Anales del VII CONGRESO NACIONAL DE ESTUDIANTES DE POSTGRADO EN ECONOMÍA (CNEPE)

DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA
UNIVERISDAD NACIONAL DEL SUR

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS Y SOCIALES DEL SUR (IIESS)
CONICET – UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Bahía Blanca

Mayo de 2015

ISBN: 978-987-1648-39-9

Departamento de Economía

CONICET

I I E S S

THE DISCRETE RAMSEY MODEL WITH DECREASING POPULATION GROWTH RATE.

Brida, Cayssials da Cunha y Pereyra

APORTES DE LA INGENIERÍA DE SISTEMAS PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO DEL SECTOR SALUD: UNA APLICACIÓN A LAS DECISIONES DE LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE SALUD.

María Florencia Arnaudo – Fernando Pablo Lago (Dpto de Economía, UNS; IIESS, UNS-CONICET)
{flago, marnaudo}@uns.edu.ar

Resumen
La aplicación del enfoque de ingeniería de sistemas al análisis y resolución de problemas de asignación de recursos del sector salud se presenta como una alternativa capaz de generar ganancias substantivas en términos de eficiencia y equidad. En particular, el modelamiento matemático (que se encuentra en el centro de este enfoque) puede ser utilizado para asesorar a los tomadores de decisiones de los sistemas de salud, proporcionando información útil sobre las estrategias óptimas, teniendo en cuenta las limitaciones políticas, presupuestarias, técnicas y otras pertinentes que enfrentan en el proceso de toma de decisiones.

En este trabajo se intenta ejemplificar las posibilidades y limitaciones del este enfoque aplicándolo a un problema concreto: el emplazamiento óptimo de centros de atencion medico-sanitaria. Con este fin, se comparó los resultados de 5 modelos discretos de localización-asignación a un mismo conjunto de datos, representando un caso hipotético de apertura de cuatro centros de salud. Los resultados obtenidos, en términos del número de instalaciones que son abiertas en cada caso, así como la distancia que deben recorrer los usuarios de cada centro de demanda, ilustran la importancia de una correcta formulación de los modelos, considerando las particularidades del sector salud y las prioridades de los tomadores de decisión.

Código JEL: C61; I10.

Introducción

La persistencia de grandes desigualdades en el acceso a la salud por parte de distintos grupos de la población es un problema del cual no está exento ningún país del mundo, ni aún aquellos que realizan grandes erogaciones de recursos en este sentido. Esta situación se presenta como poco deseable si se considera que gran parte de la carga que representan las enfermedades (*burden of disease*) podría disminuirse mediante la incorporación de tecnologías (tanto curativas como de prevención) sencillas y asequibles. Dado que se reconoce a la asignación ineficiente de los recursos físicos y humanos disponibles como una de las principales causas de las dificultades que presentan los sistemas de salud para lograr sus objetivos, el gran desafío pendiente consiste en poner, en tiempo y forma, las tecnologías adecuadas a disposición de quienes las necesitan (World Health Organization, 2007).

La Ingeniería de Sistemas tiene como principal función *guiar la ingeniería de sistemas complejos*[1], orientando o dirigiendo sus acciones hacia la búsqueda de un determinado resultado. La ingeniería de sistemas se centra en el análisis del sistema como un todo, analizando tanto su interior, a partir de la consideración de sus componentes, como su exterior, contemplando la relación con otros sistemas y el medio en el que se inserta (Kossiakoff et al, 2011). Para lograr sus objetivos, la Ingeniería de Sistemas procura descomponer los fenómenos complejos en subsistemas más pequeños y fácilmente entendibles, para luego analizar las interacciones entre los subsistemas y con su entorno (McKinney y Savitsky, 2006; Reid, et al, 2005).

Los desarrollos de esta disciplina se presentan como una herramienta potencialmente útil para aplicar en la resolución de las dificultades que muestran los sistemas de salud (McKinney y Savitsky, 2006). En este sentido, en una importante iniciativa conjunta, las academias de Ingeniería y de Medicina de EEUU elaboraron

[1] Un sistema es un conjunto de componentes actuando conjuntamente para la consecución de un objetivo, esto es un conjunto de partes interactuando para la realización de una determinada función. Los sistemas *complejos*, en particular, son aquellos en los cuales los elementos son diversos y están intrincadamente relacionados (Kossiakoff et al, 2011).

en el año 2005 un documento donde se proveen una serie de recomendaciones para avanzar en la mejora de la efectividad de los sistemas de salud. La principal conclusión del trabajo fue la necesidad de aplicar enfoques y metodologías de ingeniería de sistemas para optimizar el proceso de toma de decisiones en los diferentes niveles del sistema de salud (Reid P. *et al,* 2005)

El objetivo de este trabajo consiste en analizar las principales herramientas de la Ingeniería de Sistemas, su relación con el modelamiento matemático y sus aplicaciones potenciales al sector salud para mejorar su desempeño. Asimismo, se intenta ejemplificar las posibilidades y limitaciones de este enfoque aplicándolo a un problema concreto: la localización óptima de centros de salud. A forma de adelanto, una de las principales conclusiones es que la utilidad de los modelos para el proceso de toma de decisiones dependerá (entre otros factores claves) de una correcta especificación de la función objetivo, la cual debe reflejar en forma adecuada las prioridades de política de salud de los decisores.

