

Balance entre eficiencia operativa y preferencias en la asignación de personal en un servicio de Imagenología en Uruguay

Alfonso CALANDRA
Juan Pedro TORNONI
Julieta VIERA

Proyecto de Grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República
en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniería de Producción

Tutores:

Pedro Piñeyro
Gastón Notte

Tribunal:

Ramiro Roselli
Maria Eugenia Vila
Gastón Notte
Pedro Piñeyro

Montevideo, Uruguay

Junio de 2026

Resumen ejecutivo

La asignación de personal en servicios de salud que operan de forma continua constituye un problema de alta complejidad, ya que requiere compatibilizar la cobertura de la demanda con restricciones operativas, condiciones laborales y criterios vinculados al bienestar del personal. En este trabajo se estudia el problema de asignación de turnos en el servicio de Imagenología de una institución médica uruguaya, donde la planificación se realiza de forma manual. Con el objetivo de apoyar este proceso, se desarrollaron dos modelos de optimización multi-objetivo basados en Programación por Metas. El primero corresponde a la asignación de médicos, mientras que el segundo aborda la asignación de licenciados e incorpora explícitamente las especialidades requeridas en cada turno. Ambos modelos fueron formulados para minimizar simultáneamente las horas extra mensuales, los desvíos respecto a las preferencias del personal y la inestabilidad en la asignación semanal. Asimismo, el trabajo incluyó una revisión de la literatura sobre problemas de asignación de personal en salud y la adaptación de los modelos a las particularidades operativas del caso de estudio.

Los modelos fueron evaluados a partir de instancias construidas con datos reales del servicio, obteniéndose en ambos casos asignaciones óptimas que cubren la totalidad de la demanda en tiempos considerablemente menores a los requeridos por la planificación manual. Los resultados muestran mejoras significativas en términos de reducción de horas extra, cumplimiento de preferencias, estabilidad de los cronogramas y utilización del personal suplente. En particular, para el caso de licenciados, la proporción de horas extra se redujo de 4,62 % de las horas totales en la asignación manual a 0,05 %, mientras que el nivel de satisfacción de preferencias superó el 90 %. Por otra parte, el análisis de sensibilidad evidenció un comportamiento consistente frente a variaciones en los principales parámetros, obteniéndose asignaciones coherentes con los escenarios evaluados. Si bien el modelo de licenciados, debido a su mayor complejidad, presentó tiempos de resolución superiores a los del modelo de médicos, se entiende que estos son adecuados para su utilización como herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

Palabras Claves: Asignación de Personal con Preferencias, Gestión en Salud, Optimización Multi-objetivo, Programación por Metas.

Agradecimientos

En primer lugar queremos agradecer a nuestros tutores, Pedro Piñeyro y Gastón Notte, quienes nos acompañaron a lo largo de todo el trabajo, brindando sus experiencias, apoyo y sugerencias durante todo el proyecto.

En segundo lugar, queremos agradecer a la institución COMEPA, particularmente a Virginia Gargano y Leticia Depratti, que se mostraron a disposición para presentar los datos necesarios y dedicar su tiempo para evacuar las dudas que surgieron con el mayor de los compromisos.

En tercer lugar, queremos agradecer a nuestras familias, amigos y compañeros que nos acompañaron no solo durante este proyecto sino que a lo largo de toda la carrera.

Por último, corresponde agradecernos entre nosotros, por el compromiso que asumimos como equipo y la responsabilidad que tuvimos unos hacia otros, además de los sacrificios realizados para llegar a esta instancia final.

Gracias Totales.

Índice

1. Introducción	15
2. Marco teórico	17
2.1. Imagenología	17
2.2. Asignación en la salud	17
2.3. Revisión del Physician Scheduling Problem	18
2.4. Problemas Multi-objetivo	21
2.4.1. Suma Ponderada	23
2.4.2. Programación por Metas	23
3. Caso de estudio: COMEPA	25
3.1. Descripción de la institución	25
3.1.1. Área de Imagenología	25
3.2. Descripción del problema	26
3.2.1. Médicos	26
3.2.2. Licenciados	27
4. Modelos para asignación de turnos	29
4.1. Formulación de los Modelos Matemáticos	29
4.1.1. Modelo para médicos	30
4.1.2. Modelo para licenciados	34
4.2. Implementación de los modelos	38
4.3. Validación de los modelos	38
4.3.1. Validación del modelo de médicos	39
4.3.2. Validación del modelo de licenciados	46
4.4. Formulación de los modelos con Programación por Metas	51
4.4.1. Modelo GP para médicos	52
4.4.2. Modelo GP para licenciados	53
4.5. Validación de modelos GP y comparación de resultados	55
4.5.1. Validación del modelo GP para médicos	55
4.5.2. Validación del modelo GP de licenciados	57
5. Relevamiento y análisis de datos	61
5.1. Datos para médicos	61
5.1.1. Parametrización del modelo	61
5.1.2. Valores de demanda, disponibilidad y preferencias	62
5.1.3. Parámetros operativos definidos a partir de la contraparte	63
5.2. Datos reales de licenciados	63
5.2.1. Parametrización del modelo	63
5.2.2. Valores de demanda, disponibilidad y preferencias	65
5.2.3. Parámetros operativos definidos a partir de la contraparte	66
6. Resultados del caso real y análisis comparativo	67
6.1. Resultados para la asignación de médicos	67
6.1.1. Resultados Mono-objetivo	67
6.1.2. Resultados Multi-objetivo	68

6.1.3.	Comparación con el cronograma real de la institución	72
6.2.	Resultados para la asignación de licenciados	74
6.2.1.	Resultados Mono-objetivo	75
6.2.2.	Resultados Multi-objetivo	77
6.2.3.	Comparación con el cronograma real de la institución	78
7.	Análisis de sensibilidad	81
7.1.	Modelo para médicos	81
7.1.1.	Variación en la disponibilidad de personal	81
7.1.2.	Variación en la demanda de turnos	84
7.1.3.	Variación de preferencias	87
7.2.	Modelo para licenciados	88
7.2.1.	Variación en la disponibilidad de personal	89
7.2.2.	Variación en la demanda de turnos	91
7.2.3.	Variación en preferencias del personal	95
7.2.4.	Variación en la especialidad	97
8.	Conclusiones y trabajos futuros	101
	Referencias	105
	Apéndice 1: Estado del arte	109
	Apéndice 2: Validación de los modelos	153
	Apéndice 3: Enlaces a documentos complementarios	181
	Apéndice 4: Comparación de horas asignadas a licenciados	183
	Apéndice 5: Análisis de sensibilidad: licenciados	185

Índice de tablas

1.	Resultados mono-objetivo: médicos, Caso de referencia.	40
2.	Parámetros alterados: médicos, Caso 1	40
3.	Resultados mono-objetivo: médicos, Caso 1.	41
4.	Parámetros alterados: médicos, Caso 2	42
5.	Resultados mono-objetivo de preferencias no cumplidas: médicos, Caso 2.	42
6.	Parámetros alterados: médicos, Caso 3	43
7.	Asignación minimizando horas extra: médicos, Caso 3.	43
8.	Resultados mono-objetivo de horas extra: médicos, Caso 3.	44
9.	Parámetros alterados: médicos, Caso 4 sin ajuste de horas.	44
10.	Parámetros alterados: médicos, Caso 4 con ajuste de horas.	45
11.	Asignación minimizando horas extra: médicos, Caso 4 con ajuste de horas.	45
12.	Resultados mono-objetivo: licenciados, Caso de referencia.	46
13.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 1.	47
14.	Resultados mono-objetivo: licenciados, Caso 1.	47
15.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 2.	49
16.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 3.	50
17.	Resultados mono-objetivo: licenciados, Caso 3.	51
18.	Resultados mono-objetivo y GP: médicos, Caso 1.	56
19.	Resultados mono-objetivo y GP: médicos, Caso 2.	57
20.	Resultados mono-objetivo y GP: licenciados, Caso 1.	58
21.	Resultados mono-objetivo y GP: licenciados, Caso 2.	59
22.	Resultados mono-objetivo: médicos.	68
23.	Comparación monoobjetivo y multiobjetivo: médicos.	69
24.	Porcentaje de preferencias no cumplidas por médico según enfoque de resolución.	70
25.	Cantidad de horas de policlínica asignadas por médico según enfoque de resolución.	70
26.	Cantidad de turnos de guardia asignados por médico según enfoque de resolución.	72
27.	Resultados mono-objetivo: licenciados.	75
28.	Comparación monoobjetivo y multiobjetivo: licenciados.	77
29.	Comparación caso real y dos médicos no disponibles.	82
30.	Comparación caso real y tres médicos no disponibles.	83
31.	Comparación caso real de médicos y 10 % de aumento en demanda . . .	85
32.	Comparación caso real de médicos y 20 % de aumento en demanda. . .	86
33.	Comparación caso real de médicos y totalidad de turnos posibles. . . .	86
34.	Comparación caso real de médicos e intercambio de preferencias.	87
35.	Comparación de preferencias no cumplidas en caso real y caso de super- posición de preferencias entre médicos 1 y 2.	88
36.	Comparación caso real y preferencias superpuestas	88
37.	Comparación caso real de licenciados y aumento de disponibilidad. . . .	90
38.	Comparación caso real y disminución de disponibilidad de licenciados. .	91
39.	Comparación caso real y aumento de demanda en especialidades críticas.	92
40.	Comparación de resultados entre el caso real y el caso con aumento de demanda en especialidades con perfiles de licenciados compartidos. . . .	94

41.	Comparación caso real y variación preferencias de licenciados.	96
42.	Comparación caso real y superposición de preferencias en licenciados. . .	97
43.	Comparación caso real y variación en la especialidad de licenciados. . .	98
44.	Parámetros utilizados en el caso de referencia para médicos.	155
45.	Resultados mono-objetivo: médicos, Caso de referencia.	156
46.	Asignación minimizando horas extra: médicos, Caso de referencia. . . .	156
47.	Asignación minimizando preferencias: médicos, Caso de referencia. . . .	156
48.	Asignación minimizando inestabilidad: médicos, Caso de referencia. . .	157
49.	Parámetros alterados: médicos, Caso 1.	157
50.	Parámetros alterados: médicos, Caso 2.	158
51.	Asignación común a las funciones objetivo: médicos, Caso 2.	158
52.	Parámetros alterados: médicos, Caso 3.	159
53.	Asignación común a las funciones objetivo: médicos, Caso 3.	159
54.	Parámetros alterados: médicos, Caso 4.	160
55.	Parámetros alterados: médicos, Caso 5.	160
56.	Parámetros alterados: médicos, Caso 6.	161
57.	Parámetros alterados: médicos, Caso 7.	162
58.	Asignación minimizando horas extra: médicos, Caso 7.	162
59.	Parámetros alterados: médicos, Caso 8.	163
60.	Asignación minimizando horas extra: médicos, Caso 8.	163
61.	Resultados mono-objetivo: médicos, Caso 8.	163
62.	Parámetros alterados: médicos, Caso 9.	165
63.	Parámetros utilizados en caso de referencia para licenciados.	167
64.	Resultados mono-objetivo: licenciados, Caso de referencia.	167
65.	Asignación minimizando horas extra: licenciados, Caso de referencia. . .	168
66.	Asignación minimizando preferencias: licenciados, Caso de referencia. .	168
67.	Asignación minimizando inestabilidad: licenciados, Caso de referencia. .	168
68.	Asignación minimizando desvío calidad de servicio: licenciados, Caso de referencia.	168
69.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 1.	169
70.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 2.	170
71.	Asignación común: licenciados, Caso 2.	170
72.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 3.	171
73.	Resultados mono-objetivo: licenciados, Caso 3.	171
74.	Asignación minimizando preferencias: licenciados, Caso 3.	172
75.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 4.	172
76.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 5.	173
77.	Resultados mono-objetivo: licenciados, Caso 6.	173
78.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 7.	174
79.	Resultados mono-objetivo: licenciados, Caso 7.	175
80.	Asignación minimizando inestabilidad: licenciados, Caso 7.	175
81.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 8.	176
82.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 9.	177
83.	Resultados mono-objetivo: licenciados, Caso 9.	177
84.	Asignación minimizando horas extra: licenciados, Caso 9.	177
85.	Parámetros alterados: licenciados, Caso 10.	178
86.	Resultados mono-objetivo: licenciados, Caso 10.	179

87.	Asignación minimizando horas extra: licenciados, Caso 10.	179
88.	Porcentaje de preferencias no cumplidas por licenciado según solución obtenida.	185
89.	Cantidad de horas asignadas por licenciado según solución obtenida. . .	186
90.	Porcentaje de preferencias no cumplidas por licenciado en las soluciones mono-objetivo y multi-objetivo.	187
91.	Horas asignadas por licenciado en las soluciones mono-objetivo y multi-objetivo.	188
92.	Comparación de cantidad de horas asignadas a cada licenciado.	189

Índice de figuras

1.	Flujograma del estudio del Marco teórico	19
2.	Comparación de asignación de horas de policlínica por médico: Min. pref no cumplidas vs multiobjetivo	71
3.	Comparación de guardias contratadas vs asignadas por médico según enfoque de resolución	73
4.	Comparación de horas contratadas vs asignadas por médico según enfoque de resolución	74
5.	Gráfico comparativo de cantidad de licenciados por especialidad en asignación multi-objetivo y manual.	80
6.	Gráfico comparativo de horas asignadas a licenciados suplentes en el caso real frente al caso de aumento de disponibilidad.	90
7.	Comparación de horas asignadas en Resonancia y Mamografía ante aumento de demanda	93
8.	Comparación de horas asignadas en especialidades con perfiles compartidos ante aumento de demanda	95
9.	Comparación de preferencias no cumplidas a licenciados según enfoque de resolución	97
10.	Gráfico comparativo de horas asignadas entre licenciados.	184

1. Introducción

El presente documento constituye el informe final del proyecto de grado desarrollado en el marco de la carrera Ingeniería de Producción, el cual abordó el problema de asignación de personal en el área de Imagenología de la Corporación Médica de Paysandú (COMEPA), institución de salud ubicada en Paysandú, Uruguay. En particular, se considera la planificación de turnos y guardias de médicos y licenciados, procurando dar respuesta a una necesidad operativa concreta del servicio mediante el uso de herramientas de modelado y optimización.

El servicio de Imagenología cumple un rol fundamental dentro de una institución médica, ya que resulta esencial para el diagnóstico, seguimiento y tratamiento de los pacientes. Su funcionamiento requiere asegurar una cobertura continua las 24 horas del día, con personal capacitado para desempeñarse en distintos turnos y especialidades, bajo condiciones operativas y contractuales específicas. Particularmente, en el caso de COMEPA, la construcción de los cronogramas de asignación de turnos presenta desafíos asociados a la coexistencia de múltiples criterios de decisión. Entre ellos se destacan la necesidad de cubrir la demanda del servicio, respetar las condiciones contractuales del personal evitando la asignación excesiva de horas extra, considerar las preferencias de los funcionarios respecto a determinados días o turnos, favorecer la estabilidad semanal y, en el caso de los licenciados, contemplar además la adecuación del recurso asignado según su capacitación para cada especialidad. La consideración conjunta de estos elementos resulta relevante tanto desde el punto de vista operativo como desde la calidad del servicio y el bienestar del personal.

Frente a este problema, el objetivo del proyecto fue desarrollar y validar modelos de programación matemática multi-objetivo, basados en Programación por Metas, para la asignación de médicos y licenciados. Para ello, se formularon modelos específicos para cada caso, capaces de representar sus principales características y de generar alternativas de asignación para apoyar la toma de decisiones. El principal aporte del trabajo radica en la incorporación explícita de las preferencias del personal junto con los demás criterios considerados en la asignación actual, así como en la reducción de los tiempos de generación de cronogramas.

Los modelos permitieron obtener planificaciones mensuales en cuestión de horas, cuando anteriormente esta tarea demandaba varios días. Los resultados alcanzados evidencian, además, que los modelos propuestos contribuyen a mejorar la eficiencia operativa, mediante la reducción de horas extra y un mejor aprovechamiento de los recursos. Además se incorporan aspectos asociados al bienestar del personal, como el cumplimiento de preferencias y una mayor estabilidad en los cronogramas; y, en el caso de los licenciados, contemplan criterios vinculados a la calidad del servicio, al considerar la adecuación del recurso asignado según su capacitación para cada especialidad. De esta forma, constituyen una herramienta de apoyo relevante para la planificación del servicio.

El resto del documento se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta el marco teórico, donde se introduce el área de Imagenología, los problemas de asignación de personal médico y la metodología de Programación por Metas. En la Sección 3 se describe la institución y las características del problema. La Sección 4 describe el desarrollo de los modelos matemáticos propuestos para los problemas de médicos y licenciados, con los casos de validación más representativos. En la Sección 5

se presentan los datos recibidos y el procesamiento necesario para su uso en los modelos. En la Sección 6 se analizan los resultados obtenidos para el caso real, comparándolo con la asignación manual proporcionada por la institución. En la Sección 7 se desarrolla el análisis de sensibilidad realizado. Finalmente, en la Sección 8 se presentan las conclusiones del trabajo y se identifican posibles líneas de trabajo futuro.

2. Marco teórico

En esta sección se desarrollan los conceptos clave necesarios para comprender el problema de asignación de personal en el ámbito de la salud. Para ello, se describe el área de Imagenología, se introduce el problema de asignación en la salud, se presentan los principales aportes del estado del arte sobre el Physician Scheduling Problem y se describen algunas técnicas de resolución de Problemas Multi-objetivo. El estado del arte completo sobre los problemas de asignación en el ámbito de la salud puede consultarse en Apéndice 1.

2.1. Imagenología

El área de Imagenología constituye un servicio de apoyo diagnóstico de especial relevancia dentro de los sistemas de salud, ya que permite obtener imágenes de las estructuras internas del cuerpo para el diagnóstico y tratamiento de diversas patologías. En términos generales, la Imagenología diagnóstica comprende el uso de radiación electromagnética y de otras tecnologías para producir imágenes que contribuyan a la identificación precisa de patologías [1]. Una característica distintiva de esta área es su fuerte articulación entre práctica clínica y tecnología especializada. En este sentido, intervienen distintos perfiles profesionales. Por un lado, el médico radiólogo es el especialista encargado de obtener e interpretar imágenes médicas mediante diversas técnicas. Por otro lado, los tecnólogos o licenciados en Imagenología participan en la realización de los estudios, operando los equipos y aplicando protocolos técnicos, de posicionamiento, seguridad radiológica y atención al paciente [2]. Entre las principales modalidades comprendidas en el campo de la imagen médica se encuentran la radiología convencional, la tomografía computada, la ecografía, la resonancia magnética, la mamografía y la medicina nuclear, además de procedimientos intervencionistas guiados por imágenes. Estas técnicas presentan diferentes fundamentos físicos y aplicaciones clínicas, lo que determina requerimientos operativos y tecnológicos específicos dentro de los servicios de salud [3].

2.2. Asignación en la salud

La asignación de recursos en el tiempo (scheduling) constituye un área central dentro de la Investigación Operativa y la Gestión de Operaciones. En términos generales, este concepto se refiere al proceso de determinar la asignación de tareas o turnos a distintos recursos en intervalos temporales definidos [4]. En este contexto, el concepto de turno de trabajo se define como el intervalo temporal durante el cual se desarrolla la actividad laboral [5].

En el ámbito de los sistemas de salud, la asignación de recursos se conoce como Physician Scheduling Problem (PSP), que aborda la asignación del personal médico a turnos de trabajo dentro de un horizonte temporal determinado [6]. Este problema implica satisfacer múltiples restricciones, entre las que se destacan la cobertura de la demanda asistencial, la disponibilidad del personal y los límites en la carga horaria. La relevancia del problema de asignación de personal médico ha crecido sostenidamente en las últimas décadas, impulsada por la necesidad de mejorar la eficiencia en las organizaciones de salud [7]. En particular, se ha señalado que los costos laborales representan una proporción significativa de los costos directos, por lo que incluso mejoras

marginales en los esquemas de asignación pueden generar impactos económicos relevantes [7]. En muchos casos, los médicos constituyen un recurso limitante que condiciona la planificación del resto de los recursos asistenciales, actuando como un cuello de botella en la operación global [6]. En muchos entornos hospitalarios la elaboración de cronogramas continúa realizándose de manera manual, lo que implica un elevado consumo de tiempo y recursos. Esta situación se ve agravada cuando se consideran múltiples categorías de personal, diversos servicios o unidades funcionales, y un conjunto amplio de restricciones laborales y operativas [8].

Finalmente, la formulación de estos problemas no se limita exclusivamente a criterios de eficiencia, como horas extra o costos operativos, sino que también incorpora dimensiones relacionadas con el bienestar del personal, como preferencias por turnos o estabilidad en la asignación. Entre ellas se incluyen la equidad en la distribución de la carga de trabajo, el equilibrio en la asignación de turnos, la ergonomía laboral y la continuidad en la atención. En este marco, el concepto de preferencias adquiere especial relevancia, entendiéndose como la elección de los individuos respecto a determinadas alternativas [9]. En el contexto de la planificación de personal en salud, estas preferencias se manifiestan en la elección de días, horarios o tipos de turno, y su consideración en los modelos de asignación suele estar asociada a mayores niveles de satisfacción del personal y, consecuentemente, a mejoras en la calidad del servicio prestado.

2.3. Revisión del Physician Scheduling Problem

Para la revisión sistemática de la literatura existente sobre el Physician Scheduling Problem se utilizó el repositorio Timbó. En este se ingresó un string de búsqueda definido para abarcar la totalidad de artículos relevantes en el ámbito de operaciones, compuesto de las siguientes palabras clave y conceptos:

(“physician scheduling” OR “doctor rostering”) AND (preferences OR
“social choice”) AND (optimization OR “mathematical programming”)
AND (healthcare OR hospital OR “medical service”)

A partir de la aplicación del string de búsqueda en las colecciones ScienceDirect, SpringerLink y Scopus, mediante el repositorio Timbó, se obtuvieron 173 trabajos, como se indica en la Figura 1. Posteriormente, se descartaron aquellos artículos que no pertenecían a los últimos 10 años de trabajo, a excepción de algunos artículos que se alineaban al objetivo del estudio por su enfoque y relevancia en la literatura, reduciendo entonces a 113 artículos. Habiendo reducido el número considerablemente, se procedió a analizar el contenido de cada artículo en más profundidad y se excluyeron aquellos artículos que no presentaban una formulación matemática del problema (a excepción de revisiones bibliográficas o estados del arte) y aquellos que utilizaban modelos estocásticos o simulación de eventos discretos. Finalmente, al aplicar estos filtros se obtuvieron 38 documentos, de los cuales 2 artículos fueron descartados dado que no se pudieron acceder a través del portal Timbó.

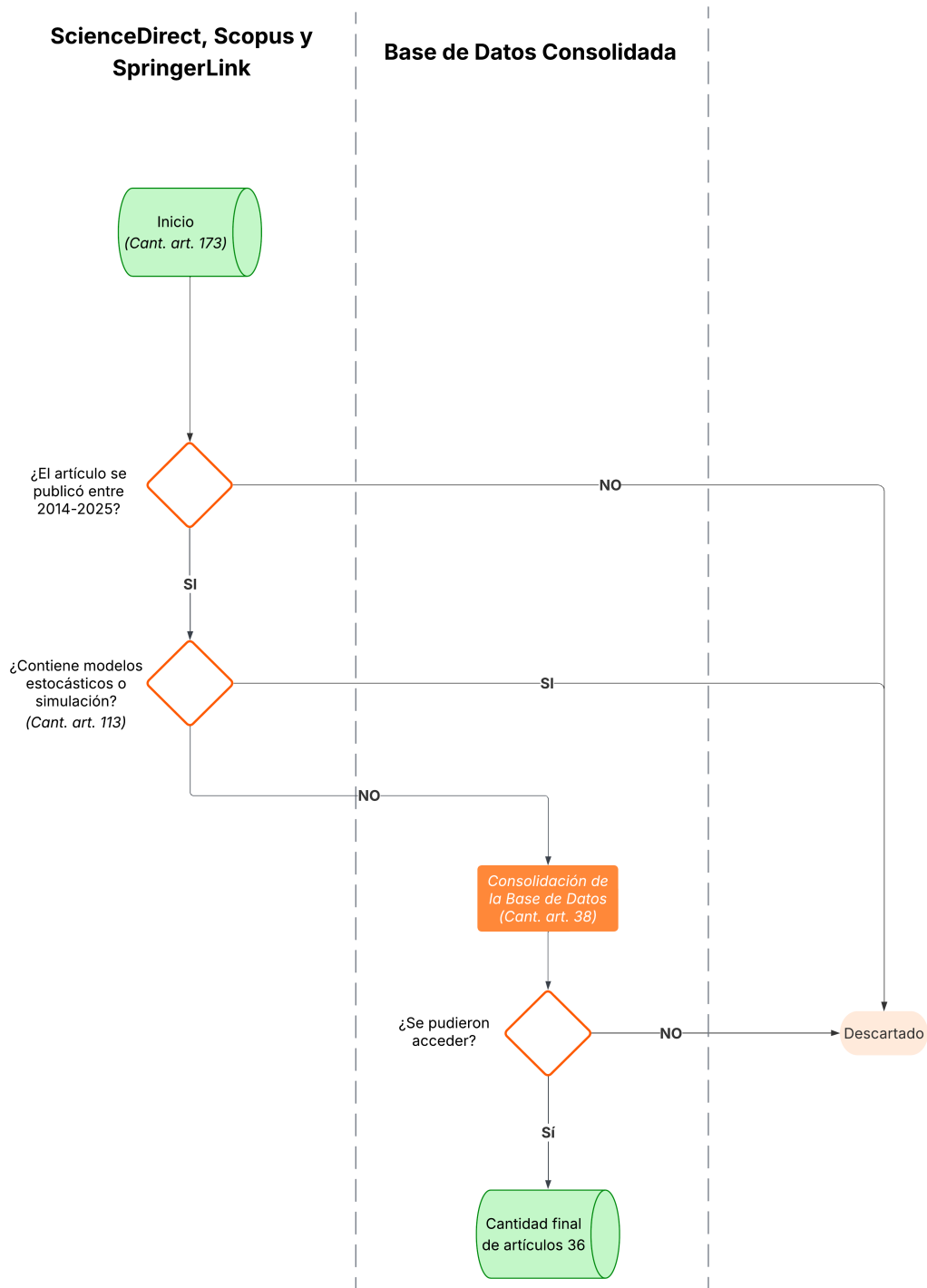


Figura 1: Diagrama de flujo del proceso de búsqueda, filtrado y selección de artículos de la revisión bibliográfica.

A partir del análisis realizado, a continuación se presentan algunos de los artículos seleccionados con mayor relevancia por su aporte en la creación del modelo matemático.

En [10] los autores abordan el problema de asignación de guardias en un hospital, donde la planificación se realizaba de forma manual para un conjunto de 49 médicos. Se

considera la existencia de distintas categorías de profesionales según su especialidad, lo que introduce restricciones específicas para ciertos grupos de tareas. Se propone un modelo de optimización que incluye restricciones tales como límites en la asignación de fines de semana consecutivos, control de la carga horaria semanal y distribución equitativa de turnos y licencias. A su vez, se incorporan restricciones vinculadas al mínimo de horas trabajadas y a la cantidad de turnos consecutivos en una misma actividad. También se consideran criterios ergonómicos orientados a limitar la cantidad de días consecutivos trabajados y reducir la variabilidad de los cronogramas. El modelo se resuelve en CPLEX, obteniéndose mejoras significativas respecto al enfoque manual previamente utilizado.

En [11] se aborda el problema de asignación de turnos médicos mediante un modelo de programación entera mixta que incorpora explícitamente criterios de equidad y preferencias individuales. El modelo mantiene la estructura clásica de cobertura y restricciones contractuales, e introduce términos en la función objetivo que penalizan el desequilibrio en la carga de trabajo y en la asignación de turnos inconvenientes, como noches y fines de semana. La formulación propuesta es flexible, permitiendo partir de un modelo base e incorporar posteriormente las preferencias de los médicos mediante términos adicionales. Los resultados obtenidos en un caso real evidencian mejoras en la distribución de la carga laboral y en la equidad de los cronogramas, con tiempos de resolución reducidos en comparación con la planificación manual.

En [12] se trabaja el problema de asignación de turnos médicos desde una perspectiva multi-objetivo, permitiendo ponderar explícitamente distintos criterios en conflicto sin fijar uno dominante. El modelo busca minimizar las desviaciones respecto a las preferencias de los médicos, al mismo tiempo que garantiza una distribución equilibrada de la carga de trabajo y un uso eficiente de los recursos. Para ello, proponen un enfoque en dos etapas: primero, aplican Programación por Metas para tratar simultáneamente múltiples objetivos; luego, utilizan el método Analytic Hierarchy Process para determinar la importancia relativa de cada criterio en la función objetivo. La implementación en un caso real muestra mejoras en la equidad y en la satisfacción del personal respecto a la planificación manual.

En [13] se propone un modelo de programación lineal para la asignación de turnos médicos que integra preferencias individuales con restricciones ergonómicas y regulatorias. El objetivo es reducir las horas extra y garantizar descansos adecuados, promoviendo el bienestar del personal y la continuidad del servicio. La función objetivo penaliza el exceso de cobertura, las variaciones en los horarios y las horas adicionales trabajadas, al tiempo que favorece la asignación de turnos según las preferencias declaradas. El modelo incorpora restricciones sobre horas contractuales, descansos mínimos entre turnos y condiciones específicas para guardias prolongadas. Para su resolución, se emplean técnicas avanzadas como descomposición de Dantzig-Wolfe y Branch-and-Price, lo que permite obtener soluciones óptimas en tiempos de cómputo aceptables.

En [14] se aborda el problema de asignación de turnos médicos incorporando simultáneamente criterios de preferencias individuales y equidad en la distribución. Para ello, se definen distintos tipos de turnos y se establecen equivalencias entre ellos según la percepción de valor de cada médico, permitiendo modelar las preferencias de forma cuantitativa. Asimismo, se garantiza un criterio de equidad mediante la definición de un horizonte temporal que asegura una distribución balanceada de los turnos entre todos los profesionales. El modelo permite que aquellos médicos que priorizan sus preferencias

puedan mejorar su asignación individual, a costa de una menor equidad global y la posible asignación de turnos menos deseables. El enfoque combina así asignaciones equitativas con la posibilidad de intercambios entre médicos orientados a maximizar sus preferencias, logrando un balance entre justicia global y satisfacción individual.

A partir de la revisión realizada, se observa que la mayoría de los trabajos abordan el problema de asignación de turnos mediante modelos de programación matemática que incorporan restricciones operativas y, en algunos casos, preferencias individuales. Sin embargo, se identifican limitaciones en aquellos enfoques que integran de manera conjunta estos aspectos con otros criterios relevantes, como la eficiencia operativa y la estabilidad del cronograma. En este contexto, el presente trabajo busca contribuir mediante una propuesta que contemple simultáneamente la eficiencia operativa, medida a través de las horas extra; el bienestar del personal, representado por el cumplimiento de preferencias y la estabilidad de la asignación; y la calidad del servicio.

2.4. Problemas Multi-objetivo

En muchos contextos de aplicación, la toma de decisiones no puede describirse adecuadamente mediante un único criterio de evaluación. Con frecuencia, los sistemas reales involucran múltiples objetivos que deben ser considerados simultáneamente [15]. Estos objetivos pueden representar distintos aspectos relevantes del problema, sin la necesidad de ser compatibles entre sí (por ejemplo, cantidad de recursos, tiempos de entrega, costos de implementación y calidad del servicio). En tales casos, mejorar el valor de un objetivo puede implicar el deterioro de otro, lo que introduce una relación de compromiso entre los distintos criterios de decisión.

Cuando un problema de optimización incorpora más de una función objetivo, se enmarca dentro del campo de la programación multi-objetivo. En este tipo de formulaciones, el modelo incluye un vector de funciones objetivo que deben ser consideradas simultáneamente, manteniendo el mismo conjunto de restricciones que define la región factible del problema [16]. Según [16], el problema general de optimización multi-objetivo (MOP) puede formularse de la siguiente manera:

$$\text{mín } f(x) \tag{1}$$

Sujeto a:

$$x \in X \tag{2}$$

donde $X \subseteq \mathbb{R}^n$ es un conjunto no vacío, y $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))^T : X \rightarrow \mathbb{R}^k$ es una función vectorial. La región factible X generalmente se expresa mediante un conjunto de restricciones de desigualdad.

A diferencia de la programación matemática clásica mono-objetivo, en la programación multi-objetivo generalmente no existe una única solución que optimice simultáneamente todos los criterios, debido a las posibles relaciones de conflicto entre ellos. La optimización mono-objetivo suele combinar todos los criterios, si es que los hay, en una única función, lo que generalmente requiere asignar ponderaciones que pueden resultar arbitrarias o poco representativas de las verdaderas preferencias del decisor. En contraste, la optimización multi-objetivo permite modelar explícitamente los conflictos

inherentes entre distintos criterios, proporcionando una representación más realista del problema. En [17] se plantea que la finalidad de la optimización multi-objetivo es el apoyo al tomador de decisiones en encontrar la solución que mejor se ajusta a sus preferencias.

El estudio de los problemas de optimización multi-objetivo tiene sus raíces en la teoría económica del bienestar, particularmente en el concepto de eficiencia introducido por Vilfredo Pareto a finales del siglo XIX. Pareto estableció que una asignación es eficiente si no es posible mejorar la situación de un individuo sin empeorar la de otro, dando origen al concepto de optimalidad de Pareto, el cual constituye la base teórica de la optimización multi-objetivo. Según [15], en los Problemas Multi-objetivo las funciones objetivo suelen ser contradictorias. Esta noción está directamente vinculada con la idea de soluciones Pareto óptimas, donde ninguno de los componentes puede ser mejorado sin empeorar al menos uno de los otros.

La definición matemática de Pareto óptimo es la siguiente: un punto $x^* \in X$, con imagen $f(x^*)$, se denomina (globalmente) Pareto óptimo (o Pareto fuerte, eficiente, no dominado o no inferior) si y solo si no existe un punto $x \in X$ tal que $f_i(x) \leq f_i(x^*)$ para todo $i = 1, 2, \dots, k$ y $f_j(x) < f_j(x^*)$ para al menos un índice $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ [15, 16, 17].

Si bien el concepto de eficiencia de Pareto permite caracterizar el conjunto de soluciones no dominadas de un problema multi-objetivo, en la práctica resulta necesario disponer de procedimientos que permitan identificar o generar dichas soluciones de manera sistemática. En [18] se explica que ante un problema multi-objetivo, con pesos no nulos y una función objetivo escalarizada estrictamente creciente, las soluciones óptimas son Pareto fuerte. En [19] se explica que las soluciones Pareto débil suelen ser más fáciles de generar computacionalmente que las Pareto óptimas, lo que las vuelve más relevantes desde un punto de vista técnico. Un punto $x \in X$, se denomina Pareto débil si y solo si no existe un punto $x \in X$ tal que $f_j(x) < f_j(x^*)$ para todo $i = 1, 2, \dots, k$.

En [20], se define el punto ideal como aquel dónde todos los objetivos toman el valor óptimo de su optimización individual perteneciendo a la región factible, en simultáneo. Es difícil alcanzar ese punto en la realidad, incluso perteneciendo a una región no factible, pero es utilizado para comparar su cercanía con otras soluciones.

Con este propósito, en la literatura se han desarrollado diversas estrategias que permiten representar y resolver problemas de programación multi-objetivo a partir de formulaciones alternativas [17]. Estas estrategias buscan, mediante distintos enfoques conceptuales, incorporar las preferencias del decisor o establecer reglas de priorización entre los objetivos considerados. Entre los métodos más utilizados se encuentran los enfoques de agregación de objetivos, como el método de suma ponderada, en el cual las distintas funciones objetivo se combinan en una única función mediante coeficientes de ponderación; los métodos basados en metas o niveles de aspiración, como la Programación por Metas, que reformulan el problema con objetivos deseados para cada criterio y desviaciones; y otros enfoques que establecen relaciones de prioridad entre los objetivos, como los métodos lexicográficos [17].

Según [17], cada una de estas metodologías propone una forma particular de transformar o estructurar el problema multi-objetivo con el fin de hacerlo tratable mediante técnicas de optimización convencionales. En las siguientes secciones se describen algunos de los enfoques más utilizados [16], pero existen otros no presentados en este trabajo, cómo ϵ -constraint, Compromise Programming y Lexicographic Optimization, e incluso combinaciones entre ellas.

2.4.1. Suma Ponderada

A partir de la formulación matemática del problema multi-objetivo planteada previamente en (1)-(2), se incorpora el vector w_i , que representa los pesos asignados a cada objetivo i . De este modo, el problema se transforma en una única función objetivo, obtenida como la suma ponderada de los distintos objetivos, de la siguiente forma:

$$\text{mín} \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad (3)$$

En [21] se explica que hay distintos criterios a la hora de seleccionar los pesos. Se parte de la base de que todos son mayor a cero y en algunos casos se considera que la suma de los pesos debe ser igual a 1, pero esto no necesariamente ocurre siempre. Se sugieren dos alternativas a la hora de fijar pesos: métodos de clasificación y métodos de categorización. En los primeros, se asignan valores independientes de importancia relativa a cada función objetivo. En los segundos, las funciones objetivo se jerarquizan según su nivel de importancia relativa, asignándoles pesos enteros que aumentan a medida que crece su prioridad. Incluso en algunos casos, se pueden generar categorías por grupos de objetivos con pesos compartidos.

Sobre la relación del uso de suma ponderada y la obtención de todas las soluciones pertenecientes al frente de Pareto, en [21] se explica que este método tiene deficiencias en representarlas. Una de las limitaciones identificadas es la dificultad a la hora de fijar pesos para compensar diferencias en la magnitudes de los objetivos, e incorporar pesos para indicar preferencia relativa de un objetivo por sobre otro. Otra de las limitaciones más relevantes es que su aproximación de las preferencias del decisor es únicamente lineal, lo que puede estar generando que las soluciones obtenidas no reflejen las preferencias indicadas originalmente. El artículo concluye que la suma ponderada no es recomendable usarla para problemas con variables discretas (no convexos). A pesar de esto, es un método que se usa de manera extensa para conseguir múltiples soluciones de un problema variando los pesos, o una solución única que se ajusta a las preferencias existentes.

2.4.2. Programación por Metas

La técnica de Programación por Metas (GP por sus siglas en inglés) consiste en fijar niveles de aspiración para cada uno de los objetivos, buscando que las soluciones se aproximen a dichos niveles [20]. La formulación genérica de cada meta, considerando Q metas con índice $q = 1, 2, \dots, Q$, n variables de decisión $x' = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ y b_q como nivel objetivo para cada una de las metas, resulta en:

$$f_q(x) + n_q - p_q = b_q \quad (4)$$

donde n_q es la variable de desviación negativa y p_q es la variable de desviación positiva, utilizadas para medir en qué medida se cumple de más o de menos cada meta. Esta formulación implica que el tomador de decisiones debe elegir cuáles desviaciones no son deseadas. Por ejemplo, como se menciona en [20], si lo que se desea es minimizar un costo, probablemente solo se intente minimizar la desviación positiva, es decir, el exceso

sobre la meta establecida para dicho costo. De manera similar, si se quiere alcanzar una ganancia económica, probablemente se intente minimizar la desviación negativa, es decir, la falta respecto a la meta deseada. Por último, si se quiere alcanzar un valor exacto, por ejemplo el tamaño de una fuerza laboral, se buscará minimizar tanto la desviación negativa como la positiva.

La formulación general de la Programación por Metas según [20] resulta en:

$$\text{mín } a = h(n, p) \tag{5}$$

Sujeto a:

$$f_q(x) + n_q - p_q = b_q \tag{6}$$

$$x \in F \tag{7}$$

donde F es la región factible de puntos de decisión que satisface todas las restricciones, y además

$$n_q, p_q \geq 0 \quad q = 1, 2, \dots, Q \tag{8}$$

Según [20], la facilidad con la que se pueden formular la Programación por Metas han asegurado que la misma se convirtiera en la técnica más popular en el contexto de Problemas Multi-objetivo.

3. Caso de estudio: COMEPA

En esta sección se presenta el contexto organizacional y operativo en el que se desarrolla el problema abordado en este trabajo. Para ello, se introduce a la Corporación Médica de Paysandú (COMEPA) como institución de referencia y, en particular, al área de Imagenología, ámbito en el que surge la necesidad de mejorar el proceso de asignación de personal. A partir del relevamiento realizado con la contraparte, se describen las principales características del servicio, así como las restricciones, criterios y particularidades que condicionan la planificación de turnos. Finalmente, se presenta el problema específico asociado a la asignación de médicos y licenciados en el área de Imagenología, distinguiendo ambos casos debido a sus diferencias operativas, contractuales y funcionales.

3.1. Descripción de la institución

COMEPA es una institución de salud uruguaya con sede central en Paysandú, dedicada a la prestación de servicios médicos integrales a través de una amplia red de atención. Como parte del sistema de asociaciones médicas colectivas de Uruguay, COMEPA ofrece atención especializada, medicina asistencial, internación y servicios de alta complejidad con una infraestructura tecnológica moderna y un equipo profesional altamente capacitado en diversas áreas de la medicina [22]. La entidad no solo cuenta con un sanatorio central y múltiples policlínicas distribuidas en el territorio, sino que también ha desarrollado servicios complementarios como asistencia domiciliaria, cobertura de emergencias y cuidados continuos, con el objetivo de acercar la atención médica a la comunidad y garantizar un seguimiento integral de sus afiliados. Además, COMEPA ha participado en iniciativas de ampliación de servicios a nivel regional, como la incorporación de tecnología de radioterapia avanzada en conjunto con otras organizaciones de salud, lo que contribuye a descentralizar la atención oncológica en el norte del país [22].

3.1.1. Área de Imagenología

Tal como se señaló en la Sección 2.1, la Imagenología constituye un área de apoyo diagnóstico de especial relevancia dentro de los sistemas de salud. En el caso de COMEPA, su funcionamiento involucra la participación de médicos y licenciados en Imagenología, quienes intervienen en la ejecución e interpretación de los estudios según el tipo de prestación realizada.

El servicio brinda distintas prestaciones, entre las que se incluyen radiología convencional, tomografía computada, mamografía, densitometría ósea y cobertura de estudios en block quirúrgico. Esta variedad de estudios implica requerimientos operativos diferentes, tanto en términos de equipamiento como de personal capacitado para su realización. Desde el punto de vista organizacional, se trata de un área con una operativa heterogénea, ya que conviven actividades programadas con otras asociadas a la atención de demanda hospitalaria y apoyo a procedimientos quirúrgicos. Esta característica genera la necesidad de coordinar adecuadamente los recursos humanos disponibles, especialmente en lo que respecta a la cobertura de turnos y a la asignación del personal según las tareas a desempeñar.

3.2. Descripción del problema

Como se describió en la Sección 2.2, la asignación de personal en el tiempo constituye un problema que, en el ámbito de la salud, implica compatibilizar la cobertura de la demanda asistencial con diversas restricciones operativas y laborales. En el caso del área de Imagenología de COMEPA, este problema se manifiesta en la necesidad de asignar adecuadamente los recursos humanos a los distintos turnos de trabajo, de forma de asegurar el funcionamiento del servicio y cumplir con los contratos. No obstante, el problema no se presenta de manera homogénea para todo el personal involucrado. En particular, la asignación de médicos y la de licenciados en Imagenología responden a lógicas distintas, ya que difieren tanto las tareas desempeñadas como las restricciones y el nivel de complejidad asociados a cada colectivo. Por esta razón, en las subsecciones siguientes se describen por separado las particularidades de ambos casos, que constituyen la base para la formulación de los modelos desarrollados en este trabajo. Antes de describir cada caso en particular, resulta conveniente señalar que en este trabajo el problema de asignación se aborda bajo un enfoque determinístico. Esto supone que, al momento de realizar la planificación, se conocen los datos necesarios para la construcción de los cronogramas, tales como la demanda a cubrir, la disponibilidad del personal y las principales restricciones operativas y laborales.

3.2.1. Médicos

En primer lugar, se analiza la situación correspondiente a los médicos, cuya asignación presenta particularidades asociadas tanto a la coexistencia de distintos tipos de actividades, como a las condiciones contractuales y operativas del servicio.

Los médicos desarrollan dos tipos de actividades principales: policlínicas y guardias. En el marco de este estudio, se considera que los médicos realizarán trabajos de tomografía en las policlínicas, y tomografía y ecografía en las guardias. Las policlínicas, funcionan de lunes a viernes de 8:00 a 22:00, organizadas en un máximo de cuatro turnos, tres de cuatro horas: 8:00-12:00, 12:00-16:00, 16:00-20:00 y uno extra de 20:00 a 22:00. Al principio del mes y previo a la asignación se tiene información de la cantidad de policlínicas a realizar (de aquí en adelante llamado demanda), dado que no necesariamente se deben realizar todos los turnos posibles en un día dado. La atención en policlínica se brinda únicamente mediante citas previamente coordinadas. En el caso de las guardias, estas funcionan bajo la modalidad de retén, con una duración de 24 horas. Sin embargo, dado que por contrato los médicos pueden tener que cubrir, por ejemplo, 6,5 guardias al mes, en algunos casos la cobertura se divide en dos turnos: de 8:00 a 20:00 y de 20:00 a 8:00. Su propósito es la atención de pacientes que se presentan de urgencia, sin cita previa. A diferencia de las policlínicas, donde la atención se brinda en horarios definidos, las guardias constituyen un servicio esencial que debe mantenerse operativo en forma ininterrumpida.

Por contrato, los médicos deben cumplir mensualmente una carga mínima de horas tanto en policlínica como en guardias, a excepción de un grupo de médicos jubilados los cuales están exentos de estas guardias. Dicha carga se establece tomando como referencia el mes con menor cantidad de días, lo que ocasiona días libres en meses más extensos. Sin embargo, para garantizar la cobertura total del servicio en todos los meses, no basta con distribuir los turnos únicamente entre los médicos contratados.

En la práctica es necesario recurrir a médicos suplentes o, en última instancia, asignar horas adicionales a los médicos titulares, remuneradas como horas extra. Se considera hora extra cuando un profesional supera las horas contratadas mensuales. Al momento de realizar la planificación, se prioriza la asignación de médicos suplentes por sobre la asignación de horas adicionales a médicos fijos, dado que el costo por hora de los suplentes es inferior al valor de la hora extra del personal fijo. Esto permite un uso más eficiente de los recursos y evitar sobrecargas innecesarias. A su vez, se procura que un médico que ya tenga más de un turno de policlínica asignado en un mismo día no cubra guardias, ya que esta combinación podría afectar el procesamiento adecuado de la información clínica y, en consecuencia, la calidad del servicio. En esta misma línea se procura limitar la cantidad de turnos de guardias asignados a un médico en una ventana de días. En este contexto, la calidad del servicio se entiende como la capacidad de asegurar un servicio continuo sin comprometer el desempeño del personal ni la atención a los pacientes.

Actualmente, la asignación de guardias se lleva a cabo de manera manual, un proceso que puede demandar varios días de análisis con el objetivo de encontrar la mejor forma de cubrir todos los turnos. En este procedimiento no se consideran explícitamente las preferencias individuales de los médicos ni la calidad del servicio a brindar. En general, la elección de los turnos se efectúa una sola vez, al iniciar la actividad laboral en COMEPA. Cuando se libera un turno de guardia (ya sea por jubilación, renuncia o decisión de cambio) los médicos con mayor antigüedad tienen preferencia para decidir si quieren tomar ese turno que se liberó o no. Por ejemplo, si existen tres médicos A, B y C, y el médico A deja su turno de guardia por jubilación, el médico B, por contar con mayor antigüedad que C, tiene preferencia para tomarlo. Si B decide asumirlo, entonces C puede optar por ocupar el turno que B deja libre. De esta manera, los turnos de guardia se van heredando según el orden de antigüedad. Esto refleja que la asignación de guardias no se modifica mes a mes, sino que permanece estática salvo que se produzcan cambios como los mencionados anteriormente.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se concluye que la lógica actual de asignación presenta diversas limitaciones. Por un lado, no se consideran explícitamente ni la calidad del servicio ni las preferencias individuales de los médicos, ya que los turnos se heredan o se asignan al profesional disponible sin contemplar sus días de mayor conveniencia o su frecuencia de descanso. Por otro lado, el proceso manual de elaboración de los cronogramas es sumamente demandante, pudiendo extenderse durante varios días y generando una distribución que no necesariamente resulta eficiente. Estas dificultades evidencian la necesidad de contar con una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para buscar una asignación, que permita cubrir todos los turnos garantizando tanto la continuidad del servicio médico como el bienestar del personal al menor costo posible.

