



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS  
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

## Informe 2

---

### Optimización de la red de alumbrado público en la comuna de Cerro Navia

### Grupo 43

Claudio Bórquez Pavez 18625126 sección 3  
Omar Fuentes Sepúlveda 22643087 sección 4  
Antonia Parra Galaz 22205578 sección 3  
Bastían Riquelme Mansilla 19205422 sección 4  
Gonzalo Torrens Mauna 2364320J sección 4  
Sofía Villarroel Lazo 22643745 sección 3  
Danae Wong Oyanedel 22205276 sección 1

Fecha entrega: 30 de Mayo de 2025

# Índice

<b>1. Descripción del problema</b>	<b>3</b>
1.1. Contextualización del problema . . . . .	3
1.2. Valor de la problemática e impacto de la resolución del problema . . . . .	4
1.3. Tomador de decisiones . . . . .	4
<b>2. Modelación del Problema</b>	<b>5</b>
2.1. Supuestos . . . . .	5
2.2. Conjuntos . . . . .	5
2.3. Parámetros . . . . .	6
2.4. Variables de Decisión: . . . . .	6
2.5. Restricciones: . . . . .	7
2.6. Función Objetivo: . . . . .	8
<b>3. Definición de Datos</b>	<b>9</b>
3.1. División por Sectores . . . . .	9
3.2. Tipos de Alumbrado . . . . .	9
3.3. Periodos de Tiempo . . . . .	9
3.4. Presupuesto . . . . .	9
3.5. Información de Luminarias . . . . .	10
3.6. Valores solicitados por el Ministerio . . . . .	10
3.7. Parámetro $\alpha_s$ , aumento en la percepción de seguridad . . . . .	10
<b>4. Resolución del Problema utilizando Python-Gurobi</b>	<b>10</b>
<b>5. Referencias</b>	<b>11</b>

# 1. Descripción del problema

## 1.1. Contextualización del problema

Uno de los temas más tratados, discutidos y conversados en las mesas chilenas es la seguridad ciudadana y la percepción de seguridad en nuestro país, destacándose generalmente la falta de prevención y acción frente a la delincuencia que afecta día a día a todos los ciudadanos. Según los resultados de la última actualización de la Encuesta Urbana de Seguridad Ciudadana (ENSUC) en el año 2023, a nivel nacional se registra un aumento en la percepción de la inseguridad por delincuencia en el país al 87,7 %, de los que el 54,3 % consideró que la delincuencia aumentó en su barrio, y 76,4 % a nivel comunal [5][4].

A nivel de la Región metropolitana, estas altas cifras que representan inseguridad en la ciudadanía también se ven reflejadas en más estudios, Por ejemplo, según el Informe de Estudio de Seguridad de Santiago desde CORPA, se señala que 36 % de los encuestados considera como inseguro vivir en la Región Metropolitana, mientras que un 54 % afirmó que la seguridad había empeorado en el último mes. Observando estas cifras, es claro que la seguridad en la capital es una problemática visible y que da para discusiones extensas de cómo lidiar con la situación.

Es común escuchar en noticieros o en otros medios de información algunas comunas de la RM donde suelen repetirse incidentes delictivos, de distintas características y nivel de violencia; muchas veces, se la ciudadanía ya considera bajo la “normalidad” que estas comunas sean renombradas en estas problemáticas. Una las localidades más representadas por la delincuencia es la comuna de Cerro Navia, que constantemente enfrenta problemas asociados a la seguridad lo cual se ve reflejado en la percepción que tienen los habitantes de la comuna que tienen una alta sensación de inseguridad en relación con el narcotráfico, consumo de drogas y asaltos con violencia. Incluso, bajo la misma encuesta de la ENSUC durante 2023, un 76,4 % de las personas considera que la delincuencia en la comuna habría aumentado durante dicho año [4].

