la configuración de las instalaciones, miden este objetivo con dos criterios diferentes y complementarios/conflictivos: el ya conocido, la distancia a la población residente, y que, por lo tanto, se ve afectada por las instalaciones y, por otro lado, la distancia desde las instalaciones a los productores de sustancias a ser tratadas en estos centros.

En este caso no se ha desarrollado, al menos en la literatura disponible, ninguna formulación operativa, pero es fácil utilizar las técnicas de evaluación multicriterio para hallar un conjunto de soluciones a la cuestión que, además, están ordenadas en cuanto a su validez. Para ello, se puede utilizar el enfoque planteado en Barredo y Bosque (1995), el cual, adaptado a este problema, facilita que, empleando el análisis del punto ideal, se obtenga una ordenación cuantitativa de todos los lugares de un área en cuanto a su capacidad de aceptar una instalación de este tipo empleando como criterios los dos citados (ver figura 4). Como es fácil de visualizar en la figura citada, la mejor solución para el problema es situar las instalaciones en los puntos a mínima distancia de los productores y, simultáneamente, a la máxima distancia de la población, este lugar es el denominado "punto ideal" en la figura. Cualquier otro lugar se sitúa a una distancia de él, en el

espacio matemático formado por los dos ejes de la gráfica, esta distancia matemática puede servir para ordenar y cuantificar la validez de cada punto del territorio para recibir una instalación, de este modo es posible identificar los lugares más adecuados para resolver el problema.

Con el mismo procedimiento es posible añadir otros criterios complementarios que se consideren de importancia (y que actúan como restricciones absolutas a la localización de una instalación en ese lugar), así se puede mencionar ciertos aspectos del medio físico, por ejemplo, la litología existente en los puntos candidatos, y su capacidad de recibir los residuos peligrosos y mantenerlos aislados del entorno (Figura 4).

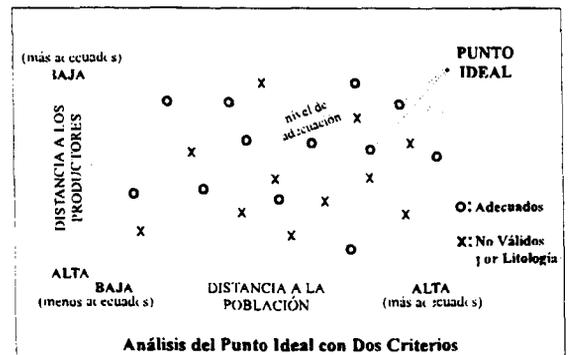


Figura 4

### EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE

La localización de plantas de tratamiento de residuos industriales, tóxicos y peligrosos, es una tarea altamente compleja, que trasciende la mera utilización de modelos de maximización de la distancia entre puntos de demanda/población residente e instalaciones. El manejo de residuos implica considerar los efectos derivados de su transporte a lo largo de una red y conduce a replantear la relación entre justicia y eficiencia espacial, que deberán estimarse

tomando en consideración las características de la red de transporte utilizada.

Como se ha mencionado anteriormente, la mayor o menor *eficiencia espacial* está dada, fundamentalmente, por los costos del transporte de los residuos y para evaluarla se requiere de la representación matemática de una red que considere, más que las distancias euclidianas entre puntos de producción e instalaciones, propiedades tales como la distancia real de recorrido, el tiempo promedio de desplazamiento y las características físicas de la ruta utilizada.

La *justicia espacial* se expresa como el grado en que la población comparte los riesgos y molestias derivados del traslado y disposición de los residuos tóxicos y peligrosos. Su evaluación debe considerar, por lo tanto, los riesgos reales y percibidos que impactan tanto a la población que habita a lo largo de la red no-deseable como al conjunto de usuarios de la misma. La justicia espacial, no puede definirse únicamente como una función de distancia a partir de la red sino que deberá incluir, entre otros elementos, una medida de ponderación en función de la carga vehicular promedio de cada tramo.

Los principales trabajos que han abordado la tarea de evaluar la red de transporte como parte del problema de la localización de instalaciones, se basan exclusivamente en la búsqueda de la mayor eficiencia espacial en términos de costos de transporte y han estado dirigidos a determinar el camino más corto entre el sitio preseleccionado para localizar una instalación y los puntos de demanda a ser atendidos (Current, ReVelle y Cohon, 1984).

