



Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Industrial y Sistemas
ICS1113 - Optimización

Informe 2

Maximización de la Cobertura de Patrullaje en Santiago mediante
Asignación Óptima de Recursos

Grupo 53

Benjamín Mondaca 2364589J sección 2

Cristóbal Rehbein 23643579 sección 1

Daniel Navarro 23644796 sección 1

Iann Wong 23646373 sección 1

Lucas Hodali 23643498 sección 2

Manuel Soto 23628480 sección 1

Martín Núñez 23645997 sección 1

Fecha entrega: 14 de abril de 2025

1. Descripción del problema.

1.1. Descripción completa y correcta de la problemática a estudiar

En la actualidad, Chile se ve enfrentado a una problemática muy particular. Un problema que se ha ido agravando en los últimos años. Hablamos de la inseguridad y el crimen en nuestro país. Ante esto, el Estado toma acción mediante sus instituciones, las cuales en este caso corresponden al Ministerio del Interior y Seguridad Pública, y más recientemente, al nuevo Ministerio de Seguridad Pública.

Como se mencionó, en los últimos años la delincuencia e inseguridad se han venido acrecentando, pero esto no fue siempre así. Si nos remontamos unas décadas al pasado, según el estudio realizado por el académico Rodrigo Saens de la Facultad de Economía y Negocios de la Universidad de Talca, se estima que el costo anual de la delincuencia en Chile en los años 90, rondaba los 2 puntos del PIB. Actualmente esta cifra asciende a los 3 - 3,5 puntos del PIB, lo que se traduce en 3000 millones de dólares.

Posteriormente, a comienzos de los años 2000 se registraban 1209 denuncias por robo (por cada 100 mil habitantes) al año. Un número más del doble que en los años 90, de 586 denuncias por robo por cada 100 mil habitantes, representando un alza de más del 100 % (Beyer & Vergara, 2006).

Si nos acercamos al panorama actual de delincuencia en nuestro país, tenemos que durante el año 2024 se registraron un total de 283.770 actos delictivos asociados a delitos violentos, drogas, armas y propiedad no violentos (Subsecretaría de prevención del delito, 2025), una cifra alarmante. Según Tudela-Poblete (2012), la insatisfacción con el actuar de la policía alcanzaba un 50 % y otro 61,8 % considera que cada día su barrio se vuelve más peligroso. Se ha decidido tomar un enfoque en la provincia de Santiago debido a su carácter urbano y concentración de actividad delictual. Existen 32 comunas, de las cuales se destacan por su tasa de delincuencia: Santiago (41.966), Estación Central (13.514), La Florida (16.514), Maipú (19.581), Providencia (12.795) (Subsecretaría de prevención del delito, 2025). Si bien estos números están asociados solamente a los delitos anteriormente mencionados, nos entrega un panorama aproximado de lo que podrían ser las zonas críticas de seguridad en Santiago.

El objetivo de este proyecto es construir un modelo de optimización para mejorar la gestión de recursos de seguridad pública, como personal (Carabineros de Chile), vehículos y equipamiento táctico (vehículos de seguridad, armamento, blindaje, etc), en función de las zonas y horarios más críticos. Esto busca principalmente aumentar la eficacia del patrullaje preventivo y la capacidad de respuesta ante incidentes, considerando restricciones legales, logísticas y presupuestarias.

El Ministerio del Interior y Seguridad Pública y, además, el Ministerio de Seguridad Pública, como ya fue mencionado, serán los principales tomadores de decisiones, ya que administran los recursos destinados a Carabineros de Chile, lo que contempla un presupuesto anual de \$1.625.635.753, sin contar el Hospital de Carabineros (Dirección de presupuestos, 2025). Por esta razón, el horizonte de planificación adecuado será anual.

1.2. Explicación de por qué podría ser valioso resolver el problema.

Mejorar la organización y distribución de los recursos de seguridad en Santiago puede tener beneficios muy valiosos, tanto en factores cuantitativos (dinero, tiempo, eficiencia) como en aspectos sociales (confianza, justicia, calidad de vida).

