

# Ejemplos del Uso de Programación Lineal para la Resolución de Problemas en la Gestión Sanitaria

Exemplos de Uso de Programação Linear para Resolução de Problemas na Área de Gestão em Saúde  
Examples of the Use of Linear Programming for Problem-solving in Healthcare Management

## RESUMO

**Objetivo:** Demonstrar como a Pesquisa Operacional, e em particular a Programação Linear, oferece um conjunto robusto de ferramentas quantitativas para a otimização de processos em gestão na área da saúde. **Método:** Através de três exemplos práticos e realistas — a alocação de enfermeiros em turnos hospitalares, a otimização do acesso geográfico a serviços especializados e aumento da sensibilidade diagnóstica de serviços laboratoriais, — exploramos a formulação de modelos, a interpretação de resultados e as limitações inerentes à técnica. **Resultados:** O trabalho conclui que, embora a PL seja uma ferramenta poderosa, seu valor é maximizado quando combinada com o conhecimento técnico dos gestores e uma compreensão clara de suas limitações, ressaltando a necessidade de capacitação contínua para a aplicação eficaz de modelos de otimização.

**DESCRITORES:** Pesquisa Operacional, Programação Linear, Alocação de Recursos, Administração Hospitalar.

## ABSTRACT

**Objective:** To demonstrate how Operations Research, and specifically Linear Programming, provides a robust set of quantitative tools for process optimization in healthcare management. **Method:** Through three realistic practical examples—nursing shift scheduling, the optimization of geographic access to specialized services, and the enhancement of diagnostic sensitivity in laboratory services—we explore model formulation, results interpretation, and the inherent limitations of the technique.

**Results:** The study concludes that while LP is a powerful tool, its value is maximized when combined with the technical expertise of managers and a clear understanding of its limitations, highlighting the necessity of continuous training for the effective application of optimization models.

**DESCRIPTORS:** Operations Research, Linear Programming, Resource Allocation, Hospital Administration.

## RESUMEN

**Objetivo:** Demostrar cómo la Investigación Operativa, y en particular la Programación Lineal, ofrece un conjunto robusto de herramientas cuantitativas para la optimización de procesos en la gestión sanitaria. **Método:** A través de tres ejemplos prácticos y realistas —la asignación de enfermeros en turnos hospitalarios, la optimización del acceso geográfico a servicios especializados y el aumento de la sensibilidad diagnóstica en servicios de laboratorio— exploramos la formulación de modelos, la interpretación de resultados y las limitaciones inherentes a la técnica. **Resultados:** El trabajo concluye que, si bien la PL es una herramienta poderosa, su valor se maximiza cuando se combina con el conocimiento técnico de los gestores y una comprensión clara de sus limitaciones, resaltando la necesidad de una capacitación continua para la aplicación eficaz de los modelos de optimización.

**DESCRIPTORES:** Investigación Operativa, Programación Lineal, Asignación de Recursos, Administración Hospitalaria.

### Anderson Sena Barnabe

Biólogo. Doctor en Epidemiología. Profesor del departamento de salud de las Facultades Oswaldo Cruz, de la Universidad Cruzeiro do Sul y del Instituto de Investigación y Educación en Salud de São Paulo (IPESP).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7463-6971>

### Flaviane de Fátima Ramos

Estudiante de pregrado en Enfermería de las Facultades Oswaldo Cruz. Integrante de los programas de iniciación científica de las Facultades Oswaldo Cruz.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6778-9730>

### Victor Cauê Lopes

Enfermero. Máster en Enfermería. Profesor del departamento de salud de las Facultades Oswaldo Cruz y del Centro Universitario Católico Ítalo Brasileño.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7328-875X>

### Luana Paula Gomes de Lima

Bióloga. Máster en Biosistemas. Profesora del departamento de salud de las Facultades Oswaldo Cruz.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7505-5283>

**Recibido en:** 26/02/2026

**Aprobado en:** 01/04/2026

## INTRODUCCIÓN

La gestión de los sistemas de salud, ya sean públicos o privados, opera en un entorno de gran complejidad, caracterizado por recursos finitos, múltiples objetivos y una necesidad constante de mejorar la calidad y la eficiencia de la atención. En este escenario, la toma

de decisiones basada puramente en la intuición o en métodos tradicionales de prueba y error resulta insuficiente <sup>(1)</sup>. La Investigación Operativa (IO) surge como una ciencia aplicada dedicada a proporcionar una base analítica para tomar decisiones más eficaces, utilizando un arsenal de métodos matemáticos, estadísticos y computacionales <sup>(2)</sup>.