3.2.2. Licenciados

En segundo lugar, se analiza el caso de los licenciados en Imagenología, cuya asignación presenta un mayor nivel de complejidad debido a la diversidad de actividades, restricciones operativas y competencias técnicas involucradas. Los licenciados en Imagenología desarrollan tres tipos de actividades: policlínicas, guardias internas y guardias retén. En estas, las tareas asignadas dependen de la técnica de Imagenología que maneje cada profesional, buscando asignar a cada licenciado en su especialidad más hábil. Todas

estas actividades se organizan en turnos. Las policlínicas se dividen en tres turnos diarios entre las 8:00 y las 20:00, donde se atiende a pacientes con citas previamente agendadas. Al igual que en el caso de los médicos, al inicio de cada mes y previo a la asignación, se dispone de un esquema de la cantidad de policlínicas a realizar, dado que no necesariamente se cubren todos los turnos posibles en un mismo día. Las guardias internas se distribuyen en dos turnos diarios, de 8:00 a 16:00 y de 16:00 a 24:00, y están destinadas principalmente a la atención de urgencias. Finalmente, de 00:00 a 8:00 se cubren las guardias retén.

El equipo de licenciados en Imagenología está integrado por personal efectivo y suplente. Los efectivos, por contrato, deben cumplir exactamente 80 horas mensuales; cualquier exceso se remunera como hora extra. Para efectos de cálculo, se establece que 1,6 horas de guardia retén equivalen a 1 hora de policlínica o de guardia interna. Para no exceder la carga horaria establecida por contrato, cada licenciado puede disponer de hasta tres días libres al mes, según la duración del mismo. Por ejemplo, en un mes con 22 días laborales, si cada jornada implica un turno de 4 horas, trabajar todos los días supondría un total de 88 horas mensuales, es decir, 8 horas por encima del límite contractual. En este caso, a cada licenciado le corresponden dos días libres para no superar las 80 horas fijadas en el contrato. En contraste, el personal suplente no tiene restricciones de carga horaria: puede no trabajar en un mes o, por el contrario, cubrir un volumen de horas muy superior a las 80 estipuladas para los efectivos.

En cuanto a la calidad del servicio, se establece que cada licenciado puede realizar como máximo un turno de policlínica por día, pudiendo excepcionalmente asumir dos. Se procura evitar asignaciones de guardia en días en que ya tienen policlínica, dado que esto generaría costos por horas extra, independientemente de que las horas totales del mes se ajusten a lo contractual. Por lo tanto, no es posible asignar guardias en días donde ya se cumple policlínica. De manera similar a médicos, se restringe la cantidad de turnos de guardias asignados a un licenciado en una ventana de días.

A diferencia de lo que ocurre con los médicos, al final de cada mes los licenciados declaran los días en los que no desean o no pueden ser asignados el próximo mes. Para ello, señalan los días en los que no están disponibles, donde estas preferencias son tomadas como sugerencias y pueden o no ser respetadas por la encargada de la asignación. Por este motivo, la asignación debe realizarse mensualmente, ya que las preferencias de disponibilidad del personal cambian de un mes a otro.

Al igual que para el caso de los médicos, actualmente la asignación de personal se realiza de forma manual, y debido a que esta asignación tiene en cuenta mayores restricciones y se debe asignar una cantidad mayor de personal, es una tarea que conlleva varios días. El criterio principal aplicado en la práctica es cubrir la totalidad de la demanda, mientras que se intenta reducir las horas extra. No obstante, este enfoque presenta limitaciones: las preferencias de disponibilidad son difíciles de tener en cuenta y la asignación final no siempre garantiza un uso eficiente ni equitativo de los recursos.

4. Modelos para asignación de turnos

En esta sección se desarrollan los modelos matemáticos asociados al problema de asignación de turnos descrito en la Sección 3.2, con el objetivo de construir una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la planificación del personal en el área de Imagenología de COMEPA. Para abordar este problema, se formularon dos modelos de programación lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés).

El caso de COMEPA pertenece a los problemas de asignación de salud presentados en la Sección 2.2. No obstante, tal como se describió en la Sección 3.2, el caso de estudio presenta particularidades operativas, contractuales y organizacionales que requieren una formulación específica. En este sentido, los modelos propuestos buscan traducir dichas condiciones a una estructura formal de programación matemática, de modo de obtener cronogramas factibles que permitan cubrir la totalidad de los turnos requeridos, respetando las restricciones vigentes y aportando una base objetiva para el proceso de planificación mensual.

Dado que el problema se manifiesta de manera diferenciada para médicos y licenciados, se plantean dos formulaciones matemáticas. Si bien ambas comparten una estructura general similar, el modelo de licenciados incorpora factores adicionales asociados a la mayor diversidad de actividades y a las restricciones operativas específicas de este rol. A su vez, aunque los modelos fueron desarrollados a partir del caso particular de COMEPA, se entiende que su formulación presenta un grado de generalidad que permitiría su adaptación a otros problemas de asignación de personal en diferentes áreas o incluso en otras instituciones de salud con características similares.

4.1. Formulación de los Modelos Matemáticos

En esta sección se presentan los modelos MILP para médicos y licenciados, con sus respectivos conjuntos, variables, restricciones y objetivos. Las decisiones de los modelos corresponden a la asignación de personal a turnos en un determinado horizonte temporal buscando satisfacer restricciones operativas y contractuales, incorporando además criterios de preferencias y estabilidad mediante funciones objetivo específicas.

Los siguientes modelos consideran algunos supuestos específicos para su elaboración. Algunos de estos son comunes para médicos y licenciados. En particular, los datos de entrada vinculados a la asignación: horizonte temporal, demanda y cantidad de personas; y los vinculados al personal: disponibilidad del personal, condiciones contractuales, preferencias del personal son discretos y conocidos previo a la asignación. Adicionalmente, las preferencias son individuales y sobre cada combinación día-turno existente y demandado. El alcance de los modelos es planificar la asignación, teniendo en cuenta que los turnos son ventanas horarias fijas y que se necesita una persona por cada uno, sin considerar contingencias que ocurren durante el horizonte de trabajo. En cuanto al criterio de estabilidad, este se mide comparando las asignaciones de dos semanas consecutivas. Así, una asignación se considera totalmente estable cuando no presenta cambios entre una semana y la siguiente. Las horas contratadas y las guardias del personal fijo deben ajustarse proporcionalmente cuando estos no estén disponibles por licencias en el mes. De esta forma, si en un período de A días un médico fijo no se encuentra disponible durante B días, la cantidad de guardias y las horas contratadas se ajustan en forma proporcional según su disponibilidad efectiva, es decir, considerando

la fracción $(A - B)/A$ del período total.

Algunos supuestos son específicos al modelo de médicos. En primer lugar, el personal médico puede clasificarse en tres grupos: médicos fijos que realizan policlínica y guardias, médicos fijos jubilados que solo realizan policlínica y médicos suplentes, que pueden realizar tanto policlínica como guardias. En segundo lugar, las horas extra se computan solo para los médicos fijos en los turnos de policlínica.

Por otro lado, algunos supuestos aplican únicamente al modelo de licenciados. En primer lugar, el grupo de licenciados se puede clasificar en licenciados fijos y suplentes. En segundo lugar, las horas extra se computan solo para los licenciados fijos en todas las actividades. En tercer lugar, se conoce que especialidades domina y que nivel de habilidad tiene cada licenciado, y se asume que estos permanecen constantes durante el horizonte. En cuarto lugar, los licenciados solo pueden ser asignados a especialidades para las que están capacitados y no pueden cubrir más de una especialidad en un mismo día y turno. Por último, la calidad del servicio se aproxima mediante el nivel de habilidad de cada licenciado en las distintas especialidades que domina, representado mediante un ranking. Para cada combinación licenciado–especialidad que domina se asigna un valor numérico, donde un menor valor indica un mayor dominio. Por ejemplo, si para un determinado licenciado el ranking es 1 en tomografía, 2 en radiología y 4 en mamografía, entonces asignarlo a tomografía representa una mejor contribución a la calidad del servicio que asignarlo a mamografía.

4.1.1. Modelo para médicos

En esta sección se procede a definir los distintos componentes del MILP para la asignación de médicos, comenzando con los conjuntos y parámetros a utilizar, luego se definirán las variables de decisión ,y por último, presentar la formulación matemática.

El objetivo del modelo es obtener la asignación óptima que permita cumplir totalmente la demanda planificada del horizonte temporal utilizando el personal fijo y suplente disponible. Esto es, definir qué persona trabaja en cada par día-turno, considerando tanto criterios de eficiencia operativa como aspectos orientados al bienestar del personal.

CONJUNTOS

M_{FG} : Conjunto de médicos fijos que realizan policlínicas y guardias, con $|M_{FG}| = FG$.

M_{FJ} : Conjunto de médicos fijos que están jubilados, con $|M_{FJ}| = FJ$.

M_F : $M_F = M_{FG} \cup M_{FJ}$. Conjunto de todos los médicos fijos disponibles para trabajar.

M_S : Conjunto de médicos suplentes, con $|M_S| = S$

M : $M = M_F \cup M_S$. Conjunto de todos los médicos disponibles para trabajar, con subíndice i .

D : Conjunto de días del mes, con subíndice d . Este conjunto define el horizonte temporal del cronograma, con $|D| = DM$.

T_G : Conjunto de turnos de guardia que pueden haber en un día laboral, con $|T_G| = G$.

T_P : Conjunto de turnos de policlínicas que pueden haber en un día laboral, con $|T_P| = P$.

T : $T = T_G \cup T_P$. Conjunto de todos los turnos a asignar, con subíndice t .

PARÁMETROS

DM : cantidad total de días correspondientes al horizonte temporal del cronograma.

G : Cantidad total de turnos de guardias por día.

P : Cantidad total de turnos de policlínicas por día.

FG : Cantidad de médicos fijos disponibles para asignar a policlínicas y guardias.

FJ : Cantidad de médicos fijos jubilados disponibles para asignar a policlínicas únicamente.

S : Cantidad de médicos suplentes disponibles para asignar a policlínicas y guardias.

q_{dt} : Demanda de turnos $t \in T$ para cada día $d \in D$ del horizonte temporal. Toma valor 1 si el día $d \in D$ se trabaja el turno $t \in T$ y 0 en caso contrario.

$pref_{idt}$: Preferencia de cada médico a trabajar en el día $d \in D$ el turno $t \in T$. Toma valor 1 si el médico $i \in M_F$ prefiere trabajar el día $d \in D$ y 0 en caso contrario.

h_t : Duración en horas de cada turno $t \in T$.

C_i : Cantidad de guardias contratadas que un médico $i \in M_{FG}$ debe realizar en el horizonte temporal seleccionado.

K_i : Cantidad de horas de policlínica contratadas que un médico $i \in M_F$ debe realizar en el horizonte temporal seleccionado.

A : Ventana de días donde se limita la cantidad de turnos máximos de guardias a realizar.

TC : Cantidad máxima de turnos continuos de guardia a realizar dentro de un lapso de A días.

CD : Máxima carga diaria en turnos para cada uno de los médicos en un día.

sem : Cantidad de días que definen una semana, utilizado como ciclo base para la determinación de la estabilidad.

dis_{id} : Disponibilidad del médico $i \in M$ en el día $d \in D$ para trabajar, donde 1 indica que el médico se encuentra disponible y 0 que no lo está.

VARIABLES DE DECISIÓN

x_{idt} : Toma valor 1 si el médico $i \in M$ es asignado el día $d \in D$, el turno $t \in T$ y 0 en caso contrario.

α_i : Cantidad de horas extra de policlínica que realiza cada médico $i \in M$ en el horizonte de planificación.

β_{idt} : Cantidad de quiebres de estabilidad semana a semana. Toma valor 0 si el médico $i \in M$ es asignado en el turno $t \in T$ los días $d \in D$ y $(d + sem) \in D$, y 1 en caso contrario.

μ_{idt} : Variable auxiliar (o de acarreo) que toma valor 1 si el médico $i \in M$ es asignado al turno $t \in T$ los días $d \in D$ y $(d + sem) \in D$, 0 en caso contrario.

w_{idt} : Cantidad de preferencias no cumplidas de los médicos. Toma valor 1 en caso de que no se cumplan las preferencias del médico $i \in MF$ para trabajar el turno $t \in T$ del día $d \in D$ y 0 en caso contrario.

λ_{idt} : Variable auxiliar (o de acarreo) que toma valor 1 cuando el médico $i \in MF$ tomo como preferencia trabajar el turno $t \in T$ del día $d \in D$ y fue asignado para trabajar, 0 en caso contrario.

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

$$\text{mín} \sum_{i \in MF} \alpha_i \quad (9)$$

$$\text{mín} \sum_{i \in MF} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} w_{idt} \quad (10)$$

$$\text{mín} \sum_{i \in MF} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \beta_{idt} \quad (11)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in M} x_{idt} = q_{dt}, \quad \forall t \in T, d \in D \quad (12)$$

$$\sum_{d \in \{j, \dots, j+A\}} \sum_{t \in T_G} x_{idt} \leq TC, \quad \forall j \in \{1, \dots, (DM - A)\}, i \in M \quad (13)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_G} x_{idt} = 0, \quad \forall i \in MFJ \quad (14)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_G} x_{idt} = c_i, \quad \forall i \in MFG \quad (15)$$

$$\sum_{t \in T} x_{idt} \leq CD \times dis_{id}, \quad \forall d \in D, i \in M \quad (16)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_P} h_t \times x_{idt} = k_i + \alpha_i, \quad \forall i \in MF \quad (17)$$

$$q_{dt} \times pref_{idt} + x_{idt} = 2\lambda_{idt} + w_{idt}, \quad \forall i \in MF, d \in D, t \in T \quad (18)$$

$$x_{idt} + x_{i(d+sem)t} = 2\mu_{idt} + \beta_{idt}, \quad \forall i \in MF, d \in \{1, \dots, (DM - sem)\}, t \in T \quad (19)$$

$$\alpha_i \geq 0, \quad \forall i \in MF \quad (20)$$

$$x_{idt}, w_{idt}, \beta_{idt}, \mu_{idt}, \lambda_{idt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in MF, d \in D, t \in T \quad (21)$$

Se definen tres funciones objetivo: (9) que busca minimizar la cantidad de horas extra que realizan los médicos fijos en el horizonte temporal, (10) que busca minimizar las preferencias no cumplidas en el horizonte temporal y (11) tiene por finalidad minimizar la inestabilidad del cronograma. A estos dos últimos los denominaremos en algunos casos como objetivo de preferencias y objetivo de estabilidad.

La familia de restricciones (12) asegura la cobertura de la demanda. Las restricciones (13) establecen el límite de turnos de guardia que un médico puede realizar dentro del horizonte temporal de A días, evitando afectar negativamente la calidad de la atención brindada. Las restricciones (14) aseguran que los médicos pertenecientes al conjunto $M_{F,J}$ no sean asignados a turnos de guardia $t \in T_G$, mientras que las restricciones (15) establecen la carga mensual de guardias de los médicos fijos habilitados para realizarlas. Las restricciones (16) limitan la máxima carga diaria de trabajo por médico. Esta familia de restricciones contempla, además, la disponibilidad diaria del médico. En caso de no disponibilidad durante parte del horizonte de planificación, los parámetros de horas y guardias contratadas se ajustan proporcionalmente a los días efectivamente trabajados. Las restricciones (17) son para calcular las horas extra realizadas por cada médico $i \in M_F$, en función de las horas contratadas k_i en el horizonte de planificación. En (18) y (19) se busca el cumplimiento de las preferencias y la estabilidad del cronograma respectivamente, con un formato del tipo XOR. Esto contabiliza los casos de no coincidencia en w_{idt} y β_{idt} , como por ejemplo se prefiere trabajar y no se trabaja (1 y 0), y su opuesto, se prefiere no trabajar y se trabaja (0 y 1). Las restricciones (20) y (21) son para definir el dominio de las variables de decisión.

Cabe señalar que la formulación propuesta combina restricciones tomadas y adaptadas de la literatura, más otras definidas específicamente para representar las particularidades del caso de estudio. En particular, las restricciones de cobertura de la demanda (12), de límite de turnos de guardia dentro de una ventana temporal (13) y la componente de carga diaria de trabajo (16) se apoyan en formulaciones presentes en [23], quienes modelan un problema real de programación de médicos en sala de urgencia. Por su parte, la componente de disponibilidad diaria considerada en la restricción (16) fue tomada como referencia de trabajos como [24] y [25], donde la disponibilidad del personal constituye una condición explícita de asignación. Por otra parte, las restricciones vinculadas a la carga contractual y al cómputo de horas trabajadas (17) fueron formuladas a partir de antecedentes de la literatura y luego adaptadas a las características específicas del problema abordado. En cambio, la restricción (14), que impide asignar turnos de guardia a médicos jubilados, surge directamente de la realidad operativa de la institución. Finalmente, las restricciones asociadas a las preferencias del personal (18) y a la estabilidad del cronograma (19) fueron desarrolladas específicamente en el marco de este trabajo.

4.1.2. Modelo para licenciados

A continuación, se presenta la formulación del MILP para la asignación de turnos de licenciados. Cabe señalar que el modelo de asignación de licenciados se construyó tomando como base la formulación desarrollada para el caso de médicos, dado que ambos problemas comparten una lógica general de cobertura, carga de trabajo y organización temporal. En consecuencia, varias de las restricciones ya introducidas en dicho modelo fueron retomadas en esta formulación, aunque debieron ser reformuladas para incorporar la dimensión de especialidad y las particularidades operativas de los licenciados. Si bien la estructura general del modelo es análoga a la desarrollada para médicos (definición de conjuntos y parámetros, variables de decisión, restricciones y funciones objetivo), en este caso se incorporan particularidades operativas propias del rol, principalmente asociadas a la necesidad de contemplar las habilidades de los licenciados por tipo de tarea (especialidad). Estas diferencias introducen cambios en los conjuntos, parámetros y las variables. En consecuencia, se realizan ajustes en las restricciones y funciones objetivo.

OBJETIVO

El objetivo del modelo es lograr la asignación del personal fijo y suplente que permita cumplir totalmente la demanda planificada del horizonte temporal. Esto es, definir qué persona trabaja en cada trío día-turno-especialidad, teniendo en cuenta criterios de eficiencia operativa así como aspectos que velan por el bienestar del personal.

CONJUNTOS

L_F : Conjunto de licenciados fijos, con $|L_F| = F$.

L_S : Conjunto de licenciados suplentes, con $|L_S| = S$.

L : $L = L_F \cup L_S$. Conjunto de todos los licenciados disponibles para trabajar, con subíndice i .

D : Conjunto de días del mes, con subíndice d . Este conjunto define el horizonte temporal del cronograma, con $|D| = DM$.

T_P : Conjunto de turnos de policlínicas que pueden haber en un día laboral, con $|T_P| = P$.

T_{GI} : Conjunto de turnos de guardia interna que pueden haber en un día laboral, con $|T_{GI}| = GI$.

T_{GR} : Conjunto de turnos de guardia retén que pueden haber en un día laboral, con $|T_{GR}| = GR$.

T : $T = T_P \cup T_{GI} \cup T_{GR}$. Conjunto de todos los turnos a asignar, con subíndice t .

E : conjunto de la totalidad de especialidades que son realizadas en el área, con subíndice e , donde $|E| = ESP$.

PARÁMETROS

DM : cantidad de días correspondientes al horizonte temporal del cronograma.

P : Cantidad total de turnos de policlínica por día.

GI : Cantidad total de turnos de guardia interna por día.

GR : Cantidad total de turnos de guardia retén por día.

F : Cantidad de licenciados fijos disponibles para asignar.

S : Cantidad de licenciados suplentes disponibles para asignar.

ESP : Cantidad total de especialidades que se realizan.

q_{dte} : Demanda de turnos $t \in T$ de cada especialidad $e \in E$ para cada día $d \in D$ del horizonte temporal. Toma valor 1 si el día $d \in D$ se trabaja el turno $t \in T$ para la especialidad $e \in E$ y 0 si no.

$pref_{idt}$: Preferencia de cada licenciados trabajar en el día $d \in D$ el turno $t \in T$. Toma valor 1 si el licenciado $i \in L_F$ prefiere trabajar el día $d \in D$ y 0 en caso contrario.

h_t : Duración en horas de cada turno $t \in T$.

K_i : Cantidad de horas mínimas que un licenciado fijo $i \in L_F$ debe realizar en el horizonte temporal seleccionado.

A : Ventana de días donde se limita la cantidad de turnos máximos de guardias a realizar.

TC : Cantidad máxima de turnos continuos de guardia a realizar dentro de un lapso de A días.

CD : Máxima carga diaria en turnos para cada uno de los licenciados en un día.

sem : Cantidad de días que definen una semana, utilizado como ciclo base para la determinación de la estabilidad.

R_{ie} : Especialidades $e \in E$ que está capacitado cada licenciado $i \in L$ a hacer. Toma valor 1 si el licenciado está capacitado en cierta especialidad $e \in E$, 0 sino.

H_{ie} : Entero positivo que representa el ranking de habilidad del licenciado $i \in L$ a realizar la especialidad $e \in E$. Se asigna $H_{ie} = 1$ a la especialidad en la que el licenciado es más competente; valores mayores indican menor nivel relativo de habilidad.

dis_{id} : Disponibilidad del licenciado $i \in L$, en el día $d \in D$ para trabajar, donde 1 indica que el médico se encuentra disponible y 0 que no lo está.

VARIABLES DE DECISIÓN

x_{idte} : Toma valor 1 si el licenciado $i \in L$ es asignado $d \in D$ al turno $t \in T$ de la especialidad $e \in E$; 0 en caso contrario.

α_i : Cantidad de horas extra que realiza cada licenciado $i \in L$ en el horizonte de planificación.

β_{idte} : Cantidad de quiebres de estabilidad semana a semana. Toma valor 0 si el licenciado $i \in L_F$ es asignado al turno $t \in T$ de la especialidad $e \in E$ los días $d \in D$ y $(d+sem) \in D$, 1 en caso contrario.

μ_{idte} : Variable auxiliar (o de acarreo) que toma valor 1 si el licenciado $i \in L_F$ es asignado al turno $t \in T$ de cierta especialidad $e \in E$ los días $d \in D$ y $(d + sem) \in D$, 0 en caso contrario.

w_{idt} : Cantidad de preferencias no cumplidas de los médicos. Toma valor 1 en caso de que no se cumplan las preferencias del licenciado $i \in L_F$, en el turno $t \in T$ del día $d \in D$ y 0 en caso contrario.

λ_{idt} : Variable auxiliar (o de acarreo) que toma valor 1 cuando el licenciado $i \in L_F$ tomo como preferencia trabajar el turno $t \in T$ del día $d \in D$ y fue asignado para trabajar, 0 en caso contrario.

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

$$\text{mín} \sum_{i \in L_F} \alpha_i \quad (22)$$

$$\text{mín} \sum_{i \in L_F} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} w_{idt} \quad (23)$$

$$\text{mín} \sum_{i \in L_F} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} \beta_{idte} \quad (24)$$

$$\text{mín} \sum_{i \in L} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} H_{ie} \times x_{idte} \quad (25)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in L} x_{idte} = q_{dte}, \quad \forall t \in T, d \in D, e \in E \quad (26)$$

$$x_{idte} \leq R_{ie}, \quad \forall i \in L, d \in D, t \in T, e \in E \quad (27)$$

$$\sum_{e \in E} x_{idte} \leq 1, \quad \forall i \in L, d \in D, t \in T \quad (28)$$

$$\sum_{d \in \{j, \dots, j+A\}} \sum_{t \in T_{GR}} \sum_{e \in E} x_{idte} \leq TC, \quad \forall j \in \{1, \dots, (DM - A)\}, i \in L \quad (29)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{e \in E} x_{idte} \leq CD \times dis_{id}, \quad \forall d \in D, i \in L \quad (30)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} h_t \times x_{idte} = K_i + \alpha_i, \quad \forall i \in L_F \quad (31)$$

$$pre f_{idt} + \sum_{e \in E} x_{idte} = 2\lambda_{idt} + w_{idt}, \quad \forall i \in L_F, d \in D, t \in T \quad (32)$$

$$x_{idte} + x_{i,(d+sem),t,e} = 2\mu_{idte} + \beta_{idte}, \quad \forall i \in L_F, d \in \{1, \dots, (DM - sem)\}, t \in T, e \in E \quad (33)$$

$$\alpha_i \geq 0, \quad \forall i \in L_F \quad (34)$$

$$x_{idte}, w_{idt}, \beta_{idte}, \lambda_{idt}, \mu_{idte} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in L, d \in D, t \in T, e \in E \quad (35)$$

Las funciones objetivo (22), (23) y (24) tienen la misma lógica que las definidas previamente para el modelo de asignación de médicos. En particular del modelo de licenciados, se incorpora además la función objetivo (25), orientada a maximizar la calidad del servicio. Dado que el parámetro de habilidad por especialidad fue definido de modo que valores menores representan una mayor idoneidad, esta maximización se formula matemáticamente como la minimización del valor de la función objetivo.

La familia de restricciones (26) corresponde a la cobertura de la demanda para todas las especialidades $e \in E$. En (27) se busca asegurar que solo se asignen licenciados que están capacitados para realizar esa especialidad. Alineado con lo anterior, las restricciones (28) aseguran que ningún licenciado sea asignado a más de una actividad en simultáneo. En (29) se limita la cantidad de turnos de guardia retén que un licenciado puede realizar. Al igual que médicos, las restricciones (30) definen la máxima carga diaria de trabajo por licenciado, contemplando la disponibilidad diaria del médico. Las restricciones (31) permiten calcular las horas extra realizadas por cada licenciado $i \in L_F$. Las restricciones (32) siguen el mismo formato XOR que se presenta en médicos y contabilizan las no coincidencias. Las restricciones (33) permiten identificar si un licenciado $i \in L_F$ mantiene el mismo turno $t \in T$ de una semana a la siguiente, pero verificando también la especialidad $e \in E$ que realiza. Las restricciones (34) y (35) son para definir el dominio de las variables de decisión.

En cuanto a su sustento en la literatura, la restricción de cobertura de la demanda (26) se apoyó en la estructura general de asignación presentada en [25], aunque en este trabajo fue adaptada para contemplar explícitamente la cobertura por especialidad. Por su parte, la restricción de no simultaneidad de asignaciones (28) se formuló en línea con [26], donde se establece que cada médico puede atender como máximo un tipo de clínica por bloque de tiempo. Las restantes restricciones comunes a ambos modelos, como los límites de carga laboral, horas trabajadas, preferencias del personal y estabilidad del cronograma retoman la lógica ya utilizada en el modelo de médicos y fueron modificadas para el caso de los licenciados.

4.2. Implementación de los modelos

Se resolvieron los modelos formulados en AMPL mediante el solver Gurobi 12.0.3, empleando la parametrización correspondiente para cada caso. Las ejecuciones se realizaron en una computadora Lenovo Slim 7 con procesador Intel Core i7-1260P y 16 GB de memoria RAM.

Como regla general de ejecución, se ejecuta hasta alcanzar una solución óptima o alcanzar las 12 horas de ejecución. En los casos donde fue necesario interrumpir la ejecución se presenta el GAP de optimalidad obtenido. El GAP utilizado es el relative MIP GAP, que hace referencia a la distancia entre la solución obtenida y una cota teórica de la solución óptima. Para el análisis de resultados, se toman como valores satisfactorios de GAP a aquellos entre 0-5 %, como valores aceptables aquellas soluciones que tienen un GAP en el rango 5-10 % y como valores regulares aquellos entre 10 % y 20 %.

4.3. Validación de los modelos

Una vez construidos los modelos propuestos, se procedió a su validación. El objetivo de esta sección es comprobar que ambos se comporten de manera consistente con la lógica del problema y con las condiciones operativas que se pretende representar. Para esto, tanto para médicos como licenciados, se partió de un conjunto de datos y se generaron variaciones en los parámetros, con el fin de evaluar particularidades del problema y situaciones límite. Asimismo, para cada caso de validación, los modelos se ejecutaron considerando cada una de las funciones objetivo definidas por separado, lo que permitió analizar la incidencia de cada objetivo en la solución. En los casos de validación presentados, los tiempos de ejecución no superaron los 5 minutos.

Previo a su ejecución, los casos de prueba se organizaron de forma creciente en función de la cantidad de parámetros modificados respecto al conjunto de datos inicial. El procedimiento de validación consistió en ejecutar cada caso y analizar los resultados obtenidos. Cuando se detectaban inconsistencias, se realizaban las correcciones necesarias en el modelo y se reiniciaba el proceso de prueba considerando los ajustes incorporados. Esta lógica se repitió hasta completar el último caso sin que fuera necesario efectuar nuevas modificaciones.

Para facilitar la interpretación de los resultados, los objetivos de preferencias no cumplidas, inestabilidad en la asignación y calidad de servicio se expresan en términos porcentuales. Para ello, en cada caso se define un valor de referencia que permite normalizar el valor obtenido en la solución.

En el caso de las preferencias, el valor de referencia se calcula como el producto entre la cantidad de días del horizonte de planificación, la cantidad de funcionarios fijos y la cantidad de turnos:

$$N_{pref} = \text{card}(d) \text{ card}(i) \text{ card}(t) \quad (36)$$

De este modo, el porcentaje de preferencias no cumplidas se obtiene dividiendo el valor de la función objetivo correspondiente entre dicho valor de referencia.

De manera análoga, para la inestabilidad se define un valor de referencia que considera únicamente los días en los que es posible evaluar estabilidad, multiplicados por la cantidad

de funcionarios fijos y de turnos:

$$Nest = (DM - sem) \text{ card}(i) \text{ card}(t) \quad (37)$$

Por lo tanto, el porcentaje de inestabilidad se obtiene dividiendo la cantidad de asignaciones inestables observadas en la solución entre este valor de referencia. En ambos casos, estos indicadores se calculan únicamente sobre el personal fijo.

Adicionalmente, en el modelo de licenciados se incorpora un indicador porcentual de calidad de servicio, construido a partir del ranking de habilidades de los licenciados para cada especialidad:

$$Ncal(\%) = 100 \times \frac{Hmax - H}{Hmax - 1} \quad (38)$$

donde $Hmax$ representa el peor ranking presente en la matriz de habilidades H_{ie} y H representa el ranking promedio de habilidad de las asignaciones realizadas, calculado como los puntos de habilidad obtenidos sobre la demanda total:

$$H = \frac{\sum_{i \in L} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} H_{ie} x_{idte}}{\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} q_{dte}} \quad (39)$$

Es importante mencionar que la totalidad de las pruebas de validación se encuentran en el Apéndice 2. A continuación, se presentarán para cada modelo, los casos de validación más representativos de los mismos.

4.3.1. Validación del modelo de médicos

En esta sección se presentan algunos de los casos de prueba utilizados para validar el modelo para médicos. Estos son:

- Preferencia de todos los médicos por no trabajar en ningún turno.
- Preferencia de todos los médicos por trabajar en todos los turnos.
- Horas contratadas de policlínica superiores a la capacidad de asignación.
- Reducción de la disponibilidad del personal médico.
 - Sin ajuste de horas contratadas.
 - Con ajuste de horas contratadas.

Como punto de partida para el análisis de los casos de validación, se define un caso de referencia, que posteriormente se utiliza como base de comparación frente a los distintos escenarios evaluados.

Caso de referencia

Se parte de un conjunto de datos construido sobre un horizonte temporal de 5 días, con 4 turnos de policlínica y 2 guardias por día, y una dotación compuesta por 2 médicos fijos, 2 médicos fijos jubilados, y 2 médicos suplentes. El detalle completo de los parámetros correspondientes se presenta en el Apéndice 2.

En la Tabla 1 se presentan los valores de los indicadores objetivo obtenidos al resolver este caso. Los valores presentados en dicha tabla, fueron calculados a partir de los resultados de las funciones objetivo y las fórmulas (36) y (37).

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Horas extra	0,00	0,83 %	25,00 %
Preferencias	4,00	0,00 %	26,39 %
Inestabilidad en la solución	0,00	17,50 %	8,33 %

Tabla 1: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para médicos en Caso de referencia.

Caso 1: Preferencia de todos los médicos por no trabajar en ningún turno

Este primer escenario representa una situación en la que el personal no manifiesta preferencias explícitas por turnos o días específicos a trabajar, y se desea validar que en consecuencia las mismas no tienen una gran influencia en la asignación cuando son todas nulas. Para esto, los datos de entrada del modelo se definen de forma tal que todas las preferencias del personal toman valor cero para la totalidad de turnos y días considerados. Por lo tanto, al optimizar el objetivo vinculado a preferencias, el modelo no cuenta con información que priorice determinados turnos sobre otros. En consecuencia, se espera que la asignación resultante quede determinada principalmente por las restricciones operativas (cobertura de demanda, disponibilidad y límite de turnos), y no por criterios de preferencia. En la Tabla 2 se presenta el único cambio en los parámetros realizado respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Preferencias	$pref_{i,d,t}$ default 0

Tabla 2: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 1 para médicos.

Resultados obtenidos

Los valores de los indicadores objetivo se presentan en la Tabla 3:

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Horas extra	0,00	14,17 %	26,39 %
Preferencias no cumplidas	4,00	14,17 %	20,83 %
Inestabilidad en la asignación	0,00	15,00 %	8,33 %

Tabla 3: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para médicos en Caso 1.

Al comparar los resultados de la Tabla 3 con los obtenidos en el caso de referencia, presentados en la Tabla 1, se observa un aumento significativo en las preferencias no cumplidas. Esto se debe a que, al eliminar las preferencias originalmente expresadas y considerar valores nulos para el parámetro $pref_{idt}$, el modelo no cuenta con asignaciones que puedan ser interpretadas como cumplimiento de preferencias. En consecuencia, al cubrir la demanda requerida, una mayor proporción de asignaciones queda contabilizada como preferencia no cumplida. Por otra parte, al comparar las soluciones obtenidas para los tres objetivos dentro de este escenario, no se observan variaciones sustanciales en el porcentaje de preferencias no cumplidas. Esto se explica porque, al partir de preferencias nulas, el margen de mejora en este objetivo es limitado y las diferencias entre soluciones se deben principalmente a cambios en la participación de suplentes en la asignación.

Este caso permitió identificar un aspecto relevante en el cálculo del indicador de preferencias: la variable λ_{idt} (utilizada para contabilizar preferencias cumplidas en las restricciones (18)) únicamente reconoce como cumplimiento aquellos casos en los que existe asignación en un turno (por ejemplo, $x_{idt} = 1$ cuando $Pref_{idt} = 1$), pero no contabiliza como cumplimiento las situaciones en las que el médico no es asignado a un turno y, simultáneamente, su preferencia era no trabajar dicho turno ($x_{idt} = 0$ cuando $Pref_{idt} = 0$). En consecuencia, el valor del objetivo vinculado a preferencias no es λ_{idt} , sino w_{idt} , que contabiliza todos los casos de no cumplimiento (por ejemplo cuando $x_{idt} = 1$ pero $Pref_{idt} = 0$).

Caso 2: Preferencia de todos los médicos por trabajar en todos los turnos

Este segundo escenario representa una situación en la que el personal manifiesta preferencias explícitas por trabajar todos los turnos y días, y se desea validar al igual que el Caso 1, que las mismas no tienen una gran influencia en la asignación cuando son todas iguales. Por ende, el parámetro de preferencias ($pref_{i,d,t}$) toma valor 1 para todas las combinaciones (i, d, t) . Dado que la función objetivo del modelo busca minimizar la cantidad de preferencias no cumplidas, se espera que este criterio no discrimine entre distintas asignaciones factibles, ya que todos los turnos resultan igualmente preferidos por el personal, sino que la asignación quede determinada exclusivamente por las restricciones operativas y laborales del modelo. En la Tabla 4 se presenta el cambio realizado respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Preferencias	$Pref_{i,d,t}$ default 1

Tabla 4: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 2 para médicos.

Resultados obtenidos

A diferencia que para el caso anterior, para este caso es pertinente observar la solución con el objetivo de minimización de preferencias no cumplidas únicamente, presentada en la Tabla 5:

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Preferencias no cumplidas	4,00	60,83 %	26,39 %

Tabla 5: Resultados de las corridas mono-objetivo para el objetivo de preferencias no cumplidas del modelo para médicos en Caso 2.

Se observa que si se compara la Tabla 5 con los valores de la Tabla 1, las preferencias no cumplidas aumentaron sustancialmente. En un día y turno dados, despreciando las restricciones a efectos de analizar, hay un médico que lo debe realizar y cinco que no podrán hacerlo, por lo que a grandes rasgos se espera que si los 6 desean trabajar, el cumplimiento sea considerablemente peor. En adición, este caso permitió identificar una inconsistencia en la forma de contabilizar las preferencias no cumplidas. En particular, cuando un médico indicaba preferencia por trabajar un turno en un día determinado ($pref_{idt} = 1$), pero dicho turno no presentaba demanda en ese día ($q_{dt} = 0$), el modelo contabilizaba esa situación como preferencia no cumplida. Sin embargo, bajo el criterio adoptado en este trabajo, las preferencias sólo deben evaluarse sobre turnos efectivamente demandados. Por lo tanto, no corresponde penalizar preferencias asociadas a turnos sin demanda. Para corregir este comportamiento, se incorporó el parámetro de demanda en la restricción que vincula asignación y preferencias, de modo que el cómputo de preferencias solo se active cuando $q_{dt} = 1$. En particular, se reemplazó la expresión de preferencias por $q_{dt} \times Pref_{idt}$, dando como resultado las restricciones (18). De esta forma, cuando $q_{dt} = 0$ el término asociado a preferencias se anula y no se generan penalizaciones por preferencias en turnos no demandados. De todos modos, el cambio implementado sirve como solución simple para mejorar la robustez del modelo ante datos de entrada contradictorios, pero se podría mantener el modelo sin modificaciones y asumir que los datos de entrada son correctos.

Caso 3: Horas contratadas de policlínica superiores a la capacidad de asignación

El objetivo de este caso es evaluar el comportamiento del modelo ante una inconsistencia entre las condiciones contractuales del personal y la demanda real del servicio, donde la cantidad de horas contratadas es mayor a las demandadas. En particular la

cantidad de horas de policlínica contratadas para el personal médico fijo excede la cantidad de horas efectivamente asignables según el cronograma de turnos definido y la demanda existente. Para este caso, se espera que no exista solución factible, debido a que no es posible cumplir la igualdad de las restricciones (17). En la Tabla 6 se presentan los parámetros modificados respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
G (Cantidad de turnos de guardia)	0
Duración de los turnos	$h_1 = 4$ $h_2 = 4$ $h_3 = 4$ $h_4 = 4$
Cantidad de horas de policlínica contratadas por médico en período a analizar	$k_1 = 21$ $k_2 = 20$ $k_3 = 20$ $k_4 = 20$
Demanda de turnos	$q_{d,t}$ default 1
Cantidad de guardias contratadas por médico en período a analizar	$c_i = 0$

Tabla 6: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 3 para médicos.

Resultados obtenidos

En este caso, para todos los objetivos no hay solución factible. Esto surge de que en el horizonte temporal no hay suficientes turnos para que todos los médicos puedan cumplir sus horas contratadas.

Análisis del umbral de factibilidad

Es relevante señalar que, si la carga contratada del médico $i = 1$ se reduce a $K_1 = 20$ horas, el problema pasa a ser factible. Este ajuste sitúa al modelo en el límite de capacidad del sistema, permitiendo que todas las horas contratadas sean asignadas sin violar las restricciones operativas. A modo ilustrativo, al minimizar el objetivo de horas extra bajo esta configuración ajustada, se obtiene la asignación presentada en la Tabla 7.

Turno	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1	1	1	2	3	3
Pol_2	1	2	1	4	4
Pol_3	2	2	3	4	4
Pol_4	1	2	3	3	4

Tabla 7: Asignación obtenida minimizando horas extra en el Caso 3 para médicos.

Como puede observarse en la Tabla 7, el modelo asigna únicamente a los médicos fijos, sin requerir el uso de los suplentes ($i = 5$ e $i = 6$). Esto se debe a que la cantidad total de horas disponibles para asignar coincide exactamente con la carga horaria contratada, como se puede ver en la Tabla 8 donde no hay horas extra asignadas. En consecuencia,

no resulta necesario recurrir a médicos suplentes para cubrir la demanda. Los valores obtenidos para los indicadores objetivo al minimizar las horas extra se presentan a continuación:

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Horas extra	0,00	45,83 %	33,33 %

Tabla 8: Resultados de la corrida mono-objetivo para el objetivo de horas extra del modelo para médicos en Caso 3.

Este caso no sólo valida la detección de infactibilidad, sino que también permite identificar el umbral exacto de capacidad del sistema. Es decir, muestra el punto a partir del cual las condiciones contractuales dejan de ser compatibles con la estructura de turnos y la demanda existente, lo cual aporta información relevante para la toma de decisiones en la planificación real del servicio.

Caso 4: Reducción de la disponibilidad del personal médico

El objetivo de este caso es validar la correcta implementación de las restricciones de disponibilidad del personal. En particular, se analiza el comportamiento del modelo cuando un médico reduce su disponibilidad dentro del horizonte de planificación debido, por ejemplo, a una licencia.

Se espera que un médico no pueda ser asignado en aquellos días en los que su parámetro de disponibilidad toma valor cero. A su vez, si se mantiene su carga contractual original (horas y guardias contratadas), la reducción de disponibilidad puede generar una incompatibilidad entre lo que debe cumplir y lo que efectivamente puede asignarse. El caso se divide en dos, para poder evaluar el extremo donde el ajuste de horas contratadas afecta o no la estabilidad.

Sin ajuste de horas contratadas

En este primer escenario se modifica la disponibilidad del médico $i = 1$ respecto al caso de referencia (véase Tabla 9), reduciendo los días en los que puede ser asignado, pero se mantienen inalteradas sus horas de policlínica y guardias contratadas, por lo que se espera una solución no factible.

Nombre del parámetro	Valor
Disponibilidad de los médicos	$dis_{i,d}$ default 1 $dis_{1,1} = 0$ $dis_{1,2} = 0$ $dis_{1,3} = 0$ $dis_{1,4} = 0$ $dis_{1,5} = 0$

Tabla 9: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia en Caso 4 sin ajuste de horas contratadas para médicos.

Bajo esta configuración, no se encontraron soluciones factibles para los tres objetivos considerados. Este resultado es consistente con el diseño del caso: al disminuir la cantidad de días disponibles sin ajustar proporcionalmente las horas contratadas, el modelo no puede satisfacer simultáneamente las restricciones de cobertura, disponibilidad y cumplimiento contractual.

Con ajuste de horas contratadas

En este segundo escenario, además de modificar la disponibilidad del médico $i = 1$, se ajustan proporcionalmente sus horas de policlínica y guardias contratadas ($K_1 = 0$ y $c_1 = 0$), manteniendo los valores originales para el resto del personal como se muestra en la Tabla 10. Bajo esta configuración, el problema vuelve a ser factible y se obtienen soluciones óptimas para los tres objetivos considerados.

Nombre del parámetro	Valor
Cantidad de horas de policlínica contratadas por médico en período a analizar	$k_1 = 0$
Cantidad de guardias contratadas por médico en período a analizar	$c_1 = 0$
Disponibilidad de los médicos	$dis_{i,d}$ default 1 $dis_{1,1} = 0$ $dis_{1,2} = 0$ $dis_{1,3} = 0$ $dis_{1,4} = 0$ $dis_{1,5} = 0$

Tabla 10: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia en Caso 4 con ajuste de horas contratadas para médicos

Resultados obtenidos

Para el escenario ajustado, se ejecutó el modelo optimizando de forma individual cada una de las tres funciones objetivo consideradas. La asignación obtenida al minimizar horas extra se puede ver en la Tabla 11:

Turno	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
Pol_1	5	5		3	10
Pol_2	4		2	5	3
Pol_3	2	4	2	3	2
Pol_4		5		10	
Gua_5	9		7		6
Gua_6	2	10	8	5	2

Tabla 11: Asignación obtenida minimizando horas extra en el Caso 4 para médicos con ajuste de horas contratadas.

Como puede observarse, el modelo no le asignó ningún turno al médico $i = 1$, lo que evidencia el correcto funcionamiento de la restricción de disponibilidad. Asimismo, al

optimizar este objetivo se obtuvieron los siguientes valores: 0 horas extra, 21,67 % de preferencias no cumplidas y 12.50 % en la inestabilidad de la asignación. Este escenario valida que las restricciones de disponibilidad están correctamente implementadas y efectivamente limitan las asignaciones del médico, ajustándose en los casos necesarios, la cantidad de horas y guardias contratadas.

A partir de los casos de validación realizados, algunos presentados en esta sección y los restantes en Apéndice 2, se valida el correcto funcionamiento del modelo de médicos.

4.3.2. Validación del modelo de licenciados

Al igual que en la validación del modelo para médicos, en esta sección se presentan algunos de los casos de prueba utilizados para validar el modelo para licenciados. Estos son:

- Preferencia de todos los licenciados por trabajar en todos los turnos.
- Disponibilidad exclusiva de licenciados suplentes.
- Especialidad con demanda sin personal capacitado.

De la misma manera que para la validación del modelo para médicos, se utilizó un caso de referencia para entender cómo varían las soluciones entre los distintos casos de validación.

Caso de referencia

Se parte de un conjunto de datos construido sobre un horizonte temporal de 5 días, con un turno de policlínica, un turno de guardia retén y un turno de guardia interna por día. Además, se contemplaron 2 especialidades a cubrir y una dotación integrada por 5 licenciados fijos y 4 licenciados suplentes. En cuanto a la capacitación del personal, los licenciados $i = 1$ y $i = 4$ se encuentran habilitados exclusivamente para desempeñarse en la especialidad $e = 1$, mientras que los restantes pueden cubrir ambas especialidades. El detalle completo de este caso se encuentra en el Apéndice 2.

En la Tabla 12 se presentan los resultados para cada una de las funciones objetivo al resolver el modelo con los datos del caso de referencia. Los valores presentados en dicha tabla, fueron calculados a partir de los resultados de las funciones objetivo y las fórmulas (36), (37) y (38).

Función Objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	0,00	30,67 %	20,00 %	48,28 %
Preferencias	8,00	6,67 %	10,00 %	75,86 %
Inestabilidad	40,00	41,33 %	0,00 %	68,97 %
Calidad de servicio	8,00	41,33 %	16,67 %	96,55 %

Tabla 12: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para licenciados en Caso de referencia.

Caso 1: Preferencia de todos los licenciados por trabajar en todos los turnos

En este primer caso, se busca validar que, cuando las preferencias son homogéneas, su influencia sobre la asignación resultante es limitada. Para esto se considera la situación en la que todos los licenciados expresan preferencia por trabajar en todos los turnos y días. En consecuencia, el parámetro de preferencias $pref_{idt}$ toma valor 1 para todas las combinaciones (i, d, t) , como se puede ver en la Tabla 13.

Nombre del parámetro	Valor
Preferencias	$pref_{i,d,t}$ default 1

Tabla 13: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 1 para licenciados.

Dado que en este escenario todos los turnos resultan igualmente preferidos por el personal, se espera que este criterio no discrimine entre distintas asignaciones factibles. Por lo tanto, la solución debería quedar determinada principalmente por las restricciones operativas y contractuales del modelo, tales como la cobertura de la demanda, la disponibilidad del personal, los límites laborales y las reglas de especialidad, sin que el componente de preferencias actúe como un factor diferenciador.

Resultados obtenidos

En la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos para este caso al optimizar cada una de las funciones objetivo.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	0,00	77,33 %	21,11 %	27,59 %
Preferencias no cumplidas	56,00	61,33 %	21,11 %	10,34 %
Inestabilidad en la asignación	48,00	64,00 %	0,00 %	6,9 %
Calidad de servicio	12,00	68,00 %	22,22 %	75,86 %

Tabla 14: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para licenciados en Caso 1.

Si bien conceptualmente todas las preferencias se encuentran satisfechas en la medida en que exista asignación, se detectó un comportamiento análogo al observado en el modelo para médicos. En particular, cuando un licenciado manifestaba preferencia por un turno en un día determinado ($pref_{idt} = 1$), pero dicho turno no presentaba demanda para ninguna especialidad en ese día ($\sum_{e \in E} q_{dte} = 0$), el modelo contabilizaba esa situación como preferencia no cumplida. Adicionalmente, al igual que como se detectó en médicos, los distintos valores en la columna preferencias corresponden a un mayor o menor uso de los suplentes, recordando que para los mismos no se consideran preferencias.

Desde el punto de vista conceptual adoptado en este trabajo, las preferencias deben evaluarse únicamente sobre turnos efectivamente demandados. En consecuencia, no corresponde penalizar preferencias asociadas a turnos que no forman parte de la demanda real del servicio. La posibilidad de que esto ocurra está vinculada a inconsistencias en los datos de entrada, donde las preferencias están definidas para días y turnos en los que hay demanda de trabajo, lo cual se considera poco probable y no forma parte del alcance de este trabajo.

