



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **AGENDAMIENTO DINÁMICO DE CITAS MÉDICAS A TRAVÉS DE UN PROCESO DE DECISIÓN MARKOVIANO**

**GABRIELA MARÍA FUENZALIDA DEL VALLE**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:  
**SERGIO MATURANA VALDERRAMA**

Santiago de Chile, Julio de 2016

© 2016, Gabriela María Fuenzalida Del Valle



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **AGENDAMIENTO DINÁMICO DE CITAS MÉDICAS A TRAVÉS DE UN PROCESO DE DECISIÓN MARKOVIANO**

**GABRIELA MARÍA FUENZALIDA DEL VALLE**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**SERGIO MATURANA V.**

**CÉSAR SÁEZ N.**

**SUSANA MONDSCHHEIN P.**

**RODRIGO ESCOBAR M.**

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Julio de 2016

A mi abuelo, un gran luchador

“I carry your heart with me

(I carry it in my heart)”

E.E. Cummings

## AGRADECIMIENTOS

Quiero darle las gracias y un reconocimiento a mi bellísima madre, Celia. Además de ser la mejor Mamá y mi persona favorita en este mundo, me enseñó todo lo que sé sobre ser una mujer fuerte y cómo encontrarle el lado divertido a todo. El único logro que merece verdaderamente la pena es hacer que mi Mamá se sienta orgullosa de mí.

Especialmente quiero agradecerle a mi hermosa hermanita Celia por ser mi mejor amiga, mi contención, por su inmensa generosidad y por su nobleza a toda prueba. Le agradezco a mi padre Mario, por siempre confiar en mí, por ser mi apoyo incondicional y mi ejemplo a seguir.

Le agradezco a mi profesor guía, al Doctor Sergio Maturana por su apoyo constante y por depositar toda su confianza en mí invitándome a exponer este tema en Glasgow, Escocia.

A Dios le doy infinitamente las gracias por darme la oportunidad de haber realizado esta investigación. Le pido que me ayude a ser un aporte real para este mundo y una ayuda concreta para los que más lo necesitan, en especial para los enfermos. Espero que este trabajo sirva para que muchos investigadores más se interesen y realicen su aporte en el área de la salud, especialmente en nuestro país, donde se necesita con imperativa urgencia que todas las personas tengan acceso real a una salud de calidad, más justa, más digna dentro de plazos razonables.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
RESUMEN .....	viii
ABSTRACT .....	ix
1. CAPÍTULO INTRODUCTORIO .....	1
1.1 Motivación .....	1
1.2 Descripción del problema .....	2
1.3 Hipótesis.....	5
1.4 Objetivos .....	5
1.4.1 Objetivo principal .....	3
1.4.2 Objetivo secundario .....	3
1.5 Resultados esperados .....	4
1.6 Revisión bibliográfica .....	5
1.6.1 Agendamiento de citas médicas .....	5
1.6.2 Agendamiento dinámico .....	8
1.6.3 Simulación.....	12
1.7 Metodología.....	13
1.7.1 Diagnóstico del problema de agendamiento .....	14
1.7.2 Caso estudio: Hospital del Salvador .....	14
1.8 Conclusiones .....	25

2.	UN PROCESO DE DECISIÓN MARKOVIANO PARA EL AGENDAMIENTO DINÁMICO DE CITAS MÉDICAS .....	26
2.1	Introducción.....	26
2.2	Revisión bibliográfica .....	27
2.3	Descripción del problema .....	36
2.3.1	Recursos disponibles.....	38
2.3.2	Situación actual .....	39
2.4	Metodología.....	41
2.4.1	Enfoque de la solución.....	41
2.5	Resultados y discusión.....	54
2.5.1	Análisis de resultados .....	54
2.6	Conclusiones .....	60
2.6.1	Síntesis y aporte de la investigación .....	60
2.6.2	Trabajo futuro .....	62
	 BIBLIOGRAFÍA .....	 64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Número total de médicos especialistas en Chile inscritos y certificados.....	18
Tabla 2: Cantidad médicos especialistas y horas disponibles de atención.....	24
Tabla 3: Variación de los costos de las horas extras.....	56
Tabla 4: Costo medio diario para distintas combinaciones de flujos de demandas....	58
Tabla 5: Tiempos medios de espera para pacientes por prioridades.....	59
Tabla 6: Cantidad horas extras anuales a realizar por especialidad quirúrgica.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Número de médicos especialistas en Chile inscritos. ....	17
Figura 2: Lista de espera consulta pacientes nuevos con especialista médicos.....	21
Figura 3: Lista de espera total consulta pacientes nuevos por especialidades.. ....	22
Figura 4: Evolución de consultas totales realizadas.....	23
Figura 5: Esquema de los pasos de resolución del problema dinámico.....	54
Figura 6: Tiempo de espera promedio por prioridades utilizando horas extra.....	57

## RESUMEN

Uno de los principales problemas que enfrentan muchos hospitales públicos de Chile es la falta de suficientes especialistas para atender la demanda. Esto ha generado listas con tiempos de espera extensos para algunos de ellos. A pesar de que la solución a largo plazo para este problema es añadir más especialistas, a corto plazo el hospital tiene que asignar prioridades a los pacientes en la lista de espera con el fin de hacer el mejor uso del tiempo de los especialistas existentes.

En el siguiente trabajo se propone una metodología para optimizar el agendamiento de los pacientes. Se trató el sistema como un Proceso de Decisión Markoviano dado el dinamismo y la estocasticidad del sistema. El objetivo es mejorar los indicadores como los tiempos de espera de los pacientes y obtener una política de agendamiento óptima. Para que sea útil para la planificación, este sistema debe ser muy flexible y capaz de ser utilizado por personas que no poseen una formación matemática o informática.

El modelo desarrollado fue aplicado al Hospital del Salvador de Santiago de Chile. Para el caso en estudio se concluyó que se necesita de un aumento de horas médicas en un 2%, 2,1% y 2,8% para las especialidades quirúrgicas de Urología, Traumatología y Cirugía respectivamente, para disminuir en un 18% el tiempo de espera medio total hasta su agendamiento. Para el Hospital del Salvador, esto se traduce en un aumento de 42, 55 y 108 horas extras anuales, lo que representa un costo total de \$2.877.000 pesos chilenos anuales.

Palabras Claves: Agendamiento Dinámico, Citas Médicas, Proceso de Decisión Markoviano, Investigación Operativa en Servicios de Salud, Hospital Público.

## ABSTRACT

One of the main problems faced by many Chilean public hospitals is the lack of enough specialists to meet the demand. This has generated very long waiting lists for many patients, which could mean excessively long waiting times for some of them. Although the long term solution to this problem is to add more specialists, in the short term hospitals have to assign priorities to the patients in the waiting list in order to make the best use of the existing specialists' time. We propose a scheduling system to optimize patients appointments scheduling. Given the stochastic and dynamic environment we faced, we developed a Markov Decision Process model. The goal is to improve indicators such as patients waiting time and obtain an optimal scheduling policy. However, in order to be useful for the person in charge of scheduling, this system should be very flexible and also should be able to be used by people that do not possess a mathematical or computing background.

This model is applied in an actual public hospital in Chile, the "Del Salvador" Hospital of Santiago. In our case study it was concluded that an increase of medical hours of 2%, 2.1% and 2.8% for the surgical specialities of Urology, Traumatology and Surgery respectively, could result in a decrease of 18% in the total average waiting time until its scheduling. This means, to "Del Salvador" Hospital an increase of 42,55 and 108 annual extra hours, which represents a total cost of \$2877.000 Chilean pesos per year. Hence, the results obtained from the dynamic scheduling model are relevant to that hospital but also we hope they are replicable for other medical facilities.

Keywords: Dynamic Scheduling, Medical Appointments, Markov Decision Process, Operational Research in Healthcare Services, Public Hospital.

# 1 CAPÍTULO INTRODUCTORIO

## 1.1 Motivación

Una atención en salud de calidad y asequible sigue siendo uno de los problemas más polémicos, complejos y urgentes que enfrentan los responsables políticos, las empresas y el público en general (Rouse & Cortese, 2010).

Determinar y conseguir el número adecuado de médicos en las especialidades adecuadas, en el lugar y en el momento preciso es la difícil tarea de la planificación de los recursos humanos para la salud (Grumbach, 2002).

Ser capaz de satisfacer la demanda con una capacidad limitada de servicio para pacientes ambulatorios es un importante desafío operacional (Baril et al., 2014). Es una problemática compleja, y la complejidad se agrava por la precariedad de los datos (González & Barber, 2007).

Existen diferentes problemas que afectan a los servicios de salud; tiempos de atención variables, especialmente cuando se atienden múltiples patologías, atributos del pacientes tales como la edad, avance de la enfermedad, entre otros, pueden afectar la duración del servicio (Gupta & Denton, 2008). Por otra parte, largos tiempos de espera aumentan la probabilidad de que los pacientes no asistan el día que les fue agendado (Gallucci et al., 2005), (Liu, N., 2009).

Es por esto que un sistema de agendamiento bien diseñado permite entregar acceso oportuno y conveniente a los servicios de salud a todos los pacientes, ajustando la oferta con la demanda (Gupta & Denton, 2008). A su vez, una correcta asignación de

citas permite reducir los tiempos de espera por atención, mientras incentiva un mejor comportamiento tanto de médicos como de pacientes (Vissers,1979).

## **1.2 Descripción del problema**

La salud pública a nivel mundial presenta diversos problemas en términos de desempeño, reflejados en largas listas de espera y prolongados tiempos de espera de atención médica (Bloom & Fendrick, 1987).

El sistema de salud público Chileno no es la excepción, observándose los mismos problemas. En él se atiende un 75% del total de la población nacional, lo que corresponde a aproximadamente 13 millones de personas.

Para la programación de citas se debe considerar los distintos tipos de pacientes que atiende el hospital con sus prioridades de atención. Pacientes derivados del servicio de urgencia poseen prioridad de atención frente a pacientes provenientes de Atención Primaria. Del mismo modo, se podría dar preferencia de atención a pacientes de Atención Primaria con diagnósticos de mayor gravedad, con riesgo vital, por ejemplo: distintos cánceres, diabetes mellitus, enfermedad de Parkinson, etc. De acuerdo a esto, un primer punto a considerar es la priorización en la atención, considerando por ejemplo, plazos máximos de atención sin que se ponga en riesgo la salud del paciente y/o su posterior recuperación. Priorización que se hace necesaria dada la capacidad limitada de atención que no permite, aun cuándo se quisiera, dar atención a los pacientes inmediatamente luego de que han solicitado la cita médica (Alcalde, et al., 2002).

Una de las principales causas de los tiempos de espera en centros de atención es la ausencia de métodos de agendamiento bien diseñados (Vissers, 1979). El aporte de este trabajo es el diseño de un sistema de programación de citas capaz de reducir los tiempos de espera de pacientes en los centros hospitalarios.

### **1.3 Hipótesis**

Mediante la implementación de una metodología de agendamiento generada a partir de un modelo de optimización dinámico es posible obtener reducciones en el tiempo medio de espera de los pacientes. De esta manera, se podrá reducir la cantidad de pacientes que aguardan por una cita médica al aumentar el desempeño del sistema, solo aumentando en una pequeña porción las horas extras médicas de especialistas.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo principal**

El objetivo principal de este trabajo consiste en el desarrollo de una metodología de diseño de agendamiento para citas médicas de pacientes ambulatorios, identificando la posibilidad que los pacientes puedan no asistir a su cita médica, aplicado a un centro hospitalario real. De esta manera, se permite utilizar los recursos disponibles de manera óptima, al disminuir los tiempos de espera de pacientes y la cantidad de pacientes en lista de espera.

#### **1.4.2 Objetivo secundario**

Dentro de los objetivos secundarios se encuentra realizar un levantamiento de procesos en el Hospital del Salvador, Chile. Identificar los puntos de conflicto del sistema y definir los indicadores para evaluar el desempeño del problema.

A su vez, la elaboración de un modelo de optimización dinámico para el agendamiento de citas médicas para cada paciente, basándose en la agenda actual de las citas.

Luego, mediante herramientas de simulación, contrastar resultados obtenidos a partir de la metodología propuesta con los presentados por la metodología actualmente utilizada en el centro hospitalario real, Hospital del Salvador de Santiago de Chile, específicamente para el Policlínico de especialidades quirúrgicas. Dado que la investigación se enmarca en la realidad de un ambiente hospitalario, es posible obtener datos reales con los cuales estudiar la efectividad de la metodología propuesta, evaluando el nivel de mejora en el desempeño hospitalario, especialmente a través del indicador de la reducción de los tiempos de espera para la atención médica.

Por último, a partir de los resultados del modelo, elaborar políticas de agendamiento para la implementación del modelo descrito y generar pautas de contratación de especialistas médicos a implementar en el ambiente hospitalario.

### **1.5 Resultados esperados**

Se espera generar una política de agendamiento de citas médicas basada en los resultados entregados por un modelo de optimización dinámico y los resultados de su

simulación. De este modo, categorizar a los pacientes, conteniendo la aleatoriedad propia del ambiente hospitalario y la dinámica de planificación diaria de la agenda. A través de diferentes escenarios de simulación para largos períodos de tiempo, se permitirá hacer visible el desempeño del hospital frente a diversas políticas de agendamiento. De esta manera, el agendamiento de citas médicas permitirá dar una mejor calidad de servicio, disminuyendo el tiempo de espera en la atención y ordenando la planificación a largo plazo.

## **1.6 Revisión bibliográfica**

### **1.6.1 Revisión bibliográfica agendamiento de citas médicas**

Comenzando con el trabajo pionero de Bailey (1952), ha habido una extensa investigación en el agendamiento de pacientes ambulatorios en los sistemas de atención de salud.

El agendamiento de citas en los sistemas de salud se usa para regular la demanda y la oferta, es decir, las solicitudes de citas médicas de parte de los pacientes y la capacidad de servicio de los proveedores de salud, respectivamente (Liu, N., 2009). Por su parte, los proveedores de los servicios de salud se encuentran bajo enorme presión para reducir costos y mejorar la calidad del servicio entregado (Cayirli, T., & Veral, E., 2003).

