

# Mathematical programming model for planning of operating rooms at a public hospital in the city of Guayaquil

Nadia Cárdenas-Escobar M.Sc.<sup>1</sup>, Jorge Quichimbo Moran MSc.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas  
Campus Gustavo Galindo Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador,  
[ncardena@espol.edu.ec](mailto:ncardena@espol.edu.ec)

<sup>2</sup> Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Químicas, Ciudadela Universitaria Salvador  
Allende, Guayaquil, Ecuador, [jorge.quichimbom@ug.edu.ec](mailto:jorge.quichimbom@ug.edu.ec)

*Abstract— Operating rooms are part of the most valuable resources of a hospital. Patients waiting for getting into this service could be, patients who need pre-programmed surgical interventions or patients who need to be operated urgently. This work focusses on the first case mentioned. In this context, the planning of a surgical center in a hospital becomes a critical process and at the same time a complex issue. A suitable resolution to this problem is critical to reach an efficient use of its resources and above all to increase the chances of improving the quality of life of patients. The complexity of the planning lies in the evaluation of certain variables which interact in this process. Among these are: the number of available operating theatres, the availability of doctors, the duration of surgical procedures, the exclusive use of an operating suite for some procedures. The patient priority to be operated is another variable to consider, which is based on the criteria of the doctor who evaluates the time of a patient can wait for surgery according to the diagnosis. These features have been regarded in a linear programming model to maximize the number of patients assigned to a doctor and operating room on a given day. As a result, it was found that the hospital can assist 482 patients by placing an operating room only for cases of traumatology, being greater than the number of patients treated applying the model with all the operating rooms. Furthermore, the results indicate that the allocation time of a patient was reduced, from 8 hours with the manual process to 2 hours with the proposed model.*

**Keywords**—linear programming, maximize operating rooms.

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.372>  
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

# Modelo de programación matemática para la planificación en salas de quirófanos centrales de un hospital público en la ciudad de Guayaquil

Nadia Cárdenas-Escobar M.Sc.<sup>1</sup>, Jorge Quichimbo Moran MSc.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas  
Campus Gustavo Galindo Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador,  
[ncardena@espol.edu.ec](mailto:ncardena@espol.edu.ec)

<sup>2</sup> Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Químicas, Ciudadela Universitaria Salvador  
Allende, Guayaquil, Ecuador, [jorge.quichimbom@ug.edu.ec](mailto:jorge.quichimbom@ug.edu.ec)

*Abstract— Operating rooms are part of the most valuable resources of a hospital. Patients waiting for getting into this service could be, patients who need pre-programmed surgical interventions or patients who need to be operated urgently. This work focusses on the first case mentioned. In this context, the planning of a surgical center in a hospital becomes a critical process and at the same time a complex issue. A suitable resolution to this problem is critical to reach an efficient use of its resources and above all to increase the chances of improving the quality of life of patients. The complexity of the planning lies in the evaluation of certain variables which interact in this process. Among these are: the number of available operating theatres, the availability of doctors, the duration of surgical procedures, the exclusive use of an operating suite for some procedures. The patient priority to be operated is another variable to consider, which is based on the criteria of the doctor who evaluates the time of a patient can wait for surgery according to the diagnosis. These features have been regarded in a linear programming model to maximize the number of patients assigned to a doctor and operating room on a given day. As a result, it was found that the hospital can assist 482 patients by placing an operating room only for cases of traumatology, being greater than the number of patients treated applying the model with all the operating rooms. Furthermore, the results indicate that the allocation time of a patient was reduced, from 8 hours with the manual process to 2 hours with the proposed model.*

**Keywords—** linear, programming, maximize, operating, rooms.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### Antecedentes

El trabajo desarrollado se basa en datos provistos por un hospital pediátrico de especialidades perteneciente al Ministerio de Salud Pública del Ecuador (MSP), con sede en la ciudad de Guayaquil. Este nosocomio cuenta con cuatro quirófanos destinados para cirugías programadas. Para el uso de estos el médico cirujano cuenta con un tiempo asignado en el quirófano siguiendo un modelo de programación en bloque [1] Los cirujanos cuentan con un equipo de anestesiólogos y enfermeras exclusivos para esta actividad.

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.372>  
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

### Descripción del problema

En la actualidad, de acuerdo con la política interna del hospital, la responsabilidad de la programación quirúrgica recae en el coordinador de quirófanos. Este proceso inicia con la con la evaluación médica del paciente y posterior emisión del parte quirúrgico realizada por el especialista. Este formato, que se registra de manera manual (no existe registros electrónicos), contiene la información referente al paciente y al tipo de intervención a realizar. Diariamente, el personal de enfermería consolida los partes de los pacientes a ser intervenidos. A diario el médico coordinador dedica al menos una hora en la asignación de estos pacientes a los distintos quirófanos. El horizonte de planificación es de dos días, es decir, el día que se realiza la planificación, será para que los pacientes sean intervenidos dos días después. Entre las consideraciones para asignar pacientes a los quirófanos se encuentra el tiempo que cada médico tiene destinado a actividades de cirugía, y el tiempo destinado a cada intervención. Este tiempo lo define el médico coordinador en base a su experiencia. Una vez realizada la asignación de pacientes, se emite una lista con todos estos datos. Finalmente, este listado es comunicado a todas las áreas que intervienen en el proceso de programación quirúrgica. Terminada la jornada de cirugías, el personal de enfermería entrega el parte posquirúrgico al coordinador de quirófanos, para su registro en una base de datos.