Bajo este contexto de percepción de inseguridad en la Comuna de Cerro Navia, la situación se intensifica en espacios públicos, especialmente en aquellos que tienen una mala iluminación, como lo son plazas, parques, paraderos y canchas públicas para realizar deporte, que se encuentran asociadas a focos de delincuencia constantemente. Zonas específicas dentro de la comuna que son puntos de mayor riesgo son las siguientes: Villa Santa María, Neptuno con Carrascal (UV 20), J.J Pérez con Neptuno, Plaza Roosevelt (UV 1) y Avenida J.J Pérez, en que este mayor riesgo y aumento de la delincuencia se asocia a la mala iluminación [3]. En general dentro de la comuna la sensación que se tiene de inseguridad proviene de la delincuencia en sí, pero hay otros factores como la mala iluminación y la infraestructura precaria que provocan que aumente la percepción de inseguridad, incluso, según declaraciones a The Clinic del alcalde de Cerro Navia, Mauro Tamayo en el 2018, sobre la las diferencias en medidas para seguridad, aclara que la instalación de luminarias o aumento de luminosidad por poda de árboles es baja en su comuna, respecto a otras como Las Condes, esclareciendo una falta de acciones, recursos y preocupación por la comuna [1]. Considerando esto, una de las posibles mejoras que pueden ayudar a reducir los índices de delincuencia es mejorar la distribución de la iluminación en sectores que lo necesitan e incluso la infraestructura de las calles y la señalética.

A partir de este contexto, se considera escoger como problemática de seguridad ciudadana, la mala iluminación e infraestructura de alumbrado como un factor influyente en la percepción de inseguridad en la comuna de Cerro Navia, donde uno de los principales desafíos de la problemática es mejorar las condiciones de infraestructura lumínica de la comuna para ayudar a reducir la ocurrencia de delitos y mejorar la percepción de seguridad de la ciudadanía.

En ese sentido, la optimización de la asignación de luces en zonas críticas de la comuna es muy relevante, y con la idea es diseñar un modelo que permita determinar óptimamente la ubicación de luminaria en zonas y puntos críticos de la comuna, considerando diversas variables como la densidad de flujo peatonal diurno y nocturno, índice delictivo de la zona, tipos de equipos de iluminación a utilizar, presupuesto de inversión. Bajo estos supuestos, el tomador de decisiones deberá encargarse de analizar todos los factores influyentes del problema con tal de tener un horizonte de planificación de seis meses a un año con tal de tener un impacto en un periodo de tiempo relativamente acotado.

## 1.2. Valor de la problemática e impacto de la resolución del problema

Resolver el problema de la mala iluminación en espacios públicos en la comuna de Cerro Navia puede tener un impacto significativo en diferentes aspectos. De forma cualitativa, mejorar el alumbrado público incide directamente en un aumento de la percepción de seguridad que tienen los habitantes de la comuna, lo cual da espacio a mejoras en su calidad de vida, pues las personas evitan lo mayor posible transitar, ya sea en vehículo o a pie, por zonas que no tienen luminaria. Además, en ese sentido al haber menos espacios con mala iluminación se reducen las zonas factibles para ocurrencia de delitos por poca visibilidad, haciendo de la vía pública un lugar más seguro y transitable. De forma cuantitativa, se tienen diferentes casos en que la delincuencia se reduce debido a el uso de iluminación de diferentes sectores, un ejemplo de ello es el caso de un experimento en “La gran Manzana” que realizo CRIME Lab New York, que relata en el artículo “Reducing Crime Through Enviromental Design: Evidence from Randomized Experiment of Street Lighting in New York City” en que se instalaron iluminarias en diferentes zonas suburbanas y se logró reducir en un 36 % la tasa de criminalidad en periodos nocturnos [6]. Bajo este estudio, se ve que hay un impacto importante que tiene la correcta distribución e implementación de iluminación en reducir los índices de delincuencia. Además, dado que los ciudadanos de Cerro Navia generalmente ya perciben una mala iluminación en general en la comuna, hay bastante espacio de mejora. Por otro lado, si con la optimización de la red de alumbrado público, podemos entregar una mejora en la prevención del delito gracias a la reducción de características de situaciones óptimas para la delincuencia, se reduciría la carga operativa de servicios y unidades de seguridad como Carabineros de Chile o unidades de Paz Ciudadana, pudiendo redirigirlos a otras necesidades de la comuna, además de una posible reasignación de presupuestos municipales para el área de seguridad. Además, el distribuir de manera eficiente la iluminación de las calles puede contribuir a reducir el gasto energético provocado por las luces que están mal posicionadas, que tienen un alto consumo y poca eficiencia, o que están en sectores que tengan sobre iluminación. Finalmente, y más importante, las personas de la comuna o que deban visitarla, podrán sentir mayor tranquilidad de transitar por sus calles, aumentando su percepción de seguridad.