Ajuste adoptado en el modelo para licenciados

En el modelo para médicos, este comportamiento fue corregido incorporando explícitamente el parámetro de demanda dentro de la restricción que vincula asignación y preferencias. Sin embargo, en el modelo para licenciados la demanda se encuentra indexada por especialidad (q_{dte}), mientras que el parámetro de preferencias no incluye dicha dimensión. Replicar este mismo ajuste para licenciados implicaba multiplicar q_{dte} por $pref_{idt}$ para todo e , lo que generaría un número elevado de restricciones adicionales innecesarias. Asimismo, incorporar una sumatoria en e podía derivar en penalizaciones sobre no asignaciones que conceptualmente no deberían contabilizarse. Por este motivo, en el modelo para licenciados se optó por no modificar la formulación matemática del componente de preferencias. En su lugar, se adoptó como supuesto de modelado que el parámetro de preferencias será definido de manera consistente con la demanda real. Es decir, cuando no exista demanda para un determinado tipo de turno en un día dado, la preferencia no debe tomar valor uno. De esta forma, el indicador de preferencias no cumplidas se activa únicamente sobre turnos efectivamente demandados, evitando penalizaciones conceptualmente incorrectas sin incrementar la complejidad del modelo.

Caso 2: Especialidad con demanda sin personal capacitado

El objetivo de este caso es validar que el modelo respeta correctamente las restricciones asociadas a la habilitación por especialidad. Para esto se construye un escenario en el que existen dos especialidades a cubrir dentro del horizonte de planificación, pero ningún licenciado se encuentra capacitado para desempeñarse en una de ellas. Para ello, se modifica el parámetro de especialidad de forma tal que, para la especialidad 1, todos los licenciados resulten no aptos ($R_{i1} = 0 \forall i \in L$). Dado que existe demanda a cubrir en una especialidad para la cual no hay personal habilitado, se espera que el problema no admita una solución factible. En la Tabla 15 se presentan los parámetros modificados respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Especialidades de cada licenciado	$R_{1,1} = 0$
	$R_{2,1} = 0$
	$R_{3,1} = 0$
	$R_{4,1} = 0$
	$R_{5,1} = 0$
	$R_{6,1} = 0$
	$R_{7,1} = 0$
	$R_{8,1} = 0$
	$R_{9,1} = 0$

Tabla 15: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 2 para licenciados.

Resultados obtenidos

Como se esperaba, bajo esta configuración, el modelo no puede satisfacer la demanda correspondiente a la especialidad 1 sin violar las restricciones de especialidad (véase restricciones (27)). En consecuencia, no puede encontrar una solución factible. Este caso evidencia que la suficiencia del personal no depende únicamente de la cantidad total de licenciados disponibles, sino también de su distribución según las especialidades que pueden desempeñar. En este sentido, contar con una mayor cantidad de licenciados no garantiza la factibilidad de la asignación si no existen funcionarios capacitados para cubrir determinadas especialidades requeridas por la demanda.

Caso 3: Disponibilidad exclusiva de licenciados suplentes

En este caso, se busca evaluar el comportamiento del modelo cuando la cobertura del servicio depende exclusivamente del personal suplente. De esta forma, el conjunto de datos de entrada se define de forma tal que únicamente se dispone de licenciados suplentes para cubrir los turnos del período de planificación. En particular, se elimina la dotación de licenciados fijos, junto con sus horas contratadas correspondientes. Se espera que el problema resulte factible únicamente si la dotación de suplentes disponible es suficiente para cubrir la totalidad de la demanda de turnos. En caso contrario, el modelo debería identificar correctamente la inexistencia de una solución factible. Se recuerda que, en el caso de los licenciados, contar con personal suficiente no corresponde únicamente a la cantidad total sino también a la especialidad de los mismos. En la Tabla 16 se presentan los parámetros modificados respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Licenciados Fijos	0
Licenciados suplentes	9
Especialidades de cada licenciado	$R_{i,e}$ default 1
Cantidad de horas contratadas de los distintos licenciados fijos	$k_i = 0$
Demanda de turnos	$q_{d,t,e}$ default 1
Disponibilidad de los licenciados	$dis_{i,d}$ default 1
Ranking de habilidades de cada licenciado	$H_{i,e}$ default 0 $H_{1,1} = 1$ $H_{1,2} = 2$ $H_{2,1} = 1$ $H_{2,2} = 2$ $H_{3,1} = 2$ $H_{3,2} = 1$ $H_{4,1} = 1$ $H_{4,2} = 2$ $H_{5,1} = 1$ $H_{5,2} = 2$ $H_{6,1} = 2$ $H_{6,2} = 1$ $H_{7,1} = 1$ $H_{7,2} = 2$ $H_{8,1} = 1$ $H_{8,2} = 2$ $H_{9,1} = 2$ $H_{9,2} = 1$

Tabla 16: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 3 para licenciados.

Resultados obtenidos

Los valores obtenidos para los indicadores objetivo se resumen en la Tabla 17. En este caso, se observa que los indicadores asociados a horas extra, preferencias no cumplidas e inestabilidad toman el mismo valor para todas las corridas, mientras que el indicador de calidad de servicio varía al optimizar dicho criterio. Este comportamiento se explica porque, al no existir licenciados fijos ($LF = 0$), los términos de la función objetivo vinculados a horas extra, preferencias e inestabilidad no se encuentran definidos sobre el conjunto de suplentes. En consecuencia, dichos objetivos resultan nulos siempre. En cambio, el indicador de calidad de servicio sí depende de las asignaciones realizadas y del ranking de habilidades, por lo que su valor difiere cuando se optimiza explícitamente dicho criterio.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	0,00	0,00 %	0,00 %	48,33 %
Preferencias	0,00	0,00 %	0,00 %	48,33 %
Inestabilidad	0,00	0,00 %	0,00 %	48,33 %
Calidad de servicio	0,00	0,00 %	0,00 %	100,00 %

Tabla 17: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para licenciados en Caso 3.

Observación y ajuste en la restricción de límite de guardias continuas

Durante la validación de este caso se detectó una inconsistencia en la implementación de la restricción de límite de guardias continuas. La intención de esta restricción es limitar la cantidad máxima de guardias que puede realizar un licenciado dentro de un período de A días, independientemente de la especialidad asignada. Sin embargo, en la formulación original la restricción se aplicaba por especialidad, permitiendo que un mismo licenciado pudiera superar el límite total de guardias si estas se realizaban en especialidades distintas. Esto no representa correctamente el objetivo de la restricción, que busca controlar la carga de guardias total, sin distinguir especialidad. Para corregirlo, se modificó la restricción incorporando la especialidad dentro de la sumatoria, de forma que el límite se aplique sobre el total de guardias realizadas, cualquiera sea la especialidad. La misma quedó formulada como las restricciones (29), expuesta en la Sección 4.1.2. De esta forma, el modelo impone correctamente el límite de guardias en la ventana considerada para cada licenciado, agregando todas las especialidades y evitando soluciones que, aunque cumplieran el límite por especialidad, excedieran el límite total.

A partir de los casos realizados, algunos presentados en esta sección y otros en el Apéndice 2, se valida el correcto funcionamiento del modelo de licenciados.

4.4. Formulación de los modelos con Programación por Metas

Los modelos formulados anteriormente consideran múltiples funciones objetivo asociadas a distintos criterios de optimización. En particular, buscan no solo minimizar la cantidad de horas extra asignadas a lo largo del horizonte de planificación, sino que también reducir las preferencias no satisfechas y, simultáneamente, favorecer la estabilidad de la asignación y mejorar la calidad del servicio. Si bien el análisis por separado de cada objetivo permitió describir con mayor claridad su incidencia sobre el cronograma resultante, el propósito de esta sección es integrar estos criterios en una única formulación que permita evaluarlos y balancearlos de manera conjunta.

En la Sección 2 se presentaron distintos enfoques para abordar Problemas Multi-objetivo, entre ellos la Suma Ponderada y la Programación por Metas. Tras analizar ambos métodos, se optó por el segundo, principalmente por su mayor facilidad de uso e interpretación en el contexto de aplicación de este trabajo, considerando su utilización esperada por personal médico no necesariamente especializado en Investigación Operativa. En este sentido, la noción de meta resulta más intuitiva que la definición de pesos,

cuya calibración implica, además, dificultades prácticas para reflejar adecuadamente la importancia relativa de cada criterio para el decisor y realizar correcciones por diferencias de magnitud. Adicionalmente, tal como se explicó en la Sección 2.4.1, la Suma Ponderada puede presentar un desempeño deficiente en representar el frente de Pareto y no se recomienda para problemas no convexos. Dado que el modelo que se formuló en la Sección 4.1 incluye variables discretas binarias, el problema resultante es no convexo, lo cual refuerza la decisión de no utilizar la Suma Ponderada y adoptar GP.

Para adaptar los modelos presentados anteriormente a su versión GP, se toma como base el modelo mono-objetivo, al que se incorporan metas asociadas a cada criterio de desempeño y variables de desviación, según fue visto en (4). Estas cuantifican el grado de incumplimiento respecto a dichos niveles deseados, permitiendo considerar los distintos objetivos de forma simultánea. Teniendo en cuenta que para cada objetivo se buscaba minimizar los resultados obtenidos, al reformular la función objetivo a GP, corresponde minimizar únicamente las desviaciones positivas. Si para el fijado de metas se utiliza el valor obtenido de cada objetivo optimizado individualmente, se está utilizando el punto ideal presentado en la Sección 2.4. En lo que sigue se presentan, para ambos modelos, los ajustes realizados en parámetros, variables, restricciones y función objetivo.

4.4.1. Modelo GP para médicos

A continuación se presentan los parámetros, variables de decisión, restricciones y la reformulación de la función objetivo que se incorporan o modifican respecto del modelo de médicos presentado en la Sección 4.1.1, con el fin de adaptarlo al enfoque de GP.

PARÁMETROS

Se agregan los siguientes parámetros correspondientes a las metas asociadas a cada objetivo del modelo:

GO_HE : Meta a alcanzar asociada a las horas extra.

GO_PREF : Meta a alcanzar asociada a las preferencias no cumplidas.

GO_EST : Meta a alcanzar asociada a la estabilidad del cronograma.

VARIABLES DE DECISIÓN

Además, se agregan las siguientes variables de decisión asociadas a la desviación positiva y negativa respecto a la meta de cada objetivo:

n^α : Desviación negativa de las horas extra.

n^ω : Desviación negativa de las preferencias no cumplidas.

n^β : Desviación negativa de la estabilidad del cronograma.

p^α : Desviación positiva de las horas extra.

p^ω : Desviación positiva de las preferencias no cumplidas.

p^β : Desviación positiva de la estabilidad del cronograma.

FUNCIÓN OBJETIVO

Se sustituyen las tres funciones objetivo planteadas en la Sección 4.1.1 por una única función, orientada a minimizar las variables de desviación no deseadas. Dado que los objetivos se formulan en términos de minimización, en este caso se consideran las desviaciones positivas. Cabe señalar que estas variables se normalizan, ya que sus magnitudes pueden diferir entre sí y, en consecuencia, sesgar la decisión al momento de buscar el cumplimiento de todas las metas. De esta forma, se obtiene la siguiente función objetivo de GP:

$$\text{mín} \left(\frac{p^\alpha}{GO_HE} + \frac{p^\omega}{GO_PREF} + \frac{p^\beta}{GO_EST} \right) \quad (40)$$

Dado que en algunos de los casos de ejecución que se presentarán posteriormente se detecta la posibilidad de que las metas tomen valor 0, se opta por modificar la función objetivo con adiciones unitarias en numerador y denominador lo que permite poder alcanzar dichas metas nulas, obteniendo la siguiente función objetivo:

$$\text{mín} \left(\frac{p^\alpha + 1}{GO_HE + 1} + \frac{p^\omega + 1}{GO_PREF + 1} + \frac{p^\beta + 1}{GO_EST + 1} \right) \quad (41)$$

Es importante mencionar que la adición de estas unidades podría llegar a alterar el peso relativo de los objetivos, pero en el rango de los valores de trabajo analizados y para la totalidad de resultados obtenidos, se consideró que este efecto es despreciable.

RESTRICCIONES

Según lo presentado en la Sección 2.4.2, la reformulación consiste en el fijado de niveles de aspiración, para cada uno de los objetivos con su respectiva desviación positiva y negativa. Por lo tanto se agrega al modelo una restricción para cada objetivo, cómo se presenta a continuación:

$$\sum_{i \in MF} \alpha_i + n^\alpha - p^\alpha = GO_HE \quad (42)$$

$$\sum_{i \in MF} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} w_{idt} + n^\omega - p^\omega = GO_PREF \quad (43)$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \beta_{idt} + n^\beta - p^\beta = GO_EST \quad (44)$$

4.4.2. Modelo GP para licenciados

De forma análoga al modelo de asignación de turnos médicos, para la asignación de turnos de licenciados se aplica el mismo procedimiento metodológico, sobre el modelo de la Sección 4.1.2. No obstante, en este caso se incorpora adicionalmente la meta de calidad de servicio, con el propósito de que, al realizar la asignación, se priorice para cada licenciado los turnos de su especialidad con mayor nivel de habilidad.

PARÁMETROS

A diferencia que para médicos, se suma un parámetro más, asociado a la calidad del servicio.

GO_HE : Meta a alcanzar asociada a las horas extra totales.

GO_PREF : Meta a alcanzar asociada a las preferencias no cumplidas.

GO_EST : Meta a alcanzar asociada a la estabilidad del cronograma.

GO_CAL : Meta a alcanzar en calidad del servicio.

VARIABLES DE DECISIÓN

Se suman además las variables de desviación positivas y negativas asociadas a la calidad del servicio

n^α : Desviación negativa de horas extra.

n^ω : Desviación negativa de preferencias no cumplidas.

n^β : Desviación negativa de estabilidad del cronograma.

n^H : Desviación negativa de calidad del servicio.

p^α : Desviación positiva de horas extra.

p^ω : Desviación positiva de preferencias no cumplidas.

p^β : Desviación positiva de estabilidad del cronograma.

p^H : Desviación positiva de calidad del servicio.

FUNCIÓN OBJETIVO

Por ende, y tomando como válida también aquí la modificación realizada en el modelo de médicos, se define la siguiente función objetivo:

$$\min \left(\frac{p^\alpha + 1}{GO_HE + 1} + \frac{p^\omega + 1}{GO_PREF + 1} + \frac{p^\beta + 1}{GO_EST + 1} + \frac{p^H + 1}{GO_CAL + 1} \right) \quad (45)$$

RESTRICCIONES

De manera similar a lo realizado en médicos, la reformulación consiste en el fijado de niveles de aspiración, para cada uno de los objetivos con su respectiva desviación positiva y negativa, a excepción del objetivo adicional de calidad del servicio. Por lo tanto se tiene una restricción para cada objetivo cómo se presenta a continuación:

$$\sum_{i \in LF} \alpha_i + n^\alpha - p^\alpha = GO_HE \quad (46)$$

$$\sum_{i \in LF} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} w_{idt} + n^\omega - p^\omega = GO_PREF \quad (47)$$

$$\sum_{i \in LF} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} \beta_{idte} + n^\beta - p^\beta = GO_EST \quad (48)$$

$$\sum_{i \in LF} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} H_{ie} x_{idte} + n^H - p^H = GO_CAL \quad (49)$$

4.5. Validación de modelos GP y comparación de resultados

Al igual que para los modelos mono-objetivo presentados en la Sección 4.3, resulta necesario validar la formulación multi-objetivo basada en Programación por Metas. Para ello, se seleccionaron algunos de los casos utilizados previamente en la validación mono-objetivo y se resolvieron nuevamente bajo la reformulación GP.

Para realizar dicha reformulación, es necesario definir las metas asociadas a cada objetivo, las cuales constituyen parámetros del modelo de GP. En este trabajo, se adoptó el siguiente procedimiento: en primer lugar, se resolvió el modelo considerando cada objetivo de forma individual; posteriormente, los valores óptimos obtenidos en dichas ejecuciones fueron utilizados como metas en la formulación multi-objetivo. Este procedimiento busca aproximarse al punto ideal definido en la Sección 2.4, dado que cada meta representa el mejor valor alcanzable para un objetivo cuando este se optimiza de manera aislada. Asimismo, como se mencionó en la Sección 2.4, si la función objetivo es estrictamente creciente y todos los pesos asociados a las desviaciones son no nulos, las soluciones óptimas obtenidas pertenecen al frente de Pareto. En este caso, si bien no se utilizan pesos explícitos, estos pueden considerarse equivalentes a 1. Además, al definir las metas a partir de los valores óptimos de los modelos mono-objetivo, las desviaciones entre cada función objetivo y su respectiva meta resultan mayores o iguales a cero. Por lo tanto, la minimización de la suma de dichas desviaciones constituye una función estrictamente creciente respecto de los objetivos considerados. En consecuencia, el procedimiento adoptado resulta metodológicamente consistente para la fijación de metas, ya que permite obtener soluciones Pareto fuertes. No obstante, también podrían definirse metas alternativas, consideradas aceptables dentro del contexto operativo de COMEPA, en función de criterios organizacionales o restricciones prácticas específicas. Sin embargo, en ese caso no necesariamente se garantizaría que las soluciones obtenidas pertenezcan al frente de Pareto.

A partir de estas ejecuciones se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación, diferenciando el análisis para médicos y licenciados. Al igual que en la validación de los modelos mono-objetivo (véase Sección 4.3), y con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, los objetivos asociados a preferencias no cumplidas, inestabilidad en la asignación y calidad de servicio se expresaron en términos porcentuales. En todos los casos, se espera que la solución obtenida no supere las metas establecidas, dado que de ocurrir esto significaría un error en el proceso de definición de metas o en la formulación de GP.

4.5.1. Validación del modelo GP para médicos

En esta sección se presentan los casos de prueba utilizados para validar el modelo de asignación de turnos médicos con GP. Para ello, se utilizan dos casos de validación

mono-objetivo (Caso 1 y 3) con sus adaptaciones correspondientes.

Caso 1: Preferencia de todos los médicos por trabajar en todos los turnos

Al igual que para los casos presentados anteriormente para validar los modelos para médicos y licenciados, el objetivo de este caso es validar que la influencia de las preferencias homogéneas sobre la asignación resultante es limitada, pero al reformularlo a GP el objetivo también es obtener una solución que se acerque a las metas lo más posible. Se espera que el término asociado a preferencias no tenga una incidencia significativa en la solución obtenida, dado que todos los turnos son igualmente preferidos por el personal. Para su adaptación a GP, se definieron las metas siguiendo el criterio presentado en la Sección 4.5: resolver el modelo de forma individual para cada objetivo y utilizar los valores óptimos obtenidos como metas de la formulación multi-objetivo. En este caso, dichas metas fueron 0 horas extra, 73 preferencias no cumplidas y 6 asignaciones no estables.

Resultados obtenidos

Los valores porcentuales obtenidos para cada objetivo y para GP con los datos presentados son los indicados en la Tabla 18, los cuales son consistentes con lo esperado. Se observa que la implementación de GP permitió alcanzar simultáneamente los valores óptimos de horas extra (0,00) e inestabilidad en la asignación (8,33 %). En términos de desviaciones respecto de las metas, se obtuvo desvío nulo para horas extra e inestabilidad, mientras que la desviación positiva para preferencias no cumplidas fue igual a 1. Por lo tanto, en este escenario, la formulación mediante GP permitió alcanzar dos de las tres metas establecidas, presentando únicamente un desvío unitario en el objetivo vinculado a preferencias, lo cual es un cumplimiento satisfactorio de las metas.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Horas extra	0,00	62,50 %	20,83 %
Preferencias no cumplidas	4,00	60,83 %	26,39 %
Inestabilidad en la asignación	0,00	61,67 %	8,33 %
GP	0,00	61,67 %	8,33 %

Tabla 18: Resultados de las corridas mono-objetivo y GP del modelo para médicos del Caso 1.

Caso 2: Horas contratadas de policlínica superiores a la capacidad de asignación

El objetivo de este caso es validar el correcto funcionamiento del modelo cuando coinciden la cantidad de horas contratadas con la demanda. Este caso retoma el escenario analizado en la validación mono-objetivo, en el que la carga horaria contratada de policlínica resulta incompatible con la capacidad total de asignación del sistema. En su formulación original, el caso no admitía solución factible, ya que la cantidad de horas

mínimas que debían cumplir los médicos supera la capacidad disponible del cronograma. No obstante, en la validación mono-objetivo se observó que, al reducir en una unidad la carga contratada del médico $i = 1$, pasando de $K_1 = 21$ a $K_1 = 20$, el problema se volvía factible. Dado que esta configuración ajustada representa el umbral de factibilidad del sistema, se consideró pertinente utilizarla para validar la reformulación mediante GP. Para ello, al igual que para el caso anterior, se definieron como metas los valores óptimos obtenidos al resolver el caso ajustado de manera individual para cada función objetivo. En consecuencia, las metas fijadas fueron 0 horas extra, 55 preferencias no cumplidas y 0 asignaciones no estables.

Resultados obtenidos

Con los valores determinados para las metas, se resolvió el modelo de Programación por Metas y se compararon los resultados obtenidos con las resoluciones mono-objetivo del mismo caso. Los valores correspondientes se presentan en la Tabla 19.

Al comparar la solución GP con la obtenida al minimizar únicamente las horas extra, se observa que ambas soluciones alcanzan 0 horas extra y 45,83 % de preferencias no cumplidas. Sin embargo, la solución GP mejora la inestabilidad en la asignación, reduciéndola de 33,33 % a 0 %. Asimismo, los resultados muestran que la solución obtenida mediante GP alcanza simultáneamente los mejores valores observados en las resoluciones mono-objetivo: 0 horas extra, 45,83 % de preferencias no cumplidas y 0 % de inestabilidad en la asignación. En otras palabras, la solución logra satisfacer en simultáneo las tres metas definidas. Desde el punto de vista operativo, esto implica una asignación en la que no se realizan horas extra, se cumple la mayor cantidad posible de preferencias y la asignación resultante resulta estable a lo largo del horizonte temporal. Por lo tanto, este caso confirma que, en una situación ubicada en el límite de capacidad del sistema, la implementación de GP permite alcanzar una solución balanceada sin necesidad de sacrificar ninguno de los objetivos considerados.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Horas extra	0,00	45,83 %	33,33 %
Preferencias no cumplidas	0,00	45,83 %	27,78 %
Inestabilidad en la asignación	0,00	49,17 %	0,00 %
GP	0,00	45,83 %	0,00 %

Tabla 19: Resultados de las corridas mono-objetivo y GP del modelo para médicos del Caso 2.

A partir de los casos de validación realizados se valida el correcto funcionamiento del modelo GP de médicos.

4.5.2. Validación del modelo GP de licenciados

Al igual que en la validación del modelo de asignación de médicos, en esta sección se presentan los casos de prueba representativos definidos para validar el modelo de

asignación de licenciados en GP. Para ello, se utilizan dos casos de validación mono-objetivo (Caso 1 y Caso 9) con sus adaptaciones correspondientes.

Caso 1: Preferencia por trabajar en todos los turnos

El objetivo de este caso es validar el correcto funcionamiento de las metas y los desvíos de GP en un grupo de datos ya conocido. De manera similar a lo visto previamente para médicos, en este escenario se considera que las preferencias de los licenciados son positivas hacia todos los turnos existentes. Aquí también para su adaptación a GP, se definieron las metas siguiendo el criterio utilizado para médicos, con la diferencia de que en este caso corresponde una adicional para la calidad del servicio: resolver el modelo de forma individual para cada objetivo y utilizar los valores óptimos obtenidos como metas de la formulación multi-objetivo. Utilizando dicho criterio se definió una meta de 0 horas extra, 46 preferencias no cumplidas, 1 para asignaciones no estables y de 36 para la calidad de servicio.

Resultados obtenidos

Los valores porcentuales obtenidos para cada objetivo en la asignación presentada, son los indicados en la Tabla 20. Si se compara los valores obtenidos implementando GP, se puede observar que solo se alcanza la meta para horas extra, mientras que preferencias tiene un resultado regular e inestabilidad del cronograma y calidad del servicio tienen valores relativamente cercanos a sus metas. Esto está asociado a las desviaciones positivas sobre cada meta, que son 0 para horas extra, 6 para preferencias no cumplidas, 3 para asignaciones no estables y 2 para calidad de servicio. Se valida correctamente que el uso de GP permite obtener mejores resultados globales.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	0,00	72,00 %	34,44 %	34,48 %
Preferencias no cumplidas	0,00	61,33 %	23,33 %	17,24 %
Inestabilidad en la asignación	36,00	72,00 %	1,11 %	41,38 %
Calidad de servicio	8,00	70,67 %	34,44 %	75,86 %
GP	0,00	69,33 %	4,44 %	68,97 %

Tabla 20: Resultados de las corridas mono-objetivo y GP del modelo para licenciados del Caso 1.

Caso 2: Cobertura de la demanda sólo con licenciados fijos.

En este caso se analiza el escenario visto en el Apéndice 2 de la validación del modelo mono-objetivo, en el cual solo se presentan licenciados fijos para cubrir la demanda. El mismo escenario se resuelve mediante Programación por Metas. Para ello, se fijan como metas los valores óptimos obtenidos al resolver cada función objetivo de forma

individual: 56 horas extra, 15 preferencias no cumplidas, 1 asignación no estable y 33 para calidad del servicio.

Resultados obtenidos

En la Tabla 21 se presentan los valores obtenidos para cada indicador al resolver el problema con cada objetivo en forma individual y mediante GP.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	56,00	38,67 %	27,78 %	55,17 %
Preferencias no cumplidas	56,00	20,00 %	16,67 %	68,97 %
Inestabilidad en la asignación	56,00	44,00 %	1,11 %	41,38 %
Calidad de servicio	56,00	41,33 %	23,33 %	86,21 %
GP	56,00	33,33 %	1,11 %	79,31 %

Tabla 21: Resultados de las corridas mono-objetivo y GP del modelo para licenciados del Caso 2.

A partir de los resultados, se observa que la solución obtenida mediante Programación por Metas alcanza la meta asociada a horas extra y estabilidad de la asignación, mientras que en los demás objetivos presenta desvíos respecto de las metas fijadas. En particular, las desviaciones positivas obtenidas son 10 para preferencias no cumplidas y 2 para calidad del servicio. Se observa que contemplar los cuatro objetivos en simultáneo permitió alcanzar simultáneamente los óptimos en horas extra e inestabilidad en la asignación, mientras que se consiguen resultados aceptables en los dos restantes.

A partir de los casos de validación realizados se valida el correcto funcionamiento del modelo GP de licenciados.

5. Relevamiento y análisis de datos

Para ejecutar los modelos planteados en la Sección 4 al caso de estudio de la realidad, es necesario definir los valores de los conjuntos y parámetros. La información requerida fue proporcionada por COMEPA a partir de cronogramas mensuales de asignación, registros de licencias y tablas complementarias vinculadas a condiciones contractuales y competencias del personal. No obstante, en algunos casos fue necesario realizar ajustes puntuales para alinear los datos con el alcance del trabajo y con el objetivo del modelo como herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Estos fueron realizados de común acuerdo con el personal referente de COMEPA. En particular, estos ajustes se orientaron a estandarizar ventanas horarias y unidades de medida, asegurar consistencia interna entre demanda, contratos y disponibilidad, y mantener una representación coherente de la operativa real sin comprometer la aplicabilidad de los resultados.

Se recibieron planillas de cronograma correspondientes al mes de noviembre de 2025 tanto para médicos como para licenciados. Dichas planillas indican, para cada día y turno, el profesional responsable asignado en forma manual a policlínica y guardias. A modo ilustrativo, se presentan la asignación manual de policlínica y guardias para médicos y licenciados del mes de referencia en el documento Cronograma Manual-Noviembre 2025 (véase Apéndice 3).

En las secciones siguientes se presentan, para cada modelo (médicos y licenciados), la parametrización adoptada para el escenario de referencia, especificando los valores utilizados y su origen (datos provistos por la institución o contruidos a partir del cronograma cuando no existía un registro explícito). Para preservar la privacidad del personal, tanto médicos como licenciados se identifican mediante índices numéricos, manteniendo una correspondencia fija a lo largo del informe.

5.1. Datos para médicos

A partir del cronograma mensual provisto por COMEPA para noviembre de 2025 se definieron los conjuntos y parámetros correspondientes al modelo de asignación de turnos médicos. El listado completo de parámetros se puede ver accediendo al documento Datos-Asignación médicos (véase Apéndice 3).

5.1.1. Parametrización del modelo

Se consideró un horizonte temporal de 30 días ($DM = 30$), correspondiente al mes de noviembre. En función de la estructura observada en el cronograma, se definió que en cada día del horizonte pueden existir hasta 2 turnos de guardia ($G = 2$) y 4 turnos de policlínica ($P = 4$). Las ventanas horarias asociadas a cada tipo de turno se establecieron como: guardias de 12 horas (08:00-20:00 y 20:00-08:00) y policlínicas de 4 horas (08:00-12:00, 12:00-16:00, 16:00-20:00 y 20:00-22:00).

El conjunto de médicos M se compone por médicos fijos de guardia (FG), médicos fijos jubilados (FJ) y médicos suplentes (S). En el escenario de referencia se consideraron 4 médicos fijos de guardia ($FG = 4$), para quienes se parametrizaron (i) las horas mensuales de policlínica contratadas k_i y (ii) la cantidad de guardias mensuales contratadas c_i . En particular, se adoptaron $k_1 = 40$, $k_2 = 40$, $k_3 = 8$ y $k_4 = 61$ horas mensuales de policlínica, y $c_1 = 12$, $c_2 = 13$, $c_3 = 5$ y $c_4 = 13$ guardias mensuales. A su vez,

se incluyeron 2 médicos fijos jubilados ($FJ = 2$), con una carga contractual definida únicamente por horas mensuales de policlínica, adoptándose $k_5 = 44$, $k_6 = 48$ horas mensuales. Por último, el conjunto se completa con 2 médicos suplentes ($S = 2$), utilizados como capacidad de respaldo para cubrir faltantes o donde sea necesario. Dado su rol complementario y la realidad descrita por la contraparte, el modelo no incorpora horas contractuales mensuales para este grupo.

5.1.2. Valores de demanda, disponibilidad y preferencias

La demanda de cobertura se modeló mediante el parámetro q_{dt} , que indica si en el día d y turno t se requiere asignar a un médico. Como criterio general, se consideró $q_{dt} = 1$ para todos los días y turnos definidos en el modelo, y se ajustó a $q_{dt} = 0$ en aquellos casos en los que el cronograma provisto por COMEPA no contempla actividad para el turno correspondiente. En particular, del análisis del cronograma se identificó que los fines de semana no se realizan turnos de policlínica; por lo tanto, se estableció $q_{dt} = 0$ para los turnos de policlínica ($t \in TP$) en los días $d \in \{1, 2, 8, 9, 15, 16, 22, 23, 29, 30\}$. A su vez, se observó que el cuarto turno de policlínica (20:00 - 24:00) no se realiza de forma sistemática en todos los días hábiles. En consecuencia, su demanda se parametrizó día a día según la actividad reflejada en el cronograma. En contraste, los turnos de guardia se encuentran activos durante todo el horizonte de planificación, por lo que se consideró $q_{dt} = 1$ para $t \in TG$ y $d \in D$.

Además del cronograma, COMEPA proporcionó la información de licencias correspondiente al mes analizado. A partir de dichos registros se definió el parámetro de disponibilidad dis_{id} , donde $dis_{id} = 1$ indica que el médico i puede ser asignado en el día d y $dis_{id} = 0$ en caso contrario. En el escenario de referencia se registraron indisponibilidades para el médico $i = 3$ en los días $d \in \{1, 2, 3, 4, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30\}$, para el médico $i = 5$ entre los días $d \in \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$ y para el médico $i = 7$ entre los días $d \in \{13, 14, 15, 16\}$.

El ajuste de las horas mensuales de policlínica contratadas k_i se aplica únicamente cuando la reducción de días disponibles compromete el cumplimiento de la carga contractual dentro del horizonte de planificación. En caso contrario, aun existiendo días no disponibles, se mantiene la carga contractual original si puede satisfacerse con los días hábiles disponibles. Por ejemplo, el médico $i = 3$ cuenta con una carga relativamente baja de policlínica ($k_3 = 8$ horas mensuales) y, por lo tanto, puede cumplir con su contrato dentro de los días habilitados sin requerir un ajuste de k_i . Para los casos en los que sí corresponde ajustar, se aplicó un prorrateo proporcional a la disponibilidad registrada:

$$k_i^{aj} = k_i^{base} \frac{D_i^{disp}}{DT} \quad (50)$$

donde $D_i^{disp} = \{d \in D : dis_{id} = 1\}$ representa el conjunto de días disponibles del médico i , y DT es la cantidad de días del horizonte en los que se realiza policlínica (equivalente a los días hábiles del mes). El valor resultante se redondeó para obtener un número de horas compatible con la parametrización del modelo. En consecuencia, para el médico $i = 5$ se adoptó $k_i = 44$ horas mensuales. Cabe señalar que el médico $i = 5$ corresponde a un médico fijo jubilado y, por lo tanto, no se le parametrizan guardias.

Sin embargo, en un escenario hipotético en el que también se exigiera el cumplimiento de guardias mensuales, un criterio análogo podría aplicarse al parámetro de guardias contratadas. Por otra parte, el médico $i = 7$ corresponde a un suplente, por lo que no se le definió una carga horaria contractual mensual en el escenario de referencia.

Con el objetivo de incorporar criterios de satisfacción del personal, se definió el parámetro de preferencias $pref_{idt}$, que indica si el médico i presenta preferencia por trabajar en el día d y turno t . Por convención, se estableció $pref_{idt} = 0$ como valor por defecto y se asignó $pref_{idt} = 1$ únicamente en las combinaciones (i, d, t) identificadas como preferidas para trabajar. Dado que en la planificación manual las preferencias por días y turnos no se encontraban formalmente registradas como un insumo explícito, el parámetro $pref_{idt}$ fue construido por el equipo a partir del cronograma de asignación de noviembre provisto. En particular, se interpretó que las asignaciones efectivamente realizadas en dicho cronograma representan combinaciones preferidas por el personal, utilizándolas como preferencias para el escenario de referencia.

5.1.3. Parámetros operativos definidos a partir de la contraparte

Por último, a partir de reuniones con la contraparte e intercambios por correo se incorporaron parámetros operativos adicionales. En primer lugar, se indicó la necesidad de respetar un descanso mínimo entre guardias asignadas a un mismo profesional en una ventana de días, adaptándose $A = 3$ como parámetro asociado a dicha ventana. En segundo lugar, la cantidad límite de guardias en esa ventana A , es $TC = 2$. En tercer lugar, se estableció que un médico puede ser asignado como máximo a 2 turnos en un mismo día, por lo que se definió $CD = 2$. Finalmente, se mencionó la conveniencia de mantener estabilidad en la asignación semana a semana; para ello, el modelo evalúa la asignación en ventanas semanales considerando $Sem = 7$ días.

5.2. Datos reales de licenciados

A partir del cronograma mensual provisto por COMEPA para noviembre de 2025 y de las tablas complementarias de contratos, disponibilidades y competencias, se definieron los conjuntos y parámetros correspondientes al modelo de asignación de turnos de licenciados. A diferencia del caso de médicos, en este modelo la planificación se realiza por especialidad, dado que la cobertura requerida y la elegibilidad del personal dependen de las competencias de cada licenciado. El listado completo de parámetros se puede ver accediendo al documento Datos - Asignación licenciados (véase Apéndice 3).

5.2.1. Parametrización del modelo

Se consideró un horizonte temporal de 30 días ($DM = 30$), correspondiente al mes de noviembre, y se definió una estructura de turnos por especialidad compuesta por 4 turnos diarios de policlínica ($P = 4$), 3 turnos diarios de guardia interna ($GI = 3$) y 2 turnos diarios de guardia retén ($GR = 2$). La duración de cada turno se parametrizó mediante h_t , aceptándose una estandarización de duraciones por tipo de turno. En consecuencia, se consideraron policlínicas de 4 horas (08:00–12:00, 12:00–16:00, 16:00–20:00 y 20:00–24:00), guardias internas de 8 horas (08:00–16:00 y 16:00–24:00) y un turno interno adicional de 4 horas (20:00–24:00). Por último, se consideraron guardias retén

de 8 horas (00:00–08:00) y de 12 horas (08:00–20:00). Para homogeneizar la medición de la carga horaria bajo una unidad común, se utilizó la equivalencia operativa definida por COMEPA, según la cual 1,6 horas de retén equivalen a 1 hora estándar de policlínica o guardia interna. En consecuencia, en el escenario de referencia una guardia retén de 8 horas equivale a 5 horas estándar, mientras que una guardia retén de 12 horas equivale a 7,5 horas estándar.

En cuanto al personal, se consideraron 23 licenciados fijos ($LF = 23$) y 8 licenciados suplentes ($LS = 8$), y un conjunto de 7 especialidades ($ESP = 7$). Las especialidades consideradas fueron: (1) block quirúrgico, (2) tomografía, (3) resonancia, (4) RX policlínica, (5) RX sanatorio modelo, (6) mamografía y (7) densitometría; esta enumeración coincide con la codificación utilizada en el modelo. La factibilidad de asignación se controló mediante la matriz de competencias R_{ie} , que indica si el licenciado i se encuentra habilitado para desempeñarse en la especialidad e . Dicha información fue provista por COMEPA y se utiliza para restringir la asignación a combinaciones licenciado - especialidad admisibles. Además, se incorporó el parámetro H_{ie} como un indicador de habilidad relativa por especialidad, con el objetivo de capturar criterios de calidad de servicio en la selección del personal cuando existen alternativas factibles. Dado que no se disponía de un ranking formal provisto por la institución, H_{ie} fue construido por el equipo a partir del cronograma manual de asignación de noviembre: para cada licenciado con asignación en el mes, se estableció H_{ie} en la especialidad e en la que efectivamente fue asignado, interpretando dicha asignación como evidencia de mayor habilidad relativa para desempeñarse en esa especialidad. Este criterio se utiliza como aproximación inicial y su precisión puede mejorarse en el futuro con evaluaciones explícitas de desempeño.

Los parámetros contractuales se expresaron en horas mensuales, representadas por k_i , a partir de la información provista por la institución. En particular, COMEPA indicó que los licenciados fijos cuentan con una carga horaria mensual (del 1 al 30/31 de cada mes) de 80 horas estándar (guardias internas o policlínicas) o, alternativamente, 128 horas de guardia retén, pudiéndose combinar ambas modalidades mediante la equivalencia operativa correspondiente. Para los licenciados suplentes, COMEPA indicó que la carga horaria del período comprendido entre el día 16 y el día 15 del mes siguiente no debe superar 80 horas estándar o 128 horas de guardia retén, también combinables. No obstante, en el marco de este trabajo dicho esquema contractual no se incorporó explícitamente en el escenario de referencia, por dos motivos. En primer lugar, el horizonte de planificación adoptado corresponde al mes calendario (1 al 30/31), mientras que el contrato de suplentes se define sobre un ciclo 16-15, lo que dificultaría la comparación directa sin introducir reglas adicionales de arrastre entre períodos. En segundo lugar, se definió como criterio de modelado que los suplentes actúan como capacidad de respaldo: su asignación se habilita únicamente cuando la dotación de licenciados fijos no resulta suficiente para cubrir la demanda, priorizando el cumplimiento de la carga contractual de los fijos y la mejora global de la asignación (cobertura, horas extra, estabilidad y preferencias). En consecuencia, se adoptó $k_i = 80$ horas estándar como referencia para los licenciados fijos en el período analizado, y se utilizó el conjunto de suplentes principalmente para cubrir faltantes de cobertura cuando sea necesario. Finalmente, a diferencia del modelo de médicos, para licenciados se consideró que cada persona puede ser asignada como máximo a un turno por día, por lo que se adoptó $CD = 1$ como cota superior de carga diaria.

5.2.2. Valores de demanda, disponibilidad y preferencias

La demanda de cobertura se modeló mediante el parámetro q_{dte} , que indica si en el día d , turno t y especialidad e se requiere asignar un licenciado. Al igual que en el caso de médicos, esta demanda se construyó directamente a partir del cronograma manual de noviembre de 2025 provisto por COMEPA. Se definió $q_{dte} = 1$ cuando el cronograma indica que el turno se encuentra activo para la especialidad correspondiente, y $q_{dte} = 0$ en caso contrario. Cabe destacar que, durante el análisis de los turnos proporcionados por la contraparte, se identificó que ciertos turnos no contaban con la misma estandarización horaria adoptada para el resto de las actividades. En particular, se excluyeron los turnos de guardia interna y de guardia retén correspondientes a fines de semana y feriados no laborables de apoyo RX y block quirúrgico, así como la guardia retén de los sábados para la especialidad block quirúrgico.

Como consecuencia de esta exclusión, se observó que para la especialidad block quirúrgico las horas contratadas de determinados licenciados generaban inconsistencias en el escenario de referencia. En particular, los licenciados $i = 1$ e $i = 6$ cuentan únicamente con habilitación para dicha especialidad, y en la operativa real los turnos de apoyo contribuían a completar su carga horaria contractual. Al eliminarse estos turnos del alcance, mantener una carga mensual de 80 horas estándar implicaba forzar asignaciones adicionales que no se encuentran respaldadas por la demanda definida en este caso, o bien inducir horas extra de manera inevitable para cumplir el contrato. Para preservar coherencia entre la demanda modelada y el cumplimiento contractual, se ajustó puntualmente la carga horaria mensual de ambos licenciados, adaptándose $k_1 = k_6 = 75$ horas estándar para el período analizado en este caso.

En cuanto a la disponibilidad del personal, se representó mediante el parámetro dis_{id} , con valor por defecto $dis_{id} = 1$ y en los días en que el licenciado i se encontraba no disponible $dis_{id} = 0$ (licencias u otras causales registradas). Este parámetro se completó a partir de la información proporcionada por la contraparte para el mes analizado, contemplando tanto licenciados fijos como suplentes. En particular, se registraron indisponibilidades para $i = 2$ desde el día 1 hasta el día 24, para $i = 15$ desde el día 10 hasta el día 30, y para $i = 19$ durante todo el mes. Asimismo, el licenciado $i = 18$ se encontró bajo certificación médica durante todo el mes. En los casos mencionados, se ajustaron las horas contractuales k_i del período con el fin de evitar incompatibilidades entre la disponibilidad registrada y la exigencia de cumplimiento de la carga horaria mensual. Mantener $k_i = 80$ horas estándar en situaciones con disponibilidad reducida (o nula) hubiera generado una inconsistencia de restricciones, dado que no sería posible asignar la totalidad de horas contractuales en los días efectivamente disponibles. Por lo tanto, para el licenciado $i = 2$ se adoptó $k_2 = 18$ horas, calculadas de igual forma que en el caso de médicos. El mismo criterio se aplicó al licenciado $i = 15$, obteniéndose $k_{15} = 20$ horas. Para los licenciados $i = 18$ e $i = 19$, al no contar con disponibilidad durante el mes, se estableció $k_{18} = k_{19} = 0$ horas.

Por su parte, el parámetro de preferencias $pref_{idt}$ se completó, al igual que en el caso de médicos, a partir del cronograma de asignación provisto por COMEPA, interpretando las asignaciones efectivamente realizadas como combinaciones deseadas por el personal para el escenario de referencia.

5.2.3. Parámetros operativos definidos a partir de la contraparte

En forma análoga a lo definido para médicos, a partir de reuniones con la contraparte e intercambios por correo se incorporaron parámetros operativos vinculados a la limitación de guardias en ventanas móviles ($A = 3$, $TC = 2$) y a la evaluación de estabilidad semanal ($Sem = 7$). A diferencia de médicos, según lo indicado para licenciados $CD = 1$.

6. Resultados del caso real y análisis comparativo

La presente sección tiene como objetivo presentar y analizar los resultados obtenidos. Para ello, se presentan los resultados asociados al modelo de asignación de médicos y al de licenciados, resueltos a partir de los datos reales correspondientes al período seleccionado. El análisis contempla, en primer lugar, las soluciones obtenidas al minimizar de forma independiente cada uno de los objetivos considerados y, en segundo lugar, la solución alcanzada mediante Programación por Metas. Se comparan las soluciones obtenidas, se estudian las compensaciones existentes entre los distintos criterios de desempeño y, finalmente, se contrasta la solución propuesta por el modelo con la asignación manual realizada por COMEPA para el mes seleccionado, con el propósito de evaluar el aporte del modelo como herramienta de apoyo a la decisión.

A partir de los datos presentados en la Sección 5, se resolvieron los modelos GP formulados en AMPL mediante el solver Gurobi 12.0.3, empleando la parametrización correspondiente al caso real analizado. Las ejecuciones se realizaron en una computadora con procesador Intel Core i7-1260P y 16 GB de memoria RAM. Como regla general se ejecuta hasta alcanzar una solución óptima o alcanzar las 12 horas de resolución. En los casos donde se alcanzaron las 12 horas de ejecución se presenta el GAP de optimalidad correspondiente.

Como se mencionó en la Sección 4.3, con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, los objetivos asociados a preferencias no cumplidas, inestabilidad en la asignación y calidad de servicio se expresaron en términos porcentuales. El detalle del cálculo de dichos porcentajes se presenta dicha sección.

6.1. Resultados para la asignación de médicos

A continuación se presentan los resultados obtenidos junto con el análisis realizado para el modelo de asignación de médicos aplicando datos reales. Para esto se realizó la división entre modelo mono-objetivo, modelo multi-objetivo y por último una comparación con la asignación manual. Los tiempos de ejecución para el caso experimental de médicos de noviembre, tanto para mono-objetivo como multi-objetivo, fueron inferiores a un minuto.

6.1.1. Resultados Mono-objetivo

A partir de los datos presentados en la Sección 5.1, se procedió a ejecutar el modelo considerando cada función objetivo de manera independiente. Es decir, en cada corrida se minimizó en forma aislada uno de los criterios de desempeño definidos: horas extra, preferencias no cumplidas e inestabilidad en la asignación. En la Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos para cada una de estas ejecuciones.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Horas extra	1,00	17,31 %	16,55 %
Preferencias no cumplidas	13,00	4,35 %	7,73 %
Inestabilidad en la asignación	6,00	18,33 %	0,72 %

Tabla 22: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para médicos.

Al minimizar cada objetivo por separado se obtiene el valor más favorable para el criterio considerado en esa corrida. En particular, cuando se minimizan las horas extra, se alcanza un valor de 1 hora extra, aunque ello se acompaña de un 17,31 % de preferencias no cumplidas y una inestabilidad del 16,55 %. Por su parte, al minimizar las preferencias no cumplidas, este indicador desciende a 4,35 % (47 preferencias no cumplidas), mientras que hay 13 horas extra y la inestabilidad en la asignación toma un valor de 7,73 %. Finalmente, al minimizar la inestabilidad en la asignación, se obtiene el menor valor para este criterio, igual a 0,72 % (6 asignaciones inestables), aunque con un aumento de horas extra a 6 y el porcentaje de preferencias no cumplidas, que alcanza el 18,33 %.

Los resultados obtenidos evidencian la existencia de compromisos entre los distintos criterios de desempeño del problema, ya que la mejora en uno de ellos implica, en general, un deterioro en al menos uno de los restantes. En consecuencia, las corridas mono-objetivo permiten identificar soluciones extremas y caracterizar el comportamiento de las soluciones frente a cada criterio considerado de forma aislada, pero no necesariamente conducen a alternativas equilibradas desde el punto de vista de la planificación. En el contexto real del servicio, utilizar alguna de estas asignaciones puede ocasionar horas extra, preferencias no cumplidas e asignaciones no estables en el personal, en función de que par de objetivos no se toma en cuenta. Por lo tanto, para generar una herramienta en la ayuda de la toma de decisiones en el armado de cronogramas, y según lo mencionado en la Sección 4.4, se descartan las soluciones sesgadas de mono-objetivo.

Además, estos resultados constituyen la base para la formulación multi-objetivo posterior, ya que los mejores valores obtenidos en cada corrida individual se utilizan para definir las metas del modelo de Programación por Metas. De este modo, las soluciones mono-objetivo no solo permiten analizar las compensaciones existentes entre criterios, sino también establecer un punto de comparación para evaluar el desempeño de la solución de compromiso. Si bien el análisis presentado en esta sección se centra en indicadores globales, las distintas corridas también generan efectos diferenciados en la distribución de la carga de trabajo y en el cumplimiento de preferencias a nivel individual. Estos aspectos serán retomados en la siguiente sección al comparar las soluciones mono-objetivo con la formulación multi-objetivo.

6.1.2. Resultados Multi-objetivo

Con el fin de construir la formulación multi-objetivo mediante Programación por Metas, se definieron valores meta para cada uno de los criterios de desempeño conside-

rados. Dichas metas fueron establecidas a partir de los mejores resultados obtenidos en las corridas mono-objetivo, siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 4.5. De esta manera, la meta de horas extra se fijó en 1 ($GO_HE = 1$), la meta de preferencias no cumplidas en 47 ($GO_PREF = 47$) y la meta de inestabilidad en la asignación en 6 ($GO_EST = 6$), valores que corresponden a las soluciones obtenidas al minimizar individualmente cada uno de estos criterios.