Algunos problemas detectados que surgen con el actual proceso de programación quirúrgica que está implementado en el Hospital, se detallan a continuación:

- La forma manual en la que se lleva los partes quirúrgicos incrementa el riesgo de pérdida de información.
- Con el proceso de programación diario que actualmente está implementado, ocurre problemas de retraso en la entrega de información. Por ejemplo, al no recibir a tiempo el listado de pacientes a ser

intervenidos, el área de admisión no gestiona adecuadamente el ingreso de pacientes al sistema informático.

- La falta de camas y, en segundo lugar, la inadecuada preparación prequirúrgica son las causas más frecuentes de cancelación para pacientes con cirugía en hospitalización convencional, de conformidad con la Association of Anaesthetists of Great Britain and Ireland (Colomer et al., 2009). Si bien es cierto, existe un déficit de camas en la institución, la programación diaria no permite un margen de acción más amplio para gestionar este recurso. Por otro lado, según información recabada de los registros del hospital, al menos una cirugía al mes es suspendida por falta de una medicación, a causa de una débil planificación para gestionar su adquisición.
- El médico responsable de la programación dedica diariamente al menos una hora a esta actividad, tiempo que podría ser invertido en la atención al paciente.

### Objetivo general

Diseñar un modelo basado en la programación matemática que permita disminuir el tiempo que toma la asignación de pacientes a los quirófanos centrales de un hospital Público en la ciudad de Guayaquil.

### Objetivos específicos

- i) Levantar el proceso que se sigue actualmente para la planificación de cirugías y detectar posibles mejoras para la adecuada asignación de pacientes.
- ii) Desarrollar un modelo para la asignación de pacientes a los quirófanos basado en la programación matemática
- iii) Desarrollar una solución computacional para el modelo a diseñarse que permita la reducción de tiempo en la asignación de pacientes a los quirófanos.

### Alcance

Este trabajo está enfocado en el desarrollo de un instrumento basado en la teoría de la programación matemática para la asignación de pacientes a los quirófanos de un hospital de la red pública de salud en la ciudad de Guayaquil, excluyendo los casos de emergencia, es decir, sólo se considera a los pacientes que han sido evaluados por el servicio de consulta externa y se les ha determinado la necesidad de una intervención, esto debido a que las intervenciones quirúrgicas de emergencia tienen otro tratamiento, inclusive en el hospital existe un quirófano exclusivo para estos casos.

### Metodología

- i) Diagnóstico inicial: Levantar el proceso actual que se sigue para la asignación de pacientes a los quirófanos, a través de entrevistas con el personal asistencial y administrativo del hospital.
- ii) Propuesta de mejora: Analizar la información disponible que aporte a la resolución de la problemática planteada. Para su procesamiento se utilizará Microsoft Excel y el software de acceso libre R.
- iii) Planteamiento de la asignación de pacientes: Se define la priorización del paciente previo a la modelización del problema.
- iv) Construcción de un modelo matemático: Desarrollar y resolver un modelo basado en la programación matemática, planteando objetivos y restricciones en función de la realidad del hospital.

## II. MARCO TEÓRICO

### Modelos de programación matemática

Un problema de programación matemática está estructurado por un par  $(F, c)$ , donde  $F$  es el dominio de puntos factibles y  $c$  es una función de utilidad/coste. El problema radica en hallar un punto factible  $x \in F$  tal que  $\forall y \in F$  verifique  $c(x) \leq c(y)$ . Cada punto  $x$  verificando las condiciones anteriormente descritas se denomina óptimo global del problema [2]

Existen conceptos básicos relacionados a la búsqueda de la solución de estos problemas, entre los que podemos citar los siguientes:

Espacio de búsqueda: es el conjunto de todas las posibles soluciones de un problema.

Objetivo: es la instancia del modelo matemático desarrollado, que permite resolver el problema de manera óptima.

Función objetivo: es la ecuación que es optimizada dadas las restricciones y variables del sistema. Es la medida del rendimiento del sistema a maximizar o minimizar.

Variables: es una abstracción de las características del sistema y representan las decisiones que se pueden tomar en torno al problema, que hacen que el valor de la función objetivo varíe.

Restricciones: representan las limitaciones del sistema, que las variables están obligados a cumplir. Son expresadas a través de ecuaciones o desigualdades.

Resolver un problema de optimización, consiste en determinar el valor que deben tomar las variables, que hacen

que la función objetivo sea optima, respetando las limitaciones o restricciones del sistema modelado.

### Modelos de programación entera y sus aplicaciones

Existen muchos problemas prácticos que pueden ser modelados usando variables enteras y restricciones de tipo lineal. En algunos casos se requiere que el valor óptimo de la función objetivo sea resultado de valores enteros para todas las variables de decisión (programación entera pura). Por otro lado, existen modelos que combinan variables continuas con variables enteras. Estos modelos son conocidos como de programación entera mixta, MIP por sus siglas en inglés [3].

De manera general, se busca una solución al problema:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } c(x) \\ &\text{Sujeto a las restricciones:} \\ &g_i(x) \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &h_j(x) = 0 \quad \forall j = 1, \dots, l \\ &x \in Z^n \end{aligned}$$

Siendo  $c, g_i$  y  $h_j$  funciones lineales [2]

### III. DESARROLLO

#### Diagnóstico inicial

Con la finalidad de ayudar a la comprensión del flujo de actividades, que actualmente se sigue en el Hospital para la programación de cirugías, se describe una secuencia de tareas que se realizan en este proceso:

El proceso inicia con la atención del paciente en el servicio de consulta externa; luego de pasar por varias evaluaciones, se determina si un paciente tiene la necesidad de ser intervenido. Llegando a esta instancia, se crea una LEQ (lista de espera quirúrgica) de pacientes, e inicia el subproceso de planificación de cirugías. La figura 1 muestra las actividades relacionadas al mismo.