## 1.3. Tomador de decisiones

El tomador de decisiones relacionado a la problemática correspondería al municipio de Cerro Navia y específicamente con la Dirección de Seguridad Pública de Cerronavia y, la Dirección de Obras Municipales de la comuna, y además como encargados de revisiones y aprobación de proyectos, el Ministerio de Energía y el Ministerio de Medioambiente. El principal objetivo de los tomadores de decisiones será mejorar y optimizar la distribución de la red de alumbrado público en la comuna, con el fin de aumentar la seguridad ciudadana al disminuir el riesgo de ocurrencia de delitos a partir de una correcta implementación de luminosidad en los sectores que más tendencia tienden a ocurrir asaltos o delitos dada la mala iluminación. Además, la mejora de la seguridad ciudadana conlleva a la optimización de la asignación de recursos públicos y por ende se pueden usar para otros aspectos de seguridad precarios dentro de la comuna y gracias a ello, un ahorro en el consumo energético.

Parte de las decisiones que deben tomar estos entes serán dónde implementar las luminarias correspondientes dado la sectorización de la comuna, entregando prioridades y cumpliendo la necesidad por sector dados los parámetros influyentes, además, los encargados deberán tomar en cuenta las limitaciones de la solución como por ejemplo, la eficiencia energética de la red utilizada, dado a restricciones ecológicas, y el presupuesto que destina la comuna y el Ministerio de Energía al proyecto en cuestión. Se contempla de forma principal, además, que los tomadores de decisiones deberán lograr aumentar la percepción de la seguridad ciudadana a partir de la solución a la problemática de falta de iluminación en la comuna.

## 2. Modelación del Problema

### 2.1. Supuestos

Para abordar la problemática, se definirán los siguientes supuestos que aportan a la construcción de un modelo matemático que nos permita dar solución al problema.

Con la formulación de este proyecto, se tiene como objetivo aumentar la percepción de seguridad en la comuna, considerando que, lo planteado en la justificación del problema en el punto 1 del informe, al aumentar la iluminación en una vía pública, se genera una reducción del índice delictivo, y por tanto, generando en la ciudadanía una mayor percepción de seguridad, que repercute beneficiosamente en el estilo de vida de las personas. Para esto, se contempla como  $\alpha_s$  el porcentaje de aumento de seguridad asociado a una mejora en la iluminación en un sector  $s \in S$ , cuyo valor será constante. Se puede interpretar de forma más concreta, la proporción entre la mejora en percepción de seguridad sobre las luminarias instaladas.

Para abarcar la comuna, esta se dividirá en  $S$  sectores o territorios definidos estratégicamente para poder ser intervenidos por el proyecto en un total de  $T$  periodos, determinado conforme a que la realización del mismo será concesionado en la administración municipal vigente.

Contemplando la situación de inseguridad, la Dirección de Seguridad Pública y Dirección de Obras Municipales contemplan un presupuesto municipal de  $B$  pesos, el cual será destinado a la implementación de luminarias  $l$  de diferentes tipos  $L$ , las cuales tienen un costo de adquisición de  $C_l$ , y que cada una de ellas entrega una eficiencia energética  $E_l$  y, una iluminación de  $p_l$ . Se debe considerar que, cada luminaria  $l \in L$  necesitará una mantención que tiene un costo de  $CM_l$ , el cual debe ser considerado en el presupuesto de cada periodo.