En la Tabla 23 se presentan, en forma conjunta, los resultados obtenidos para las distintas corridas mono-objetivo y para la formulación multi-objetivo. Se observa que la solución multi-objetivo alcanza 1 hora extra, 6,57% de preferencias no cumplidas y 0,85% de inestabilidad en la asignación. En este sentido, se logra conservar el mínimo valor de horas extra alcanzado y en preferencias no cumplidas e inestabilidad presenta niveles muy cercanos a los mínimos alcanzados al minimizar estos criterios de forma aislada.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Horas extra	1,00	17,31 %	16,55 %
Preferencias no cumplidas	13,00	4,35 %	7,73 %
Inestabilidad en la asignación	6,00	18,33 %	0,72 %
GP	1,00	6,57 %	0,85 %

Tabla 23: Comparación de resultados entre corridas mono-objetivo y formulación multi-objetivo para médicos.

A nivel individual, en la Tabla 24 se presenta el análisis del porcentaje de preferencias no cumplidas por médico para cada objetivo, lo que permite profundizar en el impacto de cada solución en los distintos integrantes del equipo médico. La solución multi-objetivo reduce de forma importante los porcentajes de incumplimiento respecto a las corridas que minimizan horas extra e inestabilidad. Por ejemplo, en los médicos $i = \{1, 2, 4\}$ se registran reducciones significativas al pasar de 20,56 %, 22,78 % y 27,78 % en la corrida de minimización de horas extra a 12,78 %, 8,89 % y 12,22 % en la solución multi-objetivo, respectivamente. De forma similar, respecto a la solución que minimiza la inestabilidad, la formulación multi-objetivo presenta menores niveles de incumplimiento en todos los casos. Asimismo, en los médicos $i = 5$ y $i = 6$ la solución multi-objetivo alcanza un 0 % de preferencias no cumplidas. Si bien la corrida específica de minimización de preferencias continúa siendo la que arroja los menores valores individuales en varios casos, la solución multi-objetivo logra niveles relativamente bajos sin resignar el desempeño alcanzado en los demás criterios.

Médico	Función objetivo			
	Horas extra	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad	Multi-objetivo
1	20.56 %	6.67 %	22.78 %	12,78 %
2	22.78 %	6.67 %	21.11 %	8,89 %
3	10.56 %	3.33 %	11.11 %	5,56 %
4	27.78 %	9.44 %	30.56 %	12,22 %
5	10.00 %	0.00 %	8.89 %	0,00 %
6	12.22 %	0.00 %	15.56 %	0,00 %

Tabla 24: Porcentaje de preferencias no cumplidas por médico según enfoque de resolución.

Desde una perspectiva organizacional, este resultado es relevante porque una menor proporción de preferencias no cumplidas contribuye a una mayor aceptación del cronograma por parte del personal médico. En otras palabras, la solución multi-objetivo no solo mejora el comportamiento agregado del sistema, sino que también reduce la insatisfacción del equipo.

Por otra parte, la distribución de las horas de policlínica asignadas que se muestra en la Tabla 25 también permite identificar diferencias entre enfoques. En términos generales, la solución multi-objetivo conserva una estructura de asignación similar a la obtenida al minimizar horas extra, particularmente en los médicos $i = \{1, 2, 4, 5, 6\}$. Sin embargo, introduce ciertos ajustes en los médicos $i = \{3, 7, 8\}$, con el fin de compatibilizar mejor los distintos objetivos del problema. En particular, el médico $i = 7$ recibe 16 horas de policlínica y el médico $i = 8$ recibe 22 horas en la solución multi-objetivo, lo que refleja una redistribución parcial de la carga ambulatoria respecto de las soluciones extremas.

Médico	Función objetivo			
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas (h)	Inestabilidad (h)	Multi-objetivo (h)
1	40,00	44,00	40,00	40,00
2	40,00	40,00	48,00	40,00
3	8,00	16,00	16,00	8,00
4	62,00	62,00	64,00	62,00
5	44,00	44,00	44,00	44,00
6	48,00	48,00	48,00	48,00
7	18,00	16,00	12,00	16,00
8	20,00	10,00	8,00	22,00

Tabla 25: Cantidad de horas de policlínica asignadas por médico según enfoque de resolución.

En la Figura 2 se presenta la comparación de las horas de policlínica asignadas por médico con el mono-objetivo de minimización de preferencias no cumplidas, con GP

y con las horas contratadas del personal. En dicha figura, se puede observar como la consideración de todos los objetivos en simultáneo permite reducir las horas extras en la asignación que solo consideraba las preferencias.

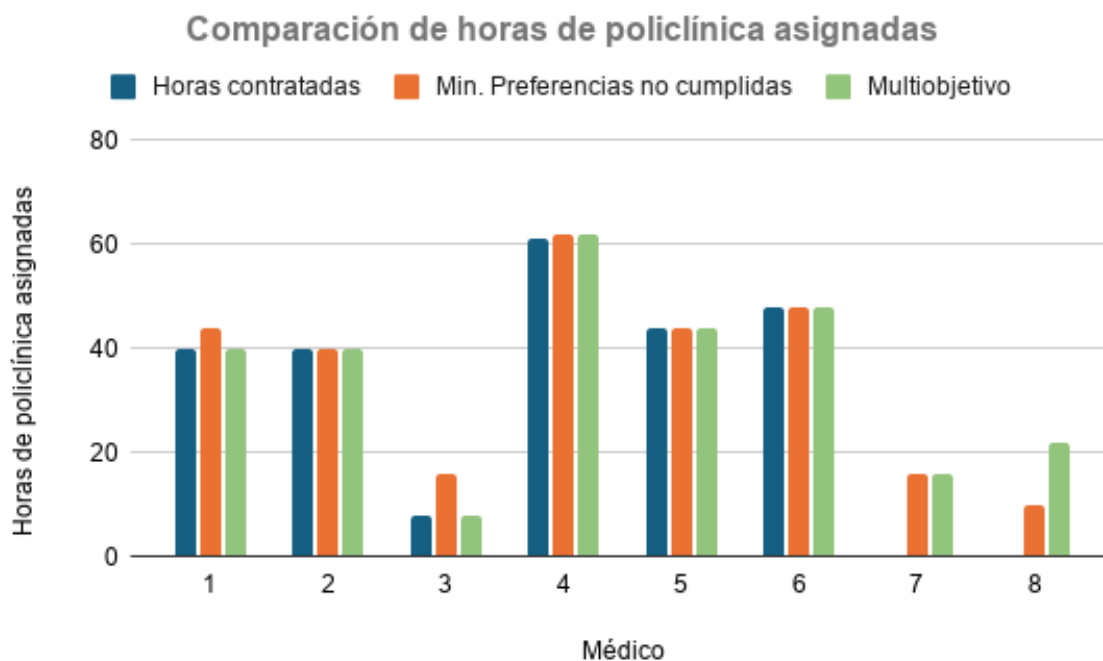


Figura 2: Gráfico comparativo de horas de policlínica contratadas y asignadas por médico, según el modelo de minimización de preferencias no cumplidas y la solución multi-objetivo.

En relación con la cantidad de turnos de guardia asignados por médico, la solución multi-objetivo presenta una estructura muy similar a la observada en las corridas mono-objetivo para los médicos $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ (véase Tabla 26), mientras que las principales variaciones se concentran nuevamente en los médicos $i = 7$ y $i = 8$. En la solución multi-objetivo, el médico $i = 7$ recibe 9 turnos de guardia y el médico $i = 8$ recibe 8, ubicándose en valores intermedios respecto a las soluciones extremas. Esto refuerza la idea de que la formulación multi-objetivo tiende a construir distribuciones más balanceadas de la carga de guardias.

Médico	Función objetivo			
	Horas extra	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad	Multi-objetivo
1	12	12	12	12
2	13	13	13	13
3	5	5	5	5
4	13	13	13	13
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	8	10	7	9
8	9	7	10	8

Tabla 26: Cantidad de turnos de guardia asignados por médico según enfoque de resolución.

Desde una perspectiva de gestión, esta distribución resulta valiosa porque contribuye a una asignación más equilibrada de los turnos del cronograma. Si bien los indicadores globales son fundamentales para evaluar el desempeño de una solución, la aceptación práctica de esta también depende de cómo se distribuye la carga entre los distintos médicos. En este sentido, la solución multi-objetivo ofrece una alternativa más aplicable que las soluciones extremas, ya que no concentra excesivamente las guardias ni las horas de policlínica en un subconjunto reducido del personal.

En síntesis, estos resultados muestran que la formulación multi-objetivo permite obtener una solución más equilibrada. Mientras que las corridas mono-objetivo conducen a soluciones extremas al priorizar exclusivamente uno de los criterios del problema, la solución multi-objetivo logra simultáneamente un desempeño muy favorable en los tres indicadores considerados. En particular, evita los niveles elevados de preferencias no cumplidas e inestabilidad que aparecen al minimizar únicamente las horas extra, y también evita el deterioro significativo del cumplimiento de preferencias que surge cuando se prioriza exclusivamente la estabilidad del cronograma. En consecuencia, el enfoque multi-objetivo se presenta como una alternativa adecuada para la toma de decisiones, al ofrecer un buen balance entre costo económico, aceptación del cronograma y regularidad en las asignaciones.

6.1.3. Comparación con el cronograma real de la institución

En esta sección se compara la solución multi-objetivo obtenida mediante GP con el cronograma elaborado manualmente por la institución para noviembre de 2025. La solución generada puede consultarse en el documento Cronograma GP - Noviembre 2025 (véase Apéndice 3). Al realizar esta comparación, se observa que ambas alternativas logran cubrir la totalidad de la demanda requerida. Sin embargo, difieren de forma relevante en la manera en que distribuyen la carga de trabajo entre médicos fijos y suplentes.

En particular, la solución multi-objetivo recurre únicamente a dos médicos suplentes, mientras que la asignación manual utiliza cuatro. Esto muestra que con una menor dependencia de personal suplente es posible resolver la cobertura necesaria y con una

estructura de asignación más concentrada. Asimismo, la solución propuesta presenta un mejor ajuste a las cargas contractuales del plantel fijo. En el caso de las guardias, los médicos $i = \{1, 2, 3, 4\}$ reciben exactamente la cantidad de turnos prevista por contrato en la solución multi-objetivo, mientras que en la asignación manual se observan desvíos respecto a dichos valores como se puede ver en la Figura 3. De forma similar, en policlínica la solución obtenida con el modelo asigna al plantel fijo una cantidad de horas prácticamente coincidente con la carga contratada total, mientras que la planificación manual se aparta en mayor medida de dicha referencia y compensa parte de la cobertura mediante una mayor utilización de suplentes, como se ve en la Figura 4. En este sentido, la solución multi-objetivo refleja un aprovechamiento más consistente de la capacidad contratada.

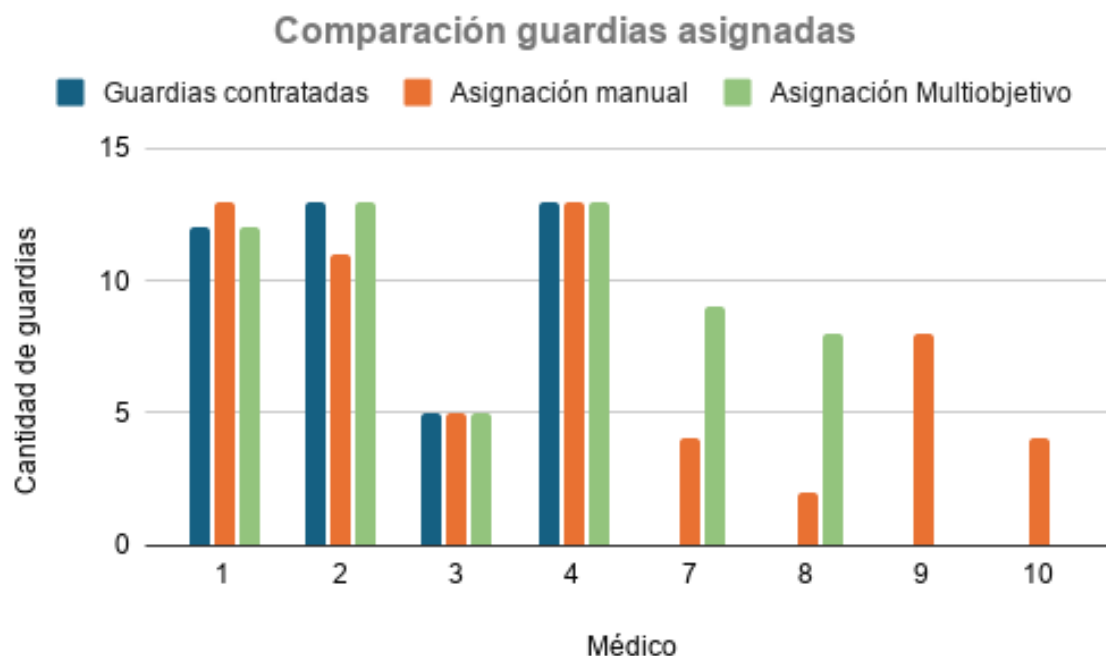


Figura 3: Gráfico comparativo de guardias contratadas y guardias asignadas a cada médico, considerando la planificación manual y la solución multi-objetivo.

Este aspecto también puede apreciarse a nivel individual. Mientras que en la solución manual algunos médicos reciben cargas de policlínica superiores o inferiores a las esperadas según su contratación, la formulación multi-objetivo corrige en gran medida estos desajustes y aproxima la asignación efectiva a la carga prevista para cada profesional (véase Figura 4). Como consecuencia, se logra una asignación que recurre en mayor medida al personal contratado y reduce las horas de policlínica asignadas a suplentes.

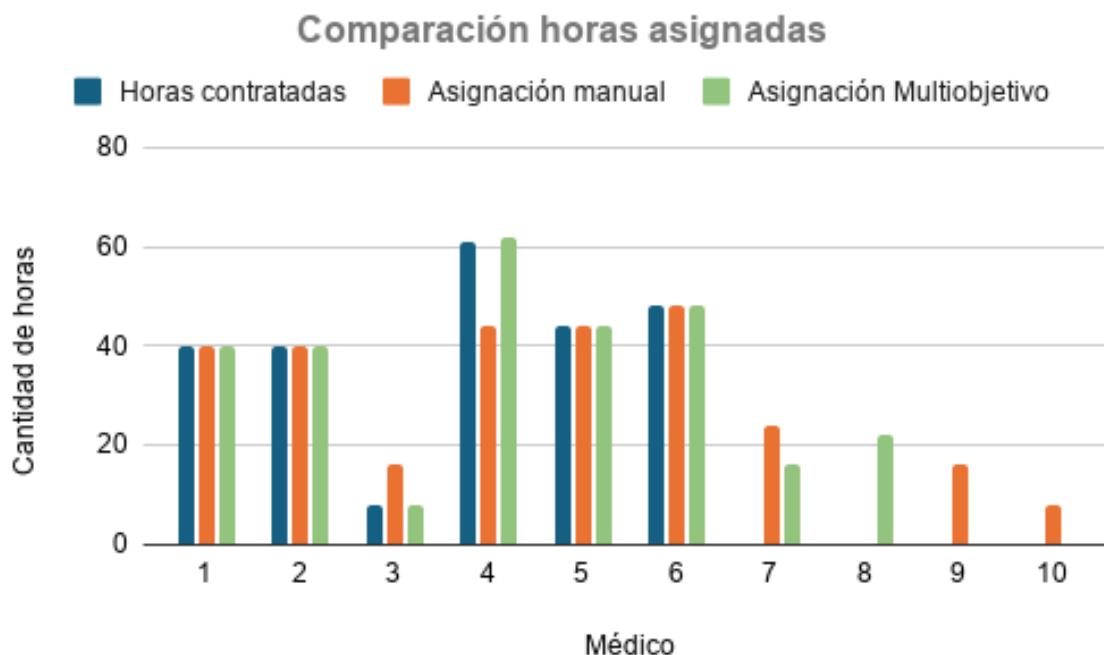


Figura 4: Gráfico comparativo de horas contratadas y horas asignadas a cada médico, considerando la planificación manual y la solución multi-objetivo.

Además de las mejoras observadas en la utilización del plantel fijo, la solución multi-objetivo presenta otra fortaleza relevante: incorpora explícitamente criterios vinculados a la aceptación y a la regularidad del cronograma. En particular, la solución obtenida registra un 6,57% de preferencias no cumplidas y un nivel de inestabilidad de 0,85%, valores que reflejan un desempeño muy favorable en ambos criterios y que, tal como se mostró previamente en la Tabla 23, se ubican entre los mejores resultados alcanzados por el modelo. Desde esta perspectiva, la propuesta no solo permite cubrir la demanda y ordenar mejor la distribución de la carga de trabajo, sino también construir un cronograma que contempla en buena medida las preferencias del personal y que mantiene una asignación estable entre semanas. En consecuencia, la principal fortaleza de la solución multi-objetivo no radica únicamente en obtener una asignación factible, sino en hacerlo de una manera más eficiente, equilibrada y transparente que la práctica manual. El modelo incorpora criterios de calidad organizacional que la planificación manual no contempla formalmente, como el cumplimiento de preferencias y la estabilidad del cronograma. Por ello, se concluye que la herramienta desarrollada constituye un apoyo relevante para la toma de decisiones en el proceso de asignación mensual de médicos, ofreciendo una base objetiva y replicable en otros meses para la elaboración de cronogramas.

6.2. Resultados para la asignación de licenciados

A continuación se presentan los resultados obtenidos junto con el análisis realizado para el modelo de asignación de licenciados aplicando datos reales. Al igual que para médicos, se hará la división entre modelo mono-objetivo, modelo multi-objetivo y por

último una comparación con la asignación manual.

6.2.1. Resultados Mono-objetivo

Los modelos mono-objetivo se resolvieron de forma aislada, minimizando en cada caso una única función objetivo, con el fin de analizar el comportamiento del sistema ante distintos criterios de decisión. Se realizaron cuatro corridas independientes: minimización de horas extra, minimización de preferencias no cumplidas, minimización de la inestabilidad en la asignación y minimización de la calidad de servicio. Este análisis permite identificar las disputas existentes entre los distintos objetivos del problema y constituye la base para la posterior definición del modelo multi-objetivo. Los tiempos de ejecución fueron para todos los casos mono-objetivo aproximadamente un minuto.

La Tabla 27 presenta los resultados globales obtenidos en cada una de las corridas mono-objetivo. Como era de esperar, cada solución logra el mejor desempeño en el objetivo que optimiza, pero a costa de deteriorar, en distinta magnitud, el valor de los restantes objetivos. Esto confirma que los criterios considerados se encuentran en conflicto y que no es posible optimizarlos simultáneamente de forma independiente sin incurrir en compromisos entre ellos.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	1,00	7,83 %	6,95 %	92,65 %
Preferencias no cumplidas	84,00	1,24 %	3,51 %	96,82 %
Inestabilidad en la asignación	103,00	8,00 %	0,29 %	93,06 %
Calidad de servicio	63,00	8,08 %	6,97 %	98,75 %

Tabla 27: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para licenciados.

En la corrida orientada a la minimización de horas extra, la solución obtuvo 1 hora extra total, lo cual es un mínimo para ese indicador. Sin embargo, esta mejora se da a expensas de un peor desempeño en los demás criterios, registrándose un 7,83 % de preferencias no cumplidas, un 6,95 % de inestabilidad en la asignación y una calidad de servicio de 92,65 %. Esto sugiere que una política centrada exclusivamente en contener la sobrecarga horaria afecta negativamente los demás objetivos del personal y servicio. Dado que las horas extra representan un costo adicional para la institución, esta solución puede interpretarse como la más conveniente económicamente entre las analizadas.

Por su parte, la corrida que minimiza las preferencias no cumplidas logra un valor de 1,24 % (77 preferencias no cumplidas). Dicha mejora implica una utilización significativamente mayor de horas extra, que ascienden a 84, así como una pérdida moderada en términos de estabilidad y calidad de servicio. Desde el punto de vista de la gestión, esto implica aceptar un mayor costo económico para la institución a cambio de mejorar la satisfacción del personal.

En la corrida que prioriza la minimización de la inestabilidad en la asignación, el indicador asociado toma valor de 0,29 % (14 asignaciones inestables), reflejando la capa-

cidad del modelo para generar cronogramas estables. Sin embargo, esta solución presenta el peor resultado en horas extra, alcanzando 103, y tampoco mejora el incumplimiento de preferencias, que se ubica en 8,08 %. Esto evidencia que una planificación más estable no resulta gratuita desde el punto de vista operativo, sino que requiere absorber mayores costos en términos de horas adicionales y tener personal no satisfecho.

Finalmente, al maximizar la calidad de servicio, el modelo alcanza el mejor valor en este criterio, con un 98,75 % (400 puntos de habilidad), lo que indica una asignación más consistente con el nivel de habilidad de cada licenciado para las especialidades en las que se desempeña. Aun así, esta solución presenta 63 horas extra y valores de preferencias no cumplidas e inestabilidad similares a los observados en la corrida de minimización de horas extra. En consecuencia, priorizar la calidad técnica de la asignación no garantiza, por sí solo, una solución equilibrada en términos del resto de los objetivos.

A nivel de cada licenciado, se observan diferencias relevantes en los porcentajes de preferencias no cumplidas según el licenciado y la corrida considerada, lo que indica que los costos asociados a la optimización de ciertos objetivos recaen con mayor intensidad sobre determinados integrantes. De forma análoga, la cantidad de horas asignadas a cada licenciado varía sensiblemente entre soluciones. Por ejemplo, el licenciado $i = 13$ presenta un comportamiento particularmente sensible al objetivo priorizado (véase Tabla 88 en Apéndice 5), registrando un 12,59 % de preferencias no cumplidas en la corrida de minimización de horas extra, un 0,37 % al minimizar preferencias, un 6,67 % al minimizar inestabilidad y un 5,56 % al priorizar la calidad de servicio. Esto evidencia que ciertos licenciados pueden verse especialmente afectados cuando se tienen en cuenta criterios distintos de sus preferencias individuales. A su vez, en términos de carga horaria (véase Tabla 89 en Apéndice 5), se observan variaciones significativas entre corridas, que responden en parte al papel que desempeñan los licenciados suplentes como capacidad de respaldo del sistema. En este sentido, un caso ilustrativo es el del licenciado $i = 24$, quien corresponde a un suplente y cuya asignación varía entre 84 horas en la corrida de minimización de horas extra, 106 horas al minimizar preferencias, 56 horas al minimizar inestabilidad y 0 horas al priorizar la calidad de servicio. Esto sugiere que, dependiendo del objetivo priorizado, la solución recurre en distinta medida a los suplentes para absorber parte de la cobertura requerida y reducir así la exigencia sobre los licenciados fijos.

En síntesis, las corridas mono-objetivo permiten verificar que las asignaciones responden de manera consistente al criterio que se le imponen como prioridad, pero también ponen de manifiesto la existencia de intercambios significativos entre eficiencia operativa, estabilidad del cronograma, satisfacción de preferencias y calidad de la asignación. En particular, los resultados evidencian una tensión clara entre objetivos de naturaleza económica y objetivos asociados al bienestar del personal: mientras que la minimización de horas extra conduce a soluciones potencialmente más convenientes en términos de costo para la institución, también tiende a desatender dimensiones como el cumplimiento de preferencias y la estabilidad del cronograma. En sentido inverso, las soluciones que mejor satisfacen las preferencias del personal o que logran cronogramas más estables requieren una mayor asignación de horas extraordinarias, lo que implica un mayor costo para el hospital. Por lo tanto, para generar una herramienta en la ayuda de la toma de decisiones en el armado de cronogramas, y según lo mencionado en la Sección 4.4, se descartan las soluciones sesgadas de mono-objetivo. Se justifica la necesidad de avanzar hacia un enfoque multi-objetivo que permita construir soluciones más equilibradas.

6.2.2. Resultados Multi-objetivo

A partir de los resultados obtenidos en las corridas mono-objetivo, se definieron las metas empleadas en el modelo multi-objetivo. En particular, para cada criterio se tomó el mejor valor alcanzado al minimizarlo de forma aislada, siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 4.5. De esta manera, el enfoque multi-objetivo busca construir una solución que permite aproximarse al punto ideal lo más posible. Las metas utilizadas en el modelo fueron las siguientes: 1 unidad para el criterio de horas extra ($GO_HE = 1$), 77 unidades para el criterio de preferencias no cumplidas ($GO_PREF = 77$), 14 unidades para el criterio de inestabilidad del cronograma ($GO_EST = 14$) y 400 unidades para el criterio de calidad de servicio ($GO_CAL = 400$).

La Tabla 28 presenta los resultados globales obtenidos con el modelo multi-objetivo, así como su comparación con las corridas mono-objetivo previamente analizadas. Los tiempos de ejecución para el caso experimental de licenciados con GP para los datos considerados fue de 1,95 horas.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	1,00	7,83 %	6,95 %	92,65 %
Preferencias no cumplidas	84,00	1,24 %	3,51 %	96,82 %
Inestabilidad en la asignación	103,00	8,00 %	0,29 %	93,06 %
Calidad de servicio	63,00	8,08 %	6,97 %	98,75 %
GP	1,00	2,62 %	0,34 %	97,45 %

Tabla 28: Comparación de resultados entre corridas mono-objetivo y multi-objetivo del modelo para licenciados.

Como puede observarse en la Tabla 28, la solución multi-objetivo alcanza resultados particularmente favorables en términos agregados. En primer lugar, iguala los valores obtenidos en las metas de horas extra e inestabilidad, con 1 hora extra total y un 0,34 % de inestabilidad en la asignación. Al mismo tiempo, mejora de forma significativa el desempeño en preferencias no cumplidas respecto a las corridas de horas extra, inestabilidad y calidad de servicio, alcanzando un 2,62 % que se aproxima al óptimo de 1,24 % más que en las otras corridas. Por último, en términos de calidad de servicio, la solución multi-objetivo obtiene un 97,45 %, ubicándose muy próximo al mejor valor de 98,45 %.

Estos resultados muestran que el modelo multi-objetivo logra una solución más equilibrada, evitando los desempeños extremos observados en algunas corridas mono-objetivo. En particular, mientras que la minimización aislada de horas extra deterioraba sensiblemente el cumplimiento de preferencias y la calidad de servicio, y la minimización aislada de preferencias o de estabilidad implicaba un aumento considerable en las horas extra, la solución multi-objetivo consigue mantener simultáneamente un muy buen desempeño en los cuatro criterios considerados. En este sentido, el enfoque propuesto de

GP logra compatibilizar de manera más adecuada las dimensiones económicas, operativas y vinculadas al personal.

A nivel individual, también se observan mejoras relevantes en la distribución de los resultados. En términos de preferencias no cumplidas, la solución multi-objetivo reproduce en varios casos valores muy cercanos, e incluso iguales, a los obtenidos en la corrida que minimiza preferencias (véase Tabla 90 en Apéndice 5). Por ejemplo, los licenciados $i = \{3, 5, 11, 14, 15, 18, 19\}$ presentan un 0% de preferencias no cumplidas en la solución multi-objetivo, mientras que otros casos que mostraban altos niveles de afectación en corridas como horas extra o inestabilidad reducen sensiblemente su porcentaje. Un caso ilustrativo es nuevamente el del licenciado $i = 13$, quien pasa de 12,59% de preferencias no cumplidas en la corrida de minimización de horas extra y 6,67% en la de inestabilidad, a apenas 0,37% en la solución multi-objetivo. Esto sugiere que la solución no solo mejora los indicadores agregados, sino que también de manera indirecta reduce algunos de los desbalances individuales observados en las soluciones individuales.

En cuanto a la carga horaria, la solución multi-objetivo también presenta una distribución más balanceada entre licenciados fijos y suplentes. En comparación con otras corridas véase Tabla 91 en Apéndice 5), se observa que la solución sigue utilizando suplentes como capacidad de respaldo, pero sin recurrir a niveles tan extremos de asignación como en algunos casos mono-objetivo. Por ejemplo, el licenciado $i = 24$ (suplente), pasa de 106 horas en la corrida de preferencias y 84 en la de horas extra, a 70 horas en la solución multi-objetivo. De forma similar, otros suplentes como los licenciados $i = \{25, 28, 30, 31\}$ mantienen una participación relevante en la cobertura, aunque en niveles intermedios respecto a las soluciones extremas. Esto indica que la solución multi-objetivo consigue aprovechar la flexibilidad aportada por los suplentes sin trasladar de forma excesiva la cobertura ni al plantel fijo ni a la capacidad de respaldo.

En resumen, los resultados obtenidos permiten concluir que la solución multi-objetivo constituye la alternativa más equilibrada entre las analizadas. A diferencia de las corridas mono-objetivo, que optimizan fuertemente un criterio a costa de deteriorar otros, la solución multi-objetivo logra sostener simultáneamente un bajo nivel de horas extra, una muy baja inestabilidad, un buen cumplimiento de preferencias y una calidad de servicio elevada. Por ello, desde el punto de vista de la gestión, se presenta como una herramienta especialmente valiosa para apoyar la toma de decisiones en contextos donde deben compatibilizarse restricciones económicas, requerimientos operativos y condiciones de trabajo razonables para el personal.

6.2.3. Comparación con el cronograma real de la institución

En esta sección, se presenta la comparación la solución obtenida mediante el modelo multi-objetivo (véase documento Cronograma GP - Noviembre 2025 en Apéndice 3) con el cronograma manual elaborado por la institución para el mismo mes para licenciados. Esta comparación permite identificar diferencias relevantes en la forma de distribuir la carga de trabajo entre licenciados fijos y suplentes, así como en la manera en que se cubren las distintas especialidades del servicio.

En primer lugar, los resultados muestran una reducción de las horas extra asignadas al personal fijo. Como se presenta en el cronograma manual (véase Tabla 92 en Apéndice 5) los licenciados $i = 4$ y $i = 12$ alcanzan 102,50 horas asignadas frente a 80 horas

contratadas, el licenciado $i = 8$ registra 95 horas frente a 80, y el licenciado $i = 16$ alcanza 87 horas frente a 80. En cambio, en la solución multi-objetivo prácticamente todos los licenciados fijos quedan asignados exactamente a su carga contractual, con la única excepción del licenciado $i = 2$, que presenta un desvío de apenas 1 hora. En términos agregados, en el cronograma manual se asignan 86 horas extra al personal fijo, equivalentes al 4,62 % del total de horas requeridas, mientras que en la solución multi-objetivo se asigna únicamente 1 hora extra, correspondiente al 0,05 % del total. Para ver estos resultados de forma gráfica se puede consultar Apéndice 4. Esta diferencia evidencia uno de los principales aportes de la solución multi-objetivo: reducir la sobreasignación del personal fijo respecto a su carga horaria contratada. Esta reducción se logra manteniendo la misma cobertura de demanda, a partir de una reasignación más eficiente de la carga hacia el personal suplente. En efecto, la solución multi-objetivo asigna 314 horas a suplentes, frente a 296 horas en el cronograma manual. Además, algunos suplentes incrementan su participación respecto al cronograma manual, como los licenciados $i = 24$ y $i = 30$, que pasan de 0 a 70 y 72 horas asignadas respectivamente (véase Tabla 92 en Apéndice 5). Al mismo tiempo, otros reducen su carga respecto al esquema manual, como los licenciados $i = \{26, 28, 31\}$. Esto refleja que la solución multi-objetivo no sustituye simplemente horas extra por suplencias de forma indiscriminada, sino que reorganiza la cobertura de manera más equilibrada entre los recursos de respaldo. Además, este resultado es relevante desde el punto de vista económico, dado que, según lo señalado por los responsables del servicio, la hora extra de un licenciado fijo tiene un costo superior al de una hora asignada a personal suplente. En consecuencia, la solución propuesta no solo mejora la distribución de la carga horaria, sino que también presenta potencial para generar ahorros económicos para la institución.

Por otra parte, al analizar la cantidad de licenciados involucrados por especialidad, también se observan diferencias relevantes entre cronogramas. Como se presenta en la Figura 5, la solución multi-objetivo utiliza una mayor cantidad de licenciados en algunas de las áreas más relevantes del servicio, particularmente en tomografía, donde intervienen 11 licenciados frente a 9 en el cronograma manual, en resonancia, con 6 frente a 5, y en RX sanatorio modelo, con 8 frente a 7. En RX policlínica, mamografía y densitometría la cantidad de licenciados no se ve afectada, mientras que en block se reduce de 3 a 2. En conjunto, estos resultados sugieren que la solución tiende a distribuir la concentración de carga en un conjunto mayor de personas en aquellas especialidades de mayor actividad.

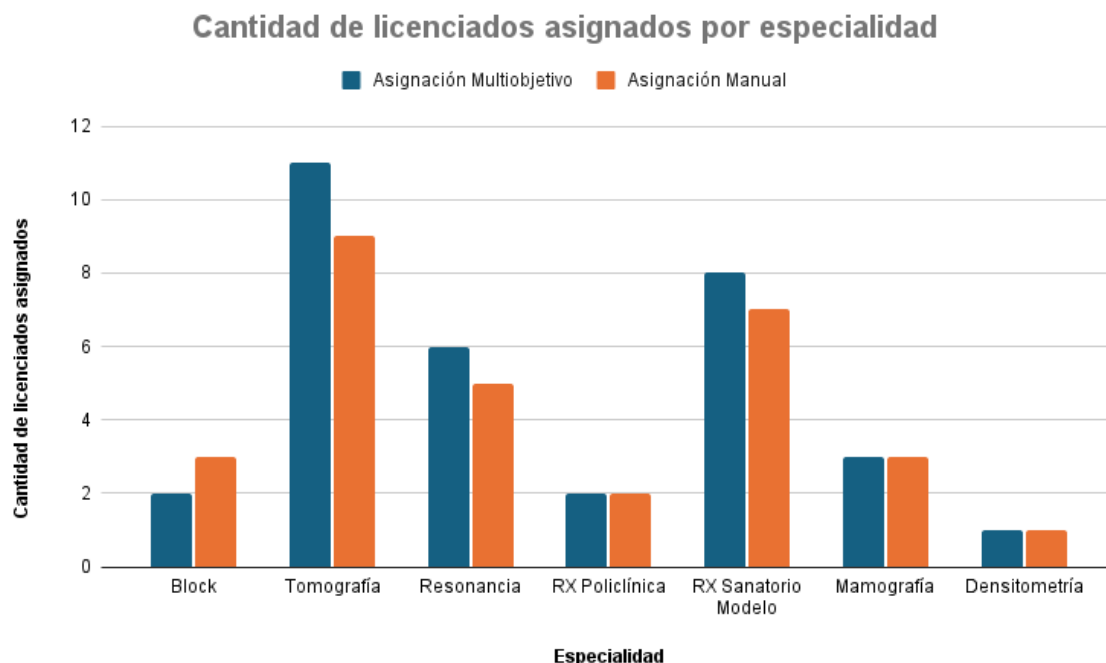


Figura 5: Gráfico comparativo de cantidad de licenciados por especialidad en asignación multi-objetivo y manual.

Desde el punto de vista organizativo, la solución multi-objetivo presenta una estructura más regular y previsible. Dado que el modelo incorpora explícitamente la estabilidad del cronograma como uno de sus objetivos, la asignación resultante tiende a conservar patrones más repetitivos entre semanas. En cambio, el cronograma manual presenta una mayor cantidad de ajustes puntuales y adaptaciones caso a caso, lo que sugiere una menor estandarización en la rutina laboral o una adaptación a eventos sobre la marcha. Si bien este aspecto no fue cuantificado para el cronograma manual mediante el mismo indicador utilizado en la solución GP, la comparación cualitativa de ambas grillas permite apreciar una mayor regularidad intersemanal en la solución optimizada.

Asimismo, debe señalarse que la ventaja del modelo no se limita a la reducción de horas extra. La solución multi-objetivo alcanza simultáneamente un 2,62 % de preferencias no cumplidas, un 0,34 % de inestabilidad y un 97,45 % de calidad de servicio, lo que evidencia que la mejora respecto al cronograma manual no se obtiene sacrificando otras dimensiones relevantes del problema, sino compatibilizando los criterios económicos, operativos y de bienestar.

En síntesis, la comparación con el cronograma real de la institución muestra que la solución multi-objetivo constituye una alternativa superior desde el punto de vista de la gestión. Frente a una planificación manual que recurre en mayor medida a horas extra del personal fijo, el modelo propone una asignación más eficiente, con mejor aprovechamiento de los suplentes, menor concentración de carga en determinadas especialidades y una estructura de trabajo más regular. En este sentido, los resultados obtenidos respaldan el potencial del enfoque desarrollado como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el proceso de asignación mensual de licenciados.

7. Análisis de sensibilidad

Con este fin, tras obtener y analizar los resultados del caso real, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de los modelos propuestos. Este tipo de análisis consiste en modificar los valores de ciertos parámetros con el fin de estudiar cómo dichas variaciones afectan las soluciones obtenidas. De esta forma, permite evaluar el comportamiento de los modelos ante distintos escenarios y analizar cómo se comportan las soluciones obtenidas frente a dichas variaciones.

Se definieron distintos escenarios a partir de modificaciones puntuales sobre parámetros relevantes del problema. Esto permite analizar la robustez de los modelos frente a situaciones plausibles dentro de la operativa de la institución, tales como variaciones en la demanda, ausencias del personal o cambios en el nivel de capacitación de los recursos humanos. Además, brinda información útil para la toma de decisiones, al identificar qué factores tienen mayor incidencia sobre el desempeño del sistema.

A continuación, se presentan los casos de análisis de sensibilidad considerados, organizados según el modelo correspondiente. Al igual que para las ejecuciones de las secciones anteriores, en todos los casos presentados, los modelos fueron ejecutados en AMPL y resueltos con Gurobi 12.0.3. Se utilizó una computadora Lenovo Slim 7 con procesador Intel i7-1260P y 16 GB de memoria RAM. Pero a diferencia de los casos anteriores, para las ejecuciones siguientes (licenciados principalmente) se ejecuta hasta alcanzar un 5% de GAP o 12 horas de ejecución.

Para una mejor lectura de los resultados, los indicadores vinculados a preferencias no cumplidas, inestabilidad en la asignación y calidad de servicio se presentan en términos porcentuales. La metodología utilizada para calcular estos porcentajes se detalla en la Sección 4.3.

7.1. Modelo para médicos

A fin de analizar su comportamiento, se definieron distintos escenarios de sensibilidad asociados a cambios en la disponibilidad del personal, aumentos en la demanda e intercambio de preferencias. Esto permite evaluar el impacto de dichas variaciones sobre la solución y sobre los valores de los objetivos considerados. Cabe señalar que para todos los casos presentados se calcularon las metas siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 4.5.

7.1.1. Variación en la disponibilidad de personal

En este primer escenario, se redujo la disponibilidad del personal médico con el fin de analizar el efecto de una menor dotación sobre la factibilidad de la asignación y sobre los principales indicadores del modelo. Este escenario permite representar situaciones como licencias, enfermedades o restricciones de agenda, que pueden afectar transitoriamente la cobertura del servicio. En particular, interesa evaluar cómo una reducción en la disponibilidad impacta sobre las horas extra, el cumplimiento de las preferencias y la estabilidad de la asignación.

Para este análisis se modificó el parámetro de disponibilidad de los médicos (dis_{id}), reduciendo la dotación de personal durante una semana. Se definieron dos escenarios. En el primero, se disminuyó la disponibilidad de dos médicos: un médico fijo habilitado para

realizar guardias y un médico jubilado que no cubre guardias. En el segundo, se agravó esta situación considerando la indisponibilidad de tres médicos en el mismo período, correspondientes a dos médicos fijos y un médico jubilado.

En forma complementaria, también se ajustaron la cantidad de horas mensuales a asignar (K_i) y la cantidad de guardias (C_i) de los médicos involucrados, bajo el supuesto de que dichos recursos se encontraban de licencia, y por lo tanto, tendrían una menor carga de trabajo ese mes.

Dos médicos no disponibles

En este primer escenario, se redujo la disponibilidad de los médicos $i = 1$ e $i = 6$ entre los días $d = 4$ y $d = 11$ del horizonte temporal de asignación. En forma complementaria, también se ajustó la cantidad de horas mensuales a asignar a cada uno de ellos, reduciéndose de 40 a 28 horas en el médico $i = 1$ y de 48 a 36 horas en el médico $i = 6$, lo que equivale a una disminución de tres turnos de policlínica por médico. Asimismo, en el caso del médico $i = 1$, también se redujo la cantidad de turnos de guardia a asignar, pasando de 12 a 9.

Dado que se modificaron parámetros del problema, también fue necesario ajustar las metas asociadas a cada uno de los objetivos del modelo. La meta asociada a preferencias pasó de 47 a 46 preferencias no cumplidas, mientras que la meta de estabilidad incrementó de 6 a 10 asignaciones inestables. En el caso de la meta correspondiente a horas extra, no se registraron cambios. En la Tabla 29 se presentan los cambios observados en las soluciones obtenidas mediante GP, comparando el caso real con el escenario de indisponibilidad de dos médicos.

Caso	Función objetivo		
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Caso real GP	1,00	6,57 %	0,85 %
Dos médicos no disponibles	1,00	6,57 %	1,57 %

Tabla 29: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con dos médicos no disponibles.

A partir de los resultados presentados en la Tabla 29, se observa, en primer lugar, que el valor asociado al objetivo de horas extra no presenta variaciones respecto al caso real, manteniéndose en 1. Esto se explica porque las horas que dejan de ser asignadas a los médicos $i = 1$ e $i = 6$ son absorbidas por los médicos $i = 7$ e $i = 8$, quienes corresponden a personal suplente. Dado que estos médicos no tienen una carga horaria contractual fija, las horas que se les asignan no generan horas extra. Lo mismo ocurre con las guardias que dejan de ser cubiertas por el médico $i = 1$, las cuales pueden ser reasignadas sin afectar este objetivo.

En cuanto al objetivo de preferencias no cumplidas, no se registran cambios en el valor relativo obtenido, que se mantiene en 6,57 %. Esto indica que la reducción en la disponibilidad de los médicos $i = 1$ e $i = 6$ no empeora el nivel de incumplimiento observado en la solución. Una posible explicación es que la carga liberada por estos

médicos pasa a ser absorbida por suplentes, quienes no poseen preferencias declaradas y, por tanto, no introducen nuevas fuentes de incumplimiento sobre este objetivo. Por el contrario, el objetivo de inestabilidad en la asignación presenta un aumento, pasando de 0,85 % a 1,57 %. Esto sugiere que, aunque la solución sigue siendo factible sin incrementar las horas extra, la menor disponibilidad de médicos reduce la flexibilidad para asignar turnos de manera consistente con el patrón de estabilidad buscado. En otras palabras, al contar con menos alternativas de asignación, se pierde margen para seleccionar combinaciones que preserven de mejor forma la continuidad y regularidad del cronograma.

Tres médicos no disponibles

Continuando con el análisis de sensibilidad sobre la disponibilidad del personal, en este segundo escenario se consideró la indisponibilidad de un tercer médico, con el fin de evaluar si la solución logra cubrir la demanda cuando tres médicos se encuentran ausentes durante una misma semana. Para ello, además de la indisponibilidad de los médicos $i = 1$ e $i = 6$ planteada en el escenario anterior, se incorporó también la del médico $i = 2$ en el mismo período. Dado que este último corresponde a un médico fijo habilitado para realizar guardias, se ajustaron sus parámetros de carga de trabajo mensual, reduciéndose de 40 a 28 horas asignables y de 12 a 9 turnos de guardia.

Como consecuencia de estas modificaciones en los parámetros, también fue necesario obtener las nuevas metas asociadas a los objetivos del modelo (véase Sección 4.5 para proceso de obtención de metas). En este caso, la meta correspondiente a preferencias no cumplidas pasó de 47 a 46, mientras que la meta de inestabilidad se incrementó de 6 a 24. La meta vinculada a horas extra, en cambio, no presentó variaciones. A partir de los resultados presentados en la Tabla 30, se observa que el valor asociado al objetivo de horas extra no presenta variaciones respecto al caso real, manteniéndose en 1. Al igual que en el escenario anterior, esto se explica porque la carga de trabajo liberada por los médicos indisponibles es absorbida en gran medida por médicos suplentes, quienes no poseen una carga horaria contractual fija y, por tanto, no generan horas extra. En este escenario se puede evidenciar que al reducir la disponibilidad se pierde margen para seleccionar combinaciones que preserven la regularidad del cronograma.

Caso	Función objetivo		
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Caso real GP	1,00	6,57 %	0,85 %
Tres médicos no disponibles	1,00	4,81 %	3,86 %

Tabla 30: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con tres médicos no disponibles.

En el caso de preferencias no cumplidas, se observa una disminución del 6,57 % al 4,81 %. Este comportamiento es consistente con la lógica del modelo, ya que al reducir la disponibilidad de los médicos $i = 1$, $i = 2$ e $i = 6$, se eliminan del problema las preferencias asociadas a dichos recursos durante el período considerado. En consecuencia,

disminuye la cantidad total de preferencias a contemplar y, dado que los médicos suplentes que absorben parte de esa carga no poseen preferencias declaradas, el nivel relativo de incumplimiento se reduce respecto al caso real. Por el contrario, el objetivo de inestabilidad en la asignación presenta un deterioro significativo, pasando de 0,85 % en el caso real a 3,86 % en este escenario. Esto evidencia con mayor claridad que, a medida que se reduce la disponibilidad del personal fijo y se necesita de suplentes, se pierde estabilidad en el cronograma.

7.1.2. Variación en la demanda de turnos

En este segundo caso de análisis de sensibilidad se incrementa la demanda de cobertura en un 10 %, 20 % y hasta alcanzar la totalidad de los turnos posibles, con el objetivo de evaluar la capacidad de la dotación actual para absorber aumentos en los requerimientos del servicio. Este escenario resulta de interés porque, en la práctica, pueden presentarse meses con una mayor necesidad de cobertura, ya sea por picos de actividad o por variaciones en la demanda asistencial. En este contexto, interesa analizar hasta qué punto la estructura vigente puede sostener dicha exigencia sin perder factibilidad ni requerir modificaciones adicionales en la asignación de recursos. En particular, se estudia si el conjunto de médicos disponibles en nómina, tanto fijos como suplentes, permite mantener la cobertura completa de los turnos bajo cada escenario de aumento, respetando las restricciones operativas del modelo. Para ello, se modificó el parámetro de demanda (q_{dt}), que indica si un turno t del día d debe ser cubierto o no. En el caso real presentado en la Sección 5.1, la demanda total considerada es de 140 turnos, aunque el horizonte de planificación contempla un máximo de 180 turnos posibles ($card(d) \times card(t) = 180$). En este sentido, el análisis consiste en incorporar progresivamente parte de los turnos que en el caso base no requerían cobertura, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la solución frente a una mayor exigencia de demanda.

Aumento demanda 10 %

En este primer escenario de aumento de demanda se consideró un incremento del 10 % en la demanda de cobertura, lo que equivale a incorporar 14 turnos adicionales a los 140 contemplados en el caso real. Para representar esta situación, se agregaron 2 turnos los sábados y 1 turno los domingos (con excepción del último domingo del horizonte temporal), días en los que originalmente no se requería cobertura. Al igual que para los casos anteriores, al modificar los datos de entrada se evaluaron nuevamente las metas asociadas a cada uno de los objetivos del modelo, las cuales no sufrieron modificaciones con respecto al caso real (véase Sección 6.1.2).

Como se observa en la Tabla 31, no se registran diferencias entre los resultados del caso real y los obtenidos bajo un aumento del 10 % en la demanda. Este resultado es coherente, ya que en el caso base los médicos fijos ya tenían asignada la totalidad de sus horas contractuales y, ante la incorporación de nuevos turnos, se recurre en primer lugar a los médicos suplentes. Dado que estos no poseen una carga horaria fija, dichas asignaciones no generan horas extra. Además, los mismos no tienen preferencias declaradas, por lo que su mayor utilización tampoco impacta sobre el objetivo de preferencias no cumplidas. En definitiva, ni las horas extras, ni las preferencias no

cumplidas, ni la inestabilidad de la solución son sensibles a un aumento del 10 % en la demanda. En este sentido, resulta particularmente relevante analizar la distribución de horas asignadas por médico, ya que allí sí se observan los efectos del aumento de demanda. En particular, los principales cambios se verifican en los médicos suplentes: el médico $i = 7$ pasa de 16 a 62 horas asignadas de policlínica, mientras que el médico $i = 8$ pasa de 22 a 32 horas asignadas de policlínica. Esto confirma que el modelo absorbe el incremento de demanda a través de estos recursos, sin interferir en los valores objetivos. En cuanto a la inestabilidad de la asignación, tampoco se observan variaciones respecto al caso real. Esto se explica porque los turnos adicionales incorporados corresponden a sábados y domingos, y su cobertura puede organizarse de manera regular entre los médicos suplentes, manteniendo el patrón de asignación semana a semana.

