

# LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE CENTROS DE TRANSPLANTES CARDIACOS: APORTES DESDE LA INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PROCESOS

María F. Arnaudo<sup>a</sup>, Fernando P. Lago<sup>a</sup>, J. Alberto Bandoni<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales del Sur (Universidad Nacional del Sur - CONICET)

12 de Octubre 1198 - 8000 Bahía Blanca – Argentina  
{flago, marnaudo}@uns.edu.ar

<sup>b</sup>Planta Piloto de Ingeniería Química (Universidad Nacional del Sur - CONICET)  
Camino La Carrindanga km. 7 - 8000 Bahía Blanca - Argentina  
abandoni@plapiqui.edu.ar

## Resumen

El objetivo del presente trabajo es realizar una comparación de los procedimientos de procuración de órganos vigentes en Bélgica y Argentina y su impacto sobre i) los tiempos involucrados en los operativos de procuración y ii) la localización óptima de los centros de trasplante. Con este fin se adapta el modelo desarrollado por Bèlien *et al* (2013) para Bélgica al caso argentino, y se comparan los resultados de ambos modelos tomando un mismo conjunto de datos correspondientes a cuatro centros de trasplante y siete hospitales donantes de Argentina en el año 2012.

Los resultados obtenidos evidencian que las características de los procesos de procuración de órganos de cada país influyen decisivamente en la localización óptima de los centros de trasplantes.

El trabajo constituye un primer paso hacia el desarrollo de un modelo de localización susceptible de ser utilizado como herramienta para la planificación estratégica de la apertura de centros de trasplante en Argentina. Con este fin, el modelo desarrollado debe modificarse para contemplar i) la existencia de múltiples órganos, ii) la posibilidad de medios alternativos de transporte dependiendo de las distancias a recorrer y iii) la incertidumbre respecto de la demanda y oferta futura de órganos.

**Palabras clave:** modelos de localización, trasplantes de órganos, programación matemática.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los trasplantes de órganos se han convertido en un tratamiento exitoso para muchas enfermedades que de otra forma resultarían fatales. En particular, el trasplante de corazón resulta la única alternativa para pacientes con insuficiencia cardíaca o cardiopatía isquémica severa (Janon Quevedo, 2012).

El operativo de procuración es el proceso desplegado con el fin de obtener órganos y tejidos para trasplante. En Argentina, éste se inicia en la unidad de terapia intensiva de un hospital (al cual denominaremos Hospital Donante). Cuando por la gravedad de la lesión un paciente neurológico crítico fallece, en situación de muerte encefálica, se abre la posibilidad de la donación de órganos para trasplante.

Con posterioridad a la detección del posible donante, los pasos de un operativo de procuración comprenden el análisis de la viabilidad de los órganos, la identificación de los posibles receptores, la certificación de muerte, el mantenimiento cadavérico, la entrevista con los familiares del fallecido y el transporte de los órganos ablacionados a los Centros de Trasplante. Estos son entidades de salud de diferente naturaleza jurídica y de dependencia pública o privada que se encuentran habilitados para la práctica de trasplantes.

Un elemento clave del proceso de procuración está dado por el tiempo que transcurre desde la notificación de la existencia de un donante hasta el momento de la intervención de trasplante. Cuando sobreviene la muerte encefálica en un paciente, sus funciones vitales se van deteriorando en forma acelerada. Una demora en el operativo de ablación incrementa las posibilidades que el donante potencial entre en paro cardio-respiratorio, lo cual inhabilitaría el uso de los órganos procurados por la falta de oxigenación. Asimismo, el período de isquemia fría<sup>1</sup> resulta vital para el éxito del trasplante: cuanto mayor es el tiempo en que un órgano permanece fuera del cuerpo, menor será la calidad del órgano trasplantado (Cobo y del Río Gallegos, 2009).

El operativo de procuración generalmente involucra traslados entre distintas localidades, sea de personal médico, pacientes o muestras de laboratorio. Es por este motivo que uno de los factores determinantes del tiempo que insume su realización es la

---

<sup>1</sup> Período que se inicia con la ablación del órgano del cuerpo del donante y finaliza con la restauración del flujo sanguíneo una vez implantado en el receptor,

localización de los centros de trasplante en relación a los hospitales donantes y el lugar de residencia de los pacientes en lista de espera. En la medida que las distancias a recorrer sean más grandes, mayor será el tiempo requerido.

En un documento del INCUCAI<sup>2</sup> del año 2003 se reconoce como una falencia del sistema de procuración 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"<sup>3</sup>.

En un trabajo reciente, Bélien *et al* (2013) desarrollan un modelo de optimización que tiene como objetivo minimizar la suma ponderada de los tiempos relacionados con los distintos componentes del proceso de donación de órganos, a partir de la elección de la localización de los centros de trasplante, a seleccionar entre una lista de posibles ubicaciones. Su modelo está adaptado al circuito operativo de donación vigente en Bélgica, el cual presenta diferencias con el caso argentino.

El objetivo del presente trabajo es realizar una comparación de los procedimientos de procuración vigentes en Bélgica y Argentina y su impacto sobre i) los tiempos involucrados en los operativos de procuración y ii) la localización óptima de los centros de trasplante. Con este fin se adapta el modelo desarrollado por Bélien *et al* (2013) al caso argentino, y se comparan los resultados de ambos modelos tomando un mismo conjunto de datos, correspondientes a cuatro centros de trasplante y siete hospitales donantes de Argentina en el año 2012. La hipótesis del trabajo es que las diferencias en los procedimientos administrativos de procuración de órganos vigentes en los distintos países pueden afectar los tiempos involucrados en un operativo de trasplante, y por consiguiente, la localización óptima de los centros.