Entre las herramientas de la IO, la Programación Lineal (PL) destaca por su versatilidad y su capacidad para resolver problemas de optimización. La PL se ha aplicado con éxito en diversas industrias para minimizar costes y maximizar la productividad, y su potencial en el ámbito de la salud es igualmente amplio <sup>(3)</sup>. Los estudios demuestran su utilidad en

una variedad de contextos, desde la planificación de dietas y la optimización de tratamientos de radioterapia hasta la asignación de recursos a gran escala, como la programación de cirugías, la gestión de camas hospitalarias y la optimización de los turnos de trabajo de los profesionales de la salud de e<sup>(4,5)</sup>. En Brasil, algunas investigaciones ya han explorado el uso de la PL para optimizar el acceso geográfico a las redes de atención sanitaria en el Sistema Único de Salud (SUS) y para evaluar el rendimiento de los servicios de atención primaria<sup>(6,7)</sup>.

Sin embargo, la mera presentación de modelos teóricos es insuficiente. La aplicación exitosa de la PL requiere una comprensión profunda no solo de cómo formular un problema, sino también de cómo interpretar sus resultados, reconocer sus limitaciones y sortear los retos prácticos de su implementación. Este artículo pretende llenar ese vacío, ofreciendo un análisis profundo y crítico de la aplicación de la Programación Lineal en el ámbito de la salud. Utilizaremos ejemplos prácticos y más realistas para ilustrar el proceso completo: desde el modelado hasta el debate sobre el análisis de sensibilidad y la necesidad de extensiones como la Programación Entera. El objetivo final es capacitar a los gestores y analistas de salud para que vean la PL no como una «caja negra» matemática, sino como una herramienta estratégica y transparente para mejorar la toma de decisiones.

## MÉTODO

Se trata de un estudio de naturaleza aplicada y cuantitativa, caracterizado por la modelización matemática y la simulación de escenarios. La investigación no implicó la recopilación de datos primarios con seres humanos, basándose en parámetros técnicos extraídos de la literatura especializada y de las normas reguladoras de la salud para la construcción de modelos realistas.

El estudio se llevó a cabo entre febrero de 2025 y diciembre de 2025. Los

escenarios simulados se construyeron basándose en el contexto del Sistema Único de Salud (SUS), teniendo en cuenta aspectos específicos como la legislación laboral de enfermería y la estructura de las redes de atención sanitaria del SUS.

La «muestra» de este estudio consiste en tres problemas típicos fundamentales de la gestión sanitaria, seleccionados por su representatividad y complejidad:

- 1. Dimensionamiento de personal:** Asignación de turnos de enfermería.
- 2. Gestión de redes:** optimización del acceso geográfico y presupuesto a los servicios de fisioterapia.
- 3. Eficiencia diagnóstica:** maximización de la sensibilidad y la rentabilidad de los análisis de laboratorio. Los criterios de inclusión para la selección de estos problemas fueron: (a) e e naturaleza lineal de las restricciones y los objetivos; (b) relevancia directa para la toma de decisiones gerenciales; y (c) disponibilidad de parámetros técnicos para la modelización

La Programación Lineal es una técnica matemática para optimizar un resultado (por ejemplo, minimizar un coste o maximizar la atención) dadas ciertas restricciones (como presupuesto, tiempo o capacidad). Todo problema de PL se compone de tres elementos esenciales:

- 1. Variables de decisión:** representan las cantidades que se desean determinar. Son las «palancas» que el gestor puede ajustar. Por ejemplo, el número de enfermeros que se asignarán a cada turno.
- 2. Función objetivo:** es la expresión matemática, en términos de las variables de decisión, que se desea optimizar (maximizar o minimizar). Debe ser una función lineal.
- 3. Restricciones:** Son ecuaciones o inecuaciones lineales que limitan los valores que pueden adoptar las variables de decisión, representando las limitaciones del mundo real (disponibilidad de personal, presupuesto, demanda mínima, etc.).

