

<https://doi.org/10.47633/xfp1tp18>

Planificación óptima de recursos hospitalarios mediante pronósticos de demanda en el sistema sanitario español

Optimizing hospital resource allocation through demand forecasting in the Spanish health system

Planejamento ótimo de recursos hospitalares por meio de previsões de demanda no sistema de saúde espanhol

David Alonso Zamora-Barrantes

Universidad Técnica Nacional. Alajuela, Costa Rica

<https://ror.org/04zhrfn38>

<https://orcid.org/0009-0009-2976-4868>

Davzamora@estudiantec.cr

Recibido 14-11-2025 | Revisado 20-11-2025 | Aceptado 14-1-2026



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Resumen

Este artículo presenta un modelo integrado para la optimización presupuestaria en sistemas de salud, que combina técnicas de pronóstico de demanda hospitalaria con programación lineal para la asignación eficiente de recursos. La pandemia de COVID-19 evidenció limitaciones en la capacidad de los sistemas sanitarios para responder a incrementos abruptos en las hospitalizaciones, resaltando la necesidad de herramientas cuantitativas que apoyen la planificación anticipada. La metodología propuesta se basa en dos componentes complementarios. Por un lado, se emplean modelos de series temporales para proyectar la evolución de las hospitalizaciones a corto plazo, identificando tendencias y patrones estacionales. Por otro, estas proyecciones se integran en un modelo de optimización lineal que determina el número óptimo de camas hospitalarias a financiar, considerando restricciones presupuestarias, costos unitarios, proporciones mínimas entre camas generales y de cuidados intensivos, así como requerimientos operativos básicos. El enfoque se valida mediante un caso de estudio con datos reales de hospitalizaciones por COVID-19 en España, obtenidos de fuentes oficiales abiertas. Los resultados muestran que la demanda proyectada se mantiene en niveles moderados y relativamente estables, lo que permite identificar configuraciones de asignación de camas económicamente viables y operativamente eficientes. En conjunto, la integración de modelos predictivos y herramientas de optimización se consolida como una estrategia robusta para fortalecer la planificación hospitalaria en contextos de incertidumbre. El modelo propuesto facilita la toma de decisiones informadas, transparentes y justificables, contribuyendo a una gestión más eficiente del presupuesto y de la capacidad hospitalaria en sistemas de salud contemporáneos.

Palabras clave: España; gestión hospitalaria; modelos de optimización; programación lineal; pronóstico de demanda sanitaria



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Abstract

This article presents an integrated model for budget optimization in healthcare systems, combining hospital demand forecasting techniques with linear programming for efficient resource allocation. The COVID-19 pandemic revealed significant limitations in the capacity of healthcare systems to respond to sudden increases in hospitalizations, highlighting the need for quantitative tools to support anticipatory planning. The proposed methodology is based on two complementary components. First, time series models are used to project short-term hospitalizations, capturing trends and seasonal patterns. Second, these projections are incorporated into a linear optimization model that determines the optimal number of hospital beds to be funded, taking into account budget constraints, unit costs, minimum proportions between general and intensive care beds, and basic operational requirements. The approach is validated through a case study using real data on COVID-19 hospitalizations in Spain obtained from official open sources. The results show that the projected demand remains at moderate and relatively stable levels, enabling the identification of economically viable and operationally efficient bed allocation configurations. Overall, the integration of predictive models and optimization tools proves to be a robust strategy for strengthening hospital planning in uncertain contexts. The proposed model facilitates informed, transparent, and justifiable decision-making, contributing to more efficient management of budgets and hospital capacity in contemporary healthcare systems.