---

<sup>2</sup> Instituto Nacional Central Único Coordinador de Ablación e Implante.

<sup>3</sup> Ministerio de Salud de la Nación - INCUCAI (2003), p. 9.

El trabajo está estructurado en cinco secciones. En la primera sección se realiza una breve revisión de la literatura de modelos de localización óptima de los centros de salud, con especial énfasis en las aplicaciones al caso de los centros de trasplantes. En la segunda sección se describe el proceso de procuración de órganos de Bélgica y Argentina, destacando especialmente aquellas fases que involucran traslados entre distintas localidades. En la tercera sección se exponen los lineamientos generales del modelo de localización de centros de trasplante desarrollado en Bélien *et al* (2013). En la sección 4 se desarrolla el modelo matemático destinado a optimizar la localización de centros de trasplantes en Bélgica, y su adaptación al caso Argentino. En la sección 5 se comparan los resultados de ambos modelos, tomando un mismo conjunto de datos correspondientes a Argentina. Por último, se exponen las conclusiones y líneas futuras de investigación.

## **2. ANTECEDENTES EN LA LITERATURA.**

En el año 2005, en una importante iniciativa conjunta, las academias de Ingeniería y de Medicina de EEUU<sup>4</sup> 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. 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, 2013).

Los modelos de localización pretenden determinar la ubicación óptima de diversos tipos de instalaciones. En pos de lograr este objetivo, deben responder cuántas instalaciones localizar, su dimensión, dónde ubicarlas y la población objetivo a la que atenderá de manera de minimizar los costos o el tiempo de viaje (Daskin, 1995).

Los modelos de localización discreta aplicados al sector salud generalmente responden a una de las siguientes familias: modelos de cobertura, modelos de máxima

---

<sup>4</sup> Reid P. et al (2005)

cobertura y modelo P-media (Daskin y Dean, 2005). Las principales diferencias entre los mismos se encuentra en su función objetivo:

a) Los modelos de cobertura intentan estimar cuál es la cantidad de instalaciones necesarias para satisfacer una determinada demanda que minimiza los costos de operación.

b) Los modelos de máxima cobertura intentan minimizar el número total de instalaciones requeridas para satisfacer la demanda

c) Los modelos P-medios tienen como objetivo determinar la ubicación de las instalaciones de manera que la distancia entre las mismas y el nodo de demanda sea mínima y toda la demanda sea satisfecha.

Si bien existen en la literatura especializada diversos artículos que intentan modelar el sistema de trasplantes total o parcialmente, según el conocimiento de los autores, solo existen cinco trabajos (incluyendo el de Bélien *et al*, 2013) que utilizan herramientas de la ingeniería de sistemas y programación matemática.

Stahl *et al* (2005) analiza el proceso de procuración y trasplantes estadounidense de donantes vivos y constituye el primer estudio relativo a la logística de trasplante de órganos. El mismo está regionalizado y en cada región se establece un número determinado de organismos de procuración de órganos (OPOs). El objetivo del trabajo es determinar la configuración óptima de regiones de trasplante de manera de alcanzar la eficiencia y la equidad geográfica del proceso.

Por otro lado, Bruni *et al* (2006) analizan el sistema de trasplantes italiano desarrollando 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. Para esto intentan minimizar el tiempo de viaje total del proceso de procuración y trasplante a partir de implementación de un modelo P-media.

Dada la escasez de órganos provenientes de donantes cadavéricos en Estados Unidos, Kong *et al* (2010) proponen maximizar la eficiencia de cada una de las regiones de trasplantes a partir de un nuevo diseño de la asignación de órganos de donantes vivos. Para esto consideran un modelo mixto entero que establece que las regiones deben

delimitarse de manera de maximizar el flujo intraregional de órganos y considerando la probabilidad de conectar un donante con un receptor.

Por último, Çay (2012) analiza el sistema de trasplantes de Turquía teniendo en cuenta únicamente donantes vivos. 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 la localización de cada uno de estos centros, y de los hospitales donantes y receptores dentro de la región, de manera de maximizar el flujo intraregional de órganos. Para esto desarrollan un modelo de tipo MIP considerando dos medios de transporte (avión y helicóptero) y teniendo en cuenta como principal restricción el tiempo de isquemia fría.

### **3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PROCURACIÓN**

En esta sección se describe los pasos operativos del proceso de procuración de órganos vigentes en Argentina y Bélgica, culminando con una breve recapitulación de las principales diferencias entre ambos. Dado que el interés del modelo a desarrollar es la localización óptima de los centros de trasplante, en cada caso se hace particular énfasis en aquellas fases del proceso que involucran flujos de personas u objetos entre distintas localizaciones.

