



ASOCIACION ARGENTINA
DE ECONOMIA POLITICA

LIV REUNIÓN ANUAL | NOVIEMBRE DE 2019

Localización Óptima de Centros de Transplantes Renales en la Provincia de Buenos Aires Un Enfoque de Programación Matemática

Arnaudo, María Florencia
Lago, Fernando Pablo
Bandoni, José Alberto

LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE CENTROS DE TRANSPLANTES RENALES EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES: UN ENFOQUE DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA¹

María Florencia Arnaudo

(1) Departamento de Economía, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina

(2) IIESS, Universidad Nacional del Sur-CONICET, Bahía Blanca, Argentina

Correo electrónico: marnaudo@uns.edu.ar

Fernando Lago

(1) Departamento de Economía, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina

(2) IIESS, Universidad Nacional del Sur-CONICET, Bahía Blanca, Argentina

José Alberto Bandoni

(1) Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina

(2) PLAPIQUI, Universidad Nacional del Sur-CONICET, Bahía Blanca, Argentina

Resumen

Un elemento clave durante un operativo trasplante es el tiempo insumido en el mismo ya que el mismo impacta en la calidad del órgano implantado. En este contexto se utiliza un enfoque de programación matemática que permita determinar cuál debería ser la localización de los centros de trasplantes renales en la provincia de Buenos Aires que permita minimizar el tiempo de traslado involucrado en el proceso de trasplante desde que aparece el donante hasta que el órgano arriba al centro de trasplante y se realiza el implante. Para ello se utiliza modelo que recoge las características de dicho proceso y se calibra utilizando datos de: i) los trasplantes realizados en la Provincia en 2016 y ii) la disponibilidad de potenciales hospitales donantes y centros de trasplantes de la Provincia. Se concluye que dadas las características del proceso de procuración la localización de los centros de trasplantes es determinante para lograr ahorros en el tiempo insumido en el procedimiento.

Abstract

The time that elapses between donor notification and transplantation is crucial in the process of organ donation. Moreover, the longer an organ is outside the donor's body, the lower the quality of the donor organ. In this context, a mathematical programming approach is used to find out the optimal locations of kidney transplant centers in the province of Buenos Aires (Argentina), in order to minimize the time elapsed between the moment a donor organ becomes available and its transplantation into the recipient's body. The model is calibrated using data from organ transplants performed in the Province of Buenos Aires in 2016. The availability of potential donor hospitals and transplant centers is also considered. It is concluded that, taking into account the specific characteristics of the organ procurement

¹ Este trabajo forma parte de la tesis para acceder al grado de doctora en Economía de María F. Arnaudo bajo la dirección de los Dres. Fernando Lago y J. Alberto Bandoni.

process in Argentina, the location of the transplant centers is decisive to reduce the time involved in the procedure.

1. Introducción

En las últimas décadas, los trasplantes de órganos, es decir, el reemplazo de un órgano vital enfermo, sin posibilidad de recuperación, por otro sano, se han convertido en un tratamiento exitoso para muchas enfermedades que de otra forma resultarían fatales.

En el proceso de trasplante se distinguen tres etapas: i) la procuración, que se inicia en el momento de la detección del potencial donante consta de varios pasos logísticos de diversa índole con un ordenamiento sistematizado, que requieren de acciones coordinadas en cada una de sus etapas. El trabajo interrelacionado entre diferentes equipos de actores se desarrolla en forma simultánea en distintos lugares físicos: en el establecimiento asistencial donde se encuentra el donante fallecido, en el INCUCAI o los organismos jurisdiccionales de ablación e implante y en los centros de trasplante donde se realiza la intervención en los receptores; ii) la ablación que es el procedimiento quirúrgico mediante el cual se realiza la extracción de los órganos y tejidos del cuerpo del fallecido y iii) el posterior implante del órgano.

Un elemento clave en este proceso de trasplante dicho proceso es el tiempo que transcurre desde la notificación de la existencia de un donante hasta el momento de la intervención de trasplante, tanto por la mejor conservación de los órganos donados como por el menor tiempo de isquemia (Cobo y del Río Gallegos, 2009). Este proceso generalmente involucra traslados entre distintas localidades, sea de personal médico, pacientes, órganos o muestras de laboratorio. Es por este motivo que uno de los factores determinantes del tiempo que insume su realización es la localización de los centros de trasplante.

En un documento del Instituto Nacional Central Único Coordinador de Ablación e Implante (INCUCAI) de la República Argentina, publicado en el año 2003 se reconoce como una falencia del sistema de trasplante argentino la desigual distribución geográfica de los centros de trasplante. Según sus autores,

“... el desarrollo de centros de trasplantes se ha producido principalmente en el área metropolitana, en detrimento del interior del país, con escasa intervención reguladora del estado. Ello genera una distorsión con consecuencias negativas tanto para la accesibilidad, tiempos de distribución y asignación de órganos, tiempos operativos en general, así como costos elevados por la necesidad de desplazamientos aéreos de los equipos y de muestras para realización de estudios en centros de la ciudad de Buenos Aires (Instituto Nacional Central Único Coordinador de Ablación e Implante - INCUCAI, p. 9, 2003)”.

En otro orden de cosas, en muchas industrias se presentan problemas al momento de disponer la localización de instalaciones de muy diversa índole, donde una ubicación incorrecta o un

número excesivo (o deficiente) de ellas da lugar a un aumento innecesario de los costos y/o una baja calidad de atención al cliente o usuario (Daskin y Maas, 2015; Daskin y Dean, 2005). Estos problemas presentes en la industria han incentivado una amplia literatura referida a modelos de localización óptima de instalaciones que pueden ser útiles para los tomadores de decisiones ya que permiten ensayar diversas soluciones al problema (Berg y Bjorn, 2013). En particular, la ingeniería de sistemas puede proveer herramientas útiles para una gran variedad de aplicaciones relevantes en los sistemas de salud. En este sentido, en el año 2005, en una importante iniciativa conjunta, las academias de Ingeniería y de Medicina de EEUU elaboraron 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, haciendo uso de modelos matemáticos (Reid, Compton, Grossman, & Fanjiang, 2005). Por otro lado, 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 la Optimización terapéutica, Gestión y logística del cuidado de la salud y Planeamiento del sector salud (en lo relativo al scheduling de diversas actividades, estimación de demanda y control de costos). En este contexto, la determinación de la localización óptima de los centros y recursos de salud constituye uno de los problemas más estudiados por la literatura especializada, siendo su uso prioritario en la planificación de la atención de la salud (Berg y Bjorn, 2013).

En particular los modelos de localización-asignación determinan simultáneamente la localización óptima de los centros de oferta y la asignación de los potenciales usuarios a dichos centros (Daskin, 2008; Owen & Daskin, 1998). La literatura acerca de este tipo de modelos y su resolución es amplia, encontrando una revisión exhaustiva en Rais y Viana (2011) y Rahman y Smith (2000). En el sector salud estos modelos han sido aplicados a la localización de hospitales en regiones rurales, bancos de sangre, la planificación de la atención médica, scheduling del sistema de ambulancias en una región determinada (Rais y Viana, 2011). No obstante, las aplicaciones de esta literatura al análisis de la localización óptima de centros de trasplantes es un campo de estudio de incipiente desarrollo, no existiendo en Argentina ningún estudio al respecto. El antecedente que sirve de base a este trabajo es el de Bélien et al (2013), quienes desarrollaron un modelo adaptado al caso de Bélgica que tiene como objetivo minimizar el tiempo que transcurre desde que se detecta un potencial donante y el órgano arriba al centro de trasplante, a partir de la elección de la localización de los centros de trasplante, considerando una lista de posibles ubicaciones.

El objetivo del trabajo es desarrollar un modelo de localización óptima de centros de trasplantes renales en la Provincia de Buenos Aires (Argentina) inspirado en el modelo elaborado por Bélien et al (2013). Este modelo permitirá determinar, en base a un listado de potenciales ubicaciones de centros de trasplantes dónde deberían instalarse efectivamente los

mismos de manera que el tiempo insumido en el proceso de procuración sea mínimo. El modelo se calibra con datos de la red de centros de trasplantes y hospitales públicos de la Provincia de Buenos Aires, considerando únicamente donantes cadavéricos (en el caso de los donantes vivos no se presentan los problemas de la logística de traslado de órganos debido a que la ablación y trasplante se realiza en un mismo centro de salud).

El trabajo está estructurado en cuatro secciones. En la primera se realiza una revisión bibliográfica de los desarrollos teóricos aplicados a la localización óptima de centros de trasplantes. En una sección posterior se describen el proceso de procuración de riñón de Argentina, destacando especialmente aquellas fases que involucran traslados entre distintas localidades y los lineamientos generales del modelo de localización de centros de trasplante desarrollado, exponiendo en la próxima sección los resultados obtenidos. Por último, se presentan las conclusiones y líneas futuras de investigación.

