

---

# MODELOS DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA ASIGNACIÓN DE PABELLONES QUIRÚRGICOS EN HOSPITALES PÚBLICOS

---

PATRCIO WOLFF<sup>\*</sup>  
GUILLERMO DURÁN<sup>\*\*</sup>  
PABLO REY<sup>\*\*\*</sup>

## Resumen

Actualmente, el sistema de salud chileno no responde satisfactoriamente la demanda de atenciones quirúrgicas electivas. Esto origina largos tiempos de espera para los pacientes. La programación de intervenciones quirúrgicas en un centro médico impacta directamente sobre el número de pacientes tratados. En este contexto, la programación de pabellones debe contemplar, aparte del problema de agendamiento, la determinación del grupo de pacientes que debe ser intervenido en función de sus prioridades relativas. En este trabajo se desarrollaron y compararon cuatro modelos de optimización que permiten la programación de pabellones durante intervalos de tiempo específicos, respetando las prioridades de los pacientes. Los modelos desarrollados se estudiaron bajo distintos escenarios, basados en información real de hospitales públicos. Las pruebas realizadas muestran que la elección del modelo depende de las características de los escenarios. En escenarios reales, es posible obtener mejoras de entre un 10% y un 15% del tiempo total de utilización comparado con los métodos manuales utilizados actualmente.

**PALABRAS CLAVE:** Pabellones Quirúrgicos, Programación Entera, Backtracking.

---

<sup>\*</sup>Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

<sup>\*\*</sup>Instituto de Cálculo y Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina. CONICET, Argentina. Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

<sup>\*\*\*</sup>Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Diego Portales, Santiago, Chile.

---

## 1. Introducción

---

El pabellón quirúrgico es un recinto especialmente diseñado y equipado para realizar actividades anestésicas o quirúrgicas. La programación de las actividades quirúrgicas en un centro médico es un proceso muy complejo [13]. La programación de las actividades y la disponibilidad de recursos impactan directamente en el número de pacientes tratados, los tiempos de espera y el nivel de rendimiento del sistema [11]. Como el sistema de salud pública chileno no es capaz de responder a la demanda total de atenciones quirúrgicas electivas (intervenciones no urgentes), existen listas de espera de pacientes. Determinar qué grupo de pacientes debe ser intervenido depende de la disponibilidad de recursos, de los tiempos de espera y de criterios biomédicos. Las complicaciones de la asignación surgen del gran número de consideraciones que se deben tener cuando se realiza la programación [2, 7]. Algunas de las variables involucradas son: la gran variedad de operaciones quirúrgicas, los tiempos de operación, las prioridades relativas de los pacientes, la capacidad del centro médico, la permanencia de los pacientes en hospitalización, los horarios médicos y la edad de los pacientes [5].

En la literatura, es posible encontrar un gran número de desarrollos que presentan modelos de gestión de pabellones y optimización de recursos de pabellón [3, 16]. Estos se refieren principalmente a la forma en la cual se asignan los recursos del hospital. La asignación de recursos puede ser realizada en diferentes niveles de decisión. En algunos estudios [2, 12] se toma la decisión sobre la intervención asociada a cada paciente y se asigna fecha, hora y pabellón. Estos estudios asumen una asignación histórica de especialidades a bloques horarios y pabellones.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar y proponer modelos que permitan programar pabellones quirúrgicos en un hospital público. Esta programación debe contemplar una serie de consideraciones relativas a los pacientes que esperan ser atendidos y a las características propias del hospital. A esta programación se le denomina tabla quirúrgica y contiene la planificación de los recursos y el orden de intervención de los pacientes en un tiempo determinado.

Mediante los modelos presentados se pretende obtener una optimización en el uso del recurso pabellón, pero respetando las prioridades relativas de los pacientes que son seleccionados para ser atendidos. Por otro lado, la utilización de una sistematización asociada a la priorización y calendarización de intervenciones quirúrgicas presenta una oportunidad para lograr una mayor

transparencia y mejorar la equidad en la asignación de los recursos [13].

### 1.1. Consideraciones Particulares del Problema

Los hospitales en Chile pertenecen a diferentes servicios de salud que componen la red asistencial pública. Los hospitales se clasifican en base a las complejidades de las atenciones que realizan. Los hospitales de alta y mediana complejidad poseen pabellones quirúrgicos que atienden cirugías de urgencia y electivas. En general, los hospitales están divididos por especialidades médicas, que realizan sus intervenciones en los pabellones de cirugía electiva y en horarios previamente establecidos para ellas. Esta asignación está basada en factores históricos y en la disponibilidad de personal. En los hospitales estudiados un pabellón disponible para una especialidad contempla: el espacio físico, los insumos, los anestesistas, el equipamiento y el equipo médico (enfermera arsenalera y pabellonera). La programación por especialidad debe especificar: los pacientes que deben ser atendidos en los bloques horarios asignados, el orden de intervención, los médicos cirujanos y el pabellón (en caso de existir más de uno disponible simultáneamente). A continuación se presentan las consideraciones del problema que fueron contempladas en este trabajo:

1. Un paciente no puede ser operado dos veces en un mismo periodo de programación. Ésta es una limitación del modelo, pero que es consistente con lo que ocurre en los hospitales estudiados.
2. Los pacientes pueden no estar disponibles para ser operados en algún día específico. Es decir, los pacientes no necesariamente pueden ser operados cuando las condiciones por parte del hospital están dadas.
3. Se cuenta con una lista priorizada de pacientes/diagnósticos que serán operados por especialidad. Esta prioridad está definida como se describe en la sección 1.2.
4. Se respeta una prioridad relativa de los pacientes que considera factores médicos y de tiempo de espera. Sin embargo, podrían no incluirse en la programación pacientes que debido a sus características, no puedan ser asignados en el período de programación.
5. El período de programación considerado es de una semana laboral (cinco días hábiles)
6. Los pacientes con prioridad más alta se asignan preferentemente al principio del período de programación.