#### **El proceso de procuración en Bélgica.**

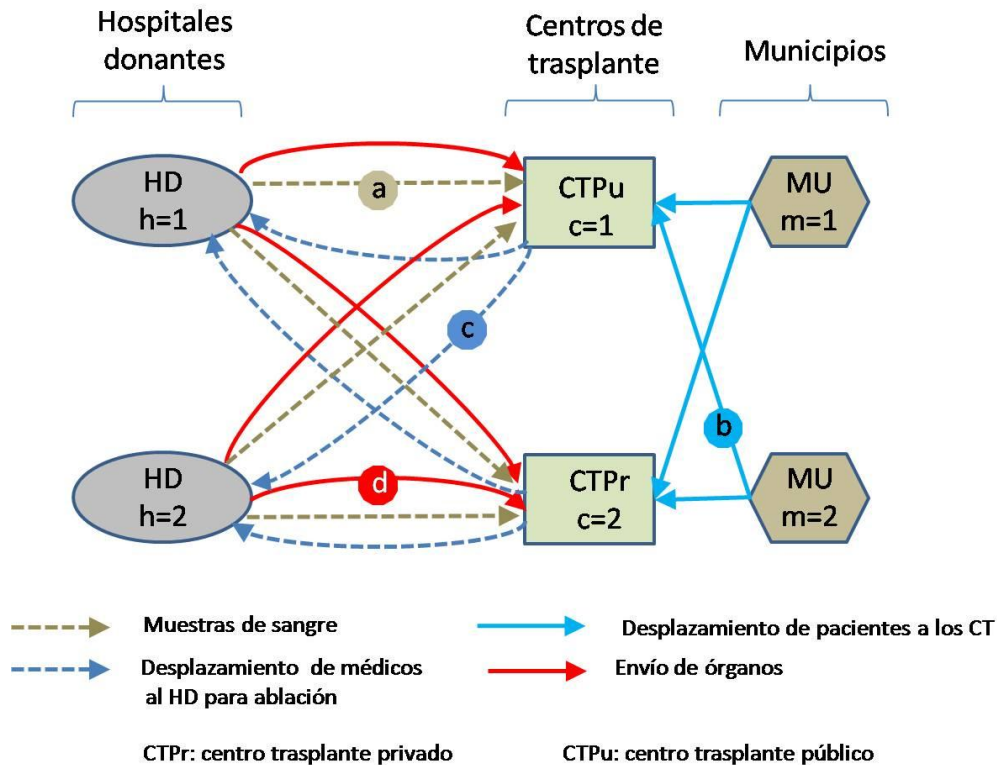
La Figura 1 (página siguiente) representa en forma esquemática el proceso de procuración de órganos en Bélgica, según Bélien *et al* (2013).

a) El Hospital donante (en adelante HD) notifica la existencia de un donante potencial al centro de trasplante (CT) más cercano, el cual pasa a servir como centro de trasplante donante (en adelante CTD) en el operativo de procuración<sup>5</sup>. El coordinador del trasplante del CTD (el médico que supervisa el operativo de ablación y transporte de los órganos) organiza la recolección de muestras de sangre del paciente donante. Las muestras de sangre se trasladan desde el HD al CTD. En función de los resultados de los

---

<sup>5</sup> El centro de trasplante donante presta servicios para facilitar la ablación e implante del órgano, como la provisión del personal médico para la supervisión del operativo y la ablación del órgano, y la realización de análisis. Su contraparte es el centro de trasplante receptor (CTR) donde se realiza la operación de implante.

análisis y del orden de prioridades establecidas en las listas de espera, se determina quienes serán los receptores de los órganos extraídos.



**Figura 1.** Proceso de procuración de órganos belga en base a Bélien, *et al* (2013)

b) Se pone en conocimiento al receptor del órgano y al centro de trasplante del receptor (en adelante CTR) donde se realizará la operación de implante. El paciente emprende su viaje al CTR.

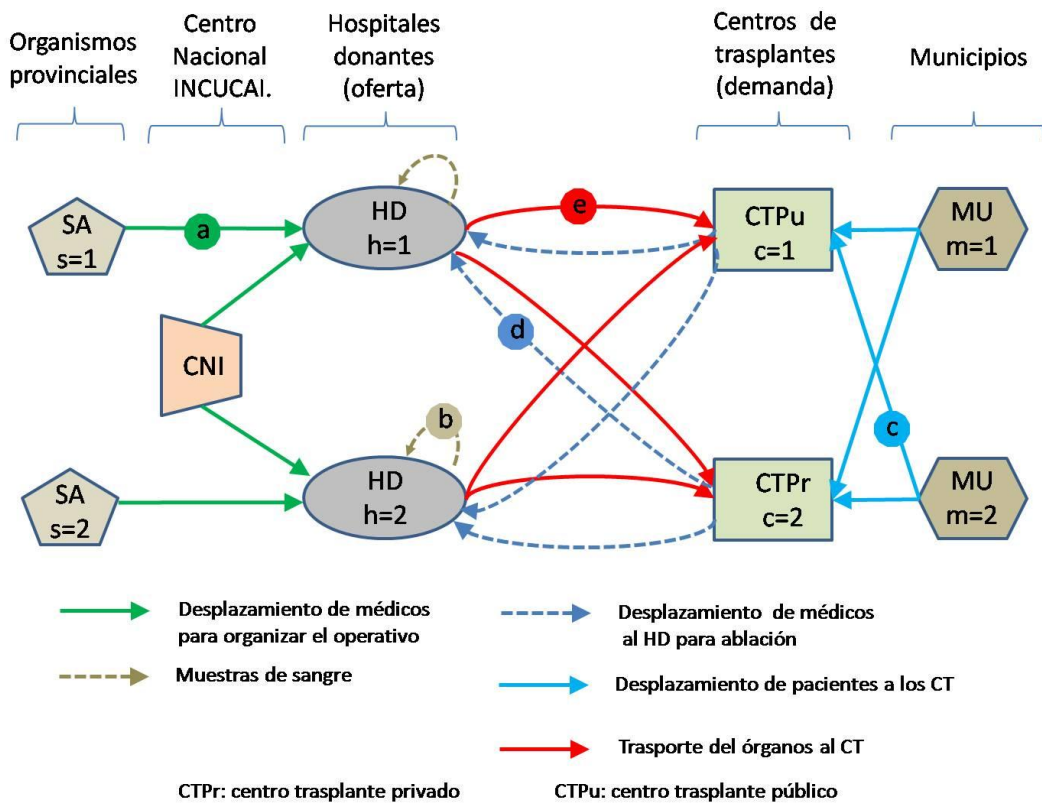
c) Al mismo tiempo que (b) el coordinador de trasplante y su equipo viajan desde el CTR al HD.

