

Entrega 3

Minimización de costos asociados a la reparación de daños provocados por desastres naturales

Grupo 72

Andrés Amthauer, 23643706, sección 3 María José Catalán, 19206492, sección 4 Felipe Eskenazi, 21624658, sección 4 Javier Farías, 22204156. sección 1 Florencia Orellana, 22639519, sección 1 Rosario Palominos, 23646098, sección 1 Gabriel Uribe, 22640827, sección 1

Fecha entrega: 22 de octubre de 2024

${\rm \acute{I}ndice}$

1.	Descripción del problema	3
	1.1. Problemática	3
	1.2. Descripción del modelo	4
2.	Modelación del problema	5
	2.1. Conjuntos	5
	2.2. Parámetros	5
	2.3. Variables de decisión	5
	2.4. Restricciones	6
	2.5. Función Objetivo	
	2.6. Naturaleza de las variables	
3.	Definición de datos	8
	3.1. Costo de oportunidad	8
	3.2. Costo fijo por despliegue de trabajo	9
	3.3. Costo por hora de trabajo de cada equipo	
	3.4. Horas que se demora cada reparación en sitio	
4.	Modelación mediante Software	10
5.	Análisis de resultados	11
6.	Bibliografía	13

1. Descripción del problema

1.1. Problemática

Los desastres naturales son fenómenos que las poblaciones de todo el mundo deben enfrentar constantemente. Estos eventos, representan un alto riesgo para los seres humanos, los animales, las infraestructuras y sus recursos. La planificación preventiva es esencial para mitigar la vulnerabilidad de la población y reducir los impactos de estos eventos. Tal como señala Coddou (2006): "Para disminuir la vulnerabilidad, es necesario generar una planificación preventiva que esté debidamente coordinada, donde las políticas públicas incorporen el ordenamiento territorial, el diseño de medidas de prevención y mitigación y el manejo de emergencias".

Chile es un país particularmente susceptible a los desastres naturales debido a su geografía y clima. En agosto de 2024, un temporal azotó la zona central del país, afectando gravemente a Santiago y sus alrededores. Las intensas lluvias y los fuertes vientos provocaron inundaciones, deslizamientos de tierra y daños en la infraestructura urbana. En la Región Metropolitana, más de 700,000 personas quedaron sin suministro eléctrico debido a la caída de árboles sobre líneas eléctricas, afectando comunas como Peñaflor, La Reina y Conchalí (Rodríguez, 2024). Además, han tenido un grave impacto económico debido a la paralización de actividades económicas, como lo demuestra el hecho de que Chile pierde en promedio el 1,2 porciento de su PIB cada año debido a desastres naturales (Rojas, 2024). Las pérdidas no solo incluyen los costos directos de reparación, sino también las pérdidas económicas derivadas de la paralización de actividades y el aumento de los costos logísticos (Agouborde et al., 2023).

Frente a estos desastres, es fundamental contar con una estrategia que permita priorizar la reparación de infraestructuras clave en el menor tiempo posible. Por ejemplo, decidir entre reparar una avenida principal afectada por un socavón o un poste de luz caído puede tener un impacto significativo en la calidad de vida de los ciudadanos. En este contexto, el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) juega un papel clave. Según la Ley 21.364, promulgada en agosto de 2021, el Plan Comunal de Emergencia permite a los municipios coordinar las respuestas ante desastres, lo que facilita la planificación y ejecución de las reparaciones en el territorio (Farías, 2024).

Desde un punto de vista económico, los municipios deben enfrentar estos desafíos asegurando el uso eficiente de los recursos disponibles. Un retraso en la recuperación de zonas afectadas podría comprometer otros proyectos comunitarios, como la política habitacional, y afectar los costos de construcción y la disponibilidad de materiales y servicios. La planificación deficiente de las reparaciones conlleva costos irrecuperables, tanto directos como indirectos. En el caso de Santiago, el temporal reciente paralizó el tráfico en la Alameda, una arteria vital de la ciudad, y afectó el acceso a hospitales y servicios esenciales, lo que exacerbó el caos (Rodríguez, 2024; Agouborde et al., 2023).