7. Se consideran pacientes “especiales”. Esta condición es determinada en caso que el paciente tenga otra complicación (ej.: alergia al látex, menor de un año) que requiera que sólo se pueda programar su intervención quirúrgica a primera hora del día.
8. El Hospital cuenta con información detallada de la disponibilidad horaria de su personal.
9. Se debe intentar repartir de forma equitativa la carga de trabajo de los médicos cada semana. Esta repartición se debe hacer proporcional a un porcentaje de horas definidas por el hospital.
10. Los médicos son especialistas en operar algunas intervenciones.
11. Los horarios de atención son de lunes a viernes de 8:00 a 13:00 hrs. en la jornada de la mañana y de 14:00 a 17:00 hrs. en la jornada de la tarde.
12. Cada especialidad médica administra sus pacientes de manera independiente, por lo que existen tantas listas de espera como número de especialidades.
13. En una misma jornada, cada especialidad médica, tiene asignado uno, más de uno o ningún pabellón para programar sus intervenciones.
14. La programación de los pabellones es generada por especialidad, utilizando los pabellones y jornadas previamente asignados para ésta.
15. En los hospitales estudiados, ninguna especialidad tuvo, en el intervalo de estudio, más de dos pabellones asignados simultáneamente.
16. Los pabellones quirúrgicos son diferentes entre sí y están especializados en algunas clases de intervenciones.
17. Las intervenciones quirúrgicas requieren de dos médicos. En el caso de ser especificado un médico para un paciente, se deben buscar turnos en los cuales el médico especificado está acompañado por un segundo médico.
18. Se permiten sobrepasos (tiempo extra de la jornada regular) en los horarios determinados por el hospital, para la programación de pabellones quirúrgicos. Estos sobrepasos permiten mejorar la eficiencia, pero requieren de un compromiso por parte del hospital que garantice cubrir los costos extras de esta consideración.

## 1.2. Priorización de Pacientes

La priorización de pacientes en lista de espera quirúrgica electiva ha sido ampliamente estudiada [4, 6, 8, 9, 10, 14, 15]. En [10] se destaca la importancia de la priorización basándose en los efectos de ésta en la disminución de las consecuencias de una espera muy prolongada en determinadas cirugías.

En [4] se considera la prioridad de los pacientes en una asignación centrada en la comparativa de los costos de postergar una intervención en función de los costos de realizarla. Desde el punto de vista de la programación de pabellones es fundamental contar con una lógica de priorización que permita obtener la posición relativa de pacientes en la lista de espera y que se adecue al sistema de salud chileno y a la información del paciente que este maneja. Este trabajo utiliza lo presentado en [14], donde se muestra la ventaja de utilizar el cálculo del NAWD (*Need Adjusted Waiting Day*) o Tiempo de espera necesario ajustado. Para realizar esta priorización de pacientes, se debe contar con la categoría biomédica de cada paciente (que se determina en base al tiempo de espera máximo determinado para cada intervención). Por otro lado, es importante saber la cantidad de días de espera desde el diagnóstico de la cirugía hasta el momento de la programación. Para poder priorizar los pacientes se calcula para cada uno el NAWD, determinado por la siguiente fórmula:

$$NAWD_i = Pond_i \cdot te_i, Pond_i \in \{1, 2, 4, 12, 48\} \quad (1)$$

donde  $te_i$  representa el tiempo de espera del paciente  $i$  en días y  $Pond_i$  representa un factor relacionado con la categoría del paciente. Mientras más urgente el diagnóstico del paciente, mayor debería ser el  $Pond_i$ . Una vez que se calculan los  $NAWD$  para cada paciente se pueden ordenar y este orden decreciente por  $NAWD$  es el considerado como la lista priorizada.

---

## 2. Métodos Desarrollados

---

Una consideración importante de los métodos desarrollados es que el problema principal se dividió en 3 subproblemas. El primero, pretende solucionar qué día se opera cada paciente. El segundo subproblema, corresponde a asignar los médicos a las intervenciones de manera más equitativa. El tercer problema, soluciona en qué orden se debe operar dentro del día, dado los pacientes que fueron asignados para cada día.

La división del primer subproblema con el segundo se basa en el hecho que la repartición de la carga de médicos es un objetivo secundario en el problema de programación de pabellones de los hospitales estudiados. La idea es no

considerar a priori el objetivo de la repartición de la carga de médicos en la asignación y una vez que se encuentre la solución óptima para el primer subproblema, tratar de mejorar el resultado del segundo subproblema con un algoritmo que ayude a mejorar la asignación, respetando todas las restricciones consideradas a priori.

La repartición de carga de médicos (que determina qué equipo médico que opera en cada intervención) se realiza en función de un porcentaje definido por el hospital. En algunos casos, este porcentaje depende de la cantidad de horas contratadas de cada médico.

La solución del primer subproblema sólo busca alternativas factibles en lo que se refiere a la carga de los médicos. Este subproblema permite repartir de una manera más equitativa la carga entre médicos que poseen distintos niveles esperados de ocupación. Este subproblema persigue un objetivo, que desde el punto de vista médico, es menos importante que los objetivos que persiguen los otros subproblemas. En este sentido, se puede utilizar un algoritmo que mejore la solución, pero no necesariamente busque la solución óptima.

La separación del tercer subproblema se plantea debido a que el orden no altera la utilización del pabellón al momento de asignar los pacientes. La repartición óptima de médicos que determina qué médico opera en cada intervención y el ordenamiento de los pacientes al interior de cada jornada no será abordada en esta investigación, ya que no corresponden a un problema significativo desde el punto de vista de su complejidad.

Esta consideración se plantea debido principalmente a que el orden de los pacientes dentro del día no altera la utilización del pabellón. La determinación del orden (que determina la hora específica de intervención) se realizará luego que cada paciente es asignado a una jornada. En este caso se ordenan los distintos pacientes en la misma jornada considerando:

- Si existe paciente especial, éste se ubica a primera hora.
- Luego, se ordenan los pacientes por edad.

Este ordenamiento no requiere de un modelo de optimización matemático debido a las características de las restricciones asociadas a este subproblema.

Los métodos desarrollados y que fueron comparados, determinan a qué pacientes de una lista priorizada y en qué momento se debe operar para mejorar la utilización de los pabellones del hospital. Se plantearon para la resolución del primer subproblema un modelo de programación lineal entera, el que contempla una variante, un algoritmo basado en un modelo de factibilidad y un algoritmo de tipo Backtracking. En las siguientes secciones se describen dichos modelos.

## 2.1. Modelo de Programación Lineal Entera

Se presentan a continuación los índices, parámetros, variables, restricciones y función objetivo del modelo de programación lineal entera.

### 2.1.1. Índices y Parámetros

A continuación se muestran las definiciones de los índices que son utilizados para el modelo:

- *doc1*: médicos principales
- *doc2*: médicos secundarios
- *i*: día
- *p*: Paciente
- *pab*: Pabellones
- *OP*: Operación

Los parámetros de entrada del modelo de programación lineal entera son los que se muestran a continuación:

- *Dur<sub>i</sub>*: Duración del día *i* expresado en minutos
- *ST<sub>i</sub>*: Sobrepaso horario máximo del día *i* expresado en minutos
- *Ope<sub>p</sub>*: Intervención quirúrgica que se debe realizar al paciente *p*
- *Dura<sub>p</sub>*: Duración de la intervención que se le debe realizar al paciente *p*  
Esta duración considera el tiempo quirúrgico y los tiempos de preparación y limpieza.
- *Pri<sub>p</sub>*: Prioridad del Paciente *p*