Los sistemas de citas tienen dos objetivos principales: entregar un mejor servicio a los pacientes a través de la asignación de pequeñas ventanas de tiempo durante las cuales se les garantiza que serán atendidos y proteger el sistema de las

fluctuaciones diarias en la demanda, las que puede llevar a un sistema ineficiente, con bajos niveles de utilización en algunos días y sobrecargas en otros (Nau Liu, 2009).

La literatura en el área de investigación de operaciones sobre el agendamiento de citas médicas ambulatorias es extensa. Puede dividirse en dos grandes categorías: el agendamiento estático y el dinámico. En el caso del agendamiento estático, todas las decisiones deben tomarse antes del comienzo de la sesión médica. Es decir, el agendamiento a realizar es a priori. Este tipo es el que más frecuentemente se utiliza en los sistemas de salud y por esto, la mayoría de la literatura se concentra en él. Por otra parte, en menor medida se trata el agendamiento dinámico. Para este caso, a lo largo del curso del día, el agendamiento de llegadas futuras se actualiza continuamente basado en el estado actual del sistema (Fries & Marathe, 1981), (Liao, Pegden, & Rosenshine 1993), (Liu & Liu, 1998b).

Por otra parte, existe una clasificación que se hace con respecto a la programación de citas que es en relación al tipo de espera modelado: directo o indirecto (Gupta & Denton, 2008). Los tiempos directos de espera se definen como los tiempos que los pacientes esperan en la clínica el día de su cita, desde su llegada hasta que son atendidos. Por su parte los tiempos indirectos corresponden a los tiempos entre los días que los pacientes piden una cita y los días reales en que se realiza.

El diseño de los sistemas de agendamiento de citas médicas se puede dividir en una serie de decisiones respecto a: (1) las reglas de citas, (2) el uso de la clasificación de los pacientes y (3) los ajustes que se realizan para reducir los efectos disruptivos de los

pacientes espontáneos, la no asistencia de pacientes y/o los pacientes urgentes (Cayirli & Veral, 2003).

Dentro del agendamiento diario existen dos extremos en el espectro de las políticas de planificación. Por un lado está *Open Access*, que lleva a tasas de inasistencia mínimas a expensas de frecuentes y/o severas sobrecargas diarias y por otro lado, se encuentra la política que suaviza la carga de trabajo entre los días, de manera que las sobrecargas diarias se mantienen en un mínimo, lo que sin embargo, causa que las clínicas sufran de los inevitables casos de inasistencias (Liu, 2009).

La política de *Open Access* consiste en agendar a los pacientes para el día que ellos deseen ser atendidos (Murray & Tantau, 2000), logrando aumentar la satisfacción de los pacientes (Kennedy & Hsu, 2003). Sin embargo, en el caso de estudio presentado no sería lo más adecuado, debido a que como exponen Mondschein & Weintraub (2002), Robinson & Chen (2008) y Liu et al. (2010) en sus trabajos donde se compara el rendimiento del *Open Access* versus el del sistema tradicional de agendamiento de citas y a través de análisis numéricos concluyen que en situaciones de alta demanda, como es el caso de estudio presentado en esta Tesis, la política de "*Open Access*" no es la óptima.

Sin embargo, el agendamiento de citas no resuelve todas las incertidumbres de la demanda diaria. La inasistencia de los pacientes a sus citas médicas provoca problemas importantes para los administradores de los servicios de salud (Cayirli, T., & Veral, E., 2003). Altas tasas de inasistencia y cancelaciones introducen capas adicionales de incertidumbre y pueden causar severas ineficiencias si no se tratan adecuadamente

(Nau Liu, 2009). Varios artículos que no son parte de la literatura de investigación operativa, han estudiado este problema y encontraron que la tasa de inasistencia depende de una variedad de factores donde se incluye la raza, el género, la edad, el nivel socioeconómico, entre otros (Oppenheim et al., 1979), (Pesata et al., 1999), (Moore et al., 2001), (Gallucci et al., 2005).

Más aún, investigaciones anteriores muestran que cuánto mayor es el retraso de la cita, definido como el tiempo entre el día que el paciente pide una cita y el día en que se agenda su cita, mayor será la posibilidad de que cancele o no asista a la cita (Gallucci et al., 2005). Es decir, entre mayor sea el tiempo de espera indirecto, mayor será la probabilidad de inasistencia del paciente a su cita médica. Estas conclusiones también fueron encontradas y confirmadas con el trabajo más reciente de Liu (2009).

Como se discute en (Gupta & Denton, 2008), los tiempos de espera indirectos, las cancelaciones de última hora y las inasistencias permanecen en gran parte como desafíos abiertos de investigación, y en particular ningún trabajo anterior, ha estudiado explícitamente las decisiones de programación de citas en un modelo que relacione las decisiones de horas extras con las tasas de inasistencia y/o de cancelación.

### **1.6.2 Revisión bibliográfica agendamiento dinámico**

En el agendamiento dinámico las decisiones de planificación deben ser tomadas cada día. En este sentido, este tipo de agendamiento toma en consideración variables sujetas a eventos aleatorios (Weber, s.f). Se considera que el agendamiento dinámico

reporta beneficios tanto económicos como operacionales, por lo cual es utilizado en distintos sectores industriales.

Un ejemplo de lo anterior es la industria del transporte, donde es usado para ajustar la fecha y hora de la salida de aviones comerciales según la demanda de pasajeros y así aumentar el margen neto de ingresos (Warburg et al., 2008), (Jiang & Barnhart, 2009), para actualizar el horario de detención en las paradas de buses con el objetivo de optimizar la frecuencia de éstos (Naumann et al. 2011; Wagale et al., 2013). Además este tipo de agendamiento se usa para la coordinación del personal, tomando en consideración días libres, trabajos de medio tiempo y turnos de trabajo (Ernst et al., 2004; Van den Bergh et al., 2013). También es aplicada en problemas de ruteo, secuenciamiento de máquinas, control de inventario, entre otros.

En el área de la salud, el agendamiento dinámico se utiliza para la coordinación del staff médico y las citas médicas a lo largo de una jornada laboral (Gupta y Denton, 2008), (Ogulata et al., 2008), (Sauré et al., 2012). Siguiendo en el área sanitaria, es usado para coordinar al personal disponible y a los pacientes a lo largo de una jornada laboral (Warner, 1979), y para programar los servicios prestados en un determinado centro médico (Robinson & Chen, 2003), (Griffiths et al., 2012), (Syam & Côté, 2012). De esta manera es posible maximizar la cantidad de pacientes atendidos, equilibrar la carga laboral entre especialistas y minimizar los tiempos de espera y tiempos ociosos.

Muy pocos artículos tratan con tiempos de espera indirectos, que corresponden a los atrasos en las citas en este capítulo, y que se refieren a los tiempos entre los días que los pacientes piden una cita y los días reales de la cita. En (Gupta & Denton, 2008)

señalan varias dificultades en el modelamiento del tiempo indirecto, que puede ser parte del motivo por el cual ha sido bastante limitada. Artículos existentes normalmente se enfocan en la pregunta de cuántos pacientes aceptar o si aceptar o no un paciente en un día particular dado el estado del sistema. Este paper también pertenece a esta corriente de investigación dado que trabaja con los tiempos indirectos de espera de los pacientes.

En (Patrick et al., 2008) se estudia un problema de programación dinámico de pacientes con múltiples prioridades y se desarrollan políticas de agendamiento costo-efectivas que responden a los objetivos de tiempo de espera para los pacientes. En la misma línea de categorización de pacientes, donde se permite ordenarlos y priorizarlos de acuerdo a sus características, Robinson & Chen (2010) proponen un modelo de agendamiento que prioriza a los pacientes de acuerdo a su gravedad. De este modo se disminuye el tiempo de espera de cada paciente según su propio estado de salud. En (Tang et al., 2014) se extiende el modelo propuesto por Robinson & Chen (2010) y se propone un modelo de agendamiento de pacientes urgentes y de rutina. De esta manera se minimiza la suma ponderada del tiempo medio de espera de cada paciente, usando la posibilidad de realizar horas de sobrecupos para los pacientes, lo que permite disminuir los tiempos de espera y las tasas de cancelación e inasistencia de los pacientes. Otro estudio, (Gupta & Wang, 2008) plantea un problema de administración de capacidad clínica usando un modelo donde las preferencias de los pacientes sobre el médico y el tiempo son formulados explícitamente. La decisión es si aceptar o no una solicitud de cita a su llegada, y el objetivo es maximizar el beneficio obtenido en un día dado. En

(Nau Liu, 2009) se expone un modelo de agendamiento dinámico de pacientes con tasas de no asistencia y tasas de cancelación de citas, para pacientes de un solo tipo con probabilidades de no asistencia y de cancelación de citas homogéneas y también para pacientes de múltiples tipos. Este trabajo es similar al expuesto en este paper, pero difiere en que asume que se tiene disponibilidad de los datos de la tasa de cancelación de citas de pacientes, que en el caso de estudio no aplica. Además, el supuesto que utilizan para los pacientes de múltiples tipos que se diferencian en las distribuciones de probabilidad de no asistencia y de cancelación asociadas a cada uno, no es adecuado en el caso de estudio, ya que la tasa de cancelación no existe en el hospital.

Otro trabajo más reciente de agendamiento dinámico para citas médicas de pacientes ambulatorios es el de Feldman, Liu, Topaloglu & Ziya (2014), donde el agendamiento que proponen toma en cuenta las preferencias de los pacientes de cuándo quieren tener su cita y ésta es considerada en el modelo.

En (Liu, N., Ziya, S., & Kulkarni, V. G., 2010) se propone un agendamiento dinámico de pacientes con tasas de no asistencia y de cancelación de citas. Se concluye que la política de *Open Access* es adecuada para los casos en que la carga de pacientes sea relativamente baja, y al menos en donde la demanda y la oferta deben estar “balanceadas”. Este trabajo también va en línea con el propuesto en esta tesis, pero difiere en que la oferta y demanda no se encuentran en balance y la carga de pacientes es muy grande en comparación a la capacidad. Por lo tanto, la política de *Open Access* propuesta por (Liu, N., Ziya, S., & Kulkarni, V. G., 2010) de ser aplicada no sería la óptima dadas sus propias conclusiones.

Un trabajos más reciente, (Truong, V. A., 2015) plantea un modelo de pacientes de dos tipos; uno de demanda urgente que debe ser atendido el mismo día de su llegada y otro de demanda regular que puede ser atendido en una fecha en el futuro. Este trabajo se diferencia del trabajo realizado aquí, debido a que en el caso de estudio no existen pacientes con urgencia de ser atendidos el mismo día, por lo cual se tiene una mayor flexibilidad.

### **1.6.3 Revisión bibliográfica simulación**

La literatura expone múltiples ejemplos del uso de modelos de simulación para la resolución de problemáticas con componentes dinámicas y estocásticas. Esto se debe a la capacidad de la simulación para la creación y resolución de problemas que se asemejan bastante a la realidad, a diferencia de otros modelos, como modelos de optimización matemática, que son menos flexibles en cuanto a niveles de variabilidad, creación de escenarios posibles y complejidad del problema.

Específicamente, la proliferación de modelos de simulación en el dominio de la investigación médica y la gestión de los servicios de salud es evidente (Brenner et al., 2010). Este crecimiento se debe a la capacidad de apalancamiento de estos modelos de simulación para abordar problemas complejos que no pueden ser atendidos por los sistemas de apoyo a las decisiones (Almagooshi , 2015).

Además ha habido muchos avances en la simulación de eventos discretos, muy en línea con la evolución de la informática (Robinson, 2005).

Los sistemas de simulación que han sido diseñados e implementados en el sistema de salud se han interesado en diferentes problemas operativos como en la asignación de los recursos humanos en todo el hospital (Jones & Evans, 2008) (Bonabeau, 2002) o en la admisión de los pacientes (Hutzschenreuter, 2008).

También se han realizado estudios de pruebas de simulación para la programación de doctores, analizar los impactos correspondientes en la atención de pacientes y la utilización de recursos (Kumar et al., 1989) (Rossetti et al., 1999), entre otros.

A pesar de lo anterior, sumado que ha habido intentos de formalizar los procesos de simulación creando marcos de referencia (Sadowski & Grabau, 1999) (Shannon, 1998), sigue disperso el conocimiento que contiene las mejores prácticas en el diseño y desarrollo de modelos de simulación para los sistemas de salud. Es necesario un estudio que junte los datos sobre mercados de médicos y ofrezca un análisis de la situación actual por especialidades (González & Barber, 2007).

## **1.7 Metodología**

El agendamiento de citas médicas es el proceso mediante el cual la capacidad de atención disponible es asignada a la demanda entrante. Cada día las personas encargadas de agendar reciben solicitudes de diversas fuentes y con distintas características. Su trabajo es asignar los recursos de manera óptima. No obstante, al existir diversos tipos de pacientes solicitando atención y frente al desconocimiento de la demanda futura, el modelo de agendamiento presentado en este trabajo permite

establecer una política de agendamiento de acuerdo a la demanda diaria que recibe el hospital.

### **1.7.1 Diagnóstico del problema de agendamiento**

En este trabajo se propone un enfoque para resolver el problema de agendamiento de pacientes en los sistemas sanitarios, especialmente para aquellos que no pueden implementar la política de *Open Access*. El agendamiento de citas médicas para pacientes ambulatorios tiene lugar en la mayoría de los centros de salud del mundo, sin embargo la investigación realizada se basa en la realidad del Hospital del Salvador de Santiago de Chile.

Las excesivas listas de espera y tiempos que deben aguardar los pacientes por una atención médica en nuestro país llevaron a que el gobierno creara el plan GES<sup>1</sup>. Éste consiste en un listado de 80 enfermedades, donde se establece para cada una de ellas: plazos máximos para la atención, para la aplicación de un procedimiento, como por ejemplo, una cirugía y para su posterior recuperación.

Sin embargo, la alta demanda, la escasez de recursos y la complejidad del sistema, dificultan el cumplimiento de éstas metas sanitarias (Leiva, 2010).

