



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

MEJORAR LA EFICIENCIA EN EL USO DE LOS PABELLONES DEL HOSPITAL
CLÍNICO DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE JOSÉ JOAQUÍN AGUIRRE MEDIANTE
ANÁLISIS ESTADÍSTICO, MACHINE LEARNING Y SIMULACIÓN

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

FELIPE SEBASTIÁN SALAZAR ROCHA

PROFESOR GUÍA:
MARCELO OLIVARES ACUÑA

PROFESORA CO-GUÍA:
SUSANA MONDSCHHEIN PRIETO

COMISIÓN:
SIMÓN MATURANA MOLINA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería

SANTIAGO DE CHILE
2024

Resumen

El manejo eficiente de los pabellones quirúrgicos implica cumplir con diversos objetivos. Estos abarcan aspectos financieros, uso de recursos físicos y humanos, la calidad y rapidez en la atención a los pacientes, entre otros. La complejidad e interrelación de estos objetivos dificulta encontrar una solución óptima, ya que es necesario equilibrarlos, a veces, en un conflicto mutuo. A modo de contexto, las utilidades reportadas por el servicio de pabellón representan el 40% de las ganancias del hospital [1], por lo que un uso ineficiente de estos espacios impacta directamente en la estabilidad financiera.

Este trabajo de investigación tiene por objetivo principal identificar, clasificar y analizar el uso del tiempo disponible de los pabellones ambulatorios con el propósito de proponer una política de programación que permita aumentar la ocupación y la cantidad de intervenciones realizadas sin provocar un aumento drástico en el sobretiempo.

Este objetivo se persigue mediante la división del uso del tiempo disponible en el pabellón en categorías de inactivo y ocupado. La categoría inactivo se subdivide en retraso al inicio del día, entre actos quirúrgicos y al final del día. Además, se calcula el error de estimación de la duración de los procedimientos quirúrgicos junto con el sobretiempo. De esta manera, se logra comprender las fuentes de inactividad y proponer una política de programación que aborde dichos márgenes identificados. Además, se emplean algoritmos de machine learning que incluyen variables del paciente, procedimiento y cirujano para predecir la duración de los actos quirúrgicos con mayor exactitud, con un enfoque de implementabilidad y programación más eficiente de los pabellones reduciendo la probabilidad de sobretiempo.

Como resultado, se ha determinado que la ocupación promedio de los pabellones durante el año 2022 oscila entre el 66.7% y el 74.15%. En relación con las fuentes de ineficiencia, se observa que los tiempos entre actos quirúrgicos son mayores cuando intervienen cirujanos distintos en dos procedimientos consecutivos, alcanzando una diferencia promedio de 21 minutos. Respecto al algoritmo de machine learning, el de mejor rendimiento fue XGBoost logrando reducir el MAPE hasta un 23.01%.

Este análisis ha derivado en una política que se enfoque en reducir los tiempos inactivos, agrupe cirugías del mismo cirujano, programe intervenciones en el tiempo liberado y realice la predicción de la duración de los procedimientos mediante machine learning. Utilizando herramientas de simulación, se cuantificó el margen de mejora, logrando un aumento de la ocupación del pabellón 12B a 81.4%, conteniendo el porcentaje de días en que el pabellón tuvo sobretiempo en el turno de las 16:00 bajo el 19.66%.

Muchas gracias a los que estuvieron, a los que están y a los que estarán.

Agradecimientos

Quiero comenzar expresando mi profundo agradecimiento a mi familia, especialmente a mis padres, Franklin Salazar Fuentes y Berta Rocha Rocha. Ellos han sido y seguirán siendo un pilar fundamental en mi vida y en mi formación académica. Siempre me han permitido dedicarme por completo a mis estudios, sin preocupaciones adicionales, proporcionándome un ambiente propicio para crecer y desarrollarme. Durante mi etapa universitaria, su compañía y apoyo fueron invaluable, especialmente en aquellos momentos en los que tenía que trabajar hasta tarde entregando trabajos, tareas, rindiendo exámenes o yéndome a buscar a la universidad a altas horas de la noche.

Además, deseo honrar la memoria de aquellas personas que, desde el cielo y durante su estadía aquí en la tierra, me brindaron apoyo, amor y consejos que me permitieron llegar hasta donde estoy hoy en día. Un abrazo y eterno agradecimiento a mi abuelito Óscar Rocha Pinilla, quien junto a mi abuelita Berta Rocha Olate, que gracias a Dios aún está compartiendo con nosotros muchas más vivencias y momentos, formaron juntos una familia llena de valores y costumbres de la que me siento orgulloso de ser parte. De igual forma, agradezco a mi tío Gustavo Rocha Pinilla, quien fue una de las personas que creyó en mí desde pequeño, buscando y recomendando un establecimiento que me brindara las herramientas y conocimientos necesarios para poder llegar a la universidad.

También, quiero reconocer y agradecer el apoyo de todos mis demás familiares, en especial a mi hermano Franklin Salazar Rocha y a mi prima Catherine Rocha Jofré, junto con su pareja Miguel Castillo. Ellos siempre creyeron en mí y me brindaron el cariño y el amor necesarios para seguir adelante y alcanzar mis metas. Su apoyo fue fundamental en los momentos de mayor estrés, ya que compartir momentos con ellos me permitió distraerme y recargar energías para continuar con mis estudios.

También deseo expresar mi gratitud a todos mis profesores, docentes, asistentes de educación, compañeros y amigos que me acompañaron y brindaron su ayuda durante mi proceso de formación, tanto en la etapa escolar como en mi etapa universitaria. Sin su colaboración, no hubiera sido posible culminar tanto mi pregrado como mi postgrado.

Asimismo, deseo agradecer a todos los profesionales y colaboradores del Hospital Clínico de la Universidad de Chile que generosamente compartieron su tiempo, experiencia y conocimiento para ayudarme en la realización de este trabajo de investigación.

Por último, pero no menos importante, quiero dar las gracias a mis profesores guía y co-guía de mi tesis, Marcelo Olivares y Susana Mondschein. Sus ideas, comentarios y críticas

constructivas fueron fundamentales para mejorar significativamente mi trabajo y descubrir aspectos importantes del mismo. También quiero hacer una mención especial a Simón Maturana, quien trabajó estrechamente conmigo y cuyos consejos, recomendaciones y diferentes puntos de vista enriquecieron aún más mi investigación.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
2. Contexto y Datos	6
3. Metodología	9
3.1. Indicadores	9
3.2. Predicción de la duración del acto quirúrgico	16
4. Resultados	21
4.1. Indicadores	21
4.2. Predicción de la duración del acto quirúrgico	30
5. Simulador	34
5.1. Construcción	34
5.2. Política de programación y heurística	37
5.3. Comparación	41
6. Discusión	44
7. Conclusión	47
Bibliografía	50
Anexo A. Procesos	51
A.1. Flujo del proceso de programación del personal de los servicios quirúrgicos	51

A.2. Etapas del proceso de programación del personal de pabellón	51
Anexo B. Diccionario de Variables	53
Anexo C. Estimación de las horas disponibles en los pabellones	55
Anexo D. Simulador	57

Índice de Tablas

3.1. Fórmula de los errores	17
3.2. Variables independientes consideradas para los modelos	17
3.3. Escenarios para calibrar y evaluar los algoritmos de predicción de la duración de los procedimientos	19
3.4. Valores de hiperparámetros utilizados para grid search	20
4.1. Indicadores del tiempo entre acto quirúrgico diferenciado si es el mismo cirujano quien realizó los procedimientos consecutivos o no	23
4.2. Indicadores del tiempo entre acto quirúrgico diferenciado si es el mismo procedimiento que se realizó consecutivamente o no	26
4.3. Indicadores del tiempo entre acto quirúrgico diferenciado si es el mismo procedimiento y cirujano en dos intervenciones consecutivas o no	27
4.4. Porcentaje de pabellones con sobretiempo y horas de sobretiempo promedio por turno	29
4.5. Sobretiempo de pabellones por turno	29
4.6. Errores de los modelos de machine learning en la base de testeo	32
4.7. Importancia de las variables del modelo CART que incluye la estimación de pabellón	33
4.8. Importancia de las variables del modelo XGBoost que incluye la estimación de pabellón	33
5.1. Comparación de los indicadores del pabellón 12B con el caso base del simulador	36
5.2. Comparación del sobretiempo del pabellón 12B con el caso base del simulador por turno	37
5.3. Comparación de la cantidad de intervenciones realizadas con el caso base del simulador	37

5.4. Valores del ponderador y margen al final del día	40
5.5. Promedios e intervalos de confianza de la media entre el caso base y heurística	43
B.1. Diccionario de Variables de la Base	54
D.1. Promedios e intervalos de confianza de la media entre el caso baso e heurística de todos los indicadores	57

Índice de Ilustraciones

2.1. Descripción del proceso de limpieza de la base de datos	7
3.1. Ejemplo del uso del tiempo de dos pabellones	10
3.2. Flujograma de definición de la hora de término por pabellón	12
4.1. Ocupación desagregada por día de la semana	21
4.2. Ocupación desagregada por mes del año	22
4.3. Desagregación del uso del tiempo disponible promedio de los pabellones	22
4.4. Desagregación del uso del tiempo disponible promedio de los pabellones según cada pabellón.	24
4.5. Control chart de tiempo inactivo al inicio del día desagregado por mes del año y día de la semana	25
4.6. Control chart de tiempo inactivo al final del día desagregado por mes del año y día de la semana	25
4.7. Control chart de tiempo inactivo entre cirugías desagregado por día de la semana	25
4.8. Comparación de tiempos entre cirugías dependiendo de si es el mismo cirujano, procedimiento o cirujano y procedimiento en dos cirugías consecutivas diferenciando por pabellón	28
4.9. Histogramas del sobretiempo	29
4.10. Error porcentual del pronóstico de la estimación del acto quirúrgico	30
5.1. Ocupación y sobretiempo en función del ponderador	41
5.2. Ocupación y sobretiempo en función del margen al final del día	41
A.1. Proceso de programación generalizada de los servicios quirúrgicos	51

A.2. Etapas del proceso de programación dentro del servicio de pabellón	52
C.1. Comportamiento semanal de horas disponibles contratadas y estimadas . . .	56
D.1. Gráficos de sensibilidad de los indicadores variando el valor del ponderador. .	58
D.2. Gráficos de sensibilidad de los indicadores variando el valor del margen al final del día.	59
D.3. Gráficos de densidad de indicadores en caso base y heurística.	60

Capítulo 1

Introducción

El manejo eficiente de los pabellones quirúrgicos se centra en cumplir una variedad de objetivos que involucran a diversos actores. Uno de estos aspectos cruciales es el financiero, ya que los pabellones representan un 40 % de las ganancias de los hospitales, siendo también una de las principales fuentes de costos e ingresos [1]. Desde la perspectiva del proveedor de servicios, un uso ineficiente de los pabellones tiene un impacto significativo en los resultados financieros.

Además, se debe velar por los pacientes y garantizar la prontitud en la realización de sus intervenciones para abordar sus condiciones médicas. Este objetivo cobra mayor importancia en Chile, donde, según datos hasta el 31 de diciembre de 2022, 267 380 personas se encuentran en lista de espera para patologías NO GES [2]. Esta cifra se incrementa aún más si se incluyen las 87 enfermedades contempladas en el plan GES. Por lo tanto, una gestión eficiente de este recurso contribuiría a reducir la cantidad de intervenciones en lista de espera.

Otro aspecto crucial es la atención a los profesionales que llevan a cabo las intervenciones, asegurándose de tener disponible todo lo necesario para que puedan realizar su trabajo de manera efectiva. Asimismo, es esencial cumplir con sus horarios de trabajo, evitando la sobrecarga laboral, factor que incide en el aumento de la probabilidad de ausentismo laboral [3].

Dada la naturaleza multiobjetivo del problema de programación, se evidencia que la solución no es trivial. Un ejemplo de esto es que si se programan muchas intervenciones debido a una subestimación de la duración de los procedimientos, se podría lograr una disminución en la lista de espera, ya que se incrementaría la cantidad de intervenciones, bajo la suposición de que se llevan a cabo todas las programadas. Sin embargo, este enfoque podría resultar en un aumento de la probabilidad de sobretiempo, lo que a su vez incidiría en una mayor sobrecarga laboral. A mediano plazo, esto podría desencadenar un aumento en el ausentismo laboral, impactando negativamente en la cantidad efectiva de intervenciones realizadas. En este ejemplo, se destaca la necesidad de una solución que considere múltiples factores, ponderando cuidadosamente todos los objetivos del problema.

Profundizando en la gestión de los pabellones, esta tarea involucra decisiones estratégicas, tácticas y operacionales. En la esfera estratégica, se encuentra la determinación de la cantidad

de pabellones que debe construir un hospital. A nivel táctico, se incluyen decisiones como la estimación del tiempo necesario para cada procedimiento dentro del pabellón. Por otro lado, la elección del pabellón específico donde se llevarán a cabo las intervenciones, así como el orden en que se realizarán, son ejemplos de decisiones operacionales [4]. Este enfoque tridimensional en la toma de decisiones destaca la complejidad y la interconexión de factores que caracterizan la gestión eficiente de los pabellones quirúrgicos.

Es importante destacar que las decisiones operacionales están limitadas por las decisiones estratégicas y tácticas tomadas previamente. Esto abarca aspectos como la definición de la infraestructura física, la cantidad de profesionales disponibles y la manera en que se distribuye el tiempo del pabellón entre los diferentes servicios, decisiones que son limitantes que se deben tener en consideración al momento programar intervenciones.

Ahondando en la programación de intervenciones, estas dependen del tipo de paciente, clasificándose en ambulatorios e internos. Esta distinción se debe principalmente al tiempo disponible para responder a la solicitud de intervención. Los pacientes ambulatorios permiten una mayor flexibilidad en la programación, ya que los procedimientos pueden planificarse con un margen de tiempo más amplio. Por otro lado, los pacientes internos deben ser atendidos con mayor urgencia debido a su estado crítico de salud.

Otro aspecto relevante es la estimación precisa de las intervenciones quirúrgicas desempeña un papel clave en la programación. Una predicción más exacta de las intervenciones facilitaría una planificación más eficiente de los pabellones, aumentando la cantidad de intervenciones realizadas y gestionando de manera más efectiva el sobretiempos del personal. Además, se obtienen otros beneficios, como iniciar las intervenciones según el horario programado, brindando a los cirujanos un mejor control sobre su tiempo y reduciendo el tiempo de espera de los pacientes durante el día de la intervención.

Las principales formas de abordar la gestión de pabellones desde el punto de vista operacional consisten en dividir el problema en dos aspectos: “advance scheduling” y “allocation scheduling”. El primero se centra en asignar las intervenciones a un día, distribuyéndolas según las restricciones consideradas para la asignación de pacientes. En su forma más básica, se tiene en cuenta solo el tiempo disponible en el pabellón, pero en enfoques más especializados se consideran restricciones de recursos como enfermeras, camas y horarios. Por otro lado, el “allocation scheduling” se enfoca en asignar el pabellón donde se llevará a cabo el procedimiento y la hora de inicio programada, estableciendo así el orden de las intervenciones durante el día, asumiendo que todos los pacientes están listos para la operación [5].

En cuanto a este trabajo de investigación, se enfoca en comprender el uso del tiempo disponible en los pabellones donde se programan intervenciones ambulatorias. El objetivo es identificar, clasificar y analizar las fuentes de ineficiencia con el propósito de proponer una política de programación que permita aumentar la ocupación y la cantidad de intervenciones realizadas sin provocar un aumento drástico en el sobretiempos.

El estudio se llevó a cabo en el Hospital Clínico de la Universidad de Chile José Joaquín Aguirre, construido en 1952 y reconocido por su liderazgo en el conocimiento médico a nivel nacional. Este hospital desempeña un papel fundamental en la formación de especialistas y estudiantes de pregrado, reflejando esta labor en su misión institucional [6]. La institu-

ción cuenta con 17 pabellones de cirugías electivas, distribuidos entre los diversos servicios quirúrgicos, cuya asignación se ha definido previamente y se mantiene constante en el tiempo.

En relación con el procedimiento de programación de intervenciones quirúrgicas, este se lleva a cabo principalmente en cada uno de los servicios quirúrgicos, mostrando heterogeneidad en la forma en que cada uno realiza la programación. En líneas generales, el paciente primero acude al policlínico y, después de la evaluación médica, el profesional decide la necesidad de una intervención en el pabellón. Posteriormente, se emite una orden de hospitalización, y el paciente debe dirigirse a admisión para realizar el presupuesto de la intervención. Una vez completado este proceso, el paciente decide si desea someterse al procedimiento. En caso afirmativo, firma el pagaré y se comunica con la secretaría quirúrgica de cada servicio para coordinar la fecha de la intervención. Esta actividad implica la coordinación del horario del cirujano y la estimación de la duración del acto quirúrgico. Paralelamente, se llevan a cabo los exámenes preoperatorios para asegurar que el paciente se encuentra capacitado físicamente para ser sometido al procedimiento. En situaciones en las que la intervención requiere insumos especiales¹, es necesario gestionar su disponibilidad con las empresas correspondientes, asegurándose de que estén disponibles el día de la intervención.

Después de que se hayan cumplido todas las condiciones mencionadas anteriormente, las intervenciones programadas se envían a pabellón tres días antes de la fecha prevista. En esta etapa, el personal de pabellón se encarga de verificar y, si es necesario, corregir las estimaciones de tiempos. Este proceso consta de contrastar la duración sugerida por los servicios quirúrgicos con la media que tiene el cirujano en el procedimientos que va a realizar², dato que se encuentra en ficha clínica electrónica³. También se aseguran de que las intervenciones programadas no excedan el tiempo disponible del pabellón y de que los pacientes hayan completado sus trámites administrativos.

Este método de programación tiene una alta dependencia de la experiencia del personal encargado de realizar las estimaciones de los actos quirúrgicos. Por lo tanto, en situaciones como las vacaciones o licencias médicas, donde dicho personal no esté disponible, las estimaciones pueden verse afectadas.

El flujo de programación que se desarrolla en los servicios se resume en la figura A.1, disponible en el anexo A, donde cada fila representa al responsable de llevar a cabo la actividad. Es importante destacar que, debido a su carácter general, ciertas particularidades no se detallan en la imagen por razones de comprensión. Por otro lado, las actividades y etapas que realiza el personal de pabellón se presentan con más detalles en la figura A.2 del anexo A.

Este estudio se abordó de dos maneras. En primer lugar, se emplearon algoritmos de machine learning para realizar predicciones más precisas de la duración de las intervenciones. Específicamente, se utilizarán Support Vector Machine (SVM), Árboles de Regresión

¹Insumos que no se encuentran disponibles inmediatamente en el hospital.

²Este solamente contempla la duración de la intervención, es decir, no contempla la anestesia ni la preparación y limpieza del pabellón por lo que de acuerdo al procedimiento el personal de pabellón en base a su experiencia le agrega entre 30 a 60 minutos.

³*“La ficha clínica es el instrumento obligatorio en el que se registra el conjunto de antecedentes relativos a las diferentes áreas relacionadas con la salud de las personas, que tiene como finalidad la integración de la información necesaria en el proceso asistencial de cada paciente” [7]*

(CART), Regresión Lineal y Extreme Gradient Boosting (XGBoost). Estos modelos fueron entrenados utilizando datos de procedimientos realizados en los pabellones donde se llevan a cabo cirugías electivas durante el período comprendido entre 2021 y 2022. La base de datos contiene variables del paciente, primer cirujano, procedimiento a realizar y la estimación realizada por el personal de pabellón. Después de entrenar y evaluar los modelos, se logró, en el mejor escenario, reducir el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE por sus siglas en inglés) en la base de prueba de 29.49 % a 23.01 %.

Por otro lado, se llevó a cabo la creación y análisis de indicadores que reflejaran el uso de los pabellones, con el objetivo de construir una política de programación. Estos indicadores incluyen la ocupación, los tiempos inactivos dentro del pabellón (desagregados en retraso al inicio del día, tiempos entre procedimientos y tiempo inactivo al final del día), sobretiempo y el error porcentual de estimación de las cirugías. La construcción de estos indicadores se basa en los datos de los procedimientos realizados durante el año 2022, los cuales se encuentran en la ficha clínica electrónica. El análisis conjunto de cada indicador permitirá proponer una política de programación centrada en aumentar la ocupación de los pabellones, reflejada en una mayor cantidad de intervenciones realizadas, con especial atención en no aumentar el sobretiempo.