Caso	Función objetivo		
	Horas extra	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Caso real GP	1,00	6,57 %	0,85 %
Aumento 10 % de demanda	1,00	6,57 %	0,85 %

Tabla 31: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con 10 % más de demanda.

Aumento demanda 20 %

En este segundo escenario se consideró un incremento del 20 % en la demanda de cobertura, lo que equivale a incorporar 28 turnos adicionales distribuidos entre los sábados y domingos del mes, respecto de los 140 turnos contemplados originalmente. Al igual que en el caso real y Aumento demanda 10 %, las metas de GP se mantuvieron sin modificaciones.

Como se observa en la Tabla 32, el aumento del 20 % en la demanda no genera cambios en los objetivos de horas extra ni de inestabilidad en la asignación, pero sí produce un incremento en el porcentaje de preferencias no cumplidas, que pasa de 6,57 % a 7,96 %. Este resultado indica que, si bien es posible determinar una solución factible sin necesidad de recurrir a horas extra adicionales, la mayor exigencia de cobertura comienza a afectar el cumplimiento de las preferencias del personal. Esto se debe a que los médicos suplentes, si bien son los primeros recursos utilizados para absorber el incremento de demanda, no pueden cubrir turnos adicionales sin violar sus restricciones de carga diaria (ver restricción (16)). En consecuencia, la solución termina asignando esa demanda adicional en turnos que eran preferidos por médicos fijos, lo que permite cubrir los requerimientos del servicio, pero deteriora el valor del objetivo asociado a preferencias. En definitiva, las horas extras y la inestabilidad de la solución no son sensibles a un aumento del 20 % en la demanda.

Caso	Función objetivo		
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Caso real GP	1,00	6,57 %	0,85 %
Aumento 20 % de demanda	1,00	7,96 %	0,85 %

Tabla 32: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con 20 % más de demanda.

Totalidad de turnos posibles

En este último escenario de aumento de demanda se consideró el caso extremo en el que todos los turnos del horizonte temporal requieren cobertura, representando un funcionamiento continuo del servicio y suprimiendo las restricciones de cobertura existentes durante los fines de semana. Esto implica incorporar 40 turnos adicionales respecto de los 140 contemplados en el caso real. A diferencia de los escenarios anteriores, en este caso fue necesario ajustar la meta asociada al objetivo de preferencias, cuyo valor pasó de 47 a 49.

Como se observa en la Tabla 33 los valores de los objetivos no presentan grandes variaciones respecto al escenario anterior de aumento del 20 % en la demanda. Esto pone de manifiesto que, una vez más, para absorber el incremento máximo de demanda sin incumplir las demás restricciones del modelo, fue necesario introducir ajustes en la asignación con foco en la carga diaria de los suplentes. En particular, los médicos fijos mantienen sus horas asignadas pero son reemplazados de algunos de sus turnos preferidos, hacia otros no preferidos, por suplentes que ya alcanzaron su límite de carga en otro día. De este modo, la carga adicional fue absorbida por los médicos suplentes: el médico $i = 7$ pasa de 16 a 78 horas asignadas, mientras que el médico $i = 8$ incrementa su carga de 22 a 100 horas respecto al caso real.

Caso	Función objetivo		
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Caso real GP	1,00	6,57 %	0,85 %
Totalidad de turnos posibles	1,00	8,33 %	0,85 %

Tabla 33: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con la totalidad de turnos posibles.

En los tres últimos escenarios de aumento de demanda se muestra que es posible sostener la cobertura requerida sin recurrir a horas extra de personal fijo o afectar la estabilidad de la solución. No obstante, este resultado se explica por la flexibilidad asociada a los suplentes, cuya carga horaria no se encuentra limitada. Por lo tanto, se puede incrementar su asignación siempre que se respeten la carga diaria máxima y los límites vinculados a la continuidad de las guardias.

7.1.3. Variación de preferencias

En este último caso de análisis de sensibilidad se modifican las preferencias determinadas para los médicos, con el objetivo de evaluar el efecto de estos cambios sobre la asignación resultante y sobre los valores de los objetivos considerados. En particular, interesa analizar en qué medida la solución logra adaptarse a nuevas configuraciones de preferencias y el impacto que tiene en los valores objetivo. Para representar esta situación, se ajustó el parámetro de preferencias ($Pref_{idt}$).

Intercambio de turnos

Se modificaron las preferencias de los médicos $i = 1$ e $i = 6$, donde al médico $i = 1$ se le tomaron preferencias por turnos de policlínica en la tarde-noche ($t = 3$ y $t = 4$) y al médico $i = 6$ se le tomaron preferencias por turnos en la mañana ($t = 1$ y $t = 2$). Este escenario representa una situación hipotética en la que ambos profesionales modifican su rutina habitual y, como consecuencia, pasan a preferir horarios distintos a los originalmente declarados como preferidos. En este caso, únicamente se modificó la meta asociada al objetivo de preferencias, que pasó de 47 a 52 respecto al caso real.

Como se observa en la Tabla 34, no se registran variaciones significativas en los valores de los objetivos respecto al caso real. Este resultado era predecible, dado que las nuevas preferencias incorporadas para los médicos corresponden a turnos que no entran en conflicto con las preferencias declaradas por otros médicos. En consecuencia, no se enfrenta una situación de competencia entre recursos para satisfacer dichas preferencias. Esto sugiere que es posible adaptarse a ciertos cambios en las preferencias del personal sin deteriorar la calidad de la solución, siempre que dichas modificaciones no generen superposición o conflicto con las preferencias del resto de los médicos. En este sentido, el escenario muestra que la incorporación de nuevas preferencias no necesariamente implica un empeoramiento en los objetivos del modelo, sino que su impacto depende de cómo se relacionan con la estructura global de la asignación.

Caso	Función objetivo		
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Caso real GP	1,00	6,57 %	0,85 %
Variación de preferencias	1,00	6,57 %	0,85 %

Tabla 34: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con intercambio de preferencias.

Superposición de preferencias

En oposición al caso anterior, aquí se definieron para el médico $i = 1$ las mismas preferencias que para el médico $i = 2$. Dado que ambos cuentan con la misma carga horaria contractual, el objetivo es analizar en qué medida la solución favorece a uno por sobre el otro cuando existe superposición directa entre sus preferencias y el impacto en la solución. En el caso real, la intersección entre las preferencias de los médicos $i = 1$ e $i = 2$

era nula, y los porcentajes de preferencias no cumplidas alcanzaban valores de 12,78 % y 8,89 %, respectivamente. En cambio, en este escenario de preferencias duplicadas, donde el cumplimiento se ve afectado por dicha superposición, los porcentajes de no cumplimiento pasan a 11,67 % para el médico $i = 1$ y 17,78 % para el médico $i = 2$.

Como se observa en la Tabla 35, el incumplimiento de preferencias del médico $i = 1$ mejora levemente, mientras que el del médico $i = 2$ aumenta de forma significativa. Este resultado sugiere que, ante la imposibilidad de satisfacer simultáneamente ambas configuraciones de preferencias, no es posible repartir el incumplimiento de forma equilibrada entre los recursos involucrados, sino que se prioriza la obtención de un mejor valor global de la solución. Este comportamiento puede verse reforzado por la interacción con el objetivo de inestabilidad. Por ejemplo, si en una determinada semana volver a asignar al médico $i = 1$ en lugar del médico $i = 2$ permite no solo cumplir una preferencia, sino también preservar una asignación más estable, el modelo tenderá a favorecer esa alternativa. En consecuencia, a nivel individual la superposición de preferencias no solo afecta el objetivo asociado a su cumplimiento, sino también los otros objetivos considerados en la optimización.

Médico	Asignación noviembre 2025	Superposición de preferencias
1	12,78 %	11,67 %
2	8,89 %	17,78 %

Tabla 35: Comparación de preferencias no cumplidas en caso real y caso de superposición de preferencias entre médicos 1 y 2.

En la Tabla 36 se presentan los valores globales de los objetivos expuestos, donde se detecta que el porcentaje de preferencias no cumplidas aumenta respecto al caso real, como consecuencia directa de la superposición introducida. En cambio, los objetivos de horas extra e inestabilidad en la asignación se mantienen sin variaciones. Esto indica que el principal efecto de este escenario se concentra en el cumplimiento de preferencias, sin comprometer la carga horaria adicional ni la estabilidad general del cronograma.

Caso	Función objetivo		
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Caso real GP	1,00	6,57 %	0,85 %
Preferencias superpuestas	1,00	7,87 %	0,85 %

Tabla 36: Comparación de resultados obtenidos en caso real y en caso con preferencias superpuestas.

7.2. Modelo para licenciados

A diferencia del modelo de médicos, en el caso de los licenciados se incorpora una complejidad adicional asociada a la especialidad de cada recurso. Dado que no todos los licenciados están capacitados para cubrir todas las especialidades, la asignación

no depende únicamente de la cantidad de personal disponible, sino también de la distribución de competencias dentro de la dotación. En este contexto, una misma variación en la disponibilidad del personal o en la demanda, por ejemplo, puede generar efectos muy diferentes según la especialidad involucrada. Cabe señalar que para todos los casos presentados se calcularon las metas siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 4.5.

7.2.1. Variación en la disponibilidad de personal

En este caso de análisis de sensibilidad se modifica la disponibilidad del personal (dis_{id}) con el objetivo de evaluar cómo responde la solución ante cambios en la dotación de licenciados disponibles para trabajar. En forma complementaria, también se ajustaron la cantidad de horas mensuales a asignar (K_i). A diferencia del modelo de médicos, en este caso el impacto de dichas variaciones no depende únicamente de la cantidad de recursos afectados, sino también del nivel de polivalencia de los licenciados involucrados, ya que algunos de ellos se encuentran capacitados para cubrir múltiples especialidades y, por lo tanto, cumplen un rol especialmente relevante dentro de la asignación.

Aumento de disponibilidad

En este primer caso, se amplía la disponibilidad respecto del caso real mediante la incorporación de los licenciados $i = 18$ e $i = 19$, quienes no se encontraban disponibles en el escenario original. Estos licenciados se caracterizan por ser dos de los recursos más polivalentes de la dotación, dado que cuentan con habilidades para cubrir una mayor cantidad de especialidades. Asimismo, fue necesario definir preferencias para estos nuevos recursos. Para ello, se priorizaron turnos correspondientes a franjas en las que podían cubrir más especialidades, con el objetivo de evitar que la incorporación de dichas preferencias condicionara excesivamente la resolución del modelo.

En este caso, la solución presentada fue obtenida luego de finalizar las 12 horas de ejecución, obteniéndose un GAP de 13,21 %. Esta distancia al óptimo implica que la solución obtenida puede ser dominada por otras, lo cual debe ser tenido en cuenta en la comparación a realizar, dado que en caso de haber obtenido una solución óptima el impacto en los objetivos pudo haber sido distinto. Se adjudica esta mayor dificultad de resolución a un aumento en la cantidad de variables consideradas, tanto por la disponibilidad de estos licenciados como por su capacidad para cubrir varias especialidades.

El impacto de este escenario se refleja en los valores de los objetivos, presentados en la Tabla 37, que se alteran en la medida que se tienen más preferencias expresadas y es más difícil cumplirlas. La calidad del servicio se ve empeorada dado que los dos empleados que se reincorporan de la licencia cuentan con muchas especialidades, lo que implica que sus respectivos ranking de especialidades llegan a valores más altos, pudiendo aumentar los valores de calidad del servicio si se utilizan en su cuarta especialidad por ejemplo.

Caso	Función objetivo			
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Caso real GP	1,00	2,62 %	0,34 %	97,45 %
Todos los licenciados disponibles	1,00	3,24 %	0,38 %	92,74 %

Tabla 37: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con aumento de disponibilidad.

En contrapartida, la incorporación de estos dos licenciados fijos, permite redistribuir la carga de trabajo y reducir la dependencia del personal suplente. En este sentido, se observan modificaciones en la carga horaria asignada a varios suplentes. Como se aprecia en la Figura 6, la carga de trabajo de gran parte de los licenciados suplentes disminuye, siendo esos turnos absorbidos por los licenciados fijos reincorporados. Esto sugiere que, en un escenario de plena disponibilidad de la dotación fija, parte del personal suplente deja de ser necesario para sostener el mismo nivel de desempeño observado en el caso real.

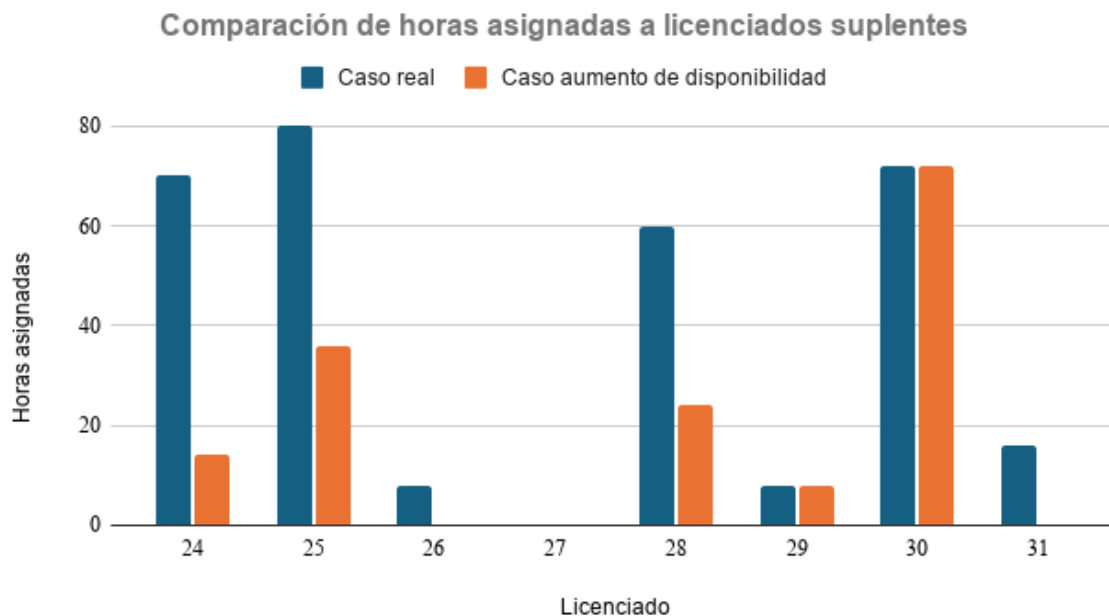


Figura 6: Gráfico comparativo de horas asignadas a licenciados suplentes en el caso real frente al caso de aumento de disponibilidad.

Disminución de disponibilidad

En este segundo escenario, se reduce la disponibilidad del personal: además de no estar disponibles los licenciados $i = 18$ e $i = 19$, también se excluye a dos licenciados

suplentes ($i = 24$ e $i = 30$) los primeros 21 días del mes, cuya ausencia genera un impacto mayor al de un licenciado fijo debido a que los primeros no se encuentran limitados por topes de horas y no poseen preferencias declaradas.

La solución obtenida en la Tabla 38 alcanza el GAP máximo fijado de 5 %, en 4 horas de ejecución. Aunque no corresponde a una solución óptima, a diferencia de lo observado en el caso real, se considera satisfactoria conforme al criterio de aceptación definido para este trabajo.

Caso	Función objetivo			
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Caso real GP	1,00	2,62 %	0,34 %	97,45 %
Disminución de licenciados	14,50	2,62 %	0,59 %	97,85 %

Tabla 38: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con disminución de disponibilidad de licenciados.

El efecto de este escenario se observa, principalmente, en el objetivo de horas extra, que aumenta de 1 a 14,50. Esto indica que, ante la ausencia de suplentes, la solución debe recurrir en mayor medida a los licenciados fijos para poder cubrir la demanda, generando así un incremento significativo en la cantidad de horas extra asignadas. En este sentido, los resultados muestran que, aunque algunos suplentes pueden no ser necesarios cuando la estructura fija se encuentra completamente disponible, su presencia resulta clave en escenarios de menor disponibilidad, y a que permiten sostener la cobertura sin incurrir en horas extra. Asimismo, se observa un aumento en la inestabilidad de la asignación, cuyo valor pasa de 0,34 % a 0,59 %. Esto sugiere que la reducción de recursos flexibles disminuye la posibilidad de construir asignaciones regulares entre semanas, obligándolo a introducir mayores ajustes en la distribución de turnos. Por su parte, la calidad del servicio presenta una muy leve mejora, pasando de 97,45 % a 97,85 %. Este resultado se debe por la ausencia de los licenciados suplentes más polivalentes, quienes en el caso real cubrían algunos turnos en los que no necesariamente constituían la mejor alternativa desde el punto de vista de la calificación relativa. En consecuencia, su exclusión lleva a que ciertos turnos sean cubiertos por licenciados mejor posicionados para esas especialidades, mejorando levemente este indicador.

7.2.2. Variación en la demanda de turnos

Al igual que en el modelo de médicos, en este caso se incrementa la demanda de cobertura de turnos con el objetivo de evaluar la capacidad de respuesta de la estructura actual de licenciados. En este modelo, sin embargo, la factibilidad no depende solo de la cantidad de personal disponible, sino también de las especialidades para las que cada licenciado se encuentra capacitado. Por este motivo, un mismo aumento de demanda puede generar efectos distintos según el área en la que se produzca. A partir de esto, se definieron dos escenarios. En el primero, se incrementó la demanda en especialidades críticas, con menor cantidad de personal capacitado y menor holgura en la asignación.

En el segundo, el aumento se aplicó sobre especialidades con mayor dotación. Dado que varios licenciados comparten competencias entre distintas especialidades, ambos casos permiten analizar cómo responde el modelo ante aumentos de demanda en contextos operativos diferentes. Al igual que para el caso de médicos, para realizar esta variación se alteró el parámetro de demanda, q_{dte} .

Aumento de demanda en especialidades críticas

En este primer escenario, se incrementó la demanda de turnos en las especialidades resonancia ($e = 3$) y mamografía ($e = 6$). En el caso de resonancia, se incorporaron 3 turnos adicionales de guardia interna por semana, lo que representa un incremento total de 96 horas. Por su parte, en mamografía se agregó un turno adicional de policlínica de lunes a viernes, sumando un total de 80 horas extra. La solución presentada en la Tabla 39 corresponde a la obtenida luego de detener la ejecución a las 2,1 horas, con un GAP de 5 %.

Caso	Función objetivo			
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Caso real GP	1,00	2,62 %	0,34 %	97,45 %
Demanda especialidades críticas	1,00	2,58 %	0,36 %	96,99 %

Tabla 39: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con aumento de demanda en especialidades críticas.

Como se observa, y al igual que en el caso del modelo de médicos, el aumento de demanda puede ser absorbido sin recurrir a horas extra o modificar el porcentaje de preferencias no cumplidas respecto al caso real. Sin embargo, se registran leves variaciones en la inestabilidad de la asignación. Esto se debe a que, aunque la carga horaria total de los licenciados fijos se mantiene prácticamente constante, algunos turnos deben reorganizarse para permitir que los licenciados suplentes cumplan con sus restricciones operativas, en particular las asociadas a la cantidad máxima de turnos diarios asignables.

En términos generales, los licenciados fijos $i = 2, 4, 8, 12, 15, 23$ no presentan cambios relevantes en la cantidad total de horas asignadas, como se puede observar en la Figura 7. No obstante, en el caso del licenciado $i = 23$, se observa una reasignación de su carga, dejando de cubrir su otra especialidad para destinar la totalidad de sus horas a esta área crítica. Son los licenciados suplentes los que asumen la mayor parte de la demanda agregada, lo que explica la sobrecarga de trabajo observada en este grupo.

Por su parte, la variación en la calidad del servicio se explica porque, ante el aumento de demanda en especialidades críticas, el modelo pierde margen para asignar en todos los casos a los licenciados mejor posicionados para cada turno. Es decir, la cobertura sigue siendo factible, pero ya no siempre puede realizarse con los recursos de mayor calidad relativa disponibles.

Comparación de horas asignadas por licenciado a Resonancia y Mamografía

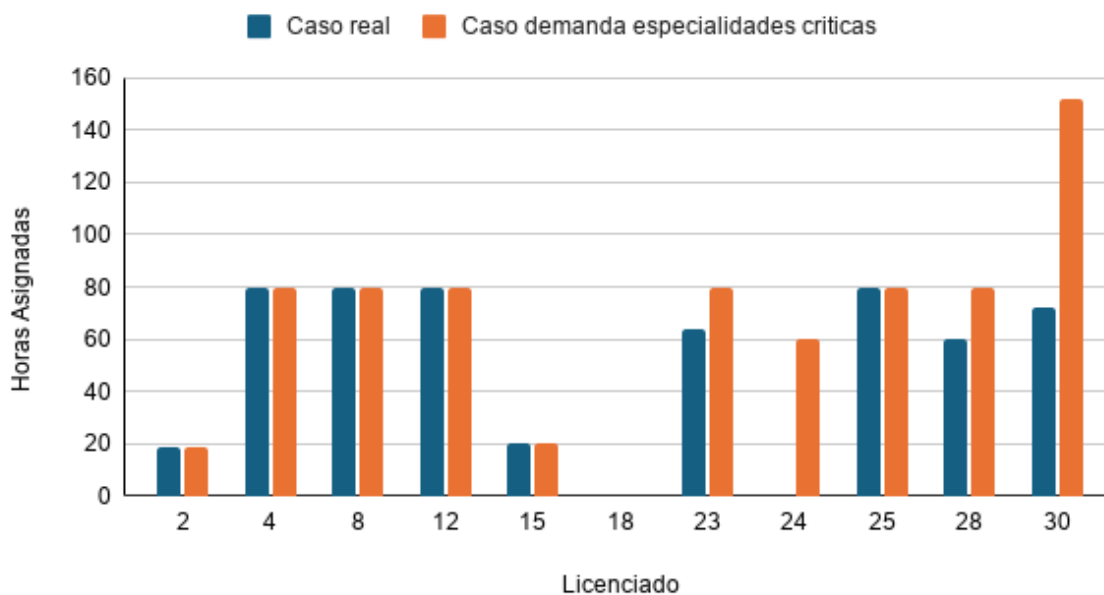


Figura 7: Gráfico comparativo de horas asignadas en especialidades resonancia y mamografía en caso real frente a caso aumento demanda especialidades críticas.

Aumento de demanda en especialidades con perfiles de licenciados compartidos

En este segundo escenario se incrementó la demanda de turnos en especialidades que comparten parte de los mismos licenciados, con el objetivo de analizar cómo responde el modelo cuando debe distribuir recursos polivalentes entre varias áreas que compiten simultáneamente por su cobertura. En particular, se aumentó la demanda en las especialidades tomografía ($e = 2$), RX policlínica ($e = 4$) y RX sanatorio modelo ($e = 5$). Este caso resulta de interés porque, si bien estas áreas cuentan con una dotación relativamente amplia de licenciados capacitados, dichos recursos no son exclusivos de una única especialidad, por lo que un aumento simultáneo en las tres puede tensionar significativamente la asignación.

Para representar este escenario, se incorporaron tres turnos adicionales de guardia interna en tomografía, lo que equivale a un total de 96 horas extra. Asimismo, se agregó un turno adicional de RX Policlínica de lunes a viernes, sumando 80 horas, y un turno adicional de guardia interna de RX sanatorio modelo los sábados y domingos. En conjunto, estas modificaciones representan un incremento total de 256 horas a asignar.

La solución obtenida, presentada en la Tabla 40, no presenta cambios significativos respecto al caso real; su ejecución fue interrumpida luego de 3,5 horas al alcanzar un GAP de 5%.

Caso	Función objetivo			
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Caso real GP	1,00	2,62 %	0,34 %	97,45 %
Especialidad con perfiles de licenciados compartidos	1,00	2,69 %	0,32 %	95,39 %

Tabla 40: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con aumento de demanda en especialidades con perfiles de licenciados compartidos.

Como se observa no se registra un aumento en horas extra, ya que la demanda adicional es absorbida completamente por los licenciados suplentes. Esto puede apreciarse en la Figura 8, donde no se observan variaciones en la cantidad de horas asignadas a los licenciados fijos ($1 \leq i \leq 23$). En cuanto al objetivo de preferencias, se observa una variación mínima, pasando de 2,62 % a 2,69 %. Este resultado es consistente con la mayor exigencia impuesta al sistema, ya que para satisfacer la demanda adicional fue necesario reacomodar parte de los turnos asignados, respetando al mismo tiempo restricciones operativas como la cantidad máxima de turnos diarios y la frecuencia de guardias dentro de períodos de tres días. En consecuencia, algunos licenciados fijos debieron recibir asignaciones distintas a las del caso base. Por su parte, la inestabilidad en la asignación se mantiene en el mismo nivel que en el caso real, lo que indica que el modelo logra absorber este incremento de demanda sin deteriorar la regularidad general del cronograma. Sin embargo, sí se observa una disminución en la calidad del servicio, que pasa de 97,45 % a 95,39 %. Al igual que en el escenario anterior, esto se explica porque el modelo pierde margen para asignar, en todos los casos, a los licenciados mejor posicionados para cada turno.

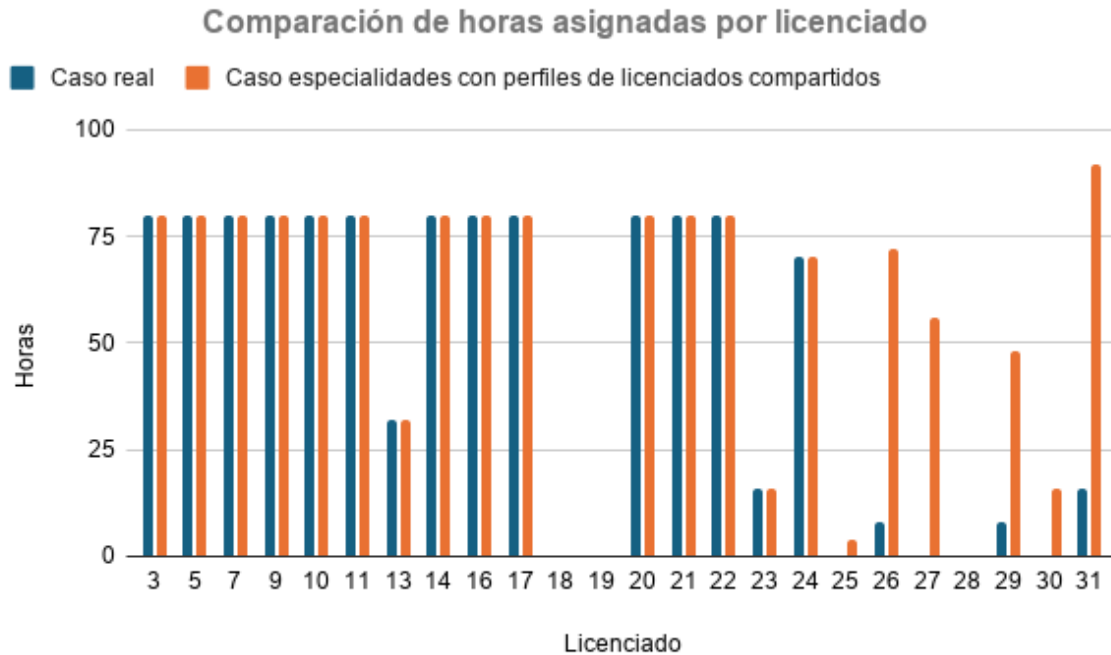


Figura 8: Gráfico comparativo de horas asignadas en especialidades tomografía, RX policlínica y RX sanatorio modelo en caso real frente a caso aumento de demanda en especialidades con perfiles de licenciados compartidos.

7.2.3. Variación en preferencias del personal

En este escenario de análisis de sensibilidad se modifican las preferencias declaradas por parte del personal ($Pref_{idt}$), con el objetivo de evaluar el impacto de estos cambios sobre la asignación resultante y sobre los valores de los objetivos considerados en el modelo. Para ello, se definieron dos casos. En el primero, se alteran las preferencias de ciertos licenciados para analizar cómo responde el modelo ante cambios en los horarios preferidos de trabajo. En el segundo, se superponen las preferencias de dos licenciados, con el fin de estudiar el comportamiento del modelo ante una situación de conflicto por los mismos turnos.

Variación de turnos de preferencias

En este primer caso se redefinieron las preferencias de determinados licenciados, representando una situación hipotética en la que dichos recursos experimentan cambios en su rutina habitual y, en consecuencia, pasan a preferir otros horarios de trabajo. En particular, se alteraron las preferencias de los licenciados $i = 2, 3, 4, 11, 12, 20, 22$. En todos los casos, las nuevas preferencias se asignaron a otros turnos dentro del mismo día, manteniendo sin alterar la cantidad total de preferencias declaradas por cada recurso.

En este escenario se observa en las soluciones presentadas en la Tabla 41 una variación en el objetivo de preferencias no cumplidas, que aumenta de 2,62 % a 4,07 %. Si bien el deterioro es visible, su magnitud sigue siendo moderada, lo que sugiere que es posible mantener cierta capacidad de adaptación frente a cambios en las preferencias del personal. Por otra parte, los valores asociados a horas extra e inestabilidad en la asignación no

presentan variaciones respecto al caso real, lo que indica que esta modificación no compromete ni la carga horaria adicional ni la estabilidad del cronograma.

Caso	Función objetivo			
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Caso real GP	1,00	2,62 %	0,34 %	97,45 %
Variación de preferencias	1,00	4,07 %	0,32 %	96,46 %

Tabla 41: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con variación de preferencias de ciertos licenciados.

Sin embargo, también se observa una disminución en la calidad del servicio, que pasa de 97,45 % a 96,46 %. Esto sugiere que, para adaptarse a la nueva configuración de preferencias sin alterar los demás objetivos, se pierde margen para asignar en todos los casos a los licenciados mejor posicionados para cada turno.

Superposición de preferencias

En este segundo caso, se superpusieron las preferencias de dos licenciados, representando una situación en la que ambos recursos manifiestan preferencia por los mismos turnos. Se trata de un caso límite, cuyo propósito es analizar cómo se responde ante conflictos directos entre preferencias individuales. En particular, se asignó el mismo bloque de preferencias a los licenciados $i = 2, 4, 8, 12$, quienes se encuentran capacitados para la misma especialidad, resonancia ($e = 3$).

Como consecuencia de esta modificación, también fue necesario ajustar la meta de preferencias del modelo de GP, cuyo valor pasó de 77 a 179.

La solución presentada en este caso fue obtenida luego de ejecutar hasta obtener un GAP del 5 % en 2 horas de ejecución.

Como se observa en la Tabla 42, en este escenario se registra un aumento en el porcentaje de preferencias no cumplidas, que pasa de 2,62 % a 4,40 %. Este deterioro, superior al observado en el caso real, resulta consistente con la naturaleza del escenario planteado, ya que ahora son cuatro los licenciados cuyas preferencias entran en conflicto directo por los mismos turnos. En estas condiciones, el modelo intenta satisfacer la mayor cantidad posible de preferencias, pero no puede hacerlo simultáneamente para todos los recursos involucrados. A pesar de ello, los restantes objetivos no presentan variaciones relevantes respecto al caso real: las horas extra y la inestabilidad de la asignación se mantienen constantes, mientras que la calidad del servicio sólo experimenta una leve disminución, pasando de 97,45 % a 97,09 %. Esto sugiere que el principal impacto de este escenario se concentra, como era esperable, en el objetivo de preferencias.

Caso	Función objetivo			
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Caso real GP	1,00	2,62 %	0,34 %	97,45 %
Superposición de preferencias	1,00	4,40 %	0,32 %	97,09 %

Tabla 42: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con superposición de preferencias.

Como puede apreciarse en la Figura 9, el aumento en las preferencias no cumplidas se distribuye de forma relativamente equilibrada entre los cuatro licenciados involucrados. Esto indica que, ante la imposibilidad de satisfacer simultáneamente todas las preferencias en conflicto, en este caso en particular el modelo tiende a distribuir el incumplimiento de manera relativamente balanceada entre los recursos, en lugar de concentrarlo sistemáticamente en uno solo. Esto se opone a lo presentado en el caso de médicos, dado que aquí la asignación puede ser estable para pares días y turnos pero en especialidades distintas.

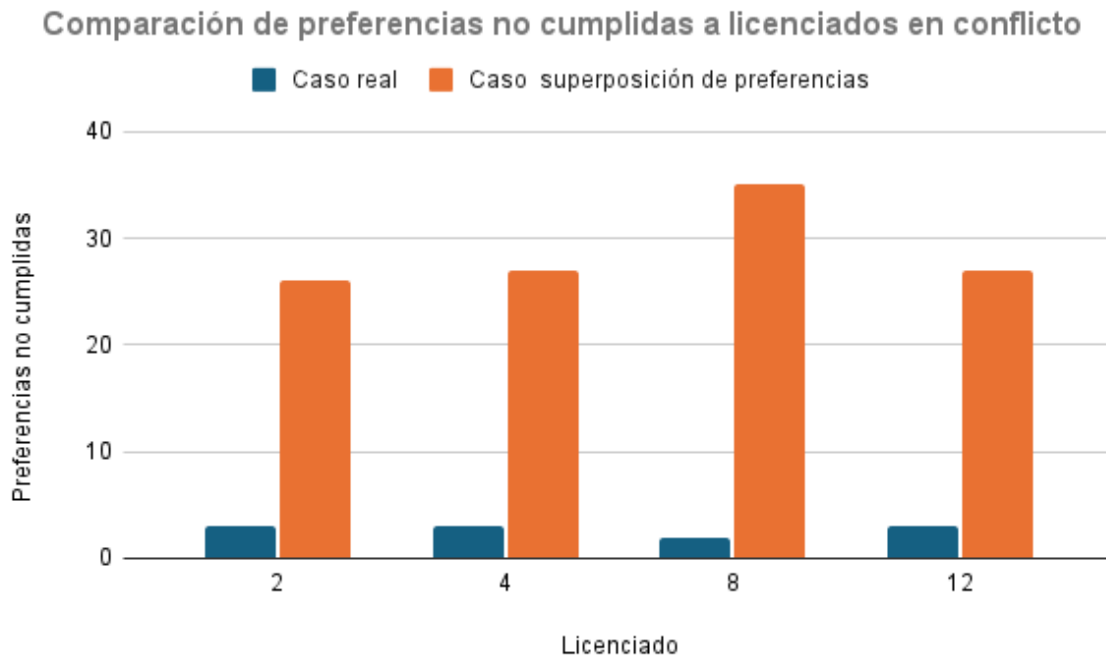


Figura 9: Gráfico comparativo de preferencias no cumplidas a licenciados en el caso real frente a caso de superposición de preferencias

7.2.4. Variación en la especialidad

En este último caso de análisis de sensibilidad se modifican las especialidades que algunos licenciados pueden cubrir, con el objetivo de evaluar si una mayor polivalencia

del personal, y por ende una mayor flexibilidad en la asignación, permite obtener mejores resultados. Este escenario parte del supuesto de que la institución decide capacitar a ciertos licenciados fijos para que puedan asistir en especialidades críticas, es decir, aquellas que cuentan con una menor cantidad de personal capacitado y, por lo tanto, presentan menor holgura en la planificación. De forma de poder realizar esta variación, se alteró el parámetro de especialidad de los licenciados (R_{ie}) y junto con ello se debió jerarquizar nuevamente las especialidades en las que estaba capacitado el personal (H_{ie}). Estas modificaciones se realizaron sobre los licenciados $i = 1, 3, 5, 6$ quienes fueron seleccionados por encontrarse, dentro de la dotación analizada, entre los recursos originalmente capacitados en una única especialidad.

Como consecuencia de estos cambios, también fue necesario recalcular las metas de GP (véase la Sección 4.5 para la metodología de cálculo de dichas metas). La meta correspondiente a horas extra no presentó variaciones, mientras que las restantes sí debieron ajustarse: la meta de estabilidad del cronograma pasó de 14 a 10, la de preferencias de 77 a 70, y la de calidad del servicio de 400 a 336.

La solución de este caso presentada en la Tabla 43 fue obtenida luego de ejecutar el modelo por un total de 12 horas, interrumpiendo la ejecución y obteniendo un GAP de 11,05 %. Esto evidencia que, si bien una mayor polivalencia amplía la flexibilidad de asignación al tener más personas capaces por especialidad, también incrementa de forma importante la complejidad computacional del problema, al aumentar la cantidad de soluciones posibles. Dada la existencia del GAP, las comparaciones a realizar son ante una solución que puede ser dominada, por lo que en caso de haber alcanzado el óptimo el impacto en los objetivos tal vez era otro.

Caso	Función objetivo			
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Caso real GP	1,00	2,62 %	0,34 %	97,45 %
Capacitación en ciertas especialidades	1,00	2,93 %	0,25 %	96,95 %

Tabla 43: Comparación de resultados entre el caso real y el caso con variación en la especialidad de los licenciados.

En cuanto a los resultados obtenidos, la solución se considera como regular por su distancia al óptimo, por lo cual tiene poco sentido compararlo en igualdad de condiciones con el caso real. Aun así, se observa que las horas extra y la inestabilidad del cronograma se mantienen en niveles similares, mientras que las preferencias no cumplidas aumentan levemente y la calidad del servicio disminuye de forma marginal. Se observa que a pesar de tener más personal capacitado, y de manera similar a lo ocurrido en el caso de aumento de disponibilidad, el hecho de tener personas que saben más especialidades puede impactar negativamente en el valor percibido de Calidad de Servicio. La polivalencia, que por un lado aumenta la flexibilidad al haber más personas capacitadas, también implica la existencia de valores más altos en el ranking de especialidad. Es decir, que un licenciado sea hábil en cinco especialidades, implica que cada vez que sea asignado a su quinta

mejor especialidad, se está empeorando la calidad del servicio, de acuerdo a la definición adoptada en este trabajo. Esto está ligado a la forma de representar las mismas y se detalla una alternativa en los trabajos futuros. Por otro lado, este escenario permite identificar con mayor claridad el efecto de la ampliación de especialidades sobre la dificultad de resolución del modelo más que sobre una mejora concreta en los resultados obtenidos.

8. Conclusiones y trabajos futuros

En este documento se presentó el trabajo final del proyecto de grado desarrollado en el marco de la carrera Ingeniería de Producción, en el cual se abordó el problema de asignación de personal en el área de Imagenología de COMEPA, una institución médica uruguaya.

En las primeras etapas del proyecto, se llevó a cabo una revisión de la literatura en profundidad sobre los problemas de asignación de personal en el ámbito de la salud. Esto permitió comprender los principales conceptos vinculados al scheduling, en particular aquellos asociados al Physician Scheduling Problem, y sirvió como base para la posterior elaboración del Estado del Arte (véase Apéndice 1) correspondiente a la revisión bibliográfica realizada.

Una vez finalizada la revisión de la literatura, se iniciaron las comunicaciones con el equipo de COMEPA con el fin de comprender el proceso actual de asignación, relevar las necesidades planteadas y avanzar en el desarrollo de modelos mono-objetivo para médicos y licenciados capaces de representar la realidad operativa del área. Dichos modelos se construyeron a partir de los artículos analizados en el Estado del Arte, incorporando modificaciones específicas para adecuarlos al contexto de COMEPA. Previo a su implementación, ambos modelos fueron sometidos a pruebas en situaciones críticas y casos borde, con el objetivo de validar su correcto funcionamiento. Una vez validado (véase Apéndice 2), se adaptaron los modelos a su formulación de Programación por Metas, los cuales también fueron validados.

Posteriormente, se resolvieron utilizando datos reales correspondientes a médicos y licenciados, y los resultados obtenidos se compararon con las asignaciones reales de un mes específico. En ambos casos, se logró una asignación óptima que cubre la demanda en su totalidad en tiempos de resolución considerablemente menores a los necesarios en la asignación manual. La comparación con el cronograma real de la institución muestra que la solución multi-objetivo constituye una alternativa superior desde el punto de vista de la gestión. A diferencia de la asignación manual que recurre en mayor medida a horas extra del personal fijo, ambos modelos proponen una asignación más eficiente, con mejor aprovechamiento de los suplentes y una estructura de trabajo más regular. A su vez, el modelo incorpora criterios de bienestar del personal, como el cumplimiento de preferencias y la estabilidad del cronograma, y de calidad del servicio que la planificación manual no contempla formalmente. En los resultados obtenidos, para médicos se mantienen 1 hora extra, se alcanzan 6,57 % preferencias no cumplidas y 0,85 % asignaciones no estables. Por su parte, para licenciados se reducen las horas extras de 4,62 % del total requerido a 0,05 %, mientras se alcanzan 2,62 % preferencias no cumplidas, 0,34 % asignaciones no estables y un nivel de calidad de servicio de 97,45 %. Por ello, se entiende que la herramienta constituye un apoyo relevante para la toma de decisiones en el proceso de asignación mensual de médicos y licenciados, ofreciendo una base objetiva y reproducible para la elaboración de cronogramas. En adición, si se sigue el procedimiento adoptado para la fijación de metas, las soluciones obtenidas son Pareto eficientes en sentido fuerte. Se recuerda que esto implica que no existe ninguna solución factible que mejore al menos uno de los objetivos sin empeorar los restantes.

El análisis de sensibilidad permitió comprobar que ambos modelos presentan un comportamiento coherente frente a modificaciones en los valores de parámetros relevantes del problema, tales como la demanda, la disponibilidad del personal, las preferencias

y, en el caso de los licenciados, la estructura de especialidades. En el caso del modelo de médicos, se evidenció que la estructura actual de COMEPA tiene capacidad para absorber variabilidades en demanda y disponibilidad del personal sin comprometer la cobertura. Sin embargo, esta capacidad se apoya en gran medida en la flexibilidad del personal suplente, cuya carga horaria no está acotada, lo que en algunos escenarios puede generar una sobreasignación de estos recursos. Aunque la solución mantiene la factibilidad sin aumentar las horas extra, ello puede implicar un deterioro en la estabilidad del cronograma o en el cumplimiento de las preferencias. En este sentido, también se observó que la solución se adapta adecuadamente a cambios individuales en las preferencias, pero que la superposición entre ellas afecta su cumplimiento y evidencia una priorización del desempeño global de la asignación. Por su parte, el modelo de licenciados mostró un comportamiento consistente, pero más sensible que el de médicos debido a la incorporación de las especialidades. En este caso, la capacidad de respuesta depende no solo de la cantidad de personal disponible, sino también de sus competencias y de la posibilidad de cubrir distintas áreas. Por ello, aumentos de demanda en especialidades críticas o reducciones de personal capacitado generan impactos más importantes en los resultados. Además, se observó que la inclusión de las especialidades incrementa la complejidad de resolución del problema, ya que variaciones puntuales en los datos pueden afectar tanto la calidad de las soluciones como los tiempos de resolución. Finalmente, se concluye que el modelo tiene capacidad para adaptarse en caso de que en el futuro se decida variar algunos de los parámetros, como por ejemplo la demanda, la cantidad de personas o la disponibilidad del personal.

En síntesis, la formulación del problema mediante Programación por Metas permitió contemplar todos los criterios en simultáneo de manera exitosa. Por ende, las asignaciones obtenidas pueden ser de utilidad para la toma de decisiones en la elaboración de cronogramas de médicos y licenciados en COMEPA. Se concluye que los modelos son capaces de representar la asignación de turnos en el área de Imagenología de un centro de salud de características similares al de COMEPA, cumpliendo con los objetivos y el alcance planteado.

Como posibles líneas de trabajo futuro, en primer lugar, se destaca la conveniencia de profundizar en el uso de la Programación por Metas. Existen variantes de esta metodología que permiten priorizar, jerarquizar o ponderar los distintos objetivos del problema. En particular, se sugiere explorar variantes de Extended Lexicographic Goal Programming, como las propuestas por [27], con el fin de lograr un balance más adecuado en el cumplimiento de los objetivos considerados.

En segundo lugar, en relación con la formulación del modelo, podría evaluarse la incorporación de restricciones orientadas a equilibrar el cumplimiento de los objetivos a nivel individual. En otras palabras, sería deseable evitar que las horas extra, las preferencias no satisfechas o las asignaciones inestables sean absorbidas sistemáticamente por un grupo reducido de trabajadores, promoviendo así una distribución más equitativa de estas cargas entre el personal. Incluso, el modelo podría extenderse para balancear la carga de trabajo de los suplentes, quienes actualmente no forman parte explícita de los objetivos, o bien incorporar un límite máximo de horas asignadas a cada suplente, lo cual es una de las limitaciones de los modelos actualmente. Esto permitiría evitar situaciones de sobrecarga, como las observadas en el análisis de sensibilidad ante aumentos de demanda.

En tercer lugar, resulta pertinente mencionar una familia de restricciones que no fue utilizada en el modelo propuesto, pero que podría incorporarse en desarrollos futuros. En particular, podría considerarse una restricción orientada a limitar la cantidad de turnos presenciales que un licenciado puede realizar en un mismo día. Su incorporación permitiría distinguir explícitamente entre la carga diaria total y la carga presencial diaria, lo cual sólo tiene sentido ante la existencia de turnos retén. En los escenarios analizados, esta restricción no resultó necesaria, ya que su efecto quedaba contemplado por la restricción de carga diaria total previamente definida, dado que ambos límites coinciden. No obstante, se considera relevante señalar esta posible extensión del modelo, dado que podría aportar mayor precisión en futuros contextos operativos.

En cuarto lugar, también se identifican oportunidades de mejora en la modelación de las preferencias y de las habilidades. En particular, para mejorar la realidad del indicador de preferencias, podría realizarse un relevamiento actualizado de las preferencias de los funcionarios de COMEPA mediante una encuesta, dado que estas podrían haber cambiado o diferir de los horarios considerados en este trabajo. Además, las preferencias podrían representarse mediante valores no binarios y crecientes, de modo de reflejar con mayor precisión el grado relativo de preferencia de un turno respecto de otro. Por otro lado, en cuanto al ranking de habilidades, la lógica actual se centra en determinar, para cada persona, cuáles son las especialidades en las que mejor se desempeñan. Sin embargo, desde el punto de vista operativo del centro de salud, podría resultar más conveniente adoptar un enfoque inverso, es decir, identificar para cada especialidad cuáles son los trabajadores más adecuados para realizarla.

Por último, particularmente en el modelo de asignación de licenciados, donde en algunos análisis de sensibilidad se registraron tiempos de ejecución considerablemente elevados, se sugiere explorar la aplicación de algunas de las heurísticas relevadas en la elaboración del Estado del Arte (véase Apéndice 1), con el objetivo de reducir los tiempos computacionales y facilitar la resolución de instancias de mayor complejidad.

Referencias

- [1] Encyclopaedia Britannica. Diagnostic imaging. En Encyclopaedia Britannica. s.f. Último acceso: 23 de marzo de 2026. <https://www.britannica.com/science/diagnostic-imaging>.
- [2] RadiologyInfo.org. Profesiones en radiología diagnóstica. En RadiologyInfo.org. s.f. Último acceso: 23 de marzo de 2026. <https://www.radiologyinfo.org/es/info/professions-diagnostic-radiology>.
- [3] Organización Mundial de la Salud. Strengthening medical imaging. En World Health Organization. s.f. Último acceso: 23 de marzo de 2026. <https://www.who.int/activities/strengthening-medical-imaging>.
- [4] Real Academia Española. Asignar. En Diccionario de la lengua española. s.f. Último acceso: 21 de enero de 2026. <https://dle.rae.es/asignar?m=form>.
- [5] Real Academia Española. Turno de trabajo. En Diccionario panhispánico del español jurídico. s.f.. <https://dpej.rae.es/lema/turno-de-trabajo>.
- [6] M. Dos Santos and H. Eriksson. Insights into physician scheduling: A case study of public hospital departments in sweden. *International Journal of Health Care Quality Assurance*, 27(2):76–90, 2014. <https://doi.org/10.1108/IJHCQA-02-2012-0018>.
- [7] J. Van den Bergh, J. Beliën, P. De Bruecker, E. Demeulemeester, and L. De Boeck. Personnel scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 226(3):367–385, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.029>.
- [8] J. O. Brunner, J. F. Bard, and R. Kolisch. Flexible shift scheduling of physicians. *Health Care Management Science*, 12:285–305, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10729-008-9095-2>.
- [9] Real Academia Española. Preferencia. En Diccionario del estudiante. s.f. Último acceso: 21 de enero de 2026. <https://www.rae.es/drae2001/preferencia>.
- [10] M. Shamia, N. Aboushaqrah, and M. Bayoumy. Physician on call scheduling: Case of a qatari hospital. In *2015 6th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO)*, pages 1–6, Istanbul, Turkey, 2015. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2015.7152217>.
- [11] R. Bruni and P. Detti. A flexible discrete optimization approach to the physician scheduling problem. *Operations Research for Health Care*, 3(4):191–199, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2014.08.003>.
- [12] K. Werghi, J. Jlassi, I. Rekik, and A. El Mhamedi. A multi-objective programming model for physician scheduling: A case study. In F. Jawab, editor, *Hospital Supply Chain*, volume 27 of *Integrated Science*. Springer, Cham, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70292-1_16.
- [13] M. Kraul, M. Erhard, and J. O. Brunner. Optimizing physician schedules with resilient break assignments. *Omega*, 129:103154, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103154>.