El trabajo se divide en cuatro secciones. En la primera se analizan las principales herramientas de la Ingeniería de Sistemas y su relación con el modelamiento matemático. En la segunda se repasan las principales aplicaciones del enfoque de Ingeniería de Sistemas a la resolución de problemas del sector salud, haciendo especial hincapié en los modelos que estudian la asignación óptima de centros de salud. En la tercera se presenta la formulación matemática de los principales tipos de modelos de localización de instalaciones susceptibles de ser aplicados al caso de los centros de salud. Dado que los problemas presentados difieren en gran medida en la forma en que se especifica la función objetivo a optimizar y las restricciones consideradas, en la cuarta sección se comparan los resultados de las distintas variantes de los modelos tomando un mismo problema base. Los modelos planteados son resueltos utilizando el software GAMS. Por último, se exponen las conclusiones y líneas de investigación futuras.

I. Ingeniería de Sistemas y modelamiento matemático

La ingeniería de Sistemas ha desarrollado diversas herramientas que permiten sistematizar el estudio del funcionamiento de los sistemas, logrando así una mejor gestión de los mismos. Estas herramientas suelen clasificarse en tres grupos conexos: para el diseño, el análisis y control (Reid, et al, 2005).

Las herramientas para el *diseño de los sistemas* se utilizan principalmente para la creación de nuevos sistemas o procesos. Generalmente se traducen en prescripciones acerca de cómo debería llevarse a cabo la producción o la distribución geográfica del sistema. En este proceso se deben tener en cuenta las necesidades y deseos de todos los integrantes del sistema, así como también las limitaciones impuestas por el contexto del mismo.

Por otro lado, las herramientas para el *análisis de los sistemas* permiten comprender cómo los sistemas complejos operan, determinando si cumplen con sus objetivos y metas y, en caso de que sea necesario, sugieren cómo mejorar su rendimiento.

Por último, las herramientas para el *control de los sistemas* se utilizan para asegurar que el sistema esté funcionando dentro de los límites prescriptos, de manera de reducir al mínimo posible los errores y optimizar el uso de los recursos. Para que el proceso de control sea eficaz es necesaria una clara comprensión de las expectativas de desempeño y los parámetros de funcionamiento del sistema en su conjunto.

Para la consecución de sus objetivos, generalmente la Ingeniería y análisis de sistemas recurre al desarrollo de modelos matemáticos, cuyas características pueden variar según los objetivos del modelamiento y el problema especifico analizado. El modelamiento de un problema de la realidad requiere el seguimiento de un proceso compuesto por cinco fases o etapas (Winston, 2005; Taha, 2004):

1. *Definición del problema*, esto requiere una descripción detallada del objetivo del estudio, de las alternativas de decisión del sistema y de las restricciones o limitaciones que pueda existir. En esta etapa también se debe realizar una observación del sistema prestando atención a las relaciones dentro del mismo y las relaciones que pueda tener con su contexto, recabando la mayor cantidad de información posible.

2. *Construcción del modelo*, en esta etapa se diseñan las relaciones y expresiones matemáticas que definen el objetivo y restricciones del modelo.

3. *Solución del modelo*, en esta etapa se resuelve el problema matemático arribando a una solución. Además de la solución del modelo, siempre que sea posible, puede resultar útil proporcionar información adicional sobre el comportamiento de la solución ante cambios en los parámetros del sistema. Este proceso se denomina Análisis de Sensibilidad.

4. *Validación del modelo*, se considera que un modelo es válido cuando a pesar de la incertidumbre que rodea al sistema, brinda una predicción confiable sobre su desempeño. La validez del modelo suele probarse a partir de la comparación de su funcionamiento con información real generada en el pasado por el propio sistema. En caso de que el sistema bajo estudio aún no se encuentre operativo, la falta de información sobre su comportamiento se puede suplir recurriendo a un modelo de simulación.

5. *Conclusión del modelo*, en esta etapa se realizan las recomendaciones para la acción a los tomadores de decisiones para lograr la solución óptima.