La política identificada que consiste en la reducción del tiempo ocioso al inicio del día, el aumento de la cantidad de intervenciones consecutivas del mismo cirujano, la predicción de la duración de las intervenciones mediante machine learning y la incorporación de nuevas intervenciones para completar el tiempo ocioso liberado se evaluó mediante simulación para identificar y cuantificar el potencial de mejora con respecto a la situación actual. La construcción del simulador se basó en las intervenciones realizadas en un pabellón del servicio de cirugía durante el año 2022. En este simulador, se calcularon las mismas métricas utilizadas para comprender el comportamiento del pabellón, destacando la ocupación y el sobretiempo. Se desarrolló una heurística que reflejara la idea central de la política descrita. La implementación de esta, resultó en un aumento de la ocupación del 71.63 % al 81.4 %, traduciéndose en un promedio de 2.88 intervenciones adicionales por semana. Además, se logró contener la proporción de días en los que el pabellón tuvo sobretiempo mayor a 30 minutos alcanzando un valor de 19.66 % y 21.3 % para los pabellones programados hasta las 16:30 y 20:00, respectivamente.

Las contribuciones del estudio incluyen:

- La predicción de la duración de las intervenciones mediante algoritmos de machine learning. Se utilizaron algoritmos que toman en cuenta diversas variables, como las características del paciente, del cirujano y del procedimiento. Además, se enfocó en la implementación práctica de estos algoritmos, asegurando su viabilidad y aplicabilidad en situaciones reales en el entorno quirúrgico. Esta característica implementativa añade un valor práctico al estudio al proporcionar herramientas que pueden ser utilizadas en la programación efectiva de intervenciones quirúrgicas.
- El análisis detallado de estas fuentes permite identificar y comprender las variables que contribuyen a la inactividad en el pabellón quirúrgico. Este enfoque proporciona información valiosa para mejorar la programación de intervenciones, ya que permite identificar factores específicos que pueden ser considerados y ajustados con el objetivo

de reducir el tiempo ocioso y optimizar la eficiencia operativa en el entorno quirúrgico.

- La construcción de una heurística que captura las principales acciones derivadas del estudio representa un avance significativo. Esta heurística se diseñó para aprovechar las brechas identificadas en el análisis de las fuentes de tiempo ocioso en los pabellones. Al desarrollar esta heurística, se han identificado estrategias y prácticas específicas que podrían implementarse para mejorar la eficiencia operativa y reducir el tiempo inactivo.
- La creación de un simulador como método para cuantificar de manera práctica el potencial de mejora en comparación con la situación actual. Este simulador proporciona una plataforma para evaluar y visualizar el impacto de posibles cambios en la programación de intervenciones, permitiendo tomar decisiones informadas sobre cómo optimizar el uso de los recursos en el pabellón quirúrgico.

Capítulo 2

Contexto y Datos

El Hospital Clínico de la Universidad de Chile José Joaquín Aguirre fue inaugurado en el año 1952 y ha desempeñado un papel destacado en el avance del conocimiento médico a nivel nacional. Se ha consolidado como un centro formador de especialistas y estudiantes de pregrado, siendo esta una de sus principales responsabilidades, que refleja y lleva a cabo en su misión institucional [6].

En cuanto a su infraestructura, el hospital cuenta con 22 pabellones, 502 camas y 73 camas críticas. En relación con su personal, dispone de 600 académicos y 3700 funcionarios que contribuyen al servicio a la comunidad. Además, su equipo profesional quirúrgico se divide en 17 especialidades [8].

Dentro de los 22 pabellones del hospital, 17 están destinados a cirugías electivas, 4 están designados para atender urgencias y 1 está dedicado a realizar procedimientos de imagenología y tratar aneurismas. El tiempo disponible en los 17 pabellones de cirugías electivas se distribuye entre los diferentes servicios quirúrgicos, permitiéndoles programar sus intervenciones.

En cuanto a los pabellones de cirugías electivas, el personal contratado permite que 10 de ellos estén operativos durante 12 horas, y los 7 restantes lo estén durante 8.5 horas. Los horarios son de 08:00 a 20:00 y de 08:00 a 16:30, respectivamente. Para los sábados, se dispone de 3 pabellones operativos durante 6 horas, con horario de 08:00 a 14:00. Es importante destacar que los horarios de los pabellones no están fijos y se ajustan según la realidad semanal. No obstante, el tiempo disponible para que los servicios programen sus intervenciones está predefinido y es constante.

Los datos disponibles corresponden a los procedimientos quirúrgicos llevados a cabo durante los años 2021 y 2022, extraídos de la ficha clínica electrónica. La información abarca diversas variables, incluyendo datos del paciente como el rut, edad, sexo y diagnóstico. También se registran detalles específicos del procedimiento, como su código, duración estimada, técnica utilizada, y fechas relacionadas, como la entrada y salida de pabellón, el inicio y término del procedimiento, y el inicio y fin de la anestesia. Además, se recopilan datos relacionados con los profesionales presentes durante la intervención, como su rut y tipo de profesional. Una descripción completa de todas las variables presentes en la base de datos se

encuentra en la tabla B.1 en el anexo B.

La unidad de análisis para este estudio será el “acto quirúrgico”, definido como el conjunto de procedimientos que se llevan a cabo de manera consecutiva en un paciente dentro de un pabellón durante un día específico. Un acto quirúrgico puede estar compuesto por múltiples procedimientos o, en algunos casos, contener solo uno.

En relación con la base de datos, se dispone de un total de 130 592 registros. La estructura de la base de datos sigue un formato long con respecto al tipo de profesional, lo que significa que hay registros para cada procedimiento equivalente a la cantidad de profesionales presentes en dicho procedimiento.

Dada la sobrerepresentación de los actos quirúrgicos debida al formato long con respecto al tipo de profesional y la posibilidad de que un acto quirúrgico tenga asociados más de un procedimiento, se ha decidido, en primer lugar, construir un identificador (ID) que permita identificar de manera única los actos quirúrgicos. A sugerencia del hospital, se propuso utilizar el número de cuenta en conjunto con la fecha del procedimiento para crear este ID. Posteriormente, con base en dicho ID, se procederá a filtrar los procedimientos, dejando únicamente un registro por cada acto quirúrgico.

Además, se realizaron los siguientes filtros:

- Se eliminaron los procedimientos realizados en pabellones que están fuera del alcance del estudio.
- Se excluyeron los procedimientos llevados a cabo en días feriados o domingos, ya que en estos días no se programan cirugías electivas.
- Se eliminaron los registros que no contaban con información de fecha, hora de entrada y salida de pabellón, así como duración estimada.
- Se aplicó un filtro relacionado con los procedimientos que tenían registrada la hora de entrada a pabellón antes de las 07:30 y después de las 19:30. Se considera que en dicho horario solo se realizan cirugías de urgencia. Además, para los procedimientos realizados los días sábados, se excluyeron aquellos que comenzaban después de las 14:00, por la misma razón mencionada anteriormente.

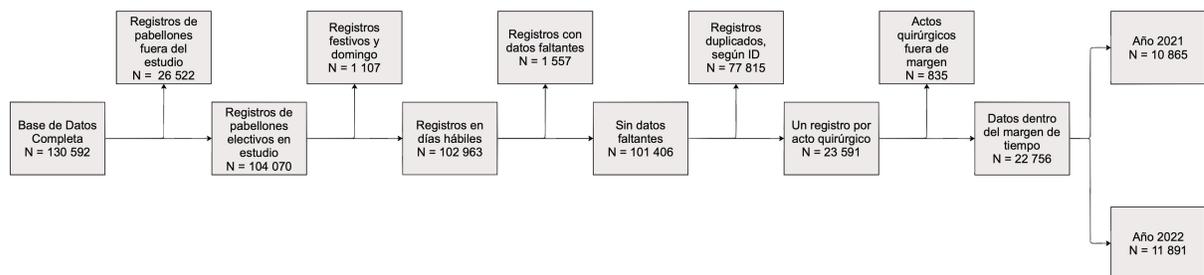


Figura 2.1: Descripción del proceso de limpieza de la base de datos

Después de aplicar la limpieza de datos mencionada anteriormente y resumida en la figura 2.1, se dispone de un total de 10 865 actos quirúrgicos registrados durante el año 2021 y 11 891 durante el año 2022.

En relación con la duración del acto quirúrgico, esta se define como la cantidad de tiempo que el paciente permanece en el interior del pabellón. El cálculo de la duración se realiza mediante la resta entre la hora de salida de pabellón y la hora de entrada a pabellón, utilizando las variables disponibles en la base de datos.

Capítulo 3

Metodología

La metodología empleada para alcanzar el objetivo se dividirá en dos tópicos. El primero consiste en definir y construir indicadores, mientras que el segundo detalla el conjunto de tareas para estimar la duración de los actos quirúrgicos.

3.1. Indicadores

El horizonte de tiempo que se considerará para la construcción y análisis de los indicadores contempla únicamente los registros pertenecientes al año 2022.

Los primeros indicadores se centran en comprender cómo se utiliza el tiempo disponible en los pabellones durante un día hábil. La elección y configuración de estos indicadores se basaron en lo establecido en el artículo de Alex Macairo [9]. Se clasifica el tiempo en ocupado e inactivo, donde el tiempo ocupado representa el período durante el cual un paciente se encuentra en el interior del pabellón. El tiempo restante se categoriza como inactivo.

El tiempo inactivo, a su vez, se subdivide en tres categorías: al comienzo del día, entre actos quirúrgicos y al final del día. El primero se define como el retraso en el ingreso del primer paciente al pabellón. El tiempo entre actos quirúrgicos contempla el período entre la salida de un paciente y la entrada del siguiente. Finalmente, el tiempo inactivo al final del día es el lapso entre la salida del último paciente y el horario de cierre del pabellón.

Dentro de los tiempos entre actos quirúrgicos se dividen en dos subcategorías: aquellos donde la cirugía precedente termina antes de lo programado y los que la cirugía empieza después del término programado de la precedente. Esta diferencia se justifica en que si el acto quirúrgico termina antes de lo programado, se debe a la aleatoriedad de la duración, así como a la cantidad de tiempo que se estimó la duración del procedimiento, mientras que si empieza después de lo programado es debido principalmente a la falta de preparación del pabellón, del paciente y/o del personal.

De igual manera, se decide cuantificar el sobretiempo incurrido para poder cumplir con los actos quirúrgicos. Este último, tiene estrecha relación con el tiempo inactivo al final del

día, dado que cuando existe tiempo ocioso al final del día, el sobretiempo es 0, mientras que en el caso contrario, el tiempo ocioso es 0.

Con la finalidad de aclarar la clasificación anterior, en la figura 3.1 se expone un ejemplo mediante una ilustración y clasificación de los tiempos entre actos quirúrgicos. En ella se encuentran representados dos pabellones, donde se programaron tres cirugías en cada uno, y sus inicios y fin programados se representan con líneas negras y marrones, respectivamente.

La figura 3.1 proporciona una representación visual del tiempo ocupado y los diferentes tipos de tiempos inactivos en dos pabellones. El tiempo ocupado dentro del horario hábil de funcionamiento en cada pabellón se muestra mediante la suma de los rectángulos azules, que corresponden al tiempo que el paciente estuvo al interior del pabellón. La suma del tiempo amarillo, verde, azul y gris representa el tiempo inactivo. En el caso del pabellón X, se incurrió en sobretiempo para poder terminar la última intervención, indicado por el color morado. La leyenda de la figura explica la relación entre los colores y los tipos de tiempos representados.

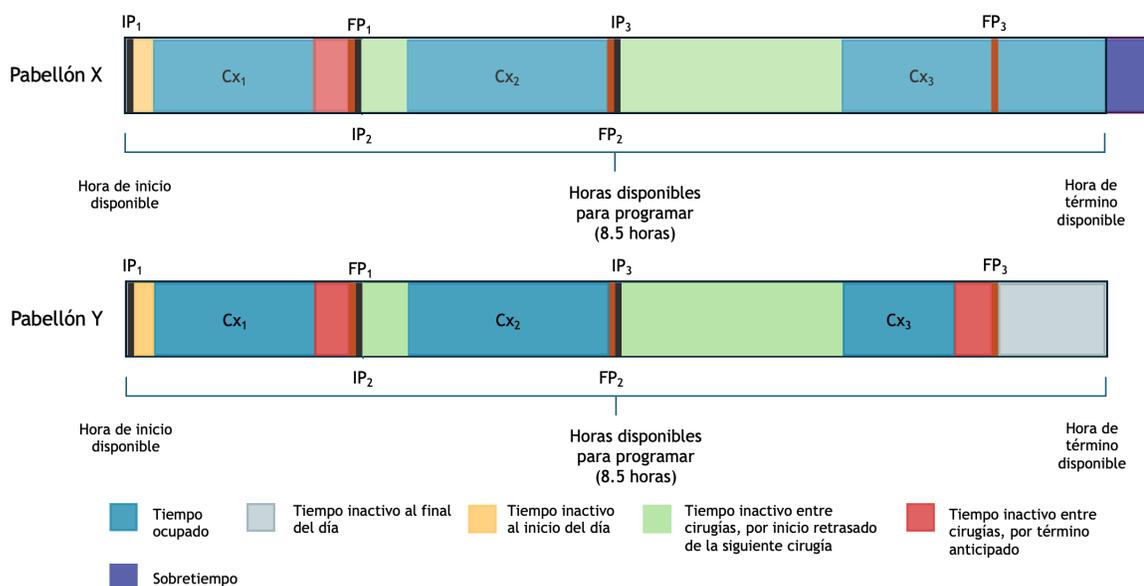


Figura 3.1: Ejemplo del uso del tiempo de dos pabellones

Para cuantificar el error de estimación de los actos quirúrgicos y determinar si hay un sesgo en la sobreestimación o subestimación de la duración de los procedimientos, se introduce el error porcentual de estimación. Este indicador mide la desviación porcentual de la duración de los procedimientos con respecto a la duración real.

A continuación, se presentan las fórmulas y definiciones de los indicadores, junto con observaciones para realizar los cálculos con los datos disponibles.

Ocupación

Definición: Este indicador se calcula como el porcentaje de tiempo durante el cual un paciente estuvo dentro del pabellón en comparación con el tiempo total disponible en un día. La fórmula de cálculo para el pabellón k en el día t es la siguiente:

$$Ocupación_{kt} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{kt}} (TF_i - TI_i)}{\text{Tiempo disponible}_{kt}}$$

Donde:

- n_{kt} es la cantidad de cirugías que se realizaron en el pabellón k el día t .
- TF_i es el mínimo entre la hora de salida del pabellón de la cirugía i y la hora de término disponible del pabellón.
- TI_i es la hora de entrada al pabellón de la cirugía i .

Observaciones del cálculo

Dado que no se cuenta con información específica sobre los horarios de cada pabellón, se realizan dos aproximaciones para estimar la cantidad de tiempo disponible para programar en cada pabellón durante el año. Ambas aproximaciones buscan proporcionar una visión del rendimiento relativo del pabellón.

La primera aproximación se basa en la información proporcionada por el personal del hospital, que indica que es factible programar 10 pabellones durante 12 horas y 7 pabellones durante 8.5 horas en un día, de lunes a viernes, mientras que para el día sábado son 3 pabellones durante 6 horas cada uno. En consecuencia, se agrupan todas las intervenciones realizadas durante un día y se dividen por el tiempo disponible antes mencionado. La fórmula para el día t es la siguiente:

$$Ocupación_t = \frac{\sum_{k=1}^P \sum_{i=1}^{n_{tk}} C_{ikt}}{12 \cdot 10 + 8,5 \cdot 7}$$

Donde C_{ikt} ¹, es la duración del acto quirúrgico i en el pabellón k durante el día t , n_{tk} corresponde a la cantidad de procedimientos que se realizaron en el pabellón k durante el día t y P la cantidad de pabellones. Mientras que el denominador corresponde a un día de lunes a viernes, para el caso del día sábado este cambia a $3 \cdot 6$.

Una analogía de la situación anterior es que todas las intervenciones se realicen en un gran pabellón, y se puede interpretar como el porcentaje de la capacidad contratada que se está utilizando realmente.

Esta forma de calcular la ocupación tiene limitaciones; no permite diferenciar la ocupación por pabellón, ya que se agrupan todos los actos quirúrgicos, ni permite capturar variaciones en los horarios de los pabellones que se originen. Por otro lado, solo permite eliminar los sobretiempos de los pabellones que terminan a las 20:00 y aquellos que se programan durante un día sábado. Esto se debe principalmente a que no se puede diferenciar el horario de término de los pabellones y solo se puede utilizar como fuente el día en que ocurrió el acto quirúrgico

¹No se considera el sobretiempos en la duración del procedimiento; el cálculo de este está restringido a los supuestos utilizados para calcular la ocupación.

y el máximo horario disponible. Esto influiría directamente en una sobreestimación de la ocupación de los pabellones.

La segunda se basa en un análisis empírico de lo que se realizó durante ese día en el pabellón. Es decir, de lo programado se desprende el horario de cada pabellón durante ese día. Para el caso del día sábado, se desprende que el horario de término de los pabellones siempre es a las 14:00, ya que no hay otro horario para dicho día. Mientras que en el resto de los casos, se establece que si la última hora de término programada² es menor a las 17:00 (se da un margen de 30 minutos), se establece que ese pabellón estaba programado hasta las 16:30, y en caso contrario, se establece que el pabellón se encontraba programado hasta las 20:00. Esto se ve representado gráficamente en la figura 3.2.

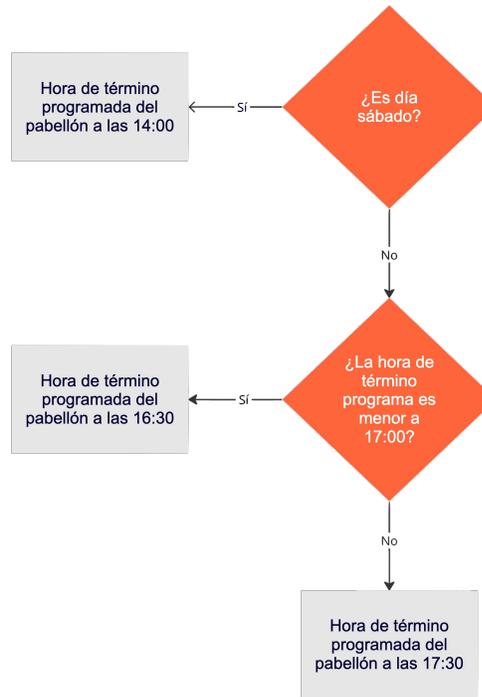


Figura 3.2: Flujograma de definición de la hora de término por pabellón

Esta manera de calcular el indicador se puede entender como el porcentaje de lo que se programó realmente se ocupó durante el día, como se refleja en la siguiente fórmula.

$$\text{Ocupación}_{kt} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{kt}} C_{ikt}}{\text{Hora de término estimada}_{kt} - 08:00 \text{ am}}$$

Donde C_{ikt} ³ es la duración del acto quirúrgico i en el pabellón k durante el día t y n_{kt} la cantidad de procedimientos realizados en el pabellón k durante el día t .

²La hora de término programada se define como la hora de inicio programada más la duración estimada.

³No se considera el sobretiempo en la duración del procedimiento; el cálculo de este se encuentra restringido a los supuestos utilizados para calcular la ocupación.

Esta fórmula permite incorporar la variación entre los horarios de los pabellones, pero tiende a subestimar los horarios, dado que si un pabellón terminó a las 16:45, entenderá que el pabellón estaba destinado a terminar a las 16:30, y puede ser que se tenía dicho pabellón programado hasta las 20:00. Esto influye directamente en la ocupación, ya que una subestimación del horario disponible a programar afecta la sobreestimación de la ocupación.

Observación: En ciertos registros, hay errores en el registro de la hora de término de los pabellones, lo que provoca que, según los datos, en algunas ocasiones se realizaran dos procedimientos diferentes con distintos pacientes en el mismo pabellón durante un periodo de tiempo compartido. Este acontecimiento fue consultado a los profesionales del hospital, y respondieron que es algo imposible que suceda y que esto fue simplemente un error de registro. Por lo tanto, se procedió a eliminar dicha superposición de intervenciones para evitar sobreestimar la ocupación.