2. Antecedentes en la literatura

La mayoría de las investigaciones realizadas por la literatura especializada en investigación operativa y modelización matemática acerca de trasplantes de órganos se refieren a la asignación de órganos a los pacientes en lista de espera, especialmente para el caso de hígado y riñón (Rais y Viana, 2010; Bruni, et al, 2006), mientras que la existencia de investigaciones respecto a la localización óptima de los centros de salud especializados en trasplantes es acotada.

El proceso de procuración y trasplantes de hígado de Estados Unidos es uno de los más estudiados por la literatura. Dicho proceso se encuentra regionalizado y jerarquizado, siendo el nivel más bajo de dicha estructura los denominados organismos de procuración de órganos (OPOs), luego el nivel regional que incluye varios OPOs y por último el nivel nacional. Ante la aparición de un posible donante, el OPO al cual pertenece el hospital busca posibles receptores entre las personas que figuran en lista de espera en dicho OPO y luego a nivel regional en situación de emergencia. En caso de no encontrar una persona compatible, se repite el proceso siguiendo el orden de la lista de espera. Si en esta situación no se encuentra un posible receptor entonces se procede a continuar la búsqueda en la lista de espera regional y nacional. En este marco, los diversos estudios que se han llevado a cabo desde la modelización matemática apuntan a determinar la configuración óptima de las regiones de trasplante de manera de alcanzar la eficiencia y la equidad geográfica del proceso considerando como dadas las localizaciones de los centros de trasplantes y de los potenciales donantes. Así intentan en un primer caso maximizar el número total de trasplantes intrarregionales (objetivo de eficiencia), luego maximizar la mínima tasa de trasplantes intrarregional calculada para todas las OPOs, esto es la proporción de trasplantes intrarregionales de una OPO respecto de la lista de espera del mismo organismo (objetivo de equidad), en otro estudio determinan la dimensión de las regiones y cuáles OPOs pertenecen a cada región (Kong, et al, 2010; Stahl, et al, 2005; Kong et al, 2002).

Bruni et al (2006) analizan el sistema de trasplantes italiano, el cual está formado por centros regionales (similares a las OPOs) que son los encargados de organizar el proceso de procuración y ablación de los órganos disponibles para trasplantes. Con este fin, desarrollaron un modelo matemático cuyo objetivo es determinar la localización óptima de los centros de procuración, hospitales donantes y centros de trasplantes que permita lograr la equidad en la atención de la salud, considerando el rol crítico del tiempo involucrado en el proceso de trasplante. Según los autores la equidad en el sistema se logra cuando minimizan el tamaño de la lista de espera máxima. Para esto intentan minimizar el tiempo de viaje total del proceso de procuración y trasplante a partir de implementación de un modelo P-Media y teniendo en cuenta como restricción la equidad.

Çay (2012) analiza el sistema de trasplantes de Turquía teniendo en cuenta donantes cadavéricos y vivos sin distinguir el tipo de órgano trasplantado. El sistema de trasplantes turco está dirigido por un Centro Nacional de Coordinación, que reúne distintos Centros Regionales. El autor desarrolla un modelo cuyo objetivo es determinar al mismo tiempo la configuración de las regiones y la localización de los hospitales donantes y receptores dentro de cada región, de manera de maximizar el flujo intraregional de órganos. Para esto desarrollan un modelo matemático de Programación Mixto Entera (*Mixed Integer Programming*, en inglés MIP) considerando dos medios de transporte (terrestre y aéreo) y teniendo en cuenta como principal restricción el tiempo de isquemia fría.

Por otro lado, en la literatura sobre el tema pueden encontrarse diversos trabajos que abordan la problemática solo mediante el uso de modelos matemáticos aplicados a casos hipotéticos. Estos desarrollos tienen como finalidad, por un lado, mostrar la utilidad de este tipo de modelos para la toma de decisiones en casos reales y, por otro, elaborar y testear diversas estrategias de resolución. Por último, la mayoría de estos trabajos plantean modelos multiobjetivos considerando entre sus funciones objetivos: minimizar alternativamente el tiempo total de todo el proceso de trasplante, el costo involucrado en el mismo y el tiempo de espera de los potenciales receptores. Algunos de estos trabajos también incorporan la incertidumbre al considerar distintos escenarios y distribuciones probabilísticas de la aparición de posibles donantes de órganos (Ghane y Tavakkoli-Moghaddam, 2018; Zahiri, et al, 2014a y 2014b).

3. Supuestos y planteo general del modelo

El modelo a desarrollar debe contemplar las distintas fases del proceso de trasplante implementado en la Provincia de Buenos Aires, el cual se describe a continuación. Dado que el interés del modelo es determinar la localización óptima de los centros de trasplante que minimice el tiempo transcurrido entre la detección de un donante y la llegada del órgano al centro de trasplante, se hace particular énfasis en aquellas fases del proceso que involucran traslados de personas, órganos y muestras de laboratorios entre distintas localizaciones.

Los órganos para trasplante se obtienen de dos formas: i) donantes cadavéricos y, ii) donantes vivos. En Argentina esta última posibilidad está contemplada solo entre familiares (hasta cuarto grado de consanguinidad) y para el caso de riñón e hígado. En el caso de los donantes cadavéricos, los potenciales donantes son aquellos pacientes que presentan muerte encefálica.

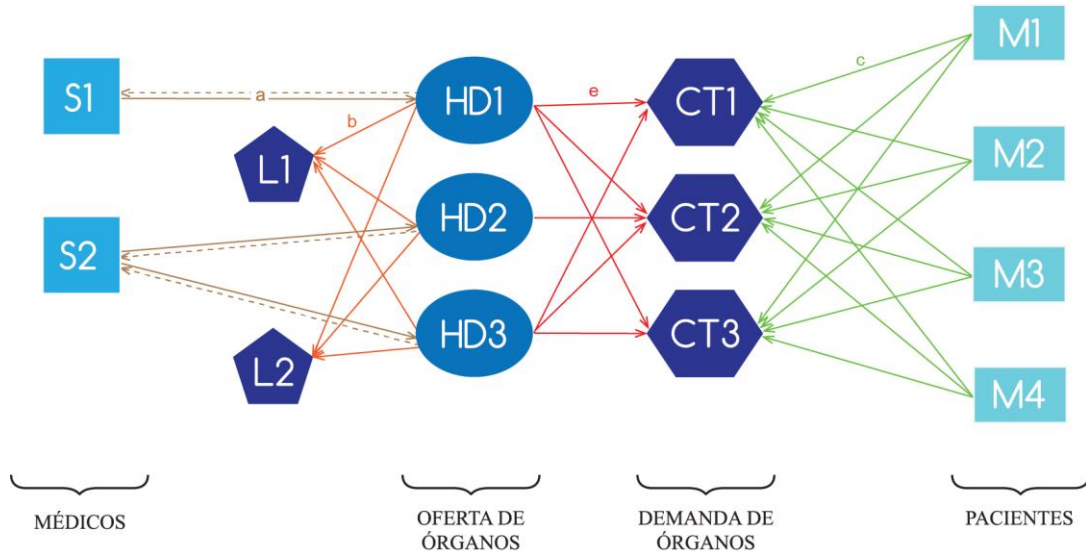
La Figura 1 representa gráfica y conceptualmente (en un caso simplificado con un número pequeño de centros involucrados) el proceso de procuración de riñón. El Hospital donante (HD) notifica la existencia de un donante potencial al Equipo de Procuración del organismo Jurisdiccional de ablación e implante o al INCUCAI². Luego, un equipo de procuración se traslada desde la sede del organismo de procuración hasta el HD con el fin de constatar la muerte encefálica y evaluar la viabilidad de los órganos para trasplante (flujo **a**, en la figura). Al mismo tiempo, comienza el proceso de búsqueda de posibles receptores y distribución. El primer paso consiste en la realización de exámenes de laboratorio (en establecimientos habilitados por el INCUCAI) que incluyen la tipificación del donante a través del análisis de histocompatibilidad (HLA). En el caso de trasplantes de riñones en la Provincia de Buenos Aires, solo dos laboratorios públicos, ubicados en las ciudades de La Plata y de Gral. San Martín, están habilitados para realizar estos estudios (flujo **b**).

El proceso de distribución se inicia buscando receptores compatibles en la provincia donde se lleva a cabo el operativo, de no hallarlos el órgano se distribuye a nivel nacional. En el marco del modelo se supone que los pacientes en lista de espera se encuentran externados, por lo tanto, una vez que el potencial receptor fue seleccionado, se le comunica que debe emprender viaje desde su residencia hacia el CT (flujo **c**). Por último, luego de la ablación, el órgano es enviado hacia el CT donde se llevará a cabo el implante (flujo **e**).