II. Aplicaciones de la Ingeniería de Sistemas al Sistema de Salud: Los modelos de localización-asignación

La ingeniería de sistemas puede proveer herramientas útiles para una gran variedad de aplicaciones relevantes en los sistemas de salud. En este sentido, Rais y Viana realizaron en el año 2010 una revisión exhaustiva de la literatura reciente acerca de las aplicaciones del modelamiento matemático en el sector salud, destacando sus potenciales usos en las siguientes áreas

i) Optimización terapéutica: Los modelos de optimización terapéutica tienen como finalidad personalizar el tratamiento de un paciente a partir de la consideración de los aspectos sociales y clínicos de una persona, tales como su edad, la movilidad física, las comorbilidades[2] y nivel socioeconómico, entre otros (Kopach-Konrad et al, 2007). En efecto, existe literatura relativa a la asignación óptima de órganos para trasplantes, la prevención y el control de enfermedades infecciosas y la respuesta de emergencia óptima ante una pandemia. A su vez, Kopach-Konrad et al (2007) señalan que este tipo de modelos se están utilizando en el tratamiento del HIV y los ataques de epilepsia, protocolos de vacunación y la determinación de la radiación óptima en el tratamiento del cáncer.

ii) Gestión y logística del cuidado de la salud: Los problemas de gestión más ampliamente estudiados se refieren a problemas de programación de turnos de pacientes y de recursos, tantos físicos como humanos.

iii) Planeamiento del sector salud: Dado que la prestación de un servicio de calidad y adecuado a las necesidades de la población constituye una de las principales preocupaciones para la mayoría de los gobiernos actuales, la importancia de la planificación en el sector salud continua vigente a pesar del paso de los años. En los últimos años, debido a la declinación en la tasa de natalidad y el envejecimiento de la población, la mayoría de los países experimenta una mayor presión presupuestaria para la atención sanitaria. En este contexto, el modelamiento matemático y los modelos de simulación constituyen una herramienta de ayuda para la toma de decisiones en el sector. Estos modelos han tenido como objetivo la estimación de la demanda de servicios sanitarios, la optimización y el control de los costos del sistema de salud y la localización de centros de salud con el objetivo de cubrir una determinada población o grupo de personas.

La determinación de la localización óptima de los centros y recursos de salud constituye uno de los problemas mayormente estudiados por la literatura especializada, siendo su uso prioritario en planeamiento del sector salud (Berg, 2013). El análisis de la problemática de localización óptima de centros de salud se ha visto especialmente beneficiada por el desarrollo de los modelos de localización – asignación, cuyo objetivo es determinar la ubicación óptima de instalaciones de diversa índole (centros de abastecimiento, locales comerciales, etc).

---

[2] La comorbilidad implica la coexistencia de dos o más patologías médicas no relacionadas, al mismo tiempo o en forma sucesiva, en un mismo paciente.

Los problemas de localización están constituidos por cuatro componentes: 1) los clientes u usuarios de los servicios, que se suponen que están ubicados en lugares conocidos, 2) las instalaciones a ubicar, 3) un espacio en el que se encuentran los clientes y las instalaciones, y 4) la distancia entre los clientes y las instalaciones que puede estar medida en tiempo, distancia métrica o costos de viaje (ReVelle y Eiselt, 2005). Sobre la base de estos datos, los modelos de localización-asignación deben seleccionar simultáneamente un conjunto de posibles emplazamientos de las instalaciones y la asignación de los potenciales nodos de demanda[3], respondiendo a algún criterio establecido por el planificador (Rahman y Smith, 2000). En otras palabras, los modelos deben determinar el número de instalaciones a localizar, su dimensión, dónde ubicarlas y la población objetivo a la que atenderá, de manera de minimizar los costos de operación o el tiempo de viaje (Daskin, 1995).

Los modelos de localización pueden diferenciarse de acuerdo al espacio en el que se modelan los problemas. En este sentido, los de mayor interés para las aplicaciones reales son los denominados modelos discretos[4]. Estos modelos asumen que hay un conjunto de sitios alternativos donde se pueden ubicar las instalaciones, llamados *nodos de oferta*, y un conjunto finito de localizaciones para los clientes o usuarios de las instalaciones, denominados *nodos de demanda*. Estos nodos de demanda pueden representar las manzanas de una ciudad o radios censales. Un dato básico requerido por el modelo son las distancias o tiempos de viaje entre los nodos de oferta y demanda. Sin embargo, una caracterización completa de los nodos de demanda puede requerir de información adicional, tales como el número de demandantes o variables referidas al grado de necesidad (o intensidad de la demanda) de los mismos. En ocasiones, la aplicabilidad de estos modelos se encuentra limitada debido a la gran cantidad de información que debe recogerse (Plastria, 2001; Daskin, 2008).