### **1.7.2 Caso de estudio: Hospital del Salvador**

El presente estudio se llevó a cabo en el Hospital del Salvador de Santiago de Chile. Este hospital perteneciente a la red pública, es uno de los más importantes a

---

<sup>1</sup> Garantías Explícitas en Salud. Semejante al Acceso Universal de Garantía explícitas (AUGE).

nivel nacional. Además, el hospital del Salvador, es centro de referencia a nivel nacional de varias especialidades, siendo la más predominante en la atención a pacientes infantiles de alta complejidad. Se encuentra situado en la Región Metropolitana, en la comuna de Providencia y pertenece al Servicio de Salud Metropolitano Oriente, atendiendo pacientes de las comunas de La Reina, Las Condes, Lo Barnechea, Macul, Ñuñoa, Peñalolen, Vitacura y Providencia. Además sirve a pacientes de alta complejidad derivados de otros centros de salud provenientes de diversas regiones del país y aquellos derivados de servicios de urgencias.

La realización de esta investigación abarca las atenciones ambulatorias con médicos especialistas en áreas quirúrgicas, del Policlínico de Especialidades Quirúrgicas del Hospital del Salvador. Éste es uno de los más grandes en términos de volumen de atención y está compuesto por las especialidades quirúrgicas de Urología, Traumatología y Cirugía. Por otra parte, este policlínico es crítico, pues presenta una de las mayores listas de esperas de pacientes por atenciones de citas médicas con especialistas. Para el caso de las atenciones ambulatorias, los recursos limitantes del sistema son los especialistas médicos. Por lo tanto, es primordial utilizar los recursos escasos de la manera más adecuada posible.

En la programación de citas ambulatorias encontramos dos grandes fuentes de flujos de pacientes: los pacientes nuevos que vienen derivados desde los consultorios de Atención Primaria y los pacientes control o recurrentes que ya fueron atendidos por un especialista en el hospital y requieren de una nueva cita. Se presentan además otros flujos pequeños de pacientes que provienen del servicio de urgencias, pacientes de

ingreso externo que provienen derivados de otros centros de atención de diversas regiones y pacientes provenientes de otras unidades del mismo Hospital del Salvador. Todos estos pacientes generan atenciones que no pertenecen a la práctica formal del hospital, pero que de igual manera es aceptada en algunos casos.

Los pacientes derivados de los consultorios de atención primaria presentan una categorización en términos de la gravedad de su patología. Se designa un paciente categoría 1, 2 y 3 representando a pacientes de alta, mediana y baja gravedad respectivamente. Los pacientes de alta gravedad, por ejemplo, son aquellos diagnosticados con algún tipo de enfermedad grave como cáncer. Además los pacientes vienen clasificados como pacientes que pertenecen o no al GES. Este tipo de pacientes se encuentran ingresados al sistema, por lo que conforman la lista de espera. Por otra parte los pacientes recurrentes son pacientes que ya tuvieron una cita médica y vienen luego a agendar su próxima cita definida por el médico tratante. Es decir, son pacientes control que piden la hora médica directamente en el hospital. Éstos pacientes también pueden ser pacientes de llegada espontánea que esperan en el hospital por un sobrecupo.

El proceso de agendamiento actual de horas médicas consiste en la apertura de la agenda para un horizonte de tiempo de 3 meses. Al transcurrir un mes, la agenda se abre nuevamente un mes adicional y así sucesivamente. Por otro lado, por decreto ministerial, se debe agendar un 70% de las horas totales a pacientes control y un 30% a pacientes nuevos. Además, en el Hospital del Salvador se agenda a 4 personas por hora cronológica, es decir, cada sesión de la cita médica debe durar 15 minutos.

El aporte de esta investigación es el diseño de un agendamiento dinámico de citas ambulatorias con especialistas médicos para el Policlínico de Especialidades Quirúrgicas del Hospital del Salvador, que reduzca los tiempos de espera de pacientes. Se espera además que este trabajo se replique en las otras especialidades médicas del hospital y, más aún, en los distintos recintos de salud a lo largo de nuestro país.

### **Situación actual a nivel nacional**

En Chile existe un total de 35.898 médicos cirujanos<sup>2</sup> inscritos en el Registro Nacional de Prestaciones Individuales de la Superintendencia de Salud entre el sector público y privado. Esto representa un índice de 1,79 médicos por cada 1.000 habitantes<sup>2</sup>. En la Figura 1 podemos ver la evolución del número de especialistas en Chile.

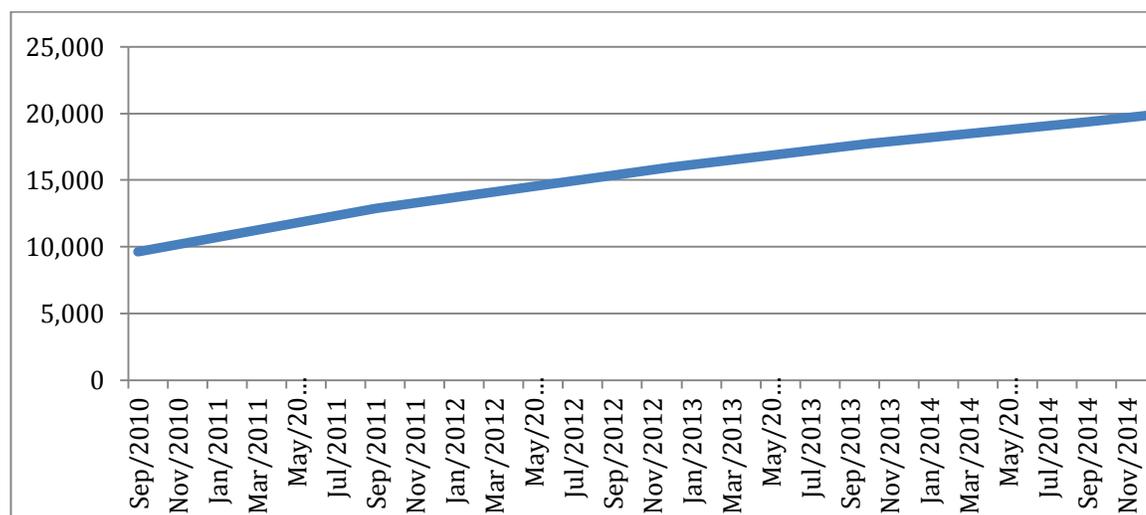


Figura 1: Número de médicos especialistas en Chile inscritos en el Registro Nacional de Prestaciones Individuales de la Superintendencia de Salud<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Fuente: Ministerio de salud. Diciembre 2014.

De la Figura 1, se observa un incremento importante de la oferta médica entre los años 2010 y 2014. Esto tiene relación, entre otros factores, con el incremento del número de universidades Chilenas que imparten esta carrera. En 2015, en Chile se registró que un total de 22 escuelas universitarias imparten la carrera de medicina general, recibiendo alumnos cada año<sup>3</sup>.

Sin embargo, a pesar de la mayor oferta total de médicos, solo un 44% de ellos se desempeña en el sector público: en los distintos servicios sanitarios y consultorios de Atención Primaria<sup>4</sup>.

Para las especialidades quirúrgicas de urología, traumatología y cirugía que se abordan en este trabajo, la cantidad de especialistas totales a nivel país, se aprecian en la Tabla 1 .

Tabla 1 : Número total de médicos especialistas en Chile inscritos en el Registro Nacional de Prestaciones Individuales de la Superintendencia de Salud y número de médicos especialistas de los Servicios de salud certificados al 30 septiembre de 2014<sup>4</sup>.

Especialidades	Número de médicos especialistas inscritos.	Número de médicos especialistas de los servicios de salud certificados.
Quirúrgicas		
Urología	411	203
Traumatología	1234	535
Cirugía General	1311	694

<sup>3</sup> Fuente: Asociación de Facultades de Medicina de Chile.

<sup>4</sup> Fuente: Ministerio de salud. Diciembre 2014.

El Sistema de Salud Público Chileno presenta largas listas de espera debido a que la demanda hospitalaria, ya sean consultas con médicos especialistas o consultas para tratamientos y cirugías, supera la oferta de los hospitales. Para el caso de consultas ambulatorias con especialistas médicos el recurso cuello de botella son los especialistas médicos. A nivel país las listas de espera han sido tema importante en los proyectos y agendas gubernamentales. Es por esto que en 2005 entra en vigencia la Ley de Garantías Explícitas en Salud (AUGE). Éste programa es creado para poner plazos máximos en la atención de pacientes dependiendo de su enfermedad a partir de una lista de enfermedades decretadas por las autoridades. Comenzó siendo un programa de pocas enfermedades y luego se fueron agregando más al listado, llegando hoy a un número de 80 enfermedades.

Uno de los problemas del plan AUGE es que los hospitales públicos no tienen, en la gran mayoría de los casos, capacidad suficiente para atender de manera oportuna la gran demanda y, por consiguiente, de cumplir con los plazos exigidos, por lo que se ven en la obligación de enviarlos al extrasistema, incurriendo en altos gastos económicos. Otro problema importante es que si un paciente tiene una patología que no se encuentra en el plan GES, para el caso de consultas ambulatorias con especialistas médicos en el Hospital del Salvador, su agendamiento será postergado, a menos que sea una persona de alta gravedad.

### **Situación actual Caso de estudio: Hospital del Salvador**

Las listas de espera de pacientes que aguardan por una hora médica son extensas. En el Hospital del Salvador, existen pacientes que esperan por una consulta médica desde el año 2011<sup>5</sup>. Por lo tanto, es un problema que debe ser resuelto con urgencia, ya que a mayor tiempo de espera se corre el riesgo de que los pacientes agraven su enfermedad. Una atención oportuna mejora la calidad de vida de las personas y del país. Por otra parte, a mayor espera en la atención de pacientes, existe una mayor probabilidad de que se ausenten a su cita médica (Gallucci et al., 2005), (Nau Liu, 2009), lo que es desfavorable para el hospital, ya que no se está utilizando de manera óptima el recurso limitante.

El caso de estudio son las especialidades quirúrgicas de Cirugía, Urología y Traumatología. Las listas de espera de pacientes por atención ambulatoria con especialistas médicos que corresponden a estas áreas para el caso del Hospital del Salvador se muestran en la Figura 2.

---

<sup>5</sup> Fuente: Boletín estadístico 2015, Hospital del Salvador.

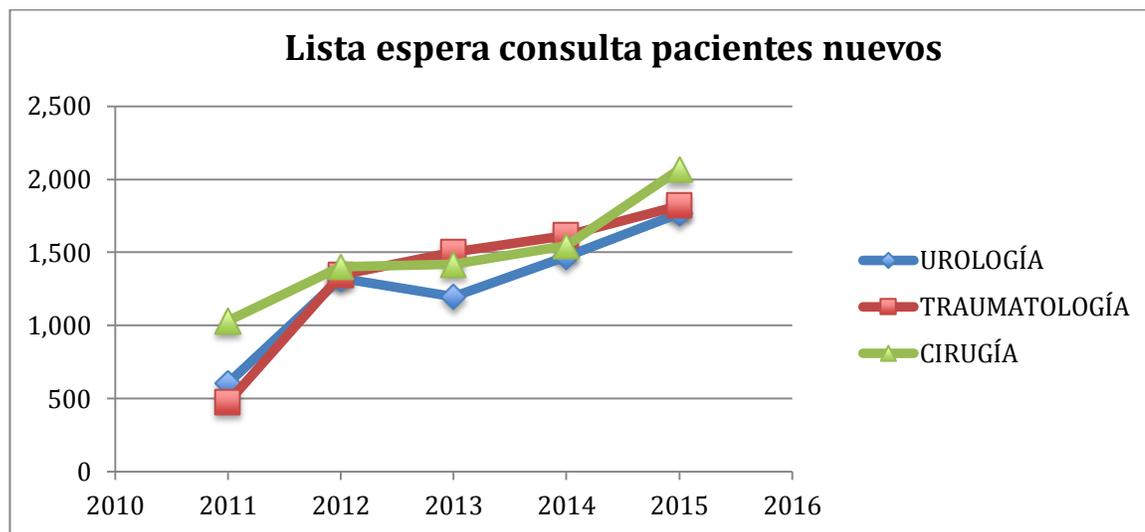


Figura 2: Lista de espera consulta pacientes nuevos con especialista médicos a diciembre 2015. Fuente: Boletín estadístico 2015.

En la Figura 2 se muestra a cantidad de personas que a la fecha de diciembre de 2015, ingresaron en la lista de espera en cada año. Por ejemplo, en la lista de espera de traumatología había 500 personas en diciembre del 2015 que se inscribieron en la lista de espera el año 2011. Como se observa, la cantidad de personas en las listas de espera de pacientes nuevos ambulatorios es considerable y existen pacientes esperando por una atención desde el año 2011 para las tres especialidades.

Se puede observar el comportamiento de las listas de espera en la Figura 3, para el total de pacientes nuevos en los años 2014 y 2015 de las especialidades en cuestión. Como es posible apreciar, la lista de espera total ha aumentado en las especialidades de Urología y Traumatología. En Cirugía se mantuvo constante.