También, dado que cada sector  $s \in S$  puede presentar diferentes características físicas o territoriales respecto a otro, no todos los tipos de luminarias serán compatibles con el sector, y por lo tanto deberá evaluarse si la luminaria  $l \in L$  es o no es compatible. Además, de que no pueden instalarse más de  $K_s$  tipos de luminarias distintas en cada sector, de manera de que los consumos en la red sean similares y no haya un desequilibrio en el suministro eléctrico.

Dado esto, también existirá una cantidad máxima de luminarias que pueden instalarse en cada sector,  $N_s^{max}$ , de forma de no sobreiluminar vías públicas y realizar instalaciones redundantes.

Con un propósito de no generar contaminación lumínica, y a su vez, iluminar lo necesario en cada sector para poder garantizar una mejora, se pide desde el Ministerio de Energía que se entregue al menos  $P_s$  de iluminación por sector, y para una máxima iluminación permitida, no debe excederse  $I_s^{max}$ . De no cumplirse este último requerimiento, se aplicará un descuento  $G$  de sanción al presupuesto destinado para ese periodo  $t \in T$  en que se está trabajando, proporcional a la iluminación en exceso.

También, desde el Ministerio de Energía, sujeto al Artículo N°47 del Reglamento de Alumbrado Público [2], se establece que todos los proyectos de alumbrado público se deben diseñar maximizando el ahorro de energía. Para esto, el gobierno define un nivel de  $R$  eficiencia energética mínimo que debe suplir el conjunto de luminarias instaladas en un sector  $s \in S$  en cada periodo  $t \in T$ . Si no se cumple esta normativa, existirá un descuento fijo  $A^e$  de sanción al presupuesto destinado para ese periodo.

Finalmente, dado que el proyecto es impulsado desde el Ministerio del Medioambiente y el Ministerio de Energía, se recomienda que para contribuir con la innovación en tecnologías limpias de generación energética en el país, exista un uso de luminarias de tipo  $l^* \in L^*$ ,  $L^* \subseteq L$ , que cumplen con esta tecnología. Dado esto, si un proyecto de alumbrado público utiliza este tipo de luminarias, entonces se entrega una bonificación al presupuesto de la municipalidad para el proyecto, de valor  $A^f$ , de forma que funcione como un incentivo para el uso de iluminación con menor impacto ambiental.

Nótese que, se asume el funcionamiento de todas las luminarias durante las horas nocturnas, y que tiene un tiempo definido y automático de encendido y apagado permanente en todos los periodos y luego del término del proyecto. Estos datos se asumen conocidos y no se contemplan en la modelación.

### 2.2. Conjuntos

- $S$ : Sectores.
- $L$ : Tipo de luminaria.

- $T$ : Períodos de tiempo.

### 2.3. Parámetros

- $C_l$ : Costo de compra e instalación de una luminaria de tipo  $l \in L$ .
- $B$ : Presupuesto del municipio.
- $E_l$ : Eficiencia energética del tipo de luminaria  $l \in L$ .
- $R$ : Eficiencia energética requerida por la ley en cada sector  $s \in S$  en el periodo  $t \in T$ .
- $CM_l$ : Costo de mantenimiento del tipo de luminaria  $l \in L$ .
- $K_s$ : Máximo número de tipos de luminarias  $l \in L$  diferentes que pueden instalarse en el sector  $s \in S$ .
- $N_s^{max}$ : Máximo número de luminarias que pueden instalarse en el sector  $s \in S$ .
- $p_l$ : Iluminación entregada por luminaria  $l \in L$ .
- $P_s$ : Iluminación mínima solicitada por el Ministerio de Energía en el sector  $s \in S$ .
- $\alpha_s$ : Porcentaje de aumento de la seguridad, asociado a la mejora de la iluminación en el sector  $s \in S$ .
- $I_s^{max}$ : Iluminación permitida por el gobierno en el sector  $s \in S$ .
- $L^* \subseteq L$ : Luminarias con las que se accede a un bono por utilizarlas.
- $G$ : porcentaje de descuento por iluminar más de lo permitido.
- $F$ : Mínimo de luminarias que pide el gobierno que sean instaladas en un periodo  $t \in T$ .
- $A^e$ : Descuento fijo asociado al incumplimiento de requerimiento energético  $R$ .
- $A^f$ : bonificación fija si es que cada sector cumple con que se usa luminarias tipo  $l^*$ .