Una vez formulado un problema, el método Simplex, desarrollado por George Dantzig en 1947, es el algoritmo que se utiliza tradicionalmente para resolverlo<sup>(8)</sup>. Aunque los detalles matemáticos son complejos, la intuición que subyace al método es geométrica y elegante. El conjunto de todas las soluciones que satisfacen las restricciones se denomina «región viable». En un problema con dos variables, esta región es un polígono en el plano. El método Simplex demuestra que la solución óptima (si existe) siempre estará en uno de los vértices (o «esquinas») de ese polígono. El algoritmo funciona de manera inteligente, partiendo de un vértice inicial y moviéndose hacia vértices adyacentes que mejoren el valor de la función objetivo, hasta que ya no sea posible encontrar un vértice mejor. Los programas informáticos modernos, como el Solver de Excel o las bibliotecas de Python (Scipy, PuLP), automatizan este proceso, permitiendo la resolución de problemas con miles de variables y restricciones.

Para ilustrar la aplicación, presentamos dos ejemplos adaptados de retos comunes en la gestión sanitaria.

### Ejemplo 1: Asignación de enfermeros (programación entera)

**Problema:** Un hospital necesita crear el horario de trabajo diario para una unidad, minimizando los costes de personal y garantizando la cobertura mínima de enfermería en los s turnos diferentes. La legislación laboral exige que cada enfermero trabaje en un turno continuo de 8 horas. Según los datos históricos, la demanda de enfermeros varía a lo largo del día, tal y como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1: Demanda mínima de profesionales en horarios específicos**

Periodo	Horario	Demanda mínima
1	06:00 a 10:00	14
2	10:00 a 14:00	8
3	14:00 a 18:00	12
4	18:00 a 22:00	6
5	22:00 a 06:00	4

Fuente: Autores.

Variables de decisión: Dado que el número de enfermeros debe ser un valor entero, utilizamos la programación entera, una variante de la programación lineal. Las variables son:

- $x_1$ : Número de enfermeros que empiezan a las 06:00 (trabajan de 06:00 a 14:00)
- $x_2$ : Número de enfermeros que empiezan a las 10:00 (trabajan de 10:00 a 18:00)
- $x_3$ : Número de enfermeros que empiezan a las 14:00 (trabajan de 14:00 a 22:00)
- $x_4$ : Número de enfermeros que empiezan a las 18:00 (trabajan de 18:00 a 02:00 del día siguiente)
- $x_5$ : Número de enfermeros que empiezan a las 22:00 (trabajan de 22:00 a 06:00 del día siguiente)
- Función objetivo (minimizar el total de enfermeros contratados):

$$\text{Minimizar } Z = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5$$

- Restricciones (la cobertura en cada periodo debe satisfacer la demanda):
- Periodo 1 (06-10 h):  $x_1 \geq 14$  (solo el turno que comienza a las 6:00 cubre este periodo)
- Periodo 2 (10-14 h):  $x_1 + x_2 \geq 8$  (Cubierto por quienes comenzaron a las 6 h y a las 10 h)
- Periodo 3 (14-18 h):  $x_2 + x_3 \geq 12$
- Periodo 4 (18-22 h):  $x_3 + x_4 \geq 6$
- Periodo 5 (22:00-06:00):  $x_4 + x_5 \geq 4$
- No negatividad e integridad:  $x_i \geq 0$  y  $x_i$  debe ser un número entero para todo  $i$ .