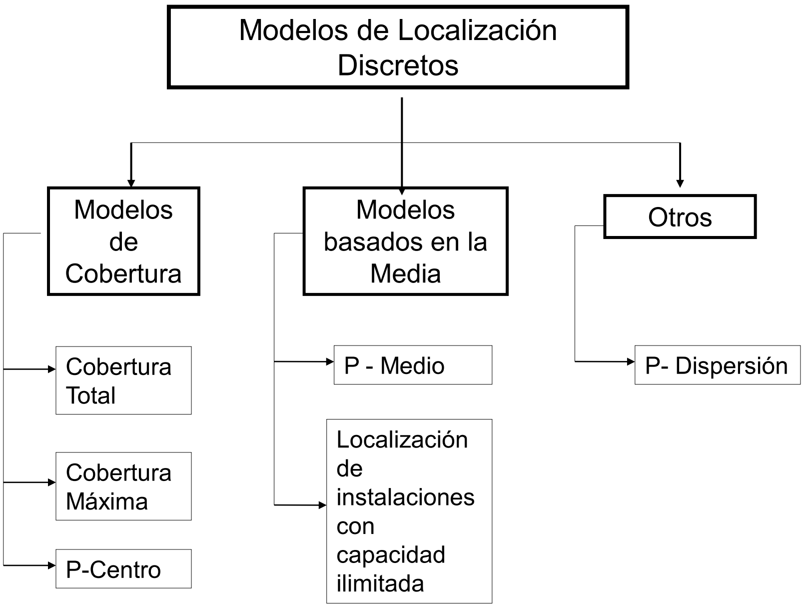
---

[3] Este tipo de modelos suponen que los demandantes de los servicios están nucleados en un lugar o área denominado nodo o centro de demanda.

[4] Además de los modelos discretos, existen modelos analíticos, modelos continuos y modelos en red (Plastria, 2000; Daskin, 2008).

Dentro de los modelos discretos de localización se reconocen tres grandes familias (Figura Nº1) las cuales se diferencian entre sí por la naturaleza de la función objetivo que se busca optimizar, entre otros factores.

Figura Nº1. Modelos de localización: clasificación según el espacio en el que se modela



Fuente: elaboración propia en base a Daskin (2008)

Modelos basados en la media

Esta familia incluye los modelos *P-medio y de localización de instalaciones con capacidad ilimitada*[5]. Parten del supuesto que los servicios de un determinado nodo de oferta son más accesibles cuanto menor es la distancia (o el tiempo de viaje) que deben recorrer los agentes para acceder a los mismos, por lo que la eficacia de una red de localizaciones puede evaluarse a partir de la consideración de la distancia media que deben recorrer los usuarios, o alternativamente por el tiempo de viaje empleado por los usuarios para acceder a la instalación (Church y Ravelle, 1976). En particular, cuando la demanda de un servicio no es sensible a la magnitud de la oferta suministrada en cada centro de oferta, la eficacia de su ubicación puede medirse a partir de ponderar la distancia entre un nodo de demanda y nodo de oferta por el tamaño de la demanda, y luego calcular la distancia total de viaje entre los

[5] En ingles P-median y fi*xed charge facility location problems* respectivamente.

distintos nodos. Los modelos P-media utilizan esta medida de eficacia para determinar la localización de un número finito *p* de instalaciones con el fin de minimizar dicha distancia ponderada.

Los problemas denominados *localización de instalaciones con capacidad ilimitada* (en adelante LICL) se formulan agregando a la función objetivo del problema P-medio un componente de costo fijo de la radicación de la instalación en un determinado lugar. Además, en este tipo de problema, se endogeneiza la decisión respecto a cuántos centros localizar (Daskin et al, 2005).

Esta familia de modelos privilegia la *eficiencia* al momento de localizar las instalaciones, en el sentido que la ubicación de los nodos de demanda con mayor cantidad de agentes tendrán un peso mayor en la decisión que otros centros de demanda con menor población. En otras palabras, en la decisión de ubicación se trata de beneficiar a la mayor cantidad de agentes posibles. La critica (o problema) que se desprende es la posibilidad que algunos nodos de demanda (los más pequeños) queden a una distancia relativa muy grande de la instalación más cercana.

Modelos de cobertura

La determinación de la red de localizaciones según el promedio de la distancia recorrida o el tiempo de viaje no resulta apropiada para algunos servicios, tales como los servicios de emergencia, las estaciones de bomberos o la ubicación de las ambulancias. La naturaleza de la demanda de este tipo de servicio hace necesaria una medida de la eficacia de la localización relacionada con la cobertura de la demanda. En efecto, se considera que un determinado nodo de demanda *i* está cubierto por un posible sitio de oferta *j* si la distancia entre ellos es menor a un cierto umbral crítico, llamado distancia de cobertura, *S*. Este enfoque puede ser visto como un objetivo de "equidad" al tratar de reducir al mínimo (o poner un límite máximo) la distancia (o tiempo) que debe recorrer cualquier agente, independientemente de su localización. Dentro de esta categoría se puede englobar a los llamados *modelos de cobertura total, el modelo de cobertura máxima y el modelo p-centro*[6].

[6] En inglés *location set covering model, maximal covering model y P-center model* respectivamente.