- [14] M. R. Bowers, C. E. Noon, W. Wu, and J. K. Bass. Neonatal physician scheduling at the university of tennessee medical center. *Interfaces*, 46(1):65–77, 2016. <https://doi.org/10.1287/inte.2015.0839>.
- [15] A. Chinchuluun and P. M. Pardalos. A survey of recent developments in multiobjective optimization. *Annals of Operations Research*, 154:29–50, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10479-007-0186-0>.
- [16] M. Ehrgott and X. Gandibleux. Multiobjective combinatorial optimization – theory, methodology, and applications. In M. Ehrgott and X. Gandibleux, editors, *Multiple Criteria Optimization: State of the Art Annotated Bibliographic Surveys*. Springer, 2002. <https://doi.org/10.1007/b101915>.
- [17] J. Wallenius, K. Miettinen, K. Deb, R. E. Steuer, and S. Zionts. *Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*. Springer, Berlin, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88908-3>.
- [18] R. Bokrantz and A. Fredriksson. Necessary and sufficient conditions for pareto efficiency in robust multiobjective optimization. *European Journal of Operational Research*, 262:682–692, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.012>.
- [19] S. Greco, M. Ehrgott, and J. R. Figueira. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer, New York, 2 edition, 2016.
- [20] D. Jones and M. Tamiz. *Practical Goal Programming*. Springer, New York, 2010. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5771-9>.
- [21] R. T. Marler and J. S. Arora. The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(6):853–862, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00158-009-0460-7>.
- [22] Corporación Médica de Paysandú. Comepa – corporación médica de paysandú. En COMEPA. s.f. Último acceso: 23 de marzo de 2026. <https://www.comepa.com.uy/>.
- [23] M. Cildoz, F. Mallor, and P. M. Mateo. A grasp-based algorithm for solving the emergency room physician scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 103:107151, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107151>.
- [24] M. Kraul. Annual scheduling for anesthesiology medicine residents in task-related programs with a focus on continuity of care. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 32:181–212, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10696-019-09365-4>.
- [25] N. Tran, C. Nguyen, L. Amodeo, F. Yalaoui, and H. Chehade. Multidimensional assignment problem in the medical sector: A case study. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10):901–905, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.416>.
- [26] N. Zaerpour, D. P. Bischak, and M. B. C. Menezes. Coordinated lab-clinics: A tactical assignment problem in healthcare. *European Journal of Operational Research*, 263(1):283–294, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.012>.

- [27] C. Romero. Extended lexicographic goal programming: A unifying approach. *European Journal of Operational Research*, 124(2):395–405, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00283-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00283-2).

Apéndice 1: Estado del arte



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE GRADO – INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN

Problemas de asignación del personal en el ámbito de la salud

Estado del arte

Autores:

Alfonso CALANDRA
Juan Pedro TORNONI
Julieta VIERA

Tutores:

Pedro PIÑEYRO
Gastón NOTTE

Febrero de 2026

Índice

1. Introducción	5
2. Descripción del problema	7
2.1. Concepto de asignación	7
2.2. Asignación en la salud	7
3. Revisión sistemática de la literatura	11
3.1. Metodología de búsqueda	11
3.1.1. Exclusión de artículos por año de publicación	12
3.1.2. Exclusión de artículos por criterios de contenido	12
3.2. Análisis de los resultados	13
4. Análisis de los trabajos seleccionados	17
4.1. Distribución de los artículos según la clasificación propuesta	17
4.2. Problemas orientados a la eficiencia operativa	18
4.2.1. Centrado en costos	19
4.2.2. No centrado en costos	21
4.3. Problemas orientados al bienestar del personal	22
4.3.1. Sin inclusión de preferencias	22
4.3.2. Inclusión de preferencias	26
4.4. Otros	30
5. Conclusiones	35
Referencias	37

Glosario

MILP: Mixed Integer Linear Programming. Programación Lineal Entera Mixta.

NSP: Nurse Scheduling Problem. Problema de asignación de enfermeras.

PSP: Physician Scheduling Problem. Problema de asignación de médicos.

VNS: Variable Neighbourhood Search. Búsqueda de vecindarios variables es un algoritmo metaheurístico para hallar soluciones próximas al óptimo.

GP: Goal Programming. Programación por metas.

DP: Dynamic Programming. Programación Dinámica.

MAP: Multidimensional Assignment Problem. Problema de asignación que considera múltiples dimensiones.

WOA: Whale Optimization Algorithm. Algoritmo de Optimización de Ballenas.

IPPSP: Integrated Physician Planning and Scheduling Problem. Problema Integrado de Planificación y Programación de Médicos.

PASP: Patient Appointment Scheduling Problem. Programación de turnos de pacientes.

Restricciones hard: Refieren a restricciones que se deben satisfacer obligatoriamente para considerar la solución válida.

Restricciones soft: Refieren a restricciones secundarias, que se van a intentar cumplir, pero llegado el caso no son obligatorias para considerar la solución válida.

1. Introducción

Los problemas de asignación de personal han adquirido una relevancia creciente en las últimas décadas debido, por un lado, a la presión por mejorar la eficiencia y reducir los costos operativos y, por otro, a la necesidad de diseñar esquemas de trabajo que contemplen las condiciones laborales y la satisfacción de los profesionales involucrados [1]. En este contexto, el objetivo del presente estado del arte es analizar y sistematizar la literatura existente sobre esta temática, con especial énfasis en la programación de turnos en el ámbito de la salud. En particular, se profundiza en aquellos trabajos que incorporan criterios vinculados al bienestar del personal, tales como la equidad, las preferencias individuales, la ergonomía y la continuidad asistencial.

A partir de una revisión sistemática de la literatura, este estado del arte busca identificar los principales enfoques, metodologías y tendencias en el modelado y resolución de problemas de planificación de personal en el ámbito de la salud. En particular, se analizan trabajos que abordan este problema desde distintas perspectivas, distinguiendo entre aquellos orientados a la eficiencia operativa y aquellos centrados en el bienestar del personal. El análisis permite establecer un marco metodológico y conceptual para el entendimiento del problema.

El documento se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se profundiza en los principales conceptos de asignación en el ámbito de la salud. En la Sección 3 se detalla la metodología utilizada para la búsqueda bibliográfica y se resumen los resultados obtenidos. En la Sección 4 se presentan en detalle los trabajos seleccionados. Finalmente, la Sección 5 presenta las inferencias del estudio.

2. Descripción del problema

El objetivo de esta sección es introducir al lector en el problema de asignación de turnos en el ámbito de la salud, un contexto particularmente complejo debido a la criticidad del servicio, la variabilidad de la demanda y las múltiples restricciones operativas y humanas involucradas. Previo a ello, resulta relevante revisar los principales conceptos y la terminología asociada a este tipo de problemas, con el fin de establecer un marco teórico común.

2.1. Concepto de asignación

En primer lugar, la literatura define el concepto de asignación (scheduling) como “señalar lo que corresponde a alguien o algo” [2]. Hay amplia variedad de problemas de asignación, como lo pueden ser Job Shop Scheduling Problem, Open Shop Scheduling Problems, Parallel Machine Scheduling. El problema relevante para este trabajo es el Physician Scheduling Problem, que consiste en la asignación del personal médico o de la salud a turnos de trabajo en un horizonte temporal, teniendo en cuenta ciertas restricciones (por ejemplo, cobertura de demanda, disponibilidad del personal, límites de carga horaria). En este contexto, se entiende como turno (shift) al “espacio horario durante el cual se desarrolla la actividad laboral” [3]. Los mismos suelen estar definidos por una duración fija, horarios de inicio y fin, y ciertas condiciones asociadas, como descansos obligatorios o restricciones legales. Por último es relevante definir lista de turnos (roster) como “Lista de personas con los trabajos que fueron ordenados a hacer” [4]. Tomando en consideración lo mencionado, la asignación de personal a turnos (o simplemente asignación de turnos) corresponde a la señalización de qué espacios horarios corresponden a quién.

El problema de asignación de personal médico ha cobrado creciente relevancia en las últimas décadas, impulsado por la necesidad de mejorar la eficiencia operativa. En particular, los costos laborales suelen representar una parte sustancial de los costos directos de una organización, por lo que mejoras, incluso moderadas, en los esquemas de asignación pueden generar beneficios significativos [1]. Por otro lado, este problema se encuentra vinculado con la necesidad de atender las demandas y el bienestar de los empleados, incorporando consideraciones como la equidad, la carga de trabajo y la conciliación entre la vida laboral y personal. En esta línea, los autores destacan que, en las decisiones de planificación y asignación de personal, ha adquirido una importancia creciente la consideración de las necesidades y preferencias de los trabajadores [1].

2.2. Asignación en la salud

En el ámbito sanitario, estas decisiones adquieren una complejidad adicional, ya que la programación de turnos involucra distintos perfiles profesionales con responsabilidades, regímenes horarios y restricciones laborales diversas. Por este motivo, y para facilitar la comprensión del presente trabajo, resulta pertinente aclarar los roles que aparecen de

forma recurrente en la literatura sobre programación de personal en salud. A lo largo del documento se hará referencia principalmente a tres tipos de actores que intervienen en los sistemas sanitarios. En primer lugar, médico (physician), entendido como la “persona legalmente autorizada para ejercer la medicina” [5]. En segundo lugar, el residente, o, en algunos casos, denominado interno, que corresponde a los estudiantes de medicina que continúan su formación académica mediante prácticas supervisadas en hospitales. Finalmente, enfermero (nurse), definido como “persona que tiene por oficio atender a los enfermos y colaborar con los médicos” [6]. Esta diferenciación resulta fundamental, dado que cada rol presenta particularidades en sus responsabilidades, horarios y restricciones laborales, aspectos que inciden directamente en los modelos de programación y asignación de turnos analizados en este estudio.

A diferencia de otros ámbitos donde la asignación de personal responde principalmente a objetivos operativos y económicos, en los servicios de salud la programación de turnos adquiere una criticidad particular por su impacto directo en la atención de las personas. Dado que las enfermedades y los accidentes ocurren de forma incierta, los hospitales deben asegurar continuidad operativa las veinticuatro horas del día, garantizando cobertura adecuada para responder a la demanda en tiempo y forma. En este contexto, una asignación deficiente no solo genera ineficiencias, sino que puede afectar la calidad y oportunidad de la atención, lo que distingue a estos problemas de programación de aquellos presentes en entornos como manufactura o logística. Adicionalmente, en muchos centros la generación de cronogramas se realiza aún de manera manual, lo que insume varias horas e incluso días, especialmente cuando se incorporan múltiples categorías de personal, diferentes servicios o unidades del hospital, y restricciones laborales y operativas más complejas [1].

En el ámbito de la salud, los problemas de asignación de personal suelen estudiarse bajo dos variantes principales. Por un lado, el problema de programación de enfermería (Nurse Scheduling Problem, NSP) refiere al proceso de construir y asignar turnos al personal de enfermería, con el objetivo de asegurar la cobertura continua del servicio. Por otro lado, el problema de programación de turnos médicos (Physician Scheduling Problem, PSP) puede interpretarse como una extensión del anterior, aplicada a profesionales médicos.

En comparación con el PSP, el NSP ha sido investigado con mayor profundidad. Además, el PSP tiende a ser más complejo debido a la mayor diversidad de especialidades y actividades, además de condiciones contractuales individuales para médicos y grupales para enfermeras [7]. A su vez, la complejidad de la asignación de médicos hace difícil la estandarización del problema de asignación en un conjunto base de restricciones, a diferencia de lo que sucede para enfermeros [8]. En línea con lo expuesto, mientras que en el NSP el personal de enfermería suele regirse por contratos colectivos (un marco contractual común), en el PSP es habitual que cada médico tenga acuerdos individuales. Esta diferencia implica restricciones horarias específicas por profesional en el PSP, en contraste con un conjunto más homogéneo de restricciones en el NSP [9].

En este contexto, la programación y asignación de personal en salud ha estado sometida a una presión creciente, impulsada tanto por la necesidad de reducir costos

como por el hecho de que los médicos suelen constituir un recurso crítico (cuello de botella) que condiciona la planificación del resto de los recursos asistenciales [7].

La necesidad de garantizar la cobertura del servicio se mantiene como objetivo central, pero en el caso del PSP suelen incorporarse otros aspectos individuales como maximizar las preferencias del médico. En contraste, en el NSP los enfoques suelen ser grupales, ya que se apoyan con mayor frecuencia en acuerdos colectivos o reglas laborales comunes para el conjunto del personal de enfermería. En esta línea, en [10] se profundiza en las diferencias entre el NSP y el PSP, señalando que en muchos hospitales la retención de médicos constituye un desafío. En consecuencia, los modelos de programación médica suelen otorgar mayor peso a la satisfacción individual, por ejemplo, mediante la consideración explícita de preferencias, en comparación con los modelos típicos de programación de enfermería, donde ese componente suele tener un rol menos determinante.

Más allá de estas diferencias entre NSP y PSP, ambos problemas suelen incorporar criterios adicionales vinculados al bienestar y las condiciones del personal, tales como el equilibrio de la carga de trabajo, la equidad en la distribución de turnos, las preferencias individuales, la ergonomía y la continuidad asistencial.

Entre estos criterios, es apropiado introducir el concepto de justicia, definido como “Idea moral que inclina a dar a cada uno lo que le corresponde o pertenece” [11]. En el contexto de la asignación, también llamado equidad (workload fairness), refiere a la asignación justa de tareas o turnos entre los profesionales, con el fin de evitar sobrecargas en algunos individuos y reducir la percepción de desigualdades o favoritismos [12]. En la programación de turnos, esto suele traducirse en distribuir de manera balanceada aquellos turnos considerados más exigentes o menos deseables, por ejemplo, noches, fines de semana o feriados, de modo que no recaigan sistemáticamente sobre un subconjunto reducido del equipo. Sin embargo, el concepto también puede extenderse a los turnos deseables: una asignación excesivamente concentrada de horarios más convenientes puede generar tensiones y percepciones de injusticia, aun cuando no exista una sobrecarga objetiva. En definitiva, la relevancia de cada tipo de turno (conveniente, inconveniente o ambos) depende del contexto específico y del servicio, pero la discusión sobre equidad suele aparecer de manera recurrente como un componente central en estos modelos.

En línea con la distinción entre turnos deseables y no deseables, resulta pertinente introducir el concepto de preferencias (preferences). Se define como: “Elección de alguien o algo entre varias personas o cosas” [13]. En el contexto de asignación en la salud, se refieren a las elecciones o inclinaciones, individuales y, en algunos casos, colectivas, del personal respecto a determinados días, horarios o tipos de turno. Incorporar estas preferencias en la planificación, e intentar satisfacerlas en la medida de lo posible, suele asociarse con mayores niveles de satisfacción del equipo y, en consecuencia, con mejoras en la calidad del servicio prestado.

Un concepto adicional que aparece con frecuencia en la práctica es el de ergonomía. Según la Organización Internacional del Trabajo, refiere a “el estudio sistemático de las personas en el trabajo, con el objetivo de mejorar la situación laboral, las condiciones de trabajo y las tareas realizadas” [14]. En el contexto de la programación de

turnos en salud, la ergonomía se vincula con el diseño de cronogramas que contemplen condiciones adecuadas de descanso y recuperación. Esto incluye, por ejemplo, asegurar tiempos mínimos de sueño entre asignaciones, establecer pausas suficientes entre turnos consecutivos y evitar secuencias prolongadas de trabajo continuo, con el propósito de reducir la fatiga y favorecer el rendimiento y bienestar del personal.

Por su parte, la noción de continuidad en la asistencia (continuity of care) refiere a asegurar una atención sostenida y coherente a lo largo del tiempo para cada paciente, minimizando la fragmentación entre distintos profesionales o turnos y favoreciendo un seguimiento clínico coordinado [15]. Este criterio no es igualmente relevante en todas las áreas, pero cobra especial importancia en contextos donde el cuidado se extiende en el tiempo o donde el conocimiento acumulado del caso por parte del profesional aporta valor (por ejemplo, en internación o en tratamientos de seguimiento). En términos de programación, la continuidad suele modelarse promoviendo que un mismo profesional atienda al mismo paciente, o que un equipo estable permanezca asignado a un mismo servicio o unidad durante un período determinado.

3. Revisión sistemática de la literatura

Esta sección tiene como objetivo describir cómo se realizó la revisión sistemática de la literatura asociada al tema de estudio. En primer lugar, se detalla dónde se efectuó la búsqueda bibliográfica y cuál fue el string utilizado. Luego, se presentan los criterios aplicados para filtrar y excluir trabajos, explicando cómo se llegó al conjunto final de artículos analizados. Finalmente, se resumen los principales resultados obtenidos, de modo de contextualizar el análisis desarrollado en las secciones siguientes.

3.1. Metodología de búsqueda

La búsqueda de artículos se realizó en el repositorio Timbó. Para ellos, se definió el siguiente string:

(“physician scheduling” OR “doctor rostering”) AND (preferences OR
“social choice”) AND (optimization OR “mathematical programming”)
AND (healthcare OR hospital OR “medical service”)

Este string fue diseñado para abarcar de manera integral el tema de estudio. El primer conjunto de términos se orienta a identificar trabajos vinculados con la asignación (scheduling) o programación (rostering) de turnos médicos. El segundo incorpora la dimensión de preferencias, contemplando tanto enfoques individuales (preferences) como aquellos que consideran criterios de decisión colectiva o agregación de preferencias (social choice). El tercero incorpora la dimensión metodológica, al incluir términos asociados a técnicas de optimización y programación matemática que permitan determinar la forma más eficiente de asignar los turnos. Finalmente, el último conjunto de términos asegura que los resultados se encuentren enmarcados en el ámbito de la salud, reduciendo la recuperación de trabajos provenientes de otros dominios no pertinentes.

Una vez ejecutado el string de búsqueda en las colecciones ScienceDirect, SpringerLink y Scopus, mediante el repositorio Timbó, se obtuvieron 173 trabajos. Estos se distribuyeron entre ScienceDirect (110), SpringerLink (50) y Scopus (13), tal como se presenta en la Tabla 1.

Colección	Cantidad de artículos
ScienceDirect®	110
Scopus	13
SpringerLink	50

Tabla 1: Cantidad de artículos del string de búsqueda en los destinos repositorios

A partir de estos resultados iniciales y en función de los objetivos del estudio, se aplicaron filtros adicionales con el propósito de refinar y focalizar la búsqueda bibliográfica, garantizando así la pertinencia de los trabajos seleccionados para el análisis posterior.

3.1.1. Exclusión de artículos por año de publicación

El primer criterio de filtrado correspondió al año de publicación. Se priorizaron artículos publicados en el período 2014-2025, de modo de cubrir un horizonte de 10 años completo a partir de 2014. La extensión hasta 2025 se justifica en que la búsqueda se realizó el 04/05/2025, por lo que se esperaban pocos registros de ese año debido a que el ciclo de publicación aún se encontraba en etapas iniciales. Aplicado este recorte temporal, el conjunto de resultados se redujo de 173 a 113 artículos.

Por otra parte, se incorporaron de forma puntual algunos trabajos fuera del rango definido cuando resultaban especialmente relevantes para los objetivos del estudio por su enfoque metodológico o por su alineación directa con el problema de asignación de turnos con preferencias.

3.1.2. Exclusión de artículos por criterios de contenido

Posteriormente, se excluyeron los artículos que no presentaban un modelo de programación matemática o una formulación explícita del problema, con la única excepción de revisiones bibliográficas o estados del arte considerados pertinentes para contextualizar el tema planteado. A su vez, se descartaron trabajos cuyo enfoque principal se basaba en modelos estocásticos o en simulación, dado que el alcance de esta revisión se centra en enfoques determinísticos. En el caso de artículos que proponían soluciones mediante heurísticas o metaheurísticas, se incluyeron únicamente cuando el trabajo explicitaba la formulación subyacente (por ejemplo, Programación Entera o Programación Entera Mixta) o presentaba restricciones de scheduling relevantes y transferibles. Como resultado de este segundo filtrado, el conjunto se redujo a 38 artículos. Sin embargo, solo fue posible analizar 36 en detalle, ya que dos no pudieron obtenerse.

En la Figura 1, se presenta un diagrama de flujo que resume el proceso de búsqueda, filtrado y selección de los artículos considerados en la revisión.

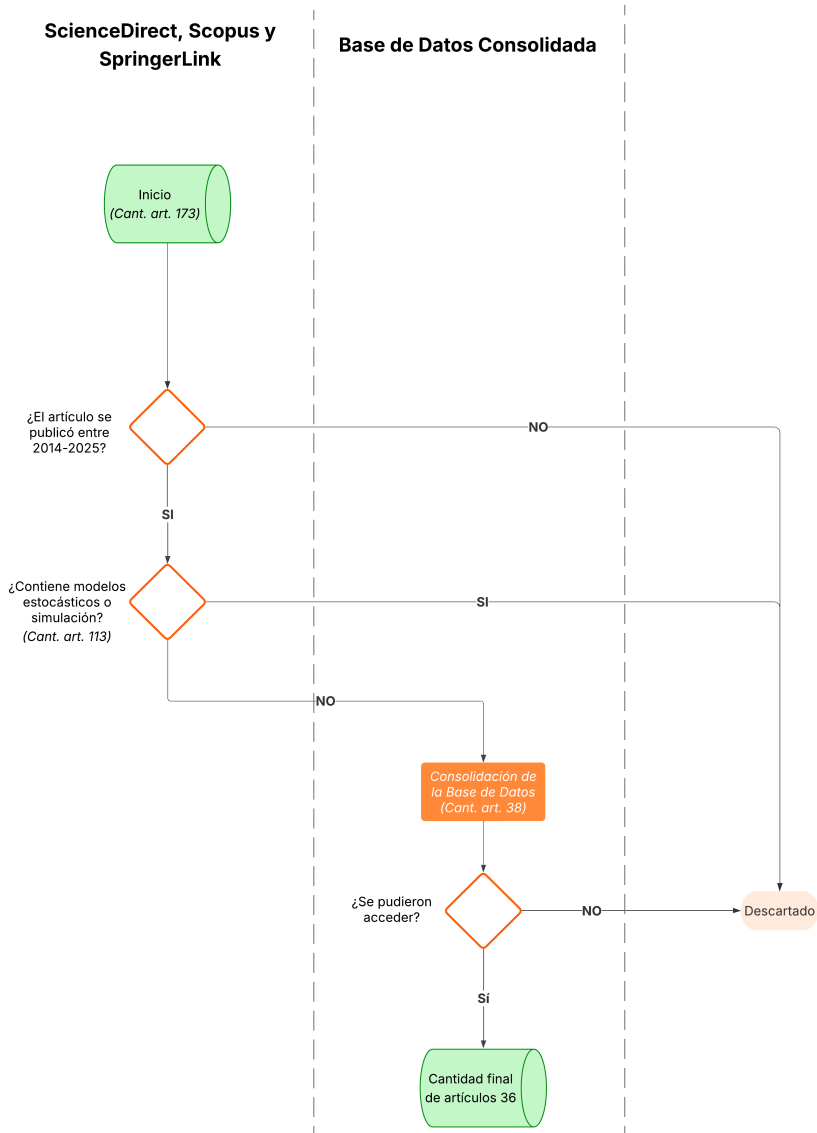


Figura 1: Diagrama de flujo del proceso de búsqueda, filtrado y selección de artículos de la revisión bibliográfica.

3.2. Análisis de los resultados

Más allá de la descripción del procedimiento de búsqueda, los resultados obtenidos permiten extraer algunas conclusiones generales sobre la literatura recuperada y, particularmente, sobre el conjunto final de artículos seleccionados para el análisis.

En primer lugar, la Figura 2 resume el proceso de identificación, filtrado y selección. Se observa que la reducción más significativa en el número de trabajos ocurre al aplicar

los criterios metodológicos, principalmente la exigencia de contar con una formulación explícita o un modelo matemático y la exclusión de enfoques fuera del alcance de esta revisión. Esto sugiere que la búsqueda inicial recuperó una gama amplia de publicaciones relacionadas con la programación de turnos en salud, pero que solo una fracción resulta directamente utilizable para el objetivo de este documento.

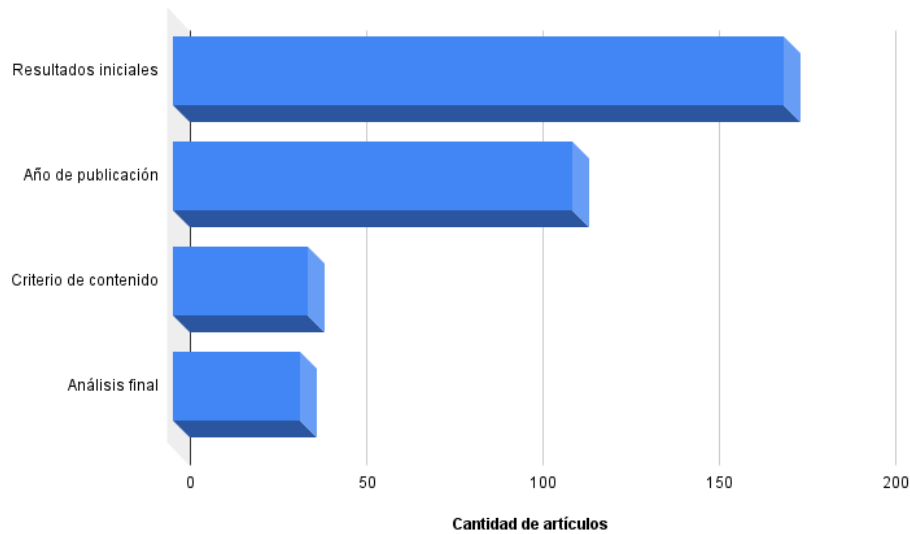


Figura 2: Cantidad de artículos luego de la aplicación de cada criterio de exclusión.

En segundo lugar, la Figura 3 presenta la distribución de los 36 artículos seleccionados según su colección de origen en el repositorio Timbó. Los artículos se encuentran distribuidos entre ScienceDirect, SpringerLink y Scopus, observándose un predominio de ScienceDirect (58,3%), seguido por SpringerLink (27,8%) y, en menor medida, Scopus (13,9%).

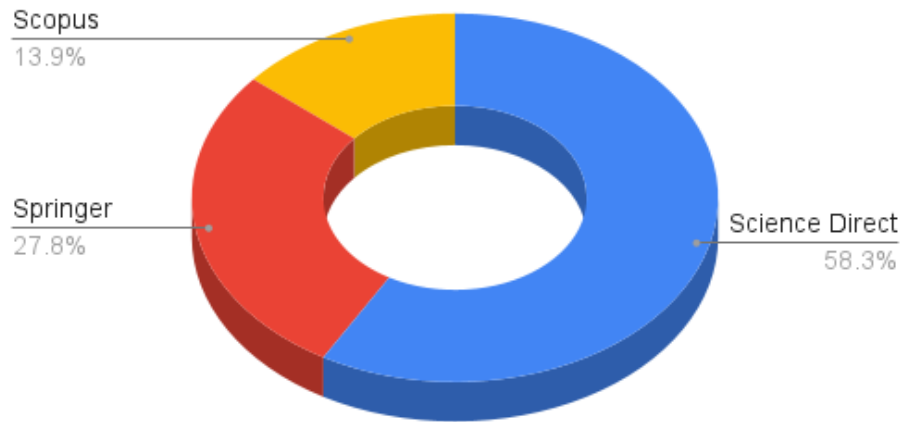


Figura 3: Distribución de los artículos seleccionados por colección.

Por último, el Figura 4 muestra la distribución de los 36 artículos seleccionados según su año de publicación en el período 2014-2024. Se observa un incremento a partir de 2016, alcanzando un máximo en 2019 con 7 publicaciones. A partir de ese año, aunque con oscilaciones, el número de artículos por año se mantiene en valores relativamente constantes, lo que indica la continuidad del interés académico en la temática dentro del campo de la optimización aplicada a la salud.

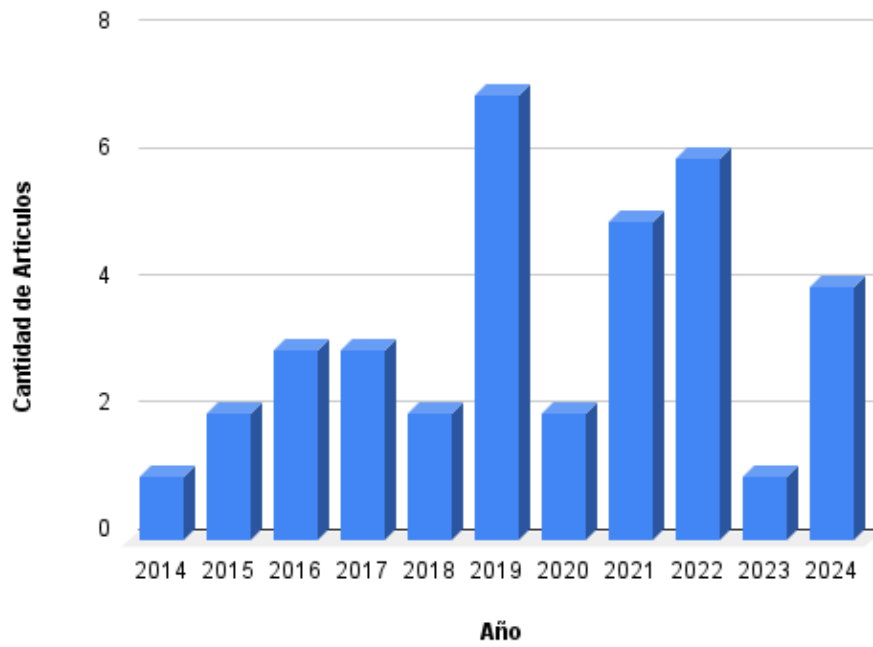


Figura 4: Distribución de los artículos seleccionados por año de publicación.

4. Análisis de los trabajos seleccionados

De modo de poder estructurar la revisión de los trabajos seleccionados, en esta sección se analizaron sus principales características con el propósito de identificar patrones comunes y agruparlos de manera consistente. En particular, se examinó qué problema aborda cada artículo, qué enfoque y método de resolución emplean y cuáles son sus principales conclusiones y aportes. A partir de este análisis, se determinaron los criterios para realizar la clasificación siguiente.

En primer lugar, se observaron diferencias claras en el abordaje del problema. Por un lado, se identificaron trabajos enfocados en la gestión operativa del hospital. Dentro de este conjunto aparecen dos orientaciones principales: algunos artículos buscan reducir costos operativos, mientras que otros no contemplan el aspecto económico. En este sentido, todos estos estudios se agrupan bajo la categoría Orientados a la eficiencia operativa, y se subdividen en Centrados en costos y No centrados en costos.

Por otro lado, se identificaron trabajos cuyo foco principal está puesto en la satisfacción y el bienestar del personal, priorizando criterios como la equidad, el balance de la carga laboral y la estabilidad del cronograma. A este conjunto de artículos se lo definió como Centrados en el personal. Dentro de esta categoría se distinguen dos subgrupos: aquellos trabajos que incorporan explícitamente preferencias del personal, tales como días y horarios preferidos para trabajar o priorización de determinados tipos de turnos por sobre otros y aquellos que no. Estos artículos se subdividen en Inclusión de preferencias y en Sin inclusión de preferencias.

Por último, se presenta la categoría Otros, que incorpora aquellos artículos que no pertenecen a las clasificaciones anteriores.

4.1. Distribución de los artículos según la clasificación propuesta

Con el objetivo de organizar la revisión de forma consistente, se examinó la distribución de los artículos entre las categorías definidas. La asignación resultante se presenta en el Figura 5.



Figura 5: Distribución de artículos según la clasificación propuesta.

Como se observa, predominan los trabajos centrados en el personal (18 artículos), mientras que los enfoques orientados a la eficiencia operativa y la categoría Otros registran una participación equivalente (9 artículos cada una). Esta distribución sugiere que, junto con los objetivos operativos tradicionales, una proporción significativa de la literatura incorpora dimensiones asociadas al bienestar del personal. Estos resultados se alinean con lo planteado en [1], donde se destaca el creciente peso que adquiere la consideración de las necesidades y el bienestar de los empleados en los problemas de asignación de personal.

4.2. Problemas orientados a la eficiencia operativa

En esta sección se agrupan aquellos problemas cuyo foco principal es la eficiencia operativa, abordada desde la perspectiva de la gestión hospitalaria. Si bien estos trabajos contribuyen indirectamente a mejorar la calidad del servicio, su énfasis se encuentra en la minimización de costos y en la optimización de la asignación de tareas y recursos. En general, estos enfoques priorizan la reducción de costos operativos, el uso eficiente de la capacidad disponible y la disminución de los tiempos de espera de los pacientes, a partir de estimaciones de la demanda, sin incorporar de manera primordial criterios orientados al bienestar del personal. En particular, estos trabajos suelen modelar al personal como un recurso operativo, sin considerar como objetivo central las preferencias individuales o condiciones específicas de cada profesional, más allá de su disponibilidad y restricciones contractuales.

Dentro de esta categoría se identifican dos subgrupos: los trabajos centrados explícitamente en la optimización de costos y aquellos que no están centrados en costos, sino que abordan la eficiencia operativa desde otros criterios.

4.2.1. Centrado en costos

Como se mencionó en la Sección 4, dentro de los problemas orientados a la eficiencia operativa se destacan aquellos trabajos cuyo objetivo principal es la reducción de los costos asociados a la asignación del personal. En estos enfoques, la planificación de turnos se aborda fundamentalmente como un problema de optimización económica, sujeto a ciertas restricciones.

Un ejemplo representativo de esta línea es en [16], que aborda el problema de programación de enfermeras (NSP). Los autores proponen un modelo cuyo objetivo es minimizar los costos totales del hospital, garantizando simultáneamente la cobertura de la demanda y el cumplimiento de las reglas contractuales. El trabajo pone especial énfasis en el método de resolución, presentando una adaptación del Whale Optimization Algorithm (WOA), un enfoque metaheurístico inspirado en el comportamiento de caza de las ballenas jorobadas. El algoritmo combina estrategias de explotación, basadas en un encerramiento decreciente y movimientos en espiral alrededor de las mejores soluciones encontradas, con mecanismos de exploración que incorporan operadores específicos para problemas discretos. Esta combinación permite equilibrar la intensificación de la búsqueda en regiones prometedoras del espacio de soluciones con la diversificación necesaria para evitar óptimos locales. Los resultados experimentales muestran que, en comparación con variantes de Branch & Bound, el WOA obtiene soluciones de mejor calidad en instancias de gran tamaño.

Siguiendo la misma lógica de reducción de costos, aunque en un nivel de planificación distinto, en [17] se aborda el problema de Tour scheduling en el ámbito de la salud, entendido como la planificación de conjuntos de turnos, definidos por su hora de inicio, duración y patrón semanal, a lo largo de múltiples ciclos de semanas. Para ello, los autores proponen un modelo implícito que reduce drásticamente la cantidad de variables al no representar cada combinación exacta de días, delegando ese detalle a una fase posterior de post-procesamiento que traduce la solución en un calendario real y factible. El objetivo es determinar cuántos empleados asignar a los distintos tours minimizando los costos de personal, incorporando además una penalización por falta de personal. Los autores evalúan el desempeño del enfoque en distintas unidades médicas con patrones de demanda heterogéneos, mostrando que permite cuantificar el balance entre costos laborales, subcobertura y flexibilidad en la planificación. En particular, concluyen que una mayor flexibilidad en la definición de los conjuntos de turnos, por horarios, fines de semana o contratos part-time, mejora la adecuación de la oferta a la demanda y contribuye a una reducción global de costos.

En una escala similar de análisis de recursos, pero aplicada a las funciones de apoyo de las instituciones médicas, [18] se centra en determinar cuántos asistentes necesita un hospital para garantizar la cobertura de sus tareas, definiendo simultáneamente sus turnos de trabajo de forma eficiente. La meta es minimizar la cantidad de personal requerido sin comprometer el cumplimiento de las actividades. Para ello, los autores proponen un modelo de programación entera mixta (MIP) con horizonte semanal orientado a reducir el costo total del sistema, considerando tanto personal interno como el eventual uso de

trabajadores externos cuando la demanda no puede ser cubierta con recursos propios. La complejidad surge de la variedad de tareas logísticas, con distintos niveles de rigidez temporal y relaciones de precedencia, y de la necesidad de modelar turnos flexibles bajo normativas laborales. Dado que el MIP completo no resulta abordable para instancias grandes, se implementa una descomposición de Dantzig-Wolfe y se resuelve mediante column generation, mediante un problema maestro y subproblemas asociados a turnos y tareas.

En la misma línea metodológica, pero aplicada al personal médico, en [19] se aborda el problema de asignación de médicos, PSP, centrado en la minimización de costos laborales, garantizando simultáneamente la cobertura de la demanda y evaluando la flexibilidad de la programación en términos monetarios. La propuesta considera decisiones estratégicas como la incorporación de turnos variables y la contratación de médicos a tiempo parcial para cubrir picos de demanda. Para ello, se desarrolla un modelo de programación entera mixta que incorpora restricciones laborales habituales vinculadas a secuencias de trabajo y descanso, límites de carga horaria y asignación de pausas. La resolución se realiza mediante una estrategia de column generation, en la que únicamente se incorporan al problema maestro aquellas combinaciones factibles de días, turnos y pausas que mejoran la función objetivo, permitiendo obtener soluciones de buena calidad en tiempos computacionales razonables, incluso para horizontes de planificación extensos. El modelo se valida mediante un caso aplicado en un hospital universitario en Alemania, evidenciando que una menor flexibilidad en la definición de días de trabajo y tipos de turno se traduce en un incremento de los costos laborales, al requerir una mayor dotación de médicos para cubrir la demanda.

Finalmente, con un enfoque aún más integrado, en [20] se aborda el Integrated Physician Planning and Scheduling Problem (IPPSP), en el cual se integran en un único marco las decisiones de planificación, relacionadas con la cantidad y el tipo de médicos a contratar y asignar a los distintos servicios, y las decisiones de programación, vinculadas a la distribución de los turnos a lo largo del horizonte temporal. A diferencia de los trabajos anteriores, el objetivo del modelo no se limita a la minimización de costos, sino que busca maximizar el beneficio neto del sistema, definido como la diferencia entre los ingresos generados por los servicios prestados y los costos laborales, incluyendo salarios regulares, horas extra y penalizaciones asociadas tanto a la subcobertura de la demanda como a la sobreasignación de recursos. Esta formulación permite capturar de manera explícita el equilibrio entre eficiencia económica y nivel de servicio. Debido a que se trata de un problema NP-hard, los autores proponen un enfoque híbrido de resolución que combina Variable Neighborhood Search (VNS), orientado a la exploración de soluciones globales de planificación, con Dynamic Programming (DP), utilizado para refinar la asignación detallada de turnos. Esta combinación metodológica permite abordar simultáneamente decisiones estratégicas y operativas, consolidando al IPPSP como una extensión natural y más completa de los modelos de asignación de médicos centrados en costos.

4.2.2. No centrado en costos

A diferencia de los artículos presentados en la sección anterior, los trabajos incluidos dentro de esta sección adoptan un enfoque distinto dentro de la optimización de recursos hospitalarios, donde el objetivo principal no es la minimización de costos. En su lugar, se priorizan criterios como la coordinación de actividades clínicas, la productividad médica o la reducción de los tiempos de espera de los pacientes.

Comenzando por un caso de planificación estratégica, se analiza un modelo anual orientado a reducir desbalances tanto en la atención de pacientes como en la asignación de rotaciones. En [21] se estudia la programación anual de residentes de medicina interna bajo el esquema 4+1, una variante del modelo X+Y en la que cuatro semanas de rotación hospitalaria se alternan con una semana ambulatoria. Los autores proponen un modelo de programación entera mixta cuyo objetivo es minimizar simultáneamente el desbalance en la cantidad de pacientes atendidos en clínicas de continuidad y el desbalance en la asignación de rotaciones a lo largo del año. Debido a la complejidad del problema, desarrollan una heurística en tres etapas: primero asignan a los residentes a grupos, luego a rotaciones y, finalmente, determinan las sesiones de clínica ambulatoria. El estudio en un caso real evidencia que el enfoque contribuye a mejorar el balance de carga frente a esquemas manuales y ofrece una metodología trasladable a otros programas de residencia basados en plantillas X+Y.

Avanzando hacia un nivel táctico, en [22] se aborda un problema de asignación en clínicas ambulatorias en el que los pacientes deben realizarse estudios diagnósticos inmediatamente antes de la consulta médica. El desafío consiste en coordinar los horarios de laboratorio y consulta de modo que los resultados estén disponibles a tiempo sin exigir a los pacientes una llegada excesivamente anticipada, dificultad que se incrementa cuando varios médicos comparten el mismo laboratorio. El objetivo es construir un cronograma semanal que asigne médicos a bloques de tiempo maximizando el cumplimiento oportuno de los exámenes. Para ello se define un nivel de servicio por bloque como la probabilidad de que el tiempo total requerido para los estudios no supere la capacidad disponible del laboratorio, y se plantea un modelo que maximiza el nivel de servicio mínimo entre todos los bloques, evitando franjas con desempeño significativamente inferior. La formulación incorpora un parámetro asociado a dicho nivel de servicio y restricciones que lo vinculan con la capacidad de testeo, junto con condiciones de asignación y capacidad que aseguran la factibilidad del plan (cada médico-clínica se asigna a un único bloque y ningún bloque excede su capacidad).

Por otro lado, en un plano operativo y con foco en la reducción de tiempos de espera, [23] aborda la asignación de médicos a turnos de atención ambulatoria considerando que los pacientes presentan un arribo no homogéneo y que existe una cola de prioridad para su atención. Para ello, los autores aproximan el tiempo de espera mediante un algoritmo genético calibrado para dos tipos de pacientes (con turno y sin turno), incorporando restricciones de carga laboral por médico, cobertura de demanda y descansos mínimos entre turnos. Además, se incluye un componente de reprogramación (rescheduling) para gestionar ausencias de médicos. El método se evalúa en un caso real en Shanghái,

mostrando un desempeño adecuado en ese contexto.

Por último, con un enfoque también centrado en la dinámica de arribo de pacientes, pero orientado a la calidad del servicio desde una perspectiva de desempeño, en [24] se analiza la asignación de médicos en servicios de emergencia buscando maximizar la productividad, definida como la relación entre pacientes atendidos y recursos disponibles. El trabajo asume que la productividad depende de factores como la especialidad del médico, la franja horaria y el tipo de paciente, y combina un modelo de pronóstico de arribos con índices de productividad (incluyendo variaciones semanales y el peso o severidad de los casos) para alimentar el modelo de optimización. La formulación busca coordinar la disponibilidad de médicos con la demanda esperada, incorporando restricciones de cobertura mínima por turno, límites de horas de trabajo y criterios de balance en la distribución de asignaciones entre médicos.

4.3. Problemas orientados al bienestar del personal

En contraposición con los artículos mencionados anteriormente, en esta sección incluimos todos aquellos problemas que están centrados en el bienestar del personal. En este tipo de enfoques, el problema de asignación se aborda priorizando criterios vinculados a los recursos humanos, buscando una asignación equitativa de los turnos, el balance de la carga de trabajo y, en algunos casos, buscando satisfacer las preferencias de los mismos.

Como fue mencionado en secciones anteriores, estos problemas suelen tomar como punto de partida formulaciones más básicas, como por ejemplo el NSP, cuyo objetivo principal es construir horarios que garanticen la cobertura del servicio. Sin embargo, a medida que se incorporan restricciones adicionales la complejidad del problema aumenta significativamente. Cuando el enfoque está centrado en el personal, uno de los aspectos más relevantes pasa a ser la forma en que se distribuye la carga laboral entre los profesionales, evitando situaciones de sobrecarga o asignaciones desbalanceadas.

Si bien es habitual asociar los enfoques centrados en el personal con la inclusión explícita de preferencias individuales, la literatura muestra que esto no siempre es necesario. Existen trabajos que, aun sin modelar preferencias de manera directa, priorizan el bienestar del personal mediante criterios de equidad y balance en la asignación. Por este motivo, la presente sección se estructura distinguiendo entre aquellos artículos que incorporan preferencias en su formulación y aquellos que, sin hacerlo, adoptan igualmente un enfoque orientado al bienestar del personal.

4.3.1. Sin inclusión de preferencias

Como fue mencionado anteriormente, a continuación se presentan trabajos centrados en el personal, contemplando la equidad en la carga laboral, los días de descanso para cada trabajador, las horas máximas trabajadas, pero sin la inclusión explícita de preferencias.

En el área de emergencias del hospital, [25] aborda el problema de determinar qué

médico debe ser asignado a cada turno en cada día, considerando un horizonte temporal de planificación anual. El objetivo principal del modelo es lograr una distribución justa de turnos, lo que implica balancear de manera equitativa la cantidad de horas trabajadas, así como la asignación de turnos nocturnos, fines de semana y feriados entre los médicos. La formulación del modelo planteado incorpora diversas restricciones operativas y ergonómicas. En primer lugar, se asegura la cobertura de la demanda, asignando solamente a un médico a cada turno y que él mismo realice como máximo un turno por día. A su vez, se incluyen restricciones ergonómicas destinadas a garantizar períodos mínimos de descanso entre determinados tipos de turnos (como los nocturnos o los correspondientes a días feriados) y a limitar la cantidad máxima de turnos de un mismo tipo que un médico puede desempeñar dentro de un período determinado. El modelo contempla restricciones específicas orientadas al control de la carga laboral, buscando que tanto las horas trabajadas como la frecuencia de asignación de turnos particulares se distribuyan de manera equilibrada, incluso dentro de subgrupos de médicos. La función objetivo se define con el propósito de minimizar la diferencia entre los valores mínimos y máximos asociados a estas variables, que actúan como cotas en las restricciones de equidad, permitiendo cuantificar y reducir los desbalances en la asignación de turnos.

Con un enfoque también orientado a la asignación justa, aunque aplicado a un contexto distinto, [26] aborda la programación de guardias médicas en el caso de un hospital de Qatar. En este estudio se analiza el proceso de programación de guardias retén en un hospital de Qatar, donde la asignación se realizaba de forma manual por parte del jefe de servicio para un total de 49 médicos, considerando múltiples actividades y un horizonte temporal mensual. Los médicos se clasifican en dos categorías según su especialidad, lo que da lugar a restricciones específicas que aplican únicamente a determinados grupos o tipos de tareas. El modelo propuesto contempla restricciones hard, entre las que se incluyen límites sobre la asignación de fines de semana consecutivos, el control de las horas semanales trabajadas, la distribución equitativa de fines de semana y licencias, así como una asignación justa de las distintas tareas. Adicionalmente, se incorporan restricciones soft que regulan aspectos como el mínimo de horas semanales y la cantidad de turnos consecutivos dedicados a una misma actividad. Por último, se consideran restricciones de carácter ergonómico, destinadas a limitar el número de días consecutivos de trabajo y a favorecer cronogramas con menor variabilidad temporal. El problema se formula como un modelo de optimización y se resuelve utilizando el software CPLEX, mostrando mejoras sustanciales respecto al proceso manual previamente utilizado.

Continuando con la línea de trabajos orientados a la asignación justa, [27] se busca asignar médicos en hospitales priorizando la equidad en la asignación. Se tienen restricciones de demanda mínima y máxima por tarea en una fecha dada, restricciones condicionales en las tareas, es decir, dos tareas t_1 y t_2 que no pueden ser realizadas el mismo día y restricciones condicionales en los días. En adición, para mejorar la equidad de la asignación, se incluyen restricciones que evalúan para un grupo de tareas, en una fecha dada, para todos los médicos pertenecientes a un grupo, la diferencia entre lo

asignado para uno y otro debe ser menor o igual a un parámetro de entrada.

Complementando los trabajos anteriores, que buscan balancear la carga laboral y cumplir restricciones normativas, en [28] se estudia la programación de médicos en un hospital público con el objetivo de optimizar el uso de los recursos humanos en un contexto de demanda creciente. A diferencia de enfoques centrados únicamente en la asignación de turnos, el trabajo se enfoca en la planificación de tareas médicas específicas como guardias, cirugías, consultas, reuniones y actividades administrativas, e incorpora restricciones contractuales y legales, criterios de equidad y la necesidad de garantizar la continuidad asistencial. Las decisiones del modelo se orientan a definir, para cada médico, el inicio y fin de su jornada y las tareas concretas a realizar, analizando además el impacto de introducir mayor flexibilidad en la asignación. Los resultados reportados muestran mejoras respecto al esquema previo, con reducción del uso de horas extra y una distribución más equilibrada de las actividades, sugiriendo que la flexibilidad puede beneficiar tanto la eficiencia hospitalaria como el funcionamiento del equipo médico.