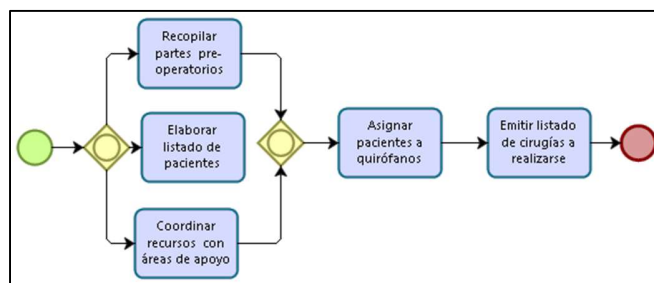


Figura 1. Subproceso actual de planificación de cirugías

La tabla I muestra las actividades que potencialmente causan problemas al proceso, y el efecto de problemas generados.

TABLA I  
ACTIVIDADES DEL PROCESO DE PROGRAMACIÓN QUIRÚRGICA, FALLAS Y EFECTOS

Actividad	Posible falla	Efecto
Emitir ordenes de exámenes y generar cita preoperatoria	Para la generación de la cita preoperatoria, el especialista tiene un registro manual por día, de los pacientes potenciales a recibir una cirugía	Lentitud en la atención de pacientes
Emitir documentos habilitantes	Se emite el parte preoperatorio de manera física	Retardo en la entrega de los partes al coordinador de cirugías, para la asignación de pacientes a los quirófanos
Ordenar y consolidar partes médicos	Recopilación y consolidación diaria de partes prequirúrgicos físicos	Perdida o manipulación de los partes quirúrgicos
Planificación de cirugías	De manera diaria, el Coordinador de cirugías, manualmente asigna pacientes a los diferentes quirófanos	Errores de asignación de pacientes; suspensión de cirugías; retraso en el proceso de planificación
Evaluación preanestésica	Evaluación del paciente el mismo día de la cirugía	Uso poco eficiente del recurso hospitalario

#### Propuesta de mejora

En base al diagnóstico inicial del proceso y los potenciales problemas que se generan en el esquema actual, se propone algunas mejoras que son:

1. Crear una base de datos digital de los partes prequirúrgicos.
2. Emisión del parte de manera digital.
3. Definir un nuevo responsable para la planificación de cirugías.
4. Modificar el esquema de planificación diario a uno semanal.
5. Diseñar un esquema semanal de asignación de pacientes a quirófanos.
6. Propuesta de creación de un comité quirúrgico.

## Planteamiento de la asignación de pacientes

La asignación de pacientes a quirófanos en el hospital está sujeta a varias situaciones tales como la lista de espera quirúrgica LEQ (listado de personas a ser intervenidas), el tipo de cirugía, la disponibilidad horaria de los médicos, la relación de un médico con un paciente, tiempo de duración de la cirugía, disponibilidad de quirófanos, entre otros.

Con lo dicho anteriormente, el problema consiste, en determinar, el día y el quirófano, al que un paciente es asignado para que su médico especialista realice la intervención. En esta instancia, es válido preguntarse, ¿cuál es la medida u objetivo a conseguir para determinar la solución al problema planteado?

Para dar respuesta a esta interrogante, se hace referencia a una solución diseñada en una tesis de la Universidad de Chile, donde su autor plantea como una medida del rendimiento a este tipo de problemas, el respeto a la prioridad del paciente [4]. Toman como referencia a un estudio de la Universidad de Génova junto con un Hospital de Italia y proponen un nuevo criterio de priorización de pacientes de acuerdo con 5 categorías que se clasifican por el avance de la enfermedad, el dolor y el nivel de discapacidad causado. Cada una de estas categorías están asociadas a un tiempo de espera máximo recomendado

Para este trabajo, la forma de determinar la prioridad del paciente dentro de la lista de espera quirúrgica se basa en dos criterios, los cuales fueron discutidos por los líderes del personal asistencial del área quirúrgica, y son los siguientes: la edad del paciente y el riesgo de deterioro de la calidad de vida del paciente asociado al tiempo de espera por la realización de la intervención.

La edad, por el tipo de pacientes que son atendidos en el hospital, es un factor clave en la priorización. A menor edad, mayor nivel de prioridad. La tabla II se muestra una posible valoración de la prioridad del paciente en función de su edad.

Otro criterio es el riesgo que puede sufrir la calidad de vida del paciente por esperar la realización de la cirugía. A menor riesgo, menos nivel de prioridad. Dado estos criterios, la prioridad  $Pri$  de un paciente  $p$  se la define de la siguiente manera:

$$Pri_i = f_{Edad} * Edad_p + f_{Riesgo} * Riesgo_p \quad (1)$$

donde  $f_{Edad} \in (0,1)$  y  $f_{Riesgo} = 1 - f_{Edad}$  representan factores asociados a cada criterio. Los valores de  $Edad_p$  y  $Riesgo_p$  representan la valoración de los criterios de edad del paciente y riesgo que sufre la calidad de vida del paciente por esperar la realización de la cirugía.