## El problema del camino más corto

El problema del camino más corto asume que la localización de las instalaciones ha sido previamente definida y a partir de esto, busca determinar la ruta más corta a lo largo de la red que conecta los diversos puntos de demanda. Esto se expresa matemáticamente como:

$$\text{Minimizar la función objetivo } z \\ z \equiv \min \sum_{i \in N_j} \sum_j d_{ij} x_{ij}$$

Donde  $d_{ij}$  es la distancia más corta desde el nodo  $i$  hasta el nodo  $j$  y  $X_{ij}=1$  cuando el tramo  $(i,j)$  pertenece al itinerario que los une en la red y  $X_{ij}=0$  cuando el tramo  $(i,j)$  no pertenece al itinerario (Current, ReVelle y Cohon, 1984). Dentro de los diversos procedimientos mencionados por Bosque (1992, p. 217) para la obtención del camino más corto, destaca el método planteado por Dantzig que consiste en un método heurístico para comparar las distancias de todos los caminos posibles entre el punto de origen y el punto de destino.

## La Ruta Óptima: la ruta práctica y la ruta menos peligrosa

La localización de instalaciones no-deseables es multiobjetivo por naturaleza, no puede abordarse en forma simplista como un problema de distancias mínimas e incluye determinar la ruta **óptima** entre puntos de demanda e instalaciones. La selección de la ruta óptima constituye un serio conflicto entre la ruta práctica, es decir, la ruta de menor costo (considerando distancias, límites de velocidad y preferencias históricas) y la ruta menos peligrosa, es decir, la que impone el menor riesgo a la mayor población posible (y que implica

considerar conjuntamente el riesgo a la población residente en las proximidades de la red y el riesgo a los usuarios de la red, ver figura 5).

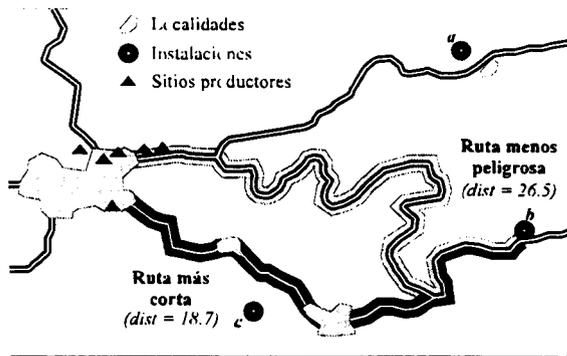


Figura 5

De acuerdo a Glickman y Sontag (1995), la definición de la ruta óptima depende del análisis comparativo costo-riesgo entre las diversas rutas alternativas de una red que conecta puntos de demanda e instalaciones. Esto implica estimar el riesgo total ( $R$ ) de cada alternativa, medido como la suma de las frecuencias de accidentes ( $f_i$ ) por la consecuencias de cada accidente ( $c_i$ ), ocurridos en cada tramo de la ruta ( $i=1, \dots, n$ ):

$$R \equiv \sum_i^n f_i c_i$$

La frecuencia ( $f_i$ ), se obtiene como el producto de la tasa histórica de accidentes para camiones de carga, la longitud del tramo y la probabilidad de vertido de un residuo como efecto del accidente. Las consecuencias ( $c_i$ ), se estiman como el producto entre el impacto posible del accidente y la densidad de población a lo largo del tramo.

El método propuesto por Glickman y Sontag (1995), representa un importante

aporte para analizar la relación justicia-eficiencia en la definición de una ruta óptima de transporte de residuos peligrosos y parte de calcular, para todas las rutas posibles, el costo y riesgo total. Como resultado del análisis comparativo, los autores citados han logrado obtener algunas conclusiones que pueden tener relevancia general:

- A medida que aumenta la distancia entre puntos de origen y destino, la longitud del recorrido y la velocidad promedio de la ruta práctica tienden a ser menores que los obtenidos para la ruta menos peligrosa. La menor distancia de las rutas prácticas contribuye a que el índice de población expuesta al riesgo, aunque mayor que para las rutas menos peligrosas, no resulte muy elevado.
- La relación costo-riesgo tiende a ser mayor para las rutas cortas que para las rutas largas. Esto implica que cuando origen y destino están muy cercanos, sería más costoso minimizar el riesgo a partir de redefinir la ruta.
- Las rutas de menor riesgo tienden a ser casi el doble de largas (medidas en Km) que las rutas prácticas pero requieren más del doble de tiempo para ser recorridas. Esto se debe principalmente a los menores límites de velocidad.
- Aunque las rutas de menor riesgo tienden a reducir la exposición de la población, no se reduce el riesgo en la misma proporción dado que este puede verse afectado por la mayor distancia y el tipo de carretera.

Es evidente que la determinación de una ruta óptima no puede ser una mera selección entre ruta práctica y ruta menos peligrosa. La determinación de la ruta menos costosa podría representar un riesgo muy elevado para la población, la selección de la ruta menos peligrosa, por su parte, podría ser muy poco realista en función de los altos costos y de los problemas derivados de las deficiencias de infraestructura, la menor transitabilidad y los mayores tiempos de recorrido.

A partir de estas conclusiones se desprende que la ruta óptima no necesariamente es la más corta pero tampoco necesariamente es la de menor riesgo. Es evidente la necesidad de profundizar en el desarrollo de modelos que consideren: el riesgo, real o percibido, impuesto a la población a lo largo del recorrido; las características y distribución de la población; las características de las diversas vialidades; las condiciones medio-ambientales regionales y las características y cantidad de residuos a transportar.

### **MODELOS DE LOCALIZACIÓN ASIGNACIÓN PARA INSTALACIONES NO DESEABLES QUE CONSIDERAN LA REACCIÓN DE LA POBLACIÓN Y SU PERCEPCIÓN DEL RIESGO PROVOCADO POR LAS INSTALACIONES**

En numerosos estudios se han tratado las actitudes de rechazo de la población a las instalaciones no deseables y como la Administración, la encargada de planificar este tipo de centros, debe actuar ante ellas. Un buen ejemplo es el establecimiento en los Estados Unidos de América de un denominado credo de la localización de instalaciones en el año 1990 (Facility Siting Credo), en el que se enumeran las condiciones y los pasos que se deben seguir

para adoptar la decisión locacional y conseguir un resultado aceptable para todos y sin graves problemas (Kunreuther, Fitzgerald y Aarts, 1993).

Este documento se centra en dos cuestiones: a) los pasos del procedimiento de decisión para situar una instalación no deseable y b) las características más apreciadas de la solución adoptada. En cuanto a la primera cuestión, el credo se puede resumir en lo siguiente: 1º Es necesario establecer un mecanismo de amplia participación popular, 2º buscar el consenso entre los diferentes interlocutores, 3º intentar establecer la confianza de todos en el proceso desarrollado, 4º buscar sitios aceptables a través de ofertas voluntarias, 5º favorecer un proceso competitivo entre los diversos lugares candidatos, 6º establecer un cronograma de trabajo realista y 7º mantener múltiples opciones durante todo el proceso. Evidentemente la existencia de lugares voluntarios para la localización de instalaciones no deseables se basa en las importantes compensaciones económicas y de otro tipo que se les ofrece.

Por su parte, en cuanto a los resultados deseados, el credo locacional se concreta en: 1º debe existir acuerdo en que la instalación a localizar es necesaria, 2º escoger la solución que mejor resuelva el problema, 3º garantizar que se aplican las más estrictas normas de seguridad, 4º delimitar con claridad todos los aspectos negativos de la localización para establecer adecuadamente la compensación, 5º establecer un paquete de compensaciones de modo que el lugar elegido considere que es preferible recibir la instalación que no recibirla, 6º especificar con claridad las acciones a realizar en casos de emergencia o cambios en el futuro de la instalación y de su peligrosidad y 7º buscar la equidad espacial en la distribución de instalaciones.

Lo que consideramos más importante es la necesidad del consenso por los posibles afectados y la búsqueda de una equidad o justicia espacial en la localización de las instalaciones. En lo posible, los modelos de localización-asignación más realistas y apropiados deberían incluir algunos o todos estos aspectos.