El modelo de localización de *cobertura total* tiene como objetivo minimizar el costo de la localización de los centros de oferta, garantizando un cierto nivel de cobertura. Generalmente se supone que el costo de las posibles ubicaciones es el mismo para cualquier posible localización de los centros de oferta, por lo cual el objetivo puede reexpresarse como la minimización de los centros de oferta que es necesario ubicar para cubrir la totalidad de la demanda.

Los modelos de cobertura total presentan algunas debilidades. En primer lugar, generalmente la solución óptima requiere el establecimiento de un gran número de instalaciones, para lo cual resulta necesario una gran inversión que lo torna inviable. En estos casos, se puede encontrar una solución alternativa a partir de aumentar la distancia de cobertura o relajar el requisito de cobertura total. En segundo lugar, suele tener más de una solución óptima. Por último, el modelo no diferencia el tamaño de los nodos de demanda, esto es, todos los nodos deben ser cubiertos sin importar el número de usuarios.

Los modelos de localización con *cobertura máxima* determinan la localización de un número finito de instalaciones, *p*, tal que maximice la cobertura de la demanda. A diferencia del modelo anterior, esta formulación permite diferenciar el tamaño de los nodos de demanda, pero presenta como debilidad el hecho de que la localización óptima podría dejar algunos nodos de demanda sin atender si el número necesario de centros de oferta es mayor que *p*.

Por último, los modelos *P-centro*, también denominados Problemas Minimax, minimizan la máxima distancia entre cualquier centro de demanda y el centro de oferta más cercano.

Otros modelos

Hay modelos que no se encuadran en ninguna de las categorías más importantes antes presentadas. Por ejemplo, el modelo de *P-dispersión* tiene como objetivo maximizar la distancia mínima entre cualquier par de instalaciones. Este modelo es útil en la localización de puntos de venta de franquicias, donde es deseable minimizar la pérdida de mercado por la cercanía de dos nodos de oferta. También puede utilizarse para establecer la localización óptima de los depósitos de armas en las que es deseable reducir al mínimo la probabilidad de que la destrucción de un depósito afecte a otros o destruya todo el arsenal. Dado el escaso interés que representan estos modelos en relación al sector salud, no serán considerados en el análisis posterior

III. Formulación matemática de los modelos basados en la media y de cobertura

Para ilustrar la formulación matemática de los modelos basados en la media y de cobertura descriptos, se introduce la siguiente notación:

Conjuntos

- I conjunto de centros de demanda i
- J conjunto de posibles localizaciones de los centros de oferta j
- N_i conjunto de los posibles nodos de oferta j que se encuentran dentro del máximo de distancia aceptable S del nodo i

Parámetros

- d_{ij} distancia entre el nodo de demanda i y el nodo de oferta j
- h_i demanda en el nodo i
- P número de instalaciones a ubicar
- c_j costo fijo de ubicar la instalación en el nodo j
- S distancia o tiempo máximo de cobertura
- D máxima distancia entre un nodo de demanda y la instalación más cercana.

Variables de decisión

- X_j que toma valor 1 si el centro de oferta j se abre y 0 si el centro j no se abre.
- Y_{ij} que toma valor 1 si el nodo de demanda i es asignado al centro de oferta j y 0 en caso contrario.
- Z_i, que toma valor 1 si el nodo de demanda i está cubierto y 0 en caso contrario.

El problema P-medio queda determinado por las siguientes ecuaciones

$$Min \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a (SA)

$$\sum_j X_j = P \quad (2)$$

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \qquad \forall i \quad (3)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i,j \quad (4)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (5)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \quad (6)$$

La función objetivo, descripta por la ecuación 1, establece que se minimiza la distancia total ponderada entre los nodos de demanda y oferta. La restricción definida por la ecuación 2 determina que solo se ubiquen p centros de oferta. La ecuación 3 asegura que cada centro de demanda i se asigna a un único centro de oferta j, mientras que la ecuación 4 establece que un nodo de demanda i será atendido por un centro de oferta j sólo si se ubica una instalación en el nodo j. Las ecuaciones 5 y 6 aseguran la integrabilidad y continuidad de la solución.

El modelo de localización de instalaciones con capacidad ilimitada es descripto por las siguientes funciones

$$Min \sum_j c_j X_j + \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (7)$$

Sujeto a (SA)

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \qquad \forall i \quad (8)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i,j \quad (9)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (10)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \quad (11)$$

La función objetivo 7 minimiza los costos totales definidos anteriormente. Las restricciones delineadas por las ecuaciones 8-9 son equivalentes a las restricciones planteadas en las ecuaciones 3-6.