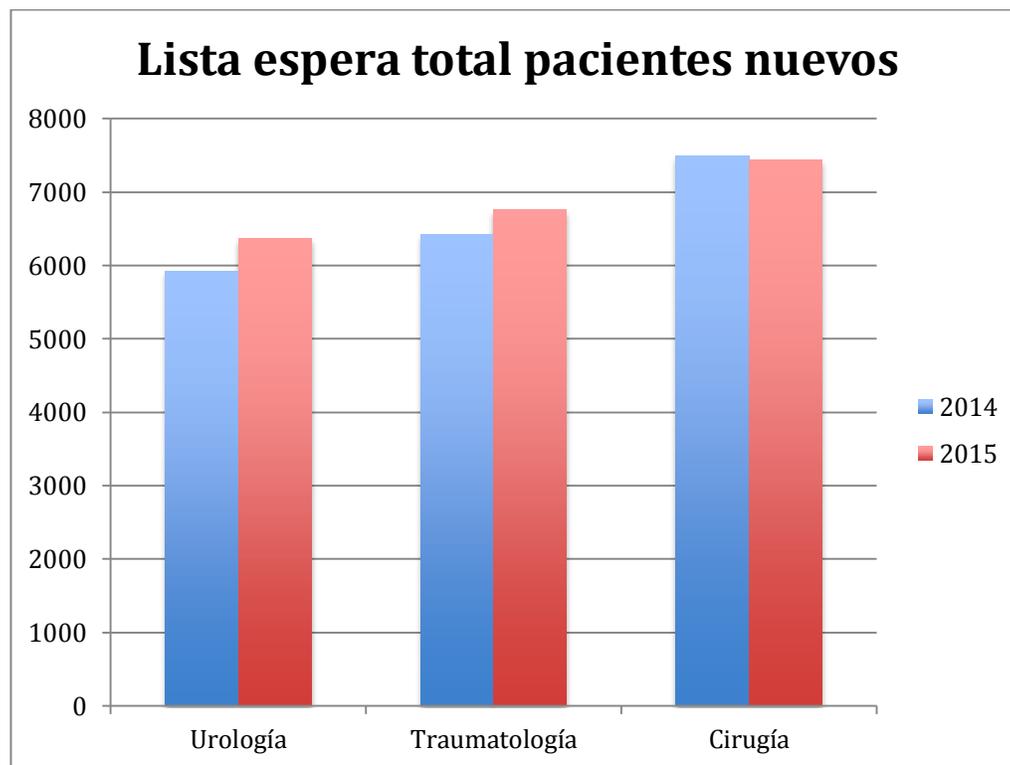


Figura 3. Lista de espera total de pacientes nuevos para consultas ambulatorias con especialistas médicos. Fuente: Boletines estadísticos 2014 y 2015.

Por otro lado, la evolución de las citas médicas totales realizadas, es decir, la suma de consultas médicas realizadas a pacientes control y pacientes nuevos se puede observar en la Figura 4.

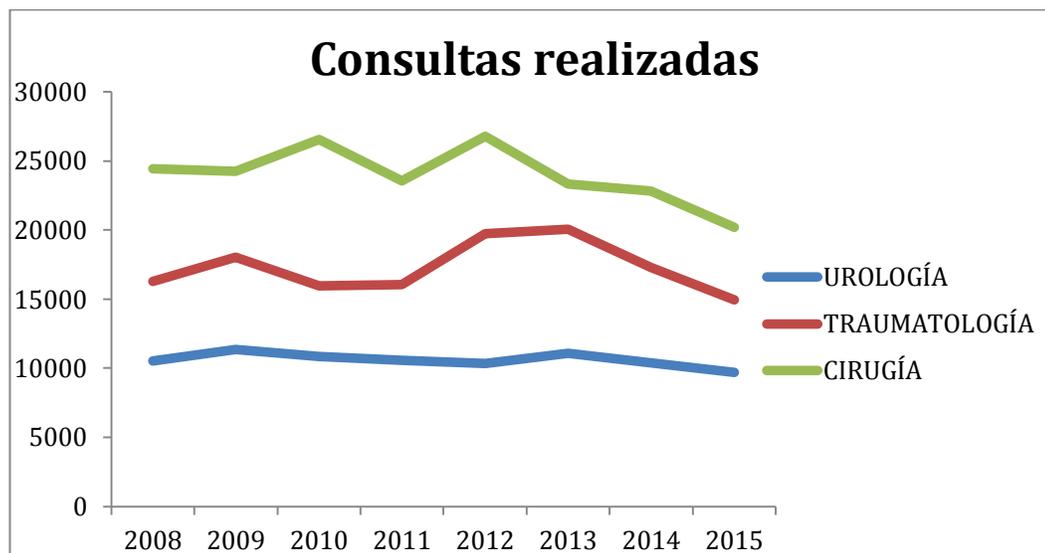


Figura 4: Evolución de consultas totales realizadas.

Fuente: Boletines Estadísticos del 2008 al 2015.

Se observa en Figura 4 que la cantidad de consultas realizadas han disminuido en los últimos años. Es decir, se han atendido menos pacientes a partir del 2013 en adelante. Esto puede atribuirse a un aumento de la demanda en comparación a la oferta de horas médicas.

### Recursos

En el Policlínico de especialidades quirúrgicas del Hospital del Salvador se dispone de una cierta cantidad de box de atención por especialidad: 11, 5 y 5 para Cirugía, Urología y Traumatología, respectivamente.

La cantidad de médicos especialistas en el Hospital del Salvador para cada especialidad quirúrgica correspondiente para el año 2015, junto con el número de horas médicas totales disponibles semanales para atención directa de pacientes nuevos y control se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Cantidad médicos especialistas y horas disponibles de atención. Fuente: Enfermeras y secretarias del Hospital del Salvador.

Especialidad	Número de especialistas	Horas médicas disponibles semanales para atención directa
Urología	15	230
Traumatología	21	266
Cirugía	53	454

Cada médico está contratado por una cantidad de horas semanales. Para el caso de Urología y Cirugía pueden ser 11 , 22 o 33 horas de contrato. Para Traumatología pueden ser 11 o 22 horas de contrato. Las horas de contrato se dividen en horas de consulta directa a pacientes y en otras actividades<sup>6</sup> (indirectas).

### **Indicadores y resultados esperados**

Como medidas de desempeño del modelo de optimización dinámico y la simulación tenemos los indicadores siguientes:

- Tiempo de espera medio por cada prioridad de paciente
- Lista de espera por prioridad de paciente

---

<sup>6</sup> Las horas de consulta directa a pacientes se subdivide en horas de consulta a pacientes nuevos y de control, visita en sala, intervenciones quirúrgicas, interconsultas y procedimientos. Las horas indirectas por su parte se refieren a las horas administrativas, las de docencia, las reuniones clínicas, perfeccionamiento y otras reuniones.

## **1.8 Conclusiones**

En este trabajo se presentó la formulación de un modelo de optimización dinámico, basado en un Proceso de Decisión Markoviano de horizonte infinito con una cantidad intratable de estados y acciones para el agendamiento de citas médicas de pacientes. La aproximación de la función objetivo de cada estado a través de una estructura afín permite generar un modelo para el agendamiento de las citas médicas que toma en consideración la demanda futura.

La política de agendamiento generada permite la implementación en el centro hospitalario de manera simple y manejable en la práctica, asegurando que se utilice al máximo el recurso limitante. De la misma manera, los resultados obtenidos permiten saber y por lo tanto protocolizar el tiempo tendrán que esperar los pacientes hasta ser atendidos. Esto permite al hospital adaptar la planificación actual y tomar mejores decisiones en el futuro, justificando por ejemplo la contratación de más horas médicas. A su vez, desde la perspectiva del paciente, el conocimiento del tiempo de espera mejora la percepción del que espera tal como se plantea en (Larson,1987).

## **2 UN PROCESO DE DECISIÓN MARKOVIANO PARA EL AGENDAMIENTO DINÁMICO DE CITAS MÉDICAS**

### **2.1 Introducción**

El clima actual en el área de los sistemas de salud demanda cada vez más eficiencia y satisfacción para los pacientes en las prestaciones de atención médica. Ambas demandas se intersectan en el agendamiento de las citas de atención ambulatoria.

Esta sección de la investigación usa medidas relacionadas con los doctores y con los pacientes para evaluar el desempeño de la atención ambulatoria e investigar la interacción entre los elementos del sistema de citas y las características del panel de pacientes a través de sus prioridades, por ejemplo. El análisis de la metodología de optimización dinámica propuesta involucra la simulación del agendamiento de las sesiones clínicas. Por otra parte, factores ambientales afectan los resultados teóricos que no los consideran en los modelos matemáticos, por lo que difieren de los resultados observados en la realidad. Debido a esto, se muestra que la simulación puede ser más provechosa en esas circunstancias ( Babes & Sarma, 1991).

## **2.2 Revisión bibliográfica**

### **Revisión bibliográfica agendamiento de citas médicas**

Comenzando con el trabajo pionero de (Bailey, 1952), ha habido una extensa investigación en el agendamiento de pacientes ambulatorios en los sistemas de atención de salud.

El agendamiento de citas en los sistemas de salud se usa para regular la demanda y la oferta, es decir, las solicitudes de citas médicas de parte de los pacientes y la capacidad de servicio de los proveedores de salud, respectivamente (Nau Liu, 2009). Por su parte, los proveedores de los servicios de salud se encuentran bajo enorme presión para reducir costos y mejorar la calidad del servicio entregado (Cayirli, T., & Veral, E. , 2003).

Los sistemas de citas tienen dos objetivos principales: entregar un mejor servicio a los pacientes a través de la asignación de pequeñas ventanas de tiempo durante las cuales se les garantiza que serán atendidos y proteger el sistema de las fluctuaciones diarias en la demanda, las que puede llevar a un sistema ineficiente, con bajos niveles de utilización en algunos días y sobrecargas en otros (Nau Liu, 2009).

La literatura en el área de investigación de operaciones sobre el agendamiento de citas médicas ambulatorias es extensa. Puede dividirse en dos grandes categorías: el agendamiento estático y el dinámico. En el caso del agendamiento estático, todas las decisiones deben tomarse antes del comienzo de la sesión médica. Es decir, el agendamiento a realizar es a priori. Este tipo es el que más frecuentemente se utiliza en los sistemas de salud y por esto, la mayoría de la literatura se concentra en él. Por otra

parte, en menor medida se trata el agendamiento dinámico. Para este caso, a lo largo del curso del día, el agendamiento de llegadas futuras se actualiza continuamente basado en el estado actual del sistema (Fries & Marathe, 1981), (Liao, Pegden, & Rosenshine 1993), (Liu & Liu, 1998b).

Por otra parte, existe una clasificación que se hace con respecto a la programación de citas que es en relación al tipo de espera modelado: directo o indirecto (Gupta & Denton, 2008). Los tiempos directos de espera se definen como los tiempos que los pacientes esperan en la clínica el día de su cita, desde su llegada hasta que son atendidos. Por su parte los tiempos indirectos corresponden a los tiempos entre los días que los pacientes piden una cita y los días reales en que se realiza.

El diseño de los sistemas de agendamiento de citas médicas se puede dividir en una serie de decisiones respecto a: (1) las reglas de citas, (2) el uso de la clasificación de los pacientes y (3) los ajustes que se realizan para reducir los efectos disruptivos de los pacientes espontáneos, la no asistencia de pacientes y/o los pacientes urgentes (Cayirli & Veral, 2003).

Dentro del agendamiento diario existen dos extremos en el espectro de las políticas de planificación. Por un lado está *Open Access*, que lleva a tasas de inasistencia mínimas a expensas de frecuentes y/o severas sobrecargas diarias y por otro lado, se encuentra la política que suaviza la carga de trabajo entre los días, de manera que las sobrecargas diarias se mantienen en un mínimo, lo que sin embargo, causa que las clínicas sufran de los inevitables casos de inasistencias (Liu , 2009).

La política de *Open Access* consiste en agendar a los pacientes para el día que ellos deseen ser atendidos (Murray & Tantau, 2000), logrando aumentar la satisfacción de los pacientes (Kennedy & Hsu, 2003). Sin embargo, en el caso de estudio presentado no sería lo más adecuado, debido a que como exponen Mondschein & Weintraub (2002), Robinson & Chen (2008) y Liu et al. (2010) en sus trabajos donde se compara el rendimiento del *Open Access* versus el del sistema tradicional de agendamiento de citas y a través de análisis numéricos concluyen que en situaciones de alta demanda, como es el caso de estudio presentado en esta Tesis, la política de “*Open Access*” no es la óptima.

Sin embargo, el agendamiento de citas no resuelve todas las incertidumbres de la demanda diaria. La inasistencia de los pacientes a sus citas médicas provoca problemas importantes para los administradores de los servicios de salud (Cayirli, T., & Veral, E., 2003). Altas tasas de inasistencia y cancelaciones introducen capas adicionales de incertidumbre y pueden causar severas ineficiencias si no se tratan adecuadamente (Nau Liu, 2009). Varios artículos que no son parte de la literatura de investigación operativa, han estudiado este problema y encontraron que la tasa de inasistencia depende de una variedad de factores donde se incluye la raza, el género, la edad, el nivel socioeconómico, entre otros (Oppenheim et al., 1979), (Pesata et al., 1999), (Moore et al., 2001), (Gallucci et al., 2005).

Más aún, investigaciones anteriores muestran que cuanto mayor es el retraso de la cita, definido como el tiempo entre el día que el paciente pide una cita y el día en que se agenda su cita, mayor será la posibilidad de que cancele o no asista a la cita

(Gallucci et al., 2005). Es decir, entre mayor sea el tiempo de espera indirecto, mayor será la probabilidad de inasistencia del paciente a su cita médica. Estas conclusiones también fueron encontradas y confirmadas con el trabajo más reciente de Nau Liu, 2009.

Como se discute en (Gupta & Denton, 2008), los tiempos de espera indirectos, las cancelaciones de última hora y las inasistencias permanecen en gran parte como desafíos abiertos de investigación, y en particular ningún trabajo anterior, ha estudiado explícitamente las decisiones de programación de citas en un modelo que relacione las decisiones de horas extras con las tasas de inasistencia y/o de cancelación.

### **Revisión bibliográfica agendamiento dinámico**

En el agendamiento dinámico las decisiones de planificación deben ser tomadas cada día. En este sentido, este tipo de agendamiento toma en consideración variables sujetas a eventos aleatorios (Weber, s.f). Se considera que el agendamiento dinámico reporta beneficios tanto económicos como operacionales, por lo cual es utilizado en distintos sectores industriales.

Un ejemplo de lo anterior es la industria del transporte, donde es usado para ajustar la fecha y hora de la salida de aviones comerciales según la demanda de pasajeros y así aumentar el margen neto de ingresos (Warburg et al., 2008), (Jiang & Barnhart, 2009), para actualizar el horario de detención en las paradas de buses con el objetivo de optimizar la frecuencia de éstos (Naumann et al. 2011; Wagale et al., 2013). Además

este tipo de agendamiento se usa para la coordinación del personal, tomando en consideración días libres, trabajos de medio tiempo y turnos de trabajo (Ernst et al., 2004; Van den Bergh et al., 2013). También es aplicada en problemas de ruteo, secuenciamiento de máquinas, control de inventario, entre otros.