En base a la experiencia del personal asistencial, se define que el factor de edad tiene un peso de 0.70, por consiguiente, el factor asociado al riesgo es 0.30.

Para la valoración de ambos criterios se definió una escala del 1 al 10 donde 1 representa el menor nivel de prioridad y 10 el mayor. Según el criterio médico, a menor edad del paciente el nivel de prioridad debe ser mayor. Por otra parte, a mayor riesgo de deterioro de la calidad de vida del paciente por esperar la realización de la cirugía, mayor nivel de prioridad. Se muestra en la tabla III.

TABLA II  
VALORACIÓN DE LA EDAD DEL PACIENTE

Edad del paciente	Valoración
Menores de un año	10
Mayores a 1 año y menores a 5 años	Entre 9 y 7
Mayores a 5 años y menores a 10 años	Entre 6 y 4
Mayores a 10 años	Entre 3 y 1

TABLA III  
CRITERIOS Y SU NIVEL DE PRIORIDAD

Factor	0,70	Factor	0,30
Edad del paciente	Nivel de prioridad	Riesgo de deterioro de la calidad de vida del paciente por esperar la realización de la cirugía	Nivel de prioridad
Más edad	1	Menor riesgo	1
	2		2
	3		3
	4		4
	5		5
	6		6
	7		7
	8		8
	9		9
Menos edad	10	Mayor riesgo	10

## Construcción de un modelo matemático para la asignación de pacientes a los quirófanos del hospital

En esta sección se muestra el desarrollo de un modelo matemático para la asignación de pacientes a los quirófanos. Para esto se sigue un esquema donde en una primera instancia se analiza el problema y los parámetros que constituyen el insumo para el modelo a desarrollar. Luego se procede a la construcción del modelo, mismo que guarda relación con las condiciones y restricciones propias del problema. Se continúa

con el desarrollo de una solución computacional al modelo planteado, para lo cual se hará uso de un software para el modelado de sistemas para la optimización matemática. Al final, se utiliza los datos disponibles del hospital, para la validación del modelo, y analizar los resultados obtenidos.

Previo a la formulación del modelo, se presenta un conjunto de consideraciones, inherentes al problema.

1. Un paciente solo puede ser asignado a un solo día del periodo de planificación, es decir, no es correcto que un paciente aparezca programado dos días en una misma semana.
2. Un paciente es asignado a un solo quirófano. En un mismo día, un paciente no puede estar asignado a dos quirófanos.
3. A cada paciente se le asocia un nivel de prioridad, el cual debe ser respetado. Sin embargo, un paciente con alta prioridad no podría ser seleccionado por el tiempo de duración de la cirugía, recordando que existe una limitante de tiempo por quirófano y del médico.
4. No existen quirófanos especializados. Es decir, cada quirófano está equipado para resolver cualquier tipo de cirugías.
5. Cada quirófano está disponible de lunes a viernes durante 7 horas al día para cirugías programadas.
6. Dado el limitado número de especialistas pediátricos, el médico tratante de un paciente es el mismo que le realiza la cirugía, por tanto, el médico está capacitado para resolver el problema de salud asociado al paciente.
7. La norma general es, que el equipo de cirugía lo conforma el médico especialista, el médico anestesiólogo y el personal de enfermería. Excepcionalmente ingresa un segundo especialista como apoyo al médico principal.
8. Un médico puede realizar varias cirugías al día y en la semana, dependiendo de su disponibilidad para actividades quirúrgicas.
9. Toda cirugía tiene asociada un tiempo de duración. En éste se encuentra incluido los tiempos de preparación y limpieza de los quirófanos.

La perspectiva utilizada para resolver el problema presentado es utilizar un modelo de programación entera, dado el tipo de la variable de decisión que se plantea.

A continuación, se define el problema formalmente, desde el punto de vista de la programación matemática. Primero se precisa los índices utilizados por el modelo:

$p$ : pacientes  
 $med$ : médico  
 $d$ : día  
 $q$ : quirófano

Luego se detallan los parámetros de entrada del modelo:

$Cupo_{med}^d$ : disponibilidad del médico  $med$  el día  $d$  expresada en minutos

$$PacMed_p^{med} = \begin{cases} 1, & \text{si el médico } med \text{ está asociado al paciente } p \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$$

$Pri_p$ : Nivel de prioridad asignado al paciente  $p$

$DurCir_p$ : Duración de la cirugía en minutos asociada al paciente

$Disp_{d,q}$ : Disponibilidad en minutos del quirófano  $q$  en el día  $d$

La variable de decisión se define de la siguiente manera:

$$X_p^{med,d,q} = \begin{cases} 1, & \text{si el paciente } p \text{ asociado al médico } med \text{ es asignado el día } d \text{ al quirófano } q \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$$

A continuación, se presenta las restricciones del modelo

-Restricción respecto al horario del médico: La siguiente restricción se refiere a que no se programe una cirugía cuando el horario del médico no lo permite.

$$\sum_{p,q} DurCir_p * X_p^{med,d,q} \leq Cupo_{med}^d \quad \forall med, d \quad (2)$$

-Restricción referente a asignar un paciente a un día a la semana: Con esta restricción, se limita a que el paciente sea programado solo en un día del horizonte de planificación.

$$\sum_{med,d,q} X_p^{med,d,q} \leq 1 \quad \forall p \quad (3)$$

-Restricción del total de cirugías por día: Con esta restricción, se limita a que el total de operaciones asignadas a cada día no sobrepase el tiempo disponible por quirófano.