Sobretiempo

Definición: Es la cantidad de tiempo, fuera del tiempo total diario durante el cual un pabellón está disponible, que se incurre para que se cumpla con la realización de la última cirugía. Su fórmula para el pabellón k en el día t se encuentra a continuación.

$$\max\{\max\{TF_i \mid i \in I_{kt}\} - TFP_{kt}, 0\}$$

Donde:

- TF_i es la hora de término de la cirugía.
- I_{kt} es el conjunto de cirugías que se realizaron en el pabellón k el día t .
- TFP_{kt} es la hora de término disponible que tiene el pabellón k en el día t .

Observación: Es menester para el cálculo de este indicador una hora de término disponible del pabellón y este se obtiene bajo la misma metodología ilustrada en la figura 3.2. Por lo tanto, como consecuencia a la forma en la que se calcula podría en algunos casos sobrestimar el valor del sobretiempo.

Tiempo inactivo al inicio del día

Definición: Porcentaje de tiempo que un pabellón se encuentra desocupado al comienzo del día. Este se define como la resta entre el comienzo de la primera intervención y las 08:00 am. La fórmula de cálculo para el pabellón k en el día t se encuentra a continuación.

$$\frac{\min\{TI_i \mid i \in I_{kt}\} - 08 : 00 \text{ am}}{\text{Tiempo disponible}_{kt}}$$

Donde:

- I_{kt} es el conjunto de cirugías que se realizaron en el pabellón k el día t .
- TI_i es la hora de entrada al pabellón de la cirugía i .

Tiempo inactivo al final del día

Porcentaje del tiempo total disponible durante el día que el pabellón se encuentra vacío debido a que la última cirugía terminó antes del fin disponible del pabellón.

$$\frac{\max\{TFP_{kt} - \max\{TF_i \mid i \in I_{kt}\}, 0\}}{\text{Tiempo disponible}_{kt}}$$

Donde

- TFP_{kt} es la hora de término disponible que tiene el pabellón k en el día t .
- TF_i es el máximo entre la hora de salida del pabellón de la cirugía i y la hora de término programada de la cirugía.
- I_{kt} es el conjunto de cirugías que se realizaron en el pabellón k el día t .

Observación: Este indicador se mide en porcentaje debido a que no se tiene una hora de término fija para todos los pabellones durante todos los días, por lo que pueden existir conflictos al comparar los pabellones y hacer cálculos agregados. La definición de la hora de término disponible del pabellón se realiza mediante la misma metodología ilustrada en la figura 3.2.

Tiempo inactivo entre cirugías

Término anticipado

Porcentaje del tiempo diario disponible de un pabellón que permanece inactivo debido a que la cirugía precedente termina antes de lo presupuestado.

$$\frac{\sum_{i=1}^{n_{kt}} \min\{TI_{i+1,k,t}, FP_{ikt}\} - TF_{ikt}}{\text{Tiempo disponible}_{kt}}$$

Donde:

- $TI_{i+1,k,t}$ es la hora de entrada al pabellón k de la cirugía $i + 1$ en el día t . Para el caso de la última intervención $TI_{n+1,k,t}$ es ∞ , con n el índice de la última intervención.
- FP_{ikt} es el fin programado de la cirugía i en el pabellón k durante el día t .
- TF_{ikt} es la hora de salida del pabellón k de la cirugía i durante el día t .

- n_{kt} es la cantidad de cirugías realizadas en el pabellón k el día t .

Observación: Este indicador se mide en porcentaje debido a que no se tiene una hora de término fija para todos los pabellones durante todos los días, lo que podría generar conflictos al comparar los pabellones. Además, es importante señalar que se incluye la última cirugía dentro del indicador, siempre y cuando esta termine antes de lo presupuestado.

Inicio Retrasado

Es el porcentaje del tiempo total disponible durante el día que el pabellón se encuentra inactivo debido a que la siguiente cirugía comenzó después del término programado de la anterior.

$$\frac{\sum_{i=1}^{n_{kt}} TI_{i,k,t} - \max\{TF_{i-1,k,t}, FP_{i-1,k,t}\}}{\text{Tiempo disponible}_{kt}}$$

Donde:

- $TI_{i,k,t}$ es la hora de entrada al pabellón k de la cirugía i en el día t .
- $FP_{i-1,k,t}$ es el fin programado de la cirugía $i - 1$ en el pabellón k durante el día t .
- $TF_{k,i-1,t}$ es el mínimo entre la hora de salida del pabellón de la cirugía $i - 1$ y la hora de término programada del pabellón k en el día t .
- $FP_{0,k,t}$ y $TF_{k,0,t}$ son iguales a $TI_{1,k,t}$ ⁴

Observación: Este indicador se mide en porcentaje debido a que no se tiene una hora de término fija para todos los pabellones durante todos los días, lo que podría generar conflictos al comparar los pabellones.

Para el cálculo de estos dos indicadores, es necesario contar con la hora de término programado de cada una de las intervenciones, la cual no está disponible en la base de datos. Sin embargo, se construye a partir de la suma de la hora de inicio programado y la duración estimada.

Error porcentual

Cuantifica la desviación porcentual de la estimación de los actos quirúrgicos con respecto a la duración real. De este indicador se desprende que aquellos valores mayores a 0 indican que se subestimó la duración de las intervenciones, mientras que en el caso que sea menor a 0, se sobreestimó la duración de las intervenciones. El caso ideal sería cuando el indicador es 0; en ese escenario, la duración real y estimada fueron iguales. La fórmula para la cirugía i se encuentra a continuación:

⁴El retraso al inicio del día se calcula de manera independiente.

$$\frac{\text{duración real}_i - \text{duración estimada}_i}{\text{duración real}_i}$$

Observación: El indicador no considera las intervenciones que tuvieron una duración menor a 15 minutos, ya que se entiende como errores de registro o que el acto quirúrgico no se realizó debido a alguna complicación del paciente al ingresar a pabellón.

Es importante destacar que existe una predisposición a la existencia de sesgo en el cálculo de este indicador, ya que el personal de pabellón incluye dentro de su estimación el tiempo de *set up* del pabellón, dato que no se encuentra contemplado en la duración real. Esto se debe a que el proceso de *set-up* se realiza después de que un paciente deja la sala de pabellón y no se registra su realización.

Finalmente, después de tenerlos expresados, se procede a analizar y decantar información de ellos, como la magnitud de la ineficiencia y oportunidades de mejora dentro del proceso.

En la misma línea, se lleva a cabo un análisis de posibles factores que podrían incidir en los tiempos inactivos entre actos quirúrgicos. Se investiga tres posibles influencias en los tiempos, en primer lugar, se estudia si la presencia del mismo cirujano en actos quirúrgicos consecutivos influye. Luego se evalúa si la realización del mismo procedimiento consecutivamente condiciona los tiempos entre actos quirúrgicos. Y por último, se analiza si la coincidencia del cirujano y procedimiento de manera consecutiva afecta dicho tiempo. La comparación de estos factores se realiza mediante la prueba t de Student, que compara las medias de dos muestras independientes.

Es importante señalar que, debido a la superposición de tiempos, existen ocasiones en las que los tiempos entre actos quirúrgicos son 0. Para el análisis anterior, se eliminaron los registros asociados a estos casos. Además, según el personal médico del hospital, se establece que el tiempo de limpieza entre un acto y otro debe ser de al menos 15 minutos, justificando la imposibilidad de que existan registros iguales a 0. Cabe mencionar que en este caso no se diferencian los tiempos entre actos quirúrgicos en término anticipado o inicio retrasado, solamente se toma el valor absoluto.

3.2. Predicción de la duración del acto quirúrgico

En la elaboración de los algoritmos, se tuvo como objetivo mejorar la estimación de la duración del acto quirúrgico en comparación con la estimación actual desarrollada por el equipo de pabellón. El tiempo objetivo a predecir abarca, como se definió anteriormente, el periodo que el paciente permanece dentro del pabellón, excluyendo los tiempos de limpieza y preparación.

El mecanismo de comparación es en base al error porcentual absoluto medio (MAPE, mean absolute percentage error en inglés), ya que involucra intervenciones de diferente duración y se busca realizar una comparación respetando la proporción del error. No obstante, también se calcula la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE, root mean squared error en inglés), junto con el error absoluto medio (MAE, mean absolute error en inglés). La

fórmula de cada uno de los errores se encuentra en la tabla 3.1, donde y_i es el valor real y \hat{y}_i es el valor predicho.

MAPE	RMSE	MAE
$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot \frac{ y_i - \hat{y}_i }{y_i}$	$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$	$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot y_i - \hat{y}_i $

Tabla 3.1: Fórmula de los errores

Fuente de Datos

Los datos utilizados para el análisis se describen en la sección de contexto y datos, utilizando información recopilada desde 2021 hasta 2022. Las variables consideradas para la construcción de los modelos deben cumplir con el enfoque de implementación del algoritmo. Por lo tanto, el primer filtro para elegir las variables relevantes implica que estas deben estar disponibles antes de estimar la duración de los actos quirúrgicos, asegurando así la viabilidad de la implementación del algoritmo.

En este sentido, las variables con las que se cuenta están detalladas en la tabla 3.2, incluyendo atributos que reflejan el estado de salud de los pacientes, como el ASA (una clasificación que identifica la capacidad física de los pacientes), así como el diagnóstico y tipo de procedimiento a realizar, junto con el cirujano que llevará a cabo la intervención.

Paciente	Intervención	Cirujano
Edad	Código del procedimiento	Rut
Género	Programación	Servicio quirúrgico
Diagnóstico	Técnica	-
ASA	Salida post operatoria	-
Institución	Tipo de anestesia	-
Modalidad	Duración Estimada	-
-	Cantidad de intervenciones quirúrgicas	-
-	Duración promedio del cirujano en el acto quirúrgico	-

Tabla 3.2: Variables independientes consideradas para los modelos

Además se crean dos nuevas variables. La primera tiene el objetivo de reflejar la duración promedio que tienen los cirujanos en los procedimientos que realizan. En primer lugar, se debe cumplir con un mínimo de registros para el cálculo del promedio del procedimiento por cirujano. De no ser así, se calcula el promedio del procedimiento. En el caso de no existir datos suficientes, se calcula el promedio del cirujano. Si no se cumplen ninguna de las restricciones anteriores, se registra el promedio del servicio. Este límite se definió arbitrariamente en 15 registros. Cabe mencionar, que esta variable se construye en base a los datos que se encuentran en la base de entrenamiento para evitar un conocimiento de los datos de la base de testeo.

Por otro lado, se registra la cantidad de procedimientos que se realizan dentro de un mismo acto quirúrgico. Esta variable se construye a partir de la cantidad de códigos distintos asociados al acto quirúrgico.

Con las variables definidas, se procede a realizar algunas modificaciones. Se agrupan las instituciones de salud previsional que se encuentran presentes bajo su razón social en un solo término denominado “ISAPRE”. De igual forma, se decide agrupar bajo el nombre de “OTRO” todos los registros de la variable que tengan menos de 30 registros⁵.

Con respecto a la variable que registra el lugar de destino de los pacientes luego de que salen de pabellón ⁶, se han agrupado sus registros. Esto se debió a que en los datos solo se presentaba el lugar físico donde los pacientes eran llevados después de la intervención, este procedimiento se realizó con la ayuda de personal de pabellón.

Además, se realizaron ajustes en ciertos signos ortográficos para evitar conflictos con las bibliotecas de Python utilizadas para programar y evaluar los distintos modelos.

Del mismo modo, se filtraron algunos registros. En cuanto al género de los pacientes, solo se consideraron los casos de género masculino y femenino, ya que el otro valor existente tenía solamente un registro. En relación con los servicios quirúrgicos, se eliminó “URGENCIA ADULTOS” porque presenta solo dos registros asociados y está fuera del ámbito de estudio, que son las cirugías electivas. En el caso de los procedimientos, solo se consideraron aquellos que fueran programados y no programados, excluyendo los casos de urgencias, ya que se encuentran fuera del foco de estudio. Como también no se contemplaron los procedimientos que tuvieran una duración menor a 10 minutos y mayor a 20 horas, ya que se consideraron como procedimientos que no se pudieron completar y outliers respectivamente.

En el caso de que los registros presenten datos faltantes (missing values, en inglés), se procede a completarlos utilizando el método KNN imputer para los datos numéricos. Mientras que para los datos categóricos, se asignan a una nueva variable denominada *missing* mediante el comando *SimpleImputer* de la biblioteca sklearn.

La base de datos se dividió aleatoriamente en conjuntos de entrenamiento y testeo en una proporción del 80 % y 20 %, respectivamente. Lo que se traduce en tener 18 462 datos para entrenar los algoritmos y 4 619 para testarlos. Es importante señalar, que se aseguró que la proporción de intervenciones de cada servicio fuera similar tanto en la base de testeo como en la de entrenamiento. Esto se logró mediante el uso de la función *StratifiedShuffleSplit* de la biblioteca sklearn en Python.

Desarrollo del modelo

Un total de 4 modelos fueron utilizados y comparados con el actual sistema de estimación de los actos quirúrgicos. Estos modelos son: Regresión Lineal[10], Árboles de Regresión [11], Support Vector Machine [12] y XGBoost [13]. Los algoritmos fueron construidos utilizando el lenguaje de programación Python en su versión 3.11.3, mediante el uso de las bibliotecas sklearn y XGBoost.

Cada uno de los algoritmos se entrenó en 7 escenarios distintos, con la intención de identificar las mejores variables que contribuyeran a realizar la mejor predicción posible y

⁵La variable en la base de datos se denomina INSTITUCION.

⁶La variable en la base de datos se denomina UF_PACIENTE.

conocer su impacto en la predicción. Cada escenario se diferencia en las variables que se tomaron en consideración para entrenar los modelos. La descripción detallada de las variables contempladas en cada uno de los escenarios se encuentra en la tabla 3.3. En ella, el término “todas las variable” hace referencia a todas las variables que se encuentran en la tabla 3.2, excepto la duración estimada y la duración promedio del cirujano en el acto quirúrgico.

Escenarios	Variables
Escenario 1	Todas las variables
Escenario 2	Todas las variables menos ASA
Escenario 3	Todas las variables más estimación de pabellón
Escenario 4	Solamente rut de cirujano y código del procedimiento
Escenario 5	Solamente aquellas variables que tengan un feature importance mayor a 0
Escenario 6	Todas las variables y duración promedio del cirujano en el acto quirúrgico
Escenario 7	Todas las variables sin considerar el rut del cirujano

Tabla 3.3: Escenarios para calibrar y evaluar los algoritmos de predicción de la duración de los procedimientos

Dada la naturaleza categórica de la mayoría de las variables predictoras del modelo y la restricción de los algoritmos de recibir variables numéricas, se utilizaron representaciones binarias de todas las categorías de las variables mediante la función *OneHotEncoder* de la biblioteca *sklearn*. Además, para el caso de la regresión lineal, se aplicó una transformación logarítmica a la variable dependiente [14], y la selección de variables se realizó mediante LASSO[10], que permite reducir la dimensionalidad del problema. Esta técnica no se implementó en el resto de los algoritmos, ya que estos realizan la elección de variables de manera interna.

Con el objetivo de evitar el sobreajuste de los modelos a la base de entrenamiento, se recurrió a la técnica de *cross-validation*, que consiste en dividir la base de entrenamiento en subdivisiones de entrenamiento y validación. Los algoritmos se entrenan en esta subdivisión de entrenamiento y se validan en la subdivisión de validación. Este procedimiento se repite una cantidad definida de veces para evitar el sobreajuste de los modelos a la base de entrenamiento [10]. En este estudio, se decidió realizar 10 validaciones en cada uno de los escenarios en cada uno de los algoritmos.

Además, se utilizó la técnica de *grid search* para encontrar los mejores hiperparámetros de cada uno de los algoritmos, permitiendo así realizar la mejor predicción posible. Este método implica establecer un número finito de hiperparámetros a evaluar y, mediante la librería *sklearn* de Python y la función *GridSearchCV*, evaluar todas las combinaciones de hiperparámetros seleccionados. El resultado son los hiperparámetros que mejor desempeño tienen basándose en una medida de error de predicción. En este caso, se decidió evaluar para cada algoritmo los hiperparámetros que se encuentran en la tabla 3.4. La medida de error utilizada fue el error porcentual absoluto medio, y se aplicó la técnica de *cross-validation* con 10 validaciones.

Algoritmo	Hiperparámetro	Valores
CART	max_depth	{5, 10, 20, 40, 80, 100}
	min_samples_split	{5, 10, 20}
	min_samples_leaf	[5, 10, 20]
SVM	C	{0.1, 1, 10}
	epsilon	{0.01, 0.1, 0.2, 0.3}
Regresión Lineal (Lasso)	alpha	{0.001, 0.01, 0.1, 1.0, 10.0}
XGBoost	max_depth	{40, 80, 100}
	learning_rate	{0.1, 0.01, 0.001}
	n_estimators	{80, 100, 200}
	subsample	{0.5, 0.7, 0.8}

Tabla 3.4: Valores de hiperparámetros utilizados para grid search

Capítulo 4

Resultados

4.1. Indicadores

El valor promedio de la ocupación de los pabellones, calculado mediante la agrupación de las intervenciones en un gran pabellón, fue del 66.7%, mientras que la estimación de la hora de término disponible para cada pabellón fue del 74.15%. Se observa una diferencia de 7.45% entre ambos cálculos. Respecto a esta disparidad, se nota que la ocupación obtenida mediante la estimación de la hora de término es mayor, y entre los factores explicativos se destaca la subestimación de las horas disponibles por pabellón. Para obtener más detalles sobre su influencia en el cálculo de la ocupación, se puede consultar el anexo C.

Con la intención de identificar posibles tendencias o estacionalidades en relación con los días de la semana o los meses del año, se desagrega la ocupación. En la figura 4.1 se presenta un control chart que muestra el comportamiento de la ocupación durante los días de la semana. Se aprecia una disminución en la ocupación promedio los días viernes, anticipada por un leve aumento los días jueves.

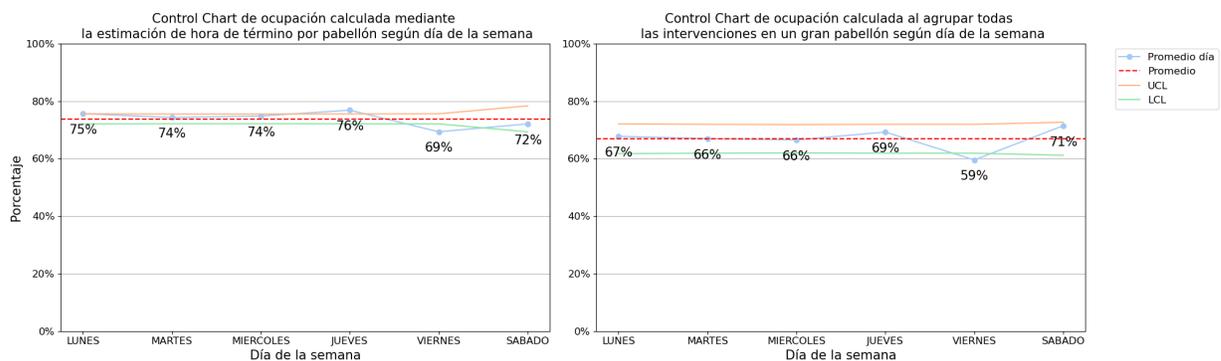


Figura 4.1: Ocupación desagregada por día de la semana

En cuanto a su comportamiento durante los meses del año, se puede observar en la figura 4.2 que el mes con la menor ocupación es febrero según ambos cálculos. Cabe destacar que al calcular la ocupación utilizando la estimación del término programado, se evidencia una

estacionalidad entre los meses del año. Este patrón no se observa en la agrupación en un gran pabellón, donde se identifican peaks durante el mes de mayo y otro durante el mes de octubre.