d) Se efectúa la ablación y se trasladan los órganos a los CTR, donde son implantados.

### El proceso de procuración en Argentina.

La Figura (2) representa en forma gráfica el proceso de procuración de órganos en Argentina.

a) El HD notifica la existencia de un donante potencial al Equipo de Procuración del organismo Jurisdiccional<sup>6</sup> de ablación e implante o al INCUCAI. El equipo de procuración se traslada con insumos y equipos desde la sede del organismo de procuración hasta el HD.



**Figura 2.** Proceso de procuración de órganos argentino en base a INCUCAI (2013)

b) En el mismo HD se realizan los estudios tendientes a determinar la viabilidad de los órganos y a identificar los potenciales receptores entre los inscriptos en la lista de espera, utilizando el sistema informático SINTRA del INCUCAI.

c) Certificada la muerte de donante y con la conformidad de la familia, se contacta al CTR del receptor seleccionado. Si el equipo médico acepta el órgano, el CTR donde se realizara la intervención organiza el traslado del personal encargado de la ablación hacia el HD. Al mismo tiempo, se comunica al paciente seleccionado que debe emprender viaje hacia el CTR.

<sup>6</sup>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.



d) El equipo de ablación parte desde el CTR y se traslada hacia el HD para efectuar la extracción del órgano.

e) Luego de la ablación, el equipo se dirige hacia el CTR donde se llevará a cabo el implante.

### **Diferencias en los procesos de procuración Belga y Argentino**

Las principales diferencias entre los sistemas de procuración, en lo referente a los flujos de objetos y personas son las siguientes:

a) En Bélgica el personal médico encargado de la dirección del operativo de implante es el del CTD (el centro de trasplante más cercano al HD). En Argentina dicho personal médico se localiza en la sede del organismo provincial de procuración y ablación de órganos.

b) En Bélgica el análisis de las muestras de sangre del donante se realiza en el CTD. En Argentina en el mismo HD.

c) En Bélgica los médicos encargados de la ablación del órgano provienen del CTD. En Argentina provienen del CTR donde se realizará el implante.

## **4. SUPUESTOS Y PLANTEO GENERAL DEL MODELO**

El objetivo básico del modelo desarrollado por Bélienet *al* (2013) es determinar la localización de los centros de trasplante de forma de minimizar los tiempos insumidos en el operativo de procuración. El modelo determina la localización de los centros cuando, a partir de una lista de ubicaciones posibles, determina el estado de "abierto" o "cerrado" de cada uno.

El tiempo de isquemia fría<sup>7</sup> es el máximo periodo que puede permanecer un órgano fuera del cuerpo y ser útil para un trasplante. Si se supera ese tiempo, el órgano no puede ser utilizado. El modelo analizado toma en consideración este período crítico que se inicia con la ablación de los órganos del cuerpo del donante de dos modos diferentes:

a) Introduciendo restricciones en relación al tiempo máximo que un órgano puede permanecer "en tránsito" desde su ablación hasta el centro de implante. Tales restricciones están dadas por los tiempos de isquemia fría.

---

<sup>7</sup> Se denomina isquemia al sufrimiento celular causado por la disminución transitoria o permanente del riego sanguíneo, y la consecuente disminución en el volumen de oxígeno.

b) Asignando en la función objetivo un peso menor a los tiempos del proceso de donación que transcurren con anterioridad a la ablación del órgano

Optimizar la localización de los centros de trasplantes requiere estimar los flujos i) de médicos, desde el CTD al HD (para efectuar la ablación) y desde el HD al CTR (para realizar el implante del órgano) y ii) de muestras de sangre, desde el HD al CTD. Bélien *et al* (2013) proponen un mecanismo de estimación que parte del número de trasplantes efectuados en un periodo dado en cada CT.

Todo trasplante involucra un donante (oferente de órganos) y un receptor (demandante de órganos). En el marco del modelo, la demanda agregada de órganos de un país es la suma de todas las intervenciones realizadas en los centros de trasplante en un año. Asumiendo la ausencia de donantes o receptores situados en el extranjero<sup>8</sup>, tal demanda necesariamente iguala a la oferta agregada de órganos, de los hospitales donantes.

El modelo asume que la oferta de órganos de cada HD así como la demanda de los CTR es relativamente estable en el tiempo. De otra forma, las localizaciones óptimas de los CT cambiarían de año a año.