La duración completa del operativo de procuración de órganos es variable, extendiéndose por lo general entre 18 y 20 horas.

² Cada provincia (jurisdicción) cuenta con un organismo responsable de las tareas de coordinación del proceso de procuración, ablación y trasplante dentro de sus respectivos territorios. Mientras que el INCUCAI es el organismo encargado de promover, regular y coordinar las actividades relacionadas con la procuración y el trasplante de órganos, tejidos y células en el ámbito nacional.

Figura 1. Proceso de procuración de riñones en Argentina.



■ Ss	Organismo jurisdiccional de ablación e implante	→ a	Desplazamiento de Médicos para ablación
◆ Ll	Laboratorio de análisis clínicos	→ a	Flujo de Información
● HDh	Hospital Donante	→ b	Envío de Muestras de Sangre desde el HD al L
◆ CTc	Potencial Centro de Trasplante	→ c	Desplazamiento de Pacientes al CT
■ Mm	Municipio	→ e	Envío de Órganos desde el HD hacia CT

Fuente: elaboración propia en base a INCUCAI (2017a)

En este contexto, entonces optimizar la localización de los centros de trasplantes renales requiere minimizar los tiempos asociados a los flujos i) de médicos, desde el organismo jurisdiccional al HD (para efectuar la ablación), ii) de muestras de sangre, desde el HD al laboratorio de análisis clínicos y iii) de órganos desde el HD al CT. Estos flujos son considerados en el modelo desarrollado, teniendo en cuenta las particularidades del proceso de procuración de riñones vigentes en la Provincia de Buenos Aires.

Todo trasplante involucra un donante (oferente de órganos) y un receptor (demandante de órganos) y dado que se supone la ausencia de donantes o receptores fuera de la región, tal demanda necesariamente iguala a la oferta de órganos³. En el marco del modelo, la demanda de órganos de una región es la suma de todas las intervenciones realizadas en los centros de trasplante en un año.

³ Esta es una simplificación usada en el modelo, pero que podría ser incluida fácilmente si se dispusieran de los datos requeridos fuera de la jurisdicción de la Provincia de Buenos Aires.

El modelo requiere conocer como dato básico la demanda de órganos de cada locación candidata a albergar un centro de trasplante. Sobre esta base, se estima la oferta anual de órganos de cada uno de los hospitales donantes. Dado que el número de camas de un hospital donante da cuenta de la población cubierta, se considera a este indicador como una variable proxy al número de donantes que un HD h podría registrar anualmente. Por lo tanto, la oferta de cada HD h , es calculada multiplicando la demanda anual de órganos por la participación de HD h en el total de camas de todos los posibles hospitales donantes. La Tabla 1 ejemplifica el cálculo de la oferta de órganos cuando existen 3 HD y 2 CT, siendo la demanda de cada CT 40 y 60 órganos respectivamente y la demanda agregada igual a 100 órganos.

Tabla 1. Estimación de la oferta anual de órganos de cada hospital donante h

Hospital donante	Camas disponibles	Oferta de órganos
Hospital Donante 1	120	$(60 + 40) \frac{120}{120 + 60 + 20} = 60$
Hospital Donante 2	60	$(60 + 40) \frac{60}{120 + 60 + 20} = 30$
Hospital Donante 3	20	$(60 + 40) \frac{20}{120 + 60 + 20} = 10$

Fuente: Elaboración propia en base a Bélien et al (2013)

Una vez conocidos el número de órganos ofrecidos por cada hospital donante y la demanda de los CT, el flujo de órganos desde un HD h a un CT c será el producto entre el total de órganos del cual dispone el HD h y el porcentaje que representa la demanda del CT c en la demanda agregada. La tabla 2 ilustra el cálculo de los flujos de órganos cuando los tiempos de transporte entre los HD y los CT no superan los de isquemia fría.

Tabla 2. Cálculo de los flujos entre los HD y los CT

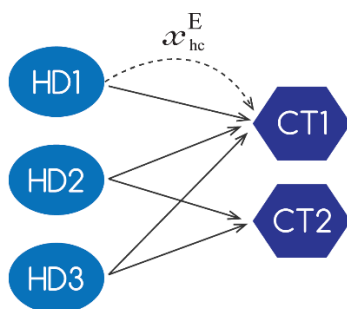
Oferta de órganos	Demanda del Centro de Trasplantes 1 = 40 órganos	Demanda del Centro de Trasplantes 2 = 60 órganos
Hospital Donante 1: 60 órganos	$60 \frac{40}{100} = 24$	$60 \frac{60}{100} = 36$
Hospital Donante 2: 30 órganos	$30 \frac{40}{100} = 12$	$30 \frac{60}{100} = 18$
Hospital Donante 3: 10 órganos	$10 \frac{40}{100} = 4$	$10 \frac{60}{100} = 6$

Fuente: Elaboración propia en base a Bélien et al (2013)

Si el modelo decide cerrar un CT, su demanda debe ser atendida por otro centro. Para ello el modelo reasigna la demanda del centro cerrado *al centro abierto más cercano*. Siguiendo con el ejemplo, la Tabla 3 ilustra el caso en el cual se decide la no apertura del CT 2 y su demanda de órganos es desplazada al CT 1.

Si el tiempo de transporte del órgano entre un determinado HD y un CT supera el tiempo de isquemia fría, ese flujo específico de órganos debe ser reasignado al CT más cercano al HD, generando un flujo extra de órganos. Siguiendo con el ejemplo, si el HD 1 se encuentra a un tiempo de viaje del CT 2 mayor al tiempo de isquemia fría, el flujo de órganos desde el HD 1 hacia el CT 2 se reasigna al CT 1 (Figura 2). Estos flujos extra afectan la demanda original de cada CT (Tabla 4)

Figura 2. Flujo extra de órganos desde el HD 1 al CT 1.



Fuente: Elaboración propia en base a Bélien et al (2013)

Tabla 3. Cálculo de los flujos entre HD y CT cuando la demanda del CT 2 se traslada al CT 1

Oferta de órganos	Demanda del Centro de Trasplantes 1 = 40 + 60 órganos	Demanda del Centro de trasplantes 2 = 60 órganos
Hospital Donante 1: 60 órganos	$60 \frac{(40 + 60)}{100} = 60$	0 ←
Hospital Donante 2: 30 órganos	$30 \frac{(40 + 60)}{100} = 30$	0
Hospital Donante 3: 10 órganos	$10 \frac{(40 + 60)}{100} = 10$	0

Fuente: Elaboración propia en base a Bélien et al (2013)

Tabla 4. Cálculo de los flujos entre HD y CT cuando el tiempo de viaje entre el HD 1 y el CT 1 supera al de isquemia fría (se genera un flujo extra al CT más cercano)

Oferta de órganos	Demanda del Centro de Trasplantes 1 = 60+24=84 órganos	Demanda del Centro de Trasplantes 2 = 40-24 =16 órganos
Hospital Donante 1: 60 órganos	36+24=60	24-24=0
Hospital Donante 2: 30 órganos	18	12
Hospital Donante 3: 10 órganos	6	4

Fuente: Elaboración propia en base a Bélien et al (2013)

3.1 Descripción del modelo

Definición de conjuntos e índices

$c, c', r \in C$: centros de trasplante.

$h, h' \in H$: hospitales donantes.

$m \in M$: municipalidades.

$s \in S$: sedes administrativas de los organismos jurisdiccionales de procuración de órganos.

$l \in L$: laboratorios de análisis clínicos.

Variables de decisión

$y_c \in \{0,1\}$: variable binaria que toma valor 1 si el centro c está abierto y 0 si está cerrado.

x_{hc}^R : flujo de órganos del hospital donante h al centro de trasplante receptor c .

x_{hc}^E : flujo extra de órganos desde el hospital donante h al centro de trasplante receptor c . Toma valor positivo cuando el hospital donante h se encuentra situado a un tiempo de viaje mayor al de isquemia en relación a algún CRT abierto.

d_{cc} : demanda de órganos desplazada desde c a c' . Toma valor positivo cuando el centro c no está abierto.

x_{sh}^D : flujo de médicos para la coordinación del operativo de procuración desde el organismo jurisdiccional de ablación e implante s al hospital donante h

x_{hl}^D : flujo de muestras de sangre desde el hospital donante h al laboratorio de análisis clínico l .

Parámetros

d_{rc} : tiempo de viaje entre los centros de trasplante r y c .

t_{mc}^M : tiempo de viaje desde la municipalidad m al centro c .

t_{hc}^T : tiempo de traslado de las muestras de órganos desde el hospital donante h hasta el centro receptor c .

D_c : Demanda de órganos del centro de trasplante c .