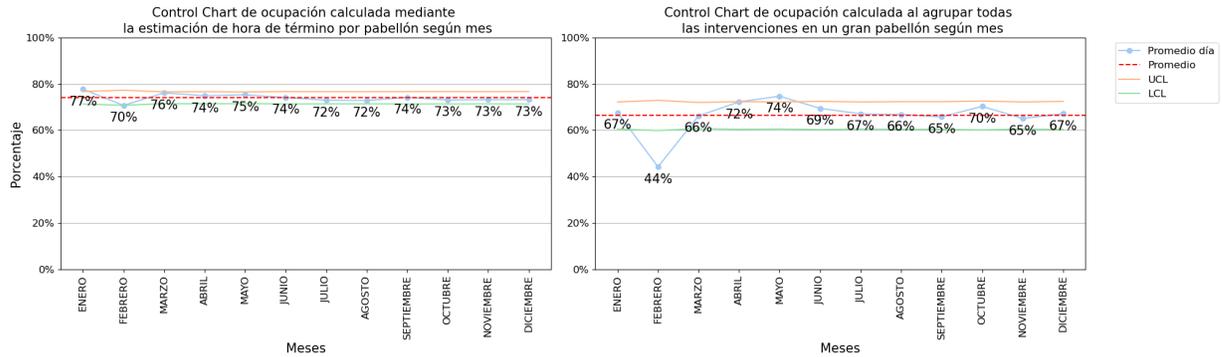


Figura 4.2: Ocupación desagregada por mes del año

A partir de ahora, cuando se haga referencia al término de ocupación promedio, se estará hablando de la ocupación calculada mediante la estimación del término programado. Se ha decidido continuar el análisis con este método de cálculo, ya que permite desagregar la ocupación por pabellón y comparar de manera adecuada las fuentes de ineficiencia que dependen de la estimación de la hora de término disponible de los pabellones.

Con base en el cálculo de la ocupación, se desprende que hay un 26 % del tiempo disponible de los pabellones en el que no estuvo un paciente en el interior del pabellón. La desagregación de este tiempo inactivo se presenta en la Figura 4.3, donde se observa que la mayor fuente de inactividad fue el tiempo inactivo al final del día, seguido por el tiempo inactivo al comienzo del día, tiempo inactivo entre actos quirúrgicos por inicio retrasado, y finalmente, tiempo inactivo entre actos quirúrgicos por término anticipado, con magnitudes del 8.4 %, 6.5 %, 5.8 %, y 5.3 %, respectivamente.

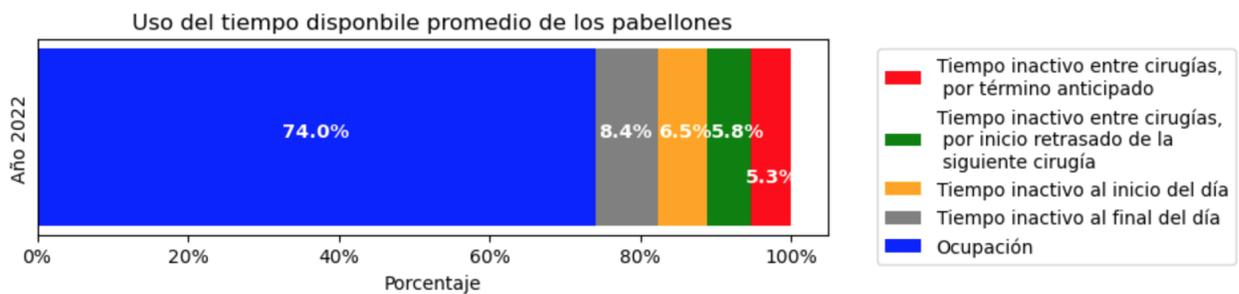


Figura 4.3: Desagregación del uso del tiempo disponible promedio de los pabellones

En la figura 4.4, se presenta la desagregación del uso del tiempo disponible de los pabellones por pabellón. Se observa que la ocupación promedio entre los pabellones oscila entre un 79.2 % y un 67.8 %. En cuanto a las principales fuentes de ineficiencia, estas varían con respecto al promedio general del año 2022. Se destaca el aumento del tiempo inactivo al inicio del día en los pabellones de Cardiocirugía y Neurocirugía. De igual forma, hay un aumento del tiempo inactivo por inicio retrasado en los pabellones de Ginecología, alcanzando un

11.9% y 9.5%. Por último, se observa un aumento del tiempo inactivo al final del día en los pabellones 6B de Cirugía y 7D de Traumatología, con un 12.4% y 11.3%, respectivamente.

En relación con el comportamiento de las distintas fuentes de tiempos ociosos, se destaca el tiempo inactivo al inicio y al final del día. En la Figura 4.5, se aprecia que la cantidad de tiempo inactivo presenta picos durante los meses de enero y julio, con valores del 7.9% y 8.2%, respectivamente. Al observar los días de la semana, se nota que el viernes es el día que presenta el mayor retraso, con un 12.84%, siendo hasta 2 veces más alto que el resto de los días de la semana. Este día coincide con el día en que se registra la menor ocupación.

En cuanto al tiempo inactivo al final del día, la Figura 4.6 muestra que este tiene un comportamiento dentro del rango que define el UCL y LCL durante los primeros 9 meses del año 2022. Sin embargo, desde septiembre en adelante, se observa una tendencia al alza, alcanzando un 11% durante el mes de diciembre. En relación con los días de la semana, se aprecia un comportamiento regular en todos los días, excepto el jueves, que presenta su mínimo valor con un 6.87%, coincidiendo con el día que registra la mayor ocupación.

En el caso de los tiempos entre actos quirúrgicos, se observa en la figura 4.7 que durante los días de la semana, el día sábado se comporta de manera diferente al resto. Este día presenta un menor valor de tiempo inactivo por inicio retrasado de la siguiente intervención, con un 1.28%. Sin embargo, es el día que registra el mayor tiempo inactivo por término anticipado, alcanzando un 11.49%. Esta anomalía influye y desplaza los límites, afectando que el resto de los días se encuentre fuera del rango definido por el UCL y LCL en ambos casos.

Al analizar la posible dependencia de los tiempos entre actos quirúrgicos absoluto con la presencia del mismo cirujano en dos actos quirúrgicos consecutivos se desprende de la tabla 4.1 que los promedios entre actos quirúrgicos difieren en 21 minutos, mientras que la diferencia de las medianas es de 11 minutos. Al aplicar el test t para determinar si la diferencia no es atribuible a la aleatoriedad de las variables, se obtiene un p-value de $1,48 \cdot 10^{-107}$. Dado que el p-value es menor a 0.05, se concluye con un 95% de confianza que existe una diferencia significativa entre los promedios.

Indicador	Mismo cirujano	Distinto cirujano	Distinto cirujano	
			Antes de lo programado	Después de lo programado
Promedio (min)	20	41	45	38
Desviación Estándar (min)	0.47	0.86	0.86	0.86
Mediana (min)	11	22	27	19
Cantidad de registros	3 716	2 874	1 353	1 521

Tabla 4.1: Indicadores del tiempo entre acto quirúrgico diferenciado si es el mismo cirujano quien realizó los procedimientos consecutivos o no

En un análisis más detallado, al diferenciar el caso de tener un cirujano diferente cuando la cirugía anterior terminó antes o después de lo programado, se observa una diferencia de 7 minutos entre las medias y de 8 minutos en las medianas. Después de realizar el test t-student para la diferencia de medias, se obtuvo un p-value de 0.00034, lo que indica que con un 95%

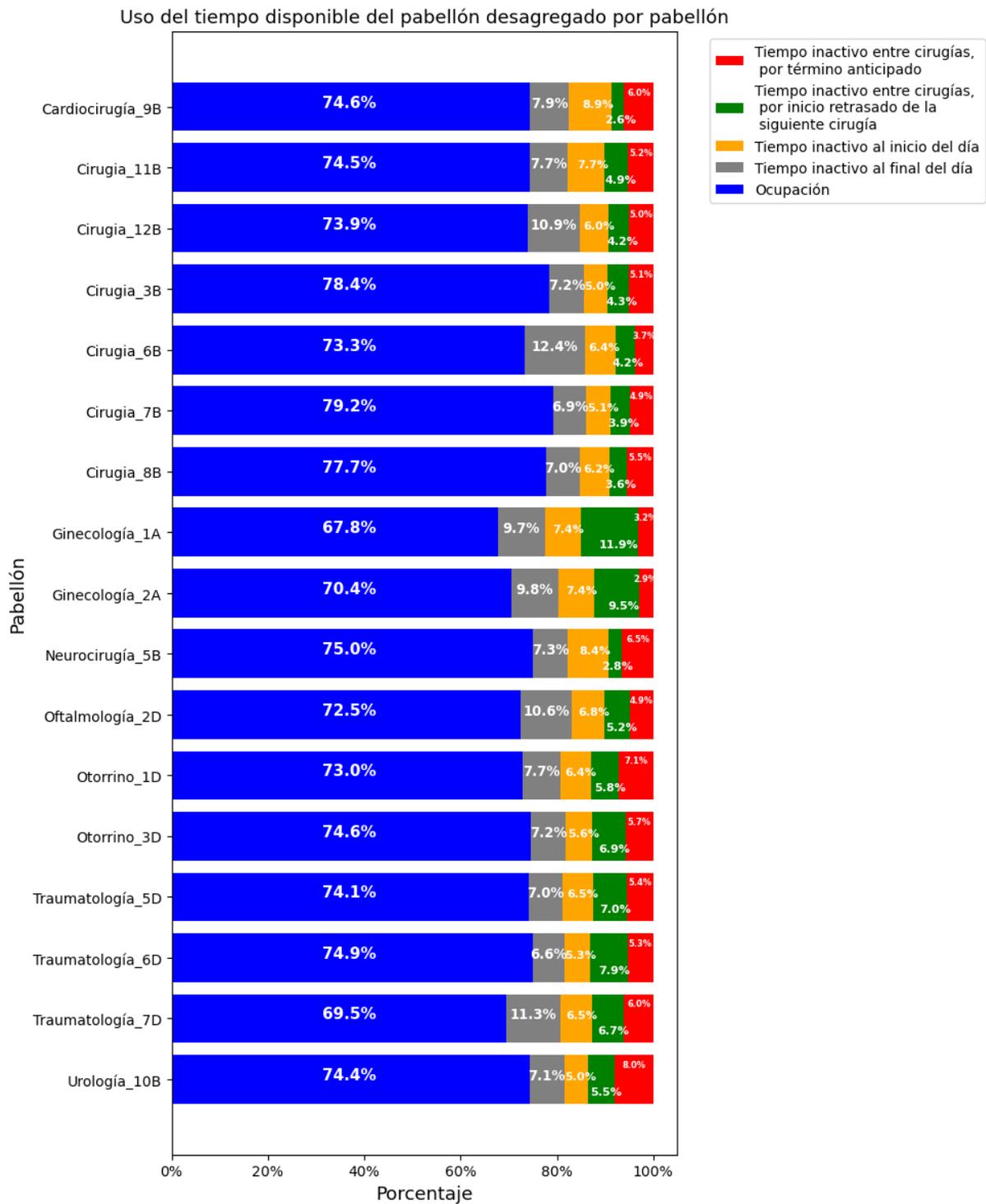


Figura 4.4: Desagregación del uso del tiempo disponible promedio de los pabellones según cada pabellón.

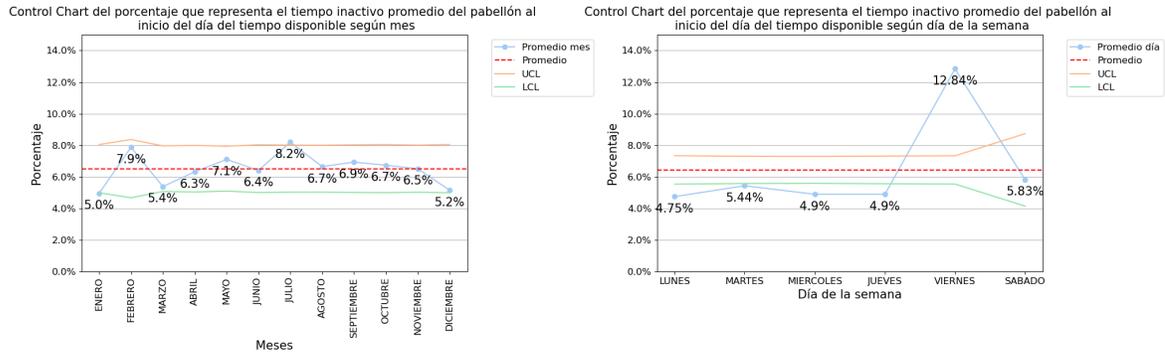


Figura 4.5: Control chart de tiempo inactivo al inicio del día desagregado por mes del año y día de la semana

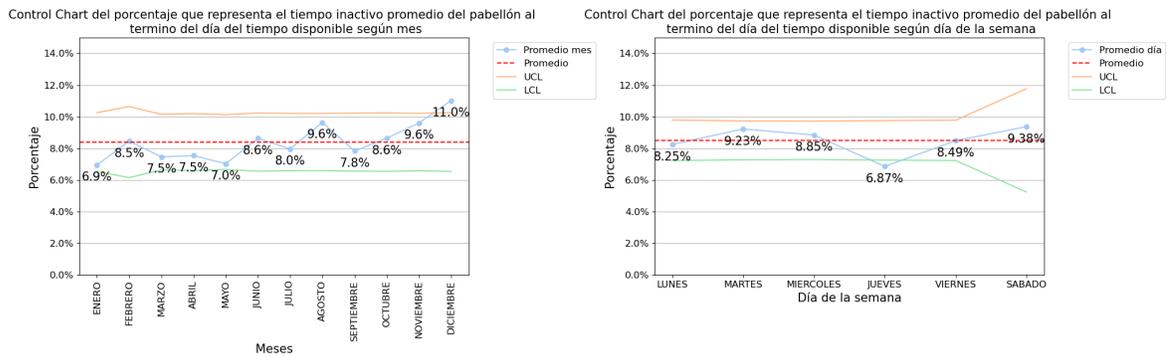


Figura 4.6: Control chart de tiempo inactivo al final del día desagregado por mes del año y día de la semana

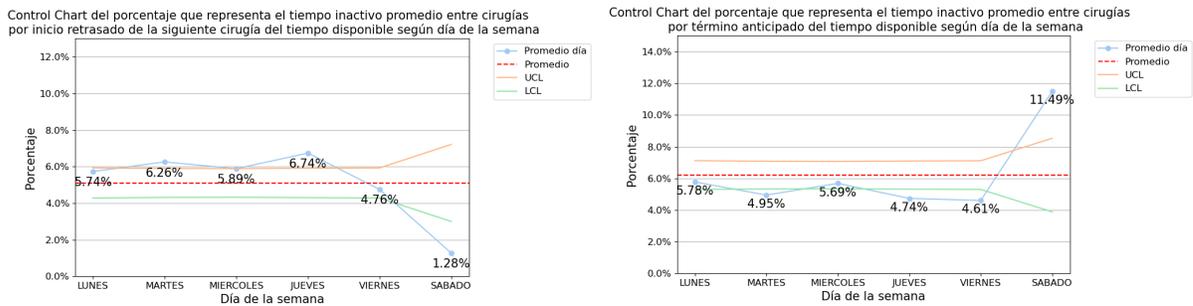


Figura 4.7: Control chart de tiempo inactivo entre cirugías desagregado por día de la semana

de confianza existe una diferencia significativa entre los dos valores.

Profundizando y diferenciando ambos casos en la magnitud de tiempo que la cirugía precedente termina antes o después de lo programado, se observa que en los casos en que la cirugía finalizó antes de lo planificado, y diferenciando si fue más de 30 minutos antes de lo programado en comparación con si termina en menos de 30 minutos antes de lo programado, se obtienen promedios de 50 minutos y 40 minutos, respectivamente. Al realizar el test, se obtiene un p-value de 0.003, concluyendo que con un 95 % de confianza existe una diferencia significativa.

Ahora, tomando en cuenta el caso de que la cirugía anterior termine después de lo programado y diferenciando si termina después o antes de 30 minutos, los promedios son de 34 y 44 minutos, respectivamente. El test de diferencia de medias arroja un p-value de $6,6 \cdot 10^{-5}$, indicando que con un 95 % de confianza existe una diferencia significativa en este caso.

En cuanto a la influencia del mismo procedimiento entre dos actos quirúrgicos consecutivos, en la tabla 4.2 se infiere que hay una diferencia de 15 minutos entre los promedios, mientras que la diferencia entre las medianas es de 7 minutos. Al aplicar las pruebas estadísticas, se obtiene un p-value de $6,6 \cdot 10^{-45}$ para el test t, indicando que con un nivel de confianza del 95 %, existe una diferencia significativa entre las medias bajo este escenario.

Indicador	Mismo procedimiento	Distinto procedimiento
Promedio (min)	18	33
Desviación Estándar (min)	0.44	0.75
Mediana (min)	9	16
Cantidad de registros	1 743	4 847

Tabla 4.2: Indicadores del tiempo entre acto quirúrgico diferenciado si es el mismo procedimiento que se realizó consecutivamente o no

Ahora al diferenciar los casos en que estuvo presente el mismo cirujano y se haya realizado el mismo procedimiento en dos intervenciones consecutivas del caso en que no, en la tabla 4.3 se puede desprender que existe una diferencia entre los promedios de 17 minutos y de 7 minutos en las medianas. Al aplicar el test t para determinar si existe evidencia estadísticamente significativa de la diferencia en los promedios, se obtuvo un p-value de $2,09 \cdot 10^{-52}$. Con un 95 % de confianza, se concluye que existe una diferencia significativa entre las medias en este escenario.

En la figura 4.8, se observa que bajo los tres escenarios descritos anteriormente, los promedios difieren en todos los pabellones. La menor diferencia se aprecia en el pabellón de Urología, especialmente para el caso en el que se encuentra el mismo procedimiento y cirujano de manera consecutiva. En cuanto a la línea de tiempos promedios entre actos quirúrgicos,

Indicador	Mismo procedimiento y cirujano	Distinto procedimiento y cirujano
Promedio (min)	15	32
Desviación Estándar (min)	0.31	0.75
Mediana (min)	9	16
Cantidad de registros	1 356	5 234

Tabla 4.3: Indicadores del tiempo entre acto quirúrgico diferenciado si es el mismo procedimiento y cirujano en dos intervenciones consecutivas o no

se nota que para el caso de Oftalmología, esta se encuentra mucho más cercana al promedio cuando existen cirujanos consecutivos, al igual que cuando existen procedimientos consecutivos. Esto sugiere una posible política de programación para ese servicio quirúrgico, donde premeditadamente agrupan el mismo tipo de procedimiento de un cirujano.

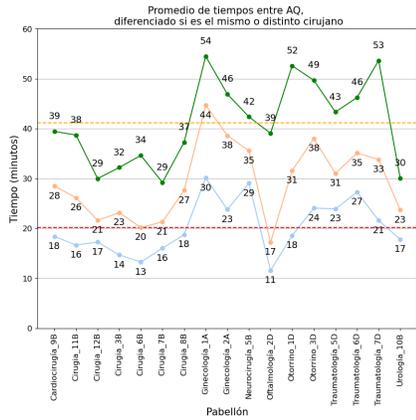
En relación al tiempo entre acto quirúrgico cuando es el mismo cirujano y procedimientos que se encuentran en dos actos quirúrgicos consecutivos, este puede aproximarse como el tiempo destinado a la limpieza de los pabellones. De ser así, el promedio de tiempo destinado a esta labor sería de 15 minutos, y dicho tiempo oscila entre los pabellones en torno a 8 y 23 minutos, siendo el menor en el pabellón de Oftalmología y el mayor en el pabellón 7D de Traumatología.

En cuanto al sobretiempos, se puede apreciar en la Figura 4.9 que la gran cantidad de las veces no hay sobretiempos, representado por la longitud de la primera barra en los histogramas de la primera fila. Además, se comporta de manera decreciente con el paso de las horas, siendo el turno de las 16:30 horas el que presenta la mayor cantidad de sobretiempos.

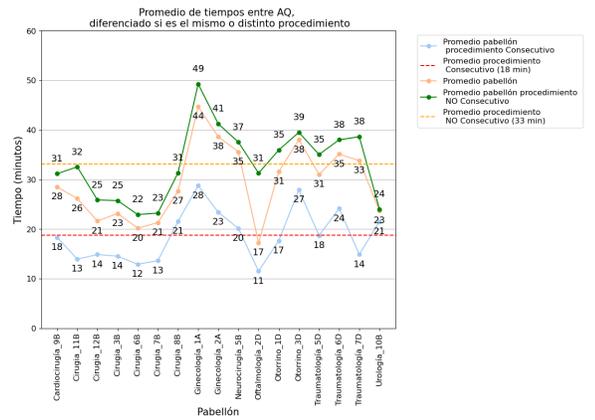
Los valores del sobretiempos promedio se encuentran en la tabla 4.4, donde se aprecia que la gran mayoría de los pabellones terminan a la hora. Esto va en línea con la cantidad de tiempo inactivo que se tiene al final del día, lo que sugiere que un gran número de veces los pabellones se encuentran subutilizados debido a que se programa menos tiempo del que el pabellón tiene disponible.