Ante la recurrencia de estos desastres, es esencial fortalecer los sistemas críticos de infraestructura y prepararse para futuros eventos. Como menciona Rojas (2024): "Debemos contar con metodologías apropiadas para la estimación de los efectos de los desastres, a fin de visualizar su relevancia y tomar medidas para minimizar sus impactos". La prevención y la preparación son claves para asegurar una respuesta rápida y efectiva ante emergencias, minimizando los daños tanto a nivel social como económico.

El modelo de optimización propuesto se centra en apoyar la toma de decisiones de los directorios municipales, específicamente del órgano responsable de gestionar las emergencias. Su objetivo principal es diseñar un plan de priorización que permita reducir al mínimo los costos por daños a la infraestructura.

El horizonte de planificación para este tipo de proyectos debe situarse entre 15 días y 1 mes.

Este rango de tiempo es ideal para gestionar desastres menores como caídas de árboles, cortes de luz o inundaciones leves, permitiendo la coordinación eficiente de equipos de trabajo, la asignación de materiales y la restauración de servicios esenciales antes de que las interrupciones generen consecuencias mayores.

1.2. Descripción del modelo

Según lo establecido por la Ley 21.364, cada municipio del país debe contar con un Plan Comunal para la Gestión de Riesgos y Desastres, el cual establece la planificación que debe llevarse a cabo para enfrentar estas situaciones. Uno de los objetivos principales es que los municipios puedan realizar reparaciones de emergencia, tales como restaurar servicios interrumpidos o rehabilitar accesos importantes afectados por desastres. Estas situaciones requieren una movilización rápida y efectiva de los equipos de reparación, ya que una respuesta tardía puede aumentar las consecuencias negativas a largo plazo.

Ante un desastre, es necesario priorizar las distintas emergencias en función de su gravedad y la urgencia de su resolución. Si una emergencia no es atendida rápidamente, esto puede aumentar el riesgo y las pérdidas para la comunidad. Esta demora se refleja en un costo de oportunidad, que aumenta con el tiempo mientras el problema no se resuelve. Por lo tanto, el objetivo de cada municipio es minimizar los costos totales asociados a la atención de las emergencias, lo cual incluye tanto el costo operativo del despliegue y trabajo de los equipos como el costo de oportunidad por el tiempo que el problema persista sin solución.

Cada municipio cuenta con un número limitado de equipos de reparación, denotado por $e \in E = \{1,...,n_e\}$. Estos equipos deben ser asignados a los diferentes sitios afectados $s \in S = \{1,...,n_s\}$ tras la ocurrencia de un desastre. Cada equipo debe trabajar dentro de un horizonte de tiempo definido para la planificación, que abarca un mes. Este mes se divide en un periodo de 4 semanas $t_s \in TS = \{0,1,2,3\}$, periodo de días por semana $t_d \in TD = \{0,...,6\}$ y el total de horas dentro del mes $t_h \in TH = \{0,...,671\}$.

Para atender estas emergencias, el municipio incurre en diferentes costos. Entre estos está el costo fijo de despliegue de un equipo e para resolver los daños encontrados en un sitio s, denotado como $CD_{e,s}$. Además, cada equipo tiene un costo por hora de trabajo durante una emergencia, indicado por CH_e , que varía dependiendo del equipo al que se ha enviado a realizar los trabajos. Asimismo, se considera el costo de oportunidad por cada hora en la que un sitio s con actividad económica no es atendido, denotado como CO_s .

Cada tipo de sitio s dependiendo del contexto tiene un tiempo estimado de reparación, que depende del equipo que se le asigne, representado por $TR_{e,s}$ el cual es medido en horas del cual dicho equipo asignado debe completar la reparación en dicho tiempo. Además, no todos los equipos son capaces de resolver todos los tipos de daños por desastres, lo que se modela mediante un parámetro binario $EP_{e,s}$, que es igual a 1 si el equipo e puede resolver el sitio s, y 0 en caso contrario.