$$\sum_{p,med} DurCir_p * X_p^{med,d,q} \leq Disp_{d,q} \quad \forall d, q \quad (4)$$

-Restricción de un médico asociado a un paciente: Con esta restricción se asegura, que el paciente tenga asociado el mismo especialista que lo ha tratado.

$$\sum_{d,q} X_p^{med,d,q} \leq PacMed_p^{med} \quad \forall p, med \quad (5)$$

A continuación, se muestra la naturaleza de la variable:

$$X_p^{med,d,q} \in \{0,1\} \quad \forall p, med, d, q \quad (6)$$

#### -Función Objetivo

La función objetivo se plantea de manera que se cumpla la elección del paciente con un mayor nivel de prioridad.

$$\text{Maximizar } \sum_{p,med,d,q} Pri_p * X_p^{med,d,q} \quad (7)$$

#### Variante del modelo planteado

Una de las consideraciones que se tomaron en cuenta para la formulación del modelo, es que no existen quirófanos especializados, es decir todos los quirófanos tienen la capacidad resolutive para cualquier tipo de intervención quirúrgica. Sin embargo, de acuerdo con lo expresado por el médico coordinador de quirófanos, pueden existir casos, donde un quirófano es destinado para uso de una especialidad en particular.

Dado esta situación se plantea una variante al modelo, donde se incorpora un nuevo parámetro que relaciona un paciente a un quirófano:

$$PacQui_p^q = \begin{cases} 1, & \text{si el paciente } p \text{ puede ser} \\ & \text{intervenido en el quirófano } q \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$$

Adicionalmente, se plantea una restricción que fuerce al modelo a cumplir la relación paciente-quirófano:

$$\sum_{med,d} X_p^{med,d,q} \leq PacQui_p^q \quad \forall p, q \quad (8)$$

#### Parámetros de entrada del modelo

**Número de pacientes:** El modelo planteado se desarrolló con la finalidad de que su desempeño sea adecuado ante situaciones reales. De manera diaria, en promedio se llegan a programar 20 pacientes. Para evaluar el funcionamiento del modelo se crea escenarios de 100, 125 y 150 pacientes para ser programados semanalmente.

**Disponibilidad de pacientes:** La jefatura asistencial facilitó el horario de los médicos de las distintas especialidades quirúrgicas. Este horario detalla el tiempo que invierte un médico en el servicio de consulta externa, visita a pacientes en hospitalización, y el tiempo dedicado a la realización de cirugías. Esta última información permite la construcción de

la siguiente matriz que muestra el tiempo en minutos por día, que cada médico tiene asignado para actividades quirúrgicas.

TABLA IV  
DISPONIBILIDAD DIARIA DE LOS MÉDICOS, PARA REALIZACIÓN DE CIRUGÍAS (MINUTOS)

Especialidad	Médico	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie
Cardiología	Médico1		180	180	180	
Cirugía Gral.	Médico2	90	90	90	90	90
Cirugía Gral.	Médico3			90	90	
Cirugía Gral.	Médico4	120	120			
Cirugía Gral.	Médico5			120	120	
Cirugía Gral.	Médico6		90			90
Cirugía Gral.	Médico7		90		90	
Cirugía Gral.	Médico8			240	240	
Cirugía Gral.	Médico9		120		120	
Cirugía Gral.	Médico10			150		150
Cirugía Gral.	Médico11	120		120		
Cirugía Plast.	Médico12		90			90
Cirugía Plast.	Médico13	90			90	
Gastro.	Médico14				90	
Neurocirugía	Médico15	180	180	180	180	180
Neurocirugía	Médico16	180	180	180	180	180
Oftalmología	Médico17		90		90	
Oftalmología	Médico18	120		120		
Oncología	Médico19		90			90
Otorrino.	Médico20	150			150	
Otorrino.	Médico21		150			150
Otorrino.	Médico22		90		90	
Traumatología	Médico23			180		180
Traumatología	Médico24	180	180			
Traumatología	Médico25		180			180
Traumatología	Médico26	180			180	
Urología	Médico27			150		150

**Médico asociado al paciente:** Como se mencionó anteriormente, dado que la población objetivo del hospital son los pacientes pediátricos, de antemano se define que el mismo médico que trata al paciente, es quien realiza la cirugía. Esta

particularidad surge del limitado personal médico pediátrico en las distintas especialidades.

La siguiente tabla muestra la representación de la relación entre paciente / médico. Para efectos ilustrativos sólo se mostrará la información de 5 pacientes asociados a un médico, y que sería utilizada para la solución del modelo.

TABLA V  
RELACIÓN PACIENTE/MÉDICO

Paciente	Médico3	Médico27	Médico7	Médico12
p1	1	0	0	0
p2	0	1	0	0
p3	0	0	1	0
p9	0	0	0	1
p10	0	0	0	1

Se puede observar que, en un periodo de planeación, un paciente tiene asociado un único médico, pero un médico puede tener asociado varios pacientes.

**Disponibilidad de quirófanos:** El hospital cuenta con cuatro quirófanos. Cada uno se encuentra a disposición 7 horas por día para cirugías planificadas. No existen quirófanos especializados, cada uno tiene la capacidad de brindar servicio a cualquier especialidad. Sin embargo, para la variante del modelo planteado, se define un parámetro, que detalla el quirófano en el que un paciente puede ser operado. Para la variante del modelo se considera el siguiente resultado, obtenido luego de analizar la base de datos de cirugía del hospital.