En nuestro país no se ve muy claro que se utilice un procedimiento semejante en cuanto a la búsqueda de las localizaciones de este tipo de instalaciones, basta con comprobar las polémicas en la prensa entre las empresas públicas dedicadas a ello y las organizaciones ambientalistas.

Un segundo enfoque de interés para la solución de esta problemática es la realización de estudios que pretenden determinar que características espaciales y ambientales tienen los lugares que son aceptados por la población para situar en ellos este tipo de instalaciones no deseables (Opaluch y otros, 1993). Llevando a cabo para ello encuestas donde se presentan a la población esquemas de posibles emplazamientos con distintas combinaciones de situaciones, ya sea respecto a cercanía a la población y a centros de especial sensibilidad (escuelas, hospitales) o en cuanto a temas ambientales (zonas de bosque o de cultivos, etc), el objetivo es averiguar la gradación que la población encuestada establece en la influencia de estos factores para utilizar esta información en la búsqueda de emplazamientos que provoquen el mínimo posible de resistencia.

En tercer lugar, se ha planteado considerar la interacción entre instalaciones no deseables y grupos de población especialmente sensibles (niños, ancianos, enfermos, etc) y los centros que los atienden (guarderías, residencias de jubilados, hospitales, etc) para evitar en lo posible que se

afecte a este tipo de grupos más débiles y sensibles (Malczewski, 1991).

Finalmente, se han construido modelos de localización-asignación para este tipo de instalaciones que incluyen en su formulación algunos elementos de la percepción del riesgo que provocan estas instalaciones entre la población (Ratick y White, 1988). Uno de ellos, el denominado "Complementario-anticobertura", parte del modelo anticobertura pero le añade determinar como incide el número de instalaciones establecidas en cuanto a la mayor o menor equidad para la población, buscando optimizar el número de instalaciones y su posición en el espacio de modo que se consiga un alto grado de equidad espacial y, por lo tanto, un menor grado de resistencia de la población. Se parte del supuesto de que el grado de equidad depende, en buena medida, del número y distribución de las instalaciones (la equidad aumenta en la medida en que aumenta el número de otras áreas con instalaciones similares, siempre y cuando dichas instalaciones estén suficientemente alejadas como para evitar riesgos a la población) y que el riesgo percibido es más que proporcional a la escala o magnitud de las instalaciones (el riesgo percibido se considera una función del riesgo real y aumenta rápidamente con el tamaño de la instalación). Dicho modelo permite identificar patrones de localización que pueden minimizar la oposición de la población derivada de posibles objeciones en cuanto a la equidad y tamaño de las instalaciones. Un grave problema de este enfoque es su olvido del tema de la eficiencia espacial, en relación sobre todo a la distancia a los productores, y, por lo tanto, no considera, en absoluto, los riesgos provocados por los transportes de los residuos.

## UN PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOCALIZACIONES ÓPTIMAS/ADECUADAS DE INSTALACIONES NO DESEABLES

La consideración de todas las cuestiones y los procedimientos antes mencionados, y, en especial, el hecho constatable de la multiplicidad de los factores que afectan a la determinación de estas localizaciones, conduce a considerar la urgente necesidad de relacionar los modelos de localización-asignación hasta ahora utilizados en la búsqueda de soluciones con nuevos procedimientos que permitan tener en cuenta de modo más completo la variedad de factores incidentes, en este sentido ocupan un papel importante, como ya hemos mencionado, los métodos de evaluación multicriterio y su uso dentro de un SIG como un verdadero Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial.

En este sentido proponemos un procedimiento organizado en las siguientes etapas:

1º Utilizar la Evaluación Multi-Criterio y, en concreto, el Análisis del Punto Ideal (Barredo, 1996; Barredo y Bosque, 1995) para encontrar un primer conjunto de soluciones al problema. Considerando para ello tres tipos de criterios: a) ambientales, b) los que miden la eficiencia espacial de las localizaciones de instalaciones y c) los que consideran la posible interacción entre las instalaciones no deseables y otros tipos de centros especialmente sensibles (ver figura 4).

