LOCALIZACION DE NUEVOS CENTROS DE SERVICIO Y MINIMIZACION DE LA DISTANCIA RECORRIDA. LOCALIZACION-ASIGNACION.

CHAMIZO GUERRA, CRISTOBAL
GUTIERREZ FERNANDEZ, ARTURO
VELASCO MORENTE, FRANCISCO
Dpt. Economía Aplicada I Facultad de C.E.Y.E.(Sevilla)

1.-INTRODUCCION:

La localización de actividades es uno de los temas sobre los que más se ha escrito en los últimos veinte años. Si se trata de dar una idea general y resumida de la tendencia en la localización, podemos decir, que cualquier actividad tiende a localizarse en la zona en la que aquella genera una ventaja relativa mayor. Cuando han de tomarse decisiones de localización de infraestructuras de tipo social o capital fijo social, la teoría de la localización cobra especial relevancia aunque no siempre se ha puesto de manifiesto, pues no estamos habituados a que las decisiones de localización de colegios, hospitales, centros de salud, parques de bomberos, comisarías de policía etc..., se tomen con el apoyo técnico suficiente. De la misma forma que no solemos aplicar a las decisiones alternativas de inversión técnicas como el análisis coste-beneficio que objetivizan la toma de decisiones. Una de las decisiones que hoy día más preocupan por las repercusiones económicas y sociales que tiene, es la localización óptima de centros de servicios, tanto en los centros urbanos, para cubrir la demanda de distritos o ciudades, o bien, para cubrir la demanda de áreas de influencia más amplia. [3], [5] y [7]. Sabemos que la solución pasa por encontrar puntos de localización en los que se obtienen máximos beneficios y/o menores costes cuando éstos reflejan los niveles de satisfacción social máxima. Un problema añadido que se deriva en no pocos casos de la localización de dichos centros (colegios, hospitales, etc...) es el reparto de la demanda o su asignación, cuando esta decisión no se deja al libre albedrío individual, puesto que el máximo beneficio social y/o los menores costes no tienen porque coincidir con el máximo de satisfacción individual. Nos ha parecido de enorme interés realizar alguna aportación a la localización de equipamientos o centros de servicio y asignación de la demanda cuyo uso exige un desplazamiento de la demanda a dichos centros, como es el caso de los colegios o los centros de salud, aunque nuestro modelo y la aplicación práctica se refiere al primer tipo de equipamientos señalado.

2.-METODOLOGIA:

La plasmación del modelo que hemos desarrollado para resolver el problema de localización y asignación de la demanda, requiere que previamente expliquemos algunas decisiones metodológicas en cuanto a las variables elegidas y su forma de medición.

2.1.-La demanda:

La forma de obtener la demanda y la localización de los puntos en los que se origina puede ser muy diversa, dependiendo del problema que sea necesario resolver. El procedimiento habitual es utilizar censos de población y estudiar las características que requiere cada usuario del centro de servicios al que se refiera el problema. En unos casos, los puntos en los que se origina la demanda serán municipios, mientras que en otros y dependiendo del número de centros a ubicar los puntos orígen de la demanda serán zonas o arcos más pequeños dentro de un municipio o una ciudad (distritos censales, etc...). Otro problema relacionado con la demanda, que es necesario resolver, se refiere al conocimiento de la demanda en la fecha que se lleve a cabo la inversión, pues la estructura de la población y un nivel económico determinan cambios en la demanda que siempre habrán de tenerse en cuenta, para lo cual el trabajo de campo mediante encuestas es una fuente directa de información de gran ayuda.