Una vez conocidos el número de órganos ofrecidos por cada hospital donante y la demanda de los CTR, el flujo de órganos entre cada HD y cada CTR se estima aplicando la siguiente regla general: el flujo de órganos desde un HD  $h$  a un CTR  $c$  será el producto entre el total de órganos del cual dispone el HD  $h$  y el porcentaje que representa la demanda del CTR  $c$  en la demanda agregada. La Tabla 1 ejemplifica el cálculo de los flujos de órganos cuando existen 3 HD y 2 CTR abiertos, siendo la oferta y demanda agregada igual a 100 órganos y en ningún caso los tiempos de transporte entre los HD y los CTR superan los de isquemia fría.

Si el modelo decide cerrar un centro de trasplante, su demanda debe ser procesada por otro centro. El criterio básico implementado en el modelo es desplazar (reasignar) la demanda del centro cerrado al centro abierto más cercano. Siguiendo con el ejemplo de la tabla anterior, la Tabla 2 ilustra el caso en el cual se decide la no apertura del CTR 2 y su demanda de órganos es desplazada al CTR 1.

---

<sup>8</sup> El modelo de Bélien *et al* (2013) incluye la posibilidad de donantes y receptores extranjeros. La misma se elimina en esta adaptación para simplificar la implementación en GAMS del modelo.

**Tabla 1.** Cálculo de los flujos entre los HD y los CTR

Oferta de órganos	Demanda del Centro receptor 1 = 40 órganos	Demanda del Centro receptor 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 4: 10 órganos	$10 \frac{40}{100} = 4$	$10 \frac{60}{100} = 6$

Fuente: Bélien *et al* (2013)**Tabla 2.** Cálculo de los flujos entre HD y CTR cuando la demanda del CRT 2 se traslada al CTR 1

Oferta de órganos	Demanda del Centro receptor 1 = 40 + 60 órganos	Demanda del Centro receptor 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 4: 10 órganos	$10 \frac{(40 + 60)}{100} = 10$	0

Fuente: Bélien, *et al* (2013)**Tabla 3.** Cálculo de los flujos entre HD y CTR cuando el tiempo de viaje entre el HD 1 y el CTR 1 supera al de isquemia fría (se genera un flujo extra al CTR más cercano)

Oferta de órganos	Demanda del Centro receptor 1 = 40-24 =16 órganos	Demanda del Centro receptor 2 = 60+24=86 órganos
Hospital Donante 1: 60 órganos	$24-24=0$ →	$36+24=60$
Hospital Donante 2: 30 órganos	12	18
Hospital Donante 4: 10 órganos	4	6

Fuente: Bélien, *et al* (2013)

Por último, si el tiempo de transporte del órgano entre un determinado HD y un CTR supera el tiempo de isquemia fría, se exigirá al modelo que ese flujo específico de órganos sea reasignado al CTR más cercano al HD, generando un flujo extra de órganos. Estos afectan la demanda real de cada CTR. Este caso se muestra en la Tabla 3, en el cual se supone que el tiempo de transporte del HD 1 al CTR 1 supera el límite impuesto, reasignándose el flujo al CTR 2.

En el caso belga, para atender la oferta de órganos proveniente de un HD se requiere de un CTD que provea los servicios de análisis de sangre, así como el equipo médico encargado de la ablación. Para determinar el flujo (de médicos y muestras para análisis) entre un HD y un CTD se aplican las siguientes reglas: a) todos los centros de trasplante abiertos pueden actuar indistintamente como centros receptores o donantes y b) un CT siempre actuará como donante para todos los HD que no tengan otro CT más cercano.

En el caso argentino los organismos jurisdiccionales de procuración son los que cumplen las funciones del CTD. Ante cada operativo de procuración, se produce un flujo de médicos, insumos y equipos desde la sede jurisdiccional del equipo de procuración de órganos (una por provincia) hacia el HD. Sin embargo, los análisis se realizan en el mismo HD, por lo que no existen flujos de muestras de sangre.

Por último, también se produce un flujo de pacientes desde su municipio de residencia al CTR. Al respecto el supuesto del modelo es que cada centro de trasplante actuará como centro receptor para todos los pacientes que no tengan otra alternativa más cercana.

## 5. DESCRIPCION DEL MODELO

En esta sección se describe, en primer lugar, la formulación original del modelo de optimización de Bélien *et al* (2013). Tal modelo pertenece a la clase mixto entero, debido al uso de variables binarias (o dicotómicas) referidas a la apertura o cierre de cada centro de trasplante propuesto. Posteriormente se explican los cambios realizados para adaptarlo al caso argentino.

### **Formulación original:**

#### *Definición de conjuntos e índices*

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

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

$m \in M$ : municipalidades.

#### *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.

$x_{hc}^D$ : flujo de muestras de sangre y médicos desde el hospital donante  $h$  al centro de trasplante donante  $c$ .

$x_{hc}^R$ : 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.

#### *Parámetros*

$w$ : Ponderación que indica la importancia relativa en la función objetivo de los flujos durante los cuales el órgano se encuentra aun en el cuerpo del donante .

$k$ : costo operativo anual de un centro de trasplante.

$d_{rc}$ : 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 sangre desde el hospital donante  $h$  hasta el centro receptor  $c$ .

$t_{ch}^T$ : tiempo de traslado del coordinador de trasplante y su equipo desde el centro receptor  $c$  hasta el hospital donante  $h$ .