S_h : Oferta de órganos del hospital donante h .

I : Tiempo de isquemia fría del órgano.

T : Máximo tiempo de viaje permitido entre cualquier municipio y un centro de trasplante abierto

a_{hs}^S : toma valor 1 si el hospital donante h pertenece a la órbita administrativa del organismo de procuración y trasplante s ; y 0 si h pertenece a otra jurisdicción. Cada hospital donante reporta a un único organismo de procuración y trasplante.

t_{sh}^S : tiempo de viaje entre el hospital donante h y el organismo jurisdiccional de ablación e implante s .

t_{hl}^S : tiempo de viaje de las muestras de sangre desde el hospital donante h hasta el laboratorio de análisis clínico l .

CMx_c^T : cantidad de trasplantes que puede realizar un centro de trasplantes c por año.

B : Presupuesto disponible.

En base a la notación anterior, el problema se plantea como se indica:

$$\min \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} (t_{sh}^S x_{sh}^D) + \sum_{h \in H} \sum_{l \in L} (t_{hl}^T x_{hl}^D) + \sum_{h \in H} \sum_{c \in C} (t_{hc}^T x_{hc}^R) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{h \in H} \sum_{c \in C} x_{hc}^R = \sum_{c \in C} D_c \quad (2)$$

$$x_{hc}^R = \left(\frac{D_c y_c + \sum_{c' \in C} d_{c'c}}{\sum_{c' \in C} D_{c'}} \right) S_h + x_{hc}^E \forall h \in H, c \in C | t_{hc}^T \leq I \quad (3)$$

$$x_{hc}^R = 0 \forall h \in H, c \in C | t_{hc}^T > I \quad (4)$$

$$d_{c'c} \geq (y_c - y_{c'} - \sum_{r \in C | d_{rc} < d_{c'c}} y_r) D_{c'} \forall c \in C, c' \in C \quad (5)$$

$$x_{hs}^D = a_{hs}^S S_h \forall h \in H, s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{l \in L} x_{hl}^D = S_h \forall h \in H \quad (7)$$

$$\sum_{c \in C} x_{hc}^R = S_h \forall h \in H \quad (8)$$

$$x_{hc}^R \leq S_h y_c \forall h \in H, c \in C \quad (9)$$

$$x_{hc}^E \leq S_h y_c \forall h \in H, c \in C \quad (10)$$

$$\sum_{c \in C | t_{mc}^M \leq T} y_c \geq 1 \forall m \in M \quad (11)$$

$$\sum_{h \in H} x_{hc}^R \leq CMx_c^T \forall c \in C \quad (12)$$

$$\sum_{c \in C} k y_c \leq B \quad (13)$$

$$y_c \in \{0, 1\} \quad (14)$$

$$x_{hc}^R \geq 0; x_{hc}^E \geq 0; x_{hc}^D \geq 0; d_{c'c} \geq 0 \forall h \in H, c \in C, c' \in C \quad (15)$$

La función objetivo (1) minimiza el tiempo de traslado involucrado en el proceso de trasplante, de modo que contabiliza los tiempos insumidos en trasladar: i) al coordinador de

procuración trasplante y su equipo desde el organismo jurisdiccional de procuración hasta el hospital donante (primer término); ii) las muestras de sangre desde el HD h al laboratorio de análisis clínico l (segundo término) y iii) el tiempo requerido para trasladar los órganos desde los HD hasta los CT (tercer término). De esta forma, se supone implícitamente que solo se considerarán como posibles receptores aquellos pacientes que puedan estar disponibles en el tiempo que demande la realización de los análisis de laboratorio y que al momento que el órgano llegue al centro de trasplantes, el receptor ya se encuentra listo para la operación (Rajmohan, 2017). Por último, dado que en cada término de la función objetivo los tiempos de viaje están ponderados por los flujos de órganos correspondientes puede considerarse que el modelo corresponde a un desarrollo más sofisticado de los modelos P-Media⁴. Este tipo de modelos tienden a privilegiar la eficiencia del sistema al otorgar mayor peso en la decisión final a aquellos nodos de demanda de mayor tamaño, en este caso a aquellos de mayor demanda de órganos para trasplante.

La Ec. (2) asegura que la suma de todos los flujos de órganos desde los hospitales donantes a los centros de trasplante sea igual a la demanda agregada de los centros de trasplantes (no quedan órganos sin asignar).

La Ec. (3) regula el flujo de órganos entre un hospital donante h y un centro de trasplante c cuando el tiempo de viaje entre ambos es menor que el tiempo de isquemia. En tal situación, el valor de dicho flujo es igual a la suma de: i) el producto de la oferta de órganos del HD h y el porcentaje de la demanda total de órganos que representa la demanda del CT c (incluyendo la demanda desplazada a c desde algún centro cerrado, en caso que la hubiese), y ii) el flujo extra desde el (o los) hospital(es) donante(s) c' a c (en caso que el modelo decida cerrar c'). La Ec. (4) impone que sea cero el flujo de órganos desde el hospital donante h al centro de trasplante receptor c si el tiempo de traslado entre ambos supera al de isquemia fría del órgano.

La Ec. (5) establece que la demanda del CT c' se desplaza al CT c si: i) El centro c está abierto y c' no lo está (con lo cual $y_c - y_{c'} = 1$) y ii) no hay otro centro abierto r más cercano al centro c' que c (con lo cual $\sum_{r \in C | d_{rc} < d_{c'c}} y_r = 0$).

Dado que cada órgano disponible genera un flujo de médicos entre los organismos jurisdiccionales de procuración y trasplante y los HD, la Ec. (6) requiere que, para todo hospital donante, la suma de los flujos entre dicho hospital y los organismos jurisdiccionales s sea igual a la oferta de órganos en el hospital donante h . En forma análoga, debido a que todo donante genera un flujo de muestras de sangre entre el HD y el laboratorio de análisis clínicos l , la Ec. (7) impone que para cada HD la suma de dichos flujos debe ser igual a su oferta de órganos. Por último, dado que todo órgano disponible debe ser asignado a algún

⁴ Para mayor detalle de estos modelos consultar Arnaudo (2018)

HD, la Ec. (8) asegura que la suma de los flujos de órganos entre cualquier hospital donante h y todos los centros receptores c sea igual a la oferta de órganos en el hospital donante h .

La Ec. (9) define que solo puede existir un flujo de órganos positivo entre un hospital donante h y un centro de trasplante receptor c si dicho centro está abierto.

La Ec. (10) asegura que solo puede existir un flujo extra positivo entre un HD y un CT si éste último está abierto.

La Ec. (11) asegura, para cada municipio m , la existencia de al menos un CT abierto situado a un tiempo de viaje desde m inferior al límite prefijado de T horas.

La Ec. (12) asegura que cada CT solo realiza una cantidad de trasplantes menor a su capacidad máxima operativa.

La Ec. (13) establece que el costo operativo anual de todos los centros de trasplante abiertos no puede superar el presupuesto anual asignado.

Por último, la Ec. (14) define a y_c como variable binaria y la (15) impide que las variables de decisión tomen valores negativos.

3.2 Definición de conjuntos y valores de los parámetros en el caso base

En este apartado se explica cómo se elaboraron los datos utilizados para la implementación del modelo. A tal fin, se sigue la estructura de los índices, conjuntos y parámetros detallado en la sección anterior.

Dado que en 2016 más del 70% de los órganos procurados procedieron de establecimientos sanitarios de dependencia pública (INCUCAI, 2017b), se asume que el conjunto de hospitales donantes (H) está compuesto por todos los hospitales de la Provincia de Buenos Aires de dependencia pública (nacional⁵, provincial y municipal) con una unidad de cuidados críticos. Estos mismos hospitales donantes se consideran a su vez como ubicaciones de potenciales centros de trasplante. La información de los hospitales fue provista por la Dirección de Información Sistematizada (DEIS) del Ministerio de Salud de la Provincia de Buenos Aires y corresponden al año 2009. En el caso de que en una misma localidad existieran varios establecimientos que pudieran actuar como hospitales donantes, a los fines prácticos del cálculo de la oferta de cada HD se los incluyó como un único establecimiento con una cantidad de camas equivalente a la suma de todos ellos. De esta manera el conjunto de HD h y potenciales CT c está compuesto por 71 establecimientos (Tabla A 4.1).

⁵ Excluyendo los establecimientos dependientes de las Fuerzas Armadas, los materno-infantil, infantiles, especializados en alguna subdisciplina médica o ubicados en localidades pequeñas (menos de 25.000 habitantes).