### Ejemplo 2: Optimización del acceso a centros de fisioterapia

Problema: Una secretaría de salud regional desea distribuir su cuota de 1.000 sesiones de fisioterapia mensuales entre dos nuevos centros (Centro A y Centro B) para maximizar el número total de pacientes atendidos. El Centro A, el más grande, tiene un coste de 50 R\$ por sesión y una capacidad máxima de 700 sesiones al mes. El Centro B, más pequeño y situado en una zona de menor coste, tiene un coste de 40 R\$ por sesión y una capacidad de 500 sesiones al mes. El presupuesto total disponible para las sesiones es de 45 000 R\$.

- Variables de decisión:
- $x_A$ : Número de sesiones asignadas al Centro A
- $x_B$ : Número de sesiones asignadas al Centro B
- Función objetivo (maximizar el número de sesiones):  
Maximizar  $Z = x_A + x_B$
- Restricciones:

- Presupuesto:  $50x_A + 40x_B \leq 45000$
- Capacidad del Centro A:  $x_A \leq 700$
- Capacidad del centro B:  $x_B \leq 500$
- Cuota total:  $x_A + x_B \leq 1000$  (Esta restricción puede ser redundante, pero es bueno explicitarla)
- No negatividad:  $x_A \geq 0, x_B \geq 0$

### Ejemplo 3: maximización de la rutina de laboratorio.

Un determinado laboratorio realiza dos tipos de pruebas con el mismo fin (pruebas A y B), ambas se complementan y deben repetirse más de una vez para obtener la mejor predictibilidad diagnóstica. La prueba A tiene una sensibilidad diagnóstica del 60 % y la B del 70 %; el coste de A es de 5,00 R\$ y el de B de 10,00 R\$.

Partiendo de la base de que el laboratorio necesita emitir los informes con la mayor precisión diagnóstica (repetición de los análisis) y en un plazo máximo de 120 minutos, al mejor precio, nuestro objetivo es: minimizar el coste de los análisis y optimizar la respuesta en cuanto a la sensibilidad de los informes y en el menor tiempo posible. El control de calidad exige que la sensibilidad diagnóstica sea de al menos el 60 %, y que el tiempo de operación sea de 20 y 40 minutos, respectivamente.