En el área de la salud, el agendamiento dinámico se utiliza para la coordinación del staff médico y las citas médicas a lo largo de una jornada laboral (Gupta y Denton, 2008), (Ogulata et al., 2008), (Sauré et al., 2012). Siguiendo en el área sanitaria, es usado para coordinar al personal disponible y a los pacientes a lo largo de una jornada laboral (Warner, 1979), y para programar los servicios prestados en un determinado centro médico (Robinson & Chen, 2003), (Syam & Côté, 2012). De esta manera es posible maximizar la cantidad de pacientes atendidos, equilibrar la carga laboral entre especialistas y minimizar los tiempos de espera y tiempos ociosos.

Muy pocos artículos tratan con tiempos de espera indirectos, que corresponden a los atrasos en las citas en este capítulo, y que se refieren a los tiempos entre los días que los pacientes piden una cita y los días reales de la cita. En (Gupta & Denton, 2008) señalan varias dificultades en el modelamiento del tiempo indirecto, que puede ser parte del motivo por el cual ha sido bastante limitada. Artículos existentes normalmente se enfocan en la pregunta de cuántos pacientes aceptar o si aceptar o no un paciente en un día particular dado el estado del sistema. Este paper también pertenece a esta corriente de investigación dado que trabaja con los tiempos indirectos de espera de los pacientes.

En (Patrick et al., 2008) se estudia un problema de programación dinámico de pacientes con múltiples prioridades y se desarrolla políticas de agendamiento costo-efectivas que responden a los objetivos de tiempo de espera para los pacientes. En la misma línea de categorización de pacientes, donde se permite ordenarlos y priorizarlos de acuerdo a sus características, Robinson & Chen (2010) proponen un modelo de agendamiento que prioriza a los pacientes de acuerdo a su gravedad. De este modo se disminuye el tiempo de espera de cada paciente según su propio estado de salud. En (Huang, Y., & Hanauer, D. A., 2014) se extiende el modelo propuesto por Robinson & Chen (2010) y se propone un modelo de agendamiento de pacientes urgentes y de rutina. De esta manera se minimiza la suma ponderada del tiempo medio de espera de cada paciente, usando la posibilidad de realizar horas de sobrecupos para los pacientes, lo que permite disminuir los tiempos de espera y las tasas de cancelación e inasistencia de los pacientes. Otro estudio, (Gupta & Wang, 2008) plantea un problema de administración de capacidad clínica usando un modelo donde las preferencias de los pacientes sobre el médico y el tiempo son formulados explícitamente. La decisión es si aceptar o no una solicitud de cita a su llegada, y el objetivo es maximizar el beneficio obtenido en un día dado. En (Nau Liu, 2009) se expone un modelo de agendamiento dinámico de pacientes con tasas de no asistencia y tasas de cancelación de citas, para pacientes de un solo tipo con probabilidades de no asistencia y de cancelación de citas homogéneas y también para pacientes de múltiples tipos. Éste trabajo es similar al expuesto en este paper, pero difiere en que asume que se tiene disponibilidad de los datos de la tasa de cancelación de citas de pacientes, que en el caso de nuestro estudio

no aplica. Además, el supuesto que utilizan para los pacientes de múltiples tipos que se diferencian en las distribuciones de probabilidad de no asistencia y de cancelación asociadas a cada uno, no es adecuado en el caso de estudio, ya que la tasa de cancelación no existe en el hospital.

Otro trabajo más reciente de agendamiento dinámico para citas médicas de pacientes ambulatorios es el de Feldman, Liu, Topaloglu & Ziya (2014), donde el agendamiento que proponen toma en cuenta las preferencias de los pacientes de cuándo quieren tener su cita y ésta es considerada en el modelo.

En (Liu, N., Ziya, S., & Kulkarni, V. G., 2010) se propone un agendamiento dinámico de pacientes con tasas de no asistencia y de cancelación de citas. Se concluye que la política de *Open Access* es adecuada para los casos en que la carga de pacientes sea relativamente baja, y al menos en donde la demanda y la oferta deben estar “balanceadas”. Este trabajo también va en línea con el propuesto en esta tesis, pero difiere en que la oferta y demanda no se encuentran en balance y la carga de pacientes es muy grande en comparación a la capacidad, por lo tanto, la política de Open Access propuesta por Liu, Ziya & Kulkarni (2010) de ser aplicada no sería la óptima dadas sus propias conclusiones.

Un trabajos más reciente, (Truong, V. A., 2015) plantea un modelo de pacientes de dos tipos; uno de demanda urgente que debe ser atendido el mismo día de su llegada y otro de demanda regular que puede ser atendido en una fecha en el futuro. Este trabajo se diferencia del trabajo realizado aquí, debido a que en el caso de estudio no existen

pacientes con urgencia de ser atendidos el mismo día, por lo cual se tiene una mayor flexibilidad.

### **Revisión bibliográfica simulación**

La literatura expone múltiples ejemplos del uso de modelos de simulación para la resolución de problemáticas con componentes dinámicas y estocásticas. Esto se debe a la capacidad de la simulación para la creación y resolución de problemas que se asemejan bastante a la realidad, a diferencia de otros modelos, como modelos de optimización matemática, que son menos flexibles en cuanto a niveles de variabilidad, creación de escenarios posibles y complejidad del problema.

Específicamente, la proliferación de modelos de simulación en el dominio de la investigación médica y la gestión de los servicios de salud es evidente (Brenner et al., 2010). Este crecimiento se debe a la capacidad de apalancamiento de estos modelos de simulación para abordar problemas complejos que no pueden ser atendidos por los sistemas de apoyo a las decisiones (Almagooshi , 2015). Además ha habido muchos avances en la simulación de eventos discretos, muy en línea con la evolución de la informática (Robinson, 2005).

Los sistemas de simulación que han sido diseñados e implementados en el sistema de salud se han interesado en diferentes problemas operativos como en la asignación de los recursos humanos en todo el hospital (Jones & Evans, 2008) (Bonabeau, 2002) o en la admisión de los pacientes (Hutzschenreuter, 2008).

También se han realizado estudios de pruebas de simulación para la programación de doctores, analizar los impactos correspondientes en la atención de pacientes y la utilización de recursos (Kumar et al., 1989) (Rossetti et al., 1999), entre otros.

A pesar de lo anterior, sumado que ha habido intentos de formalizar los procesos de simulación creando marcos de referencia (Sadowski & Grabau, 1999) (Shannon, 1998), sigue disperso el conocimiento que contiene las mejores prácticas en el diseño y desarrollo de modelos de simulación para los sistemas de salud. Es necesario un estudio que junte los datos sobre mercados de médicos y ofrezca un análisis de la situación actual por especialidades (González & Barber, 2007).

En este trabajo se propone un enfoque para resolver el problema de agendamiento de pacientes en los sistemas sanitarios, especialmente para aquellos que no pueden implementar la política de *Open Access*. El agendamiento de citas médicas para pacientes ambulatorios tiene lugar en la mayoría de los centros de salud del mundo, sin embargo la investigación realizada se basa en la realidad del Hospital del Salvador de Santiago de Chile.

Las excesivas listas de espera y tiempos que deben aguardar los pacientes por una atención médica en nuestro país llevaron a que el gobierno creara el plan GES<sup>7</sup>. Éste consiste en un listado de 80 enfermedades, donde se establece para cada una de ellas: plazos máximos para la atención, para la aplicación de un procedimiento, como por ejemplo, una cirugía y para su posterior recuperación.

---

<sup>7</sup> Garantías Explícitas en Salud. Semejante al Acceso Universal de Garantía explícitas (AUGE).

Sin embargo, la alta demanda, la escasez de recursos y la complejidad del sistema, dificultan el cumplimiento de estas metas sanitarias (Leiva, 2010).

### **2.3 Descripción del problema**

El presente estudio se llevó a cabo en el Hospital del Salvador de Santiago de Chile. Este hospital perteneciente a la red pública, es uno de los más importantes a nivel nacional. Además, el hospital del Salvador, es centro de referencia a nivel nacional de varias especialidades, siendo la más predominante en la atención a pacientes infantiles de alta complejidad. Se encuentra situado en la Región Metropolitana, en la comuna de Providencia y pertenece al Servicio de Salud Metropolitano Oriente, atendiendo pacientes de las comunas de La Reina, Las Condes, Lo Barnechea, Macul, Ñuñoa, Peñalolen, Vitacura y Providencia. Además sirve a pacientes de alta complejidad derivados de otros centros de salud provenientes de diversas regiones del país y aquellos derivados de servicios de urgencias.

La realización de esta investigación abarca las atenciones ambulatorias con médicos especialistas en áreas quirúrgicas, del Policlínico de Especialidades Quirúrgicas del Hospital del Salvador. Éste es uno de los más grandes en términos de volumen de atención y está compuesto por las especialidades quirúrgicas de Urología, Traumatología y Cirugía. Por otra parte, este policlínico es crítico, pues presenta una de las mayores listas de esperas de pacientes por atenciones de citas médicas con especialistas.

Para el caso de las atenciones ambulatorias, los recursos limitantes del sistema son los especialistas médicos. Por lo tanto, es primordial utilizar los recursos escasos de la manera más adecuada posible.

En la programación de citas ambulatorias encontramos dos grandes fuentes de flujos de pacientes: los pacientes nuevos que vienen derivados desde los consultorios de Atención Primaria y los pacientes control o recurrentes que ya fueron atendidos por un especialista en el hospital y requieren de una nueva cita. Se presentan además otros flujos pequeños de pacientes que provienen del servicio de urgencias, pacientes de ingreso externo que provienen derivados de otros centros de atención de diversas regiones y pacientes provenientes de otras unidades del mismo Hospital del Salvador. Todos estos pacientes generan atenciones que no pertenecen a la práctica formal del hospital, pero que de igual manera es aceptada en algunos casos.

Los pacientes derivados de los consultorios de atención primaria presentan una categorización en términos de la gravedad de su patología. Se designa un paciente categoría 1, 2 y 3 representando a pacientes de alta, mediana y baja gravedad respectivamente. Los pacientes de alta gravedad, por ejemplo, son aquellos diagnosticados con algún tipo de enfermedad grave como cáncer. Además los pacientes vienen clasificados como pacientes que pertenecen o no al GES. Este tipo de pacientes se encuentran ingresados al sistema, por lo que conforman la lista de espera. Por otra parte los pacientes recurrentes son pacientes que ya tuvieron una cita médica y vienen luego a agendar su próxima cita definida por el médico tratante. Es decir, son pacientes control que piden la hora médica directamente en el hospital. Éstos pacientes también

pueden ser pacientes de llegada espontánea que esperan en el hospital por un sobrecupo.

El proceso de agendamiento actual de horas médicas consiste en la apertura de la agenda para un horizonte de tiempo de 3 meses. Al transcurrir un mes, la agenda se abre nuevamente un mes adicional y así sucesivamente. Por otro lado, por decreto ministerial, se debe agendar un 70% de las horas totales a pacientes control y un 30% a pacientes nuevos. Además, en el Hospital del Salvador se agenda a 4 personas por hora cronológica, es decir, cada sesión de la cita médica debe durar 15 minutos.

El aporte de esta investigación es el diseño de un agendamiento dinámico de citas ambulatorias con especialistas médicos para el Policlínico de Especialidades Quirúrgicas del Hospital del Salvador, que reduzca los tiempos de espera de pacientes. Se espera además que este trabajo se replique en las otras especialidades médicas del hospital y, más aún, en los distintos recintos de salud a lo largo de nuestro país.

### **2.3.1 Recursos disponibles**

En el Policlínico de especialidades quirúrgicas del Hospital del Salvador se dispone de una cierta cantidad de box de atención por especialidad: 11, 5 y 5 para Cirugía, Urología y Traumatología, respectivamente.

La cantidad de médicos especialistas en el Hospital para cada especialidad quirúrgica correspondiente para el año 2015, junto con el número de horas médicas totales disponibles semanales para atención directa de pacientes nuevos y control se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Cantidad médicos especialistas y horas disponibles de atención. Fuente: Enfermeras y secretarías del Hospital del Salvador.

Especialidad	Número de especialistas	Horas médicas disponibles semanales para atención directa
Urología	15	230
Traumatología	21	266
Cirugía	53	454

Cada médico está contratado por una cantidad de horas semanales. Para el caso de Urología y Cirugía pueden ser 11 , 22 o 33 horas de contrato. Para Traumatología pueden ser 11 o 22 horas de contrato. Las horas de contrato se dividen en horas de consulta directa a pacientes y en otras actividades (indirectas).

### 2.3.2 Situación actual

El Sistema de Salud Público Chileno presenta largas listas de espera debido a que la demanda hospitalaria, ya sean consultas con médicos especialistas o consultas para tratamientos y cirugías, supera la oferta de los hospitales.

A nivel país las listas de espera han sido tema importante en los proyectos y agendas gubernamentales. Es por esto que en 2005 entra en vigencia la Ley de Garantías Explícitas en Salud (AUGE). Este programa se creó para poner plazos máximos en la atención de pacientes dependiendo de su enfermedad a partir de una lista de 80 enfermedades decretadas por las autoridades. Uno de los problemas del plan AUGE es que los hospitales públicos no tienen, en la gran mayoría de los casos,

capacidad suficiente para atender de manera oportuna la gran demanda y, por consiguiente, de cumplir con los plazos exigidos, por lo que se ven en la obligación de enviarlos al extrasistema, incurriendo en altos gastos económicos. Otro problema importante, es que si un paciente tiene una patología que no se encuentra en el plan GES, para el caso de consultas ambulatorias con especialistas médicos en el Hospital del Salvador, su agendamiento será postergado, a menos que sea una persona de alta gravedad.

### **Situación actual Caso de estudio: Hospital del Salvador**

Las listas de espera de pacientes que aguardan por una hora médica son extensas. En el Hospital del Salvador, existen pacientes que esperan por una consulta médica desde el año 2011<sup>8</sup>. Por lo tanto, es un problema que con urgencia debe ser resuelto, ya que a mayor tiempo de espera se corre el riesgo de que los pacientes agraven su enfermedad. Una atención oportuna mejora la calidad de vida de las personas y del país. Por otra parte, a mayor espera en la atención de pacientes, existe una mayor probabilidad de que se ausenten a su cita médica (Gallucci et al., 2005), (Nau Liu, 2009), lo que es desfavorable para el hospital, ya que no se está utilizando de manera óptima el recurso limitante.