2.2.-<u>Variable elegida</u>:

En todos los casos en los que los usuarios se tienen que desplazar para hacer uso de un servicio, siempre y cuando la decisión se tome racionalmente, la variable elegida será la distancia recorrida, se mida en kilómetros o en tiempo empleado en recorrer dicha distancia. Al tratarse de un problema de localización y de asignación de la demanda en centros alternativos, era necesario saber si la variable utilizada en el modelo de localización servía para la asignación. Hemos supuesto que la realidad del servicio prestado es la misma en los distintos centros y por tanto, la variable elegida cumplía las condiciones requeridas. El paso siguiente ha sido decidir entre un punto de demanda y uno de oferta, que tipo de distancia tomábamos, pues se podían tomar la distancia euclídea, la rectangular, la real en función de las infraestructuras, etc... La toma de decisiones ante problemas reales requiere que las variables que se elijan en un problema como este, sean las mismas que son tenidas en cuenta por los usuarios, ajustándonos al máximo a las condiciones reales en las que se desenvuelve la oferta y la demanda. No hubiese sido correcto abstraerse de las infraestructuras terrestres existentes, ni de las restricciones que impone la normativa de circulación (direcciones prohibidas, semáforos...). Si bien dado que la localización de los colegios que hemos abordado no planteaba problemas de asignación de la demanda dentro de una misma ciudad por no existir en ella colegios alternativos, ha simplificado enormemente la decisión acerca de la variable elegida y su medición, pues no ha sido necesario enfrentarse con restricciones propias de una red de infraestructura (semáforos, direcciones prohibidas...), ni tan siquiera abordar el problema añadido de los pesos diferentes a los medios de transporte (vehículo motorizado, bicicleta, a pie...). De manera que la variable elegida ha sido la distancia real, utilizando para su medición la red de infraestructuras existente.

2.3.-<u>Valoración de los t_{ij}</u>:

A continuación fue necesario decidir como íbamos a valorar la distancia entre dos puntos (t_{ij}), sabiendo que aquella debía medirse sobre la red de infraestructuras existentes entre dichos puntos, la alternativa que en cualquier decisión de este tipo es utilizar la distancia en kilómetros o en tiempo (isocronas). Al enfrentarnos con un problema de desplazamiento interurbano y sabiendo que las infraestructuras existentes entre los puntos de orígen y destino de la demanda no ofrecían desviaciones entre la distancia en kilómetros y en tiempo, se ha tomado la primera, pues nos facilita los cálculos, ya que disponíamos de datos estadísticos exactos y no desvirtuábamos la toma de decisiones. Elegida la variable (la distancia) y decidida su forma de valoración (kilómetros recorridos), el criterio de localización y asignación ante un problema como este ha sido la minimización de la distancia en kilómetros que es también la minimización de la distancia "tiempo". Criterio que al aplicarse a la localización de colegios y asignación de la demanda mejora el nivel de bienestar desde varias ópticas:

a)Disminuyendo el peligro del viaje para los escolares, al ser la distancia más corta.

b)Aumentando la disponibilidad de tiempo para otras actividades por ser menor también el tiempo de desplazamiento.

c)Si la distancia es la menor, los costes de transporte también lo serán, lo que determinará la maximización de beneficios individuales si el transporte lo pagan los usuarios, o social, si es la Administración. En definitiva, en una sociedad con recursos escasos, la asignación óptima es el objetivo de cualquier problema de localización.

3.-EL MODELO:

El modelo que a continuación desarrollamos va a tratar de resolver la localización de los centros y la asignación de la demanda que posteriormente dará lugar a la aplicación práctica. Nos hemos enfrentado a un problema de localización de centros contando con centros existentes y de asignación de la demanda en cada uno de ellos.

3.1.-Localización:

Notaremos por $P_i=(a_i,b_i)$, $i=1,\ldots,m$ los puntos de demanda y $Q_j=(c_j,d_j)$, $j=1,\ldots,n$ los lugares que potencialmente pueden albergar un centro de servicio. Sea w_i, $i=1,\ldots,m$ el número de usuarios de los centros que viven en el lugar de demanda P_i. Sea también t_{ij} el tiempo medio estimado que emplean los usuarios que van del lugar de demanda P_i al centro Q_j. En algunos casos prácticos estos valores t_{ij} son proporcionales a la distancia del lugar i al j (d_{ij}). Sean entonces las variables binarias X_{ij} $i=1,\ldots m$ $j=1,\ldots n$ ($X_{ij}=0$ ó 1). Esta variable vale 1 si la demanda procedente de i es satisfecha por el centro situado en j y 0 en caso contrario. Consideremos otro conjunto de variables binarias Y_j $j=1,\ldots,n$ ($Y_j=0$ ó 1). Valdrá 1 si existe un centro en el lugar j y 0 en caso contrario.