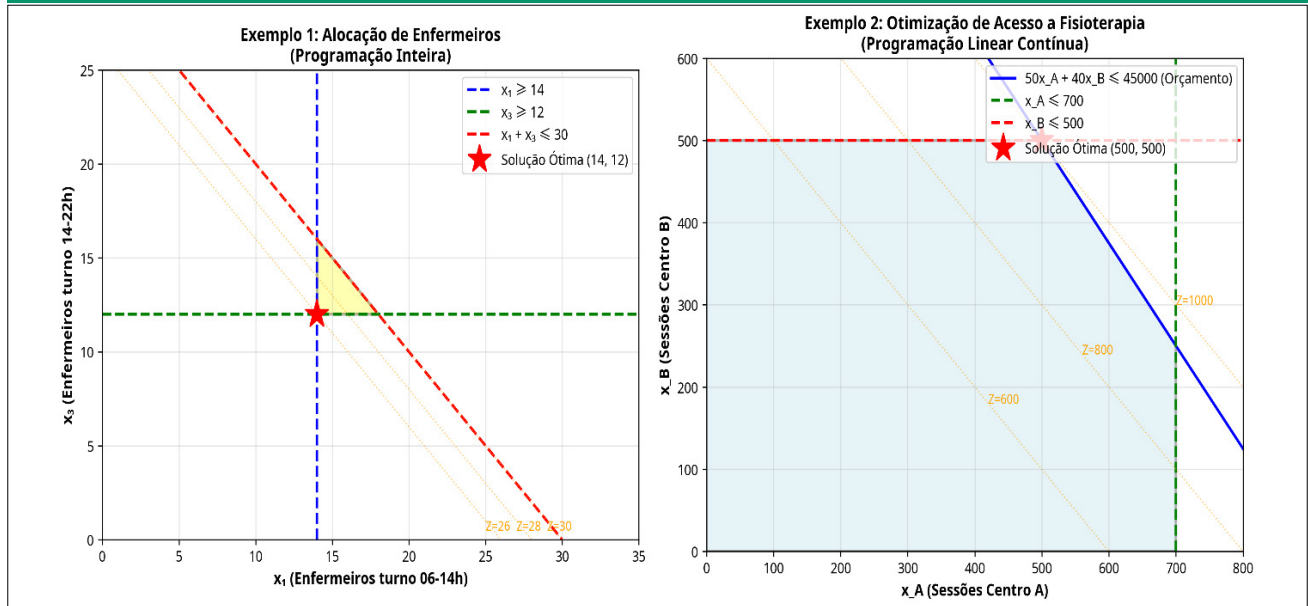
## RESULTADOS

La figura siguiente presenta la representación geométrica de ambos ejemplos, mostrando la región viable (área sombreada) y el punto óptimo (estrella

roja). En el Ejemplo 1, la región viable viene definida por las restricciones de demanda mínima, y la solución óptima se encuentra en el vértice que minimiza el número total de enfermeros. En el Ejemplo 2, la región viable es un polígono más

complejo, limitado por el presupuesto, las capacidades de los centros y la cuota total, y la solución óptima maximiza el número de sesiones (figura 1).

Figura 1: Representaciones gráficas de las respuestas a los problemas descritos en los ejemplos 1 y 2, utilizando programación lineal.



Fuente: Autores.

### Solución del ejemplo 1 (Asignación de enfermeros)

Al resolver el problema de programación entera, la solución óptima es:

- $x_1 = 14$  (14 enfermeros que comienzan a las 06:00)
- $x_2 = 0$  (ningún enfermero que empiece a las 10:00)
- $x_3 = 12$  (12 enfermeros que empiezan a las 14:00)
- $x_4 = 0$  (ningún enfermero que empiece a las 18:00)
- $x_5 = 4$  (4 enfermeros que empiezan a las 22:00)

El coste mínimo es de 30 enfermeros en total ( $Z = 14 + 0 + 12 + 0 + 4$ ).

### Solución del ejemplo 2 (Acceso a fisioterapia)

Este es un problema clásico de programación lineal. La solución óptima es:

- $x_A = 500$  (500 sesiones en el Centro A)
- $x_B = 500$  (500 sesiones en el Centro B)

El número máximo de sesiones es 1000 ( $Z = 500 + 500$ ). El coste total sería de  $50 \cdot 500 + 40 \cdot 500 = 25\,000 + 20\,000 = 45\,000$  R\$, utilizando todo el presupuesto. La capacidad del Centro A no se aprovecha al máximo, y se alcanza el cupo total.

Solución del ejemplo 3:

Las ecuaciones relativas a las restricciones del ejemplo 1 son: Tiempo de ejecución:  $x_1 + x_2 \leq 120$  Examen A:  $x_1 \geq 20$  Examen B:  $x_2 \geq 40$  Así, el modelo matemático es La solución óptima del problema se encuentra en la intersección de las rectas  $ax_1 = 20$  y  $bx_2 = 40$ . El punto óptimo del problema es  $(x_1, x_2) = (20, 40)$ , es decir, cuatro repeticiones del examen A y cuatro del examen B.

Con esta metodología podemos verificar la hipótesis óptima en cuanto al tiempo de ejecución de los informes y al coste mínimo. Se puede obtener un coste mínimo de 60,00 R\$ si se realizan cuatro repeticiones de ambos exámenes de forma simultánea.

## DISCUSIÓN

En el ejemplo de los enfermeros, la solución de no contratar a nadie para los turnos de las 10:00 y las 18:00 puede crear cuellos de botella o sobrecarga en los turnos adyacentes, aunque se satisfaga la demanda mínima. El modelo no tiene en cuenta la fatiga ni la flexibilidad del equipo. El análisis de sensibilidad es una etapa crucial en este caso. Responde a preguntas como: «¿Hasta qué punto puede aumentar el coste de un turno antes de que cambie la solución óptima?» o «¿Cuál es

el impacto en el coste total si la demanda en el periodo 3 aumenta en una unidad?». Este análisis proporciona al gestor una comprensión de la solidez de la solución y de las variables más críticas del sistema.