Al reducir la delincuencia en las zonas más peligrosas, se puede ahorrar mucho dinero público. Por ejemplo, menos gastos médicos en víctimas, menos daños materiales, menos procesos judiciales, etc. Como fue mencionado anteriormente, se estima que los costos asociados a la delincuencia rondan el 3 % del PIB. Estos recursos podrían ser utilizados en otras cosas que sean más útiles, por ejemplo, este costo anual representa el triple del fondo del Pilar Solidario en 2022, que es uno de los componentes del sistema previsional chileno, orientado a mejorar las pensiones de quienes no tienen ahorros previsionales suficientes. Así como en esta, también se ve limitada la inversión en otras áreas, como educación, salud, etc.

También, distribuir de mejor manera los recursos de seguridad, ayuda a que no se desperdicien, como cuando hay patrullas que dan vueltas sin cubrir lugares realmente críticos. Una mejor organización puede significar millones de pesos ahorrados cada año, al evitar operaciones poco efectivas y responder de manera más rápida cuando ocurre una emergencia.

Desde un punto de vista cualitativo, las personas sentirán más seguridad en sus barrios, lo que mejora su calidad de vida y el bienestar del día a día, intentando revertir la sensación actual de que cada día se vuelve todo más peligroso. También, con una mejor distribución y eficiencia de la seguridad, la confianza de las personas en carabineros aumenta y colaboran con ellos, que es clave para que puedan hacer un mejor trabajo.

1.3. Explicación del objetivo del tomador de decisiones

Como tomador de decisiones en la problemática planteada, el Ministerio de Seguridad Pública tiene como objetivo aumentar la seguridad ciudadana y disminuir la criminalidad en Santiago, tomando las decisiones más óptimas para lograrlo. Dado lo anterior, la entidad deberá buscar maximizar el impacto operativo de Carabineros de Chile, tomando esto como meta clave para lograr los objetivos anteriormente mencionados. Esta meta estará limitada por el personal, recursos y financiamiento.

Decisiones y restricciones:

Asignación de la distribución de recursos a las comisarías: Los recursos son escasos, por lo que el tomador de decisiones deberá encontrar la cantidad óptima de recursos destinados a cada comisaría considerando zonas críticas.

Asignación estratégica del personal de Carabineros por comuna y turno: De forma similar a como ocurre con los recursos, el personal del cuerpo de Carabineros también es limitado, por lo que la cantidad de carabineros por comisaría estará sujeta a la cantidad total de Carabineros en Santiago de Chile.

Adquisición eficiente de recursos: El tomador de decisiones deberá definir de forma estratégica la cantidad de recursos a adquirir dentro de los límites que establece el presupuesto. Definir la capacidad operativa de las comisarías: Cada comisaría tiene límites, es decir, para que puedan operar de forma óptima, estas deberán estar dentro de sus márgenes de capacidad, tanto de personal como de recursos.

Establecer una cobertura mínima por comuna: El objetivo principal es disminuir el nivel de criminalidad y aumentar la seguridad ciudadana, priorizando las comunas de mayor índice de criminalidad. Sin embargo, se debe asegurar un nivel mínimo de cobertura en cada comisaría, es decir, que pese a que el índice de seguridad sea extremadamente bajo en una comuna, se dispongan de igual forma los recursos de seguridad mínimos para un eventual crimen. Esta medida es clave para poder responder de forma eficiente ante algún eventual incidente que pueda generarse en una comuna con estas características, puesto que no es posible garantizar que no existan crímenes en tales comunas.

Administración del presupuesto: El tomador de decisiones deberá asegurar que los gastos en personal, vehículos y equipamiento no superen el monto disponible de presupuesto asignado. Planificación estratégica del patrullaje: El Ministerio deberá decidir la frecuencia y modo de patrullaje por comuna, es decir, franja horaria y si el patrullaje es a pie o auto, esto estará sujeto a la cantidad de personal y recursos disponibles.

En conclusión, para lograr los objetivos anteriormente mencionados, el tomador de decisiones deberá buscar el equilibrio entre maximizar el impacto operativo de Carabineros y las limitaciones del sistema, con el fin de conseguir la asignación óptima de los recursos de seguridad.