El caso de estudio son las especialidades quirúrgicas de Cirugía, Urología y Traumatología. Las listas de espera de pacientes por atención ambulatoria con

---

<sup>8</sup> Fuente: Boletín estadístico 2015, Hospital del Salvador.

especialistas médicos que corresponden a estas áreas para el caso del Hospital del Salvador se muestran en la Figura 2.

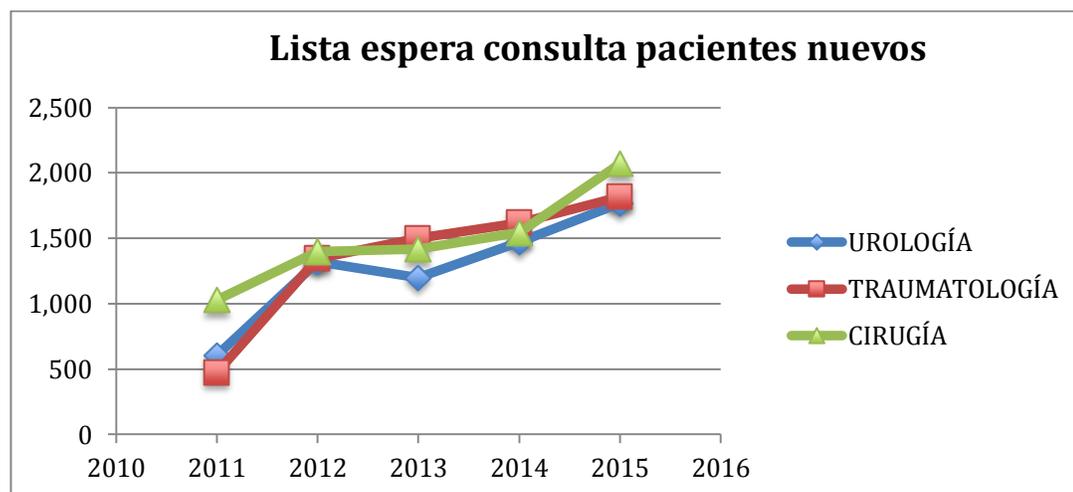


Figura 2: Lista de espera consulta pacientes nuevos con especialista médicos a diciembre 2015. Fuente: Boletín estadístico 2015.

Como se observa en la Figura 2, la cantidad de personas en las listas de espera de pacientes nuevos ambulatorios es considerable y existen pacientes esperando por una atención desde el año 2011 para las tres especialidades.

## 2.4 Metodología

### 2.4.1 Enfoque de la solución

#### El modelamiento matemático

El sistema es tratado como un problema de decisión Markoviano, donde la llegada de pacientes con necesidad de realizar una sesión de atención médica está sujeta a incertidumbre. El problema es modelado de esta manera debido a la alta demanda por el recurso limitante, su alta variabilidad y de la forma en cómo las decisiones de hoy

afectan el futuro, ya sea en el largo de la lista de espera o en la disponibilidad de atención a los pacientes. Este modelo está basado en el propuesto por Patrick , Puterman & Queyranne (2006), donde la llegada de pacientes con distintas prioridades de atención está sujeta a incertidumbre, pero a diferencia de éste, en este modelamiento se tomó en cuenta la inasistencia de pacientes.

### **Instantes de decisión**

En cualquier día se tendrá acceso al estado actual de la agenda, a partir de hoy hasta el final del horizonte de tiempo de agendamiento, así como también a la demanda entrante que espera ser agendada de cada clase de prioridad.

### **Los conjuntos**

Se definen los siguientes conjuntos para caracterizar el problema de decisión Markoviano:

- N: Conjunto de los días en que se lleva a cabo el agendamiento.
- I: Conjunto de las prioridades de clase de cada paciente.
- S: Conjunto con todos los estados posibles para el sistema.
- A: Conjunto con todos los agendamientos que pueden realizarse.

### **Los estados**

El conjunto de estados, S, toma la siguiente forma:

$$(x,y) = (x_1,x_2,\dots,x_N ; y_1, y_2,\dots,y_I)$$

donde,

- $x_n$ =el número de pacientes agendados el día  $n$ ,  $1 \leq n \leq N$ .
- $x_n \in \{0,1, \dots, C\}$  , con  $C$  igual a la capacidad regular diaria, dada en horas.
- $y_i$  = el número de pacientes de prioridad  $i$  esperando para ser agendados,  $1 \leq i \leq I$ .

### Las acciones

Debe existir una acción viable cuando no hay suficiente capacidad libre para satisfacer la demanda en espera. En este caso, se puede relajar el stress del sistema mediante la realización de horas extras o la externalización del servicio. Ambas alternativas se realizan en la práctica actual en el Hospital del Salvador. Por otro lado, se supone que cuando llega la demanda por una hora de atención médica, la decisión de agendar para una hora disponible o realizar horas extras debe ser tomada.

Luego, un vector de acciones posibles puede escribirse como:

$$(a, z) = \{a_{in}, z_i\}$$

donde,

- $a_{in}$  es el número de pacientes con prioridad  $i$  a agendar el día  $n$ .
- $z_i$  es el número de pacientes con prioridad  $i$  a atender en horas extras o por externalización del servicio médico.

Las acciones factibles para un estado determinado deben cumplir con las siguientes restricciones:

Que la restricción de capacidad no sea violada:

(1)

$$x_n + \sum_{i=1}^I a_{i,n} \leq C \quad \forall n, n = 1, \dots, N$$

Que todos los pacientes en espera son atendidos:

(2)

$$\sum_{i=1}^N a_{i,n} = y_i - z_i \quad \forall i, i = 1, \dots, I$$

Que las acciones son forzadas a ser positivas y enteras:

(3)

$$a, z \geq 0 \text{ Enteros}, \quad \forall i, i = 1, \dots, I \text{ \& } \forall n, n = 1, \dots, N$$

Por lo tanto, el set de acciones para cualquier estado dado está dado por:

$$A_{x,y} = \{(a, z) | x_n + \sum_{i=1}^I a_{i,n} \leq C, \sum_{i=1}^N a_{i,n} = y_i + z_i, (a, z) \geq 0, \text{entero}\}$$

Cabe notar que las decisiones se toman al final de cada día. Por otra parte, el modelo es complicado debido a que el horizonte de tiempo no es estático sino rodante, con el día 2 convirtiéndose en el día 1 y así sucesivamente luego de cada toma de decisión. Finalmente, se supone que ningún paciente puede agendarse en más de N días

en adelante, por lo que, al principio de cada toma de decisión el día N no tiene ningún agendamiento en él.

### Las probabilidades de transición

Una vez que se toma una decisión el único elemento estocástico en la transición a un nuevo estado consiste en las llegadas del siguiente día. Así la transición puede escribirse como:

$$(x_1, x_2, \dots, x_N; y_1, y_2, \dots, y_I) \rightarrow \left( x_2 + \sum_{i=1}^I a_{i,2}, \dots, x_N + \sum_{i=1}^I a_{i,N}, 0 ; d_1, \dots, d_I \right)$$

con probabilidad:

$$p(d) = \prod_{i=1}^I p(d_i)$$

donde  $p(d_i)$  es la probabilidad que  $d_i$  pacientes de prioridad  $i$  lleguen en un día dado.

Aquí se asume independencia entre las demandas de las clases de prioridades.

### Los costos

Los costos vienen de dos fuentes: (a) Se incurre en un costo si el paciente es agendado más tarde que el tiempo de espera máximo recomendado para cada clase de prioridad respectiva y (b) existe un costo asociado con el uso de horas extras para

satisfacer el exceso de demanda. Así, se supone una estructura lineal de costos, dada por:

(4)

$$c(a, z) = \sum_{i,n} c(i, n) a_{i,n} + \sum_{i=1}^I h(i) z_i$$

en donde,

$$c(i, n) = k(i)[n - T(i)]^+$$

y además,

- $k(i)$  es la penalización diaria para un paciente de prioridad  $i$  que espera más tiempo que el tiempo máximo recomendado,  $T(i)$ .
- $h(i)$  es la penalización diaria por atender a través de horas extra a un paciente ambulatorio de prioridad  $i$ .

Es importante notar que en la práctica, el costo de agendar un paciente tarde es difícil de cuantificar. Así  $k(i)$  es algo artificial. Sin embargo, dado que las clases de prioridad están ordenadas desde más urgente a menos urgente, es razonable asumir que  $k(i)$  es no creciente en  $i$ , por lo que de esta manera es más costoso agendar un paciente de alta prioridad tarde que uno de baja prioridad.

Por otra parte, para el caso de  $h(i)$ , debido a que los costos no varían en relación a las distintas clases de prioridades es razonable asumir que  $h(i)$  es independiente de  $i$ .

### Ecuación de optimalidad

La ecuación de optimalidad del sistema viene dada por la expresión:

(5)

$$v(x, y) = \min_{(a,z) \in A_{x,y}} \left\{ c(a, z) + \gamma \sum_{d \in D} p(d) v(x_2 + \sum_{i=1}^I a_{i,2}, \dots, x_N + \sum_{i=1}^I a_{i,N}, 0 ; d_1, \dots, d_I) \right\}$$

Donde  $\gamma$  es el factor diario de descuento y  $D$  es el set de todos los posibles flujos de demanda entrante. El primer término corresponde al costo de tomar la acción  $(a,z)$  en el estado  $S$  y el segundo término corresponde al valor presente del valor óptimo de todos los estados futuros del sistema a partir del estado inicial  $S$  y la acción  $a$ . Se aprecia que el espacio de estados en (5) es demasiado grande por lo que no permite una solución numérica directa.

### Modelo Equivalente

El gran número de estados y acciones factibles hacen que este problema no pueda ser resuelto a través de métodos estándares. Por este motivo se debe abordar

como un problema de programación lineal equivalente. Uno de estos métodos fue desarrollado por Schweitzer & Seidmann (1985), con un trabajo más reciente realizado por Adelman (2003, 2004, 2005) y de Farias & Van Roy (2004). La teoría de dinámica de procesos establece que el problema presentado en (5) puede ser transformado de la siguiente forma:

(6)

$$\max \sum_{x,y \in S} \alpha(x,y) v(x,y)$$

s.a.

(7)

$$c(a,z) + \gamma \left[ \sum_{d \in D} p(d) v(x_2 + \sum_{i=1}^I a_{i,2}, \dots, x_N + \sum_{i=1}^I a_{i,N}, 0 ; d_1, \dots, d_I) \right] \\ \geq v(x,y) \quad \forall (a,z) \in A_{x,y} \text{ \& } (x,y) \in S$$

donde  $\alpha$  es un positivo estricto cualquiera (Puterman, 1994). Sin pérdida de generalidad, se supone que  $\alpha$  es la distribución de probabilidades del espacio de estados y puede ser interpretada como una distribución lineal para el sistema.

### Modelo Aproximado

Notar que la cantidad de estados y acciones del sistema sigue intacta, es decir, el problema de la dimensionalidad no ha sido resuelto. Una posible solución es aproximar

el valor de la función  $v(x,y)$ , con una combinación lineal de funciones de base (de Farias & Roy, 2003) y (Adelmann, 2005), de la siguiente forma:

(8)

$$v(x,y) = W_0 + \sum_{n=1}^N V_n x_n + \sum_{i=1}^I W_i y_i$$

donde  $V_n$ , puede interpretarse como el costo marginal de agendar un paciente el día  $n$ .  $W_i$ , puede interpretarse como el costo marginal de tener un paciente más de clase de prioridad  $i$  esperando ser agendado, además sujeto a las restricciones de no negatividad para todo  $V_n$  con  $n=1, \dots, N$  y para todo  $W_i$  con  $i=1, \dots, I$ .

Reemplazando la aproximación lineal en (4) se obtiene:

(9)

$$\max_{V,W} \left\{ W_0 + \sum_{n=1}^N E_\alpha[X_n] V_n + \sum_{i=1}^I E_\alpha[Y_i] W_i \right\}$$

s.a.

$$(1 - \gamma)W_0 + \sum_{n=1}^N V_n (x_n - \gamma x_{n+1} - \gamma \sum_{i=1}^I a_{i,n+1}) + \sum_{i=1}^I W_i (y_i - \gamma E_\alpha[Y_i]) \\ \leq c(a,z) \quad \forall (a,z) \in A_{x,y} \quad \& \quad (x,y) \in S$$

$$V, W \geq 0$$

Con  $x_{n+1} = 0$  y  $a_{i,N+1} = 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}$  y donde  $X_n$  es una variable aleatoria que representa el número de pacientes agendados el día  $n$ .  $Y_i$  es una variable aleatoria

que representa el número de pacientes de clase de prioridad  $i$  esperando para ser agendados.

### Problema Maestro

Se tiene un problema con un número manejable de variables, pero el número de restricciones aún permanece intratable. Una manera de resolverlo es plantear su problema dual, denominado maestro (10) y resolverlo a través del algoritmo de Generación de Columnas (Demiriz, A., Bennett, K. P., & Shawe-Taylor, J., 2002).

(10)

$$\min_X \sum_{\substack{(x,y) \in S \\ (a,z) \in A_{x,y}}} X(x, y, a, z) \left( \sum_{i,n} c(i, n) a_{in} + \sum_{i=1}^I h(i) z_i \right)$$

s.a.

$$(1 - \gamma) \sum_{\substack{(x,y) \in S \\ (a,z) \in A_{x,y}}} X(x, y, a, z) = 1$$

$$\sum_{\substack{(x,y) \in S \\ (a,z) \in A_{x,y}}} X(x, y, a, z) \left( x_n - \gamma x_{n+1} - \gamma \sum_{i=1}^I a_{i,n+1} \right) \geq E_\alpha[X_n] \quad \forall n = 1, \dots, N$$

$$\sum_{\substack{(x,y) \in S \\ (a,z) \in A_{x,y}}} X(x, y, a, z) (y_i - \gamma E_y[Y_i]) \geq E_\alpha[Y_i] \quad \forall i = 1, \dots, I$$

$$X \geq 0$$

Esta metodología parte con una solución básica inicial del problema maestro e ingresa una nueva columna a partir de la solución del problema (11), que corresponde a la restricción menos violada del problema maestro. Este proceso itera hasta que no es posible agregar nuevas columnas a dicho problema, es decir, no hay nuevas variables con costos reducidos menores a cero. Dada la formulación del problema, una solución básica factible es un estado sin disponibilidad de horas de atención y donde toda la demanda entrante es atendida a través de horas extras.