### 2.4. Variables de Decisión:

- $x_{s,l,t}$ : Cantidad de luminarias tipo  $l$  instaladas en el sector  $s$  en el día  $t$ .
- $L_{l,s} = \begin{cases} 1, & \text{si el tipo de luminaria } l \text{ es compatible con el sector } s \\ 0, & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $y_{s,l,t} = \begin{cases} 1, & \text{si se instala la luminaria de tipo } l \text{ en el sector } s \text{ en el periodo } t \\ 0, & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $u_{s,l,t} = \begin{cases} 1, & \text{si se realiza mantención en luminarias de tipo } l \text{ en el sector } s \text{ en el periodo } t \\ 0, & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $z_{s,t}^i = \begin{cases} 1, & \text{si se supera la iluminación permitida por el gobierno en el sector } s \text{ en el día } t \\ 0, & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $z_{s,t}^e = \begin{cases} 1, & \text{si en el sector } s \text{ en el día } t \text{ se cumple la eficiencia energética requerida por la normativa} \\ 0, & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $z_t^f = \begin{cases} 1, & \text{si se usan las luminarias tipo } l^* \\ 0, & \text{e.o.c.} \end{cases}$

- $w_t^i$  =: Valor del impuesto aplicado en el período  $t$  debido al exceso de iluminación.
- $w_{s,t}^e$  =: Valor del descuento aplicado en el período  $t$  por no cumplir con la eficiencia energética mínima que solicita el gobierno en el sector  $s$ .
- $w_{s,t}^f$  =: Valor del bono recibido en el sector  $s$  en el período  $t$  por utilizar luminarias del tipo  $l^*$ .
- $J_t$  =: Caja disponible al final del periodo  $t$

## 2.5. Restricciones:

1. No superar el presupuesto del municipio a través de un flujo de caja:

Definición del flujo de caja para  $t$ :

$$J_1 = B - \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} C_l \cdot x_{s,l,1} - \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} CM_l \cdot u_{s,l,1} - \sum_{s \in S} w_{s,1}^{(i)} - \sum_{s \in S} w_{s,1}^{(e)} + \sum_{s \in S} w_{s,1}^{(f)} \quad (1)$$

Y para los  $t > 1$

$$J_t = J_{t-1} - \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} C_l \cdot x_{s,l,t} - \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} CM_l \cdot u_{s,l,t} - \sum_{s \in S} w_{s,t}^{(i)} - \sum_{s \in S} w_{s,t}^{(e)} + \sum_{s \in S} w_{s,t}^{(f)}, \quad \forall t \in \{2, \dots, T\} \quad (2)$$

2. Activación de la mantención, solo sí se instala luminaria:

$$u_{s,l,t} \leq x_{s,l,t}, \quad \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (3)$$

3. Mínimo de iluminación diaria requerida por sector:

$$\sum_{l \in L} p_l \cdot x_{s,l,t} \geq P_{s,t}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (4)$$

4. Límite de luces por sector:

$$\sum_{l \in L} x_{s,l,t} \leq N_s^{max}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (5)$$

5. Compatibilidad de luminaria con el sector:

Se considera  $M$  como un valor lo suficientemente grande para que  $x_{l,s,t}$  no se limite a ser solamente 1, sino el valor que desee.

$$x_{l,s,t} \leq L_{l,s} \cdot M, \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (6)$$

6. Vinculo variable x-y:

$$x_{l,s,t} \leq M \cdot y_{s,l,t}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (7)$$

$$y_{s,l,t} \leq x_{s,l,t}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (8)$$

7. Límite de tipos distintos de luminarias por sector:

$$\sum_{l \in L} y_{l,s,t} \leq K_s, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (9)$$