Como se trabaja con equipos, por ley se deben cumplir una serie de normas laborales. Según las leyes vigentes, un equipo debe descansar al menos 16 horas seguidas antes de iniciar un nuevo turno de trabajo. Además, la duración máxima de un turno continuo es de 10 horas, además el equipo al tratar emergencias debe trabajar el turno completo sin interrupciones. También, cada equipo tiene un límite de 44 horas laborales por semana (TS) y debe tener al menos dos días consecutivos al haber trabajado dentro de cinco días.

Además, se debe considerar que los equipos de reparación no pueden dividirse, por lo que solo trabajan en un sitio a la vez. Para tener una mejor distribución de los recursos, los municipios también han estipulado que solo puede trabajar un equipo por sitio. También, por seguridad de los trabajadores, no pueden trabajar en resolver un daño por desastre en el no estén facultados para ello $(EP_{e,s})$. Por último, si el equipo comienza a trabajar en un sitio en una hora dada, debe permanecer trabajando toda esa hora.

Las decisiones que se debe tomar para el municipio son cómo será la distribución de equipos a los sitios con daños por desastre, cuál serán los horarios en los que cada equipo trabajará, y cuál será la prioridad de arreglo de los sitios con daños, lo cual afecta al incremento del costo de oportunidad.

2. Modelación del problema

2.1. Conjuntos

- $e \in E = \{1, ..., n_e\}$: Existe un conjunto de equipos de servicio de reparación.
- $th \in TH = \{0, ..., 671\}$: Período en horas de un mes.
- $td \in TD = \{0, ..., 6\}$: Período en días de una semana..
- $ts \in TS = \{0, 1, 2, 3\}$: Período en semanas de un mes.
- $s \in S = \{1, ..., n_s\}$: Sitios con presencia de daños por desastre.

2.2. Parámetros

- $CD_{e,s}$: Costo fijo de despliegue de un equipo e por el sitio a reparar s.
- \blacksquare CH_e : Costo por hora de trabajo del equipo e trabajando.
- \bullet CO_s : Costo de oportunidad por hora por no haber reparado el sitio s.
- \blacksquare $TR_{e,s}$: Horas utilizadas por el equipo e en arreglar el daño dentro del sitio s.
- $EP_{e,s} \in \{0,1\}$: Si el equipo e puede encargarse del daño dentro del sitio s.

2.3. Variables de decisión

- $\bullet \ X_{e,s,th} \in \{0,1\} : \begin{cases} 1 & \text{Si el equipo } e \text{ trabaja en el sitio } s \text{ en la hora } th \text{ en el día } td \\ & \text{en la semana } ts. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$
- $\quad \blacksquare \ U_{e,s,th} \in \{0,1\} : \begin{cases} 1 & \text{Si el equipo } e \text{ comienza a trabajar en el sitio } s \\ & \text{en la hora } th \text{ en el día } td \text{ en la semana } ts. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$
- $Z_{e,td,ts} \in \{0,1\}$: $\begin{cases} 1 & \text{Si el equipo } e \text{ trabaja en el en el día } td \text{ en la semana } ts. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$
- $TU_{e,s,th}$: Tiempo acumulado en horas que un equipo e ha estado trabajando dentro de un un sitio s en la hora th.
- TM_s : Tiempo desde que se tiene conocimiento del daño por desastre en el sitio s hasta que se repara.
- $HW_{e,th}$: Horas seguidas que un equipo e ha estado trabajando en la hora th.
- $HD_{e,th}$: Horas seguidas que un equipo e ha descansado en la hora th.

2.4. Restricciones

1. Un equipo de reparación no puede estar en más de un sitio a la vez.

$$\sum_{s \in S} X_{e,s,th} \le 1, \quad \forall e \in E, th \in TH$$
 (1)

2. Un equipo debe descansar mínimo 16 horas antes de volver a trabajar otro turno.

$$HD_{e,th} \ge HD_{e,th-1} + \left(1 - 672 \cdot \sum_{s \in S} X_{e,s,th}\right) \quad \forall e \in E, th \in \{1, ..., 671\}$$
 (2)

$$HD_{e,th} \leq HD_{e,th-1} + \left(1 - \sum_{s \in S} X_{e,s,th}\right) \quad \forall e \in E, th \in \{1, ..., 671\}$$
 (3)

$$HD_{e,0} = \left(1 - \sum_{s \in S} X_{e,s,0}\right) \quad \forall e \in E \tag{4}$$

$$HD_{e,th-1} \ge 16 \cdot \sum_{s \in S} U_{e,s,th} \quad \forall e \in E, th \in \{9, ..., 671\}$$
 (5)