$D_c$ : Demanda de órganos del centro de trasplante  $c$ .

$S_h$ : Oferta de órganos del hospital donante  $h$ .

$B$ : Presupuesto disponible.

$I$ : Tiempo de isquemia fría del órgano.

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

*Función Objetivo*

$$\min \sum_{h \in H} \sum_{c \in C} (w(t_{hc}^T x_{hc}^D + t_{ch}^T x_{hc}^D) + t_{hc}^T x_{hc}^R) \quad (1)$$

*Restricciones*

$$\sum_{c \in C} k y_c \leq B \quad (2)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{c \in C} x_{hc}^R = \sum_{c \in C} D_c \quad (3)$$

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

$$x_{hc}^R = \left( \frac{D_c y_c + \sum_{c' \in C} d_{c'c}}{\sum_{c' \in C} D_{c'}} \right) S_h + x_{hc}^E \quad \forall h \in H, c \in C | t_{hc}^T \leq I \quad (5)$$

$$d_{c'c} \geq (y_c - y_{c'} - \sum_{r \in C | d_{rc} < d_{c'c}} y(r)) D_c \quad \forall c \in C, c' \in C \quad (6)$$

$$\sum_{c \in C} x_{hc}^D = S_h \quad \forall h \in H \quad (7)$$

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

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

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

$$x_{hc}^E \leq S_h y_c \quad \forall h \in H, c \in C \quad (11)$$

$$\sum_{c \in C | t_{mc}^M \leq T} y_c \geq 1 \quad \forall m \in M \quad (12)$$

$$y_c \in \{0,1\} \quad (13)$$

$$x_{hc}^R \geq 0; x_{hc}^E \geq 0; x_{hc}^D \geq 0; d_{c'c} \geq 0 \quad \forall h \in H, c \in C, c' \in C \quad (14)$$

La función objetivo (1) minimiza la suma ponderada de los tiempos de traslado de i) las muestras de sangre, desde el HD al CTD, ii) el coordinador de trasplante y su equipo, desde el CTD al HD y iii) los órganos, desde el HD hasta el CTR.

La restricción (2) establece que el costo operativo anual de todos los centros de trasplante abiertos no puede superar el presupuesto anual asignado.

La restricción (3) asegura que la suma de todos los flujos de órganos desde los hospitales donantes a los centros de trasplante receptores sea igual a la demanda agregada de los centros receptores (no quedan órganos sin asignar).

La restricción (4) hace 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 restricción (5) regula el flujo de órganos entre un hospital donante  $h$  y un centro de trasplante receptor  $c$  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 CTR  $c$  (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 restricción (6) 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  $\sum_{r \in C | d_{rc} < d_{r_c}} y(r) = 0$ ).

Dado que cada órgano disponible genera un flujo de médicos para realizar la ablación y de muestras de sangre entre el CTD y el HD, la restricción (7) requiere que para todo hospital donante, la suma de los flujos entre dicho hospital y los centros donantes  $c$  sea igual a la oferta de órganos en el hospital donante  $h$ . En forma análoga, dado que todo órgano disponible debe ser asignado a algún HD, la restricción (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 restricción (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; mientras que la (10) impone que solo puede existir un flujo de médicos y muestras de sangre positivo entre un hospital donante  $h$  y un centro de trasplante donante  $c$  si dicho centro está abierto.

La condición (11) asegura que solo puede existir un flujo extra positivo entre un HD y un CTR si éste último está abierto.

La condición (12) 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.

Por último la restricción (13) define a  $y_c$  como variable binaria y la (14) impide que las variables de decisión tomen valores negativos.

### **Adaptación del modelo al caso argentino**

Para adaptar el modelo al caso argentino, se realizaron las siguientes modificaciones.

*Definición de conjuntos e índices:* Se incorpora un nuevo conjunto a los existentes.

$s \in S$ : sedes administrativas de los organismos jurisdiccionales de procuración de órganos. En nuestro país existen 25, uno por cada provincia más el centro nacional, en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

*Variables de decisión:* Se altera el dominio de la variable  $x^D$

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

*Parámetros:* Se elimina el parámetro  $t_{ch}^T$  y se añaden dos nuevos parámetros.

$\alpha_{hs}^S$ : 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.

$t_{hs}^S$  Tiempo de viaje (en horas) entre el hospital donante  $h$  y el organismo jurisdiccional de ablación e implante  $s$ .

*Función Objetivo:* Se modifica la función objetivo, tal como se indica a continuación:

$$\min w[\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} (t_{hs}^S x_{hs}^D) + \sum_{h \in H} \sum_{c \in C} (t_{hc}^T x_{hc}^R)] + \sum_{h \in H} \sum_{c \in C} (t_{hc}^T x_{hc}^R) \quad (15)$$

El primer término de la función objetivo calcula los tiempos insumidos en trasladar i) al coordinador de trasplante y su equipo desde la organismo jurisdiccional de procuración hasta el hospital donante y ii) al equipo de ablación desde el CTR hasta el HD. Dado que ambos traslados ocurren cuando el órgano aun se encuentra dentro del cuerpo, se pondera el tiempo por el parámetro  $w$ . El segundo término calcula el tiempo requerido para trasladar los órganos desde los HD hasta los CTR.