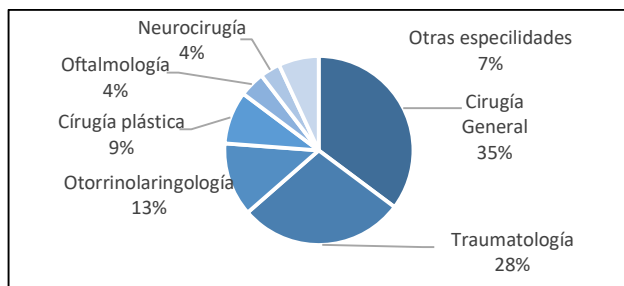


Figura 2. Proceso actual de programación quirúrgica del hospital

En el gráfico anterior se puede observar que la mayor parte de cirugías realizadas en el hospital, pertenecen a las especialidades de Cirugía General y Traumatología. Si se observa el personal médico con el que cuenta el hospital (Tabla IV), hay menos médicos traumatólogos, que cirujanos generales, aun teniendo demandas similares. Dado esto, el diseño de los escenarios para la variante del modelo contempla que todos los pacientes de Traumatología son intervenidos en el quirófano 4, y los pacientes de las demás especialidades serían asignados entre los quirófanos 1, 2 y 3.

**Duración de cirugías:** El tiempo de duración de las cirugías varía, en función del grado de complejidad de estas. En base a la información de las cirugías realizadas en el hospital durante el año 2016, se realiza el siguiente análisis.

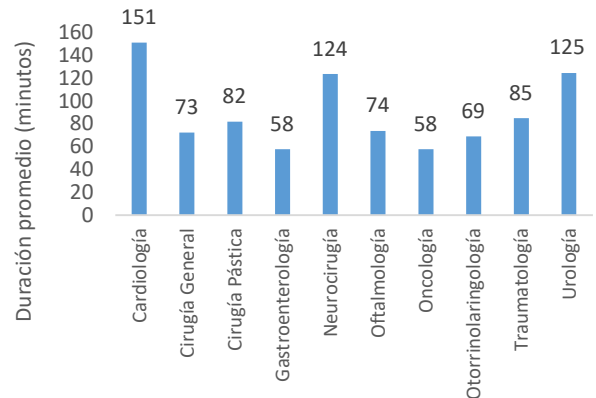


Figura 3. Duración promedio (en minutos) de intervenciones quirúrgicas por especialidad

A través del gráfico anterior se puede observar, que las cirugías en las especialidades de Cardiología, Neurocirugía, y Urología, en promedio tienen una duración mayor a dos horas. Es importante indicar que en estos tiempos están incluidos los tiempos de limpieza de los quirófanos.

El hospital en sus registros emplea una denominación estándar para cada intervención quirúrgica, lo que permite, en base al histórico, definir una "Cartera de procedimientos quirúrgicos", a la que se le asocia un tiempo de duración, que es el promedio de todas las intervenciones realizadas de cada tipo de cirugía. Un ejemplo de la cartera de procedimientos quirúrgicos se muestra a continuación.

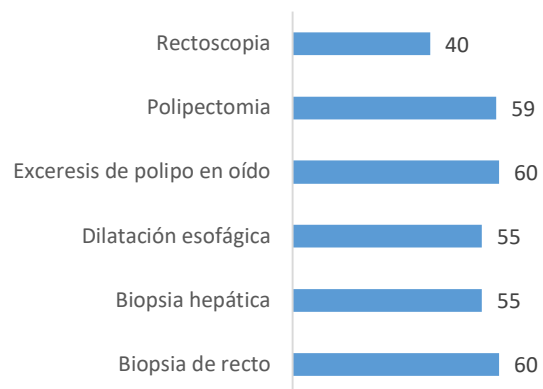


Figura 4. Cartera de servicios de la especialidad de Gastroenterología y duración promedio en minutos



La figura 4 muestra las diferentes cirugías realizadas por la especialidad de Gastroenterología, y la duración promedio expresada en minutos, en base a datos históricos del hospital del año 2016.

#### IV. RESULTADOS

##### Solución del modelo en GAMS

Para el desarrollo del código, se hace uso del software para modelamiento GAMS; el código elaborado se lo ejecuta a través del servidor web de acceso libre NEOS. Para resolver el modelo propuesto se hace uso del solver CPLEX, que con frecuencia es utilizado para solucionar problemas de programación matemática entera.

Tanto el modelo propuesto como su variante se someten a tres escenarios, de 100, 120 y 150 pacientes. Para la variante del modelo, el parámetro que guarda la relación entre el paciente y el quirófano asignado fue configurado de manera que los pacientes de la especialidad de Traumatología sean asignados al quirófano 4. Los demás parámetros son similares para todos los escenarios.

##### Tiempo que le toma al modelo encontrar la solución

Un primer aspecto para analizar es el tiempo que toma encontrar una solución al problema. Las siguientes tablas muestran este tiempo en segundos para cada escenario diseñado.