La regla lexicográfica: “Es mejor operar a un paciente prioritario, que todo el resto de pacientes menos prioritarios que éste” permite establecer los valores de *Pri<sub>p</sub>*. Si se utilizan valores enteros, no es difícil notar que aparecen términos que crecen de manera exponencial a medida que aumenta la prioridad. Es decir, si *N* es el número de pacientes, para el paciente *j* de la lista priorizada de pacientes se tiene:

$$Pri_j = 2^{N-j} \quad (2)$$

- $MN_i = \begin{cases} 1, & \text{si el día } i \text{ se puede asignar un paciente especial} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

- $ESP_p = \begin{cases} 1, & \text{si el paciente } p \text{ es especial} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

- $Coin_{doc1,doc2} = \begin{cases} 1, & \text{si } doc1 = doc2 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

- $f1_p^{doc1} = \begin{cases} 1, & \text{si el médico } doc1 \text{ puede realizar la intervención} \\ & \text{del paciente } p \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

- En los hospitales estudiados, no todos los pabellones eran iguales entre ellos. Existían algunos con algunas características especiales que permitían poder realizar determinados tipos de intervenciones.

$$f_p^{pab} = \begin{cases} 1, & \text{si en el pabellón } pab \text{ se puede realizar la intervención} \\ & \text{del paciente } p \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

- $DOCT_p^{doc1} = \begin{cases} 1, & \text{si el médico } doc1 \text{ debe realizar la intervención} \\ & \text{del paciente } p \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

- $Asig_p^{doc1} = \begin{cases} 1, & \text{si el paciente } p \text{ tiene el médico asignado} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

- $d1_i^{doc1} = \begin{cases} 1, & \text{si el médico } doc1 \text{ trabaja el día } i \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

- $d2_i^{doc2} = \begin{cases} 1, & \text{si el médico } doc2 \text{ trabaja el día } i \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

- $cor_i^{pab} = \begin{cases} 1, & \text{si el pabellón } pab \text{ corresponde al día } i \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

- $disp_i^p = \begin{cases} 1, & \text{si el paciente } p \text{ está disponible el día } i \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

### 2.1.2. Variables

La variable de decisión del modelo es la siguiente:

$$t_i^{p,doc1,doc2,pab} = \begin{cases} 1, & \text{si el paciente } p \text{ se atiende con los médicos } doc1 \text{ y } doc2 \\ & \text{en el pabellón } pab \text{ el día } i \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

La variable que indica si un sobrepaso horario es o no utilizado:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{si se utiliza el sobrepaso horario el día } i \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

### 2.1.3. Restricciones

A continuación se presentan las restricciones del modelo de programación lineal entera:

1. No se pueden programar intervenciones en pabellones y días en los que no es factible realizar intervenciones. El número  $M_1$  debe ser mayor o igual que el máximo de intervenciones que es factible realizar en una jornada de trabajo.

$$\sum_{p,doc1,doc2} t_i^{p,doc1,doc2,pab} \leq M_1 \cdot cor_i^{pab}, \forall pab, i \quad (3)$$

2. No se pueden programar intervenciones cuando no hay médicos que puedan realizar dichas intervenciones. El número  $M_2$  debe ser mayor que el máximo de intervenciones que puede realizar un médico en una jornada de trabajo.

$$\sum_{p,doc2,pab} t_i^{p,doc1,doc2,pab} \leq M_2 \cdot d1_i^{doc1}, \forall doc1, i \quad (4)$$

$$\sum_{p,doc1,pab} t_i^{p,doc1,doc2,pab} \leq M_2 \cdot d2_i^{doc2}, \forall doc2, i \quad (5)$$

3. Se debe evitar que el mismo médico sea asignado como médico principal y secundario en la misma intervención.

$$\sum_{pab,i} Coin_{doc1,doc2} \cdot t_i^{p,doc1,doc2,pab} \leq 0, \forall p, doc1, doc2 \quad (6)$$

4. Se debe evitar que se programen intervenciones cuando los pacientes no están disponibles.

$$\sum_{doc1, doc2, pab} t_i^{p, doc1, doc2, pab} \leq disp_i^p, \forall i, p \quad (7)$$

5. Cada paciente no puede ser operado más de una vez en el horizonte de tiempo considerado.

$$\sum_{i, doc1, doc2, pab} t_i^{p, doc1, doc2, pab} \leq 1, \forall p \quad (8)$$

6. Si existe médico asignado, sólo él debe realizar la intervención. Si no existe, entonces el médico debe saber realizar la intervención. Aquí,  $Asig_p$  es el parámetro que indica si el paciente tiene asignado o no al médico primario que debe realizar la intervención.

$$\sum_{i, doc2, pab} t_i^{p, doc1, doc2, pab} \leq Asig_p \cdot DOCT_p^{doc1} + (1 - Asig_p) \cdot f1_p^{doc1}, \forall p, doc1 \quad (9)$$

7. La siguiente restricción apunta a que no se programen intervenciones en pabellones en los cuales por las características de los mismos no se puedan realizar las intervenciones específicas de los pacientes.

$$\sum_{i, doc1, doc2} t_i^{p, doc1, doc2, pab} \leq f_p^{pab}, \forall p, pab \quad (10)$$

8. Las siguientes restricciones indican que la programación en cada jornada no debe exceder el tiempo máximo, más un sobrepaso horario permitido,  $ST_i$  y en dicho caso, la variable  $x_i$  tomará el valor 1.

$$\sum_{p, doc1, doc2, pab} Dura_p \cdot t_i^{p, doc1, doc2, pab} \leq Dur_i + ST_i \cdot x_i, \forall i \quad (11)$$

$$\sum_{p, doc1, doc2, pab} Dura_p \cdot t_i^{p, doc1, doc2, pab} \geq Dur_i \cdot x_i, \forall i \quad (12)$$

9. Los pacientes considerados especiales deben ser programados únicamente a primera hora de la mañana. Esta condición hace que sea imposible programar más de un paciente especial en la mañana. El parámetro  $MN_i$  indica si la jornada es de mañana o no y como su valor es 0 ó 1 a lo más se podrá programar sólo un paciente especial (en cuyo caso  $ESP_p$  será 1).

$$\sum_{p, doc1, doc2, pab} ESP_p \cdot t_i^{p, doc1, doc2, pab} \leq MN_i, \forall i \quad (13)$$

10. Naturaleza de las variables.

$$x_i \in \{0, 1\} \forall i$$

$$t_i^{p, doc1, doc2, pab} \in \{0, 1\} \forall p, doc1, doc2, pab, i$$

#### 2.1.4. Función Objetivo

La función objetivo del modelo de programación lineal entera considera 3 criterios diferentes. A continuación se presentan los mismos:

1. **Respeto de la Prioridad:** En la investigación previa al desarrollo de los modelos se intentó llegar a un acuerdo con los médicos sobre los criterios de asignación. De esta investigación aparece la siguiente regla lexicográfica: "Es mejor operar a un paciente urgente, que todo el resto de pacientes menos prioritarios que éste". Esta regla entrega una aproximación a lo deseado por los médicos, en lo que refiere a la asignación de pabellones. La prioridad es incorporada entonces a la decisión de la siguiente forma:

$$\lambda_F \cdot \sum_{i, p, doc1, doc2, pab} Pri_p \cdot t_i^{p, doc1, doc2, pab} \quad (14)$$

donde  $Pri_p$  es un valor que es mayor para los pacientes con prioridades más altas. Esta forma de modelar la prioridad respeta la regla lexicográfica definida por el personal del hospital. Es fácil ver que este valor crece exponencialmente con el número de pacientes si se respeta estrictamente esta consideración.  $\lambda_F$  es un ponderador que permite establecer el peso de este criterio en la función objetivo.