Keywords: demand forecasting in healthcare; hospital management; linear programming; optimization models; Spain

Resumo

Este artigo apresenta um modelo integrado para a otimização orçamentária em sistemas de saúde, que combina técnicas de previsão da demanda hospitalar com programação linear para a alocação eficiente de recursos. A pandemia da COVID-19 evidenciou limitações na capacidade dos sistemas de saúde de responder a aumentos abruptos nas hospitalizações, destacando a necessidade de



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

ferramentas quantitativas que apoiam o planejamento antecipado. A metodologia proposta baseia-se em dois componentes complementares. Primeiramente, utilizam-se modelos de séries temporais para projetar as hospitalizações no curto prazo, identificando tendências e padrões sazonais. Em seguida, essas projeções são integradas a um modelo de otimização linear que determina o número ótimo de leitos hospitalares a serem financiados, considerando restrições orçamentárias, custos unitários, proporções mínimas entre leitos gerais e de terapia intensiva, bem como requisitos operacionais básicos. O enfoque é validado por meio de um estudo de caso com dados reais de hospitalizações por COVID-19 na Espanha, obtidos de fontes oficiais abertas. Os resultados indicam que a demanda projetada se mantém em níveis moderados e relativamente estáveis, permitindo identificar configurações de alocação de leitos economicamente viáveis e operacionalmente eficientes. Em conjunto, a integração de modelos preditivos e ferramentas de otimização consolida-se como uma estratégia robusta para fortalecer o planejamento hospitalar em contextos de incerteza, favorecendo decisões informadas, transparentes e justificáveis na gestão orçamentária e da capacidade hospitalar.

Palavras-chave: previsão de demanda em saúde; gestão hospitalar; programação linear; modelos de otimização; Espanha

Introducción

La pandemia de COVID-19 evidenció las limitaciones de los sistemas de salud para adaptarse a variaciones rápidas e impredecibles en la demanda hospitalaria. En ese contexto, planificar la disponibilidad de camas generales y de UCI se volvió esencial para garantizar la continuidad del servicio sin sobrepasar las restricciones presupuestarias.

Este trabajo presenta un modelo integrado de pronóstico y optimización destinado a apoyar la toma de decisiones en la planificación hospitalaria. La metodología combina el modelo Facebook Prophet, utilizado para estimar la evolución temporal de las hospitalizaciones y caracterizar sus patrones de tendencia y estacionalidad, con un modelo de programación lineal que emplea dichas proyecciones para definir la asignación óptima de recursos bajo un presupuesto limitado.



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Ambos componentes actúan de manera complementaria: Prophet genera una estimación cuantitativa de la demanda futura y su incertidumbre asociada, mientras que el modelo de optimización traduce esa información en decisiones operativas sobre el número de camas generales y de UCI a financiar, considerando costos unitarios, proporciones mínimas requeridas y restricciones de capacidad.

El caso de estudio utiliza datos de hospitalizaciones por COVID-19 en España procedentes de Our World in Data y busca responder a una pregunta clave para la gestión sanitaria: ¿El presupuesto disponible permite cubrir la demanda proyectada y cómo debería distribuirse entre camas generales y de UCI para garantizar una asignación eficiente y sostenible?

Metodología

Este estudio integra dos componentes metodológicos principales: un modelo de pronóstico de demanda hospitalaria mediante Facebook Prophet y un modelo de programación lineal para la asignación óptima de recursos hospitalarios.

Se emplearon los datos de hospitalizaciones y admisiones a UCI por COVID-19 en España proporcionados por Our World in Data. El conjunto de datos contiene series temporales diarias y constituye la base para la construcción del modelo de pronóstico.

Proyección con Facebook Prophet

La proyección consistirá en una predicción de los próximos 90 días. Se probaron con múltiples configuraciones para la misma, siendo que los mejores resultados se obtuvieron de la siguiente forma:

```
# Crear y ajustar el modelo Prophet con parámetros específicos
modelo <- prophet(
  df_prophet,
  growth = "linear",           # Tendencia lineal
  seasonality_mode = "multiplicative", # Estacionalidad multiplicativa
  daily.seasonality = FALSE,      # No se utiliza estacionalidad diaria
```



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

```
weekly.seasonality = TRUE,  
yearly.seasonality = TRUE,  
changepoint.prior.scale = 0.004, # Flexibilidad de puntos de cambio  
n.changepoints = 32,          # Cantidad de puntos de cambio  
interval.width = 0.80         # Intervalo de confianza  
)
```

Modelo de programación lineal

Objetivo: Maximizar la capacidad hospitalaria ajustada a la demanda histórica, sujeto a restricciones de recursos.

Variables:

x : Número de camas hospitalarias a asignar.

y : Número de camas UCI a asignar.