El problema que se plantea entonces es el siguiente:

$$\left.\begin{array}{l} \displaystyle\min_{X_{ij},Y_j} \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} w_i t_{ij} X_{ij} \\ s.a. \\ \displaystyle\sum_{j=1}^{n} X_{ij}=1 \;, i=1,\ldots,m \\ X_{ij}\le Y_j \;, i=1,\ldots,m, j=1,\ldots,n \\ \displaystyle\sum_{j=1}^{n} Y_j=p, \quad X_{ij}=0 \text{ ó } 1, Y_j=0 \text{ ó } 1 \end{array}\right\} (A)$$

donde el tiempo medio empleado (o distancia recorrida) total por los usuarios que van del lugar i al centro situado en j es $w_i t_{ij} X_{ij}$. Por tanto el tiempo total empleado por todos los usuarios es la función objetivo. Ahora bien, teniendo en cuenta que la demanda debe ser satisfecha, obtenemos la primera restricción. Además no podrá ser satisfecha la demanda que va de i a j, si en j no hay centro, por lo que se debe dar la segunda restricción. Por último, supongamos que queremos instalar p centros, luego se ha de cumplir la última restricción.

3.2.-Asignación:

El modelo de asignación es parecido al de localización. Los valores de t_{ij} van a ser los mismos que para el modelo anterior. Supongamos ahora que tenemos n centros localizados disponibles situados en los lugares Q_j, $j=1,\ldots,n$. Supongamos también que tenemos los m puntos de demanda P_i,

$i=1,...,m$. Llamemos, igual que en el apartado anterior, w_i al número de usuarios de los centros que viven en el lugar de demanda P_i. Las variables X_{ij} van a significar ahora la cantidad de usuarios del lugar i que van al centro j. (Ahora no es una variable binaria). Por último vamos a introducir unas nuevas restricciones que son la capacidad máxima y mínima de los centros. Llamemos c_j a la capacidad máxima del centro y k_j a la capacidad mínima que consideremos para la que debe estar en funcionamiento un centro. La distancia-tiempo total empleada por los usuarios que van del lugar de demanda i, al centro situado en j, es $t_{ij}X_{ij}$ y considerando además que todos los usuarios que salgan de i deben distribuirse entre todos los centros, el problema a resolver, es el programa lineal siguiente:

$$\left.\begin{array}{l} \min\limits_{x_{ij}} \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} t_{ij}X_{ij} \\ s.a. \\ \sum_{j=1}^{n} X_{ij}=w_i,\ i=1,\ldots,m \\ k_j\le\sum_{i=1}^{m} X_{ij}\le c_j,\ \ j=1,\ldots,n \\ X_{ij}\ge 0 \end{array}\right\} \quad (B)$$

4.-UN EJEMPLO DE APLICACION PRACTICA:

Las teorías y los instrumentos de los que aquellas se sirven necesitan su contrastación en el primero de los casos y la viabilidad de su aplicación por los resultados que se obtienen en el segundo. A continuación hemos utilizado el modelo enunciado en el apartado anterior para resolver un problema real existente en la zona norte de la provincia de Sevilla, como es, localizar un nuevo Instituto de Enseñanza Secundaria Obligatoria en dicha zona, pues hay ya dos centros actualmente. A la vez vamos a tratar, que la localización del nuevo centro lleve consigo la minimización de las distancias desde los puntos de demanda a los tres centros, en función de la asignación de la demanda. El área objeto de estudio está integrada por siete municipios, que son en definitiva centros de demanda enumerados como: P_1=Alanís de la Sierra, P_2=Cazalla de la Sierra, P_3=Constantina, P_4=Guadalcanal, P_5=Las Navas de la Concepción, P_6=El Pedroso, P_7=San Nicolás del Puerto. La demanda o el número de usuarios de los centros, que viven en cada lugar de demanda P_i la vamos a llamar W_i, que en nuestro caso se ha obtenido del censo de población correspondiente al año 1991. Se han tomado como posibles alumnos para la Enseñanza Secundaria Obligatoria los comprendidos entre 15 y 19 años, teniendo en cuenta que el 80 % de esta población estudia ya. De manera que los datos de la demanda son:

$$w_1=105,\ \ w_2=316,\ \ w_3=497,\ \ w_4=185$$

$$w_5=107,\ \ w_6=140,\ \ w_7=38$$

Siendo el total de demanda:

$$\sum_{i=1}^{7} w_i=1388$$

Los centros existentes en la zona actualmente son dos, uno situado en Cazalla de la Sierra (Q_2) con capacidad para 380 alumnos y otro situado en