Saliendo del ámbito estrictamente hospitalario, en [29] se analiza la complejidad de asignar personal en hogares de ancianos y centros de atención a niños con discapacidades, donde la demanda es altamente flexible tanto en el tipo de servicio como en su duración, y dependen de una fuerza laboral con disponibilidad igualmente variable, en la que los empleados suelen trabajar bajo contratos no tradicionales que difieren en carga horaria, días disponibles y posibilidad de realizar horas extra. A ello se suman restricciones legales y normativas sobre descansos y límites de trabajo, lo que incrementa la dificultad de la planificación. El modelo propuesto tiene como objetivo diseñar un cronograma semanal que asigne empleados a distintas demandas de manera eficiente y justa, respetando las condiciones contractuales e individuales. Para ello persigue cuatro objetivos centrales: reducir al mínimo la demanda insatisfecha, aprovechar al máximo las horas contractuales, mejorar la satisfacción del personal mediante asignaciones acordes a sus habilidades y con menor carga de horas extra, y garantizar la equidad en la distribución del trabajo, especialmente durante los feriados. A diferencia de otros enfoques basados en turnos fijos, este modelo utiliza un marco de tiempo continuo, en el que los servicios se asignan de forma flexible en función de la demanda y la disponibilidad de los empleados.

Con un enfoque distinto respecto de la equidad en la asignación, [30] se analiza un caso de aplicación del Multidimensional Assignment Problem (MAP) en el sector salud. La organización dispone de distintos perfiles de empleados, médicos, enfermeros y administrativos, cada uno con un contrato que define las tareas que puede realizar (clínicas, administrativas, etc.) y la proporción de tiempo que debe dedicar a ellas. El desafío consiste en asignar a los empleados a diferentes tareas, ubicaciones y momentos dentro de un horizonte temporal, cumpliendo múltiples restricciones operativas y contractuales. El objetivo principal es minimizar el máximo desajuste entre la carga de trabajo efectivamente asignada y la estipulada en el contrato de cada trabajador, evitando tanto excesos como déficits significativos. Esto no garantiza que los turnos se repartan de manera justa con los criterios de los artículos anteriores (tipo de turnos, frecuencia de trabajo, días de trabajo), pero sí que no haya grandes desvíos para cada individuo. Para abordar este problema, se propone un modelo de programación entera mixta (MILP) que

determina la asignación óptima de empleados a actividades, centros de trabajo y franjas horarias dentro de un horizonte de planificación. El modelo exige que cada empleado sea asignado de acuerdo con su disponibilidad, habilitación y competencias, y que la dotación resultante respete los mínimos y máximos de personal definidos para cada actividad y período. Además, los centros sólo pueden operar durante sus horarios de apertura y deben alcanzar un mínimo de tiempo de actividad acumulado en el horizonte considerado.

En la misma línea de planificación pero enfocada en residentes, en [31] se presenta un modelo para la construcción de calendarios anuales de residentes de anestesiología, considerando tanto restricciones de cobertura clínica como el progreso educativo, analizado bajo criterios de equidad. La propuesta se estructura en dos etapas secuenciales: en la primera, un modelo de programación entera determina el número óptimo de posiciones en cada departamento con el objetivo de maximizar la cantidad de intervenciones posibles y así capacitar al mayor número de residentes. En la segunda, un modelo cuadrático entero mixto utiliza esos resultados para asignar a todos los residentes. Este último incorpora explícitamente en la función objetivo la continuidad asistencial, buscando minimizar tanto los movimientos de residentes entre departamentos como la desviación respecto a los objetivos de progreso educativo en el horizonte de planificación. El estudio de caso, aplicado a un hospital universitario Alemán, demuestra que este enfoque mejora la continuidad asistencial, al permitir mantener una calidad de servicio estable sin necesidad de reemplazar completamente los equipos de un departamento. Asimismo, se logra considerar el progreso educativo de cada residente, para que así pueda tener experiencia en distintos tipos de intervenciones. Como posible mejora, se sugiere profundizar en la inclusión de criterios de equidad que equilibren aún más la distribución de la carga y las oportunidades de formación.

Finalmente, ampliando el alcance hacia la coordinación de agendas entre pacientes y personal, en [32] se estudia el problema de planificación en un centro de radiología. La novedad de este artículo es la integración simultánea de la grilla de citas de pacientes con los horarios del personal tecnólogo. Proponen dos versiones de un modelo de programación entera mixta: una integrada, que construye ambos planes al mismo tiempo, y otra secuencial, donde primero se generan los horarios del personal y luego el calendario de citas. El modelo incorpora restricciones realistas como reglas sindicales, contratos (jornada completa y media jornada), habilidades de los tecnólogos, disponibilidad de máquinas y categorías de exámenes, además de considerar en su función objetivo criterios de eficiencia (maximización de utilización de equipos y pacientes atendidos) y de satisfacción laboral (días libres en fines de semana, estabilidad en asignaciones). Al aplicar el modelo al servicio de resonancia magnética de un hospital canadiense con datos reales de tres meses, el modelo logra mejoras significativas frente al método actual: mayor cantidad de pacientes atendidos, menores cambios y mayor estabilidad de los horarios. El modelo integrado ofrece un mejor balance global entre eficiencia y estabilidad, mientras que el secuencial otorga más robustez en la programación del personal.

4.3.2. Inclusión de preferencias

A continuación se presentan trabajos que, además de incorporar criterios de equidad, descansos y límites de carga laboral como los vistos en la sección anterior, integran explícitamente preferencias del personal, ya sea como restricciones blandas, como penalizaciones en la función objetivo o mediante formulaciones multicriterio. Estas preferencias pueden ser desde un consenso grupal, un punto de vista individual o una combinación de ambas. Asimismo, las preferencias no se limitan únicamente a los turnos: también pueden referirse a la asignación a determinadas sucursales o servicios, o a la posibilidad de trabajar con determinados compañeros. En lo que sigue, se presentan enfoques que incorporan preferencias con distintos niveles de detalle, comenzando por formulaciones que las integran como penalizaciones simples y avanzando hacia modelos multicriterio y escenarios más complejos.

Comenzando por el tratamiento más directo, en [33], se presenta un modelo que incorpora preferencias individuales mediante un término adicional en la función objetivo, manteniendo la estructura clásica de cobertura y restricciones contractuales. Los autores abordan el problema de asignación de turnos médicos y destacan la importancia de elaborar cronogramas de alta calidad, ya que una mala planificación puede generar cargas desbalanceadas o fatiga excesiva en los médicos. Para ello, proponen un modelo de programación entera mixta que asegura el cumplimiento de los requisitos de cobertura y las restricciones contractuales, incorporando además criterios de equidad en la distribución de la carga laboral. En particular, se introducen términos en la función objetivo que penalizan el desequilibrio en la carga de trabajo y en la asignación de turnos inconvenientes (noches, fines de semana, feriados). Se busca que todos los médicos de un mismo grupo reciban una cantidad similar de turnos y que los turnos “inconvenientes” se repartan de forma justa. La formulación es flexible, lo que permite introducir preferencias adicionales de los médicos: primero se plantea un problema base sin preferencias y luego se añade un término específico en la función objetivo para contemplarlas. Los resultados obtenidos en un caso real muestran mejoras significativas en el balance de carga y en la equidad respecto a la planificación manual, con tiempos de cómputo muy reducidos, lo que convierte al modelo en una herramienta práctica y adaptable.

Sobre esta base, en [34] no solo se incorpora preferencias, sino que además se formula el problema como multiobjetivo, evitando fijar a priori un único criterio dominante y permitiendo ponderar explícitamente la importancia relativa entre metas en conflicto. El objetivo principal del modelo es generar cronogramas de alta calidad que respeten tanto restricciones duras como blandas, minimizando las desviaciones respecto a las preferencias de los médicos y, al mismo tiempo, garantizando una distribución equilibrada de la carga de trabajo, un uso eficiente de los recursos y una mayor satisfacción tanto del personal como de los pacientes. Para ello, los autores proponen un método en dos etapas: en la primera, aplican Goal Programming para optimizar de forma simultánea objetivos en conflicto y reducir las desviaciones en las restricciones blandas. En la segunda, emplean el método Analytic Hierarchy Process (AHP), que permite determinar la importancia relativa de los distintos criterios utilizados en la función objetivo, permitiendo que los

médicos puedan elegir qué priorizar a la hora de realizar la asignación. El modelo es implementado en un hospital en Túnez para la asignación de turnos médicos en el departamento de Dermatología y Venereología. Los resultados muestran una reducción significativa de los desbalances en la carga de trabajo, con mejoras en la equidad y en la satisfacción del personal respecto a la planificación manual. En síntesis, el estudio demuestra el valor de integrar técnicas de optimización y decisión multicriterio para obtener planes más justos, eficientes y sostenibles.

En una etapa posterior, en [35], integra preferencias dentro de marcos más exigentes desde el punto de vista ergonómico, donde no alcanza con asignar turnos deseables. El mismo presenta un modelo matemático lineal para la programación de turnos médicos que busca equilibrar las preferencias individuales del personal con las restricciones legales y ergonómicas. El objetivo principal es reducir las horas extra, evitar la sobreasignación y garantizar descansos viables durante la jornada, promoviendo tanto el bienestar del equipo como la continuidad asistencial. La función objetivo combina distintos componentes: penaliza el exceso de cobertura, las variaciones en los horarios de inicio y las horas adicionales trabajadas, mientras favorece la asignación de turnos de acuerdo con los puntajes de preferencia declarados por cada médico y la factibilidad real de realizar pausas. Estas preferencias se modelan mediante parámetros que indican qué tan deseable resulta cada turno para cada profesional, incorporando explícitamente la satisfacción individual al proceso de asignación. A su vez, se consideran criterios ergonómicos y regulatorios, como el respeto de las horas contractuales semanales, los descansos mínimos entre turnos consecutivos y la exigencia de que cada turno cuente con un intervalo de descanso con probabilidad mínima de cumplimiento. De la misma manera, se introducen restricciones específicas para las guardias de 24 horas, que bloquean la asignación del día siguiente a fin de garantizar la recuperación del médico y la calidad del servicio. Para resolver el modelo, los autores aplican una descomposición de Dantzig-Wolfe y un algoritmo de branch-and-price, lo que permite obtener soluciones óptimas en horizontes temporales relevantes.

Con un enfoque híbrido aplicado a enfermería, en [36] se realiza la asignación de turnos a enfermeros. En primer lugar se pone en contexto del problema del NSP. Luego se propone un modelo matemático que apunta a resolver el mismo. Se puede destacar la presencia de restricciones de límite de turnos consecutivos. Además, se tienen otras restricciones donde en el horizonte temporal la cantidad de minutos, fines de semana, días libre que puede trabajar un enfermero están acotados por un máximo y un mínimo. El objetivo del modelo es minimizar las penalidades que surgen de asignar a un enfermero en un día no preferido o de no asignarla en un día preferido. Se utiliza una heurística basada en Programación Entera Mixta y la salida de eso se alimenta a un algoritmo que explora mejores soluciones.

Avanzando hacia contextos organizacionales más complejos, en [37] se busca que las preferencias no se limiten al qué turno, sino que incluyen también dónde y con quién trabajar, particularmente en hospitales con múltiples sucursales o unidades. El objetivo es minimizar la insatisfacción del personal con respecto a la cantidad de trabajo, el lugar de trabajo, los compañeros de trabajo y las penalizaciones por asignaciones consecutivas.

Tiene restricciones hard y soft. Las primeras destinadas a regular la carga de trabajo, la capacidad de salas disponibles, respetar las regulaciones laborales y las ergonómicas. Las restricciones soft buscan restringir la cantidad de turnos continuos asignados o los turnos sucesivos en la misma rama y son estas penalizaciones las que se minimizan en la función objetivo. Para modelar las preferencias, se introdujeron parámetros de valores binarios que modelan el favoritismo de un médico dado por una rama, por un turno y por el staff. Los autores consideran que el abordaje del problema que han tomado es único en el área. Se utilizan dos heurísticas para la resolución dada la complejidad y escala del problema.

Por otra parte, en [38] se presenta un modelo en el que, incorpora explícitamente las preferencias históricas de médicos y residentes en la función objetivo, maximizando la satisfacción global bajo un marco de equidad. Para ello se plantea la función objetivo la cual busca maximizar la satisfacción total, que se calcula mediante los pesos derivados de la historia. En la práctica, cada médico mes a mes indica sus preferencias de turnos previo a realizar la asignación. Una vez realizada la asignación, para el mes siguiente se identifican aquellos profesionales a quienes no se les cumplieron sus preferencias, otorgándoles mayor peso en la nueva planificación. Es decir, los médicos que no vieron satisfechas sus preferencias previamente obtienen mayor prioridad en la nueva planificación. El modelo aplicado en un hospital metropolitano demuestra que la herramienta computacional permite generar en segundos cronogramas que antes requerían semanas de trabajo manual. Los resultados muestran mejoras en eficiencia, adecuación a las políticas del hospital y equidad en la distribución de turnos, además de una reducción significativa de problemas como turnos consecutivos, sobrecarga en ciertos médicos o acumulación de guardias en días festivos.

En un modelo que considera eventos inesperados, en [39] se enfoca en el problema de reprogramar cronogramas médicos ya definidos frente a cambios no planificados, como ausencias por enfermedad u otras contingencias. Para ello, desarrollan un modelo de programación entera mixta que actualiza de manera simultánea tanto el cuadro de guardias como la asignación de médicos a estaciones de trabajo. La función objetivo persigue dos grandes metas: (i) garantizar la calidad del plan en términos de cobertura, preferencias, equidad y formación, y (ii) mantener la estabilidad, minimizando los cambios respecto al cronograma original. Estos atributos se modelan mediante recompensas y penalizaciones: se favorece la cobertura, el cumplimiento de planes de formación y las preferencias, mientras que se penaliza la sobreasignación de guardias nocturnas, el incumplimiento de la cobertura mínima y la necesidad de reprogramar turnos. Como punto de comparación, los autores también proponen un enfoque secuencial en el que primero se generan las guardias y luego se asignan las estaciones de trabajo. La principal contribución frente a estudios previos es la integración de ambos rosters, que habitualmente se resolvían por separado, lo cual permite evitar óptimos locales y ajustar el peso relativo entre estabilidad y calidad según las prioridades del hospital. A través de un caso de estudio en un hospital universitario alemán, demuestran que el modelo integrado produce planes más equilibrados y estables en tiempos de cómputo muy reducidos, constituyéndose en una herramienta práctica para la gestión hospitalaria.

Volviendo a la asignación de tareas planificadas, en [40] se tiene como objetivo crear un cronograma para los ginecólogos donde las horas de clínica estén balanceadas, se tengan en cuenta las preferencias y se reduzca el tiempo de armado. Este tiempo está en el orden de días para crear la asignación, y aumenta en la medida que surgen solicitudes personales. La función objetivo busca minimizar las penalidades que surgen cuando la asignación se desvía de las preferencias establecidas. Las preferencias no son individuales, sino genéricas e intentan satisfacer tres escenarios: la eliminación de tiempo libre entre turnos, la frecuencia mínima con la que se realizan algunas tareas semanalmente y favorecer la realización de dos turnos de guardia en un mismo día. A su vez, para la asignación se tiene en cuenta que ciertas tareas pueden ser realizadas por ciertos ginecólogos especializados y que algunos médicos están bajo contrato part-time.

En [41] se presenta un abordaje original ya que consideran las preferencias de los médicos sobre ciertos tipos de turnos, y además buscan la equidad en la asignación. Particularmente, los médicos que consideran más relevante satisfacer su preferencia personal pueden hacerlo, a costo de perder la equidad en la asignación global y tal vez trabajar en turnos menos convenientes. El modelo busca maximizar las ganancias relativas en las preferencias individuales pero intentando, en lo posible, mantener equidad en la asignación. Para esto se definieron los tipos de turnos: turno día entre semana, turno noche entre semana, turno día fin de semana, turno noche fin de semana. Sobre estos turnos, se establecieron preferencias en función de cuantos turnos día entre semana cambiarían de manera equivalente por otro turno. De modo que, por ejemplo, para algunos médicos un turno un domingo de noche tenía la carga equivalente a dos turnos día entre semana. Para garantizar la equidad, se seleccionó un horizonte temporal de igual número de semanas que de médicos, de modo que finalizado el período todos los médicos hayan trabajado en la misma cantidad todos los tipos de turnos. Finalmente, para aquellos médicos que deseaban una asignación realmente justa, se asignaba la obtenida con las preferencias promedio. Pero para aquellos que estaban más orientados en una asignación por preferencias, se permitían variaciones de la asignación justa entre los orientados a la preferencia únicamente, de modo de intercambiar turnos entre ellos para mejorar su ganancia individual.

Finalmente, en [42] se busca la asignación de turnos en el departamento de emergencias pediátricas para los pasantes, con un horizonte temporal mensual. Al tratarse de pasantes, se consideran varios objetivos, como respetar los patrones de sueño, considerar solicitudes de vacaciones, y el servicio del hospital. Esto hace que el encargado de decidir no pueda encontrar una solución que atienda los tres objetivos en simultáneo, dado que es difícil asignar peso a estos objetivos. Por eso se propone utilizar las soluciones Pareto-dominantes, es decir las que aquellas dónde no es posible mejorar un objetivo sin empeorar otro y proveer al médico jefe de estas para que elija. La ventaja de esta alternativa es que se atienden las prioridades cambiantes. Considerando los datos y restricciones del problema, se tienen 7 turnos diarios, y ciertos pasantes de primer año no pueden atender algunos turnos por límites de conocimiento. Sobre los descansos, hay un límite de días (y noches) consecutivos que se pueden trabajar, y hay un descanso obligatorio de 10 horas entre un turno y otro. En adición, la cantidad total de turnos (y

de turnos nocturnos) a trabajar en una semana tiene una cota inferior y superior.

4.4. Otros

En esta sección se agrupan aquellos artículos que no se corresponden directamente con las categorías de eficiencia operativa o bienestar del personal, pero que aportan una comprensión más amplia del contexto, la evolución metodológica y las nuevas líneas de investigación en la programación de personal en salud. Por lo tanto, se definió una tercera categoría, denominada Otros, donde se incluyen revisiones literarias, que analizan tendencias del área y comparan enfoques metodológicos. Si bien estos estudios no constituyen una solución directa al problema de programación, cumplen un rol fundamental como soporte del análisis, ya que permiten contextualizar los avances del campo y fundamentar decisiones de modelado en el desarrollo del presente trabajo.

El punto de partida lo constituye [43], una revisión literaria de 68 publicaciones sobre la programación de médicos en hospitales, un área cada vez más relevante debido a la escasez de médicos, altos costos laborales y necesidad de balancear calidad y eficiencia en hospitales. Este trabajo está referenciado en la gran mayoría de los artículos mencionados previamente. El mismo clasifica los problemas según su horizonte temporal y se analizan los enfoques de la solución. Se analizan las principales restricciones, diferenciando si son hard o soft. En las restricciones hard identifican: cobertura de demanda del hospital, no simultaneidad de turnos de trabajo, descansos mínimos por persona, límites de turnos nocturnos y horas máximas de trabajo. En las restricciones soft identifican: ergonomía (ritmo circadiano, mínimo de fines de semana libres, límites de noches de trabajo seguidas), equidad (distribución de turnos poco populares), solicitudes personales y licencias.

En una línea más amplia, en [44] se contextualiza la programación de personal dentro del desarrollo histórico de la Investigación Operativa aplicada a la salud. A diferencia de otros trabajos, esta revisión no pretende cubrir de manera exhaustiva todo el campo, sino profundizar en aquellos ámbitos que los autores identifican como más representativos e influyentes. Para ello, estructuran el análisis en torno a nueve dominios de aplicación: programación de personal, gestión de la cadena de suministro de sangre, diagnóstico y tratamiento del cáncer, respuesta médica de emergencias y atención de desastres, enfermedades infecciosas, enfermedades crónicas, imagenología diagnóstica, salud pública y programación de quirófanos. El enfoque elegido se centra en las aplicaciones y su impacto en la práctica clínica, más que en el desarrollo metodológico en abstracto.

El recorrido histórico muestra cómo la Investigación de Operaciones ha pasado de modelos clásicos de optimización hacia enfoques más integrados y orientados a la práctica, logrando mejoras significativas en eficiencia, asignación de recursos y calidad asistencial. En los distintos dominios se destacan hallazgos relevantes: la centralidad de la programación de personal como uno de los problemas más estudiados, la particular complejidad de la programación de quirófanos y la incorporación progresiva de áreas emergentes como enfermedades infecciosas, imagenología diagnóstica y condiciones crónicas. Sin embargo, los autores advierten que persisten importantes limitaciones: la

baja adopción de estas herramientas en hospitales, la escasa integración entre problemas interdependientes (por ejemplo, quirófanos, personal y pacientes) y la insuficiente consideración de la incertidumbre en los modelos.

En definitiva, la revisión identifica tendencias clave que probablemente orienten la agenda futura de investigación. Por un lado, se destaca la convergencia de la Investigación de Operaciones con la inteligencia artificial y la ciencia de datos, impulsando enfoques más predictivos y adaptativos. Por otro lado, se subraya la necesidad de modelos más holísticos que integren problemas interdependientes y contemplen la trayectoria completa del paciente. Finalmente, los autores plantean la incorporación explícita de la sostenibilidad, en sus dimensiones económica, ecológica y social, como un criterio de diseño y evaluación en la planificación de los sistemas de salud.

Avanzando hacia una perspectiva más ética y social, en [45] se introduce el concepto de equidad como dimensión analítica dentro de los modelos de optimización. Tradicionalmente, el énfasis de estos modelos estuvo puesto en la eficiencia, minimizar costos, tiempos o recursos, pero este enfoque puede generar distribuciones inequitativas con consecuencias sociales y éticas negativas. El objetivo del trabajo es presentar un marco unificado que clasifique las distintas formas de modelar la equidad, identificando métricas, métodos y aplicaciones relevantes.

Los autores distinguen dos conceptos. Por un lado, la equidad entendida como el trato igual para quienes se encuentran en condiciones equivalentes. Por otro, el balance, asociado a una distribución proporcional que reconoce diferencias relevantes entre individuos, por ejemplo en la carga de trabajo o en necesidades específicas. A partir de esta distinción, revisan las principales formas de introducir la equidad en modelos de optimización: restricciones adicionales, términos en la función objetivo y formulaciones multicriterio. El artículo recoge múltiples aplicaciones en asignación de recursos, localización de instalaciones, ruteo de vehículos, programación de personal y distribución en salud pública o logística humanitaria. En todos los casos se observa un balance entre eficiencia y equidad, lo que lleva a reflexionar sobre el precio de la equidad en términos de soluciones menos eficientes pero socialmente más aceptables.

En sus conclusiones, señalan que la equidad constituye un desafío teórico y práctico de creciente relevancia, especialmente en servicios públicos y sistemas de salud. Recomiendan avanzar hacia enfoques interactivos que ofrezcan un conjunto de soluciones equitativamente eficientes, profundizar en el análisis de sensibilidad y extender el concepto a problemas de ranking y selección. De este modo, el artículo proporciona un marco conceptual sólido para comprender y modelar la equidad en optimización, consolidando este aspecto como un componente esencial de la investigación operativa contemporánea.

Con una orientación más técnica, en [46] se realiza una revisión literaria comparando y analizando los estudios realizados entre 2010 y 2020 en asignación de personal en el ámbito de la salud, con un énfasis en enfoques metaheurísticos. Los artículos los clasifican dentro de tres categorías: Programación de turnos de pacientes (PASP), Programación de salas de operación (OR), NSP, además de un conjunto de artículos que no encajan directamente en estas clasificaciones.

En cuanto a la PASP, los estudios se concentran mayoritariamente en el nivel opera-

tivo, con escasa atención a los niveles táctico y estratégico. Si bien existe abundante investigación en pacientes electivos, la planificación bajo incertidumbre (pacientes de emergencia o no electivos) sigue siendo un área poco explorada y de gran complejidad. Respecto al NSP, se confirma que es uno de los problemas centrales dentro de la programación de personal en el ámbito de la salud. Se destacan los avances logrados con metaheurísticas e incluso con enfoques híbridos, aunque los autores sugieren que el campo puede ampliarse incorporando particularidades nacionales (regulaciones, convenios laborales, condiciones locales) y explorando la integración del NSP con la programación de pacientes y médicos, lo que permitiría mejorar la eficiencia institucional. En cuanto a la programación de quirófanos, los trabajos abarcan los tres niveles de decisión (operativo, táctico y estratégico), pero debido a sus fuertes restricciones y a la presencia de incertidumbre temporal, no suelen resolverse con métodos exactos, siendo necesarias heurísticas y metaheurísticas. La literatura coincide en que la integración de la programación quirúrgica con otros problemas hospitalarios (pacientes, médicos, enfermeras) contribuye a mejorar la calidad del servicio, optimizar el uso de recursos y reducir costos. En conjunto, esta revisión resalta la relevancia creciente de las metaheurísticas en la programación sanitaria, a la vez que identifica brechas de investigación en la integración de problemas, en la incorporación de la incertidumbre y en el tratamiento de niveles de decisión más allá del operativo.

En esta misma línea de integración entre factores humanos y restricciones operativas, en [47] se amplía la discusión hacia el impacto de la fatiga en el rendimiento laboral. Estudia el impacto de la misma en la productividad de las operaciones, y cómo al aumentar la fatiga también lo hacen los errores. Además, nota que rara vez se integra explícitamente en los modelos de asignación de personal. Propone líneas de investigación futura para integrar fatiga en modelos de optimización además de revisar mecanismos de mitigación como la rotación de tareas, los descansos y los límites en las horas a realizar. Se incluyen las siguientes restricciones de los modelos revisados: límites legales de horas trabajadas, políticas de descansos y turnos nocturnos, restricciones de ergonomía (como por ejemplo: ritmos circadianos, fines de semana).

A continuación, en [48] se presenta un caso de aplicación real en el que se analiza el impacto de una nueva ley laboral en China relacionada a la programación de enfermeras. La ley introduce un límite de horas trabajadas y requisitos de descansos que antes no existían. El artículo busca diseñar un modelo de programación (o agregar restricciones al existente) para que cumpla con la nueva legislación laboral, garantizando cobertura de la demanda de pacientes. La ley busca limitar la jornada laboral semanal con un tope máximo de horas por semana, con regulación de las horas extra, penalizaciones estrictas en caso de excederse y la introducción de períodos de descansos obligatorios entre turnos.

Sobre bases similares, en [49] se aborda el caso de los estudiantes de medicina en Colombia, quienes deben realizar rotaciones clínicas obligatorias. Estas rotaciones incluyen servicios de hospitalización, ambulatorios y electivos, y suelen planificarse manualmente, lo que consume tiempo y genera asignaciones poco balanceadas. Se busca hacer estas asignaciones con programación entera mixta y una heurística VNS, para reducir el tiempo de planificación y lograr una distribución pareja de estudiantes entre

servicios. Se tienen restricciones de no simultaneidad en una asignación y de rotación entre los servicios a lo largo del internado obligatorio.

Siguiendo la evolución hacia modelos más sofisticados, [50] se centra en la asignación de residentes de un hospital alemán, particularmente en el área de anestesiología. Para cumplir su educación, se espera que los residentes realicen cierta cantidad de veces cada tarea, pero esto es impredecible y no tiene un horizonte temporal exacto. El modelo debe definir cuántos residentes se pueden entrenar en el hospital y generar el cronograma con sus respectivas asignaciones, teniendo en cuenta que si se toman muchos residentes no todos alcanzarán la repetición de tareas mencionadas. La solución es con un algoritmo de generación de columnas. Se tienen restricciones de la cantidad de veces que deben realizar cada tarea, mínimo de horas por departamento y de capacidad (es decir, no más de tantas horas o departamentos a una persona en cierto período). Se obtiene que con las soluciones del modelo llegan a soluciones cercanas al óptimo con un GAP menor al 5% en pocos minutos.

Finalmente, en [51] se aborda el problema de asignación de residentes en un grupo hospitalario austríaco y discute la transferencia de enfoques de planificación de manufactura al ámbito hospitalario. Los autores presentan un método híbrido que combina una heurística constructiva basada en reglas de prioridad con un algoritmo genético para generar y mejorar cronogramas de residentes, buscando buen desempeño con tiempos de cómputo operativamente viables. La propuesta se valida con datos reales de 82 residentes en 7 hospitales, comparando sus resultados contra planificaciones realizadas por expertos y contra una referencia exacta implementada en GAMS/CPLEX, mediante métricas asociadas a continuidad del entrenamiento, cambios de rotación, carga y cumplimiento de preferencias. En conjunto, el trabajo reporta mejoras claras frente a la planificación manual y desempeño competitivo respecto al enfoque exacto, con una reducción significativa del tiempo de ejecución, y plantea su posible extensión a otros problemas de programación hospitalaria y a contextos de replanificación.

5. Conclusiones

La revisión de la literatura realizada permite extraer varias conclusiones relevantes respecto a la programación de personal en el ámbito de la salud. En primer lugar, se evidencia que estos problemas presentan características propias que los diferencian de otros problemas de asignación, debido a la criticidad del servicio, la necesidad de operación continua y la variabilidad de la demanda. En este escenario, garantizar la cobertura de los turnos constituye una condición necesaria, pero no suficiente, para una asignación de calidad.

En segundo lugar, el análisis muestra que el NSP ha recibido una atención considerable en la literatura, mientras que el PSP ha sido abordado en menor medida. Sin embargo, este último suele presentar una mayor complejidad, asociada a la variedad de especialidades, la diversidad de actividades realizadas por los médicos y la existencia de condiciones contractuales individuales, lo que dificulta la estandarización de modelos y restricciones. En consecuencia, muchos trabajos orientados a la asignación de médicos incorporan criterios adicionales, como preferencias individuales, equidad en la distribución de la carga de trabajo y restricciones ergonómicas.

En tercer lugar, la clasificación de los artículos analizados permite identificar una tendencia en la literatura: junto a los enfoques tradicionales centrados en la eficiencia operativa y la reducción de costos, se observa una proporción considerable de trabajos orientados al bienestar del personal. Dentro de este grupo, una parte significativa de los estudios incorpora explícitamente preferencias, mientras que otros priorizan la equidad y el balance de carga sin modelar preferencias de forma directa.

Por último, la revisión pone de manifiesto que la incorporación simultánea de criterios operativos y humanos continúa siendo un desafío abierto. Muchos trabajos resaltan la necesidad de buscar un balance existente entre eficiencia y equidad, así como de modelos flexibles y adaptables a cada contexto institucional específico. En este sentido, se entiende que la literatura revisada proporciona un marco sólido para el desarrollo de modelos de optimización que busquen no solo garantizar la factibilidad y eficiencia de la asignación, sino también promover esquemas de trabajo más justos, sostenibles y alineados con las necesidades del personal médico, aspecto central del presente trabajo.

Referencias

- [1] J. Van den Bergh, J. Beliën, P. De Bruecker, E. Demeulemeester, and L. De Boeck. Personnel scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 226(3):367–385, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.029>.
- [2] Real Academia Española. Asignar. En Diccionario de la lengua española. s.f. Último acceso: 21 de enero de 2026. <https://dle.rae.es/asignar?m=form>.
- [3] Real Academia Española. Turno de trabajo. En Diccionario panhispánico del español jurídico. Último acceso: 21 de enero de 2026. <https://dpej.rae.es/lema/turno-de-trabajo>.
- [4] Cambridge Dictionary. Roster, s.f. Cambridge Dictionary. Último acceso: 21 de enero de 2026. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/roster>.
- [5] Real Academia Española. Médico. En Diccionario de la lengua española. Último acceso: 21 de enero de 2026. <https://dle.rae.es/médico>.
- [6] Real Academia Española. Enfermero. Diccionario del estudiante. Último acceso: 21 de enero de 2026. <https://www.rae.es/diccionario-estudiante/enfermero>.
- [7] M. R. Dos Santos and H. Eriksson. Insights into physician scheduling: A case study of public hospital departments in sweden. *International Journal of Health Care Quality Assurance*, 27(2):76–90, 2014. <https://doi.org/10.1108/IJHCQA-02-2012-0018>.
- [8] J. O. Brunner, J. F. Bard, and R. Kolisch. Flexible shift scheduling of physicians. *Health Care Management Science*, 12:285–305, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10729-008-9095-2>.
- [9] M. Gendreau, J. A. Ferland, B. Gendron, N. Hail, B. Jaumard, S. Lapierre, G. Pesant, and P. Soriano. Physician scheduling in emergency rooms. In E. K. Burke and H. Rudová, editors, *Practice and Theory of Automated Timetabling VI: PATAT 2006*, volume 3867 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin–Heidelberg, 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77345-0_4.
- [10] M. W. Carter and S. D. Lapierre. Scheduling emergency room physicians. *Health Care Management Science*, 4:347–360, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1011802630656>.
- [11] Real Academia Española. Justicia. En Diccionario del estudiante. Último acceso: 21 de enero de 2026. <https://www.rae.es/diccionario-estudiante/justicia>.
- [12] Sustainability Directory. Workplace fairness, s.f. Sustainability Directory. Último acceso: 21 de enero de 2026. <https://climate.sustainability-directory.com/term/workplace-fairness>.

- [13] Real Academia Española. Preferencia. En Diccionario del estudiante. Último acceso: 21 de enero de 2026. <https://www.rae.es/drae2001/preferencia>.
- [14] Organización Internacional del Trabajo. Ergonomía, s.f. Último acceso: 29 de enero de 2026. <https://www.ilo.org/es/ergonomia>.
- [15] Royal College of General Practitioners. Continuity of care work at rcgp, September 2021. Publicado el 1 de septiembre de 2021. Último acceso: 30 de marzo de 2026. <https://www.rcgp.org.uk/blog/continuity-of-care-work-at-rcgp>.
- [16] A. Sadeghilalimi, M. Mouhoub, and L. B. Said. Solving the nurse scheduling problem using the whale optimization algorithm. In B. Dorronsoro, F. Chicano, G. Danoy, and E. G. Talbi, editors, *Optimization and Learning*, volume 1824 of *Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34020-8_5.
- [17] M. W. Isken and O. T. Aydas. A tactical multi-week implicit tour scheduling model with applications in healthcare. *Health Care Management Science*, 25:551–573, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10729-022-09601-8>.
- [18] J. Volland, A. Fügner, and J. O. Brunner. A column generation approach for the integrated shift and task scheduling problem of logistics assistants in hospitals. *European Journal of Operational Research*, 260(1):316–334, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.026>.
- [19] M. Erhard. Flexible staffing of physicians with column generation. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 33:212–252, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10696-019-09353-8>.
- [20] Y. Lan, C. Fan, J. Yang, and P. M. Pardalos. A variable neighborhood search algorithm for an integrated physician planning and scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 147:105969, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105969>.
- [21] J. F. Bard, Z. Shu, D. J. Morrice, and L. K. Leykum. Annual block scheduling for internal medicine residents with 4+1 templates. *Journal of the Operational Research Society*, 67(7):911–927, 2016. <https://doi.org/10.1057/jors.2015.109>.
- [22] N. Zaerpour, D. P. Bischak, and M. B. C. Menezes. Coordinated lab-clinics: A tactical assignment problem in healthcare. *European Journal of Operational Research*, 263(1):283–294, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.012>.
- [23] J. Li and P. A. Forero. Physician scheduling for outpatient department with nonhomogeneous patient arrival and priority queue. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 34(4):879–915, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10696-021-09414-x>.

- [24] N. Camiat, M. I. Restrepo, J. M. Chauny, N. Lahrichi, and L. M. Rousseau. Productivity-driven physician scheduling in emergency departments. *Health Systems*, 10(2):104–117, 2021. <https://doi.org/10.1080/20476965.2019.1666036>.
- [25] M. Cildoz, F. Mallor, and P. M. Mateo. A grasp-based algorithm for solving the emergency room physician scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 103:107151, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107151>.
- [26] M. Shamia, N. Aboushaqrah, and M. Bayoumy. Physician on call scheduling: Case of a qatari hospital. In *2015 6th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO)*, pages 1–6, Istanbul, Turkey, 2015. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2015.7152217>.
- [27] P. Damcı-Kurt, M. Zhang, B. Marentay, and N. Govind. Improving physician schedules by leveraging equalization: Cases from hospitals in u.s. *Omega*, 86:1–15, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.06.008>.
- [28] R. Mansini and R. Zanotti. Optimizing the physician scheduling problem in a large hospital ward. *Journal of Scheduling*, 23:337–361, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10951-019-00614-w>.
- [29] S. Ağralı, Z. C. Taşkın, and A. T. Ünal. Employee scheduling in service industries with flexible employee availability and demand. *Omega*, 66:159–169, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.03.001>.
- [30] Q. N. H. Tran, N. Q. Nguyen, L. Amodeo, F. Yalaoui, and H. Chehade. Multidimensional assignment problem in the medical sector: A case study. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10):901–905, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.416>.
- [31] M. Kraul. Annual scheduling for anesthesiology medicine residents in task-related programs with a focus on continuity of care. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 32:181–212, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10696-019-09365-4>.
- [32] N. Bentayeb, N. Lahrichi, and L. M. Rousseau. On integrating patient appointment grids and technologist schedules in a radiology center. *Health Care Management Science*, 26:62–78, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10729-022-09618-z>.
- [33] R. Bruni and P. Detti. A flexible discrete optimization approach to the physician scheduling problem. *Operations Research for Health Care*, 3(4):191–199, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2014.08.003>.
- [34] K. Werghi, J. Jlassi, I. Rekik, and A. El Mhamedi. A multi-objective programming model for physician scheduling: A case study. In F. Jawab, editor, *Hospital Supply Chain*, volume 27 of *Integrated Science*. Springer, Cham, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70292-1_16.

- [35] M. Kraul, M. Erhard, and J. O. Brunner. Optimizing physician schedules with resilient break assignments. *Omega*, 129:103154, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103154>.
- [36] A. M. Turhan and B. Bilgen. A hybrid fix-and-optimize and simulated annealing approaches for nurse rostering problem. *Computers & Industrial Engineering*, 145:106531, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106531>.
- [37] Y. Lan, C. Fan, Y. Liu, and J. Yang. A hybrid sca-vns meta-heuristic based on iterated hungarian algorithm for physicians and medical staff scheduling problem in outpatient department of large hospitals with multiple branches. *Applied Soft Computing*, 85:105813, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105813>.
- [38] Y. C. Huang, Y. C. Lee, and Y. H. Huang. A rostering optimization model for physician scheduling in medical department: A case study in a district hospital. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(3):203–215, 2016. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1180327>.
- [39] C. N. Gross, A. Fügenger, and J. O. Brunner. Online rescheduling of physicians in hospitals. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30:296–328, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10696-016-9274-2>.
- [40] N. M. Van de Vrugt, S. Luen-English, W. A. M. Bastiaansen, M. R. Kleinluchtenbeld, J. T. M. Lardinois, J. M. Pots, M. G. Schoonbergen, E. W. Hans, J. L. Hurink, and R. J. Boucherie. Integrated scheduling of tasks and gynecologists to improve patient appointment scheduling: A case study. *Operations Research for Health Care*, 16:10–19, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2017.11.003>.
- [41] M. R. Bowers, C. E. Noon, W. Wu, and J. K. Bass. Neonatal physician scheduling at the university of tennessee medical center. *Interfaces*, 46(1):65–77, 2016. <https://doi.org/10.1287/inte.2015.0839>.
- [42] Y. Hong, A. Cohn, M. Epelman, and J. Alpert. Creating resident shift schedules under multiple objectives by generating and evaluating the pareto frontier. *Operations Research for Health Care*, 23:100170, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2018.08.002>.
- [43] M. Erhard, J. Schoenfelder, A. Fügenger, and J. O. Brunner. State of the art in physician scheduling. *European Journal of Operational Research*, 265(1):1–18, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.040>.
- [44] J. Beliën, S. C. Brailsford, E. Demeulemeester, D. Demirtas, E. W. Hans, and P. R. Harper. Fifty years of operational research applied to health-care. *European Journal of Operational Research*, 326(2):189–206, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.12.040>.

- [45] Ö. Karsu and A. Morton. Inequity averse optimization in operational research. *European Journal of Operational Research*, 245(2):343–359, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.02.031>.
- [46] Z. Z. Abdalkareem, A. Amir, M. A. Al-Betar, P. Ekhan, and A. I. Hammouri. Healthcare scheduling in optimization context: A review. *Health and Technology*, 11:445–469, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12553-021-00547-5>.
- [47] X. Xu and N. G. Hall. Fatigue, personnel scheduling and operations: Review and research opportunities. *European Journal of Operational Research*, 295(3):807–822, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.03.032>.
- [48] Z. Zhuang and W. Yu. Analyzing the effects of the new labor law on outpatient nurse scheduling with law-fitting modeling and case studies. *Expert Systems with Applications*, 180:115103, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115103>.
- [49] F. Castaño and N. Velasco. Exact and heuristic approaches for the automated design of medical trainees rotation schedules. *Omega*, 97:102107, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.08.005>.
- [50] M. Kraul, A. Fügner, J. O. Brunner, and S. Blobner. A robust framework for task-related resident scheduling. *European Journal of Operational Research*, 276(2):656–675, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.025>.
- [51] C. Gaal, W. Dummer, M. Lindorfer, and A. Ansari. A novel personnel planning method to improve operations management: Transferring lessons learned from manufacturing to healthcare. *IFAC-PapersOnLine*, 58(19):929–934, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.162>.

Apéndice 2: Validación de los modelos

Además de los casos más representativos presentados en la Sección 4.3 del informe, en esta sección se incluyen los restantes casos de prueba utilizados en la validación de los modelos desarrollados. Los casos se organizan en subsecciones según el modelo correspondiente y, para cada uno, se presenta una breve descripción del objetivo de la prueba, los parámetros considerados y los principales resultados obtenidos, con énfasis en las variables más relevantes.

Como mencionamos en la Sección 4.3, dado que algunos de los objetivos evaluados toman valores numéricos que pueden resultar poco intuitivos o difíciles de comparar de forma directa, en particular los asociados a preferencias no cumplidas, inestabilidad del cronograma y, para el caso de licenciados, calidad del servicio, en cada caso se incorporan valores de referencia que permiten expresar e interpretar los resultados en términos porcentuales. Es por esto que para dimensionarlos se introducen valores de referencia para cada uno de estos objetivos.

Para el caso de preferencias, el valor de referencia se obtiene del producto de las cardinalidades de días, personal fijos y turnos:

$$N_{pref} = \text{card}(d) \text{ card}(i) \text{ card}(t) \quad (51)$$

De esta forma, el porcentaje de preferencias no cumplidas se calcula dividiendo la cantidad de incumplimientos observada entre dicho valor de referencia.

Por su parte, el valor de referencia para la inestabilidad en la asignación se obtiene de la cantidad de días dónde se puede ser estable, es decir días totales menos el rango de medición de estabilidad, multiplicado por la totalidad de personal fijo y los turnos totales:

$$N_{est} = (DM - sem) \text{ card}(i) \text{ card}(t) \quad (52)$$

En consecuencia, el porcentaje de asignaciones inestables se obtiene dividiendo la cantidad de asignaciones inestables entre este valor de referencia.

En el caso del modelo de licenciados, también se incorpora un indicador porcentual asociado a la calidad del servicio. Su valor de referencia depende de la escala utilizada para parametrizar la matriz de habilidades H_{ie} . Dado que un menor valor de H_{ie} representa una mayor habilidad del licenciado i para desempeñarse en la especialidad e , asignar personal más capacitado conduce a un menor valor de la función objetivo asociada a la calidad de servicio.

En este contexto, se define en primer lugar el ranking promedio de habilidad de las asignaciones realizadas como:

$$H = \frac{\sum_{i \in L} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} H_{ie} x_{idte}}{\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} q_{dte}} \quad (53)$$

donde el numerador representa la suma de los rankings de habilidad asociados a todas las asignaciones efectuadas, mientras que el denominador corresponde al total de asignaciones requeridas en el horizonte de planificación.

A partir de este valor, se calcula el indicador porcentual de calidad de servicio mediante la siguiente expresión:

$$Ncal = \frac{Hmax - H}{Hmax - 1} \quad (54)$$

donde $Hmax$ representa el peor ranking presente en la matriz de habilidades H_{ie} .

Si se desea expresar el indicador en porcentaje, se multiplica el resultado anterior por 1

$$Ncal(\%) = 100 \times \frac{Hmax - H}{Hmax - 1} \quad (55)$$

Así, un valor de $Ncal = 100\%$ indica que todas las asignaciones fueron realizadas con licenciados que presentan el mejor ranking de habilidad posible, mientras que un valor de $Ncal = 0\%$ corresponde al caso en que todas las asignaciones se realizan con el peor ranking considerado. Es relevante esta aclaración, porque el objetivo se está minimizando, pero en los resultados a analizar posteriormente será positivo un porcentaje mayor.

Modelo de asignación para médicos

En esta subsección se presentan los casos de prueba definidos para validar el modelo de asignación de médicos. El primer caso funciona como escenario de referencia: se detallan los datos de entrada y la salida obtenida, de modo que el lector cuente con un punto de comparación para el comportamiento esperado del modelo. A partir de este escenario, se varían de forma controlada distintos parámetros y condiciones del problema, generando escenarios adicionales que permiten verificar la consistencia del modelo y analizar su desempeño ante situaciones diversas.

Caso de referencia

En este escenario se utilizan los datos que se presentan en la Tabla 44.

Nombre del parámetro	Valor
DM (días del horizonte temporal)	5
G (Cantidad de turnos de guardia)	2
P (Cantidad de turnos de policlínica)	4
FG	2
FJ	2
S	6
A	2
TC	1
CD	2
Sem	2

Nombre del parámetro	Valor
Duración de los turnos	$h_1 = 4$ $h_2 = 4$ $h_3 = 4$ $h_4 = 2$ $h_5 = 12$ $h_6 = 12$
Cantidad de horas de policlínica contratadas por médico en período a analizar	$k_1 = 16$ $k_2 = 16$ $k_3 = 12$ $k_4 = 8$
Demanda de turnos	$q_{d,t}$ default 1 $q_{1,4} = 0$ $q_{2,2} = 0$ $q_{2,5} = 0$ $q_{3,1} = 0$ $q_{3,4} = 0$ $q_{4,5} = 0$ $q_{5,4} = 0$
Cantidad de guardias contratadas por médico en período a analizar	$c_1 = 2$ $c_2 = 2$
Disponibilidad de los médicos	$dis_{i,d}$ default 1
Preferencias	$pref_{i,d,t}$ default 0 $pref_{1,1,1} = 1$ $pref_{1,1,5} = 1$ $pref_{1,2,3} = 1$ $pref_{1,3,2} = 1$ $pref_{1,5,3} = 1$ $pref_{1,5,5} = 1$ $pref_{2,1,2} = 1$ $pref_{2,2,4} = 1$ $pref_{2,2,6} = 1$ $pref_{2,3,3} = 1$ $pref_{2,4,1} = 1$ $pref_{2,4,4} = 1$ $pref_{2,5,2} = 1$ $pref_{2,5,6} = 1$ $pref_{3,1,3} = 1$ $pref_{3,4,2} = 1$ $pref_{3,5,1} = 1$ $pref_{4,2,1} = 1$ $pref_{4,4,3} = 1$

Tabla 44: Parámetros utilizados en el caso de referencia para médicos.

Resultados obtenidos

La solución del escenario de referencia depende del objetivo seleccionado. En particular, se evaluó el comportamiento del modelo optimizando cada objetivo por separado (horas extra, preferencias no cumplidas e inestabilidad de la solución). La Tabla 45 resume los valores resultantes para cada ejecución.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Horas extra	0,00	0,83 %	25,00 %
Preferencias no cumplidas	4,00	0,00 %	26,39 %
Inestabilidad en la asignación	0,00	17,50 %	8,33 %

Tabla 45: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para médicos en Caso de referencia.

Adicionalmente, se presentan las asignaciones obtenidas en este escenario a modo de referencia. En las Tablas 46, 47 y 48 se muestran los cronogramas resultantes al considerar, respectivamente, la minimización de: (i) horas extra, (ii) preferencias no cumplidas y (iii) asignaciones inestables.

Turno	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1	1	4		2	3
Pol_2	2		1	3	10
Pol_3	3	1	2	4	1
Pol_4		2		2	
Gua_5	1		9		1
Gua_6	10	2	8	10	2

Tabla 46: Asignación obtenida minimizando horas extra en el Caso de referencia para médicos.

Turno	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1	1	4		2	3
Pol_2	2		1	3	2
Pol_3	3	1	2	4	1
Pol_4		2		2	
Gua_5	1		9		1
Gua_6	10	2	5	10	2

Tabla 47: Asignación obtenida minimizando preferencias no cumplidas en el Caso de referencia para médicos.

Turno	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1	1	4		4	1
Pol_2	2		3	6	3
Pol_3	3	1	2	1	2
Pol_4		2		2	
Gua_5	2		7		1
Gua_6	1	5	10	9	2

Tabla 48: Asignación obtenida minimizando inestabilidad de la asignación en el Caso de referencia para médicos.