Respecto a la cantidad de sobretiempos, se observa en la tabla que, de aquellos pabellones que tuvieron sobretiempos (sobretiempos > 0), este en promedio es a lo más de 1 hora y 21 minutos en los pabellones programados hasta las 16:30, mientras que el menor es durante el día sábado con 42 minutos en promedio. Esto sugiere que, en caso de existir sobretiempos en los diferentes turnos, este se encuentra en promedio debajo del máximo de horas extras diarias impuestas por ley (2 horas) [15].

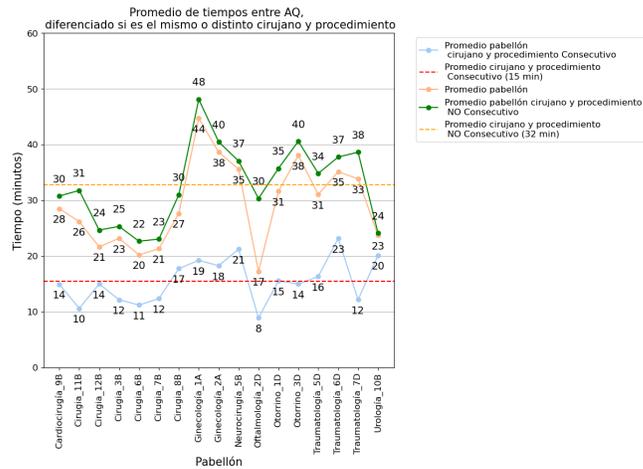
En la tabla 4.5, se aprecia que la cantidad de pabellones con sobretiempos disminuye drásticamente al aumentar las horas de sobretiempos, alcanzando a tener un sobretiempos mayor a 2 horas un 9.04 % de los pabellones que tienen turno hasta las 16:30, un 2.86 % para



(a) Cirujano



(b) Procedimiento



(c) Cirujano y procedimiento

Figura 4.8: Comparación de tiempos entre cirugías dependiendo de si es el mismo cirujano, procedimiento o cirujano y procedimiento en dos cirugías consecutivas diferenciando por pabellón

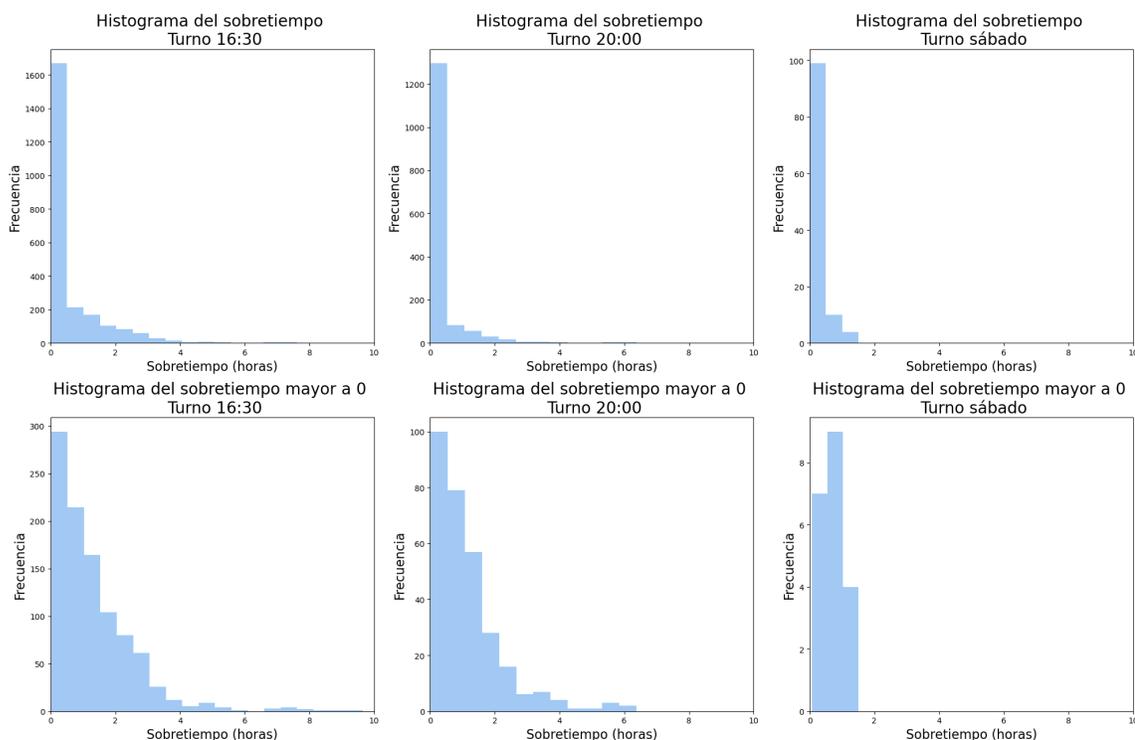


Figura 4.9: Histogramas del sobretiempo

Porcentaje de pabellones programados hasta las 16:30 que tuvieron sobretiempo	36.94 %	Porcentaje de pabellones programados hasta las 20:00 que tuvieron sobretiempo	18.35 %	Porcentaje de pabellones programados el día sábado que tuvieron sobretiempo	14.15 %
Sobretiempo promedio de pabellones programados hasta las 16:30	1 hora y 21 minutos	Sobretiempo promedio de pabellones programados hasta las 20:00	1 hora y 10 minutos	Sobretiempo promedio de pabellones programados el día sábado	42 minutos

Tabla 4.4: Porcentaje de pabellones con sobretiempo y horas de sobretiempo promedio por turno

los que tienen turno hasta las 20:00 y un 0 % durante el día sábado.

Sobretiempo de pabellones programados hasta las 16:30	Porcentaje	Sobretiempo de pabellones programados hasta las 20:00	Porcentaje	Sobretiempo de pabellones programados el día sábado	Porcentaje
>30 minutos	29.45 %	>30 minutos	14.03 %	>30 minutos	11.5 %
>1 hora	20.49 %	>1 hora	8.44 %	>1 hora	3.54 %
>2 horas	9.04 %	>2 horas	2.86 %	>2 horas	0 %

Tabla 4.5: Sobretiempo de pabellones por turno

Tomando en consideración el error de las estimaciones de la duración de los procedimientos, se aprecia en la figura 4.10 que la mediana del indicador es levemente negativa, alcanzando un valor de -5.3 %, lo que da a entender que prácticamente no hay sesgo en la estimación de los actos quirúrgicos con respecto a la duración real¹. Mientras que en torno al promedio, este es de -10.5 %, representando un valor negativo que tiende a sobreestimar la duración en promedio de los actos quirúrgicos. Es importante recordar que dentro del tiempo estimado por pabellón se contempla el tiempo de limpieza, por lo que al comparar

¹Tiempo durante el que un paciente estuvo al interior del pabellón

las duraciones de los actos quirúrgicos se debe tener en consideración este factor.

Al intentar corregir la influencia de la limpieza de los pabellones del error porcentual, se procede a incorporar dentro de la duración real el tiempo de limpieza. Este tiempo se estima constante y equivale al promedio de tiempo entre actos quirúrgicos cuando es el mismo cirujano y procedimiento que se realizan de manera consecutiva, además se diferencia por pabellón con tal de respetar las particularidades de los procedimientos asociados a cada pabellón.

Al considerar la limpieza en las duraciones reales de los procedimientos se aprecia en la misma figura 4.10 que se desplaza hacia la derecha el histograma, siendo su nueva media de 18.6% y mediana de 21.2%. Esto indica que los procedimientos tienden a subestimarse mayoritariamente. En tanto, los valores muy negativos sugieren que deben ser complicaciones de los pacientes durante las intervenciones que implicaron que no pudieran completarse los procedimientos.

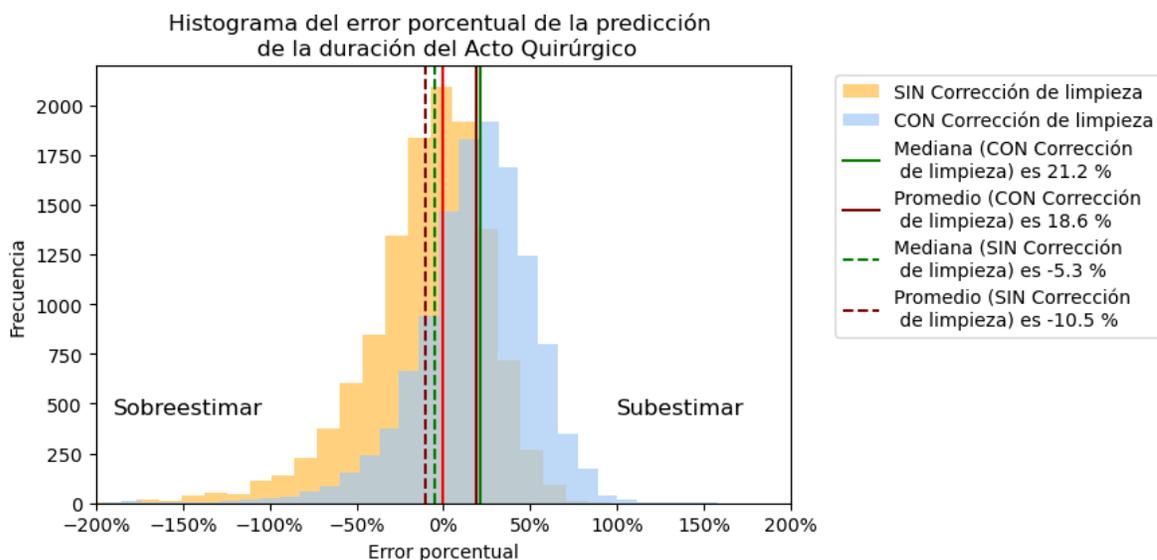


Figura 4.10: Error porcentual del pronóstico de la estimación del acto quirúrgico

En cuanto al error absoluto porcentual (MAPE por las siglas en inglés), este es de un 27.74% y tiene una desviación estándar de un 29.19%. Luego de corregir por el factor de limpieza, los valores cambian a 30.8% con una desviación estándar de 23.8%.

4.2. Predicción de la duración del acto quirúrgico

Después de entrenar y evaluar los modelos bajo los distintos escenarios descritos, se procede a determinar cuál de ellos tuvo el mejor rendimiento con respecto al MAPE, donde valores más cercanos a cero indican que la estimación es mejor. En la tabla 4.6, los modelos están ordenados de manera creciente respecto al MAPE, y se señala la particularidad de las variables que se utilizaron para calibrar los modelos, haciendo referencia a los escenarios descritos anteriormente. Cuando solo se menciona el nombre del algoritmo, significa que se

usaron todas las variables del caso base correspondientes al escenario 1.

Se observa que el mejor rendimiento lo tuvo el algoritmo XGBoost, que contempla entre sus variables la predicción de la duración del acto quirúrgico estimada por el personal de pabellón. Le sigue el mismo algoritmo, pero que contempla la variable de promedio de cirugía. A continuación, se encuentra Support Vector Machine, que también incluye la estimación realizada por el personal de pabellón. Los valores del MAPE para cada uno de ellos son 23.01 %, 24.32 %, y 24.5 %, respectivamente.

Respecto al resto de los modelos bajo diferentes algoritmos, se aprecia que en 17 oportunidades los algoritmos superaron la estimación de pabellón, lográndose una reducción del MAPE de hasta un 6.48 % en el mejor caso.

Es importante resaltar que el mejor algoritmo considera la estimación del personal de pabellón, lo que sugiere que el algoritmo utiliza estos valores y mejora la predicción mediante el análisis de las demás variables disponibles. No obstante, es crucial destacar que la estimación del personal de pabellón incluye los tiempos de limpieza y preparación del pabellón, eventos que no se contemplan en la definición de duración de los procedimientos. Por lo tanto, es posible que el error esté sesgado debido a esta discrepancia en la definición de duración.

Con la intención de corregir dicho sesgo, se procede bajo el mismo mecanismo del caso del error porcentual, incorporar el tiempo de limpieza y calculando los indicadores nuevamente. Con este ajuste, se obtiene una reducción del MAPE a 26.99 %, un aumento del RMSE a 0.95 horas, mientras que el MAE se mantiene invariable.

Al contemplar el tiempo de limpieza, la cantidad de modelos que tienen un menor MAPE en comparación con la estimación de pabellón se reduce a 14, y la diferencia con respecto al algoritmo con mejor rendimiento es del 3.98 %.

Respecto a los algoritmos utilizados, CART y XGBoost permiten obtener el orden de importancia de las variables mediante un indicador que refleja la contribución de cada variable en la realización de predicciones. En el caso de CART con estimación de pabellón, se observa que la variable más importante es la duración estimada, seguida por el código del procedimiento y el primer cirujano de la intervención. El resto de las variables y su orden de importancia se encuentran detallados en la tabla 4.7.

Para el caso de XGBoost con estimación de pabellón, la importancia de las variables se encuentra en la tabla 4.8, donde se aprecia que las tres variables más importantes son diagnóstico, código del procedimiento y duración estimada. Es relevante destacar que dentro de los cinco lugares de importancia en ambos modelos se encuentran las variables duración estimada por pabellón, código del procedimiento, primer cirujano y edad.

Es importante mencionar que en tanto la tabla 4.7 como en la tabla 4.8, los nombres de las variables están presentados tal como aparecen en la base de datos proporcionada por el hospital. Para una explicación detallada de cada una de las variables, se puede consultar el diccionario que se encuentra en el anexo B.

Modelo	MAPE	MAE (hora)	RMSE (hora)
XGBoost con estimación de pabellón	23.01 %	0.57	0.90
XGBoost con promedio cirugía	24.32 %	0.61	0.98
SVM con estimación de pabellón	24.50 %	0.55	0.84
XGBoost	24.99 %	0.62	1.00
XGBoost sin ASA	25.02 %	0.62	1.00
XGBoost Feature>0	25.48 %	0.65	1.04
XGBoost sin cirujano	26.10 %	0.65	1.03
SVM con promedio cirugía	26.23 %	0.60	0.96
SVM	26.34 %	0.59	0.93
SVM feature>0	26.35 %	0.59	0.93
SVM sin ASA	26.39 %	0.59	0.93
CART con estimación de pabellón	26.53 %	0.57	0.86
SVM sin cirujano	26.90 %	0.61	0.97
SVM solo con código del procedimiento y cirujano	26.96 %	0.63	1.02
Estimación Pabellón con corrección de limpieza	26.99 %	0.63	0.95
LOG(T) con estimación de pabellón	27.36 %	0.60	1.01
XGBoost solo con código del procedimiento y cirujano	27.70 %	0.67	1.09
CART con promedio cirugía	28.85 %	0.63	0.97
Estimación Pabellón	29.49 %	0.63	0.91
LOG(T) con promedio cirugía	30.36 %	0.68	1.08
CART sin ASA	30.44 %	0.68	1.06
CART	30.70 %	0.68	1.05
CART Feature>0	30.71 %	0.68	1.05
CART sin cirujano	32.09 %	0.71	1.07
LOG(T)	32.33 %	0.70	1.07
LOG(T) sin ASA	32.38 %	0.70	1.08
CART solo con código del procedimiento y cirujano	33.40 %	0.72	1.10
LOG(T) sin cirujano	33.79 %	0.74	1.12
LOG(T) solo con código del procedimiento y cirujano	35.68 %	0.77	1.19

Tabla 4.6: Errores de los modelos de machine learning en la base de testeo

Variable	Importancia
DURACION_ESTIMADA	0.9084
COD_PROCE	0.0156
CIRUJANO_1	0.0128
SERV_CLINIC	0.0117
EDAD	0.0109
CANTIDAD_DE_IQ	0.0089
TECNICA	0.0083
DIAGNOSTICO	0.0047
PROGRAMACION	0.004
ASA	0.0038
TIPO_ANEST	0.0036
UF_PACIENTE	0.0032
INSTITUCION	0.0028
GENERO	0.0022
MODALIDAD	0.0006

Tabla 4.7: Importancia de las variables del modelo CART que incluye la estimación de pabellón

Variable	Importancia
DIAGNOSTICO	0.4157
COD_PROCE	0.3065
DURACION_ESTIMADA	0.1147
CIRUJANO_1	0.1138
EDAD	0.0219
SERV_CLINIC	0.0147
ASA	0.0122
CANTIDAD_DE_IQ	0.009
UF_PACIENTE	0.0087
TECNICA	0.0071
INSTITUCION	0.0033
TIPO_ANEST	0.0021
PROGRAMACION	0.001
MODALIDAD	0.0003
GENERO	0.0002

Tabla 4.8: Importancia de las variables del modelo XGBoost que incluye la estimación de pabellón

Capítulo 5

Simulador

La construcción de un simulador surge de la necesidad de evaluar el potencial de mejora de los aspectos identificados anteriormente, como la reducción en el error porcentual promedio de la estimación de las intervenciones, la posibilidad de disminuir el tiempo inactivo al comienzo y final del día, la capacidad de agrupar la mayor cantidad de procedimientos del mismo cirujano para reducir el tiempo entre actos quirúrgicos y la oportunidad de programar más intervenciones en los tiempos liberados al implementar estas medidas. El simulador se ha diseñado con el propósito de cuantificar el margen de mejora potencial al implementar estas medidas, es decir, determinar cuánto se podría aumentar la ocupación, manejando el sobretiempo y en cuántas intervenciones adicionales se traduce implementar estas mejoras.

5.1. Construcción

El simulador considera el funcionamiento de un pabellón durante una semana, de lunes a viernes. Se utilizarán los mismos datos de procedimientos que se emplearon para la construcción de los indicadores en la sección anterior, con la excepción de los registros del mes de febrero debido a la particularidad de tener una ocupación promedio inferior al resto de los meses ni la de los días sábados. En otras palabras, se tomarán en cuenta únicamente los datos que cumplen con los filtros mencionados en dicha sección menos los registros de febrero y de los días sábados.

Dado que se considerará un solo pabellón, se ha decidido seleccionar el pabellón perteneciente al servicio que realiza más intervenciones, en este caso, el servicio de Cirugía. Dentro de los pabellones de este servicio, se ha elegido aquel que tenga una ocupación similar a la ocupación anual que tuvo en el año 2022, condición que cumple el pabellón 12B.

Para simular una semana aleatoria, se seguirá el siguiente procedimiento: primero, se agruparán todas las intervenciones de la base de datos por día de la semana, es decir, todas las que se realizaron un lunes en un conjunto, las del martes en otro conjunto, y así sucesivamente. Luego, de cada uno de estos conjuntos, se elegirá un día al azar¹. De esta manera, la semana

¹La elección es con repetición, es decir, si un día lunes es elegido para la semana t no se restringe la

estará conformada por cada uno de estos días seleccionados de manera aleatoria. Al elegir estos días de forma aleatoria, quedan determinadas las cirugías que se llevarán a cabo durante ese día, junto con la información asociada, como el cirujano, la duración estimada, el orden establecido por pabellón y el horario del pabellón.

En la simulación de un día, primero se determina el retraso al comienzo del día mediante la ejecución de una variable aleatoria. Este retraso define el inicio real de la primera intervención, programada para las 08:00, sumándole el retraso obtenido.

Luego, se ejecuta una segunda variable aleatoria para obtener la duración real de los procedimientos, lo que establece el fin real de la cirugía. Este fin es calculado sumando la duración obtenida al inicio real.

A continuación, se utiliza una tercera variable aleatoria para modelar el tiempo entre actos quirúrgicos, determinando así el inicio de la siguiente intervención como el fin de la cirugía anterior más esta variable aleatoria.

Este proceso se repite para todas las intervenciones programadas durante el día, donde la duración real de cada intervención se ejecuta primero, seguido del tiempo entre actos quirúrgicos, hasta completar todas las intervenciones programadas.

Se destaca que las intervenciones que tienen una hora de inicio posterior a las 19:00 y 15:30 (para pabellones programados hasta las 20:00 y 16:30, respectivamente) son excluidas del registro en el simulador, es decir, se toma en cuenta como si estas no se hubieran realizado. Esta decisión se basa en la premisa de evitar la realización de intervenciones con una probabilidad elevada de incurrir en sobretiempos excesivos. De este modo, la simulación refleja la práctica actual llevada a cabo en el hospital para gestionar eficientemente los horarios de las intervenciones quirúrgicas.

En cuanto a las tres variables aleatorias del simulador (retraso al inicio del día, duración real de los procedimientos y tiempo entre actos quirúrgicos), cada una de ellas se construyó en base a la distribución empírica que presentaban estos eventos en los datos del año 2022.