En el ejemplo de la fisioterapia, la solución asigna el máximo posible de sesiones (500) al centro más barato (B) y el resto al centro A hasta agotar el presupuesto. ¿Qué pasaría si el presupuesto fuera de 48 000 R\$? La solución cambiaría a  $x_A = 700$  y  $x_B = 300$ , lo que muestra que la capacidad del Centro A se convierte en la restricción activa. El análisis de sensibilidad permite al gestor comprender el valor de cada recurso. Por ejemplo, cada real adicional en el presupuesto (hasta cierto punto) puede generar más sesiones, y el análisis cuantifica exactamente esa ganancia.

## CONCLUSIÓN

La Programación Lineal es una herra-

mienta de eficacia probada para abordar retos complejos de asignación de recursos en el ámbito de la salud. Como se ha demostrado, su aplicación va mucho más allá de simples problemas teóricos, pudiendo fundamentar decisiones estratégicas sobre plantillas de trabajo, asignación de servicios y utilización de presupuestos. Sin embargo, este trabajo ha pretendido destacar que el poder de la Programación Lineal no reside en una aplicación ciega de sus algoritmos, sino en un uso crítico e informado.

El verdadero valor surge cuando los gestores comprenden la formulación del modelo, cuestionan sus premisas, realizan análisis de sensibilidad y son conscientes de sus limitaciones. La decisión de utilizar la Programación Entera, por ejemplo, es un reflejo de esta comprensión más profunda. La implementación exitosa no es solo un reto técnico, sino también de gestión, y exige datos de calidad, herramientas adecuadas y una cultura que va-

lore la toma de decisiones basada en la evidencia.

La toma de decisiones en el ámbito de la asistencia sanitaria abre la puerta a la aplicación de técnicas de optimización en problemas de asignación de recursos, presentándose como una herramienta complementaria a los modelos de evaluación económica; la estadística pasa a ser una herramienta de uso en salud de implicaciones extremadamente necesarias.

Por lo tanto, más que una simple técnica matemática, la Programación Lineal debe considerarse una filosofía de gestión: un enfoque estructurado para abordar problemas complejos, identificar los principales factores de decisión y encontrar, de forma transparente y defendible, el mejor camino a seguir. La inversión en la capacitación de los profesionales de la salud para utilizar estas herramientas no es un lujo, sino una necesidad para la sostenibilidad y la eficiencia de los sistemas de salud del futuro.

## Referencias

1. Rais A, Viana A. Operations Research in Healthcare: A survey. *International Transactions in Operational Research*. 2011;18(1):1-31.
2. Hillier FS, Lieberman GJ. *Introduction to Operations Research*. 10th ed. New York: McGraw-Hill; 2015.
3. Moreira FR. Programação linear aplicada a problemas da área de saúde. *Einstein (São Paulo)*. 2003;1(1):1.
4. Hughes WL, Soliman SY. Short-Term Case Mix Management With Linear Programming. *Journal of Healthcare Management*. 1985;30(1):34-42.
5. Biswas T, Das MC. A Linear Programming Problem Analysis for Improving the Nurse Rostering. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*; 2015.
6. Battesini M, Coelho HS, Dionísio EA, Fogliatto FS. Uso de programação linear para otimizar o acesso geográfico em redes temáticas de atenção à saúde. *Cadernos de Saúde Pública*. 2018;34(7):e00055017.
7. Colussi CF, Calvo MCM, Freitas SFT. A Programação Linear na avaliação do desempenho da Saúde Bucal na Atenção Primária. *Einstein (São Paulo)*. 2013;11(3):324-330.
8. Cottle RW. George B. Dantzig (1914–2005). *Notices of the AMS*. 2007;54(3):344-362.