3. Las horas de trabajo totales de un equipo e debe ser como máximo 10 horas:

$$HW_{e,th} \ge HW_{e,th-1} + 1 + 11 \cdot \left(\sum_{s \in S} X_{e,s,th} - 1\right) \quad \forall e \in E, th \in \{1, ..., 671\}$$
 (6)

$$HW_{e,th} \le HW_{e,th-1} + 1 + \left(\sum_{s \in S} X_{e,s,th} - 1\right) \quad \forall e \in E, th \in \{1, ..., 671\}$$
 (7)

$$HW_{e,0} = \sum_{s \in S} X_{e,s,0} \quad \forall e \in E$$
 (8)

$$HD_{e,th} \leq 10 \cdot \sum_{s \in S} X_{e,s,th} \quad \forall e \in E, th \in TH$$
 (9)

4. Tiempo acumulado en horas que un equipo ha estado trabajando en un sitio.

$$TU_{e,s,th} \ge TU_{e,s,th-1} + 1 + 11 \cdot (X_{e,s,th} - 1) \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{1, ..., 671\}$$
 (10)

$$TU_{e,s,th} \le TU_{e,s,th-1} + 1 + (1 - X_{e,s,th}) \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{1, ..., 671\}$$
 (11)

$$TU_{e,s,th} \leq 11 \cdot X_{e,s,th} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{1, ..., 671\}$$

$$\tag{12}$$

$$TU_{e,s,0} = X_{e,s,0} \quad \forall e \in E, s \in S$$
 (13)

5. Un equipo debe haber terminado la reparación de un sitio sin detenerse una vez iniciado.

$$TU_{e,s,th} \leq TR_{e,s} \quad \forall e \in E, th \in TH, \forall s \in S$$
 (14)

$$1000 \cdot (1 - U_{e,s,th}) \cdot TR_{e,s} + U_{e,s,th} \cdot TR_{e,s} \geq TU_{e,s,th+TR_{e,s}-1} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{0, ..., 671 - TR_{e,s}\}$$

$$(15)$$

$$U_{e,s,th} \cdot TR_{e,s} \le TU_{e,s,th+TR_{e,s}-1} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{0, ..., 671 - TR_{e,s}\}$$
 (16)

6. Cada sitio con daño asociado a desastre debe repararse. Solo un equipo trabaja por sitio.

$$\sum_{th \in TH} \sum_{e \in E} U_{e,s,th} = 1 \quad \forall s \in S$$
 (17)

7. Si el equipo e comienza a trabajar en la hora th en un sitio s, este no puede haber trabajado en este mismo durante la hora anterior.

$$U_{e,s,th} \ge X_{e,s,th} - X_{e,s,th-1} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{1, \dots, 671\}$$
 (18)

$$U_{e,s,th} \le 1 - X_{e,s,th-1} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{1, \dots, 671\}$$
 (19)

$$U_{e,s,0} \leq X_{e,s,0} - X_{e,s,th-1} \quad \forall e \in E, s \in S \tag{20}$$

8. Si el equipo e comienza a trabajar en una hora th, debe estar trabajando en esa hora th.

$$U_{e,s,th} \leq X_{e,s,th} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in TH$$
 (21)

9. Tiempo transcurrido desde que se produjo el daño por desastre hasta que algún equipo lo repara.

$$TM_s = \sum_{th \in TH} \sum_{e \in E} (th + TR_{e,s}) \cdot U_{e,s,th} \quad \forall s \in S$$
 (22)

10. Un equipo solo puede reparar los daños de un sitio si es que está facultado para ello..

$$\sum_{th \in TH} U_{e,s,th} \leq EP_{e,s} \quad \forall e \in E, s \in S$$
 (23)