Particularmente, el retraso al inicio del día se construyó utilizando los retrasos registrados durante el año 2022, excluyendo los pabellones de Ginecología (1A-2A), Neurocirugía (5B), Cardiocirugía (9B) y un pabellón de Cirugía (11B) debido a que presentan un promedio considerablemente más alto que el pabellón 12B de cirugía. Además, dado que existe variación entre los días de la semana, se decidió asignar una distribución diferente para cada día, la cual se construye solo con los registros asociados a ese día específico presentes en los datos.

En cuanto a la variable aleatoria de duración real de los procedimientos, esta se construye a partir de la duración estimada por el personal de pabellón, multiplicada por un error de predicción que es una variable aleatoria.

$$\text{Duración Real}_i = \text{Duración Estimada}_i \cdot \text{Error porcentual}(\omega)$$

Donde i es un indicador del procedimiento y ω representa un escenario aleatorio.

posibilidad de elegirlo para la semana $t+1$.

Indicador	Pabellón 12B	Simulador
Ocupación	74.1 %	71,6 %
Tiempo inactivo al final del día	10,9 %	11,1 %
Tiempo inactivo al inicio del día	6,8 %	6,4 %
Tiempo inactivo entre AQ por término anticipado	4,2 %	6.2 %
Tiempo inactivo entre AQ por inicio retrasado	4 %	4,7 %

Tabla 5.1: Comparación de los indicadores del pabellón 12B con el caso base del simulador

La distribución empírica del error porcentual se elaboró en base a los errores porcentuales de la base de prueba que se utilizó para validar los algoritmos de machine learning, filtrando por aquellos procedimientos que se realizaron en el pabellón 12B.

Dado que en los datos se encontró que el tiempo entre una intervención y otra es influenciado por si es el mismo cirujano que realiza los dos procedimientos, se decide diferenciar si se presentan dichos casos. En primer lugar, se filtran por aquellos tiempos entre actos quirúrgicos que tuvieron lugar en el pabellón 12B, y luego se diferencia si este tiempo está asociado al mismo cirujano o a distintos. En el caso particular de que sean distintos, además se diferencia si la cirugía precedente termina antes de lo programado o después, y dentro de cada uno de estos escenarios se diferencia si es 30 minutos antes de lo programado o 30 minutos después de lo programado. En resumen, se tienen 5 distribuciones distintas de acuerdo a cada caso.

Para validar el simulador, se procede a simular 1000 semanas y comparar las cifras de ocupación y tiempos inactivos promedios durante el año 2022 del pabellón 12B. En la tabla 5.1, se encuentra dicha información. Es importante mencionar que en la tabla, los indicadores no toman en cuenta el mes de febrero, ni las semanas que tengan algún día en que no se hayan realizado intervenciones, ni los días sábados dentro del cálculo. Esto se realiza con la finalidad de comparar cifras equivalentes en su forma de cálculo, donde las semanas tengan la misma cantidad de días.

Se puede desprender de la tabla 5.1 que la diferencia en ocupación es solamente 2.5 %, siendo mayor la ocupación promedio del pabellón 12B. Con respecto al tiempo inactivo este presenta diferencias que oscilan entre 0.2 % y 2 %, siendo la mayor la diferencia de los tiempos inactivos entre actos quirúrgicos por término anticipado y la menor el retraso al final del día. Destacar que el caso de los tiempos entre actos quirúrgicos es el que presenta mayor diferencia, donde es más difícil lograr capturar los atrasos de los cirujanos, los retrasos por esterilización o retrasos de traslado de pacientes, sin embargo, es consistente en la cifra de ocupación.

Además, se comparan los sobretiempos obtenidos mediante el simulador. En este caso, se excluyen los días sábados y el mes de febrero en el cálculo de los indicadores del pabellón 12B. En la tabla 5.2, se observa que se tiende a sobreestimar el sobretiempos en un rango del 1.43 % al 6.88 % en casi todos los escenarios, excepto en el sobretiempos de más de 30 minutos en el turno del pabellón hasta las 16:30, donde se subestima el sobretiempos en un 5.04 %.

Esto podría explicarse en parte debido a la influencia del filtro de prolongación de tabla; así, un aumento de este valor podría resultar en una disminución del sobretiempo, reduciendo así el sesgo. Sin embargo, dado que en mayor medida se sobreestima y en la evaluación se analizan condiciones en las que el sobretiempo estimado por el simulador no exceda un nivel crítico, es probable que la solución propuesta cumpla la restricción incluso con mayor holgura en la práctica.

Sobretiempo del turno programado hasta las 16:30	Pabellón 12 B	Simulador	Sobretiempo del turno programado hasta las 20:00	Pabellón 12B	Simulador
>30 minutos	22.13 %	17.09 %	>30 minutos	15.69 %	23.9 %
>1 hora	8.4 %	10.64 %	>1 hora	9.8 %	16.68 %
>2 horas	2.29 %	3.72 %	>2 horas	3.92 %	9.01 %

Tabla 5.2: Comparación del sobretiempo del pabellón 12B con el caso base del simulador por turno

Finalmente se consideran la cantidad de intervenciones que se realizan tanto semanal como diariamente que se encuentran registradas en la tabla 5.3 el promedio semanal contempla únicamente semanas donde se encuentran registros de todos los días entre el lunes y viernes, no considera el mes de febrero ni los días sábados. Mientras que el promedio diario solamente excluye del cálculo los registros del mes de febrero y del día sábado. Teniendo en consideración lo anterior al comparar los promedios se aprecia que se tiende a subestimar las cantidades de intervenciones tanto semanal como diariamente, siendo la diferencia de 0.27 para el caso del promedio diario y 1.77 en el caso del promedio semanal.

Indicador	Pabellón 12B	Simulador
Promedio de cantidad de intervenciones realizadas en un día	2.81	2.54
Promedio de cantidad de intervenciones realizadas en una semana	14.47	12.7

Tabla 5.3: Comparación de la cantidad de intervenciones realizadas con el caso base del simulador

5.2. Política de programación y heurística

De la sección de resultados, se puede desprender que existe una oportunidad que considere reducir los tiempos inactivos con la intención de utilizar ese tiempo para programar más intervenciones y controlar de manera más efectiva el sobretiempo. El enfoque más intuitivo es reducir el tiempo inactivo al comienzo del día, ya que un retraso en el inicio tiene el potencial de afectar el resto de la programación diaria y es el menos incierto, ya que su inicio no está influenciado por las duraciones de otras intervenciones.

En relación con los actos quirúrgicos, se propone programar la mayor cantidad de intervenciones del mismo cirujano de manera consecutiva, con el fin de acortar los tiempos entre actos quirúrgicos, como se evidenció en la sección de resultados.

También se plantea la optimización del uso de los pabellones programando más intervenciones con el objetivo de ocupar el tiempo inactivo al final del día. Esto se lograría manejando el sobretiempo del personal de pabellón con la ayuda del resto de las políticas.

Finalmente, se destaca el potencial de mejora que ofrece la implementación del algoritmo de machine learning para predecir la duración de los actos quirúrgicos. Esto permitiría realizar predicciones más precisas, respetar de manera más efectiva la programación de los procedimientos y controlar el sobretiempo del personal de pabellón.

Con la intención de evaluar el conjunto de medidas mencionadas anteriormente es que se realizan algunas modificaciones al simulador y además se construye una heurística de programación de intervenciones. La primera modificación contempla un cambio en la variable aleatoria de tiempo inactivo al inicio del día, esta se cambia por una distribución exponencial con media de 5 minutos para todos los días. Se elige dicha distribución debido a que de igual manera esta distribución toma en cuenta la posibilidad de posibles atrasos, pero estos son muy poco probables que ocurran.

La otra modificación es que la duración estimada de los procedimientos quirúrgicos se realiza por medio del algoritmo XGBoost que se entrena utilizando dentro de sus variables la duración estimada por el equipo de pabellón. Aquí se hace la salvedad que la duración estimada no es equivalente al tiempo reservado del pabellón para la realización del acto quirúrgico, esto se debe a que se incorpora un ponderador porcentual que amplía o reduce dicha estimación. De esta manera el fin programado de las intervenciones se define como el inicio programado más la duración estimada por uno más el ponderador. Este ponderador tiene como objetivo encontrar la cantidad de tiempo de reserva apropiado, que permita realizar la mayor cantidad de procedimientos posibles respetando lo más posible el horario de pabellón.

$$\text{Tiempo Agendado} = \text{Tiempo estimado mediante machine learning} \cdot (1 + \text{Ponderador})$$

También se encuentra una lista de espera que permita reflejar una cierta cantidad de procedimientos que estén listos para programarse y puedan usarse para ocupar los espacios disponibles. La manera de construir dicha lista de espera consiste en elegir con repetición 3 días aleatorios dentro de todos los registros ², y los procedimientos que se encuentre programados en dichos días constituirán la lista de espera.

Además en esta ocasión se contempla una nueva variable definida como un margen al final del día. Esta tiene como finalidad dejar un buffer al final del día que permita resguardarse del sobretiempo. La función de esta es acortar la cantidad de tiempo disponible para programar intervenciones, es decir, si un pabellón tiene 8 horas disponibles al incorporar un margen de 30 minutos se tendrán solamente 7.5 horas disponibles.

Respecto a la heurística se construye con la finalidad de estimar cuántas cirugías más se pueden realizar en el pabellón con la intención de asignar la mayor cantidad de cirugías consecutivas del mismo cirujano durante un día. Dentro de sus limitaciones es que no toma en consideración restricciones de simultaneidad de operaciones, dado que solamente se simula

²Sin considerar los pertenecientes al mes de febrero ni al día sábado.

un solo pabellón y asumen que los cirujanos pueden ser asignados a cualquier día, es decir, no tienen un horario preestablecido para operar. Se comenta por parte de la dirección del hospital que no contemplar esta última restricción no es tan irracional dado que es un incentivo para los cirujanos poder realizar más de una intervención de manera consecutiva, por lo que se presume que estarían dispuestos a flexibilizar sus horarios.

El funcionamiento de heurística es en base a una semana, por lo que toma como input las mismas semanas generadas por el caso base del simulador. De esta semana respeta el horario que tuvo el pabellón para cada día de la semana, se crea un grupo de intervenciones a programar y además se crean subconjuntos de intervenciones asociadas a cada cirujano.

Para cada conjunto de cirujanos se construye el conjunto potencia, es decir, todos los subconjuntos del conjunto. Esto se realiza con la intención de tener todas las posibles agrupaciones de intervenciones del mismo cirujano. Seguidamente, se calcula la duración total de cada elemento del conjunto potencia, la que corresponde a la sumatoria de la duración estimada de cada procedimiento ³.

Posteriormente se unen todos los conjuntos potencia de todos los cirujanos en un solo conjunto donde se ordenan de manera descendiente de acuerdo a la cardinalidad de cada uno de los elementos de este conjunto. Este orden se establece con la intención de priorizar a que aquellos cirujanos que tienen más intervenciones consecutivas.

Luego se procede a elegir el primer elemento del conjunto y asignar esas intervenciones a un día de la semana. Para poder llevarse a cabo la asignación se debe cumplir con dos restricciones: el conjunto de intervenciones respete el horario del día⁴ y todas las intervenciones pertenecientes al conjunto no hayan sido asignadas previamente. La primera corresponde a una restricción de capacidad, mientras que la segunda es un método de control para que no se programen más de una vez las intervenciones. La asignación se realiza desde el lunes a viernes, es decir, se revisa si existe disponibilidad el lunes y de no ser así se revisa el martes y así sucesivamente hasta llegar al viernes.

Luego de programarse el conjunto de intervenciones se procede a eliminar todas las intervenciones programadas del conjunto de intervenciones a programar. De esta manera este conjunto se actualiza y permite no asignar nuevamente las intervenciones ya programadas. Este procedimiento se realiza para todas los elementos del conjunto.

Cumplido lo anterior se procede a crear la lista de espera como se detalló en párrafo superior. Teniendo definido los días y por consecuente los procedimientos, se procede a realizar el mismo procedimiento descrito anteriormente. Se crea un conjunto de intervenciones a programar con los procedimientos de la lista de espera, estos se agrupan en conjuntos de acuerdo al cirujano. El procedimiento es análogo a lo descrito previamente, sin embargo, tiene la salvedad de que si dentro de los cirujanos de la lista de espera hay alguno que se encuentre dentro de la semana se da la prioridad de empezar a asignar dicho cirujano en los días que ya se encuentra programado. Luego de analizar la factibilidad se procede a seguir con todos los cirujanos de la lista de espera y analizar todos los días de la semana de acuerdo a las mismas reglas descritas anteriormente.

³Esta duración ya se encuentra modificada por el ponderador.

⁴Recordar que es el horario disponible menos el margen.

Luego de tener las intervenciones programadas se ordenan los procedimientos, respetando que estén los del mismo cirujano durante un día de manera consecutiva y dentro de los ellos se ordenan de manera descendente de acuerdo a la estimación de la duración de estos. Este orden se define de acuerdo a la regla dentro del hospital de que los procedimientos más complejos se realizan primero, por lo que se hace la analogía de que los procedimientos más extensos son más complejos.

Finalmente con el orden definido se procede a realizar el mismo mecanismo descrito para el caso base. En primer lugar, se ejecuta la variable aleatoria de retraso al inicio del día, con la nueva distribución (exponencial con media de 5 minutos). Con ello se tiene definido el horario de inicio de la primera intervención. Posteriormente, se realiza la variable de duración real, en este caso se usa la distribución del error porcentual que tuvo el algoritmo en la base de testeo en el pabellón 12B. Con lo anterior se define la hora de término real como la hora de inicio más la duración. Luego el algoritmo sigue los mismos pasos descritos en el capítulo de construcción.

Con el simulador construido se realiza un análisis de sensibilidad con respecto al ponderador de la duración estimada y el margen al final del día. Para el caso del ponderador se fija el margen al final del día en 30 minutos mientras que para el caso del margen al final del día se fija el ponderador en 10 % y la cantidad de simulaciones para cada escenario es 1000. Los valores de cada uno de ellos que se probaron se encuentran en la tabla 5.4

Valor del Ponderador	Valor del margen al final del día (horas)
-50 %	0
-20 %	0.25
-15 %	0.5
-10 %	0.75
-5 %	1
0 %	1.5
10 %	2
15 %	
20 %	
50 %	

Tabla 5.4: Valores del ponderador y margen al final del día

El objetivo es lograr un equilibrio entre el sobretiempos y la ocupación de los pabellones, buscando alcanzar la máxima ocupación posible sin exceder la proporción deseada de días con sobretiempos. En este caso, se establece como meta que la proporción de días con sobretiempos mayor a 30 minutos en los pabellones programados hasta las 16:30 ronde en torno al 25 %.

Al examinar el comportamiento del sobretiempos en relación con el ponderador y el margen al final del día, como se muestra en las figuras 5.1 y 5.2, se observa que el objetivo se logra cuando el margen es de 0.5 horas y el ponderador es 10 %. Con esta configuración, se alcanza una ocupación del 81.4 % y una proporción de sobretiempos mayor a 30 minutos en los pabellones programados hasta las 16:30 del 19.66 %. Este resultado demuestra que ajustando

adecuadamente el ponderador y el margen al final del día, es posible cumplir con el objetivo de equilibrar la ocupación y el sobretiempo.

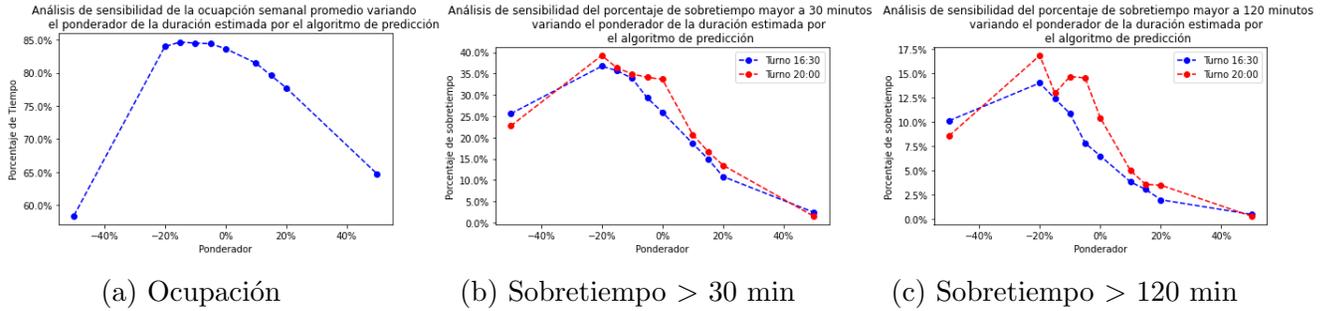


Figura 5.1: Ocupación y sobretiempo en función del ponderador

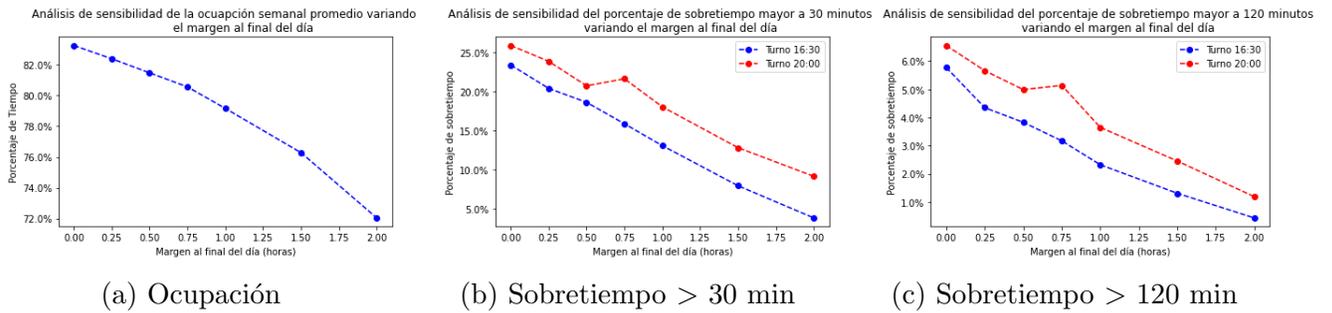


Figura 5.2: Ocupación y sobretiempo en función del margen al final del día

Dado lo anterior se decide finalmente definir el margen al final del día en 0.5 horas y el ponderador en 10 %.

5.3. Comparación

Con la intención de identificar el margen de mejora con respecto a la situación actual se plantea la construcción de intervalos de confianza para la diferencia entre los indicadores. Estos se construyen bajo la siguiente fórmula:

$$(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) \pm t_{\frac{\alpha}{2}, \nu} \cdot s.e(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2)$$

Donde:

- \bar{Y}_1 y \bar{Y}_2 son los promedios de los indicadores del caso base y bajo la heurística.
- $t_{\frac{\alpha}{2}, \nu}$ es el valor del porcentaje $100 \cdot (1 - \frac{\alpha}{2})$ con ν grados de libertad de una distribución t-student.
- $s.e(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2)$ es el error estándar de la diferencia de los promedios.

Para mayor detalle de como se calcula el error estándar, dependiendo si los indicadores se encuentran correlacionados o no, revisar el capítulo 12 del libro “ Discrete-Event System Simulation” [16].

Mientras que para el caso del sobretiempo se usa el mismo mecanismo, pero dado que el indicador es la proporción de veces que existió sobretiempo este se realiza bajo la siguiente metodología [17].

$$(\hat{Y}_1 - \hat{Y}_2) \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\hat{Y}_1 \cdot (1 - \hat{Y}_1)}{n_1} - \frac{\hat{Y}_2 \cdot (1 - \hat{Y}_2)}{n_2}}$$

Donde:

- \hat{Y}_1 y \hat{Y}_2 son las proporciones de los pabellones que tuvieron sobretiempo del caso base y heurística.
- $z_{\frac{\alpha}{2}}$ es el valor del porcentaje $100 \cdot (1 - \frac{\alpha}{2})$ de una distribución normal con media 0 y desviación estándar 1.
- n_1 y n_2 son la cantidad total de pabellones en el caso base y simulador.

Respecto a los indicadores, en la tabla 5.5 se presentan las medias y el intervalo de confianza de la diferencia de medias con un nivel de confianza del 95 %. La diferencia se plantea como la disparidad entre la heurística y el caso base, es decir, si la diferencia es positiva, el indicador del caso base es menor que el de la heurística. Se aprecia que la implementación de la heurística logra un aumento de la ocupación promedio que se sitúa entre el 9.19 % y el 10.34 % con un 95 % de confianza. Esto se refleja en un incremento que se puede traducir en entre 2.76 y 2.99 intervenciones más en promedio a la semana.