Restricciones:

1. Recursos totales: $x + y \leq$ Presupuesto máximo.
2. Demanda mínima: $x \geq$ Promedio de hospitalizaciones diarias
3. Proporción: $y \geq 0.3 \times x$ (al menos 30% de camas UCI respecto a generales).
4. Cantidad mínima de camas UCI: $y \geq 100$

Función objetivo: Minimizar $Z = C_x \times x + C_y \times y$ donde C_x , C_y son costos por cama general y UCI respectivamente.

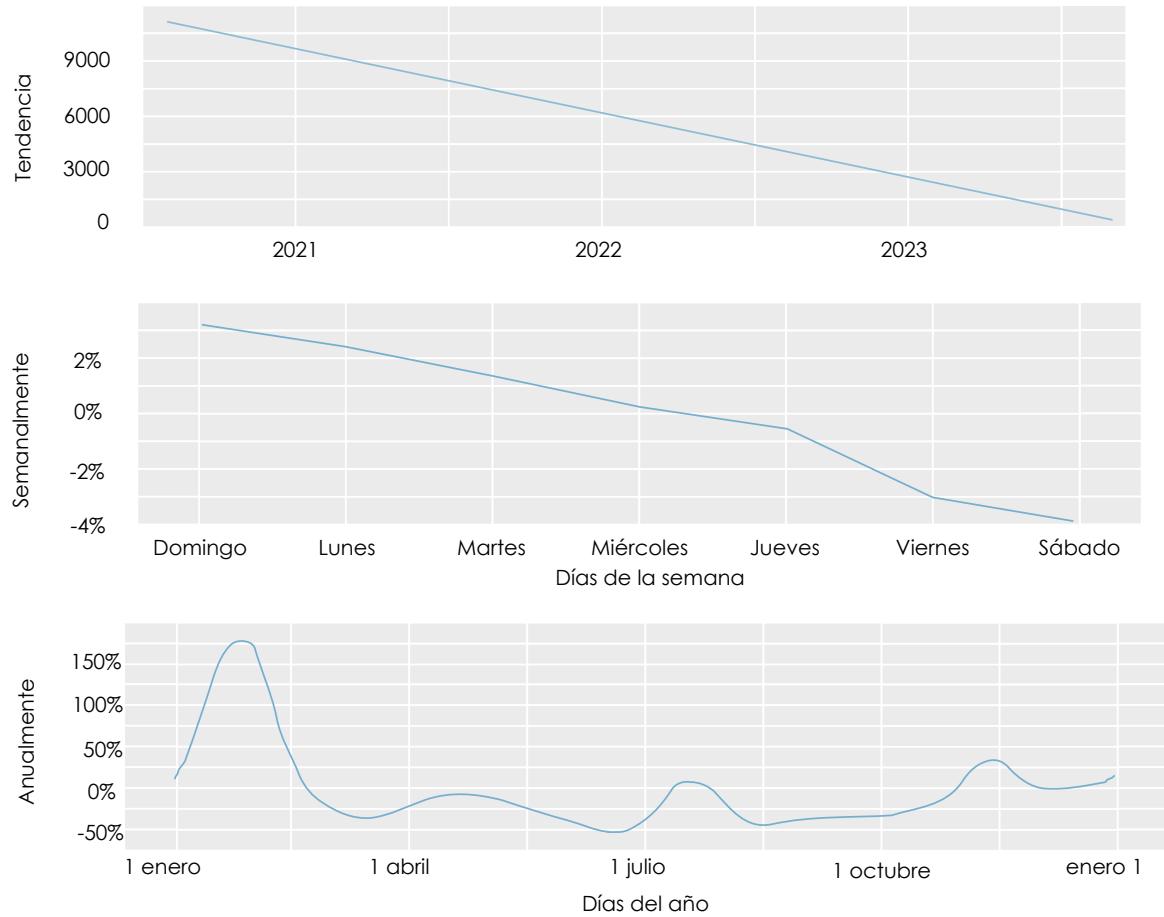
Se utilizó como referencia un presupuesto de 7.371 millones de euros destinado al tratamiento de COVID-19 durante 2020 [2], tomado como aproximación general para el modelo. El costo unitario de una cama hospitalaria se estimó en 4000 euros , a partir de un valor comercial de 3872 euros [3], mientras que una cama de UCI se valoró en 15 500 euros según datos de contratación pública [4]. Estos valores sirven como parámetros de costo para el modelo de optimización.