El modelo de localización de cobertura total se formula de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$Min \sum_j c_j X_j \qquad (12)$$

Sujeto a

$$\sum_{j \in N_i} X_j \geq 1 \qquad \forall i \qquad (13)$$

$$X_j \in \{0,1\} \qquad \forall j \qquad (14)$$

La función objetivo delineada en la ecuación 12 asegura que el costo de la localización sea mínimo. La restricción definida por la ecuación 13 asegura que cada nodo de demanda debe ser atendido, mientras que la restricción recogida por la ecuación 14 impone que la solución debe ser entera.

En caso de suponer que el costo de instalación es el mismo para todos los centros de oferta, la función objetivo se reescribe de la siguiente manera,

$$Min \sum_j X_j \qquad (15)$$

Los modelos de localización con cobertura máxima están determinados por las siguientes ecuaciones

$$Max \sum_i h_i Z_i \qquad (16)$$

Sujeto a (SA)

$$Z_i \leq \sum_{j \in N_i} X_j \qquad \forall i \qquad (17)$$

$$\sum_j X_j \leq P \qquad (18)$$

$$X_j \in \{0,1\} \qquad \forall j \qquad (19)$$

$$Z_i \in \{0,1\} \qquad \forall i \qquad (20)$$

La función objetivo descripta por la ecuación 16 maximiza la demanda cubierta por las instalaciones. La restricción definida por la ecuación 17 determina cuáles serán los centros de demanda atendidos dentro de la distancia máxima S. Cada centro de demanda i se considera cubierto (Z_i=1) si existe un centro de oferta j dentro de la distancia S, en caso contrario el lado derecho de la restricción será 0 y por lo tanto también lo será Z_i, con lo cual el nodo de demanda quedará sin atender. La restricción delineada por la ecuación 18 establece que como máximo se abrirán p centros de oferta. Las restricciones 19 y 20 aseguran que la solución sea entera.

Por último, los modelos P-centro se formulan de acuerdo a las siguientes ecuaciones

$$Min\ D \qquad (21)$$

Sujeto a (SA)

$$\sum_j X_j = P \qquad (22)$$

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \qquad (23)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i,j \qquad (24)$$

$$D \geq \sum_j d_{ij}\ Y_{ij} \quad \forall i \qquad (25)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall i \qquad (26)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \qquad (27)$$

La función objetivo (Ec. 21) minimiza D, es decir la máxima distancia entre un nodo de demanda y la instalación más cercana. Las restricciones impuestas en las ecuaciones 22-24 son equivalentes a las ecuaciones 2-4 del problema P-medio, mientras que la restricción recogida en la ecuación 25 asegura que la distancia entre un centro de demanda i y un centro de oferta j sea menor o igual a D. Por último, las ecuaciones 26 y 27 aseguran que la solución sea entera.

Como se puede apreciar en la descripción de los modelos de localización-asignación realizada anteriormente, la distancia entre los nodos de oferta y demanda (d_{ij}) ocupa un rol central en la resolución de los modelos. Las medidas de distancia, denominadas métricas[7], pueden obtenerse a partir de la utilización de dos métodos (Ramírez, 2012; Buzai, 2011).

[7] Una métrica, en cuanto función matemática que permite calcular la distancia entre puntos, debe cumplir una serie de condiciones. Estas son: i) Positividad (dij ≥0), ii) Identidad (si dij =0 entonces

La distancia euclidiana o rectilínea es la distancia más corta entre dos nodos. Se obtiene a partir de la consideración de un espacio ideal en el cual no existen limitaciones para transitar en cualquier sentido. Puede ser calculada aplicando la siguiente fórmula:

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

Debido a que en ocasiones resulta necesario el cálculo de distancia considerando el recorrido que realizan los usuarios teniendo en cuenta la disponibilidad de caminos, se recurre a la denominada distancia Manhattan, o city block, que se calcula como se indica:

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

IV. Aplicación de los modelos: un caso hipotético

En esta sección se aplicarán los modelos descriptos anteriormente a un caso hipotético con el objetivo de comparar los resultados que arrojan cada uno de ellos. Este ejercicio de aplicación se llevo a cabo utilizando el software GAMS.

Se supone que solo se instalarán cuatro centros de oferta ($P=4$), mientras que la distancia o tiempo máximo de cobertura se considera igual a nueve (S=9). La tabla 1 indica los valores considerados para el costo fijo de ubicar la instalación en el nodo j (c_j) y la población de cada nodo de demanda i (H_i).

---

ambos puntos se ubican en el mismo lugar del espacio), iii) Simetría (dij =dji) y iv) Desigualdad Triangular (dij ≤ dik +dkj) (Ramírez, 2012; Buzai, 2011).

Tabla Nº1. Costo de instalación de los centros de oferta y población en cada centro de demanda

Centro de oferta	Costo de instalación (c_j)	Centro de demanda *i*	Población (H_i)
J1	15	I1	40
J2	10	I2	60
J3	5	I3	80
J4	8	I4	80
J5	12	I5	120
		I6	40

Por último, la distancia entre cada nodo de demanda i y cada nodo de oferta j se exponen en la tabla 2.