Para simplificar el análisis, se supone que el conjunto de los pacientes que se encuentran en lista de espera para recibir un riñón tienen como lugar de residencia los partidos de la Provincia de Buenos Aires que en el Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas del año 2010 registraron una población superior a 25.000 personas (INDEC, 2017). Este listado incluye a 78 de los 135 distritos que conforman la provincia, y comprende al 95% de su población (Tabla A 4.2). A su vez, a los efectos de calcular el tiempo de viaje entre las municipalidades y los centros de trasplante, se considera que los pacientes receptores residen en la localidad cabecera de cada partido, dada la inexistencia de información estadística relativa a la distribución de la población por localidades en algunos partidos.

En la Provincia existe una única sede jurisdiccional de Ablación e Implante, el CUCAIBA, localizada en La Plata. Adicionalmente, existen tres equipos de Coordinación Regional del Proceso de Procuración, con sede en las ciudades de Bahía Blanca, Mar del Plata y Junín, los cuales actúan en el proceso de procuración y ablación como los equipos que se trasladan desde la sede administrativas hasta el HD. Sin embargo, los equipos regionales de procuración solo atienden los casos que se presentan en la Región Sanitaria⁶ a la cual pertenecen, mientras que en el resto de los casos los equipos parten desde La Plata.

La demanda de órganos de cada potencial centro de trasplante se estimó suponiendo que la demanda de trasplantes valorada a partir de la cantidad de operaciones realizada en 2017 se distribuye entre las distintas localidades de la Provincia en forma proporcional a su población. En el caso de localidades que no cuenten con un potencial CT, su demanda se asignó al potencial centro de trasplantes más cercano. En el caso de localidades donde existe más de un potencial CT, se supuso que la demanda se distribuye uniformemente entre los establecimientos disponibles.

La oferta de órganos de cada hospital donante fue estimada a partir de la información del número de camas provista por la DEIS, siguiendo los pasos detallados en la sección anterior.

⁶ Las regiones sanitarias son estructuras técnico-administrativas que dependen del Ministerio de Salud de la Provincia de Buenos Aires y actúan localmente en sus territorios. Su propósito fundamental es coordinar y articular los establecimientos asistenciales con todos sus recursos humanos y tecnológicos en una Red Asistencial. Entre otras actividades, sus funciones comprenden la difusión de las políticas y acciones del Ministerio de Salud y la recepción de los problemas e inquietudes de las comunidades a través de los Secretarios de Salud y sus organizaciones Sociales. Mar del Plata pertenece a la Región Sanitaria VIII junto con los partidos de Ayacucho, Balcarce, General Alvarado, General Guido, General Lavalle, General Madariaga, Lobería, Maipú, Mar Chiquita, Necochea, Pinamar, San Cayetano, Tandil, Villa Gesell y Partido de La Costa. Junín está incluida en la Región Sanitaria III junto con los partidos de Chacabuco, Florentino Ameghino, General Arenales, General Pinto, General Viamonte, Leandro N. Alem y Lincoln. Bahía Blanca pertenece a la Región Sanitaria I junto con los partidos Adolfo Alsina, Adolfo González Chávez, Coronel Rosales, Coronel Dorrego, Coronel Pringles, Coronel Suárez, Guaminí, Monte Hermoso, Patagones, Puán, Saavedra, Tornquist, Tres Arroyos y Villarino.

Los tiempos de traslado se encuentran expresados en minutos y fueron calculados utilizando el software *Google Maps*, suponiendo que todos los traslados se realizan en automóvil.

El máximo tiempo de viaje entre una localidad y un centro de trasplantes abierto para considerar que la localidad está cubierta, toma el valor de 176 minutos. Para ponderar este valor se seleccionó la distancia máxima entre un municipio y la ubicación de todos los potenciales CT.

El costo operativo de un centro de trasplante se desconoce, por lo que se supuso igual para todos los centros de trasplantes (igual a 1 u.m.). En el escenario base el monto del presupuesto disponible es de 71 u.m., con lo cual inicialmente sería factible abrir todos los potenciales centros de trasplante sin saturar la restricción presupuestaria establecida en la Ec. (11).

La cantidad de trasplantes que puede realizar un CT c por año se estableció en el escenario base en 330 trasplantes, considerando que se realiza uno por día y que los profesionales cuentan con 35 días no laborables.

El tiempo de isquemia para el caso del riñón asciende a 30hs, sin embargo, dado que menores tiempos redundan en mayor probabilidad de éxito del trasplante (entre otros factores) se adoptó un valor de 15hs. De todas maneras, dadas las distancias de la provincia de Buenos Aires, este parámetro no representa una limitante en el proceso.

3.3 Escenarios

Además del análisis de la solución en el caso base, se realizará un análisis de sensibilidad para estudiar el impacto sobre la solución de cambios en dos parámetros del modelo: la restricción presupuestaria y el máximo tiempo de viaje entre una localidad y un centro de trasplantes abierto para considerar que la localidad está cubierta. De esta manera se elaboran seis escenarios alternativos (Tabla 5).

Considerando que actualmente en la Provincia de Buenos Aires funcionan cuatro centros de trasplantes de dependencia pública⁷, tanto el caso base como cada uno de los seis escenarios propuestos será resuelto asumiendo alternativamente i) que se respeta la ubicación de los centros de trasplante actualmente en funcionamiento, es decir, que en caso de ser necesario la apertura de nuevos centros se trataría de una ampliación de la red actual, ii) sin respetar dicha ubicación, pudiendo el modelo elegir libremente la localización de los centros.

En primer lugar, se restringe el presupuesto disponible: se supone que el mismo asciende alternativamente a 10 u.m. o a 5 u.m. Por otro lado, se libera la restricción de cobertura, es

⁷ Hospital Eva Perón de San Martín, Hospital San Martín de La Plata, Hospital Penna de Bahía Blanca y Hospital El Cruce de Florencio Varela.

decir se amplía la distancia máxima considerada aceptable entre cualquier municipio de residencia de los pacientes y un CT abierto.

Tabla 5. Caso Base y Escenarios propuestos

Descripción	Restricción	Restricción
	Presupuestaria (u.m.)	Cobertura (minutos)
Caso Base	Sin restricción	176
Escenario 1	10	176
Escenario 2	5	176
Escenario 3	Sin restricción	200
Escenario 4	Sin restricción	250
Escenario 5	10	200
Escenario 6	10	250

Fuente: Elaboración propia

4. Resultados

El modelo se resolvió utilizando el *software* GAMS (GAMS, 2017) con el *solver* CPLEX, ejecutado en una computadora con procesador core i5 (4° generación) de 3,1 GHz y 16 GB de memoria DDR3. Cada una de las soluciones presentadas presenta un GAP relativo nulo. Los tiempos de CPU insumidos fueron en todos los casos inferiores a los 10 minutos.

El modelo está compuesto por 15.771 ecuaciones: 5.468 son de igualdad, 5.119 desigualdades de mayor o igual y las restantes 5.184 desigualdades de menor o igual. A su vez está definido por 15.478 variables: 71 binarias y las restantes 15.407 continuas.

A partir de los resultados obtenidos en el caso base y los escenarios 1 y 2 puede decirse que, a igual capacidad de los centros y demanda de órganos, a medida que disminuye el presupuesto disponible para la instalación de CT (y, por lo tanto, el número de centros instalados) aumenta el tiempo insumido en el proceso de procuración y posterior traslado del órgano para su implante. En el caso base que supone que se podrían abrir todos los potenciales centros de trasplantes, se presentan diferencias en cuanto a la cantidad de centros a instalar: si es posible rediseñar la red de CT la cantidad de instalaciones abiertas resulta menor. Asimismo, el tiempo incurrido para la realización de todos los procesos de procuración requeridos es menor, este resultado es particularmente importante ya que implica al mismo tiempo menores costos operativos para el sistema de salud en su conjunto. Además, en el escenario 1 que implica la misma cantidad de CT abiertos, el tiempo insumido es menor si no se respeta la ubicación actual de la red asistencial. Por otro lado, dados los valores de

los restantes parámetros el escenario 2 respetando la ubicación de los CT que actualmente se encuentran funcionando no resulta factible, es decir que es necesario instalar una cantidad mayor de centros (Tabla 6 y Figura 3). Por último, en todos los escenarios en que es posible rediseñar la red actual de atención, el modelo determina que es necesario que continúen funcionando los CT localizados en Florencio Varela y a excepción del escenario 3, en Bahía Blanca⁸.