- Criterios ambientales. En concreto, factores tales como la hidrografía, litología, etc, permiten eliminar las zonas que no presentan un mínimo de condiciones físicas para recibir los residuos y conservarlos aislados del resto del medio. Se

seleccionan exclusivamente zonas impermeables, alejadas de los cursos fluviales, y otras semejantes. De este modo, los criterios de este tipo actúan como factores limitantes o restrictivos de la instalación de este tipo de centros.

- Criterios que miden la eficiencia espacial: 1º a los productores de residuos, a través de minimizar la distancia/coste de recorrido ponderado por la cantidad de residuos a transportar desde cada punto origen; 2º a la población, maximización de la distancia/coste de recorrido a cada centro poblado, ponderado por la población residente en cada punto del territorio.

- Un tercer tipo de criterios que pueden intervenir en el cálculo forman un nuevo factor limitante que asegure que no se instale ningún centro a menos de una distancia mínima de los lugares de residencia de la población (Modelo anti-cobertura) y, por otro lado, otra restricción que impida la posición de centros de este tipo dentro del radio de influencia de lugares especialmente sensibles (hospitales, residencias de jubilados, guarderías, etc).

Este análisis permite establecer una jerarquía de los lugares más adecuados para situar estos centros. De este modo, se ha obtenido una primera solución, aunque sea todavía poco refinada y precisa, no obstante, en muchos casos podemos confiar baste con esto para ofrecer a los planificadores y decisores unas alternativas bien fundamentadas para que ellos, añadiendo otros criterios, resuelvan definitivamente la cuestión.

2º En caso de necesitar soluciones más detalladas y con mayor resolución espacial, los lugares determinados hasta el momento se pueden convertir en "candidatos" sobre los cuales se pueden utilizar los modelos de localización-asignación antes

comentados, pero que funcionan mucho más eficazmente al partir de un conjunto reducido de lugares candidatos a recibir los centros. Su papel consiste en determinar cual es la combinación más correcta, (óptima) de estos lugares, en la cual situar los centros buscados. Dos planteamientos complementarios será necesario considerar en este momento:

a) Por un lado, utilizar algunos de los modelos localización-asignación existentes para seleccionar la combinación de lugares candidatos más idónea y "óptima". En este caso se puede usar alguno de los diferentes tipos de modelos mencionados en los apartados previos, en especial los denominados maxisum y maximin. No obstante, dada la importancia de la equidad espacial y de la percepción que la población tiene del problema, puede ser de mayor interés emplear el modelo de localización-asignación denominado "Complementario anticobertura", que ha sido creado para tener en cuenta estos elementos.

b) Por otro lado, una fase simultánea y/o alternativa a la anterior es la discusión de los resultados iniciales, los puntos "candidatos" definidos en la etapa 1, considerando el problema de las rutas "óptimas" entre lugares productores y centros de tratamiento. Para ello, sería necesario analizar las características de las rutas de mínimo recorrido y las de mínimo riesgo que unen cada uno de los lugares candidatos preseleccionados con los puntos de producción, de este modo, sería posible considerar este factor, el tamaño del riesgo producido al trasladar los residuos hacia uno u otro de los lugares candidatos y, con ello, calcular cuales resultan más adecuados desde este punto de vista.

Con las dos enfoques anteriores, obtendríamos dos valoraciones de los pun-

tos candidatos, una de ellas alcanzada con los modelos de localización-asignación y la otra a partir de los movimientos de los residuos, la decisión final debería estar influida por ambas valoraciones.

3º En esta etapa final, nuevamente las técnicas de evaluación multicriterio podrían ayudar a diferenciar entre los lugares candidatos, empleando como datos de entrada las dos valoraciones de ellos obtenidas con los dos métodos mencionados (etapa 2), a lo que se podría añadir otras cuestiones diferentes que se consideren de interés (costes diferentes de la construcción de las instalaciones, o de la expropiación de los terrenos, problemas políticos específicos de cada lugar candidato, etc). Evidentemente, y dada la magnitud de las informaciones disponibles sobre los lugares preseleccionados, resultarían de gran utilidad los procedimientos denominados "programación compromiso" o de "responsabilidad compartida entre los grupos afectados", que se describen con cierto detalle en los trabajos de Massan (1980 y 1993).