2. **Penalización por Sobrepasos Horarios:** El término  $x_i$  toma el valor 1 si utiliza el sobrepaso horario de la jornada  $i$ . Este término permite incorporar a la función objetivo una penalización por el uso de los sobrepasos horarios en conjunto con un parámetro  $\lambda_H$  (constante para todos los días), que permite modelar el peso relativo de este criterio en la función objetivo. Es decir que en la función objetivo aparece:

$$\lambda_H \cdot \sum_i x_i \tag{15}$$

3. **Pacientes más Urgentes al Principio de la Semana:** La idea detrás de este término es entregar una bonificación por operar primero en el intervalo de programación a un paciente más prioritario. Es decir, en la función objetivo aparece un término como el que se muestra a continuación:

$$\lambda_S \cdot \sum_{i,p,doc1,doc2,pab} \delta_i^p \cdot t_i^{p,doc1,doc2,pab} \tag{16}$$

donde  $\lambda_S$  permite modelar el peso relativo de este criterio en la función objetivo. El valor de  $\delta_i^p$  se determina de la siguiente manera:

$$\delta_i^p = M - (p - 1) - (i - 1) \tag{17}$$

donde  $M$  debe ser mayor que el máximo número de pacientes más el número de jornadas (recordar que los pacientes están ordenados por prioridad decreciente).

Con ésto, la función objetivo del modelo queda de la forma que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{máx} \quad & \lambda_F \cdot \sum_{i,p,doc1,doc2,pab} Pr i_p \cdot t_i^{p,doc1,doc2,pab} - \lambda_H \cdot \sum_i x_i \\ & + \lambda_S \cdot \sum_{i,p,doc1,doc2,pab} \delta_i^p \cdot t_i^{p,doc1,doc2,pab} \end{aligned} \tag{18}$$

En esta fórmula aparece  $\lambda_F$ , este valor por simplicidad del modelo puede ser considerado para todos los casos como 1. En este modelo se utilizaron

valores de  $\lambda_H$  y  $\lambda_S$  elegidos luego de realizar algunas pruebas. Estos valores se eligieron independientes del número de pacientes y sólo dependiente del valor del  $Pri_p$  del paciente más prioritario. Se probaron diferentes valores para  $\lambda_H$  y  $\lambda_S$ , encontrando que los valores que mejor representan la relación entre los criterios son los que se presentan a continuación:

$$\lambda_H = Pri_{\lfloor N/2 \rfloor} \text{ y } \lambda_S = Pri_{\lfloor N/4 \rfloor} \quad (19)$$

donde  $N$  es el número de pacientes de cada escenario. Es posible observar que en esta función objetivo aparecen algunos términos que a simple vista no son comparables. Se probó dejar sólo la consideración de la prioridad en la función objetivo y las otras como restricciones con un parámetro ajustable. Sin embargo, los resultados obtenidos en estas pruebas fueron muy similares a los del modelo aquí planteado. Por otro lado, la forma en la que se construyen  $\lambda_H$  y  $\lambda_S$  permiten hacer más comparables los términos de la función objetivo del modelo planteado.

## 2.2. Variante del Modelo de Programación Lineal Entera

El modelo que se detalla a continuación corresponde a un modelo de programación lineal entera con modificaciones específicamente en lo relacionado con la prioridad. La modificación se basa en calcular nuevos pesos a la asignación de pacientes, en lugar de  $Pri_p$  que mantenga la propiedad de ser mayores para pacientes con mayor prioridad. La justificación de esto es que en la función objetivo del modelo original aparecen términos que crecen de manera exponencial a medida que aumenta la prioridad. Se propone utilizar pesos de la siguiente forma:

$$w_p = \alpha^{CAT_p} \cdot (1/Qp) \quad (20)$$

donde  $CAT_p \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ , y depende del tiempo de espera que lleva el paciente y la categoría, que puede ser A, B, C, D o E decreciendo en orden de importancia, dependiendo del diagnóstico y los agravantes de cada paciente. En la siguiente tabla se muestra cómo se calculan los  $CAT_p$ .

Las categorías médicas mencionadas son definidas por los mismos médicos.

Por su parte,  $\alpha$  es un parámetro que define el grado de exponencialidad que se le quiere dar al parámetro  $CAT_p$ . Tras varias pruebas decidimos trabajar con dos valores de  $\alpha$ ,  $\alpha = 2$  y  $\alpha = 5$ .

Por último,  $Qp \in \{1, 2, \dots, 10\}$  representa una proporción del tiempo quirúrgico demandado para la intervención del paciente  $p$ . Este tiempo es discretizado

	< 1 semana	< 1 mes	< 3 meses	< 6 meses	≥ 6 meses
A	3	4	5	5	5
B	2	3	4	5	5
C	1	2	3	4	5
D	1	1	2	3	4
E	1	1	1	2	3

Tabla 1: Categorías para la Variante del Modelo de Programación Lineal Entera

en enteros del 1 al 10, donde 1 se le asigna a la intervención más larga y 10 a la más corta. La idea de este coeficiente es que ante situaciones de empate producidas por igualdad en el valor de  $\alpha^{CAT_p}$ , se le asigne mayor prioridad a las intervenciones más largas, tal cual fue sugerido por los médicos.