TABLA VI  
TIEMPO EN SEGUNDOS QUE LE TOMA AL MODELO REALIZAR LA ASIGNACIÓN DE PACIENTES

Modelo principal			
Pacientes	100	125	150
Tiempo (segundos)	1.163	1.240	0.986
Variante del modelo			
Pacientes	100	125	150
Tiempo (segundos)	0.764	0.238	0.493

Se puede observar que la variante del modelo tiene tiempos más bajos que el modelo principal. Por ejemplo, en el escenario con 150 pacientes, el tiempo de asignación en el modelo principal es de 0,986 segundos, a diferencia de los 0,493 segundos de la variante del modelo. Esto se da porque la variante del modelo incluye restricciones que limitan el número de combinaciones factibles totales. Para todos los escenarios los tiempos de asignación son razonables, tomando en consideración que la persona encargada de esta actividad tendrá a disposición 1 hora a la semana para realizar esta actividad.

##### Análisis de la prioridad del paciente

Una medida del desempeño del modelo es observar el paciente que no es tomado en cuenta en la solución encontrada luego de ejecutar el modelo. La siguiente tabla muestra los primeros 20 pacientes, ordenados de mayor a menor en función del nivel de prioridad, para cada escenario diseñado. Se sombrea de negro los pacientes que son considerados en cada solución obtenida.

100 pacientes				125 pacientes				150 pacientes			
Modelo principal		Modelo (Variante)		Modelo principal		Modelo (Variante)		Modelo principal		Modelo (Variante)	
Orden	Paciente	Orden	Paciente	Orden	Paciente	Orden	Paciente	Orden	Paciente	Orden	Paciente
1	p006	1	p006	1	p006	1	p006	1	p006	1	p006
2	p022	2	p022	2	p022	2	p022	2	p147	2	p147
3	p051	3	p051	3	p051	3	p051	3	p022	3	p022
4	p060	4	p060	4	p060	4	p060	4	p051	4	p051
5	p064	5	p064	5	p064	5	p064	5	p060	5	p060
6	p024	6	p024	6	p024	6	p024	6	p064	6	p064
7	p034	7	p034	7	p034	7	p034	7	p024	7	p024
8	p020	8	p020	8	p020	8	p020	8	p034	8	p034
9	p048	9	p048	9	p048	9	p048	9	p020	9	p020
10	p025	10	p025	10	p109	10	p109	10	p048	10	p048
11	p045	11	p045	11	p116	11	p116	11	p109	11	p109
12	p028	12	p028	12	p125	12	p125	12	p116	12	p116
13	p094	13	p094	13	p112	13	p112	13	p125	13	p125
14	p019	14	p019	14	p025	14	p025	14	p112	14	p112
15	p096	15	p096	15	p045	15	p045	15	p025	15	p025
16	p017	16	p017	16	p028	16	p028	16	p045	16	p045
17	p066	17	p066	17	p094	17	p094	17	p138	17	p138
18	p068	18	p068	18	p019	18	p019	18	p028	18	p028
19	p073	19	p073	19	p096	19	p096	19	p094	19	p094
20	p075	20	p075	20	p101	20	p101	20	p019	20	p019

Figura 5. Pacientes seleccionados por la solución en cada escenario

Analizando los primeros 20 pacientes, se observa que los escenarios para 100 y 125 pacientes, tanto el modelo principal como su variante seleccionan los mismos pacientes. Una situación diferente se observa en el escenario para 150 pacientes, donde el modelo principal no considera a 3, mientras que el modificado no toma en cuenta a 2 pacientes.

Por otro lado, como la principal medida del desempeño del modelo, se analiza el valor al que llega la función objetivo para cada escenario. Es importante recordar que el valor de la función objetivo representa la sumatoria de la prioridad de todos los pacientes que forman parte de la solución obtenida.

TABLA VII  
VALOR DE LA FUNCIÓN OBJETIVO PARA CADA ESCENARIO

	Número de pacientes		
	100	125	150
Modelo principal	406.9	441.8	475.2
Variante del modelo	406.9	443.0	482.6

La tabla anterior muestra que la solución encontrada por la variante del modelo para 150 pacientes permite que el valor de la función objetivo sea la más alta comparado con el modelo principal. Situación similar se observa para el escenario de 125

pacientes. De esto se puede concluir, que la variante del modelo elige una solución que incluye pacientes con mayor nivel de prioridad. En el contexto médico, este resultado es deseable ya que permite cumplir el objetivo de dar atención a pacientes con mayor nivel de prioridad.

### Ocupación de quirófanos

Dentro de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, se puede analizar el porcentaje de ocupación esperado de cada quirófano, con la asignación de pacientes hecha por el modelo. A continuación, la figura 6 muestra los valores que toma este indicador, en los diferentes escenarios en los que se prueba el modelo.

TABLA VII  
PORCENTAJE DE OCUPACIÓN ESPERADO POR CADA QUIRÓFANO

	Quirófano	Modelo principal	Modelo (Variante)
100 pacientes	Q1	88%	90%
	Q2	89%	65%
	Q3	44%	13%
	Q4	0%	55%
125 pacientes	Q1	86%	85%
	Q2	93%	72%
	Q3	57%	21%
	Q4	0%	60%
150 pacientes	Q1	86%	89%
	Q2	90%	72%
	Q3	68%	26%
	Q4	4%	66%

Comparando el porcentaje de ocupación esperado de quirófanos obtenido con las soluciones del modelo principal y su variante en los diferentes escenarios diseñados, el modelo principal distribuye las cirugías entre los quirófanos 1, 2 y 3, mientras que existe un mayor equilibrio de este indicador, cuando el modelo plantea asignar el quirófano 4 para la segunda especialidad con más alta demanda que es Traumatología. En ambos modelos el nivel de ocupación de uno de los quirófanos es bajo, esto se debe a que no existe más disponibilidad de médicos que permita la inclusión de más pacientes en las soluciones encontradas.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- En cuanto al proceso de programación de pacientes a quirófanos, el proyecto propone ideas de solución a problemas encontrados, tales como actividades manuales que desembocan en manipulación y pérdida de información.