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Resultados

Proyección con Facebook Prophet



Desde 2020 hasta 2023 la serie muestra una tendencia claramente decreciente reflejo de la alta presión hospitalaria en 2020–2021 y su posterior reducción por vacunación y menor gravedad de casos; no se detectan saltos bruscos recientes, lo que sugiere estabilidad en el periodo analizado. A escala semanal existe una estacionalidad administrativa: los ingresos reportados son más altos domingos y lunes y disminuyen hacia el sábado, probablemente por efectos de reporte y gestión y no por cambios reales en la transmisión. La estacionalidad anual presenta picos en enero (olas invernales/post-Navidad), mínimos en junio-julio y pequeños repuntes en

octubre-noviembre, coherentes con la dinámica típica de virus respiratorios.

El pronóstico de Prophet para 90 días proyecta un promedio diario bajo (≈ 400 hospitalizados) con intervalos amplios y límites inferiores poco informativos, lo que indica incertidumbre en extremos debido a la baja tendencia base.

RESUMEN DEL PRONÓSTICO PARA LOS PRÓXIMOS 90 DÍAS:

```
> cat("Promedio predicho:", round(mean(pronostico_final$yhat), 2), "\n")
```

Promedio predicho: 396.13

```
> cat("Mínimo predicho:", round(min(pronostico_final$yhat), 2), "\n")
```

Mínimo predicho: 83.86

```
> cat("Máximo predicho:", round(max(pronostico_final$yhat), 2), "\n")
```

Máximo predicho: 726.92

```
> cat("Intervalo de confianza 80%: [",
```

```
+ round(mean(pronostico_final$yhat_lower), 2), ",",
```

```
+ round(mean(pronostico_final$yhat_upper), 2), "]\n")
```

Intervalo de confianza 80%: [-2856.76 , 3680.1]

El modelo estima que en los próximos tres meses el promedio diario de hospitalizaciones rondará unas 400 personas. Esto representa un nivel muy bajo comparado con los picos históricos (de más de 20 000 hospitalizados al día en 2020–2021).

El valor concuerda con la fase “endémica” (nivel base de la enfermedad) observada en 2023, donde las hospitalizaciones son residuales y no saturan los hospitales. Con picos mínimos de 100 personas y máximos de 700, lo que sugiere que el modelo espera oscilaciones leves, posiblemente asociadas a la estacionalidad. En cuanto al intervalo de confianza del 80 %, su rango es extremadamente amplio y con un límite inferior negativo. Lo que indica que el modelo no puede garantizar con precisión los valores extremos, esto por la reducción drástica de la tendencia (cercana a cero).

El uso de una componente multiplicativa que amplifica la varianza en niveles bajos, además de posibles picos esporádicos o efectos de calendario difíciles de capturar.

Problema de programación lineal: Resultados del modelo



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Rows: 230524 Columns: 5

— Column specification —————

Delimiter: ","

chr (3): entity, iso_code, indicator

dbl (1): value

date (1): date

i Use `spec()` to retrieve the full column specification for this data.

i Specify the column types or set `show_col_types = FALSE` to quiet this message.

[1] "Camas generales: 6195"

[1] "Camas UCI: 1859"

[1] "Costo total: 53594500"

Discusión

La validación cruzada realizada sobre el modelo Prophet permitió evaluar su capacidad para reproducir el comportamiento histórico de las hospitalizaciones por COVID-19 en España. Los once cortes generados entre mayo de 2022 y marzo de 2023 mostraron un desempeño estable: el MAE y el RMSE indican errores moderados y sin valores atípicos significativos, mientras que el MAPE de 0.7 % refleja un ajuste preciso, aunque influido por la magnitud elevada de las cifras históricas. En general, el modelo logra proyecciones confiables a 90 días en contextos de tendencia estable como el observado en 2022–2023. Sin embargo, su precisión podría disminuir ante una nueva ola epidémica, ya que asume continuidad en los patrones pasados.