Tabla 1. Cantidad de CT instalados según cada escenario propuesto

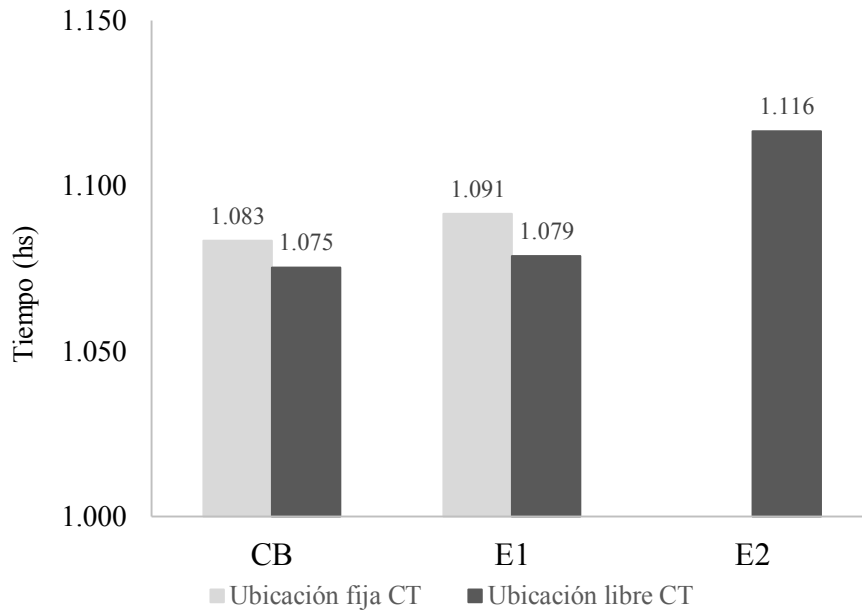
Escenario	Respetando la ubicación de los CT actuales		Sin respetar la ubicación de los CT actuales	
	Cantidad de CT abiertos	Valor de la Función Objetivo (hs)	Cantidad de CT abiertos	Valor de la Función Objetivo (hs)
Caso Base	18	1.083	14	1.075
Escenario 1	10	1.091	10	1.079
Escenario 2	No Factible		5	1.116
Escenario 3	17	1.082	13	1.070
Escenario 4	15	1.070	11	1.063
Escenario 5	10	1.090	10	1.074
Escenario 6	10	1.076	10	1.064

Fuente: Elaboración propia

Si se relaja la restricción de cobertura, es decir, es posible que el potencial receptor se encuentre más alejado de la ubicación del potencial CT respecto del caso base el modelo determina que tanto si se permite el rediseño de la red asistencial como si es necesario respetar la ubicación de los CT que actualmente se encuentran funcionando, el número de centros a instalar es menor. No obstante, los tiempos insumidos desde que se detecta el donante hasta que el órgano arriba al centro de trasplante en todo el sistema de salud es menores (Tabla 6 y Figura 4). Al igual que en los escenarios anteriores, cuando es posible rediseñar la red asistencial el modelo determina que los CT que funcionan en Bahía Blanca y Florencio Varela deben permanecer abiertos.

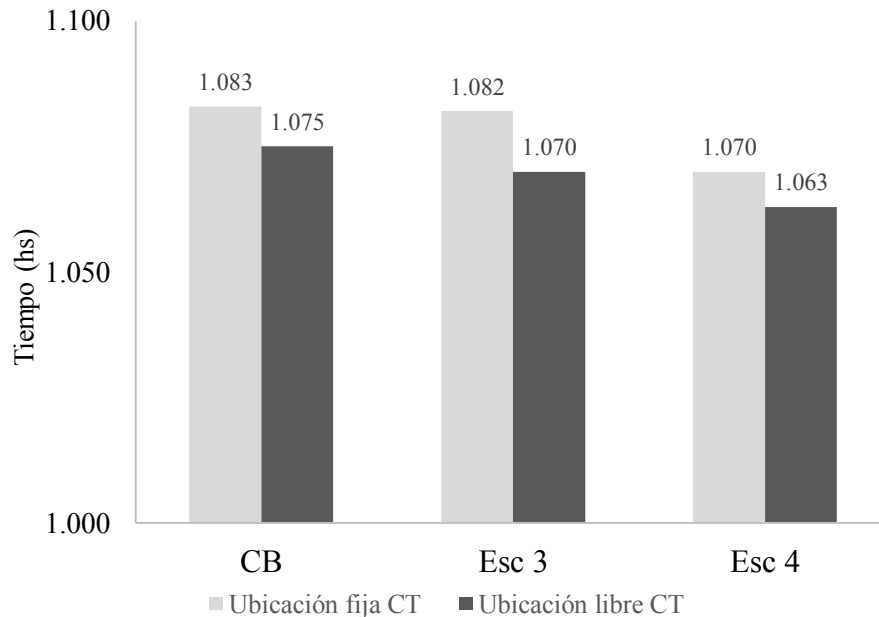
⁸ En la tabla A4.3 del anexo se encuentra el detalle de los CT instalados en cada escenario.

Figura 3. Tiempo de traslado insumido desde la aparición del donante hasta que el órgano arriba al CT. Comparación del Caso Base y los Escenarios 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Tiempo de traslado insumido desde la aparición del donante hasta que el órgano arriba al CT. Comparación del Caso Base y los Escenarios 3 y 4

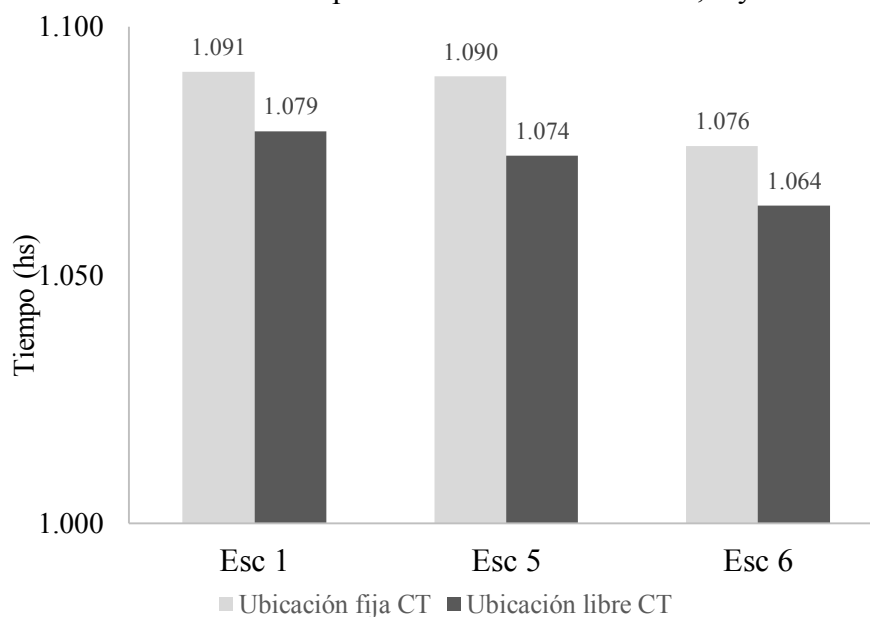


Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, si se fija la restricción presupuestaria en 10 u.m. y se relaja la restricción de cobertura (escenarios 5 y 6) y se compara con el escenario 1, se observa que a medida que es

posible que el potencial receptor se encuentre más alejado de un CT abierto, el tiempo transcurrido entre la aparición del donante y que el órgano llega al CT en el sistema de salud disminuye (Tabla 6 y Figura 5). En estos escenarios, cuando es posible no respetar la ubicación de los actuales CT el modelo determina que los CT instalados en Bahía Blanca y Florencio Varela deben permanecer en funcionamiento en el escenario 5 mientras que en el escenario 6 solo debe continuar funcionando el CT de Florencio Varela.

Figura 5. Tiempo de traslado insumido desde la aparición del donante hasta que el órgano arriba al CT. Comparación de los Escenarios 1, 5 y 6



Fuente: Elaboración propia

Las características del sistema de trasplante conducen a que la localización de los CT determine el ahorro en el tiempo insumido en el procedimiento.

5. Reflexiones finales

Si bien los modelos de localización óptima de centros de salud no representan una novedad, su aplicación a la localización de establecimientos especializados en trasplantes es relativamente incipiente. En particular, no existe ningún estudio de este tipo aplicado a las características específicas del proceso de trasplante de Argentina, ni aun incluyendo a todos los países de América Latina.

El modelo desarrollado en el presente capítulo, si bien contiene supuestos simplificadores destinados a facilitar el cómputo de las soluciones, considera todos los elementos relevantes para estudiar la localización óptima de los centros de trasplante de riñones en la provincia de Buenos Aires, con el objetivo de alcanzar mayores niveles de eficiencia (al minimizar los

costos) y de equidad (al garantizar el acceso de la población). Sin embargo, los resultados obtenidos solo pueden considerarse exploratorios, dado que el conjunto de datos al cual fue aplicado no resulta completo. En particular,

- a. Se omitieron todos los hospitales privados de la provincia de Buenos Aires con unidad de terapia intensiva, que en realidad actúan como hospitales donantes y muchos de ellos también como centros de trasplante. Dado que los mecanismos de asignación de órganos no discriminan entre centros públicos y privados, esta omisión obviamente limita la utilidad real de los resultados obtenidos en las corridas realizadas.
- b. Tampoco se consideran todas las localidades de la provincia donde pueden residir los potenciales donantes. Si bien el universo de población considerado alcanza al 95% del total provincial, la omisión de los municipios con menos de 25.000 habitantes también tiene el potencial de afectar los resultados en términos de localizaciones óptimas.
- c. Se asume que la capacidad de trasplantes anuales es la misma en todos los centros, tanto en funcionamiento como candidatos potenciales a alojar un CT. Este supuesto obviamente no es realista, debiendo recabar mayor información para poder estimar en forma más fidedigna dicha capacidad.