(11)

$$z(V, W) = \sum_{n=1}^N b_n + \gamma \sum_{i=1}^I E_{\alpha}[Y_i]W_i - (1 - \gamma)W_0 + \sum_{i=1}^I (h(i) - W_i) z_i^*$$

donde cada  $b_n$  tiene la forma

$$b_n = \min_{a_{\bullet,n} x_n} \left\{ \sum_{i=1}^I [c(i, n) + \gamma V_{n-1} - W_i] a_{i,n} + [\gamma V_{n-1} - V_n] x_n \right\}$$

s.a.

$$x_n + \sum_{i=1}^I a_{i,n} \leq C$$

$$x_n \text{ \& } a_{\bullet,n} = (a_{1n}, \dots, a_{In}) \geq 0, \quad \textit{Enteros}$$

con  $V_{n-1} = 0$  y el óptimo  $z_i$  dado por:

$$z_i^* = \begin{cases} 0 & \text{si } W_i \leq h(i) \\ M & \text{Sino} \end{cases}$$

### Modelo de Agendamiento

Con los valores de  $V_n$  y  $W_i$  es posible generar un modelo de agendamiento al reemplazar dichos valores en la ecuación de optimalidad original (5). De esta forma se obtiene la acción aproximadamente óptima de agendamiento para un estado en particular del sistema, por lo que la forma de la función de valor, está dada por:

- $V_n = \gamma^{[n-T(1)]^+} h(1) \quad \forall n \in \{1, \dots, N-1\}$
- $V_N = 0$
- $W_i = \gamma^{T(i)-T(1)} h(1) \quad \forall i$
- $W_0 = h(1) \left( -T(1)C - \frac{\gamma C}{1-\gamma} + \gamma \sum_{i=1}^I \frac{\gamma^{T(i)-T(1)}}{1-\gamma} \lambda_i \right)$

siempre que se cumplan las restricciones (12) y (13) expuestas a continuación:

(12)

$$k(i)[n - T(i)]^+ + \gamma^{n-T(1)} h(1) > \gamma^{T(i)-T(1)} h(1) \quad \forall n > T(i) \quad \& \quad \forall i$$

y

(13)

$$\sum_{i=1}^I \frac{\gamma^{T(i)-T(1)}}{1-\gamma} \lambda_i + \sum_{n=1}^N \gamma^{[n-T(1)]^+} E_\alpha[X_n] > T(1)C + \frac{\gamma C}{1-\gamma}$$

donde  $\lambda_i$  es la tasa de llegada de la demanda de clase de prioridad  $i$ ,  $C$  es igual a la capacidad y  $\gamma$  es la tasa de descuento.

### Política de Agendamiento

Se necesita un método alternativo para derivar una política óptima de agendamiento de la función de valor óptima aproximada. Dada la función de valor aproximada, podemos determinar una acción viable,  $(a,z)$ , para cualquier estado dado,  $(x,y)$ , cuanto sea necesario, al resolver el problema de programación entera a continuación:

(14)

$$\min_{(a,z) \in A_{x,y}} \left\{ \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I (c(i,n) + \gamma \delta V_{n-1}) a_{i,n} + \sum_{i=1}^I h(i) z_i + [2h(i)(C - x_n - a_{i,n})]^+ \right\}$$

sujeto a

(1)

$$x_n + \sum_{i=1}^I a_{i,n} \leq C \quad \forall n, n = 1, \dots, N$$

(2)

$$\sum_{i=1}^N a_{i,n} = y_i + z_i \quad \forall i, i = 1, \dots, I$$

(3)

$$a, z \geq 0, \quad \text{enteros} \quad \forall i, i = 1, \dots, I \quad \& \quad \forall n, n = 1, \dots, N$$

donde  $\delta$  corresponde a la tasa de insasistencia media de pacientes y

$[2h(i)(C - x_n - a_{i,n})]^+$  representa el castigo en que se incurre si no se cumple la condición necesaria.

El siguiente esquema resume los pasos anteriores de resolución del problema dinámico expuesto:



Figura 5: Esquema de los pasos de resolución del problema dinámico.

## 2.5 Resultados y discusión

### 2.5.1 Análisis de resultados

Se programó el modelo presentado en (14) en el software GAMS 23.5 (General Algebraic Modeling System). Además se utilizó el software MATLAB R2012b como herramienta de apoyo a la simulación. Para inicializar el modelo se utilizaron datos reales proporcionados por el Hospital del Salvador. Se corrió el problema de agendamiento presentado en (14) para el escenario que agenda en un horizonte de

planificación de 60 días hábiles en adelante, con 3 prioridades de pacientes y con capacidad diaria de 15 horas médicas de atención con los especialistas para cada una de las 3 especialidades quirúrgicas en estudio: cirugía, urología y traumatología. La demanda se supone como una distribución Poisson con media diaria 8, 3, 3 para cada una de las prioridades de los pacientes, respectivamente.

Este supuesto en la llegada de pacientes de acuerdo a un proceso de Poisson es ampliamente utilizado en la literatura, y en particular para definir patrones de llegada de pacientes. En (Klassen & Rohleder, 1996), (Rohleder & Klassen, 2000) la distribución Poisson se utiliza para generar las llamadas urgentes. También se usan procesos de Poisson para determinar la llegada de pacientes semi-urgentes (Zooderland, Boucherie, Litvak & Vleggeert-Lankamp, 2010), la demanda tanto de pacientes de rutina como de pacientes urgentes (Dobson, Hasija & Pinker, 2011), la demanda de pacientes externos (Bretthauer, Heese, Pun & Coe, 2011) y la demanda de pacientes en general (Liu & Ziya, 2014). Aún más recientes, en (Souza, Morabito, Chiyoshi & Iannoni, 2015) la demanda de distintas clases de usuarios arriba con un proceso de Poisson, en (Samorani & LaGanga, 2015) las solicitudes de cita llegan antes de la sesión clínica de acuerdo a un proceso de Poisson y en (Muñoz, D. F., & Villafuerte, D., 2015) se supone que la llegada de pacientes sigue una distribución Poisson.

El tiempo máximo de espera recomendado para cada prioridad de clase es de 20, 40 y 60 días respectivamente. Se utiliza una tasa de descuento de 0,99, que corresponde a una tasa de actualización, ya que no queremos sacrificar el futuro por el

presente y la probabilidad de inasistencia media de pacientes a sus citas médicas es un 20%, dato proporcionado por el Hospital del Salvador, en particular por el Departamento de Planificación y Control de Gestión del Hospital.

Para las mediciones se consideró un tiempo de simulación de 10.000 días, con un *warm-up period* de 2.500 días, lo que corresponde al tiempo en que el sistema se demora en entrar en régimen.

El costo de una hora extra se fijó en \$14.000 pesos chilenos, que es el costo bruto del salario asociado a un slot de cita de 15 minutos con el especialista médico realizada en formato de hora extra, dato proporcionado por el Departamento de Recursos Humanos del Hospital del Salvador. El costo de atraso se estimó a partir de una espera adicional más allá de  $T(i)$  de 5, 10 y 15 días para cada clase de prioridad respectivamente, lo que equipara el costo diario de horas extras. Así, el costo diario de una hora médica atrasada para cada prioridad es de \$2.800, \$1.400 y \$933 pesos chilenos respectivamente. Es decir, es igual de costoso atender en horas extras a un paciente de alta prioridad que a uno de baja prioridad y es siempre más costoso atender en horas extras que agendar.

El efecto resultante en el desempeño de la aproximación lineal está dado en la Tabla 3 junto con el desempeño cuando el costo de horas extra se incrementa a \$20.000 y \$30.000.

Tabla 3: Variación de los costos de las horas extras.

Costo hora extra	Porcentaje atrasos			Porcentaje de horas extras			Costo promedio diario
	Prioridad 1	Prioridad 2	Prioridad 3	Prioridad 1	Prioridad 2	Prioridad 3	
\$14.000	0	0	0	2,03	0	0	\$2.274
\$20.000	0	0	0	2,07	0	0	\$3.312
\$30.000	0	0	0	2,12	0	0	\$5.088

De esta forma, al utilizar horas extras en el agendamiento, se pueden mantener tiempos de espera razonables al atender una pequeña porción de demanda de prioridad más urgente. Así, se elimina algo de tensión en el sistema mejorando de manera importante los tiempos de espera.

Bajo este escenario, la política de agendamiento anterior logra mantener los tiempos de espera dentro de los largos recomendados pero solo a expensas de atender en hora extras (o externalizando el servicio de horas médicas) alrededor del 2% de todos los pacientes de prioridad 1 (ver Tabla 3), esto es 1 paciente cada 5 días. Está claro que no se atiende en tiempo extra a ningún paciente a menos que la demanda para ese día exceda la capacidad diaria. La Figura 5 muestra los tiempos de espera por prioridades cuando se realizan horas extras, cuando el sistema se encuentra en régimen. Se puede apreciar que se cumplen los tiempos máximos de espera para la atención de los pacientes al aplicar la política de horas extras propuesta.

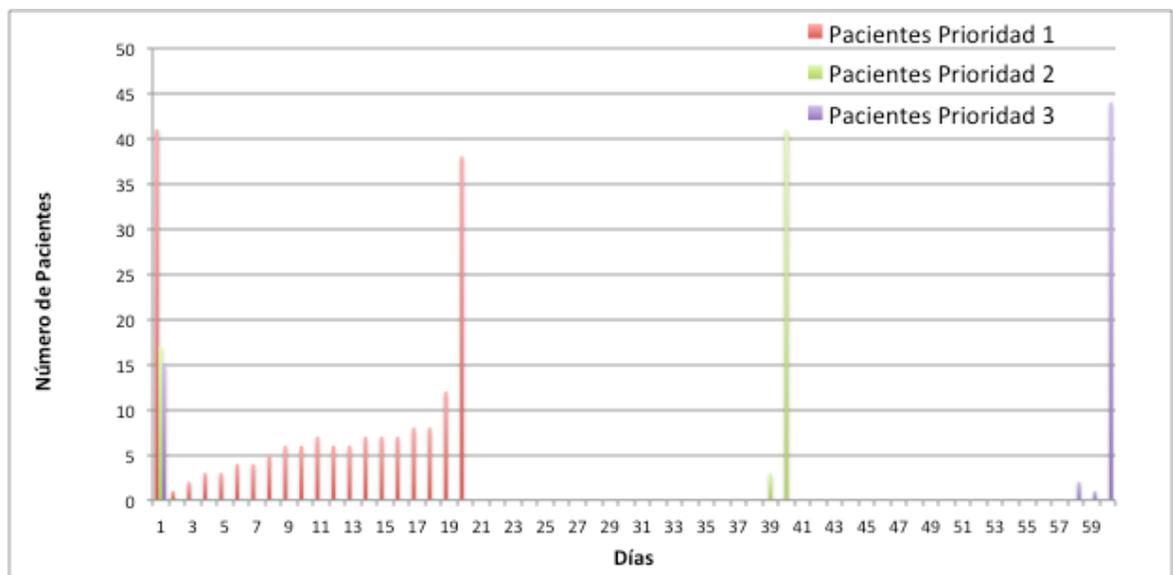


Figura 6: Tiempo de espera promedio por prioridades utilizando horas extra.

Si se realiza un análisis de sensibilidad en la demanda, podemos obtener distintos escenarios y calcular el costo medio diario de cada uno de ellos. En la Tabla 4 se presentan los resultados para 7 escenarios diferentes.

Tabla 4: Costo medio diario para distintas combinaciones de flujos de demandas

	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	Costo medio diario política horas extras
Escenario 1	8	3	3	\$2.274
Escenario 2	7	4	3	\$2.205
Escenario 3	7	3	4	\$2.192
Escenario 4	6	4	4	\$2.183
Escenario 5	5	5	4	\$2.175
Escenario 6	4	4	6	\$2.163
Escenario 7	3	3	8	\$2.152

De la Tabla 4 podemos concluir que la política de agendamiento con horas extra es bastante robusta ya que al variar la demanda los costos no varían de manera significativa.

Lo anterior se debe a que esta política es poco sensible a los cambios en la capacidad del hospital, es decir, se comporta razonablemente bien independiente de la frecuencia relativa de cada prioridad de pacientes.

Luego, si se compara el caso base, que es el modelo actual de agendamiento de pacientes en el hospital, con el modelo propuesto, se observa a continuación en la Tabla 5 los resultados de los tiempos medios de espera para cada prioridad de pacientes. El porcentaje de mejora total es de un 18,1%.

Tabla 5: Tiempos medios de espera para pacientes por prioridades

	Caso base [días]	Modelo horas extra [días]	Porcentaje mejora
Paciente Prioridad 1	19,4	19,2	1,0%
Paciente Prioridad 2	47,8	39,2	18,0%
Paciente Prioridad 3	75,7	58,7	22,5%
Total Pacientes	47,6	39,0	18,1%

Dados los resultados anteriores se pueden determinar acciones de agendamiento óptimas para la demanda aleatoria simulada. Así la solución óptima resulta en una política simple y definida de agendamiento. Esta política es:

- Primero llene toda la capacidad vacía disponible para mañana, esto debido a que la capacidad se perderá si no se llena hoy.
- Segundo, si es posible agende todos los pacientes que queden de prioridad 1 para alguna hora dentro de los primeros 20 días. En caso contrario, en el primer día disponible.
- Tercero, agende los pacientes de las prioridades menos urgentes en los días más tardes disponibles, pero que no incurran en una penalidad por atraso. Es decir, agende los pacientes de prioridades 2 y 3 en el día 40 y 60 respectivamente.

En términos de costos para el hospital en Tabla 6 se presentan los costos totales anuales por especialidad si se realiza la política planteada anteriormente de horas extras y la cantidad de horas que esos costos representan.