Constantina (Q_3) con capacidad para 540 alumnos [1]. Conocida la demanda y la oferta resulta evidente la necesidad de aumentar las plazas escolares de este nivel educativo, sea ampliando los centros existentes, sea creando uno nuevo. Parece razonable que se cree un centro nuevo (p=1) que puede evitar desplazamientos de la demanda innecesarios; no obstante, a la hora de resolver el problema hemos supuesto que no hay ningún centro Q_j, con objeto de comprobar si hay una solución óptima con tres centros, que optimice también la localización y asignación de los dos centros ya existentes. Así, hemos considerado que los lugares donde potencialmente pudiera haber un nuevo centro son todos aquellos en los que hay demanda ($P_i=Q_i$). Para valorar la "distancia" desde P_i al centro Q_j que hemos llamado t_{ij}, tal como señalabamos en la metodología hemos utilizado los kilómetros existentes por carretera [2].

El problema que planteamos, es por tanto (A), en el que n=m=7, cuya solución es:

$$Y_2=1 \quad Y_3=1 \quad Y_4=1$$
$$X_{12}=1 \quad X_{22}=1 \quad X_{62}=1 \quad X_{72}=1$$
$$X_{33}=1 \quad X_{53}=1$$
$$X_{44}=1$$

siendo el resto de las variables iguales a 0

Lo que significa que hay una solución óptima con dos centros existentes en Cazalla de la Sierra y Constantina (Q_2 y Q_3 respectivamente), lugares en los que tenemos ya dos centros y habría que hacer uno nuevo en Q_4, (Guadalcanal). Un dato a tener en cuenta también, es que el valor de la función objetivo en el óptimo es de 5690. A continuación hemos valorado las soluciones de este segundo problema de asignación. Se han fijado los alumnos que deben ir a Q_2, que son los de P_1, P_2, P_6 y P_7, que hacen un total de 599; los que irían a Q_3 son los de P_3 y P_5, que dan un total de 604 alumnos; y al centro de nueva creación en Q_4 deberían ir los de P_4 que son 285 alumnos, habitantes todos ellos de Guadalcanal (P_4). Si las capacidades actuales de Q_2 y Q_3 son respectivamente 380 y 540 alumnos, el resultado óptimo obtenido no sería viable creando otro centro exclusivamente. Conscientemente no hemos incluido hasta este momento en el ejemplo de aplicación práctica la restricción de capacidad máxima de los centros, ya que ésta es una decisión que han de tomar los responsables públicos en función también de los costes y beneficios correspondientes, que pueden ser diferentes en cada ámbito espacial. De todas formas a nuestros efectos resultaba irrelevante, ya que la restricción la teníamos en el número máximo de centros, minimizando las distancias t_{ij}. De manera que la solución que se obtiene con las restricciones incorporadas nos dice que es necesario ampliar el centro Q_2 en 319 puestos escolares, Q_3 en 64 puestos y crear un centro nuevo con 185. A esta solución la hemos llamado S_1.

Dado que cuando se trata de acometer inversiones de este tipo, es necesario valorar su idoneidad y racionalidad a corto, medio y largo plazo, hemos creido conveniente hacer un estudio de la evolución de *la demanda futura*, para observar si la solución que hemos llamado S_1, va a seguir siendo una solución óptima a diez años, tanto en lo que se refiere al número de centros, como a su ubicación y capacidades. Hemos resuelto el problema de localización en dos situaciones futuras, a cinco y diez años, utilizando los censos de niños existentes en 1991, con edades entre 5 y 14 años, ceteris páribus, es decir, sin introducir saldos netos migratorios ni mortalidad, pues a efectos del trabajo que hemos realizado, no presenta ninguna dificultad su introducción si se dispone de la información y en definitiva pretendemos poner

[1] Según datos obtenidos de los propios centros.