Un primer paso de acción con vistas en transformar la herramienta desarrollada en un instrumento que pueda ser utilizado verdaderamente para la planificación estratégica de la apertura de centros de trasplante en la Provincia de Buenos Aires, requiere considerar la totalidad de los datos relevantes.

Asimismo, algunas situaciones podrían deberían ser incorporadas para dotar al modelo de mayor realismo. En particular:

- a. Incorporar la incertidumbre respecto de la demanda y oferta futura de órganos: el modelo asume que la oferta de órganos de cada HD y la demanda de cada CT resulta estable en el tiempo. Tal supuesto no resulta adecuado, donde la cantidad de donantes (y por lo tanto de trasplantes) registra un aumento sostenido en los últimos años.
- b. Incorporar la existencia de múltiples órganos: en el modelo se asume que existe un único órgano ofrecido y demandado (riñones). En realidad, cada donante puede ofrecer distintos órganos y tejidos, los cuales pueden ser implantados en múltiples receptores, situados en distintos centros de trasplante. Considerar la totalidad de los órganos susceptibles de ser trasplantados obviamente afectará la disposición óptima de la red.
- c. La posibilidad de utilizar medios alternativos de transporte en los traslados, dependiendo de las distancias a recorrer.

Superar las falencias mencionadas se plantea como línea de investigación para trabajos futuros.

Referencias Bibliográficas

- Arnaudo, M. F. (2018). Planeamiento óptimo en el sector salud: aportes de la economía y la ingeniería de sistemas. Tesis doctoral. Disponible en <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4110>
- Beliën, J., De Boeck, L., Colpaert, J., Devesse, S., & Van den Bossche, F. (2013). Optimizing the facility location design of organ transplant centers, *Decision Support Systems*, 54(4), 1568-1579.
- Berg, B & Borj. (2013). Location Models in Healthcare. En B. Denton (Ed) *Handbook of Healthcare Operations Management*, (pp 387-402). Estados Unidos: Springer.
- Bruni, M., Conforti, D., Sicilia, N. & Trotta, S. (2006). A new organ transplantation location-allocation policy: a case study of Italy, *Health care management science*, 9(2), 125-142.
- Çay, P. (2012). Organ transplantation logistics: case for Turkey. Tesis Doctoral, Bilkent Universit. Recuperado de <http://www.thesis.bilkent.edu.tr/0006059.pdf>.
- Cobo, J, y del Río Gallegos, F. (2009). Preservación de órganos. *Medicina intensiva*, 33(6)282-292.
- Daskin, M., & Maass, K. (2015). The P-Median Problem. En: Gilbert Laporte, Stefan Nickel y Francisco Saldanha da Gama, *Location Science* (1st ed., p. 21). Ginebra, Springer International Publishing. Disponible en: <http://www.springer.com/cda/content/.../9783319131108-c1.pdf>
- Daskin, M. (2008). What you should know about location modeling, *Naval Research Logistics*, 55(4), 283-294.
- Daskin, M., y Dean, L. (2005). Location of health care facilities. En M. Brandeau, F. Sainfort & W. Pierskalla (Eds). *Operations research in healthcare: a handbook of methods and applications*, (pp 43-76). Estados Unidos: Kluwer Academic Publisher.
- GAMS Development Corporation (2017). *General Algebraic Modeling System (GAMS)*. Release 24.4.5. Estados Unidos: autor.
- Ghane, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). A stochastic optimization approach to a location-allocation problem of organ transplant centers. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 11(1), 103-111.
- Instituto Nacional Central Único Coordinador de Ablación e Implante (INCUCAI). (2003). *Programa Federal de Procuración de Órganos y Tejidos*. Disponible en www.incucai.gov.ar/docs/otros_documentos/programa_federal.pdf
- Instituto Nacional Central Único Coordinador de Ablación e Implante (INCUCAI) (2017a). www.incucai.gov.ar
- Instituto Nacional Central Único Coordinador de Ablación e Implante (INCUCAI). (2017b). *Procuración y Trasplante de Órganos, Tejidos y Células en Argentina*. Memoria 2016. Disponible en http://www.msal.gov.ar/images/stories/bes/graficos/0000001195cnt-10-memoria_2017.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). Argentina. Disponible en: <https://www.indec.gov.ar/>.
- Kong, N., Schaefer, A., Hunsaker, B., y Roberts, M. (2010). Maximizing the efficiency of the US liver allocation system through region design, *Management Science*, 56(12), 2111-2122.
- Kong, N., Shechter, S., Schaefer, A., & Stahl, J. E. (2002). Organ transplantation regions: The need for optimization. *IIE 2002 IERC, Orlando, Florida, May 2002*.

- Rais, A. & Viana, A. (2011). Operations research in healthcare: a survey. *International Transactions in Operational Research*, 18(1), 1-31.
- Rajmohan, M., Theophilus, C., Sumalatha, M. R., & Saravanakumar, S. (2017). Facility location of organ procurement organisations in Indian health care supply chain management. *South African Journal of Industrial Engineering*, 28(1), 90-102.
- 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.
- Reid P. Compton W., Grossman J. y Fanjiang G, editores (2005). *Building a Better Delivery System: A New Engineering/Health Care Partnership*. Committee on Engineering and the Health Care System, National Academy of Engineering and Institute of Medicine. Estados Unidos: National Academies Press
- Stahl, J., Kong, N., Shechter, S., Schaefer, A., Roberts, M. (2005). A methodological framework for optimally reorganizing liver transplant regions, *Medical Decision Making* 25(1) 35–46.
- Zahiri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pishvaei, M. S. (2014a). A robust possibilistic programming approach to multi-period location–allocation of organ transplant centers under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 74, 139-148.
- Zahiri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mohammadi, M., & Jula, P. (2014b). Multi-objective design of an organ transplant network under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72, 101-124.

Anexo

Tabla A4.1. Conjunto H y C. Hospitales seleccionados

Localidad	Hospital	Camas
25 de Mayo	Hosp. Subz. Saturnino Unzué	58
9 de Julio	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Julio de Vedia	78
Adroque	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Dr. Lucio Meléndez	184
Avellaneda	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Pte. Perón	301
Avellaneda	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Dr. Pedro Fiorito	228
Ayacucho	Hosp. Local Munic. Dr. Pedro Solanet	58
Azul	Hosp. Munic. Dr. Angel Pintos	93
Bahía Blanca	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Dr. J. Penna	295
Bahía Blanca	Hosp. Munic. de Agudos Dr. Leónidas Lucero	125
Balcarce	Hosp. Subz. Munic. de Balcarce	74
Baradero	Hosp. Subz. Gral. Dr. L. Piñeiro	41
Berazategui	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Evita Pueblo	226
Berisso	Hosp. Zonal Gral. de Agudos Dr. M. V. Larrain	91
Bolívar	Hosp. Subz. Gral. Dr. M. A. Capredoni	117
Bragado	Hosp. Munic. San Luis	60
Campana	Hospital San José	91
Cañuelas	Ente Descentralizado Hospital Dr. Angel Marzetti	48
Carmen de Patagones	Hosp. Munic. de Agudos Dr. Pedro Ecay	115
Chacabuco	Hosp. Munic. Ntra. Sra. del Carmen	133
Chascomús	Hosp. San Vicente de Paul	58