2. Modelación del problema

A continuación se presentarán los parámetros, variables, función objetivo y restricciones que conlleva el problema.

Conjuntos

- S : Comunas en Santiago de Chile.
- F : Franja horaria cada 8 horas.
- T : Días del año.
- C : Comisarías en Santiago.
- C_s : Comisarías en la comuna s , $\forall s \in S$.
- P : Carabineros activos disponibles.
- B : Vehículos disponibles: {radio patrullas, motocicletas, cuarteles móviles}
- G : Material de patrullaje complementario: {cámaras de seguridad, drones, alarmas}

Parámetros

- γ_b : Costo fijo por usar el vehículo b .
- β_p : Sueldo del carabinero p .
- $i_{s,f,t}$: Índice de criminalidad de la comuna s el día t en la franja horaria f .
- d_c : Mínimo de carabineros activos en la comisaría c .
- η_s : Mínimo de vehículos en la comuna s .
- α : Presupuesto inicial.
- λ_g : Costo fijo por utilizar el material g .
- ψ_g : Efectividad de patrullaje del material g .
- κ_b : Efectividad de patrullaje del vehículo b .
- ξ : Efectividad de patrullaje sin vehículo.
- ρ_{s_1,s_2} : Distancia entre comuna s_1 y s_2 .
- ϵ : Distancia máxima de desplazamiento por patrulla entre comunas en el mismo día.
- δ_b : Máximo de carabineros en el vehículo b .
- m_s : Mínimo de material de patrullaje complementario en la comuna s .

Variables

- $X_{p,c,t,f} : \begin{cases} 1, & \text{si el carabinero } p \text{ es asignado el día } t \text{ en la franja horaria } f \text{ en la comisaría } c \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$
- $W_{s,b,t,f} : \begin{cases} 1, & \text{si se asigna el vehículo } b \text{ a patrullar el día } t \text{ en la franja horaria } f \text{ en la comuna } s \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$
- $J_{s,b,p,t,f} : \begin{cases} 1, & \text{si se le asigna el vehículo } b \text{ al carabinero } p \\ & \text{el día } t \text{ en la franja horaria } f \text{ en la comuna } s \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$
- $L_{s,p,t,f} : \begin{cases} 1, & \text{si el carabinero } p \text{ va a patrullar sin vehículo} \\ & \text{el día } t \text{ en la franja horaria } f \text{ en la comuna } s \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$
- $U_{s,p,t,f} : \begin{cases} 1, & \text{si el carabinero } p \text{ es asignado a patrullar el día } t \text{ en la franja horaria } f \text{ en la comuna } s \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$
- $A_{g,s,t} : \begin{cases} 1, & \text{si el material } g \text{ es utilizado el día } t \text{ en la comuna } s \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$
- K_t : Presupuesto total del Ministerio de Seguridad Pública para el término del día t .
- $V_{s,t,f}$: Patrullaje en la comuna s el día t en la franja horaria f .

Función Objetivo

Se buscará maximizar la cobertura de patrullaje de las distintas comunas, priorizando aquellas con mayor índice delictual, por esto es que se multiplica el patrullaje por $i_{s,f,t}$, ya que mientras mayor sea índice, mayor deberá ser la cobertura de patrullas.

$$\max \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} V_{s,t,f} i_{s,t,f}$$

Restricciones

R1) Presupuesto del Ministerio de Seguridad Pública al final de cada mes, suponiendo que cada mes tiene 30 días)

$$K_{30} = \alpha - \sum_{t'=1}^{30} \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} \sum_{b \in B} W_{s,b,t',f} \gamma_b - \sum_{p \in P} \beta_p - \sum_{t'=1}^{30} \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} A_{g,s,t'} \lambda_g$$

$$K_t = K_{t-30} - \sum_{t'=t-29}^t \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} \sum_{b \in B} W_{s,b,t',f} \gamma_b - \sum_{p \in P} \beta_p - \sum_{t'=t-29}^t \sum_{s \in S} \sum_{g \in G} A_{g,s,t'} \lambda_g, \quad \forall t \in \{60, 90, \dots, 360\}$$