- La propuesta desarrollada, intenta reducir la carga de trabajo administrativa que genera el proceso de planificación de cirugías para el personal asistencial que actualmente está a cargo, incluyendo nuevos actores al proceso, siguiendo la normativa vigente bajo la que se rige el hospital.

- En el esquema actual, el tiempo invertido en el proceso de asignación de pacientes a los quirófanos, de acuerdo con un informe interno del hospital, es alrededor de 8 horas semanales, considerando actividades de recopilación y transcripción de partes de forma manual, coordinación con áreas de apoyo asistencial, de la asignación de pacientes y de la comunicación del plan de cirugías. Bajo el esquema propuesto, la LEQ, es obtenida automáticamente de registros informáticos por lo que no existe recopilación y transcripción de partes de forma manual. El tiempo que al modelo le toma realizar la asignación de pacientes es menos de un minuto. La coordinación de actividades entre las áreas de apoyo asistencial se la realiza a través de una reunión del comité quirúrgico, que por política de la institución no debe durar más de una hora. La socialización del plan de cirugías, mediante el sistema de comunicación interna de la institución toma media hora. Sumados estos tiempos, bajo el esquema propuesto, el proceso de planificación de cirugías tomaría alrededor de 2 horas semanales, con lo que se llegaría al objetivo de reducir el tiempo que toma realizar este proceso.

- Tanto el modelo principal como su variante cumplen con las restricciones relacionadas a la realidad del hospital.

- El modelo de asignación trabaja de manera adecuada con una cantidad de pacientes cercana a la realidad que maneja el hospital, esto es alrededor de 100 pacientes semanales, según la base de datos de cirugías de la institución. Se diseñaron escenarios de 125 y 150 pacientes, donde se observó que el modelo también es funcional para este número de pacientes.

- El modelo ayuda a evaluar el impacto que puede causar variaciones en los parámetros tales como la disponibilidad del personal asistencial, o estrategias como asignar un quirófano a una especialidad en función de su demanda, entre otras.

## Recomendaciones

- Es necesario elaborar instructivos para las actividades que lo requieran dentro del proceso de programación quirúrgica propuesto, poniendo especial atención, al mantenimiento de la LEQ, a medida que los pacientes vayan accediendo a la realización de una cirugía, así como a la salida de esta.
- Se sugiere el desarrollo de un método que permite acercarse a los tiempos reales de duración de las cirugías, para encontrar mejores soluciones al problema. Por ejemplo, se podría incluir en los parámetros del modelo un tiempo adicional a los tiempos promedios de duración de las cirugías, en base a la probabilidad de complicaciones en la realización.
- Se conoce que, por limitaciones de talento humano, no se puede incrementar el tiempo de disponibilidad de los quirófanos, pero se propone revisar el tiempo que los cirujanos tienen asignado a actividades de cirugía para aprovechar el tiempo disponible de quirófanos
- Se puede usar el modelo de programación matemática desarrollado como punto de partida para nuevos modelos que incluyan otras restricciones no consideradas en este trabajo, como, por ejemplo, la asignación de cirugías a determinadas horas de un día, o la asignación de pacientes más urgentes al inicio del horizonte de planificación.

## REFERENCIAS

- [1] «Sudamérica, Agencia Pública de Noticias del Ecuador y», 2016. [En línea]. Available: <http://www.andes.info.ec/es/noticias/gobierno-ecuador-invertido-13500-millones-dolares-salud-durante-sus-9-anos.html>.
- [2] A. Vidal, Algoritmos heurísticos en optimización, 2013.
- [3] H. P. Williams, Model Building in Mathematical Programming, Londres: (J. Wiley, Ed.) (Cuarta). , 2008.
- [4] P. Wolf, G. Durán. y P. Rey, «Modelos de Programación Matemática para Asignación de Pabellones Quirúrgicos en hospitales públicos,» *Ingeniería de Sistmas. Universidad de Chile*, vol. XXVI, 2012.
- [5] J.. Colomer, J. Arias, F. Barturen, J. García, J. I. Gómez, «Bloque Quirúrgico Estándares y recomendaciones,» *Informes, estudios e investigación, Ministerio de Sanidad y política social. Gobierno de España*, 2009.
- [6] W. C. Levine, P.F. Dunn «Optimizing Operating Room Scheduling,» *Anesthesiology Clinics*, pp. 697-711., 2015.
- [7] Ministerio de Salud Pública, «Estatuto Orgánico de Gestión Organizacional por Procesos de los Hospitales del Ministerio de Salud Pública,» 2012.
- [8] Ministerio de Salud Pública, «Rendición de cuentas,» 2015. [En línea]. Available: [http://www.salud.gob.ec/wp-content/uploads/2016/03/ppt\\_rc\\_29.04.15.pdf](http://www.salud.gob.ec/wp-content/uploads/2016/03/ppt_rc_29.04.15.pdf).
- [9] Ministerio de Salud Pública, «Valores, misión y visión,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.salud.gob.ec/valores-mision-vision/>.
- [10] B. Cardoen, E. Demeulemeester y J. & Beliën, «Scheduling surgical cases in a day-care environment: a branch-and-price approach,» *Department of decision sciences and information management*, 2009.