En cuanto al sobretiempo, se evidencia que el porcentaje de pabellones con turno hasta las 16:00 que experimentaron sobretiempo mayor a 30 minutos aumentó, y dicho incremento en promedio se sitúa entre el 0.79 % y el 4.34 %. Por otro lado, para el mismo indicador pero para el turno de las 20:00, no se observa evidencia significativa para hacer una afirmación concluyente, ya que el valor 0 se encuentra dentro del intervalo de confianza del indicador.

Dado que el simulador restringe la cantidad de intervenciones que se pueden realizar, imponiendo que ninguna intervención puede comenzar después de cierto horario, se optó por crear un nuevo indicador para comparar entre el caso base y el simulador. Este indicador corresponde a la cantidad de intervenciones que se eliminan debido a esta regla. El propósito es cuantificar el efecto sobre el caso base de la heurística en la cantidad de suspensiones. Para el caso base, se reportaron 1.21 intervenciones que no se realizaron, mientras que usando la heurística fueron 1.76. Al cuantificar la diferencia de las medias con un 95 % de confianza, se observa que la cantidad de intervenciones suspendidas aumenta en promedio entre 0.46 y 0.65 intervenciones a la semana.

En cuanto al resto de los indicadores, las cifras se encuentran en el anexo D. En este, se pueden apreciar tanto los histogramas de los indicadores como los intervalos de confianza

Indicador	Promedio Caso Base	Promedio Heurística	I.C al 95 %	
			Límite Inferior	Límite Superior
Ocupación	71,63 %	81,40 %	9,19 %	10,34 %
Cantidad de Actos Quirúrgicos Semanal	12,7	15,58	2,756	2,998
Sobretiempo mayor a 30 min, turno 16:30	17,09 %	19,66 %	0,79 %	4,34 %
Sobretiempo mayor a 30 min, turno 20:00	23,90 %	21,30 %	-5,70 %	0,56 %

Tabla 5.5: Promedios e intervalos de confianza de la media entre el caso base y heurística

de la diferencia de medias. A modo de resumen, se logra una reducción del tiempo inactivo al final e inicio del día, así como del tiempo entre acto quirúrgico por inicio anticipado. En contraposición, el único indicador que aumenta su valor es el tiempo entre acto quirúrgico por inicio retrasado.

Capítulo 6

Discusión

La falta de disponibilidad exacta de información impidió calcular la ocupación precisa de los pabellones; no obstante, se pudo estimar un margen alrededor de dicho indicador. Se asume que el estimador tiende a sobrestimarse al calcular el término programado y a subestimarse al agrupar las intervenciones en un único gran pabellón. Sin embargo, dadas las dos fuentes de cálculo, se presenta un rango de movimiento del indicador que fluctúa en aproximadamente un 7.45 %.

De acuerdo con esta evaluación, se observa que el valor de la ocupación está por debajo del 75 % y cercano al 73.9 % reportado para los hospitales públicos en 2019 [18]. No obstante, para considerarse eficiente, la ocupación debe superar el 90 % [9].

Es importante destacar, que el indicador de ocupación podría verse afectado por la posibilidad de un tiempo de recuperación postanestésica debido a la falta de camas en la unidad de recuperación postanestésica. Este escenario podría impedir que el paciente abandone el pabellón, influyendo en la interpretación del tiempo al interior de pabellón. Lamentablemente, con la información disponible, no se puede distinguir ni considerar de manera independiente este tiempo de recuperación postanestésica como una variable separada en el cálculo del indicador.

En relación con las fuentes de ineficiencia, estas se analizan en referencia a la sobreestimación de la ocupación de los pabellones. Por lo tanto, el análisis de estas fuentes es conservador, ya que el margen de mejora podría ser mayor. En consecuencia, las conclusiones derivadas de este estudio son válidas y proporcionan una cota inferior de mejora para el uso de los pabellones.

Además, se debe tener en cuenta que el tiempo entre acto quirúrgico no solo contempla ineficiencia, sino que toma en cuenta el tiempo de set-up y limpieza de los pabellones. Por lo que para una análisis más pulcro, debiera registrarse dicho tiempo de manera separada, para que de esta forma quede en cuenta solamente el tiempo inactivo entre actos quirúrgicos.

La reducción del error en la estimación de la duración de los actos quirúrgicos, de un 29.49 % a un 23.01 %, se encuentra en línea con otros estudios que utilizan algoritmos basados en árboles de regresión. En esos estudios, la estimación de los actos quirúrgicos logra, en el

mejor de los casos, un MAPE que oscila entre el 23.36 % y el 28 % [14, 19]. Otro indicador relevante, como el MAE, ha demostrado en otros modelos un error promedio de 20 minutos [20], mientras que en el caso de este estudio el XGBoost que contempla la estimación de pabellón es de 34.2 minutos. Es importante señalar, que durante el entrenamiento de los algoritmos estudiados, el enfoque estaba en reducir el error porcentual absoluto medio, lo que podría influir en la diferencia entre ambos casos. No obstante, la diferencia promedio es menor a 15 minutos.

Entre las limitaciones del modelo se destaca su dependencia de la codificación y validez de los datos de entrenamiento. Cualquier cambio en la forma en que se codifican y registran las variables podría afectar la predicción del algoritmo. Además, la particularidad y la adaptación del modelo al hospital específico del estudio también se considera una limitación. Sin embargo, la metodología y el conocimiento de las variables pueden adaptarse fácilmente para implementar el modelo en otros hospitales.

Además, es importante ser cauteloso con los procedimientos poco frecuentes, ya que su rareza implica que hay poca información disponible para entrenar el algoritmo, lo que puede resultar en una mayor probabilidad de error en las predicciones.

Asimismo, las variables clave utilizadas en los algoritmos coinciden con estudios previos, donde las estimaciones del personal de pabellón, el primer cirujano y el tipo de procedimiento se identifican como factores relevantes [19]. Se destaca también la similitud en el enfoque de entrenar los modelos con información del paciente, el procedimiento y los cirujanos [14, 19, 20, 21, 22].

Dentro de las posibles mejoras, se podría considerar la incorporación de variables que reflejen la experiencia del cirujano a cargo del procedimiento, como se realiza en el estudio de Óscar Martínez et al. [21]. Además, agregar información complementaria del paciente, como comorbilidades, índice de masa corporal, peso, alergias, entre otros, podría contribuir a mejorar la predicción de la duración del procedimiento.

En cuanto al simulador, se logró una mejora en la ocupación hasta alcanzar un valor promedio del 81.4 %, lo que se traduce en un aumento de en promedio 2,88 intervenciones más a la semana. Sin embargo, este aún se encuentra por debajo del umbral del 90 %, por lo que aún deben realizarse esfuerzos para mejorar dicho rendimiento. Se destaca la necesidad de prestar especial atención a una política que reduzca el tiempo entre actos quirúrgicos cuando se produce un cambio de cirujano en dos procedimientos consecutivos, ya que se observa que este tiempo aumenta en 20 minutos en promedio.

Con respecto a las limitaciones del simulador, es importante señalar que este solo simula un pabellón, por lo que no considera restricciones de simultaneidad de cirugía ni restricciones de horarios de los cirujanos. Sin embargo, se establece que, en caso de restricciones de equipos, el hospital está dispuesto a de ser necesario adquirir más implementos. En relación con los horarios de los cirujanos, se afirma que estos estarían dispuestos a realizar más intervenciones consecutivas, lo que podría incentivarse con reestructuraciones de horarios.

Se observa que el simulador tiene dificultades para predecir los tiempos entre actos quirúrgicos, lo cual era de esperar, ya que este tiempo está afectado por diversas variables que la distribución no captura. Ejemplos de estas variables son el retraso del cirujano debido

a eventos aleatorios como la congestión o algún accidente, demoras en la esterilización de un equipo, y la dificultad de encontrar al cirujano para que acuda a realizar el procedimiento.

Cabe señalar, que el objetivo principal de este estudio no fue construir un *scheduler* de intervenciones, sino identificar las fuentes de ineficiencia y plantear una política que permita abordarlas, manteniendo el sobretiempo en rangos razonables. Esta política fue posteriormente evaluada y se cuantificó su potencial de mejora bajo una heurística. En relación con esta heurística, es importante destacar que representa una cota inferior de mejora de la ocupación de los pabellones quirúrgicos.

Capítulo 7

Conclusión

Una gestión eficiente de los pabellones quirúrgicos tiene un impacto significativo tanto en los hospitales como en los pacientes. Por lo tanto, es crucial comprender cómo se lleva a cabo la programación de intervenciones e identificar las fuentes de ineficiencia para corregirlas y mejorar la eficiencia de esta labor.

En este estudio, se observó que la ocupación promedio de los pabellones se encuentra al menos un 16 % por debajo de lo considerado eficiente. Se identificaron como principales causas el tiempo inactivo al final e inicio del día, representando en conjunto un 14.9 %. Además, se identificó y cuantificó el potencial de mejora al asignar dos intervenciones consecutivas al mismo cirujano, lo que tiene el potencial de reducir los tiempos entre actos quirúrgicos en 20 minutos en promedio.

Asimismo, se desarrolló un algoritmo de predicción que permite prever de manera más precisa la duración de los procedimientos, considerando variables del paciente, cirujano y procedimiento, con un enfoque de implementación. Esto condujo a una disminución del MAPE al 23.01 %, reduciéndose en al menos un 3.98 % en comparación con la situación actual.

Además, se identificó y cuantificó el margen de mejora al aplicar una política que agrupa intervenciones del mismo cirujano, reduce los tiempos inactivos y estima los procedimientos mediante machine learning. Este enfoque permite aumentar las intervenciones en un promedio de 2.88, logrando una ocupación promedio del 81.4 % y limitando el sobretiempo del pabellón, asegurando que bajo ningún turno la proporción de días con sobretiempo mayor a 30 minutos supere el 24 %.

Un trabajo futuro implica la implementación de esta política en el hospital. Para ello, está la opción de construir un *scheduler* mediante la formulación de un problema de optimización entero mixto, donde la duración de las intervenciones sea determinista [23] y estimada con el algoritmo de machine learning. De igual manera, se podría penalizar la función objetivo cuando se programen distintos cirujanos en procedimientos consecutivos. Esto permitiría agrupar intervenciones por cirujanos y explorar diversas opciones, como la de dividir en algunos casos la cantidad de intervenciones consecutivas de un cirujano y asignarlas en dos días distintos, eligiendo la mejor alternativa disponible con tal de aumentar la ocupación logrando sobrepasar el 90 % de ocupación.

Bibliografía

- [1] Brian Denton, James Viapiano, and Andrea Vogl. Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty. *Health care management science*, 10:13–24, 2007.
- [2] Ministerio de Salud. *GLOSA 6 Lista de Espera No GES y Garantías de Oportunidades GES Retrasadas*.
- [3] Carolina Vidal Gamboa, Ingrid Palavecino Sáez, Patricia MoyaRivera, Carol Toro Huerta, and Lorena Hoffmeister Arce. Calidad de vida del personal de salud y su relación con el ausentismo. *Ciencia & trabajo*, 19(60):188–193, 2017.
- [4] Jerrold H May, William E Spangler, David P Strum, and Luis G Vargas. The surgical scheduling problem: Current research and future opportunities. *Production and Operations Management*, 20(3):392–405, 2011.
- [5] James M Magerlein and James B Martin. Surgical demand scheduling: a review. *Health services research*, 13(4):418, 1978.
- [6] Hospital Clínico Universidad de Chile. Misión - hospital clínico universidad de chile. <https://www.redclinica.cl/institucional/mision.aspx>, 2023.
- [7] Departamento de Asistencia Remota en Salud. Ficha clínica. <https://saludresponde.minsal.cl/ficha-clinica/>, 2023.
- [8] Hospital Clínico Universidad de Chile. Problemática presupuestaria que afecta el funcionamiento del hospital clínico josé joaquín aguirre, 2020.
- [9] Alex Macario. Are your hospital operating rooms “efficient”? a scoring system with eight performance indicators. *The Journal of the American Society of Anesthesiologists*, 105(2):237–240, 2006.
- [10] Aurélien Géron. *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*. O’Reilly Media, Inc., 2022.
- [11] Leo Breiman. *Classification and regression trees*. Routledge, 2017.
- [12] Steve R Gunn et al. Support vector machines for classification and regression. *ISIS technical report*, 14(1):5–16, 1998.

- [13] Tianqi Chen and Carlos Guestrin. Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, pages 785–794, 2016.
- [14] Matthew A Bartek, Rajeev C Saxena, Stuart Solomon, Christine T Fong, Lakshmana D Behara, Ravitheja Venigandla, Kalyani Velagapudi, John D Lang, and Bala G Nair. Improving operating room efficiency: machine learning approach to predict case-time duration. *Journal of the American College of Surgeons*, 229(4):346–354, 2019.
- [15] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Guía legal sobre horas extraordinarias. <https://www.bcn.cl/portal/leyfacil/recurso/horas-extraordinarias>, 2023.
- [16] Jerry Banks. *Discrete event system simulation*. Pearson Education India, 2005.
- [17] Neus Canal Díaz. Comparación de proporciones. *Rev Soc Esp Enferm Nefrol*, 20112011:149–164, 2011.
- [18] Maximiliano Barahona, Marcela Cárcamo, Macarena Barahona, Cristian Barrientos, Carlos Infante, and Álvaro Martínez. Estimación de la eficiencia del uso de pabellones electivos en el sistema de salud público chileno entre 2018 y 2021. *Medwave*, 23(3):e2667, 2023.
- [19] Sean Shao Wei Lam, Hamed Zaribafzadeh, Boon Yew Ang, Wendy Webster, Daniel Buckland, Christopher Mantyh, and Hiang Khoon Tan. Estimation of surgery durations using machine learning methods-a cross-country multi-site collaborative study. In *Healthcare*, volume 10, page 1191. MDPI, 2022.
- [20] Justin P Tuwatananurak, Shayan Zadeh, Xinling Xu, Joshua A Vacanti, William R Fulton, Jesse M Ehrenfeld, and Richard D Urman. Machine learning can improve estimation of surgical case duration: a pilot study. *Journal of medical systems*, 43:1–7, 2019.
- [21] Oscar Martinez, Carol Martinez, Carlos A Parra, Saul Rugeles, and Daniel R Suarez. Machine learning for surgical time prediction. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 208:106220, 2021.
- [22] Zahra ShahabiKargar, Sankalp Khanna, Abdul Sattar, and James Lind. Improved prediction of procedure duration for elective surgery. In *HIC*, pages 133–138, 2017.
- [23] Macarena Azar, Rodrigo A Carrasco, and Susana Mondschein. Dealing with uncertain surgery times in operating room scheduling. *European Journal of Operational Research*, 299(1):377–394, 2022.
- [24] Contraloría General Metropolitana de Santiago. *INFORME FINAL N° 914, Hospital Clínico de la Universidad de Chile*.
- [25] Brecht Cardoen, Erik Demeulemeester, and Jeroen Beliën. Operating room planning and scheduling: A literature review. *European journal of operational research*, 201(3):921–932, 2010.

- [26] Narges Hosseini, Mustafa Y Sir, Christopher J Jankowski, and Kalyan S Pasupathy. Surgical duration estimation via data mining and predictive modeling: a case study. In *AMIA annual symposium proceedings*, volume 2015, page 640. American Medical Informatics Association, 2015.

Anexo A

Procesos

A.1. Flujo del proceso de programación del personal de los servicios quirúrgicos

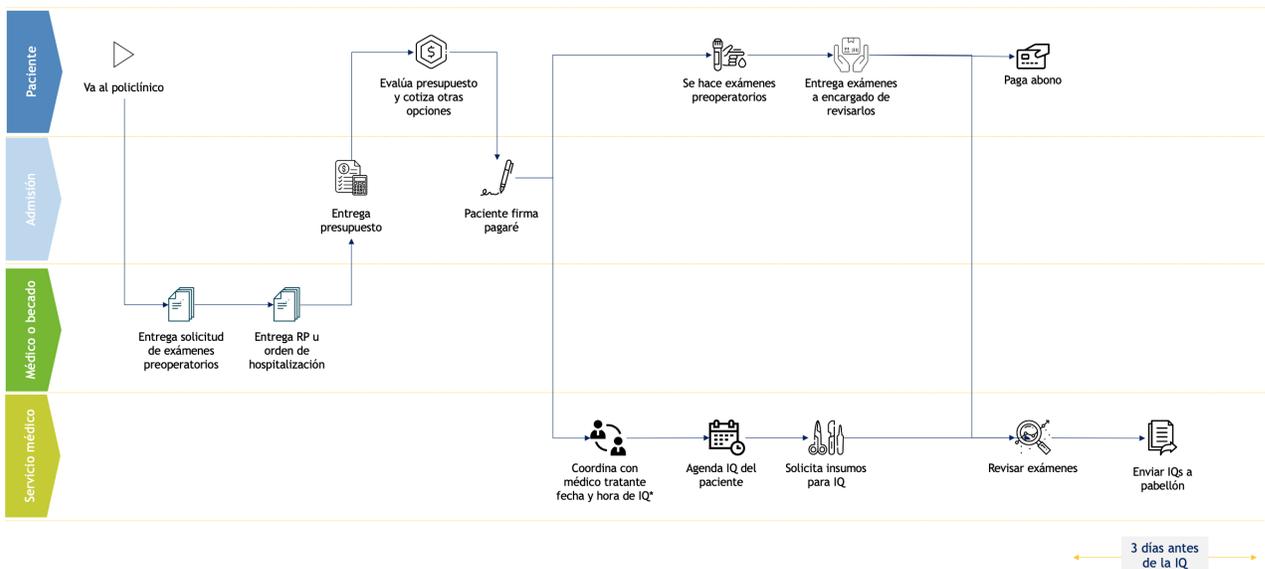


Figura A.1: Proceso de programación generalizada de los servicios quirúrgicos

A.2. Etapas del proceso de programación del personal de pabellón

La primera de ellas tiene que ver con el cumplimiento de la sanción de la tabla operatoria del día siguiente, para cumplir con lo anterior se debe retirar a los pacientes señalados por los servicios quirúrgicos que no cumplan con los requisitos administrativos y aquellos donde no se adquirieron los insumos para la intervención. Además de esto se trata de ingresar pacientes

urgentes y/o hospitalizados para rellenar los cupos de los que se liberaron. Cumplido lo anterior se procede a sancionar la tabla. Para luego, difundir la tabla operatoria a la encargada de camas, admisionistas, servicios quirúrgicos, enfermeras de pabellón, entre otros y es en alguna de ellas donde se incorpora información extra como edad y comorbilidades de los pacientes.

La segunda etapa, consiste en revisar si se deben ingresar y/o retirar pacientes de la tabla operatoria en base a la información recibida por cada uno de los servicios y el cumplimiento de los requerimientos administrativos y médicos de los pacientes.

Y la última etapa es recibir las intervenciones quirúrgicas que se encuentran programadas para tres días hábiles más. Se verifica que cumplan las restricciones de equipos disponibles en pabellón para que no se programen más intervenciones en paralelo de las que se pueden realizar. Además se chequea las estimaciones de los actos quirúrgicos y en caso de ser necesario corregirlo, para que no se exceda el periodo de tiempo disponible de pabellón. Cumplido lo anterior se verifica en los casos que sea necesario que se adquirieron los insumos especiales para la intervención con la empresa correspondiente y además se comprueba si el paciente realizó la reserva de hospitalización. Para luego finalmente ingresar los pacientes a FCE.