R2) Mínimo de carabineros por comisaría.

$$\sum_{p \in P} X_{p,c,t,f} \geq d_c, \quad \forall c \in C, t \in T, f \in F$$

R3) Un vehículo no puede ser asignado en más de una comuna en la misma franja horaria.

$$\sum_{s \in S} J_{s,b,p,t,f} \leq 1 \quad \forall b \in B, p \in P, t \in T, f \in F$$

R4) Mínimo de vehículos por comuna.

$$\sum_{b \in B} W_{s,b,t,f} \geq \eta_s, \quad \forall s \in S, t \in T, f \in F$$

R5) Un carabinero solo puede estar en una comisaría a la vez.

$$\sum_{c \in C} X_{p,c,t,f} \leq 1, \quad \forall p \in P, t \in T, f \in F$$

R6) Un carabinero no puede trabajar más de 16 horas por día.

$$\sum_{f \in F} X_{p,c,t,f} \leq 2, \quad \forall c \in C, p \in P, t \in T$$

R7) Un carabinero solo puede ser asignado a un vehículo.

$$\sum_{b \in B} J_{s,b,p,t,f} \leq U_{p,s,t,f}, \quad \forall s \in S, p \in P, t \in T, f \in F$$

R8) Máximo de carabineros por vehículo.

$$\sum_{p \in P} J_{s,b,p,t,f} \leq \delta_b \quad \forall s \in S, b \in B, t \in T, f \in F$$

R9) Patrullaje, con distinta efectividad por medio.

$$V_{s,t,f} = \sum_{p \in P} L_{s,p,t,f} \xi + \sum_{b \in B} \sum_{p \in P} J_{s,b,p,t,f} \kappa_b + \sum_{g \in G} A_{g,s,t} \psi_g \quad \forall s \in S, t \in T, f \in F$$

R10) Carabineros disponibles para patrullar.

$$\sum_{c \in C_s} \sum_{p \in P} X_{p,c,t,f} \geq \sum_{p \in P} U_{p,s,t,f} \quad \forall s \in S, t \in T, f \in F$$

R11) Máximo de distancia recorrida por día en el patrullaje, si es que se desplaza en la misma comuna, el parametro es 0.

$$(0,5 \sum_{s \in S} \sum_{f \in F} J_{s,b,p,t,f}) \rho_{s,s'} \leq \epsilon \quad \forall s, s' \in S, t \in T, p \in P$$

R12) Se pueden recorrer distintas comunas pero en distintas franjas horarias.

$$J_{s,b,p,t,f} + J_{s',b,p,t,f} \leq 1 \quad \forall s, s' \in S, s' \neq s, t \in T, p \in P, f \in F$$

R13) Mínimo de material complementario por comuna.

$$\sum_{t \in T} \sum_{g \in G} A_{g,s,t} \geq m_s, \quad \forall s \in S$$

R14) Si es que hay algún carabinero patrullando en el vehículo b, entonces el vehículo b se está utilizando. Siendo M un número muy grande.

$$\begin{aligned} \sum_{p \in P} J_{s,b,p,t,f} &\leq M \cdot W_{s,b,t,f} \quad \forall s \in S, b \in B, t \in T, f \in F \\ W_{s,b,t,f} &\leq \sum_{p \in P} J_{s,b,p,t,f} \quad \forall s \in S, b \in B, t \in T, f \in F \end{aligned}$$

R15) Naturaleza de las variables.