[2] Obtenidos de la guia de CAMPSA

de manifiesto que tenemos una herramienta instrumental adecuada para poder hacer frente a los problemas de localización. Utilizando primero el censo de niños comprendidos entre 10 y 14 años se obtiene los siguientes resultados:

$$\begin{gathered} Y_2=1 \quad Y_3=1 \quad Y_4=1 \\ X_{12}=1 \quad X_{22}=1 \quad X_{62}=1 \\ X_{33}=1 \quad X_{53}=1 \quad X_{73}=1 \\ X_{44}=1 \end{gathered}$$

siendo el resto de las variables iguales a 0

y posteriormente utilizando el censo de niños comprendidos entre 5 y 9 años, obtenemos los resultados:

$$\begin{gathered} Y_2=1 \quad Y_3=1 \quad Y_4=1 \\ X_{12}=1 \quad X_{22}=1 \quad X_{62}=1 \quad X_{72}=1 \\ X_{33}=1 \quad X_{53}=1 \\ X_{44}=1 \end{gathered}$$

siendo el resto de las variables iguales a 0

donde estamos suponiendo que las migraciones quedan constantes.

Resolviendo ambos problemas, la solución en cuanto a ubicación de los centros existentes es la misma que obteníamos en el momento presente; lo que nos dice que dicha solución o localización es también óptima a 10 años. También se observa, que la asignación de la demanda es la misma, salvo para la resolución con el censo de niños entre 10 y 14 años, en la que se obtiene que el alumnado procedente de P_7 debe ir al centro situado en Q_3 ($X_{73}=1$), y no al que está en Q_2, como se obtiene en la solución del problema utilizando los censos de posibles alumnos entre 5 y 9 años, y entre 15 y 19 años ($X_{72}=1$). A continuación hemos estudiado la asignación a cada centro, que resulta de la resolución de los problemas. Recordemos que la capacidad actual de Q_2 es de 380 y la de Q_3 de 540. Las diferencias con la solución S_1 se presentan en la capacidad que van a tener los centros, ya que esta solución que vamos a llamar S_2, nos muestra que los centros Q_2 y Q_3 si se amplian en 319 y 64 puestos escolares, presentarán a diez años un exceso de capacidad de 46 y 86 respectivamente, y el centro nuevo a crear de 23 puestos. La suma de los correspondientes excesos de plazas es en definitiva la que corresponde a la disminución de la población según la pirámide correspondiente. Esta nueva situación a largo plazo nos muestra que la solución S_1 puede considerarse óptima, haciendo mínimas las distancias recorridas t_{ij}. No obstante, hemos querido realizar una nueva aportación que muestre la versatilidad del modelo empleado en función de las restricciones impuestas. Es decir, si incorporamos al modelo una nueva restricción de capacidad de los centros, de manera que fuera necesario crear centros con una capacidad mínima de 400 y máxima de 600 puestos escolares, se volvería a realizar la asignación, atendiendo en primer lugar a las restricciones de capacidad y a continuación de las distancias. Esto supondría que una solución puede pasar por ampliar Q_2 de 380 a 400 plazas, Q_3 de 540 a 600 plazas y crear un centro nuevo en Q_4 con 400 plazas, entre los múltiples soluciones que puede haber. Suponiendo también que para que un centro esté en funcionamiento, debe hacerlo al menos con la mitad de su capacidad, el problema que resolvemos es (B) con m=7, j=2, 3, 4; $k_1=200$, $k_2=300$, $k_3=200$, $c_1=400$, $c_2=600$, $c_3=400$; donde obtenemos dos soluciones básicas factibles óptimas S_3, y S_4:

S_3

$$X_{22}=260 \quad X_{62}=140$$
$$X_{33}=497 \quad X_{53}=103$$
$$X_{14}=105 \quad X_{24}=56 \quad X_{44}=185 \quad X_{54}=4 \quad X_{74}=38$$