En cualquier caso, el procedimiento planteado proporciona una amplia gama de resultados y ordenaciones cuantitativas de los distintos puntos del espacio, en cuanto a su capacidad para recibir una instalación no deseable, información que puede ser considerada con facilidad en un proceso de decisión final realizado por los políticos y responsables administrativos, que son, en definitiva, los que adoptan la solución definitiva en una sociedad democrática.

#### Bibliografía

BARREDO CANO, J.I. (1996): *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, Ed. RA-MA.

- BARREDO CANO, J.I. y BOSQUE SENDRA, J. (1995): "Integración de evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica para la evaluación de la capacidad de acogida del territorio y la asignación de usos del suelo". *Actas del IV Congreso español de Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, AESIG, pp. 191-200.
- BOSQUE SENDRA, J. (1992): *Sistemas de información geográfica*. Madrid, Ediciones Rialp, 451 p.
- BOSQUE SENDRA, J. y MORENO JIMÉNEZ, A. (1990): "Facility location analysis and planning: a GIS approach", *EGIS'90. First European Conference on Geographical Information Systems*. Utrecht, EGIS Foundation, pp. 87-94.
- CURRENT, J.; REVELLE, CH. y COHON, J. (1984): "The Shortest Covering Path Problem: An Application of Locational Constraints to Network Design", *Journal of Regional Science*, Vol. 24, No. 2, pp. 161-183.
- DREZNER, Z. y WESOLOWSKY, G.O. (1983): "The Location of an Obnoxious Facility with Rectangular Distances", *Journal of Regional Science*, Vol. 23, No. 2, pp. 241-232.
- ERKUT, E., y NEUMAN, S. (1989): "Analytical models for locating undesirable facilities", *European Journal of Operational Research*, vol. 40, pp. 275-291.
- GLICKMAN, T. S. y SONTAG, M. A. (1995): "The Tradeoffs Associated with Rerouting Highway Shipments of Hazardous Materials to Minimize Risk", *Risk Analysis*, Vol. 15, No. 1, pp. 61-67.
- KUBY, J. M. (1987): "Programming Models for Facility Dispersion: The p-Dispersion and Maximum Dispersion Problems", *Geographical Analysis*, Vol. 19, No. 4, pp. 315-329.
- KUNREUTHER, H., FITZGERALD, K. y AARTS, T.D. (1993): "Siting Noxious Facilities: A Test of the Facility Siting Credo", *Risk Analysis*, vol. 13, n° 3, pp. 301-315.
- MALCZEWSKI, J. (1991): "Central facility location and environmental health", *Environment and Planning A*, vol 23, pp. 385-395.
- MASSAM, B. (1980): *Spatial search. Applications to Planning problems in the Public Sector*. Oxford, Pergamon Press, 293 p.
- MASSAM, B. (1993): *The Right Place. Shared responsibility and the allocation of public facilities*. Londres, Longman, 231 p. (G551).
- MCALLISTER, D. M. (1976): "Equity and Efficiency in Public Facility Location", *Geographical Analysis*, Vol. 8, pp. 47-63.
- MOON, D. y CHAUDHRY, S. (1984): "An Analysis of Network location problems with distance constraints", *Management Science*, vol. 30, n° 3, pp. 290-307.
- MORRILL, R. L. y SYMONS, J. (1977): "Efficiency and Equity aspects of Optimum Location", *Geographical Analysis*, Vol. 9, pp. 215-225.
- OPALUCH, J.J. y otros (1993): "Evaluating Impacts from Noxious Facilities: Including Public Preferences in Current Siting Mechanisms", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 24, pp. 41-59.
- RATICK, S.J. y WHITE, A.L. (1988): "A risk-sharing model for locating noxious facilities", *Environment and Planning B*, vol. 15, pp. 165-179.
- SCHILLING, D. A.; REVELLE, CH.; COHON, J. y ELZINGA D. J. (1980): "Some Models for Fire Protection Locational Decisions", *European Journal of Operational Research*, Vol. 5., pp. 1-7.
- STEVENS, BENJAMIN H. (1985): "Location of Economic Activities: The JRS Contribution to the Research Literature", *Journal of Regional Science*, Vol. 25, No. 4, pp. 663-685.