$$X_{p,c,t,f} \in \{0,1\},$$

$$\forall p \in P, t \in T, f \in F, c \in C$$

$$W_{s,b,t,f} \in \{0,1\},$$

$$\forall s \in S, b \in B, t \in T, f \in F$$

$$U_{s,p,t,f}, L_{s,p,t,f} \in \{0,1\},$$

$$\forall s \in S, f \in F, t \in T, p \in P$$

$$J_{s,b,p,t,f} \in \{0,1\},$$

$$\forall s \in S, f \in F, t \in T, p \in P, b \in B$$

$$A_{g,s,t} \in \{0,1\},$$

$$\forall g \in G, s \in S, t \in T,$$

$$K_t \in \mathbb{R}_0^+$$

$$\forall t \in T$$

$$V_{s,t,f} \in \mathbb{R}_0^+$$

$$\forall s \in S, t \in T, f \in F$$

3. Definición de Datos

El modelo fue planteado con el objetivo de maximizar la cantidad de patrullaje en comunas de la RM. Para ello, se realizó una búsqueda profunda de datos en los cuales poder guiarse para una resolución lo más realista posible. Cabe mencionar que para fines prácticos del desarrollo de código, se empleó una cantidad reducida de comunas y datos en general. Para empezar, para el desarrollo del modelo por medio de GUROBI, se consideraron únicamente 3 comunas: Lo Prado, Santiago y Estación Central. En base a la información recabada, se estableció 1 comisaría en Estación Central, 1 comisaría en Lo Prado y 5 en Santiago. Además, el mínimo de carabineros por comuna, se definió en base a la tasa de homicidios por cada 100 mill habitantes por comuna, asignando un número mayor en aquellas comunas que poseían un índice mayor. Además, se considero un período de 60 días como tiempo del modelo. Por otro lado

4. Gurobi, Resultados Obtenidos y Validación de Resultado

Al ejecutar el modelo de optimización en GUROBI, no se logró obtener una solución óptima. El solucionador declaró el problema como infactible, lo cual implica que no existe ninguna combinación de valores para las variables de decisión que satisfaga simultáneamente todas las restricciones impuestas. Este resultado fue verificado mediante el resumen entregado por GUROBI y el análisis posterior del modelo. La infactibilidad podría deberse a inconsistencias en los parámetros definidos, restricciones demasiado estrictas, o una combinación de ambos. Esto sugiere la necesidad de revisar cuidadosamente los supuestos del modelo, relajar ciertas restricciones, o ajustar los datos de entrada para lograr viabilidad en futuras iteraciones.

Referencias

- [1] El Mostrador. (2023, 10 de mayo). *Costo de la delincuencia en Chile sería cercano a los 9 mil millones de dólares anuales*. Recuperado de <https://www.elmostrador.cl/mercados/2023/05/10/costo-de-la-delincuencia-en-chile-seria-cercano-a-los-9-mil-millones-de-dolares-anuales>
- [2] Beyer, H., & Vergara, R. (2006). *Delincuencia en Chile: Determinantes y rol de las políticas públicas*. Instituto de Economía UC. Recuperado de https://www.subdere.gob.cl/sites/default/files/documentos/articles-69857_recurso_1.pdf
- [3] Dirección de Presupuestos. (2025). *Informe de Finanzas Públicas: Proyecto de Ley de Presupuestos del Sector Público para el año 2025*. Ministerio de Hacienda. Recuperado de https://www.dipres.gob.cl/597/articles-346685_doc_pdf.pdf
- [4] Subsecretaría de Prevención del Delito. (2025). *Estadísticas delictuales*. Gobierno de Chile. Recuperado el 7 de abril de 2025, de <https://cead.spd.gov.cl/estadisticas-delictuales/>
- [5] Tudela-Poblete, P. (2012). La evaluación del desempeño de la policía: explorando relaciones entre opinión pública y labor policial en Chile. *Revista Criminalidad*, 54(1), 379–404. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/crim/v54n1/v54n1a09.pdf>
- [6] Tabla de distancia en kilómetros entre comunas. Scribd. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/502755560/Tabla-de-distancia-en-kilometros-entre-comunas-www-vialidad-cl1>
- [7] Google Maps. (2025). Cálculo de distancias entre direcciones en Santiago, Chile. Recuperado de: <https://www.google.com/maps>
- [8] ESTADÍSTICAS DELICTUALES. (s.f). Portal CEAD. <https://cead.spd.gov.cl/estadisticas-delictuales>
- [9] Carabineros de Chile. (2025). Busca tu comisaría. <https://www.carabineros.cl>