S_4

$$X_{22}=316 \quad X_{62}=84$$
$$X_{33}=497 \quad X_{53}=103$$
$$X_{14}=105 \quad X_{44}=185 \quad X_{54}=4 \quad X_{64}=56 \quad X_{74}=38$$

siendo el resto de las variables iguales a cero

Sabemos que, cualquier combinación lineal convexa:

$$\lambda S_3+(1-\lambda)S_4 \quad con\ 0\leq\lambda\leq1$$

también es solución de nuestro problema. Se obtiene un valor de la función objetivo en el óptimo de 7591, que es mayor que el obtenido antes, pero como ya dijimos, el modelo anterior no tuvo en cuenta las capacidades de los centros. Todas estas soluciones, minimizan la distancia recorrida por el alumnado. Ahora, se plantea el problema de elegir entre las infinitas soluciones, la que más se adecúe a otras características de nuestro ejemplo práctico. Para elegir una de ellas, hemos pensado que un criterio para hacerlo, puede ser que todos los alumnos que proceden de un pueblo donde hay situado un centro, no tengan que desplazarse a otro pueblo, y esto se consigue en la **solución S_4**. Evidentemente, este criterio puede cambiar, porque, por ejemplo, en la solución S_3 la demanda procedente de P_6, está asignada por completo al centro Q_2 ($X_{62}=140$), mientras que en la solución S_4, dicha demanda se reparte entre los centros situados en Q_2 y Q_4 ($X_{62}=84$, $X_{64}=56$), y habría que hacer un estudio de los costes de desplazamiento, para ver que solución sería más ventajosa.

Hemos introducido esta última hipótesis de trabajo, que puede no tener relación con la realidad, pero que muestra la bondad del modelo cuando imponemos distintas restricciones de capacidad mínima o máxima. Solamente pueden justificarse después de aplicar una técnica de inversiones consistente, como puede ser el análisis coste-beneficio que se deriva de cada capacidad tipo. Además, si se dispusiera del censo de población por edades, se podría hacer un estudio más dinámico del problema.

5.-CONCLUSIONES:

1.-La contribución de las matemáticas y la modelización a la resolución de los problemas de localización de infraestructuras de tipo social o capital fijo social es una realidad.

2.-La posibilidad de maximizar o minimizar la variable elegida, así como de incluir en los modelos y concretamente en el modelo expuesto, distintas restricciones, permite tener localizaciones óptimas en cada caso.

3.-La aplicación práctica del modelo a una zona concreta de la provincia de Sevilla, que incluye siete municipios, ha puesto de manifiesto la bondad y versatilidad del modelo, siempre buscando soluciones óptimas de localización.

4.-Las posibilidades de resolución de problemas de localización utilizando este modelo son enormes, desde centros sanitarios, colegios, parques de bomberos, centros de limpieza, recogida y eliminación de residuos, centros comerciales etc...

BIBLIOGRAFIA:

[1] BEGUIN H., DECONNINCK J. y PEETERS D.- (1989) "Optimiser la localisation des écoles primaries: le cas de Mouscron, Belgique", Revue d'Economie Régionale et Urbaine nº 5, 795-805. ADICUEER. París.

[2] HANSEN P., LABBE M., PEEERS D. et THISE J.F.-1987 Facility Location Analysis. Fundamentals of Pure and Applied Economics 22, 1-70

[3] HURTER A.P., MARTINICH J.S.- 1989 Facility Location and the Theory of Production. Kluwer Academic Publishers. Massachusetts.

[4] INSTITUTO DE ESTADISTICA ANDALUZ.-1991 "Censo de viviendas de Andalucía". Sevilla.

[5] LOVE R.F., MORRIS J.G., WESOLOWSKY G. O.-1988 Facilities Location. Models & Methods. North Holland. New York.

[6] MUÑOZ J.P.-1989 Competitive Location of two new facilities whit rectilinear distances. Congreso Internacional de Localización. Sevilla.

[7] THISSE J-F. ZOLLAR H.G.- 1983 Locational Analysis of Public Facilities. North Holland. New York.

[8] VELASCO M.F., NADAL M.P., MIRMAN C.M., BEGINES B.F.-1992 "Localización Competitiva de un centro de servicio con distancia rectangular". VI Reunión Asepelt-España. Granada.