Con esto la función objetivo utilizada en este método queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{máx} \quad & \lambda_F \cdot \sum_{i,p,doc1,doc2,pab} w_p \cdot t_i^{p,doc1,doc2,pab} - \lambda_H \cdot \sum_i x_i \\
 & + \lambda_S \cdot \sum_{i,p,doc1,doc2,pab} \delta_i^p \cdot t_i^{p,doc1,doc2,pab}
 \end{aligned} \tag{21}$$

En nuestra implementación se consideró  $\lambda_F = 1$ . Este valor se tomó por simplicidad del modelo. Los valores de  $\lambda_H$  y  $\lambda_S$  elegidos luego de realizar algunas pruebas fueron los siguientes:

$$\lambda_H = \frac{\max(w_p)}{2} \text{ y } \lambda_S = \frac{1}{\lambda_H} \tag{22}$$

### 2.3. Algoritmo Basado en un Modelo de Factibilidad

La idea detrás de este algoritmo es dividir nuevamente el problema en dos partes: la primera, es resolver el problema de quién debe ser operado en la semana considerada; y la segunda, es resolver cuándo (qué día) intervenir a los pacientes que se decidió operar. El método consta de dos partes, éstas son descritas a continuación:

1. **Problema de Asignación:** El problema de “A quién operar” puede ser resuelto por un árbol binario que recorra por paciente (en orden de prioridad) y ejecute un modelo de factibilidad para saber si dicho paciente puede ser asignado o no. Esto significa ejecutar un modelo de factibilidad  $n$  veces. En la figura 1 se muestra como se construye el algoritmo computacional:

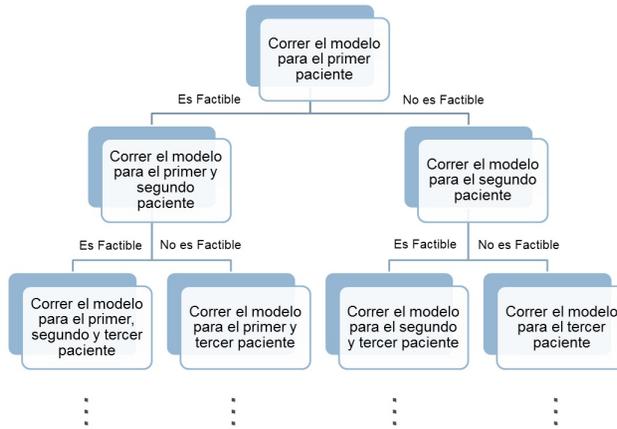


Figura 1: Problema de Asignación

Al final de este algoritmo computacional se tiene la lista de todos los pacientes que es factible asignar, respetando el criterio de prioridad. Como la búsqueda de factibilidad se hace en el mismo orden que el resultado del criterio de prioridad, los pacientes son asignados respetando la prioridad de manera estricta. Es decir, un paciente asignado no entra en conflicto con un paciente de mayor prioridad, ya que si el paciente de mayor prioridad no fue asignado antes, es porque no es factible de ser asignado y no porque el método elija a otro de menor prioridad.

2. **Problema de Calendarización:** El problema de la calendarización puede ser resuelto después de resolver el problema de asignación, con un modelo de programación lineal entera que ya no considera la prioridad. Como los pacientes son establecidos en el punto anterior en este punto se debe considerar sólo a los pacientes que fueron asignados. En este caso la función objetivo queda de la siguiente forma:

$$\text{máx} \quad -\lambda_H \cdot \sum_i x_i + \lambda_S \cdot \sum_{i, doc1, doc2, pab, p \in A} \delta_i^p \cdot t_i^{p, doc1, doc2, pab} \quad (23)$$

donde  $A$  es el conjunto de los pacientes asignados mediante el algoritmo de factibilidad. Por simplicidad se utilizó el valor de  $\lambda_S$  igual a uno. Luego, el valor de  $\lambda_H$  se eligió de tal forma que fuera igual al mayor valor que puede tomar el otro término de la función objetivo. El de valor ocupado se muestran a continuación:

$$\lambda_H = \sum_{i,p \in A} \delta_i^p \tag{24}$$

este valor depende de  $N$  (el número de pacientes) y de las jornadas utilizadas en cada escenario.

## 2.4. Algoritmo del Tipo Backtracking

Otra perspectiva es desarrollar un algoritmo que encuentre soluciones factibles, dependiendo de las reglas de asignación definidas por el hospital. Una vez obtenidas estas soluciones se puede evaluar cuál de ellas es la más conveniente. La idea se basa en un algoritmo de tipo Backtracking, incluyendo algunas modificaciones para poder resolver este problema particular. A continuación se muestran los pasos:

1. **Creación de asignaciones factibles:** Esta etapa consiste en generar listas de jornadas en las cuales se puede operar un paciente. En este punto se consideran la duración de la operación (que no sobrepase el largo de la jornada), la disponibilidad del médico que puede realizar esa operación y si la operación es “especial” (éstas no pueden ser operadas en la tarde).
2. **Creación de combinación de asignaciones factibles:** Es un método que permite construir combinaciones factibles, entre asignaciones factibles determinadas en la parte anterior. En este punto se considera la factibilidad de cada paciente agregado, que no pueden existir más de dos operaciones especiales en una jornada y que el total de duraciones no exceda la duración de la jornada acumulada para cada combinación.

La técnica de este método es generar arreglos que contengan la información de las asignaciones factibles de los pacientes asignados. Cada vez que se genera un arreglo (o combinación de asignaciones factibles) se ingresa a una pila (o stack) de dos entradas. Cuando se recorren todas las asignaciones factibles de cada paciente, se extrae un elemento de la pila y se comprueba la factibilidad de agregar asignaciones factibles del paciente siguiente al arreglo extraído. Si la combinación es factible, esa asignación se agrega al arreglo y el arreglo ingresa nuevamente a la pila. Si no es factible se prueba con otra asignación del paciente siguiente. Como consecuencia de la aplicación del método, la pila tendrá al final del proceso combinaciones de pacientes asignados a jornadas con el máximo de pacientes factibles y respetando la prioridad de éstos.

3. **Salto de paciente:** Cuando las asignaciones factibles de un paciente no pueden ser asignados a ninguna combinación este paciente no es agregado y se continúa con el paciente que tenga la prioridad más cercana a dicho paciente. Para lograr esto se definen 2 pilas donde la segunda pila almacena todas las combinaciones que no pudieron ser agregadas a la pila principal. En el caso que ninguna combinación pudo ser vuelta a agregar a la pila principal (es decir, un paciente no puede ser asignado a ninguna combinación), entonces se continúa con el paciente siguiente y la pila principal pasa a ser la secundaria.
4. **Evaluación de soluciones factibles:** El resultado de la etapa anterior puede entregar más de una solución factible. En esta etapa se evalúan las soluciones, considerando que mientras menor sea la edad del paciente se incrementa la prioridad por operarlos en la mañana y que las operaciones más urgentes se intentan operar en los primeros días de la semana. Como resultado de esta etapa se obtiene una única solución factible, que es mejor que las otras combinaciones.