*Restricciones:* Se eliminan las restricciones (7) y (10). Esta última es reemplazada por la ecuación (16), la cual calcula el flujo de médicos entre los organismos jurisdiccionales de procuración y trasplante y los HD .



$$x_{hs}^D = a_{hs}^S S_h \forall h \in H, s \in S \quad (16)$$

## 6. COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS.

En esta sección se comparan los resultados de las dos variantes del modelo bajo distintos escenarios, tomando un mismo conjunto de datos correspondientes a la procuración de corazones para trasplante en Argentina del año 2012. Los datos utilizados son parciales, dado que no se incluyen la totalidad de los CT de corazón ni de los HD.

### Datos

Se incluyen 4 centros de de trasplante cardíacos, los cuales se encuentran ubicados en CABA<sup>9</sup>, Córdoba, Mendoza y Bahía Blanca.

Los hospitales donantes considerados son 7, y están localizados en las localidades de Rio Grande (Tierra del Fuego), San Juan, Formosa, CABA, San Luis, Santa Fe y Mendoza.

Los municipios de residencia de los receptores de órganos son 11: Rio Grande, San Juan, Formosa, CABA, San Luis, Santa Fe, Mendoza, Santa Rosa, Catamarca, Posadas y Comodoro Rivadavia.

La oferta y demanda anual de corazones por institución se exhibe en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Corazones: oferta por HD y demanda por CT. Año 2012.

Oferta anual de órganos del hospital donante		Demanda anual de órganos de los centro de trasplante	
Rio Grande	2	CABA	26
Formosa	4	Córdoba	5
San Luis	4	Mendoza	17
Mendoza	11	Bahía Blanca	3
San Juan	4		
CABA	18		
Santa Fe	8		

**Fuente:** elaboración propia sobre la base de datos del INCUCAI.

En Argentina, las sedes administrativas jurisdiccionales de ablación e implante se encuentran emplazadas en las capitales de provincia, por lo que con la única excepción

<sup>9</sup> Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

de Rio Grande (que responde al organismo jurisdiccional situado en Ushuaia, a 15 minutos en avión) los hospitales donantes incluidos en este estudio se sitúan en la misma localidad que las sedes jurisdiccionales.

La Tabla 5 indica el tiempo de viaje entre cada municipio y los centros de trasplante, la Tabla 6 indica los tiempos de viaje entre los centros de trasplante y los hospitales donantes y la Tabla 7 expone los tiempos de viaje entre cada CT.

**Tabla 5.** Tiempo de viaje (en horas) entre los municipios y los CT

Municipio	Centro de Trasplante			
	CABA	Córdoba	Mendoza	Bahía Blanca
Rio Grande	3.9	4.4	4.1	3
San Juan	1.8	0.7	0.3	1.7
Formosa	1.6	1.4	2.2	2.5
CABA	0	1.1	1.7	1
San Luis	1.3	0.5	0.4	1.2
Santa Fe	0.7	0.6	1.4	1.4
Mendoza	1.7	0.8	0	1.5
Santa Rosa	1.01	1.02	1.02	0.51
Catamarca	1.73	0.62	1	2
Posadas	1.46	1.6	2.42	2.43
Comodoro Rivadavia	2.56	2.85	2.52	1.58

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 6.** Tiempo de viaje (en horas) entre los CT y los HD

Centros de trasplante	Hospitales donantes						
	Rio Grande	San Juan	Formosa	CABA	San Luis	Santa Fe	Mendoza
CABA	3.9	1.8	1.6	0	1.3	0.7	1.7
Córdoba	4.4	0.7	1.4	1.1	0.5	0.6	0.8
Mendoza	4.1	0.3	2.2	1.7	0.4	1.4	0
Bahía Blanca	3	1.7	2.5	1	1.2	1.4	1.5

Fuente: elaboración propia.

El tiempo de isquemia fría para el trasplante de corazones de 4 horas y el tiempo máximo de viaje desde un municipio hasta un CT se fijó en 5 horas. Asimismo, la ponderación del tiempo del proceso en el cual el órgano todavía se encuentra dentro del cuerpo del donante es de 0.8.

**Tabla 7.** Tiempo de viaje (en horas) entre los CT

Centros de trasplante	CABA	Córdoba	Mendoza	Bahía Blanca
<b>CABA</b>	0	1.1	1.7	1
<b>Córdoba</b>	1.1	0	0.8	1.45
<b>Mendoza</b>	1.7	0.8	0	1.5
<b>Bahía Blanca</b>	1	1.45	1.5	0

Fuente: elaboración propia.

Por último, se supuso que inicialmente el costo operativo de un centro de trasplante es de tres unidades monetarias (u.m.) y la restricción presupuestaria de doce u.m.

### Escenarios

Se analiza el impacto sobre los resultados de los modelos que resultan de alterar los siguientes parámetros: a) La ponderación en la función objetivo del tiempo que permanece el órgano dentro del cuerpo del donante, b) El presupuesto anual disponible para los centros de trasplante y c) El tiempo de isquemia fría de cada órgano.

Los valores de los parámetros mencionados en cada escenario analizado se indican en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Escenarios analizados

Escenario	$w$	$B$	$I$
<b>base</b>	0,8	12	4
<b>1</b>	0,2	12	4
<b>2</b>	0,8	9	4
<b>3</b>	0,8	12	3

Fuente: elaboración propia.