Tabla 6: Cantidad horas extras anuales a realizar por especialidad quirúrgica.

	Horas diarias disponibles	Porcentaje de horas extras pacientes prioridad 1	Cantidad horas extras diarias totales	Cantidad horas extras anuales a realizar	Costo total anual
Urología	14	2,03%	0,162	42	\$591.136
Traumatología	16	2,11%	0,211	55	\$768.040
Cirugía	27	2,78%	0,417	108	\$1.517.880
Total	57	2,31%	0,790	206	\$2.877.056

## 2.6 Conclusiones

### 2.6.1 Síntesis y aporte de la investigación

Como punto importante, cabe mencionar que como se expone en (Patrick and Puterman, 2006), si la demanda es muy superior a la capacidad, entonces nada menos que incrementar los recursos será suficiente para reducir los tiempos de espera.

De acuerdo a esto los resultados de esta investigación se justifican ya que requieren el aumento de una pequeña porción de horas extras de médicos especialistas para darle la flexibilidad necesaria al sistema y cumplir con los tiempos máximos de espera para la atención.

Para el caso en estudio se concluye que se necesita de un aumento de horas médicas en un 2%, 2,1% y 2,8% para las especialidades quirúrgicas de Urología, Traumatología y Cirugía respectivamente, para disminuir en un 18% el tiempo de espera medio total hasta la atención de los pacientes. Es decir, para el hospital del Salvador, esto se traduce en el aumento de 42, 55 y 108 horas extras anuales, lo que representa un costo total de \$2.877.056 pesos chilenos anuales.

Si bien el nivel de ocupación es igual para el caso base y el modelo de agendamiento, la medida práctica del esquema propuesto no es en cuánto se reduce la capacidad esperada sin uso, sino en cuánto se reduce el tiempo de espera de los pacientes ambulatorios que aguardan por una cita médica con un especialista.

Por otro lado, la política de planificación generada por el modelo de agendamiento dinámico es simple y su implementación no requiere de un costo adicional para el hospital, reduciéndose a medidas protocolares de agendamiento. Además, el uso de horas extras ha mostrado por sí mismo ser bastante robusto, al mantener tiempos de espera razonables a mínimo costo, sobre una variedad de restricciones de capacidad y flujos de demanda.

De esta manera, los resultados obtenidos permiten estimar cuánto tiempo tendrán que esperar los pacientes hasta ser atendidos. Ello permite al hospital adaptar la planificación actual y tomar mejores decisiones en el futuro, justificando por ejemplo la contratación de un número mayor de horas médicas, ya sean como horas extras o como externalización del servicio.

Aun cuando el modelo presentado en este trabajo representa la optimización de citas de horas médicas para pacientes ambulatorios para el caso de estudio, también puede ser adaptable en otro tipo de situaciones. Por ejemplo, para ser replicado en otros centros hospitalarios y como base para la optimización de otros procesos médicos.

Es urgente y necesario seguir investigando en el área de la salud ya que cualquier mejora en el sistema tendrá un impacto significativo en el largo plazo. Lo anterior se justifica en (Patrick, J., Puterman, M. L., & Queyranne, M., 2008) donde

demuestra que pequeños cambios a un sistema muy congestionado traen cambios desproporcionados en el tamaño de la cola.

### **2.6.2 Trabajo futuro**

Como trabajo futuro se plantea el estudio de la dinámica de los slots de citas dentro de un día en particular, ya que este trabajo no lo considera explícitamente. La consideración simultánea del día de la cita y la hora de la cita en ese día es claramente un problema importante, pero es también un problema muy difícil, que es la posible razón por la cual no muchos la han estudiado. En (Feldman, J., Liu, N., Topaloglu, H., & Ziya, S., 2014) se propone como una de las limitaciones y trabajo futuro de su trabajo.

Por otra parte, como investigación futura sería deseable incorporar al modelo dinámico la tasa de los pacientes que llegan por demanda espontánea a sus citas médicas y como este flujo influye en el agendamiento. También sería interesante permitir que los tiempos de servicio sean aleatorios.

A su vez, de gran interés es la incorporación al modelo de agendamiento dinámico a los pacientes recurrentes y queda propuesto como trabajo futuro.

Finalmente, confío en que esta investigación será útil para aquellos que realizan las políticas de agendamiento en el Hospital del Salvador de Santiago de Chile, al mantener tiempos de espera razonables para los servicios de atención de consultas ambulatorias de pacientes con especialistas médicos. Al mismo tiempo espero que el

trabajo expuesto sea replicable en otros centros de salud pública del país y sea una inspiración para mejorar otras áreas en el sistema de salud pública nacional.

## BIBLIOGRAFIA

Adelman, D. (2003). Price-directed replenishment of subsets: Methodology and its application to inventory routing. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5(4), 348-371.

Adelman, D. (2004). A price-directed approach to stochastic inventory/routing. *Operations Research*, 52(4), 499-514.

Adelman, D. (2007). Dynamic bid prices in revenue management. *Operations Research*, 55(4), 647-661.

Almagooshi, S. (2015). Simulation Modelling in Healthcare: Challenges and Trends. *Procedia Manufacturing*, 3, 301-307.

Babes, M., & Sarma, G. V. (1991). Out-patient queues at the Ibn-Rochd health centre. *Journal of the Operational Research Society*, 42(10), 845-855.

Baril, C., Gascon, V., & Cartier, S. (2014). Design and analysis of an outpatient orthopaedic clinic performance with discrete event simulation and design of experiments. *Computers & Industrial Engineering* 78., 285–298.

Bhattacharjee, P. & Kumar, P. (2015). Simulation Modelling and Analysis of appointment system performance for multiple classes of patients in a hospital: A case study.

Bloom, B. S., & Fendrick, A. M. (1987). Waiting for care: queuing and resource allocation. *Medical Care*, 131-139

Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 99 Suppl 3. pp. 7280–7.

Brenner, S., Zeng, Z., Liu, Y., Wang, J., Li, J. & Howard, P.K. (2010). Modeling and analysis of the emergency department at university of Kentucky Chandler Hospital using simulations. *J. Emerg. Nurs.*, vol. 36, no. 4, pp. 303–310.

Bretthauer, K. M., Heese, H. S., Pun, H., & Coe, E. (2011). Blocking in healthcare operations: a new heuristic and an application. *Production and Operations Management*, 20(3), 375-391.

Cayirli, T., & Veral, E. (2003). Outpatient scheduling in health care: a review of literature. *Production and Operations Management*, 12(4), 519-549.

De Farias, D. P., & Van Roy, B. (2004). On constraint sampling in the linear programming approach to approximate dynamic programming. *Mathematics of operations research*, 29(3), 462-478.

De Souza, R. M., Morabito, R., Chiyoshi, F. Y., & Iannoni, A. P. (2015). Incorporating priorities for waiting customers in the hypercube queuing model with application to an emergency medical service system in Brazil. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 274-285.

Demiriz, A., Bennett, K. P., & Shawe-Taylor, J. (2002). Linear programming boosting via column generation. *Machine Learning*, 46(1-3), 225-254.

Dobson, Gregory; HASIJA, Sameer; PINKER, Edieal J. Reserving capacity for urgent patients in primary care. *Production and Operations Management*, 2011, vol. 20, no 3, p. 456-473.

Feldman, J., Liu, N., Topaloglu, H., & Ziya, S. (2014). Appointment scheduling under patient preference and no-show behavior. *Operations Research*, 62(4), 794-811.

Fooks, C., Duvalko, K., Baranek, P., Lamothe, L., & Rondeau, K. (2002). Health human resource planning in Canada: Physician and nursing work force issues. *Submission to the Royal Commission of the Future of Healthcare in Canada, Canadian Policy Research Network*.

Gallucci, G., Swartz, W., & Hackerman, F. (2014). Brief reports: Impact of the wait for an initial appointment on the rate of kept appointments at a mental health center. *Psychiatric Services*, 56(3), 344-346.

González, B., & Barber, P. (2007). Oferta y necesidad de médicos especialistas en España 2006-2030. *Grupo de Investigación en Economía de la Salud. Universidad de Las Palmas de GC-España*.

Gupta, D., & Denton, B. (2008). Appointment scheduling in health care: Challenges and opportunities. *IIE Transactions*, 40(9), 800-819.

Gupta, D., & Wang, L. (2008). Revenue management for a primary-care clinic in the presence of patient choice. *Operations Research*, 56(3), 576-592.

Huang, Y., & Hanauer, D. A. (2014). Patient no-show predictive model development using multiple data sources for an effective overbooking approach. *Applied clinical informatics*, 5(3), 836-860.

- Hutzschenreuter, A.K., Bosman, P. A. N., Blonk-Altena, I., Aarle, J., & La Poutré, H. (2008). Agent-based patient admission scheduling in hospitals. *In Belgian/Netherlands Artificial Intelligence Conference*. pp. 315–316.
- Jiang, H., & Barnhart, C. (2009). Dynamic airline scheduling. *Transportation Science*, 43(3), 336-354.
- Jones, S.S. & Evans, R. S. (2008). An agent based simulation tool for scheduling emergency department physicians. *AMIA Annu. Symp. Proc.*, pp. 338–42.
- Klassen, K. J., & Rohleder, T. R. (1996). Scheduling outpatient appointments in a dynamic environment. *Journal of operations Management*, 14(2), 83-101.
- Kumar, A., Kapur, R. (1989). Discrete Simulation Application-Scheduling Staff for the Emergency Room. *Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference*. pp. 1112-1117.
- Liu, N., & Ziya, S. (2014). Panel size and overbooking decisions for appointment-based services under patient no-shows. *Production and Operations Management*, 23(12), 2209-2223.
- Liu, N., Ziya, S., & Kulkarni, V. G. (2010). Dynamic scheduling of outpatient appointments under patient no-shows and cancellations. *Manufacturing & Service Operations Management*, 12(2), 347-364.
- Mondschein, S., & Weintraub, G. (2002). ¿ Bajo qué Escenarios es Conveniente Realizar Citaciones en una Empresa de Servicios. *Revista Ingeniería de Sistemas*, 16(1), 21-48.
- Muñoz, D. F., & Villafuerte, D. (2015). Análisis de la Entrada en Simulación Estocástica. *Información tecnológica*, 26(1), 13-22.
- Ogulata, S. N., Koyuncu, M., & Karakas, E. (2008). Personnel and patient scheduling in the high demanded hospital services: a case study in the physiotherapy service. *Journal of medical systems*, 32(3), 221-228.
- Patrick, J., & Puterman, M. L. (2007). Improving resource utilization for diagnostic services through flexible inpatient scheduling: A method for improving resource utilization. *Journal of the Operational Research Society*, 58(2), 235-245.
- Patrick, J., Puterman, M. L., & Queyranne, M. (2008). Dynamic multipriority patient scheduling for a diagnostic resource. *Operations research*, 56(6), 1507-1525.

Puterman, M. L. (1994). Markov decision processes: Discrete dynamic stochastic programming. *New York, NY: John Wiley. doi, 10, 9780470316887.*

Robinson, S., (2005). Discrete-event simulation: from the pioneers to the present, what next? *Journal of the Operational Research Society 56 (6)*, 619– 629.

Robinson, L. W., & Chen, R. R. (2003). Scheduling doctors' appointments: optimal and empirically-based heuristic policies. *Iie Transactions, 35(3)*, 295-307.

Rohleder, T. R., & Klassen, K. J. (2000). Using client-variance information to improve dynamic appointment scheduling performance. *Omega, 28(3)*, 293-302.

Rohleder, T.R., Lewkonja, P., Bischak, D., Duffy P. & Hendijani, R. (2011). Using simulation modeling to improve patient flow at an outpatient orthopedic clinic. *Health Care Manag. Sci.*, vol. 14, no., pp. 135–145.

Rossetti, M., Trzcinski, G. & Syverud, S.A. (1999). Emergency Department Simulation and Determination of Optimal Attending Physician Staffing Schedules. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*. pp. 1532-1539.

Rouse, W.B. & Cortese, D.A. (2010). Engineering the System of Healthcare Delivery. *IOS Press, Amsterdam* .

Sadowski, D.& Grabau, M.(1999). Tips for successful practice of simulation. *Simul. Conf.*, pp. 56–61.

Samorani, M., & LaGanga, L. R. (2015). Outpatient appointment scheduling given individual day-dependent no-show predictions. *European Journal of Operational Research, 240(1)*, 245-257.

Sauré, A., Patrick, J., Tyldesley, S., & Puterman, M. L. (2012). Dynamic multi-appointment patient scheduling for radiation therapy. *European Journal of Operational Research, 223(2)*, 573-584.

Schweitzer, P. J., & Seidmann, A. (1985). Generalized polynomial approximations in Markovian decision processes. *Journal of mathematical analysis and applications, 110(2)*, 568-582.

Shannon, R. (1998). Introduction to the art and science of simulation. *Winter Simul. Conf. Proc. (Cat. No.98CH36274), vol. 1*, pp. 7–14.

Sulaf, A. (2015). Simulation modelling in healthcare: Challenges and trends. *Procedia Manufacturing 3*. 301 – 307.

- Syam, S. S., & Côté, M. J. (2012). A comprehensive location-allocation method for specialized healthcare services. *Operations Research for Health Care*, 1(4), 73-83.
- Truong, V. A. (2015). Optimal advance scheduling. *Management Science*, 61(7), 1584-1597.
- Vasilakis, C. & El-Darzi, E. (2001). A Simulation Study of the Winter Bed Crisis. *Health Care Manag. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 31–36.
- Vissers, J., & Wijngaard, J. (1979). The outpatient appointment system: Design of a simulation study. *European Journal of Operational Research* 3.6, 459–463.
- Warburg, A. (2008). *Der Bilderatlas Mnemosyne* (Vol. 1). Akademie Verlag.
- Warner, H. R. (1979). Computer--Assisted Medical Decision-Making.
- Weber, S. F. (1993). A modified analytic hierarchy process for automated manufacturing decisions. *Interfaces*, 23(4), 75-84.
- Zonderland, Maartje E., et al. "Planning and scheduling of semi-urgent surgeries." *Health Care Management Science* 13.3 (2010): 256-267.