8. Activación del descuento asociado a superar la iluminación permitida por el gobierno en sectores en periodo  $t$ :

$$\sum_{l \in L} p_l \cdot x_{s,l,t} \geq I_s^{max} \cdot z_{s,t}^{(i)}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{l \in L} p_l \cdot x_{s,l,t} \leq I_s^{max} + M \cdot z_{s,t}^{(i)}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (11)$$

9. Definición de descuento asociado a la iluminación permitida:

$$w_t^{(i)} \leq z_{s,t}^{(i)} \cdot M, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (12)$$

$$w_t^{(i)} \leq G \cdot \sum_{l \in L} p_l \cdot x_{s,l,t}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (13)$$

10. Activación del descuento en caso de que no se cumpla con la eficiencia energética mínima requerida:

$$\sum_{l \in L} E_l \cdot x_{s,l,t} + M \cdot z_{s,t}^e \geq R, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (14)$$

11. Definición de descuento asociado a la eficiencia energética

$$w_{s,t}^e \leq A^e \cdot z_{s,t}^e, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (15)$$

$$w_{s,t}^e \geq A^e \cdot z_{s,t}^e, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (16)$$

12. Activación de bonificación en caso de usar luminarias tipo  $l^*$ :

$$\sum_{l \in L^*} x_{s,l,t} \geq F \cdot z_{s,t}^f, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (17)$$

13. Definición de bono en caso de usar luminarias tipo  $l^*$

$$w_{s,t}^f \leq z_{s,t}^f \cdot A^f, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (18)$$

$$w_{s,t}^f \geq z_{s,t}^f \cdot A^f, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (19)$$

14. Naturaleza de las variables: Agregar el resto de variables

$$x_{s,l,t} \in \mathbb{N}^{\{0\}}, \quad \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T$$

$$y_{s,l,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T$$

$$u_{s,l,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T$$

$$z_{s,t}^i \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$z_{s,t}^e \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$z_t^f \in \{0, 1\}, \quad \forall t \in T$$

$$w_t^i \in \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}, \quad \forall t \in T$$

$$w_{s,t}^e \in \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$w_{s,t}^f \in \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$J_t \in \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}, \quad \forall t \in T$$

## 2.6. Función Objetivo:

Maximizar la seguridad de todos los sectores  $S$  de la comuna de Cerro Navia, a partir de la instalación de luminarias estratégicamente.

$$\max \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} p_l \cdot x_{s,l,t} \cdot \alpha_s$$



### 3. Definición de Datos

Para poder implementar el modelo de optimización de alumbrado público en la comuna de Cerro Navia, en Python-Gurobi, se definen numéricamente los parámetros utilizados en el modelo matemático, con el fin de encontrar una solución óptima al modelo que nos permita cumplir con la función objetivo, de maximizar la seguridad de todos los sectores  $S$  de la comuna de Cerro Navia en un conjunto de periodos  $T$  que dura el proyecto. A continuación, se asignan los valores de cada parámetro.

#### 3.1. División por Sectores

La comuna de Cerro Navia se divide en 10 territorios. Estos representan una división geográfica, pero a la vez de zonas de la comuna, así se pueden tratar una a una y asegurar una equidad entre todas [7]. Debido a esto, que ya existen en la comuna, utilizaremos los sectores  $S$  con un total de 10 sectores.

#### 3.2. Tipos de Alumbrado

A partir las Orientaciones técnicas: Prevención situacional – Iluminación peatonal, de parte de la Subsecretaría de la Prevención del Delito [10], se consideran para el proyecto luminarias de proyección de luz y luminarias con paneles fotovoltaicos, siendo las siguientes las contempladas:

1. Asimétrico
2. Haz Abierto
3. Haz Intenso
4. Haz Cerrado
5. Haz Amplio
6. Luminaria de Panel Fotovoltaico

Estos fueron elegidos, a partir de un análisis de búsqueda sobre las luminarias utilizadas para iluminación de la vía pública

#### 3.3. Periodos de Tiempo

Dado cualquier proyecto a realizarse en una comuna, dependerá del equipo a cargo (Alcalde, concejal y funcionarios de la administración municipal de turno), por esto se pondrá como suposición que este proyecto se realizará en a lo más 4 años. Además, se encontró que “un proyecto de iluminación peatonal no podrá ser menor a nueve meses ni exceder los trece meses”, según Orientaciones Técnicas (OOTT) realizada en 2021 por la Subsecretaría de Prevención del Delito (SPD). Así, para trabajar conforme a la disponibilidad de la administración municipal, se propone: 1 periodo = 9 meses. Por lo que se trabajará con 5 periodos.