---

### 3. Resultados

---

En este capítulo se presenta un resumen de los resultados obtenidos en la comparativa de modelos y una comparación con una situación real. El desempeño de cada modelo puede ser evaluado en distintos escenarios según la calidad de la solución entregada. Los indicadores de la calidad definidas para los modelos son:

1. **Tiempo de Ejecución:** Una implementación rutinaria de un sistema que incluya un modelo de programación de pabellones como el que se desarrolló en este proyecto debe poder resolver el problema en menos de un tiempo límite. Si se considera que la ejecución del modelo ocurrirá en una reunión de médicos cirujanos, ésta no podría tardar más de 10 ó 15 minutos.
2. **Porcentaje de Utilización de Pabellón:** Según el Ministerio de Salud de Chile el porcentaje de utilización proviene de:

$$\text{Porcentaje de Utilización} = \frac{h_O + h_P}{h_D} \quad (25)$$

donde  $h_O$  son las Horas Mensuales Ocupadas Totales,  $h_P$  las Horas Mensuales de Preparación y  $h_D$  representa el Total de Horas Mensuales Disponibles.

3. **Respeto de la Prioridad:** Al existir una prioridad específica para cada paciente en la lista de espera, establecida previamente a la ejecución del modelo o el algoritmo, se debe respetar esta lista en la asignación. Para poder comparar estos resultados se puede obtener el logaritmo de la suma de los  $Pri_p$  de los pacientes asignados, de la siguiente forma:

$$\log_{10} \sum_{p \in A} Pri_p \cdot t_p \quad (26)$$

donde  $A$  es el conjunto de pacientes asignados por el modelo. Este valor representa la calidad de la solución en función de la solución que se obtiene de todos los modelos y permite comparar los resultados de los modelos en un mismo escenario.

### 3.1. Escenarios de Comparación y Valores que Definen los Escenarios de Estudio

Las características de las especialidades y las listas de espera de éstas pueden variar dependiendo del hospital. Los modelos desarrollados están pensados para poder operar frente a diferentes escenarios y basados en la información real de los hospitales. A continuación, se presenta una clasificación de 4 variaciones que fueron consideradas y los valores utilizados en cada una, para evaluar los resultados entregados por cada modelo en diferentes escenarios.

1. **Número de pacientes:** Corresponde al número de pacientes en la lista de espera quirúrgica de determinada especialidad que se pretende programar. En una semana, una especialidad con 10 jornadas disponibles opera cerca de 25 pacientes. Para que el modelo pueda manejar distintas alternativas de asignación se deben incluir al menos el doble de pacientes. Para evaluar el desempeño de los modelos se consideraron 50, 100 y 200 pacientes.
2. **Tiempos de duración de intervenciones en función del tiempo de duración de la jornada:** Algunas especialidades médicas se caracterizan por tener duraciones de intervenciones más largas que otras. Para el caso de la duración de las operaciones, se utilizó información histórica

del hospital. Se estudiaron 4 situaciones donde el promedio de las duraciones de las intervenciones con respecto a la duración de las jornadas fue 12,5 %, 25 %, 37,5 % y 50 %.

**3. Número de jornadas en las que se pueden programar pacientes:**

El número de jornadas en las que se pueden programar pacientes depende en algunos casos de la preasignación de horas de pabellón a las especialidades médicas y en otros casos de los recursos con que ésta cuente. Sobre el número de jornadas que se opera, las especialidades del hospital con el cual se trabajó poseían 10 jornadas disponibles en la semana (2 jornadas por día, durante 5 días), en las cuales operaban considerando 2 pabellones.

**4. Número de jornadas y/o pabellones disponibles por paciente:**

Un paciente puede ser programado a priori en más de una jornada y/o pabellón (para que el problema tenga sentido). Para estimar el número de jornadas factibles a priori por paciente por semana, se consideraron casos reales y se trabajó con 3 valores diferentes para este parámetro: 2,5; 3,5 y 4,5 jornadas por semana.

De este modo, se consideraron 36 escenarios diferentes, que se constituyen al considerar 3 números de pacientes, 4 duraciones promedio de las intervenciones, 1 número de jornadas semanales y 3 números de jornadas disponibles por paciente por semana.

## **3.2. Resultados Obtenidos**

Para todos los efectos comparativos, los modelos fueron ejecutados en el mismo computador, el cual contó con un procesador AMD Phenom II X4 965 de 3,4GHz y 8 GB de memoria RAM. El algoritmo de Backtracking fue programado en Java utilizando la herramienta NetBeans 6.9.1, para la ejecución del programa se le asignó una memoria disponible máxima 6,5 GB. Los otros métodos se modelaron en GAMS 23.5 y se resolvieron con CPLEX versión 12.2.

### **3.2.1. Tiempos de Ejecución**

En la tabla 2 se muestra un resumen de los tiempos de ejecución promedio en los escenarios estudiados, donde AB corresponde al algoritmo del tipo Backtracking, MPLE es el modelo de programación lineal entera, VMPLE es la variante del modelo de programación lineal entera y ABMF corresponde al algoritmo basado en un modelo de factibilidad

N de pacientes	MPLE	VMPLE	ABMF	AB
50	0:07	0:08	6:01	0:04
100	0:15	0:15	23:31	0:04
200	0:28	0:29	97:18	0:07

Tabla 2: Resumen de Tiempos de Ejecución Promedio (en minutos) por Modelo y Número de Pacientes

Cabe notar que el promedio de tiempo corresponde a los casos efectivamente resueltos, un 100 % en todos los casos excepto en el algoritmo de Backtracking, que fue un 60 % del total (en el 40 % restante Java detuvo la ejecución del algoritmo indicando problemas de asignación de memoria RAM).

Los resultados obtenidos en cuanto a tiempos de ejecución son bastante similares entre los modelos de programación lineal entera y su variante. Es posible ver, en ambos casos, que dependen del número de pacientes. El algoritmo del tipo Backtracking entregó en general muy buenos resultados desde el punto de vista del tiempo de ejecución, independiente del número de pacientes, en todos los casos en los que pudo encontrar una solución.

El algoritmo basado en un modelo de factibilidad en todos los escenarios estudiados tardó significativamente más tiempo en entregar la solución. No obstante, este algoritmo por construcción, entrega la mejor solución desde el punto de vista del número y prioridad de los pacientes asignados. El algoritmo del tipo Backtracking entregó el mismo resultado que el algoritmo basado en un modelo de factibilidad. Sin embargo, como ya fue comentado el algoritmo del tipo Backtracking no en todos los escenarios logró completar la ejecución. Específicamente, el algoritmo del tipo Backtracking falló en escenarios con duraciones de intervenciones mucho menores que la duración de las jornadas o cuando el número de jornadas factibles por paciente era cercano al número de jornadas por semana.

### 3.2.2. Utilización de Pabellón

Los escenarios estudiados muestran que cuando las duraciones de las intervenciones son muy cortas en comparación a las duraciones de la jornadas (12,5%) y son pocos los pacientes que se desean programar, la asignación máxima de pacientes no logra cubrir un porcentaje importante de las jornadas disponibles. Por ésto, en estos casos, se obtienen bajas tasas de utilización de pabellón. Por otro lado, cuando las duraciones de las intervenciones son cercanas a la mitad de la duración de las jornadas, disminuyen las combinaciones que permiten obtener buenos resultados en la utilización de pabellón. Para escenarios similares al real el resultado de todos los modelos supero el 95 % de

utilización del tiempo disponible.