Caso 1: Demanda nula de turnos

En este caso, se desea validar el correcto funcionamiento ante una demanda nula. En términos prácticos, no existe requerimiento de asignar personal médico a ninguno de los turnos considerados, pero estos mantienen sus obligaciones contractuales. En la Tabla 49 se detallan los parámetros que se modifican respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Demanda de turnos	$q_{d,t}$ default 0

Tabla 49: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 1 para médicos.

Bajo estas condiciones, se espera que el problema resulte infactible, dado que el modelo debe compatibilizar la existencia de carga contratada con la ausencia total de turnos demandados dentro del período analizado.

Resultados obtenidos

Para cada una de las tres funciones objetivo consideradas, el solver determinó que el modelo no admite solución factible bajo los datos del Caso 1.

Caso 2: Demanda concentrada en un único turno

En este caso, se desea validar el correcto funcionamiento de la asignación ante la presencia de un único turno y un único médico. En consecuencia, el modelo debe cubrir exclusivamente ese turno, sin generar asignaciones adicionales. Bajo esta configuración, se espera que la variable binaria de asignación tome valor 1 únicamente para la combinación (médico, día, turno) correspondiente al turno demandado. En la Tabla 50 se presentan los parámetros modificados respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
DM (días del horizonte temporal)	1
G (Cantidad de turnos de guardia)	0
P (Cantidad de turnos de policlínica)	1
FG	1
FJ	0
S	0
A	1
TC	1
CD	1
Sem	1
Duración de los turnos	$h_1 = 4$
Cantidad de horas de policlínica contratadas por médico en período a analizar	$k_1 = 4$
Demanda de turnos	$q_{d,t}$ default 1
Cantidad de guardias contratadas por médico en período a analizar	$c_1 = 0$
Disponibilidad de los médicos	$dis_{i,d}$ default 1
Preferencias	$pref_{i,d,t}$ default 1

Tabla 50: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 2 para médicos.

Resultados obtenidos

Para las tres funciones objetivo consideradas, se obtuvo la misma asignación, presentada en la Tabla 51. Esto era esperable, dado que el problema posee una única asignación que satisface simultáneamente la demanda (q_{dt}) y la carga contratada (k_1).

Turno	Día 1
Pol_1	1

Tabla 51: Asignación obtenida común a las tres funciones objetivo en el Caso 2 para médicos.

A su vez, los valores de los objetivos resultaron nulos en los tres casos, indicando que la solución cumple las condiciones del modelo sin penalizaciones asociadas a horas extra, preferencias no cumplidas ni inestabilidad.

Caso 3: Disponibilidad exclusiva de médicos suplentes

En este caso, se espera validar el correcto uso de los suplentes cuando es necesario. El conjunto de datos de entrada se define de forma tal que la cobertura de los turnos del período de planificación depende únicamente de médicos suplentes. Para ello, se excluyen los médicos fijos del horizonte ($FG = 0$ y $FJ = 0$) y, en consecuencia, sus parámetros asociados de carga y guardias contratadas se anulan ($k_i = 0$ y $c_i = 0$). El conjunto de suplentes se mantiene disponible para la asignación de turnos ($S=25$). En la Tabla 52 se resumen las modificaciones realizadas respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
FG	0
FJ	0
S	25
Cantidad de horas de policlínica contratadas por médico en período a analizar	$k_i = 0$
Cantidad de guardias contratadas por médico en período a analizar	$c_i = 0$
Preferencias	$pref_{i,d,t}$ default 0

Tabla 52: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 3 para médicos.

Se espera que el problema resulte factible y tenga solución óptima únicamente en aquellos casos en que la cantidad de médicos suplentes disponibles sea suficiente para cubrir la totalidad de la demanda de turnos. En caso contrario, el modelo debería identificar correctamente la inexistencia de una solución factible.

Resultados obtenidos

Para las tres funciones objetivo consideradas se obtuvo el mismo cronograma, presentado en la Tabla 53.

Turno	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1	1	1		1	1
Pol_2	1		25	1	1
Pol_3	25	25	25	25	25
Pol_4		25		25	
Gua_5	4		1		3
Gua_6	25	3	2	4	25

Tabla 53: Asignación obtenida común a las tres funciones objetivo en el Caso 3 para médicos.

Asimismo, los valores de las funciones objetivo resultaron nulos en las tres corridas. Esto se explica porque, los términos de la función objetivo se calculan únicamente sobre el conjunto de médicos fijos, mientras que los médicos suplentes no contribuyen a ninguno de los objetivos. En consecuencia, cualquier solución factible basada en suplentes presenta el mismo valor objetivo, por lo que el solver retorna la misma asignación para las tres corridas.

Caso 4: Personal insuficiente para cubrir la demanda

El objetivo de este caso es verificar que el modelo identifica correctamente situaciones de infactibilidad cuando no es posible satisfacer la cobertura requerida respetando las restricciones establecidas. Se evalúa un escenario en el que la cantidad de médicos disponibles no alcanza para cubrir la totalidad de los turnos demandados en, al menos, uno de los días del horizonte de planificación. En particular, la carga exigida por la demanda supera la capacidad máxima de cobertura del personal disponible bajo las

restricciones operativas y laborales del modelo y se espera que no exista solución factible.

En la Tabla 54 se presenta el parámetro modificado respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
S	2

Tabla 54: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 4 para médicos.

Resultados obtenidos

Para las tres funciones objetivo consideradas no existe solución factible, lo cual es coherente con lo esperado.

Caso 5: Turnos de guardia contratadas superiores a las disponibles para asignar

En este caso, el objetivo es evaluar el comportamiento del modelo cuando las restricciones de cumplimiento contractual de guardias entran en conflicto con la demanda real del servicio. En particular, dado que la restricción de cumplimiento de guardias se encuentra formulada como una igualdad, es decir, cada médico debe cumplir exactamente la cantidad de turnos contratados, se genera una incompatibilidad estructural: no es posible asignar más guardias que las efectivamente demandadas en el horizonte, y se espera que no existe solución factible. En la Tabla 55 se presentan los parámetros modificados respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Demanda de turnos	$q_{d,t}$ default 1
Cantidad de guardias contratadas por médico en período a analizar	$c_1 = 6$ $c_2 = 6$

Tabla 55: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 5 para médicos.

Resultados obtenidos

Para las tres funciones objetivo consideradas, el modelo no admite solución factible bajo los datos del caso. Este resultado es consistente con el diseño del escenario, ya que la suma de guardias contratadas imposibilita satisfacer la restricción de cobertura.

Caso 6: Carga diaria insuficiente para cumplir la demanda

En este caso, el objetivo de este escenario es evaluar el impacto de una restricción más estricta sobre la carga diaria en la factibilidad del modelo. Para ello se modifica la restricción de carga diaria respecto del escenario de referencia, reduciendo el parámetro CD de 2 a 1. Esto implica que cada médico puede ser asignado, como máximo, a un turno por día dentro del horizonte de planificación. En el escenario de referencia algunos

médicos, en particular los médicos $i = 1$ e $i = 2$, requieren eventualmente realizar dos turnos en un mismo día para poder cumplir con la totalidad de las horas o guardias contratadas. Al imponer un límite diario más restrictivo, se elimina esa posibilidad, por lo que se espera que no exista solución factible. En la Tabla 56 se presenta el parámetro modificado respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
CD	1

Tabla 56: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 6 para médicos.

Resultados obtenidos

Bajo esta configuración, no existe solución factible. En efecto, al limitar la cantidad máxima de turnos diarios por médico, el modelo ya no puede satisfacer simultáneamente las restricciones de cobertura de demanda y las obligaciones contractuales del personal dentro del horizonte temporal considerado. Este caso valida que el modelo responde de manera coherente ante restricciones operativas más exigentes, identificando correctamente situaciones en las que las condiciones contractuales dejan de ser compatibles con los límites diarios de asignación.

Caso 7: Disponibilidad reducida de médicos suplentes

En este caso, el objetivo es validar que las restricciones de disponibilidad individual se apliquen correctamente también al conjunto de suplentes. Para ello, se analiza un escenario en el que los médicos suplentes presentan disponibilidad parcial dentro del horizonte de planificación, y se espera que la solución no los utilice en días en los que dichos médicos no se encuentren disponibles. En la Tabla 57 se presentan las modificaciones realizadas respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Disponibilidad de los médicos	$dis_{i,d}$ default 1
	$dis_{4,1} = 0$
	$dis_{4,2} = 0$
	$dis_{4,3} = 0$
	$dis_{5,2} = 0$
	$dis_{5,3} = 0$
	$dis_{5,4} = 0$
	$dis_{6,3} = 0$
	$dis_{6,4} = 0$
	$dis_{6,5} = 0$
	$dis_{7,1} = 0$
	$dis_{7,3} = 0$
	$dis_{7,5} = 0$
	$dis_{8,2} = 0$
	$dis_{8,4} = 0$
	$dis_{8,5} = 0$
$dis_{9,1} = 0$	
$dis_{9,4} = 0$	
$dis_{9,5} = 0$	

Tabla 57: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 7 para médicos.

Resultados obtenidos

Para el escenario considerado, el modelo fue ejecutado optimizando cada una de las tres funciones objetivo y en ningún caso se utiliza a los suplentes los días que no están disponibles. A modo de ejemplo, se presenta el cronograma al minimizar horas extra en la Tabla 58.

Turno	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1	1	10		2	3
Pol_2	2		1	3	4
Pol_3	3	1	2	4	1
Pol_4		2		2	
Gua_5	1		9		1
Gua_6	10	2	8	10	2

Tabla 58: Asignación obtenida para minimización de horas extra en el Caso 7 para médicos

Caso 8: Horas contratadas inferiores a la demanda sin disponibilidad de suplentes

El objetivo de este escenario es evaluar el comportamiento del modelo cuando la demanda supera la capacidad contratada del personal fijo, forzando la utilización de horas extra como mecanismo de ajuste. Para ello, se analiza un escenario en el que

únicamente se dispone de personal médico fijo, y la cantidad de horas contratadas resulta insuficiente para cubrir la totalidad de los turnos demandados en el horizonte de planificación. En consecuencia, se espera que el modelo produzca una solución factible que cubra la totalidad de la demanda, aunque ello implique asignar horas extra al personal. En la Tabla 59 se presentan las modificaciones realizadas respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
S	0
TC	2
Demanda de turnos	$q_{d,t}$ default 1 $q_{1,5} = 0$ $q_{2,6} = 0$ $q_{3,5} = 0$ $q_{4,6} = 0$

Tabla 59: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 8 para médicos.

Resultados obtenidos

Al minimizar horas extra, se obtiene el cronograma presentado en la Tabla 60.

Turno	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1	1	4	2	4	1
Pol_2	2	2	1	2	4
Pol_3	3	4	1	3	3
Pol_4	1	1	3	2	2
Gua_5		1		1	2
Gua_6	2		2		1

Tabla 60: Asignación obtenida para la minimización de horas extra en el Caso 8 para médicos.

Los valores alcanzados por las funciones objetivo en esta corrida se resumen en la Tabla 61.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación
Horas extra	18,00	60,83 %	31,94 %
Preferencias no cumplidas	18,00	60,83 %	29,17 %
Inestabilidad en la asignación	18,00	62,50 %	1,39 %

Tabla 61: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para médicos en Caso 8.

Tal como se esperaba, la solución logra cubrir la totalidad de los turnos requeridos aun cuando las horas contratadas del personal fijo resultan insuficientes (ver Tabla 60). Esto se traduce en un valor de 18 horas extra para todos los objetivos en la Tabla 61, confirmando que el modelo utiliza este mecanismo para satisfacer la demanda en ausencia de suplentes. Asimismo, se observa un incremento en los valores asociados a preferencias no cumplidas, asociado a la necesidad de trabajar más de lo deseado y una disminución en la inestabilidad del cronograma, asociada al mayor involucramiento del personal de manera cíclica.

Este caso valida que el modelo responde coherentemente ante escenarios de sobre-demanda, priorizando la cobertura del servicio y permitiendo absorber el desbalance mediante horas extra.

Caso 9: Disponibilidad exclusiva de médicos fijos jubilados

En este caso, el objetivo de este escenario es validar que el modelo respete correctamente la restricción que impide asignar turnos de guardia a médicos jubilados. Para ello, se analiza un escenario en el que la totalidad del personal disponible pertenece a la categoría de médicos jubilados ($FJ > 0$, $FG = 0$ y $S = 0$), mientras que existe demanda de turnos de guardia durante el horizonte de planificación. Dado que no existe personal habilitado para cubrir la demanda de guardias, se espera que el problema no admita una solución factible. En la Tabla 62 se presentan los parámetros modificados respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
DM (días del horizonte temporal)	5
G (Cantidad de turnos de guardia)	2
P (Cantidad de turnos de policlínica)	0
FG	0
FJ	2
S	0
Duración de los turnos	$h_1 = 12$ $h_2 = 12$
Cantidad de horas de policlínica contratadas por médico en período a analizar	$k_1 = 12$ $k_2 = 12$
Demanda de turnos	$q_{d,t}$ default 1 $q_{1,4} = 0$ $q_{2,2} = 0$ $q_{2,5} = 0$ $q_{3,1} = 0$ $q_{3,4} = 0$ $q_{4,5} = 0$ $q_{5,4} = 0$
Cantidad de guardias contratadas por médico en período a analizar	$c_i = 0$
Preferencias	$pref_{i,d,t}$ default 1

Nombre del parámetro	Valor
----------------------	-------

Tabla 62: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 9 para médicos.

Resultados obtenidos

Bajo esta configuración, no existe solución factible. Este caso confirma que la restricción que prohíbe la asignación de guardias a médicos jubilados se encuentra correctamente implementada en el modelo.

Modelo de asignación para licenciados

En esta subsección se presentan los casos de prueba utilizados para validar el modelo de asignación de licenciados. Al igual que en el modelo de médicos, el objetivo de la validación es comprobar que el modelo se comporta de manera consistente, respeta las restricciones definidas y genera asignaciones coherentes ante distintos escenarios de operación. Dado que el enfoque aquí se centra en el modelo de licenciados, los casos se construyen variando parámetros y datos de entrada relevantes para este grupo (por ejemplo, tipo de guardia, especialidades y habilidades), con el fin de evaluar la respuesta del modelo sin repetir la metodología de validación ya detallada para el modelo de médicos.

Caso de referencia licenciados

En primer lugar, se define y ejecuta un escenario de referencia con el propósito de verificar que los datos de entrada estén correctamente parametrizados y permitan obtener una solución factible. Este escenario se toma como referencia para la ejecución de los posteriores casos.

La Tabla 63 resume los parámetros utilizados en este escenario, incluyendo: el horizonte de planificación, la estructura de turnos (policlínica, guardia interna y guardia retén), la dotación de licenciados fijos y suplentes, la disponibilidad diaria, las preferencias declaradas, la demanda de turnos por especialidad y el ranking de habilidades empleado para evaluar la calidad del servicio.

Nombre del parámetro	Valor
DM (días del horizonte temporal)	5
GI (Cantidad de turnos de guardia interna)	1
GR (Cantidad de turnos de guardia retén)	1
P (Cantidad de turnos de policlínica)	1
LF	5
LS	4
ESP	2
A	2
TC	2
CD	2
Sem	2

Nombre del parámetro	Valor
Especialidades de cada licenciado	$R_{i,e}$ default 1 $R_{1,1} = 0$ $R_{4,1} = 0$
Duración de los turnos	$h_1 = 4$ $h_2 = 4$ $h_3 = 12$
Cantidad de horas contratadas de los distintos licenciados fijos	$k_1 = 28$ $k_2 = 28$ $k_3 = 28$ $k_4 = 28$ $k_5 = 28$
Demanda de turnos	$q_{d,t}$ default 1 $q_{1,1} = 0$
Disponibilidad de los licenciados	$dis_{i,d}$ default 1 $dis_{1,1} = 0$ $dis_{3,3} = 0$
Preferencias	$pref_{i,d,t}$ default 0 $pref_{1,2,3} = 1$ $pref_{1,4,3} = 1$ $pref_{1,5,1} = 1$ $pref_{2,1,2} = 1$ $pref_{2,2,3} = 1$ $pref_{2,4,3} = 1$ $pref_{3,1,3} = 1$ $pref_{3,2,1} = 1$ $pref_{3,4,1} = 1$ $pref_{3,5,2} = 1$ $pref_{4,1,1} = 1$ $pref_{4,2,1} = 1$ $pref_{4,3,1} = 1$ $pref_{4,4,1} = 1$

Nombre del parámetro	Valor
Ranking de habilidades de cada licenciado	$H_{i,e}$ default 0
	$H_{1,2} = 1$
	$H_{2,1} = 1$
	$H_{2,2} = 2$
	$H_{3,1} = 1$
	$H_{3,2} = 2$
	$H_{4,2} = 1$
	$H_{5,1} = 1$
	$H_{5,2} = 2$
	$H_{6,1} = 1$
	$H_{6,2} = 2$
	$H_{7,1} = 1$
	$H_{7,2} = 2$
	$H_{8,1} = 1$
	$H_{8,2} = 2$
	$H_{9,1} = 1$
$H_{9,2} = 2$	

Tabla 63: Parámetros utilizados en caso de referencia para licenciados.

Resultados obtenidos

Al igual que en el modelo de médicos, la solución del escenario de referencia depende de la función objetivo seleccionada. Por este motivo, el modelo se ejecuta optimizando cada objetivo de manera individual, y los valores obtenidos para los principales indicadores (horas extra, preferencias no cumplidas, inestabilidad y calidad de servicio) se presentan de forma comparativa en la Tabla 64.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	0,00	30,67 %	20,00 %	48,28 %
Preferencias no cumplidas	8,00	6,67 %	10,00 %	75,86 %
Inestabilidad de la solución	40,00	41,33 %	0,00 %	68,97 %
Calidad de servicio	8,00	41,33 %	16,67 %	96,55 %

Tabla 64: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para licenciados en caso de referencia.

Adicionalmente, para cada corrida se obtiene un cronograma específico. Las asignaciones resultantes se presentan en las Tablas 65, 66, 67 y 68, correspondientes, respectivamente, a la minimización de: (i) horas extra, (ii) preferencias no cumplidas, (iii) inestabilidad en la asignación y (iv) desvío en la calidad del servicio.

Turno Esp	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1_E01		6	6	2	5
Pol_1_E02	6	1	4	9	3
GI_2_E01	6	9	8	6	8
GI_2_E02	4	7	4	4	9
GR_3_E01	3	3	8	5	2
GR_3_E02	5	1	1	2	4

Tabla 65: Asignación obtenida para la minimización de horas extra en el caso referencia para licenciados.

Turno Esp	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1_E01		3	9	3	6
Pol_1_E02	4	4	4	4	1
GI_2_E01	2	9	9	9	3
GI_2_E02	6	6	6	6	5
GR_3_E01	5	2	5	2	3
GR_3_E02	3	1	6	1	4

Tabla 66: Asignación obtenida para la minimización de preferencias no cumplidas en el caso referencia para licenciados.

Turno Esp	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1_E01		9	6	9	6
Pol_1_E02	4	1	4	1	4
GI_2_E01	5	3	5	3	5
GI_2_E02	4	4	4	4	4
GR_3_E01	2	3	2	3	2
GR_3_E02	5	1	5	1	5

Tabla 67: Asignación obtenida para la minimización de inestabilidad en la asignación en el caso referencia para licenciados.

Turno Esp	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1_E01		7	7	7	7
Pol_1_E02	3	5	1	1	1
GI_2_E01	7	2	2	7	2
GI_2_E02	4	1	1	1	1
GR_3_E01	2	2	7	9	3
GR_3_E02	4	5	4	3	5

Tabla 68: Asignación obtenida para la minimización del desvío en la calidad de servicio en el caso referencia para licenciados.

Caso 1: Demanda nula de turnos

En este caso, se desea validar el correcto funcionamiento ante una demanda nula. En términos prácticos, no existe requerimiento de asignar licenciados a ninguno de los turnos considerados, pero estos mantienen sus obligaciones contractuales. En la Tabla 69 se detallan los parámetros que se modifican respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Demanda de turnos	$q_{d,t,e}$ default 0

Tabla 69: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 1 para licenciados.

Dado que se mantienen las horas contratadas del personal, se espera que el problema resulte infactible: el modelo debe cumplir obligaciones contractuales de asignación, pero no dispone de turnos demandados sobre los cuales realizar dichas asignaciones.

Resultados obtenidos

Al ejecutar el modelo bajo la configuración planteada, no existe solución factible para todas las funciones objetivo consideradas. Este resultado es consistente con el diseño del escenario: al no existir demanda de turnos ($q_{dte}=0$) y mantenerse las horas contratadas del personal, el modelo no puede satisfacer simultáneamente las restricciones de cumplimiento contractual y las restricciones de cobertura, lo que genera una incompatibilidad estructural en los datos.

Caso 2: Demanda en un único turno

En este caso, se desea validar el correcto funcionamiento de la asignación ante la presencia de un único turno y un único licenciado. En consecuencia, el modelo debe cubrir exclusivamente ese turno, sin generar asignaciones adicionales. Bajo esta configuración, se espera que la variable binaria de asignación tome valor 1 únicamente para la combinación (licenciado, día, turno, especialidad) correspondiente al turno demandado. En la Tabla 70 se presentan los parámetros modificados respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
DM (días del horizonte temporal)	1
GI (Cantidad de turnos de guardia interna)	0
GR (Cantidad de turnos de guardia retén)	0
P (Cantidad de turnos de policlínica)	1
LF	1
LS	0
ESP	1
A	1
TC	1
CD	1
Sem	1
Especialidades de cada licenciado	$R_{i,e}$ default 1
Duración de los turnos	$h_1 = 4$
Cantidad de horas contratadas de los distintos licenciados fijos	$k_1 = 4$
Demanda de turnos	$q_{d,t,e}$ default 1
Disponibilidad de los licenciados	$dis_{i,d}$ default 1
Preferencias	$pref_{i,d,t}$ default 1
Ranking de habilidades de cada licenciado	$H_{1,1} = 1$

Tabla 70: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 2 para licenciados.

Resultados obtenidos

Para las cuatro funciones objetivo consideradas, se obtuvo la misma asignación, presentada en la Tabla 71. Este resultado era esperable, dado que el problema queda prácticamente determinado: existe una única asignación que satisface simultáneamente la demanda (q_{dte}) y la carga contratada del licenciado (k_1), sin inducir horas extra ni violaciones de disponibilidad.

Turno	Día 1
Pol_1	1

Tabla 71: Asignación obtenida común para los tres objetivos en el Caso 2 para licenciados.

A su vez, los valores de las funciones objetivo resultaron nulos en las cuatro corridas, lo que indica que la solución cumple las condiciones del modelo sin penalizaciones asociadas a horas extra, preferencias no cumplidas, inestabilidad ni deterioro de la calidad del servicio.

Caso 3: Preferencia de todos los licenciados por no trabajar en ningún turno

En este primer caso, se busca validar que, cuando las preferencias son homogéneas, su influencia sobre la asignación resultante es limitada. Para ello, los datos de entrada del modelo se definen de modo que todas las preferencias de los licenciados toman valor

cero para la totalidad de los días, turnos y especialidades del horizonte de planificación. Este escenario representa una situación en la que el personal no manifiesta preferencias explícitas por ningún turno en particular.

Dado que una de las funciones objetivo busca minimizar la cantidad de preferencias no cumplidas, se espera que, al no existir preferencias positivas, dicho criterio no oriente la optimización hacia ninguna asignación específica. En consecuencia, la solución debería estar determinada principalmente por las restricciones operativas del modelo (cobertura de demanda, disponibilidad, límites contractuales y reglas de especialidad), y no por el componente de preferencias. En la Tabla 72 se presenta el único parámetro modificado respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Preferencias	$pref_{i,d,t}$ default 0

Tabla 72: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 3 para licenciados.

Resultados obtenidos

El modelo fue ejecutado optimizando cada una de las cuatro funciones objetivo consideradas. Los valores obtenidos para los principales indicadores se presentan de manera comparativa en la Tabla 73.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	0,00	25,33 %	20,00 %	13,79 %
Preferencias no cumplidas	0,00	20,00 %	14,44 %	31,03 %
Inestabilidad en la asignación	48,00	36,00 %	0,00 %	20,69 %
Calidad de servicio	4,00	26,67 %	20,00 %	75,86 %

Tabla 73: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para licenciados en Caso 3.

Al igual que en el Caso 1 del modelo de médicos (véase Sección 4.3.1), se observa que, aun con $pref = 0$ en todo el horizonte, el indicador de preferencias no cumplidas no necesariamente toma valor nulo o es constante. Esto se debe a que, por la definición adoptada, se están cumpliendo las preferencias de no trabajar en algunos casos, y esto varía en la medida que se utilizan suplentes sin preferencias. Para evitar redundancias, se presenta como cronograma representativo el obtenido al minimizar preferencias no cumplidas en la Tabla 74.

Turno Esp	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1_E01		7	7	6	6
Pol_1_E02	6	6	6	7	4
GI_2_E01	5	6	7	6	3
GI_2_E02	6	1	6	7	2
GR_3_E01	2	3	5	3	5
GR_3_E02	4	4	1	1	2

Tabla 74: Asignación obtenida para la minimización de preferencias no cumplidas en el Caso 3 para licenciados.

Caso 4: Carga diaria insuficiente para cumplir la demanda

El objetivo de este caso es validar la correcta implementación de la restricción de carga diaria, verificando que el modelo detecte adecuadamente situaciones en las que dicha restricción imposibilita satisfacer la demanda requerida. En este caso se analiza el comportamiento de la solución ante un escenario en el que la capacidad operativa diaria del personal resulta insuficiente para cubrir la demanda. En particular, se fija la carga diaria máxima por licenciado en un nivel tal que impide realizar cualquier turno dentro del día. Al establecer $CD=0$, se espera que ningún licenciado pueda ser asignado a turnos en ningún día del horizonte, aun cuando exista demanda positiva. En la Tabla 75 se presenta el parámetro modificado respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
CD	0

Tabla 75: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 4 para licenciados.

Resultados obtenidos

Tal como se esperaba, el modelo no admite solución factible bajo esta configuración. La restricción de carga diaria impide cualquier asignación, mientras que la demanda de turnos permanece positiva, generando una incompatibilidad estructural entre imposibilidad de trabajo y requerimientos de cobertura. Este caso confirma que la restricción de carga diaria se encuentra correctamente implementada y que el modelo identifica adecuadamente escenarios en los que la capacidad operativa es insuficiente para satisfacer la demanda.

Caso 5: Horas contratadas superiores a las disponibles para asignar

El objetivo de este caso es evaluar la coherencia del modelo ante esta incompatibilidad entre obligaciones contractuales y capacidad real de asignación. En particular, se analiza una situación de sobrecontratación, en la que las horas contratadas de los licenciados fijos superan la capacidad efectiva de asignación del sistema, dadas la demanda y la estructura de turnos disponibles. En consecuencia, se espera que el problema no admita una solución factible, ya que no es posible cumplir simultáneamente con la restricción de horas contratadas y con las restantes restricciones operativas del modelo. En la Tabla 76 se presentan los parámetros modificados respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Cantidad de horas de policlínica contratadas por médico en período a analizar	$k_1 = 60$
	$k_2 = 60$
	$k_3 = 60$
	$k_4 = 60$
	$k_5 = 60$

Tabla 76: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 5 para licenciados.

Resultados obtenidos

Bajo esta configuración, no existe solución factible. Este resultado es consistente con el diseño del caso: las horas contratadas a cumplir superan la capacidad total de horas asignables en el horizonte, lo que imposibilita encontrar una solución que satisfaga simultáneamente las restricciones contractuales y la estructura de turnos demandados.

Caso 6: Disponibilidad exclusiva de licenciados fijos

El objetivo es validar el comportamiento del modelo cuando la capacidad contratada del personal fijo no es suficiente para cubrir todos los turnos demandados y, en consecuencia, la única alternativa para alcanzar la cobertura es recurrir a horas extra. En este caso se define un escenario en el que no se dispone de licenciados suplentes ($LS=0$), por lo que toda la cobertura de la demanda debe resolverse con licenciados fijos.

En este sentido, se espera que el problema resulte factible y que el modelo cubra la totalidad de los turnos requeridos asignando horas extra a los licenciados fijos, respetando el resto de las restricciones operativas.

Resultados obtenidos

El modelo fue ejecutado optimizando cada una de las cuatro funciones objetivo. Los valores obtenidos para los principales indicadores se resumen en la Tabla 77. Dado que no se dispone de suplentes en este escenario, todas las soluciones factibles se construyen necesariamente con licenciados fijos. Los resultados muestran que la cobertura completa de la demanda requiere asignar horas extra: el indicador de horas extra toma el valor 56 en las cuatro corridas.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	56	38,67 %	27,78 %	13,79 %
Preferencias no cumplidas	56	20,00 %	16,67 %	24,14 %
Inestabilidad en la asignación	56	44,00 %	1,11 %	6,90 %
Calidad de servicio	56	33,33 %	18,89 %	65,52 %

Tabla 77: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para licenciados en Caso 6.

Esto confirma que, bajo esta parametrización, la utilización de horas extra es estructural (es decir, está impuesta por el desbalance entre demanda y horas contratadas disponibles) y no depende del criterio de optimización seleccionado. En cambio, los restantes indicadores (preferencias no cumplidas, inestabilidad y calidad de servicio) sí varían entre corridas, reflejando las compensaciones propias de cada función objetivo una vez garantizada la cobertura mediante horas extra.

Caso 7: Reducción de disponibilidad con ajuste de horas contratadas

El objetivo de este caso es validar la correcta implementación de las restricciones de disponibilidad. En particular, se evalúa el comportamiento del modelo ante la situación de un licenciado que presenta días de licencia dentro del horizonte de planificación y, por lo tanto, no se encuentra disponible para ser asignado en dichos días. Además, se ajusta su carga contractual para representar una menor exigencia de horas a cumplir en el período. Se espera que el licenciado no reciba asignaciones en los días en los que su disponibilidad es nula. En consecuencia, las necesidades de cobertura correspondientes a esos días deben ser absorbidas por el resto del personal disponible, respetando las restantes restricciones del modelo. En la Tabla 78 se presentan los parámetros modificados respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Cantidad de horas contratadas de los distintos licenciados fijos	$k_1 = 8$
	$k_2 = 28$
	$k_3 = 28$
	$k_4 = 28$
	$k_5 = 28$
	$k_6 = 28$
Disponibilidad de los licenciados	$dis_{i,d}$ default 1
	$dis_{1,1} = 0$
	$dis_{1,3} = 0$
	$dis_{1,5} = 0$

Tabla 78: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 7 para licenciados.

Resultados obtenidos

El modelo fue ejecutado optimizando cada una de las cuatro funciones objetivo. Los valores obtenidos para los principales indicadores se presentan en la Tabla 60.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	0,00	37,33 %	16,67 %	51,72 %
Preferencias no cumplidas	24,00	8,00 %	12,22 %	79,31 %
Inestabilidad en la asignación	56,00	37,33 %	0,00 %	65,52 %
Calidad de servicio	8,00	37,33 %	13,33 %	100,00 %

Tabla 79: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para licenciados en Caso 7.

En la Tabla 80 se presenta el cronograma correspondiente a la solución obtenida para el objetivo considerado más representativo en este caso:

Turno Esp	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1_E01		2	6	2	7
Pol_1_E02	7	3	7	3	6
GI_2_E01	3	3	3	3	3
GI_2_E02	5	4	5	4	5
GR_3_E01	2	5	2	5	2
GR_3_E02	4	1	4	1	4

Tabla 80: Asignación obtenida para la minimización de inestabilidad en la asignación en el Caso 7 para licenciados.

Resultados obtenidos

Se presenta el cronograma para el objetivo de inestabilidad, pero en todas las corridas se verifica que el licenciado $i = 1$ no es asignado en los días en los que se definió, lo que confirma la correcta implementación de la restricción de disponibilidad. Al mismo tiempo, la demanda se cubre mediante reasignaciones sobre el resto del personal, lo que impacta en los valores de los indicadores según la función objetivo optimizada.

Caso 8: Reducción de disponibilidad sin ajuste de horas contratadas

El objetivo es evaluar el comportamiento del modelo ante la incompatibilidad entre dos requisitos: respetar la disponibilidad individual del personal y satisfacer el cumplimiento de horas contractuales. Este caso es análogo al Caso 8, pero incorpora una condición adicional: se considera un licenciado que no se encuentra disponible para trabajar durante todo el horizonte de planificación y, sin embargo, mantiene horas contratadas a cumplir. Dado que el licenciado no puede ser asignado en ninguno de los días del período, no es posible cumplir sus horas contratadas. En consecuencia, se espera que el modelo identifique correctamente la inexistencia de una solución factible. En la Tabla 81 se presentan los parámetros modificados respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Cantidad de horas contratadas de los distintos licenciados fijos	$k_1 = 28$
	$k_2 = 28$
	$k_3 = 28$
	$k_4 = 28$
	$k_5 = 28$
Disponibilidad de los licenciados	$dis_{i,d}$ default 1
	$dis_{1,1} = 0$
	$dis_{1,2} = 0$
	$dis_{1,3} = 0$
	$dis_{1,4} = 0$
	$dis_{1,5} = 0$

Tabla 81: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 8 para licenciados.

Resultados obtenidos

Bajo esta configuración, no existen soluciones factibles. Este resultado es consistente con el diseño del caso: las restricciones de disponibilidad impiden asignar al licenciado $i = 1$ durante todo el horizonte, mientras que la restricción de cumplimiento de horas contratadas exige asignaciones para satisfacer k_1 , generando un conflicto estructural entre ambas condiciones.

Caso 9: Disponibilidad reducida de médicos suplentes

En este caso el objetivo es validar la correcta implementación de las restricciones de disponibilidad del personal, pero particularmente que el modelo también respete la disponibilidad individual de los licenciados suplentes. A diferencia de los casos anteriores, el foco se sitúa en estos recursos, quienes no poseen horas contratadas a cumplir. Por lo tanto, este escenario permite aislar el efecto de la disponibilidad sobre la asignación de suplentes, sin que intervenga el cumplimiento de una carga contractual. En consecuencia, se espera que ningún licenciado suplente sea asignado en aquellos días en los que se definió $dis_{i,d}=0$. En la Tabla 82 se presentan los parámetros modificados respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Disponibilidad de los licenciados	$dis_{i,d}$ default 1
	$dis_{6,1} = 0$
	$dis_{6,2} = 0$
	$dis_{7,3} = 0$
	$dis_{7,4} = 0$
	$dis_{8,1} = 0$
	$dis_{8,2} = 0$
	$dis_{8,5} = 0$
	$dis_{9,3} = 0$
	$dis_{9,4} = 0$
$dis_{9,5} = 0$	

Tabla 82: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 9 para licenciados.

Resultados obtenidos

El modelo fue ejecutado optimizando cada una de las cuatro funciones objetivo. Los valores obtenidos para los principales indicadores se presentan en la Tabla 83.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	0	36,00 %	23,33 %	58,62 %
Preferencias no cumplidas	8	6,67 %	12,22 %	58,62 %
Inestabilidad en la asignación	36	42,67 %	0,00 %	44,83 %
Calidad de servicio	24	44,00 %	21,11 %	93,10 %

Tabla 83: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para licenciados en Caso 9.

A su vez, el cronograma resultante para el criterio de optimización de horas extra se presenta en la Tabla 84:

Turno_Esp	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1_E01		3	3	3	7
Pol_1_E02	1	1	4	1	1
GI_2_E01	7	5	3	6	7
GI_2_E02	1	2	8	1	1
GR_3_E01	7	3	5	5	2
GR_3_E02	2	7	8	4	4

Tabla 84: Asignación obtenida para la minimización de horas extra en el Caso 9 para licenciados.

En todas las corridas se verifica que los licenciados suplentes no son asignados en los días en los que su disponibilidad fue definida como nula, se presenta únicamente 84 a modo de ejemplo, lo que confirma la correcta implementación de la restricción de disponibilidad para este grupo. Dado que los suplentes no tienen horas contratadas, el modelo puede utilizarlos únicamente cuando están disponibles y cuando resulta conveniente para satisfacer la demanda o mejorar el valor de la función objetivo seleccionada, sin introducir obligaciones adicionales de cumplimiento contractual.

Caso 10: Horas contratadas suficientes para cubrir la demanda sin asignar suplentes

El objetivo de este caso es validar que, cuando la cobertura puede satisfacerse con licenciados fijos respetando las restricciones del modelo, el uso de suplentes no se active de manera innecesaria. Para esto, se define un escenario en el que existen licenciados suplentes disponibles, pero la dotación de licenciados fijos y sus horas contratadas resultan suficientes para cubrir la totalidad de la demanda del horizonte de planificación sin necesidad de recurrir a suplentes ni a horas extra. En consecuencia, se espera obtener una solución factible en la que no se asignen licenciados suplentes y en la que el indicador de horas extra sea nulo. En la Tabla 85 se presenta el parámetro modificado respecto del escenario de referencia.

Nombre del parámetro	Valor
Cantidad de horas contratadas de los distintos licenciados fijos	$k_1 = 32$
	$k_2 = 28$
	$k_3 = 48$
	$k_4 = 56$
	$k_5 = 32$

Tabla 85: Parámetros alterados respecto del escenario de referencia para el Caso 10 para licenciados.

Resultados obtenidos

El modelo fue ejecutado optimizando cada una de las cuatro funciones objetivo consideradas. Los valores obtenidos para los principales indicadores se presentan en la Tabla 86.

Función objetivo	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad en la asignación	Calidad de servicio
Horas extra	0	36,00 %	21,11 %	68,97 %
Preferencias no cumplidas	0	22,67 %	18,89 %	62,07 %
Inestabilidad de la solución	0	44,00 %	5,56 %	62,07 %
Calidad de servicio	0	49,33 %	16,67 %	75,86 %

Tabla 86: Resultados de las corridas mono-objetivo del modelo para licenciados en Caso 10.

Se observa que el valor de horas extra es 0 en todas las corridas, lo que confirma que la dotación fija alcanza para cubrir la demanda sin recurrir a trabajo extraordinario. Además, el cronograma obtenido en Tabla 87 no asigna licenciados suplentes, lo cual es consistente con el objetivo del caso: la disponibilidad de suplentes no induce asignaciones cuando los licenciados fijos pueden satisfacer la demanda por sí solos.

Turno_Esp	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Pol_1_E01		3	2	2	3
Pol_1_E02	4	4	4	4	4
GI_2_E01	5	2	2	3	5
GI_2_E02	4	4	1	4	1
GR_3_E01	3	3	5	3	2
GR_3_E02	5	1	4	1	4

Tabla 87: Asignación obtenida para la minimización de horas extra en el Caso 10 para licenciados.

Este caso valida correctamente que el modelo no utiliza suplentes de forma innecesaria cuando la demanda puede cubrirse con licenciados fijos dentro de sus límites contractuales, y que la cobertura se logra sin activar horas extra.

Apéndice 3: Enlaces a documentos complementarios

[Cronograma Manual - Noviembre 2025](#): planillas de cronograma correspondientes al mes de noviembre 2025, tanto para médicos como para licenciados, recibidas por parte de COMEPA.

[Datos - Asignación médicos](#): listado completo de parámetros para el modelo de médicos.

[Datos - Asignación licenciados](#): listado completo de parámetros para el modelo de licenciados.

[Cronograma GP - Noviembre 2025](#): planillas correspondientes a los cronogramas de médicos y licenciados para noviembre de 2025, obtenidos a partir de la ejecución de los modelos GP.

Apéndice 4: Comparación de horas asignadas a licenciados

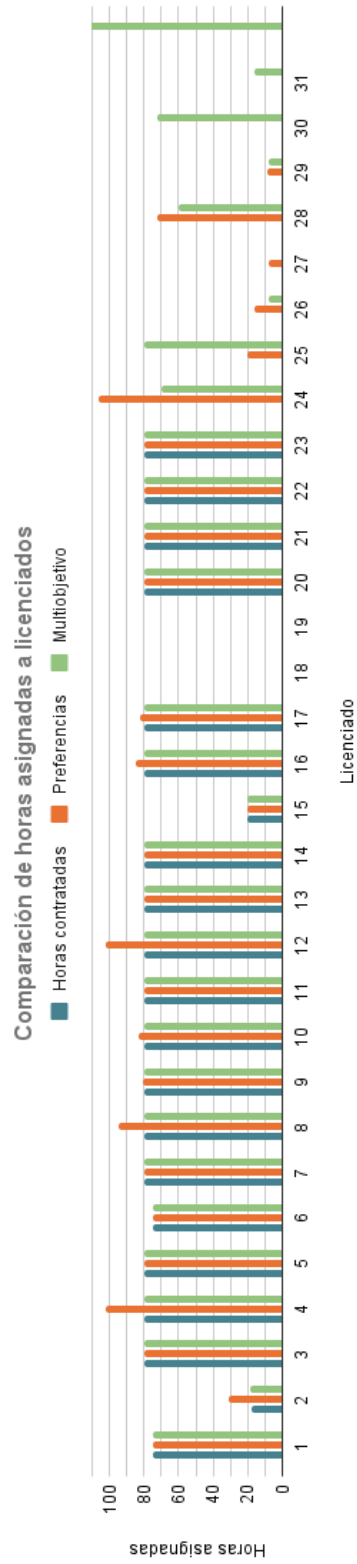


Figura 10: Gráfico comparativo de horas asignadas entre licenciados.

Apéndice 5: Análisis de sensibilidad: licenciados

Lic.	Función objetivo			
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas	Inestabilidad	Calidad de servicio
1	3,70 %	2,96 %	3,70 %	2,96 %
2	1,11 %	0,00 %	1,85 %	3,33 %
3	11,85 %	0,00 %	13,70 %	11,85 %
4	12,22 %	0,00 %	15,93 %	11,48 %
5	11,85 %	0,00 %	13,70 %	12,59 %
6	3,70 %	2,96 %	3,70 %	2,96 %
7	8,15 %	7,41 %	10,37 %	7,41 %
8	12,59 %	0,00 %	9,63 %	13,33 %
9	8,89 %	3,70 %	7,78 %	9,26 %
10	7,78 %	3,33 %	8,89 %	9,26 %
11	9,63 %	0,00 %	5,93 %	14,81 %
12	9,26 %	0,00 %	10,00 %	14,44 %
13	12,59 %	0,37 %	6,67 %	5,56 %
14	9,63 %	0,00 %	5,93 %	14,81 %
15	1,48 %	0,00 %	3,70 %	3,70 %
16	10,37 %	2,59 %	9,63 %	10,74 %
17	9,26 %	1,48 %	8,52 %	9,26 %
18	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
19	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
20	5,93 %	0,00 %	8,15 %	1,48 %
21	11,11 %	1,11 %	11,48 %	11,11 %
22	8,89 %	0,00 %	9,63 %	0,74 %
23	10,00 %	2,59 %	15,19 %	14,81 %

Tabla 88: Porcentaje de preferencias no cumplidas por licenciado según solución obtenida.

Lic.	Función objetivo			
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas (h)	Inestabilidad (h)	Calidad de servicio (h)
1	75,00	75,00	75,00	75,00
2	19,00	31,00	19,00	23,50
3	80,00	80,00	92,00	82,00
4	80,00	102,50	80,00	95,00
5	80,00	80,00	92,00	80,00
6	75,00	75,00	75,00	75,00
7	80,00	80,00	112,00	80,00
8	80,00	95,00	80,00	95,00
9	80,00	81,00	84,00	81,00
10	80,00	83,00	80,00	81,00
11	80,00	80,00	80,00	80,00
12	80,00	102,50	80,00	80,00
13	80,00	80,00	89,00	80,00
14	80,00	80,00	80,00	80,00
15	20,00	20,00	20,00	20,00
16	80,00	85,00	80,00	81,00
17	80,00	82,00	80,00	80,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00
20	80,00	80,00	96,00	80,00
21	80,00	80,00	81,00	81,00
22	80,00	80,00	80,00	80,00
23	80,00	80,00	96,00	101,50
24	84,00	106,00	56,00	0,00
25	40,00	20,00	72,00	68,00
26	13,00	16,00	0,00	16,00
27	8,00	8,00	0,00	0,00
28	56,00	72,00	12,00	72,00
29	20,00	9,00	0,00	40,00
30	85,00	0,00	72,00	24,00
31	8,00	0,00	0,00	32,00

Tabla 89: Cantidad de horas asignadas por licenciado según solución obtenida.

Lic.	Función objetivo				
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas (h)	Inestabilidad (h)	Calidad de servicio (h)	Multi-objetivo (h)
1	3,70 %	2,96 %	3,70 %	2,96 %	3,70 %
2	1,11 %	0,00 %	1,85 %	3,33 %	1,11 %
3	11,85 %	0,00 %	13,70 %	11,85 %	0,00 %
4	12,22 %	0,00 %	15,93 %	11,48 %	1,11 %
5	11,85 %	0,00 %	13,70 %	12,59 %	0,00 %
6	3,70 %	2,96 %	3,70 %	2,96 %	3,70 %
7	8,15 %	7,41 %	10,37 %	7,41 %	7,41 %
8	12,59 %	0,00 %	9,63 %	13,33 %	0,74 %
9	8,89 %	3,70 %	7,78 %	9,26 %	7,04 %
10	7,78 %	3,33 %	8,89 %	9,26 %	5,19 %
11	9,63 %	0,00 %	5,93 %	14,81 %	0,00 %
12	9,26 %	0,00 %	10,00 %	14,44 %	1,11 %
13	12,59 %	0,37 %	6,67 %	5,56 %	0,37 %
14	9,63 %	0,00 %	5,93 %	14,81 %	0,00 %
15	1,48 %	0,00 %	3,70 %	3,70 %	0,00 %
16	10,37 %	2,59 %	9,63 %	10,74 %	6,30 %
17	9,26 %	1,48 %	8,52 %	9,26 %	7,41 %
18	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
19	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
20	5,93 %	0,00 %	8,15 %	1,48 %	2,96 %
21	11,11 %	1,11 %	11,48 %	11,11 %	3,70 %
22	8,89 %	0,00 %	9,63 %	0,74 %	2,96 %
23	10,00 %	2,59 %	15,19 %	14,81 %	5,56 %

Tabla 90: Porcentaje de preferencias no cumplidas por licenciado en las soluciones mono-objetivo y multi-objetivo.

Lic.	Función objetivo				
	Horas extra (h)	Preferencias no cumplidas (h)	Inestabilidad (h)	Calidad de servicio (h)	Multi-objetivo (h)
1	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00
2	19,00	31,00	19,00	23,50	19,00
3	80,00	80,00	92,00	82,00	80,00
4	80,00	102,50	80,00	95,00	80,00
5	80,00	80,00	92,00	80,00	80,00
6	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00
7	80,00	80,00	112,00	80,00	80,00
8	80,00	95,00	80,00	95,00	80,00
9	80,00	81,00	84,00	81,00	80,00
10	80,00	83,00	80,00	81,00	80,00
11	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
12	80,00	102,50	80,00	80,00	80,00
13	80,00	80,00	89,00	80,00	80,00
14	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
15	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
16	80,00	85,00	80,00	81,00	80,00
17	80,00	82,00	80,00	80,00	80,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	80,00	80,00	96,00	80,00	80,00
21	80,00	80,00	81,00	81,00	80,00
22	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
23	80,00	80,00	96,00	101,50	80,00
24	84,00	106,00	56,00	0,00	70,00
25	40,00	20,00	72,00	68,00	80,00
26	13,00	16,00	0,00	16,00	8,00
27	8,00	8,00	0,00	0,00	0,00
28	56,00	72,00	12,00	72,00	60,00
29	20,00	9,00	0,00	40,00	8,00
30	85,00	0,00	72,00	24,00	72,00
31	8,00	0,00	0,00	32,00	16,00

Tabla 91: Horas asignadas por licenciado en las soluciones mono-objetivo y multi-objetivo.

Licenciado	Horas contratadas (h)	Horas Cronograma Manual (h)	Horas Modelo Multi-objetivo (h)
1	75,00	75,00	75,00
2	18,00	31,00	19,00
3	80,00	80,00	80,00
4	80,00	102,50	80,00
5	80,00	80,00	80,00
6	75,00	37,50	75,00
7	80,00	74,50	80,00
8	80,00	95,00	80,00
9	80,00	82,00	80,00
10	80,00	82,00	80,00
11	80,00	80,00	80,00
12	80,00	102,50	80,00
13	80,00	80,00	80,00
14	80,00	80,00	80,00
15	20,00	20,00	20,00
16	80,00	87,00	80,00
17	80,00	82,00	80,00
18	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00
20	80,00	80,00	80,00
21	80,00	72,00	80,00
22	80,00	80,00	80,00
23	80,00	64,00	80,00
24	0,00	0,00	70,00
25	0,00	80,00	80,00
26	0,00	56,00	8,00
27	0,00	0,00	0,00
28	0,00	100,00	60,00
29	0,00	24,00	8,00
30	0,00	0,00	72,00
31	0,00	36,00	16,00

Tabla 92: Comparación de cantidad de horas asignadas a cada licenciado.