Tabla Nº2. Distancia entre cada nodo de demanda i y cada nodo de oferta j

Centros de demanda	Centros de Oferta				
	J1	J2	J3	J4	J5
I1	7	5	6	10	2
I2	8	5	10	12	3
I3	8	9	6	10	11
I4	10	13	18	4	7
I5	7	8	10	15	6
I6	8	7	13	6	10

De acuerdo con los supuestos realizados, en la siguiente tabla se muestran cuáles serían los centros de oferta que serían abiertos en la solución óptima determinada en cada uno en cada uno de los modelos analizados

Tabla Nº3. Centros de oferta abiertos según cada modelo analizado.

P-Medio	LICL	Cobertura Total	Máxima Cobertura	P-Centro
J2	J3	J1	J2	J2
J3	J4	J4	J3	J3
J4	J5		J4	J4
J5				J5

Asimismo, en la tabla Nº4 se ilustra la asignación óptima de la población a los centros de salud abiertos según cada modelo.

Tabla Nº4. Asignación de los nodos de demanda a cada centro de oferta abiertos según cada modelo analizado

P-Medio		LICL		P-Centro	
Centro de población	Centro de oferta	Centro de población	Centro de oferta	Centro de población	Centro de oferta
I1	J5	I1	J5	I1	J3
I2	J5	I2	J5	I2	J2
I3	J3	I3	J3	I3	J3
I4	J4	I4	J4	I4	J4
I5	J5	I5	J5	I5	J5
I6	J4	I6	J4	I6	J4

Combinando estos dos resultados podemos calcular cuál es la distancia total que recorre la población para acceder a un centro de oferta en cada uno de los modelos bajo estudio (Tabla Nº5). En el caso de los modelo de cobertura (que no asignan nodos de demanda a los de oferta) se supone que cada población recurre a la instalación más cercana.

Tabla Nº5. Distancia total recorrida por la población en cada modelo

Modelo	Distancia
P-Medio	27
LICL	27
Máxima Cobertura	33
Cobertura Total	40
P-Centro	33

Este ejercicio nos permite concluir que dados los supuestos realizados, los modelos más eficientes desde el punto de vista de la accesibilidad de la población a los servicios de salud, medida en función de la distancia recorrida por la población, son los basados en la media. En efecto, tanto la versión *p-medio* del problema como la de *localización de instalaciones con capacidad limitada* arrojan idénticos resultados en términos de apertura de centros, asignación de los nodos de demanda y distancias recorridas. Por otra parte, el modelo que menos eficiente resulta en términos de accesibilidad a los servicios de salud es el modelo cobertura total, donde la población debe recorrer la mayor distancia total para acceder a los servicios de salud.

En términos de cantidad de centros de oferta abiertos la menor cantidad se obtiene en el modelo de cobertura total, que con solo dos centros asegura la cobertura de la totalidad de la población (en el sentido de asegurar que cada nodo de demanda se encuentre a una distancia no mayor a la estipulada en el modelo, en este caso igual a 9). Este resultado no es de extrañar, ya que el modelo busca minimizar los costos de atender a la demanda existente. Asimismo, los modelos que más centros abren son el *p-medio* y el *p-centro,* dada la restricción impuesta que el número de centros abiertos debe ser igual al máximo estipulado (4 centros en este caso)

Conclusiones y discusión

La aplicación del enfoque de ingeniería de sistemas al análisis y resolución de problemas de asignación de recursos del sector salud se presenta como una alternativa capaz de generar ganancias sustantivas en términos de eficiencia y equidad. En particular, el modelamiento matemático (que se encuentra en el centro de este enfoque) puede ser utilizado para asesorar a los tomadores de decisiones de los sistemas de salud, proporcionando información útil sobre las estrategias óptimas, teniendo en cuenta las limitaciones políticas, presupuestarias, técnicas y otras pertinentes que enfrentan en el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, una especificación no adecuada del modelo a la realidad que intenta representar (en forma simplificada) así una interpretación errónea de las prioridades de los tomadores de decisión pueden conducir a conclusiones equivocadas.

En este trabajo se intentó ejemplificar las posibilidades y limitaciones del este enfoque aplicándolo a un problema concreto: el emplazamiento óptimo de centros de salud. Con este fin, se comparó los resultados de cinco modelos discretos de localización-asignación a un mismo conjunto de datos, representando un caso hipotético de apertura de cuatro centros de salud.

Los resultados obtenidos, en términos de los centros que son abiertos en cada caso así como la distancia que deben recorrer los usuarios de cada centro de demanda, ilustran la importancia de una correcta adecuación de los modelos al caso específico analizado. De esta manera, si se busca por ejemplo priorizar la capacidad de acceso de la mayor parte de la población a los centros de salud, la mejor estructura general del problema parece ser la de un modelo p-media; mientras que si las restricciones presupuestarias son de magnitud tal que es deseable abrir la menor cantidad de centros posibles, entonces un modelo de cobertura máxima es el más adecuado. En última instancia, la formulación adecuada de la función objetivo es una cuestión que debe ser resuelta por los destinatarios de los modelos: los tomadores de decisión del sector salud.