### 3.2.3. Respeto de la Prioridad

La representación gráfica del respeto de la prioridad no es simple, una alternativa es marcar en una tabla los pacientes que fueron asignados en cada modelo, como en la figura 2. En esta tabla se ordenan los pacientes según prioridad, dejando al principio los pacientes prioritarios. Resulta interesante observar un ejemplo de esta asignación en el escenario que considera 50 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 37,5% de la duraciones de las jornadas y jornadas disponibles a priori de 3,5 promedio por paciente.

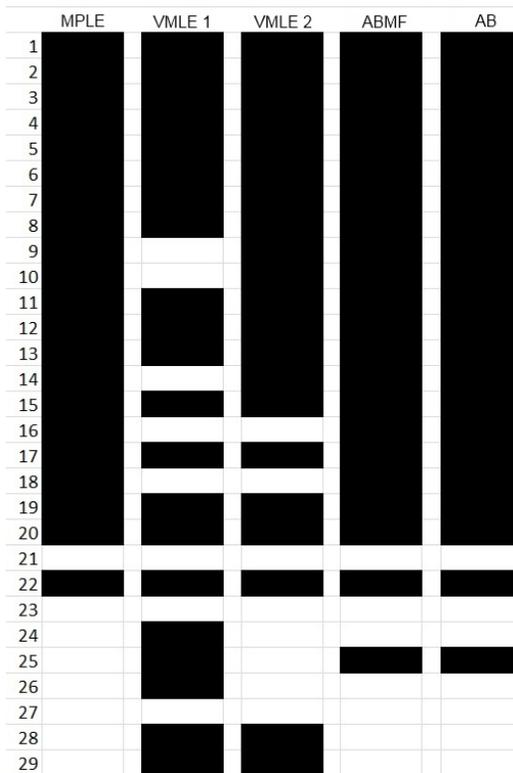


Figura 2: Respeto de la Prioridad

Para esta parte se analizaron diferentes valores de  $\alpha$  en el estudio de la variante del modelo de programación lineal entera. En esta figura se muestran las soluciones con  $\alpha = 2$  (VMLE1) y  $\alpha = 5$  (VMLE2). Se puede observar que el algoritmo del tipo Backtracking entregó los mismos resultados, desde el punto de vista del respeto a la prioridad, que el algoritmo basado en un modelo de factibilidad y el modelo de programación lineal entera. Los resultados de estos modelos fueron mejores, en todos estos escenarios, que los resultados

obtenidos por las variantes del modelos de programación lineal entera.

### 3.3. Resultados Obtenidos en los Casos Reales

Por razones de confidencialidad del hospital, la información aquí mostrada no contiene datos que permitan identificar a los pacientes. Los casos reales estudiados corresponden a lo ocurrido en la segunda semana de Agosto del 2009 en la especialidad de Cirugía General en los pabellones 3 y 4 del Hospital Luis Calvo Mackenna. En la figura 3 es posible observar los tiempos totales en minutos ocupados en cada jornada.

Pabellón 3				
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Paciente 1	305 Paciente 7	270 Paciente 15	270 Paciente 18	230
Paciente 2		Paciente 16	Paciente 19	
		Paciente 17	Paciente 20	
Tarde	Tarde	Tarde	Tarde	Tarde
	Paciente 8	165		
	Paciente 9			
	Paciente 10			

Pabellón 4				
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Paciente 3	275 Paciente 11	185	Paciente 21	330
Paciente 4	Paciente 12		Paciente 22	
Paciente 5	Paciente 13			
	Paciente 14			
Tarde	Tarde	Tarde	Tarde	Tarde
Paciente 6	95		Paciente 23	60

Figura 3: Programación de Pabellones en el Caso Real

En la figura 4 se muestra para la misma semana si se hubiese utilizado la programación propuesta por el algoritmo del tipo Backtracking, el modelo de programación lineal entera y la variante del modelo de programación lineal entera (para este caso los 3 modelos entregaron la misma solución). En esta tabla también se adjunta el médico que fue asignado.

Pabellón 3				
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Paciente 1	305 Paciente 7	285 Paciente 15	270 Paciente 18	280
Paciente 2	Paciente 4	Paciente 16	Paciente 8	
		Paciente 17	Paciente 53	
			Paciente 20	
Tarde	Tarde	Tarde	Tarde	Tarde
	Paciente 31	115		
	Paciente 30			

Pabellón 4				
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Paciente 3	320 Paciente 11	265	Paciente 21	250
Paciente 9	Paciente 19		Paciente 23	
Paciente 10	Paciente 13		Paciente 34	
	Paciente 12			
	Paciente 14			
Tarde	Tarde	Tarde	Tarde	Tarde
Paciente 6	195		Paciente 22	170
Paciente 28				
Paciente 5				

Figura 4: Programación de Pabellones Utilizando los Modelos Propuestos con los Mismos Médicos Asignados y Conservando el Primer Paciente

Este escenario corresponde al de 100 pacientes, 10 jornadas disponibles, duraciones de intervenciones promedio del 37.5% de la duraciones de las jornadas y jornadas disponibles a priori de 2,5 promedio por paciente. Por otro

lado, se evaluó el mismo caso, pero considerando 3,5 de promedio de jornadas prefactibles por paciente. Esto es posible mediante la relajación de algunas reglas de asignación de médicos a pacientes. Con esto se obtiene el resultado que se presenta en la tabla 3.

	Minutos Utilizados	Minutos Disponibles	Porcentaje de utilización	Mejora
Programación Manual	2185	2820	77,50 %	-
Modelos (Jornada de 2,5)	2455	2820	87,10 %	9,60 %
Modelos (Jornada de 3,5)	2624	2820	93,00 %	15,60 %

Tabla 3: Resultados Obtenidos en un Caso Real

Esto permite mostrar que la elección de políticas menos restrictivas impacta positivamente en la utilización del pabellón y que la programación de pabellones, utilizando los métodos aquí descritos, puede aumentar en un caso real la utilización del pabellón.

---

## 4. Conclusiones

---

Los modelos desarrollados permiten entregar soluciones a la programación de pabellones quirúrgicos en hospitales públicos de buena calidad según los médicos encargados. Estos modelos pueden entregar asignaciones horarias que permitirían mejorar las utilidades de pabellón entre un 10 % y un 15 % sobre la situación actual, lo que representa una oportunidad para los hospitales públicos de Chile. Este número depende de las restricciones que se consideren para la programación. Es posible además observar que la utilización del pabellón obviamente aumenta mientras menos restricciones se incorporen.