11. Un equipo puede trabajar máximo 44 horas semanales.

$$\sum_{th'=ts*168} \sum_{s \in S} X_{e,s,th'} \leq 44 \quad \forall e \in E, ts \in TS$$

$$(24)$$

12. Se deben tener 2 días de descanso a la semana al haber trabajado los otros 5.

$$\sum_{td \in TD} \leq 6 - Z_{e,7,ts} \quad \forall e \in E, ts \in TS$$
 (25)

13. Se habrá trabajado en un día td de una semana ts si se ha trabajado al menos una vez durante una hora th de dicho día.

$$\sum_{k=td*24+ts*168} \sum_{s \in S} X_{e,s,k} \leq 24 * Z_{e,td,ts} \quad \forall e \in E, ts \in TS, td \in TD$$
 (26)

$$\sum_{k=td*24+ts*168}^{(td+1)*24+ts*168} \sum_{s \in S} X_{e,s,k} \geq Z_{e,td,ts} \quad \forall e \in E, ts \in TS, td \in TD$$
 (27)

2.5. Función Objetivo

El objetivo de este modelo es minimizar los costos de reparar un incidente ocasionado por un desastre natural, teniendo en cuenta los costos de oportunidad, despliegue y hora de trabajo de todos los equipos.

$$\min \sum_{s \in S} (CO_s * TM_s) + \sum_{th \in TH} \sum_{s \in S} \sum_{e \in E} (CD_{e,s} * U_{e,s,th}) + \sum_{th \in TH} \sum_{s \in S} \sum_{e \in E} (CH_e * X_{e,s,th})$$
(28)

2.6. Naturaleza de las variables

- $X_{e,s,th}, \in \{0,1\} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in TH$
- $U_{e,s,th}, \in \{0,1\} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in TH$
- $Z_{e,td,ts} \in \{0,1\} \quad \forall e \in E, td \in TD, ts \in TS$
- $\blacksquare TU_{e,s,th} \ge 0 \quad \forall e \in E, s \in S, th \in TH$
- $\blacksquare TM_s \ge 0 \quad \forall s \in S$
- $HW_{e,th}$ \geq 0 $\forall e \in E, th \in TH$
- $\blacksquare HD_{e,th} \geq 0 \quad \forall e \in E, th \in TH$

3. Definición de datos

Para definir los datos, se decidió recrear una simulación de una catástrofe con diversos tipos de daños. Usando la información proporcionada en el contexto del problema, se seleccionó la comuna de Las Condes, ya que es una de las que cuenta con mayor disponibilidad de fuentes de información relevantes. Cada uno de los cálculos detallados se encuentra en el documento Çonjuntos y Parámetros", adjunto en la carpeta de esta entrega.

3.1. Costo de oportunidad

Para calcular el costo de oportunidad $C0_s$ por hora en los diferentes sitios afectados, se siguió un enfoque basado en métricas clave para cada tipo de lugar. Se utilizaron datos estimados de estudios anteriores y supuestos razonables para generar valores representativos de la pérdida económica o social en caso de interrupciones. Se analizaron distintos lugares que generan costos de oportunidad por hora debido a la interrupción parcial o total de su operación; a continuación, se explica cómo se obtuvieron dos de ellos.

En el caso de los hospitales, se consideró el costo estimado por minuto de demora en la atención médica. Según estudios que analizan la pérdida de productividad, los costos médicos adicionales y el riesgo de mortalidad, el costo de oportunidad por minuto en emergencias puede llegar a los USD 100, lo que implica un costo total de USD 6,000 por hora de inactividad (Orlando, 2020). En este caso, dado que el servicio de urgencias sería el más afectado, además de las atenciones programadas, se decidió considerar solo un tercio de este costo, ya que el modelo no abarca daños internos en las instalaciones. Además de esa reducción, se aplicó otra, ya que, aunque los servicios de urgencias estarían restringidos, esto no significa que el lugar no pueda usarse, solo que el acceso sería más complicado. Finalmente, se estimó una pérdida de USD 200 por hora.

Por otro lado, para los colegios se consideró el costo social y económico por hora de clase perdida. De acuerdo con un estudio sobre cierres escolares durante la pandemia, cada hora sin clases representa una pérdida económica significativa, que puede estimarse en USD 10 por alumno por hora.