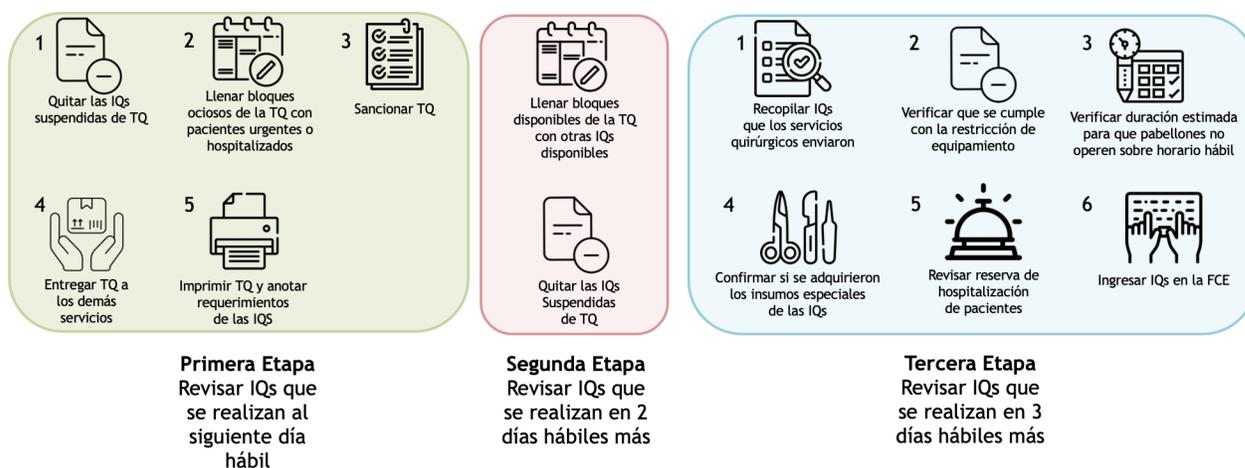


Figura A.2: Etapas del proceso de programación dentro del servicio de pabellón

Anexo B

Diccionario de Variables

Clasificación	Variable	Tipo	Descripción	Comentario
Datos del paciente	PACIENTE	String	Nombre del paciente que se le realiza la intervención	Formato es sin punto y con guión (XXXXXXXXXX-X)
	RUT_PAC	String	Es el rut del paciente que se le realiza la intervención	Unidad de medida año
	EDAD	Númerica	Edad del paciente que se le realiza la intervención	Valores: Masculino, Femenino e Indefinido
	GENERO	Categoría	Indica el sexo del paciente	
	DIAGNOSTICO	String	Frase donde se describe el diagnóstico del paciente	Valores: Nivel 1, Nivel 2, Nivel 3, Nivel 4, Nivel 5, Sin Determinar
	ASA	Categoría	Variable asociada a la clasificación del estado físico preoperatorio	Ejemplo de valores: Fonasa, Consalud, Dipreca, etc
	INSTITUCION	Categoría	Institución previsual del paciente	Valores: Institucional o Privado
	CUENTA	Númerica	Id del paciente en términos de información financiera interna	
	MODALIDAD	Dummy	Si el paciente es derivado desde policlínico del hospital (institucional) o de la consulta privada de un cirujano (privado)	
	COD_PROCE	Númerica	Código asociado al procedimiento que se realiza	
	DESCRIP_PROCE	String	Detalle del procedimiento que se realiza al paciente	
	TECNICA	Categoría	Técnica quirúrgica utilizada en la cirugía	Ejemplo de valores: Abierta, Laparoscópica, Endoscópica, etc
	FEC_INTERVENCION	Date	Fecha en que se realiza la intervención	Formato: DD-MM-AAAA
	HORA_INTERVENCION	String	Señala la hora en que se tiene programada que comience la intervención	Formato: HH:MM AM/PM
DURACION_ESTIMADA	Númerica	Duración planificada de la intervención quirúrgica	Su unidad de medida es el minuto	
TIPO_INTERVENCION	Dummy	Clasificación de complejidad de la intervención	Valores: Alta Complejidad, Otra Complejidad	
PABELLON	Categoría	Pabellón donde se realiza el procedimiento	Ejemplo de valores: Pab 05B, Pab 07B, Pab 5D, etc	
UF_PACIENTE	Categoría	Unidad donde el paciente se recupera luego de que abandona el área de pabellón	Ejemplo de valores: UPC, UCI, Unidad Coronaria, etc	
TIPO_ANEST	Categoría	Indica el tipo de anestesia que se le aplica al paciente	Ejemplo de Valores: Anestesia General, Anestesia local, Anestesia Regional, etc	
PROGRAMACION	Categoría	Define si la intervención fue agendada con tiempo (Programada), solo dos días antes de la intervención (No Programada) o debido a la gravedad fue agendada el mismo día (Urgente)	Valores: No Programada, Programada y Urgente	
Datos de la Intervención	ADMISION_PABELLON	Date	Fecha en la que el paciente ingresa al área de pabellón	Formato: DD-MM-AAAA
	HORA_ADMISION_PABELLON	String	Hora en la que el paciente ingresa al área de pabellón	Formato: HH:MM AM/PM
	ENTRADA_PABELLON	Date	Fecha en la que el paciente entra al pabellón	Formato: DD-MM-AAAA
	HORA_ENTRADA_PABELLON	String	Hora en la que el paciente entra a pabellón	Formato: HH:MM AM/PM
	FEC_INICIO_ANESTESIA	Date	Fecha en la que comienza el suministro de anestesia al paciente	Formato: DD-MM-AAAA
	HORA_INICIO_ANESTESIA	String	Hora en la que comienza el suministro de anestesia al paciente	Formato: HH:MM AM/PM
	FEC_INICIO_INTERV	Date	Fecha en la que empieza la intervención quirúrgica	Formato: DD-MM-AAAA
	HORA_INICIO_INTERV	String	Hora en la que comienza la intervención quirúrgica	Formato: HH:MM AM/PM
	FEC_FIN_INTERV	Date	Fecha en la que termina la intervención quirúrgica	Formato: DD-MM-AAAA
	HORA_FIN_INTERV	String	Hora en la que termina la intervención quirúrgica	Formato: HH:MM AM/PM
	FEC_FIN_ANESTESIA	Date	Fecha en la que se despierta al paciente de la anestesia	Formato: DD-MM-AAAA
	HORA_FIN_ANESTESIA	String	Hora en la que se despierta al paciente de la anestesia	Formato: HH:MM AM/PM
	SALIDA_PABELLON	Date	Fecha de salida del paciente del pabellón	Formato: DD-MM-AAAA
	HORA_SALIDA_PAB	String	Hora de salida del paciente del pabellón	Formato: HH:MM AM/PM
SALIDA_BLOQUE	Date	Fecha de abandono del paciente del área de pabellón	Formato: DD-MM-AAAA	
HORA_BLOQUE_PAB	String	Hora de abandono del paciente del área de pabellón	Formato: HH:MM AM/PM	
TIPO_PERSONAL	Categoría	El rol del personal médico dentro del acto quirúrgico	Ejemplo de valores: Cirujano 1, Cirujano 2, Anestesta 1, etc	
Datos de los profesionales	PERSONAL_MED	String	Nombre del cirujano que realiza el procedimiento	Formato es sin punto y con guión (XXXXXXXXXX-X)
	RUT_PROFESIONAL	String	Es el rut del cirujano que realiza la intervención	Ejemplo de valores: Oftalmología, Otorrinolaringología, Urología, etc
	SERV_CLINIC	Categoría	El servicio clínico que programó la intervención	Valores: 0 y 1
Otras	REINTERVENCION	Dummy	Indica si la intervención corresponde a una reintervención o no	Valores: 0 y 1
	PRINCIPAL_1_SEC_0	Dummy		Valores: 0 y 1

Tabla B.1: Diccionario de Variables de la Base

Anexo C

Estimación de las horas disponibles en los pabellones

El comportamiento que se observa en la figura C.1 de las horas disponibles de pabellón de manera semanal durante el año 2022 se puede desprender que en ninguna semana del año la estimación supera a la cantidad de horas contratadas y se observa que en 6 semanas del año la diferencia fue menor a un 5% de las horas disponibles contratadas presentándose en los meses de mayo, agosto, octubre y diciembre.

Respecto a la mayor diferencia, corresponde al mes de febrero, donde se aprecia que la diferencia llega hasta un 74.95% en la semana que comienza el lunes 14 de febrero y la menor diferencia de dicho mes es de 53.81% correspondiente la semana que empieza el lunes 07 de febrero.

Destacar que las diferencia en el comportamiento de las horas contratadas responden a la cantidad de días que se programaron intervenciones, por lo tanto, aquellas semanas que tuvieron un día feriado tienen una menor cantidad de horas disponibles contratadas, igual caso a aquellas semanas que no se programan intervenciones los días sábados.

Dada la diferencia que existe, se desprende que debe existir una influencia en el cálculo de los indicadores, dado que estos se calculan como porcentaje del tiempo disponible. Respecto al impacto, para el caso de la ocupación que se calcula por medio de la hora de término estimada esta tiende a sobreestimar el indicador que se da de igual manera para el tiempo entre cirugías y porcentaje de cirugías con sobretiempo. Mientras que para el caso de tiempo inactivo al final del día tiende a subestimar dicho indicador. Sin embargo, el cálculo de los indicadores permite tener un límites superiores como lo es el caso de los indicadores que se sobreestiman y un límite inferior para los indicadores que se subestiman.

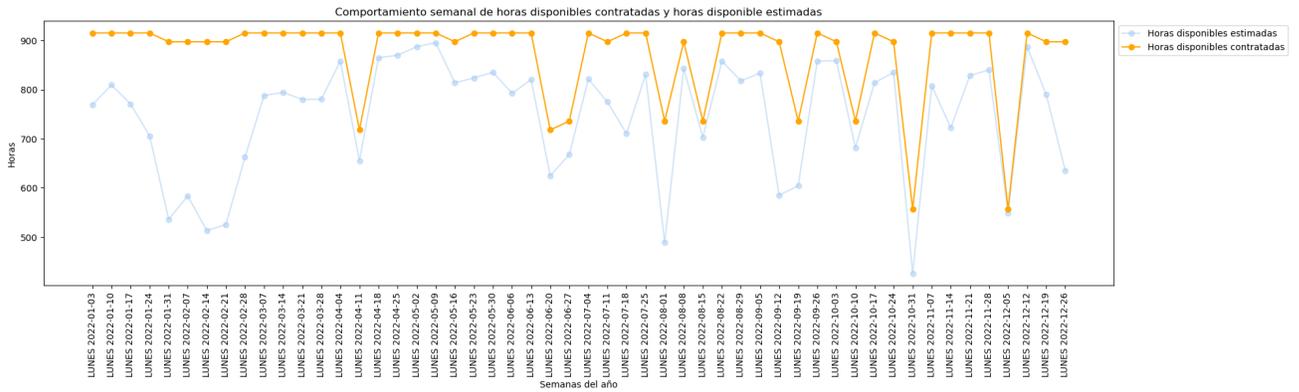


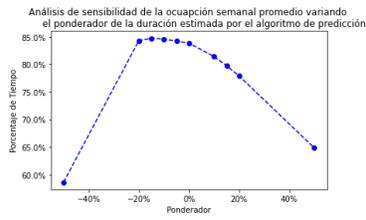
Figura C.1: Comportamiento semanal de horas disponibles contratadas y estimadas

Anexo D

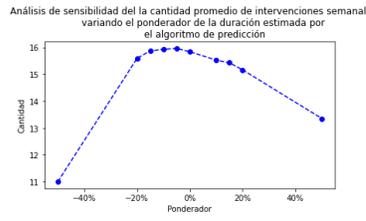
Simulador

Indicador	Promedio Caso Base	Promedio Heurística	I.C al 95 %	
			Límite Inferior	Límite Superior
Ocupación	71,63 %	81,40 %	9.19 %	10.34 %
Cantidad de actos quirúrgicos Semanal	12,7	15,58	2,756	2,998
Sobretiempo mayor a 30 min, turno 16:30	17,09 %	19,66 %	0,79 %	4,34 %
Sobretiempo mayor a 30 min, turno 20:00	23,90 %	21,30 %	-5,70 %	0,56 %
Tiempo inactivo inicio del día	6,37 %	0,89 %	-5,70 %	-5,26 %
Tiempo inactivo al final del día	11,10 %	7,18 %	-4,36 %	-3,48 %
Tiempo ocioso entre actos quirúrgicos por término anticipado	6,23 %	3,69 %	-2,91 %	-2,19 %
Tiempo ocioso entre actos quirúrgicos por inicio retrasado	4,68 %	6,87 %	1,89 %	2,48 %
Sobretiempo mayor a 60 min, turno 16:30	10,64 %	11,21 %	-0,86 %	2 %
Sobretiempo mayor a 120 min, turno 16:30	3,72 %	4,05 %	-0,56 %	1,21 %
Sobretiempo mayor a 60 min, turno 20:00	16,68 %	12,51 %	-6,84 %	-1,50 %
Sobretiempo mayor a 120 min, turno 20:00	9,01 %	5,29 %	-5,67 %	-1,78 %

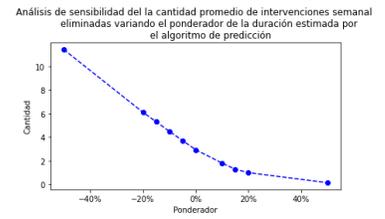
Tabla D.1: Promedios e intervalos de confianza de la media entre el caso baso e heurística de todos los indicadores



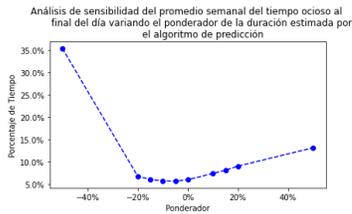
(a) Ocupación



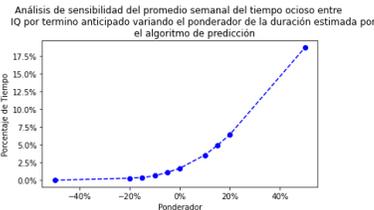
(b) Procedimientos realizados



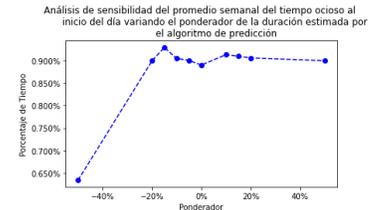
(c) Procedimientos suspendidos



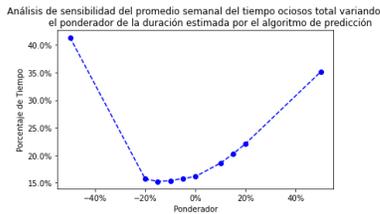
(d) Tiempo inactivo final del día



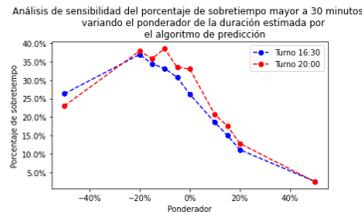
(e) Tiempo entre AQ término anticipado



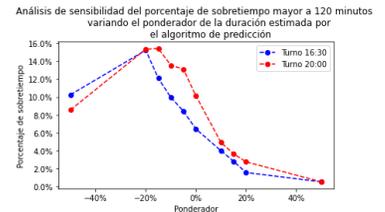
(f) Tiempo entre AQ inicio retrasado



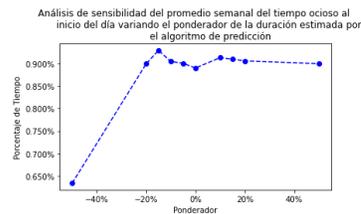
(g) Tiempo ocioso total



(h) Sobretiempos > 30 min

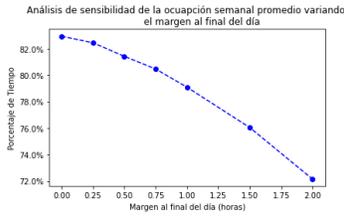


(i) Sobretiempos > 120 min

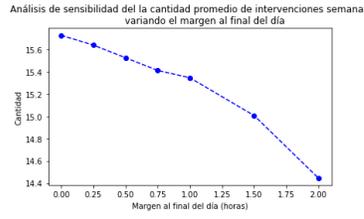


(j) Tiempo inactivo al inicio del día

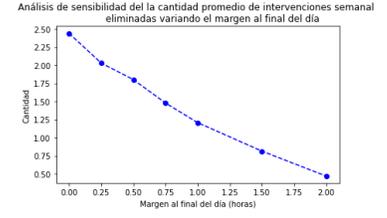
Figura D.1: Gráficos de sensibilidad de los indicadores variando el valor del ponderador.



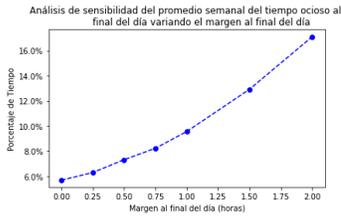
(a) Ocupación



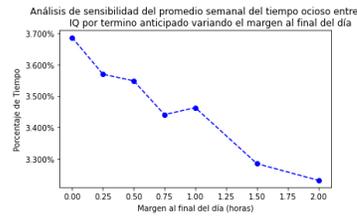
(b) Procedimientos realizados



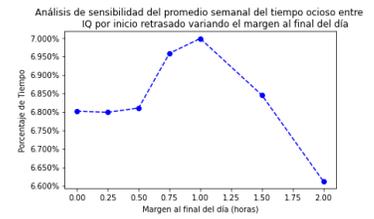
(c) Procedimientos suspendidos



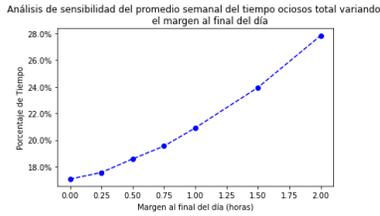
(d) Tiempo inactivo final del día



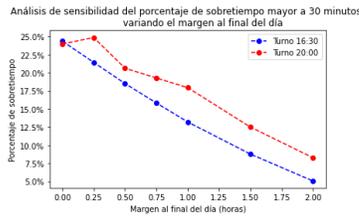
(e) Tiempo entre AQ término anticipado



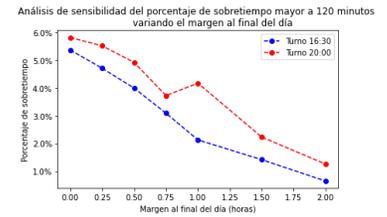
(f) Tiempo entre AQ inicio retrasado



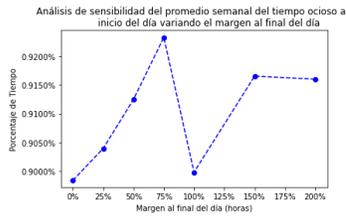
(g) Tiempo ocioso total



(h) Sobretiempo > 30 min

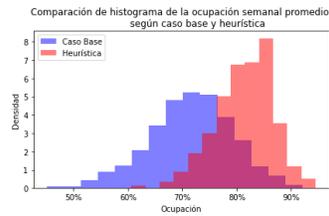


(i) Sobretiempo > 120 min

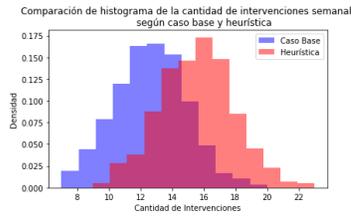


(j) Tiempo inactivo al inicio del día

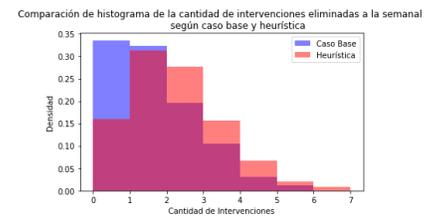
Figura D.2: Gráficos de sensibilidad de los indicadores variando el valor del margen al final del día.



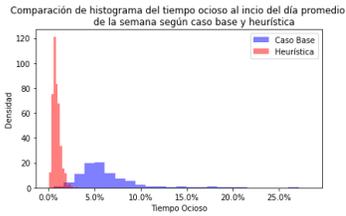
(a) Ocupación



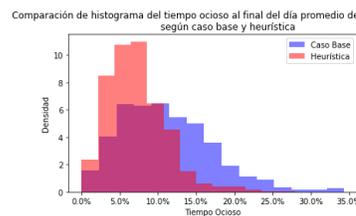
(b) Procedimientos realizados



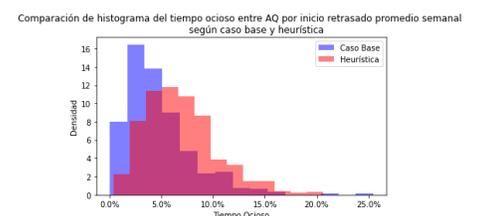
(c) Procedimientos suspendidos



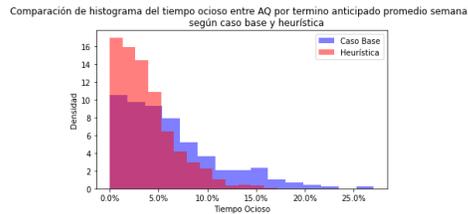
(d) Tiempo inactivo inicio del día



(e) Tiempo inactivo final del día



(f) Tiempo entre AQ inicio retrasado



(g) Tiempo entre AQ término anticipado

Figura D.3: Gráficos de densidad de indicadores en caso base y heurística.