Un aporte importante de este estudio es la incorporación de la prioridad relativa del paciente en el modelo de agendamiento y cómo el manejo de ésta puede ser fundamental en el modelamiento del problema de programación de pabellones. Como se vio en la literatura consultada, en muchos estudios la decisión de asignación se centra en intentar minimizar los costos de operación, pero no incorporan criterios como el tiempo de espera del paciente y su condición biomédica.

Desde el punto de vista de los modelos desarrollados el algoritmo del tipo Backtracking permite resolver en muchas instancias el problema planteado en tiempos cercanos al segundo, en comparación al resto de los modelos estudiados que requieren más tiempo. Sin embargo, para casos donde existe un gran número de soluciones factibles este método puede no entregar soluciones en

tiempos razonables. Con respecto al respeto de la prioridad, el algoritmo del tipo Backtracking entregó los mismos resultados que el algoritmo basado en un modelo de factibilidad, que por construcción entrega el mejor resultado desde el punto de vista de la prioridad. Con respecto a la utilización de pabellón, el resultado entregado por el algoritmo del tipo Backtracking depende de las características de duración de las intervenciones de los pacientes asignados.

Respecto al tiempo de ejecución, el modelo de programación lineal entera cumple con los requerimientos de tiempo máximo estimado para entregar la solución. Si bien los tiempos de ejecución son menores en todos los escenarios estudiados que los tiempos del algoritmo basado en un modelo de factibilidad, este algoritmo tarda algunos segundos más que el algoritmo del tipo Backtracking. El principal problema del modelo de programación lineal entera es la prioridad. La forma original de modelarla lleva a que crezca exponencialmente el valor que determina la prioridad de cada paciente.

La variante del modelo de programación lineal entera presenta algunos problemas en lo que refiere al respeto de la prioridad. Si bien el valor que toma  $w_p$  puede ser modificado o ajustado mediante los valores de  $\alpha$ , esto hace que sea muy poco versátil frente a una implementación rutinaria. Desde el punto de vista de la utilización de pabellón este método suele mostrar mejores resultados porcentuales en comparación a los otros modelos.

El problema del algoritmo basado en un modelo de factibilidad es su tiempo de ejecución, debido a que se ejecuta el algoritmo de factibilidad tantas veces como pacientes sean ingresados en cada escenario. Desde el punto de vista de la calidad del resultado es fácil determinar que siempre entrega la mejor solución con respecto al cumplimiento de la prioridad, pero los tiempos de ejecución se escapan por mucho a los máximos permitidos en una implementación rutinaria.

En la actualidad estos modelos están siendo probados en un hospital pediátrico de Santiago de Chile. Para esto, se utilizó un desarrollo previo que permite priorizar pacientes en base a criterios de tiempos de espera y complejidad biomédica [1]. Hemos desarrollado e implementado una aplicación computacional que, basada en nuestros modelos, permite generar programaciones semanales de pabellón. Las pruebas han mostrado que los resultados que se obtienen son satisfactorios tanto desde el punto de vista clínico como desde el aprovechamiento de los recursos del hospital.

**Agradecimientos:** A Oscar Barros por motivarnos a trabajar en este problema y a Daniel Espinoza por sus interesantes sugerencias. También a autoridades y médicos del Hospital Luis Calvo Mackenna por su colaboración en este proyecto. El segundo autor es parcialmente financiado por el proyecto FONDECYT 1110797 (Chile), el Instituto Milenio “Sistemas Complejos de Ingeniería” (Chile), ANPCyT PICT-2007-00518 (Argentina), CONICET PIP 112-200901-00178 (Argentina), y UBACyT 20020090300094 (Argentina).

## Referencias

- [1] Oscar Barros and Cristian Julio. Enterprise and process architecture patterns. *Business Process Management Journal*, 17:598–618, 2011.
- [2] B. Cardoen, E. Demeulemeester, and J. Beliën. Scheduling surgical cases in a day-care environment: An exact branch-and-price approach. *Computers and Operations Research*, 36(9):2660–2669, 2009.
- [3] B. Cardoen and J Demeulemeester, E.and Beliën. Operating room planning and scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 201:921–932, 2010.
- [4] M. Daiki and Y. Yuehwern. An elective surgery scheduling problem considering patient priority. *Computers and Operations Research*, 37:1091–1099, 2009.
- [5] F. Dexter and A. Macario. Changing allocations of operating room time from a system based on historical utilization to one where the aim is to schedule as many surgical cases as possible. *Anesthesia and Analges*, 94:1272–1279, 2002.
- [6] G.L.M Hilkhuisen, J.P. Oudhoff, Wal G. Rietberg, M., and D.R.M. Timmermans. Waiting for elective surgery: a qualitative analysis and conceptual framework of the consequences of delay. *Public Health*, 119:290–293, 2005.
- [7] A. Jebali, A.B.H. Alouane, and P. Ladet. Operating rooms scheduling. *International Journal of Production Economics*, 99:52–62, 2006.
- [8] A. D. MacCormick, W. G. Collecutt, and B. R. Parry. Prioritizing patients for elective surgery: A systematic review. *ANZ Journal of Surgery*, 73:633–642, 2003.

- [9] P.M. Mullen. Prioritising waiting lists: How and why? *European Journal Operational Research*, 150:32–45, 2003.
- [10] J.P. Oudhoff, D.R. Timmermans, D.L. Knol, A.B. Bijnen, and G. Wal. Prioritising patients on surgical waiting lists: A conjoint analysis study on the priority judgements of patients, surgeons, occupational physicians, and general practitioners. *Social Science and Medicine*, 64:1863–1875, 2007.
- [11] C. Reveco and R. Weber. Gestión de capacidad en el servicio de urgencia en un hospital público. *Revista Ingeniería de Sistemas*, 25:57–75, 2011.
- [12] B. Roland, C Di Martinelly, and F Riane. Operating theatre optimization: A resource constrained based solving approach. *Service Systems and Service Management*, 2:443–448, 2006.
- [13] P. Santibáñez, M. Begen, and Atkins D. Surgical block scheduling in a system of hospitals: an application to resource and wait list management in a british columbia health authority. *Health Care Manage Sci*, 10:269–282, 2007.
- [14] A. Testi, E. Tanfani, R. Valente, L. Ansaldo, and C. Torre. Prioritizing surgical waiting lists. *Journal of Evaluation in Clinical Practice, University of Genova, Villa Scassi Hospital, Génova, Italy*, 14:59–64, 2006.
- [15] R. Valente, A. Testi, E. Tanfani, M. Fato, I. Porro, M. Santo, G. Santori, G. Torre, and G. Ansaldo. A model to prioritize access to elective surgery on the basis of clinical urgency and waiting time. *BMC health services research*, 9, 2009.
- [16] B. Zhang, P. Murali, M. Dessouky, and D. Belson. A mixed integer programming approach for allocation operating room capacity. *Journal of the Operational Research Society*, 60:663–673, 2008.