### Resultados

Los modelos MILP fueron resueltos en GAMS (GAMS 2013) utilizando el solver CPLEX 12.5.0.0, en una PC con procesador de 2,7 GHz y 8 GB de memoria RAM. En todos los casos los tiempos de computo fueron insignificantes (0 seg.).

La Tabla 9 resume los resultados de ambos modelos, en cada uno de los escenarios planteados.

**Tabla 9.** Resultados: valor de la función objetivo y CT abiertos en distintos escenarios.

Escenario	Valor de la función objetivo		Centros de trasplante abiertos	
	Caso Belga	Caso Argentino	Caso Belga	Caso Argentino
<b>Base</b>	85,66	91,94	CABA, Mendoza, Bahía Blanca, Córdoba	CABA
<b>1</b>	62,62	61,16	CABA, Mendoza, Bahía Blanca, Córdoba	CABA
<b>2</b>	88	91,94	CABA, Córdoba, Mendoza	CABA
<b>3</b>	87,74	99,26	CABA, Mendoza, Bahía Blanca, Córdoba	CABA, Mendoza, Bahía Blanca

**Fuente:** elaboración propia.

Tal como se observa en la Tabla 9, con los datos utilizados el modelo Belga de procuración arroja resultados levemente mejores en lo que respecta a los valores de la función objetivo en todos los casos analizados con la única excepción del escenario 1.

Al analizar los CT abiertos en cada caso, surgen claras diferencias. Con la única excepción del escenario 2 (donde la restricción presupuestaria lo impide), el modelo Belga abre todos los centros de trasplante. En el caso Argentino, en tres de los cuatro escenarios analizados sólo se abre el CT situado en CABA. La excepción es el escenario 3, donde por el valor ingresado en el tiempo de isquemia (3 hs) los órganos provenientes de Rio Grande no pueden ser enviados a la Ciudad de Buenos Aires.

## 7. CONCLUSIONES

Si bien los modelos de localización óptima de centros de salud no representan una novedad, su aplicación al caso de centros especializados en trasplantes es relativamente incipiente.

En particular, en este trabajo se realiza un ejercicio de comparación entre los sistemas belga y argentino de procuración y trasplantes a partir de i) la adaptación del modelo desarrollado por, et al (2013) para el caso Belga al procedimiento argentino, ii) la implementación en GAMS del modelo original y su adaptación, considerando un mismo

conjunto de datos correspondientes a una muestra de centros de trasplante cardiacos y hospitales donantes de Argentina, en el año 2012.

Los resultados de los experimentos ponen en evidencia que la localización óptima de los CT se ve decisivamente afectada por las características específicas de los procesos de procuración de órganos de cada país. Asimismo, el modelo Belga es el que registra mejor desempeño en términos de los tiempos insumidos en el proceso en tres de los cuatro escenarios analizados, aunque por un margen pequeño.

El presente trabajo debe considerarse como un primer paso hacia un objetivo más ambicioso, como es el desarrollo de un modelo de localización susceptible de ser utilizado como herramienta para la planificación estratégica de la apertura de centros de trasplante en Argentina. Con este objetivo en mente, existen diversos aspectos del trabajo que deberían ser mejorados.

En primer lugar, debería realizarse una investigación más exhaustiva de las normativas que regulan la procuración de órganos en nuestro país, de manera de mejorar la comprensión y modelización de la logística involucrada en un operativo de trasplante.

En segundo lugar, la base de datos utilizada por el modelo debe ampliarse para incluir la totalidad de las localidades, centros de trasplante y hospitales donantes del país.

Por último, sería necesario modificar el modelo para considerar las siguientes situaciones:

a) La existencia de múltiples órganos: en el modelo se asume implícitamente que existe un único órgano ofrecido y demandado. En realidad, cada donante puede ofrecer distintos órganos y tejidos, los cuales pueden ser implantados en múltiples receptores, situados en distintos centros de trasplante.

b) La posibilidad de utilizar medios alternativos de transporte en los traslados, dependiendo de las distancias a recorrer.

c) La presencia de incertidumbre respecto de la demanda y oferta futura de órganos: el modelo de Bélien 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 al caso argentino, donde la cantidad de donantes (y por lo tanto de trasplantes) registra un aumento sostenido en los últimos años.

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

## REFERENCIAS

- Berg, B. (2013). Location Models in Healthcare. En Handbook of Healthcare Operations Management. Springer, New York.
- 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.
- Bruni, M. E., 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, BilkentUniversit. Dsponible en <http://www.thesis.bilkent.edu.tr/0006059.pdf>. Fecha de consulta: 20/09/2013.
- Cobo, J, y del Río Gallegos, F. (2009). Preservación de órganos. *Medicina intensiva*, 33(6)282-292.
- Daskin, M. (1995). Network and Discrete Location: models, algorithms and applications. Wiley, New York.
- Daskin, M., y Dean, L. (2005). Location of health care facilities. Operations research in healthcare: a handbook of methods and applications. Kluwer Academic Publisher, New York.
- GAMS (2013). General Algebraic Modeling System. Distribution 24.0.2. A User's Guide. GAMS Development Corporation.
- Ministerio de Salud de la Nación - INCUCAI (2003). Programa Federal de Procuración de Órganos y Tejidos. Julio. Disponible en: [www.incucai.gov.ar/docs/otros\\_documentos/programa\\_federal.pdf](http://www.incucai.gov.ar/docs/otros_documentos/programa_federal.pdf)
- 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.
- 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. 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.