La interacción entre Prophet y la programación lineal resulta fundamental. El pronóstico define la demanda mínima que debe satisfacer el modelo de optimización, por lo que cualquier cambio en la tendencia estimada se traduce directamente en ajustes en el número óptimo de camas y en el costo total. Así, un incremento en la demanda proyectada elevaría los requerimientos de camas generales y de UCI, mientras que una tendencia descendente permitiría una asignación más reducida y económica.



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

A pesar de la utilidad de este enfoque integrado, ambos modelos presentan limitaciones. Prophet no incorpora factores operativos como estancias promedio, disponibilidad de personal, mantenimiento de equipos o variaciones regionales, y depende de la estabilidad de la serie temporal. Por su parte, la programación lineal se ve condicionada por la calidad de los parámetros de entrada: costos, presupuesto y límites operativos, que pueden variar entre centros o actualizarse con el tiempo. Además, los valores utilizados provienen de referencias públicas generales que no necesariamente reflejan la realidad específica del sistema hospitalario en distintos entornos.

Entre las mejoras posibles se incluyen: evaluar escenarios de demanda baja, media y alta usando los intervalos de Prophet; explorar modelos de optimización con múltiples objetivos que equilibren costo, capacidad y riesgo de insuficiencia; actualizar periódicamente el pronóstico para mantener decisiones vigentes; e integrar dimensiones adicionales, como personal sanitario, infraestructura física, cadenas de suministro, costos variables o restricciones regionales. Estas ampliaciones permitirían capturar mejor la complejidad del sistema hospitalario y ofrecer recomendaciones más robustas frente a la incertidumbre.

Conclusiones

El estudio demuestra que la integración de un modelo de pronóstico mediante Prophet y un modelo de optimización por programación lineal constituye una herramienta eficaz para apoyar la planificación hospitalaria. Prophet permitió caracterizar la evolución temporal de las hospitalizaciones por COVID-19 en España, evidenciando una tendencia general a la baja y proyectando una demanda futura moderada, con un promedio cercano a 396 hospitalizaciones diarias.

A partir de estas predicciones, la programación lineal tradujo la demanda estimada en decisiones operativas concretas, determinando la combinación óptima de camas generales y de UCI bajo restricciones presupuestarias y operativas. La relación entre ambos modelos es directa: un aumento en la demanda proyectada incrementa los recursos necesarios y el costo asociado, mientras que una tendencia descendente reduce la presión sobre la capacidad hospitalaria.



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

El enfoque integrado ofrece una base cuantitativa para anticipar necesidades y orientar la asignación eficiente del presupuesto. No obstante, el análisis aún presenta limitaciones derivadas de modelos deterministas, datos agregados y costos aproximados, además de la falta de elementos como variabilidad real del sistema o recursos humanos.

Para estudios futuros se recomienda incorporar análisis por escenarios, actualizar de manera continua los modelos con nuevos datos y ampliar las dimensiones consideradas; personal, tiempos de atención, distribución territorial y restricciones de infraestructura, con el fin de obtener una visión más completa de la capacidad hospitalaria. En conjunto, la combinación de pronósticos y optimización constituye una estrategia sólida y adaptable para apoyar la toma de decisiones en contextos de alta incertidumbre.

Referencias

- Our World in Data. (2023). Data on COVID-19 (coronavirus) hospitalizations and intensive care by Our World in Data [Base de datos]. GitHub. <https://github.com/owid/covid-19-data/tree/master/public/data/hospitalizations>
- Arganda, C. (2022, 6 de setiembre). El gasto sanitario por covid en 2020 fue el 7,3% del total: 8.900 millones. Diariofarma. <https://diariofarma.com/2022/09/06/el-gasto-sanitario-por-covid-en-2020-fue-el-73-del-total-8-900-millones>
- Holity. (2025). Camilla hospitalaria capacidad 200 kg h634_11. <https://www.holity.es/camillas-hospitalarias-de-pasillo/camilla-hospitalaria-capacidad-200-kg-h634-11.html>
- Sescam. (2024). Acuerdo Marco para la Selección de Proveedores de Equipamiento Hospitalario grupo IV para las Gerencias del SESCAM. https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/PLACE_es/Site/area/docAccCmpnt?DocumentIdParam=44d823e6-3c28-4d1b-911a-254e48306f12



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.