Una limitación del ejercicio desarrollado en este trabajo es la no consideración en los modelos de las especificidades del sector salud relevantes para el problema planteado. En este sentido, Harper et al (2005) señalan que con el fin de desarrollar un modelo que permita la determinación de la localización óptima de los servicios de salud, es necesario tener en cuenta un amplio conjunto de factores entre los que se puede citar:

a) Las especialidades médicas o servicios a ofrecer.
b) La cantidad, la ubicación y los servicios prestados por los centros de salud existentes cada centro de salud.
c) La cantidad de centros de salud a abrir o ubicar y los servicios que ofrecerán.
d) Las características de la población: la cantidad de personas que habitan en la ciudad, la pirámide poblacional y el perfil socioeconómico de la población.
e) Demanda de los servicios, es necesario contar con alguna estimación de la demanda de la población de los distintos servicios a ofrecer y su distribución espacial. También puede resultar útil realizar previsiones acerca de la demanda futura de los servicios.
f) El modo de transporte de los pacientes hacia el centro de salud.
g) Las preferencias de los usuarios / pacientes de los centros.
h) La accesibilidad de los pacientes a los centros de salud.

Avanzar en el desarrollo específico de modelos capaces de integrar los factores mencionados, adaptados a las necesidades de información disponibles en Argentina, es el desafío que se plantea como futura línea de investigación a partir de este trabajo

Referencias Bibliográficas

Berg, B. (2013). Location Models in Healthcare. En *Handbook of Healthcare Operations Management*. New York; Springer.

Buzai, G. (2011). 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. *Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía*, *20*(2), 111-123.

Church, R. & ReVelle, C. (1976). Theoretical and computational links between the p-median location set-covering and the maximal covering location problem, *Geographical Analysis 8*(4), 406-415.

Daskin, M. (2008). What you should know about location modeling. *Naval Research Logistics*, *55*(4), 283-294.

Daskin, M., & Dean, L. 2004. Location of health care facilities. In Brandeau, M., Sainfort, F. & Pierskalla, W. (eds) *Operations Research and Health Care. A*

Handbook of Methods and Applications (pp. 43–76). Estados Unidos: Kluwer's International Series.

Daskin, 1995. *Network and Discrete Location*. Sabim S.A. A wiley publication.

Harper, P. R., Shahani, A. K., Gallagher, J. E., & Bowie, C. (2005). Planning health services with explicit geographical considerations: a stochastic location–allocation approach. *Omega*, *33*(2), 141-152.

Kopach-Konrad, R., Lawley, M., Criswell, M., Hasan, I., Chakraborty, S., Pekny, J., & Doebbeling, B. N. (2007). Applying systems engineering principles in improving health care delivery. *Journal of general internal medicine, 22*(3), 431-437.

Kossiakoff A., Sweet, W., Seymour, S. & Biemer, S. Systems engineering principles and practice. sSecond edition. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos.

McKinney, D. & Savitsky, A. (2006). *Basic Optimization Models for Water and Energy*. Recuperado de http://www.caee.utexas.edu/prof/mckinney/ce385d/Lectures/McKinney_and_Savitsky.pdf

Plastria, F. (2001). Static competitive facility location: An overview of optimisation approaches. *European Journal of Operational Research 129*(3), 461-470.

Rahman, S., & Smith, D. K. (2000). Use of location-allocation models in health service development planning in developing nations. *European Journal of Operational Research*, 123(3), 437-452.

Rais, A., & Viana, A. (2011). Operations research in healthcare: a survey.*International Transactions in Operational Research*, *18*(1), 1-31.

Ramírez, L. (2012). Sitios óptimos destinados a la expansión de los equipamientos de atención primaria de la salud en el Área Metropolitana del Gran Resistencia Chaco (Argentina). En: Bosque, J. & Moreno, A. (coords.), *Sistemas de Información Geográfica y localización óptima de instalaciones y equipamientos*, España: RA-MA.

Reid, P. P., Fanjiang, G., Grossman, J. H., Compton, W. D., & (Eds.). (2005).*Building a Better Delivery System: A New Engineering/Health Care Partnership*. National Academies Press.

ReVelle, C. y Eiselt, A. (2005). Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, p.165 1–19.

Taha, H (2004). *Investigación de operaciones*. (7a. ed). México: Pearson Educación de México.

Winston, W. (205). *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos* (4a. ed). México: Thomson Learning.

World Health Organization (2007). *Everybody business: strengthening health systems to improve health outcomes: WHO's framework for action.* WHO Document Production Services, Geneva.