#### 3.4. Presupuesto

Según la cuenta pública del año 2024, la comuna de Cerro Navia tiene un presupuesto de \$397,077,330 para financiar tres líneas de trabajo destinadas a fortalecer la seguridad del territorio. Nosotros nos centraremos en solo uno de los proyectos, por tanto se decide suponer que el presupuesto a utilizar para nuestro modelo será un tercio del presupuesto total, es decir \$132,359,100.[9]

### 3.5. Información de Luminarias

Se realizó una búsqueda de información necesaria sobre las luminarias, como el área iluminada, la potencia, la eficiencia, el costo de instalación y mantención, entre otros, para cada tipo de luminaria definida. Así, se realizó un promedio entre los distintos valores encontrados, y fueron estos promedios los utilizados para la modelación en el programa. Cabe recalcar que cada información se sacó de fuentes relacionadas con los valores a necesitar, por ejemplo en el caso de los precios de compra, se buscó en paginas de venta especializada de productos lumínicos, para así sacar un promedio del precio a ocupar. También, se deja en claro que la información respecto a la iluminación de cada luminaria se dejó en unidades de medida *lux* y para eso se utilizó un promedio de área necesaria a iluminar, considerando los valores de luminarias para avenidas y calles de mediano tamaño, para cada tipo de luminaria (Estos valores se encuentran en los documentos .csv utilizados para modelar el problema).

### 3.6. Valores solicitados por el Ministerio

Estos valores fueron sacados y adaptados a nuestro problema desde la Guía de requisitos mínimos de un proyecto de alumbrado público del Ministerio de Energía, División de Energías Sostenibles.

### 3.7. Parámetro $\alpha_s$ , aumento en la percepción de seguridad

El parámetro  $\alpha_s$  es calculado a partir del estudio “*Reducing Crime Through Environmental Design: Evidence from a Randomized Experiment of Street Lighting in New York City*” [8], en que fueron instaladas 400 torres de iluminación (luminarias) en Nueva York para observar cómo afectaba en los índices delictivos. El resultado fue una disminución del 36 % de los delitos nocturnos al aire libre. De esta forma, construimos alpha como el porcentaje de aumento de seguridad, bajo el supuesto que “**menor índice delictivo = aumento en percepción de seguridad**”, según la instalación de una luminaria, así alpha es:

$$\alpha_s = \frac{0,36 \text{ (aumento en percepción de seguridad)}}{400 \text{ (luminarias instaladas)}} = 0,09\% \quad (20)$$

De esta manera, se interpretará para el modelo, que  $\alpha_s$  es el aumento de percepción de seguridad por cada luminaria instalada.

## 4. Resolución del Problema utilizando Python-Gurobi

En los archivos adjuntados de la entrega se agrega el código realizado en python para la resolución (véase para mayor entendimiento). Con los datos especificados en el punto anterior, se crearon archivos csv los cuales fueron leídos para poder dar uso a los correspondientes parámetros. De esta manera, la primera parte del código consta de una función que se dedica a la lectura de los datos y a convertirlos en diccionarios para su posterior manipulación.

La segunda parte es la más fundamental, pues es la elaboración del modelo a través de una función llamada *construir modelo*. Este consta de 13 restricciones distintas y de 11 variables. A su vez, los conjuntos definidos son:  $S, L, T, L_{solar}$ .  $S$  es el conjunto de sectores, cuya cantidad de datos está definida por el archivo *sectores.csv*. De igual manera,  $L$  es el conjunto del tipo de luminarias y sus índices están definidos por el largo de *luminarias.csv*.  $T$  es el conjunto de periodos de tiempo, considerando 5 periodos de tiempo para su formulación. Por último,  $L_{solar}$  son las luminarias que ocupan energía solar, conjunto que está definido para el uso de una restricción. Esto es un modelo lineal mixto, por lo que las variables son continuas mayores a cero, o binarias que toman 1 o 0 como valores, las cuales también fueron definidas correspondientemente en el código. Las funciones *resolver modelo* y la función *imprimir* se encargan, como dicen sus nombres, de resolver y mostrar en pantalla el modelo. Todo corre a través del main, así que no hay que tocar nada en el código para que funcione.