Chivilcoy	Hosp. Munic. de Chivilcoy	75
Ciudadela	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Prof. Dr. R. Carrillo	116
Coronel Suárez	Hosp. Munic. de Cnel. Suárez	55
Dolores	Unid. Hospitalaria San Roque	81
Echeverría	Policlínico S. T. Santamarina	132
Ensenada	"Hosp. Zonal Gral. de Agudos ""Dr. H. Cestino"""	50
Escobar	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Dr. E. Erill	138
Exaltacion De La Cruz	Hosp. Munic. San José	56
Ezeiza	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Madre Teresa de Calcuta	147
Fcio Varela	Hosp. de Alta Compl. El Cruce	103
General Rodríguez	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Vte. Lopez y Planes	345
General Villegas	Hosp. Munic. de Gral. Villegas Ntra. Sra del Carmen	60
González Catán	Hosp. Zonal de Ag. de González Catán Km.32	152
Gral Alvarado	Hosp. Munic. Dr. Mariano Cassano	40
Gral Viamonte	Hosp. Subz. de Gral. Viamonte	51
Isidro Casanova	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Dr. Paroissien	311
José C. Paz	Hosp. Zonal de Ag. Gob. Domingo Mercante	156
Junín	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Abraham Piñeyro	153
La Plata	Hosp. Interz. Esp. de Ag. y Crón. Dr. A. Korn - neurops	1.198
La Plata	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Gral. San Martín	352
Lanús	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Evita	304
Lanús	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Narciso López	123
Lanús	Hosp. Local Gral. de Agudos Dr. A. Melo	29
Lincoln	Hosp. Subz. Munic. Dr. R. O. Miravalle	115
Lobos	Hosp. Zonal Gral. de Ag. de Lobos	71
Loma Hermosa	Hosp. Zonal Gral. de Agudos Dr. C. A. Bocalandro	140
Lomas De Zamora	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Luisa C. de Gandulfo	181
Los Polvorines	Ctro. de Alta Compl. Cardiovasc. Pte. J. D. Perón	190
Los Polvorines	Hosp. Gral. Los Polvorines Dr. Carrillo	165
Luján	Hosp. Munic. Ntra. Sra. de Luján	106
Maipú	Hosp. Subz. de Maipú	84
Mar del Plata	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Dr. O. Alende	288
Marcos Paz	Hosp. Dr. Héctor J. D'Agnillo	51
Mercedes	Hosp. Zonal Gral. de Agudos Blas Dubarry	118
Merlo	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Héroses de Malvinas	164
Merlo	Hosp. Munic. Eva Perón	163
Moreno	Hosp. Zonal Gral. M.L. De la Vega	190
Morón	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Prof. Dr. L. Güemes	147
Morón	Hosp. Munic. O. B. de Lavignolle	188
Morón	Hosp. Nac. Dr. Posadas	455
Necochea	Hosp. Munic. Dr. Emilio Ferreyra	81
Olavarría	Hosp. Zonal Munic. Dr. Héctor Cura	132
Olivos (de facto)	Hosp. Munic. Dr. Bernardo Houssay	131
Pablo Nogués	Hosp. Munic. de Trauma y Emerg. Dr. F. A. Abete	117
Pehuajó	Hosp. Zonal Dr. J. C. Aramburu	70
Pilar	Hosp. Central de Pilar Juan C. Sanguinetti	136
Quilmes	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Dr. I. Iriarte	156
Rafael Calzada	Hosp. Zonal. Gral. Ag. Dr. Arturo Oñativia	164
Saladillo	Hosp. Zonal Gral. Dr. A. Posadas	82
Salto	"Hosp. Munic. de Salto ""Presidente J. D. Perón"""	58
San Fernando	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Petrona V. de Cordero	149
San Isidro	Hosp. Central Munic. de San Isidro	187
San Justo	Policlínico Central San Justo	34
San Martín	Hosp. Interz. Gral. de Ag. Eva Perón	226

San Martín	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Gral. M. Belgrano	124
San Miguel	Hosp. Munic. Dr. Raúl F. Larcade	232
San Nicolás de los Arroyos	Hosp. Interz. Gral. de Ag. San Felipe	158
San Pedro	Hosp. Subz. Gral. Dr. E. Ruffo	65
San Vicente	Hosp. Subz. Gral. Dr. R. Carrillo	69
Tandil	Hosp. Munic. Ramón Santamarina	124
Tigre	Hosp. Zonal Gral. de Ag. M. V. de Martínez	147
Trenque Lauquen	Hosp. Munic. Dr. Pedro T. Orellana	89
Tres Arroyos	Hosp. Ignacio Pirovano	136
Villa Watteone	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Mi Pueblo	190
Zárate	Hosp. Zonal Gral. de Ag. Virgen del Carmen	95

Nota: se incluyen todos los hospitales considerados. En la resolución del problema aquellos hospitales que funcionan en la misma localidad se consideraron como un único establecimiento.

Fuente: elaboración propia en base a información provista por la Dirección de Información Sistematizada del Ministerio de Salud de la Provincia de Buenos Aires

Tabla A 4.2. Conjunto m. localidades consideradas

Localidad (Conjunto <i>m</i>)	Localidad (Conjunto <i>m</i>)	Localidad (Conjunto <i>m</i>)
25 de Mayo	La Plata	Ezeiza
9 de Julio	Lanús	San Juan Bautista (ex F. Varela)
Adrogue	Lincoln	Miramar
Arrecifes	Lobos	Mar del Plata
Avellaneda	Lomas de Zamora	General Rodríguez
Azul	Luján	San Martín
Bahía Blanca	Los Polvorines	General Villegas
Balcarce	Marcos Paz	Hurlingham
Baradero	Mercedes	Ituzaingó
Berazategui	Merlo	José C. Paz
Berisso	Moreno	Junín
Bolívar	Morón	Mar del Tuyú
Bragado	Necochea	San Justo
General Brandsen	Olavarría	San Miguel
Campana	Carmen de Patagones	San Nicolás de los Arroyos
Cañuelas	Pehuajó	San Pedro
Chacabuco	Pergamino	San Vicente
Chascomús	Pilar	Tandil
Chivilcoy	Pinamar	Tigre
Punta Alta	Guernica	Trenque Lauquen
Coronel Suárez	Quilmes	Tres Arroyos
Dolores	Ramallo	Caseros
Ensenada	Saladillo	Olivos
Escobar	Salto	Villa Gesell
Monte Grande	San Fernando	Médanos
Capilla del Monte	San Isidro	Zárate

Tabla A 4.3. Centros de trasplantes instalados según cada escenario propuesto. Ubicación fija CT

CASO BASE	ESC 1	ESC2	ESC 3	ESC 4	ESC 5	ESC 6
Avellaneda	Avellaneda	NO FACTIBLE	Avellaneda	Avellaneda	Bahía Blanca	Azul
Azul	Azul		Bahía Blanca	Azul	Bragado	Bahía Blanca
Bahía Blanca	Bahía Blanca		Berazategui	Bahía Blanca	Chascomús	Bragado
Berazategui	Bragado		Bragado	Berazategui	Fcio Varela	Ciudadela
Bolívar	Dolores		Chascomús	Ciudadela	General Rodríguez	Fcio Varela
Chascomús	Fcio Varela		Ciudadela	Fcio Varela	La Plata	General Rodríguez
Ciudadela	Gral Rodríguez		Fcio Varela	General Rodríguez	Saladillo	La Plata
Dolores	La Plata		General Rodríguez	La Plata	San Justo	San Justo
Fcio Varela	San Justo		La Plata	Lobos	San Martín	San Martín
General Rodríguez	San Martín		Lomas De Zamora	Lomas De Zamora	Tres Arroyos	Villa Vatteone
La Plata			Moreno	Pablo Nogués		
Lobos			Quilmes	Quilmes		
Lomas De Zamora			Saladillo	San Justo		
Moreno			San Justo	San Martín		
Quilmes			San Martín	San Vicente		
San Justo			San Vicente			
San Martín			Tres Arroyos			
San Vicente						

Tabla A 4.3 Continuación. Centros de trasplantes instalados según cada escenario propuesto. Ubicación Libre CT.

CASO BASE	ESC 1	ESC2	ESC 3	ESC 4	ESC 5	ESC 6
Avellaneda	Azul	Bahía Blanca	9 de Julio	Avellaneda	9 de Julio	Avellaneda
Azul	Bahía Blanca	Balcarce	Avellaneda	Azul	Carmen de Patagones	Azul
Bahía Blanca	Berazategui	Bragado	Berazategui	Bahía Blanca	Chascomús	Bahía Blanca
Berazategui	Bolívar	Fcio Varela	Carmen de Patagones	Berazategui	Ciudadela	Berazategui
Bolívar	Ciudadela	San Justo	Chascomús	Ciudadela	Fcio Varela	Ciudadela
Chascomús	Dolores		Ciudadela	Fcio Varela	Lomas De Zamora	Fcio Varela
Ciudadela	Fcio Varela		Fcio Varela	Lomas De Zamora	Saladillo	Lomas De Zamora
Dolores	Lomas De Zamora		Lomas De Zamora	Quilmes	San Justo	Saladillo
Fcio Varela	San Justo		Quilmes	Saladillo	San Vicente	San Justo
Lobos	San Vicente		Saladillo	San Justo	Tres Arroyos	San Vicente
Lomas De Zamora			San Justo	San Vicente		
Quilmes			San Vicente			
San Justo			Tres Arroyos			
San Vicente						

Nota: los CT resaltados en gris son aquellos que coinciden con la red actual. Fuente: Elaboración Propia