El código además imprime un valor óptimo correspondiente a 0.03, el cual corresponde a la maximización de la variable  $\alpha$ , que es el coeficiente de aumento de la percepción de la seguridad de

la instalación de una luminaria en un sector  $s$ . Según este resultado, el aumento de la percepción es del 3 %. Además se muestra un GAP igual a 0, que en teoría implica que es la solución óptima asegurada, o sea, que no hay una mejor. El tiempo de ejecución del código es de 0,05 segundos, y también muestra la cantidad del tipo de luminarias por sector y periodo que se instalan (correr el código para su revisión), teniendo así:

- Sector 7, Luminaria 5, Periodo 3: 0.50 unidades
- Sector 7, Luminaria 5, Periodo 4: 0.18 unidades
- N° variables: 995
- N° restricciones: 1562
- Dimensiones:  $|S| = 9, |L| = 5, |T| = 5$

## 5. Referencias

- [1] Alcalde de Cerro Navia: “La muerte en la periferia pareciera tener menor connotación social”. (2018, 10 julio). The Clinic. <https://www.theclinic.cl/2018/07/10/alcalde-de-cerro-navia-la-muerte-en-la-periferia-pareciera-tener-menor-connotacion-social/>
- [2] Del Congreso Nacional, B. (s.f.). Biblioteca del Congreso Nacional. [www.bcn.cl/leychile](http://www.bcn.cl/leychile). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1085891>
- [3] Plan de Desarrollo Comunal 2023-2030, Cerro Navia. (2021). [https://www.cerronavia.cl/wp-content/uploads/2025/02/Plan-de-Desarrollo-Comunal-Cerro-Navia-2023-2030\\_modificacio%CC%81n2024.pdf](https://www.cerronavia.cl/wp-content/uploads/2025/02/Plan-de-Desarrollo-Comunal-Cerro-Navia-2023-2030_modificacio%CC%81n2024.pdf)
- [4] Por primera vez, ENUSC entrega cifras de victimización y percepción a nivel comunal – Subsecretaría de Prevención del Delito. (s.f.). <https://www.seguridadpublica.cl/noticia/por-primera-vez-enusc-entrega-cifras-de-victimizacion-y-percepcion-a-nivel-comunal/>
- [5] Seguridad ciudadana. (s.f.). Default. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/seguridad-publica-y-justicia/seguridad-ciudadana>
- [6] Universidad Técnica Federico Santa María. (29 de abril de 2024). Experiencia internacional. <https://usm.cl/noticias/alumbrado-publico-clave-para-combatir-la-delincuencia/>
- [7] Cabrera, I. (2025, 19 mayo). Unidades vecinales - Municipalidad de Cerro Navia. Municipalidad de Cerro Navia. [https://www.cerronavia.cl/unidades-vecinales/#.YRFTky1t\\_UI](https://www.cerronavia.cl/unidades-vecinales/#.YRFTky1t_UI)
- [8] Chalfin, A., Hansen, B., Lerner, J., & Parker, L. (2019). Reducing crime through environmental design: Evidence from a randomized experiment of street lighting in New York City (NBER Working Paper No. 25798). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w25798>
- [9] Municipalidad de Cerro Navia. (2025). Cuenta pública 2024–2036. <https://www.cerronavia.cl/wp-content/uploads/2025/04/Cuenta-P%C3%BAblica-2024-2036.pdf>
- [10] Subsecretaría de Prevención del Delito. (2021). Orientaciones técnicas: Prevención situacional – Iluminación peatonal. Gobierno de Chile. <https://www.seguridadpublica.cl>