Con una escuela promedio de 500 estudiantes, esto resulta en un costo de oportunidad de USD 5,000 por hora (Joint Economic Committee, 2020). Dado que el costo de oportunidad en este modelo se considera para las 24 horas del día, se tomó en cuenta que un colegio está abierto aproximadamente 7 horas diarias. Este total se dividió por 24 para obtener una estimación del costo por cada hora del día. El costo ajustado resultó en USD 1,500 por hora, pero para mantener la proporcionalidad con el costo calculado para los hospitales, se decidió considerar un costo de USD 150 por hora.

Además de los hospitales y colegios, se consideraron otros casos importantes para el cálculo del costo de oportunidad, los cuales están detallados en el archivo Excel adjunto. Estos incluyen: viviendas, departamentos, farmacias, supermercados, restaurantes y paraderos de micro. Para los comercios, como farmacias, supermercados y restaurantes, el costo de oportunidad se estimó considerando la pérdida de ingresos por hora. Esta pérdida se distribuyó durante las horas de operación de cada comercio, basándonos en el horario promedio de funcionamiento de entre 8 a 16 horas diarias, dependiendo del tipo de comercio. Este enfoque está respaldado por estudios sobre la actividad económica en entornos urbanos (Aguayo, 2019), que indican que la mayor parte de las ventas en estos sectores ocurre durante las horas de operación principales.

En el caso de las viviendas, se estimó un conjunto de 10 casas, asumiendo que la interrupción genera una pérdida estimada de USD 2 por hora por casa, lo que refleja el costo social y de bienestar asociado a la interrupción de servicios básicos como electricidad o agua. Para los edificios, se consideró un promedio de 100 departamentos por edificio, debido a la alta densidad habitacional en la comuna de Las Condes, con un costo similar al de las viviendas individuales (Municipalidad de Las Condes, 2021).

Por último, en el caso de los paraderos de micro, se utilizó una metodología que estima la pérdida de productividad en USD 0,5 por persona por cada 10 minutos de retraso en sus actividades diarias. Este cálculo se realizó bajo el supuesto de que aproximadamente 10 - 20 personas se verían afectadas por paradero por hora, una estimación basada en el flujo promedio de pasajeros en transporte público en zonas urbanas (Goldenberg et al, 2013).

3.2. Costo fijo por despliegue de trabajo

Para la selección de equipos de trabajo, se eligieron cinco tipos de equipos especializados en electricidad, agua potable, infraestructura, seguridad vial y reparaciones rápidas, basándose en la naturaleza de las emergencias más comunes que ocurren en situaciones de desastre. La elección de estos equipos responde a la necesidad de abordar los problemas más urgentes que afectan a infraestructuras urbanas críticas, como cortes de energía, daños en la red de agua potable, fallas estructurales, accidentes en vías principales, y la necesidad de reparaciones de emergencia para evitar mayores daños. Los datos sobre la composición de los equipos de trabajo y su capacidad para atender emergencias fueron extraídos de normativas chilenas sobre protección civil y emergencias, así como de estudios sobre la vulnerabilidad de la infraestructura urbana ante desastres naturales (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2019).

Para llevar a cabo las simulaciones de emergencias, se utilizó un escenario en el que ocurren 25 incidentes que deben ser resueltos dentro de la comuna en el horizonte de tiempo estipulado. Este número se basó en estimaciones hipotéticas para simular un entorno de alta demanda de servicios, como podría ocurrir en el caso de un terremoto o un evento meteorológico extremo.

Para calcular las distancias que recorrerán los equipos, se realizó una simulación aleatoria que generó distancias en kilómetros desde la Municipalidad de Las Condes hacia 25 puntos diferentes dentro de la comuna. La simulación permitió obtener una muestra diversa de ubicaciones, representando diferentes zonas que los equipos tendrían que cubrir durante los despliegues.

El cálculo del costo fijo por despliegue de cada equipo se desarrolló tomando en cuenta exclusivamente los gastos relacionados con la logística operativa, como el combustible y el mantenimiento del vehículo de transporte. Asumimos que los equipos de trabajo se desplazarían en una camioneta grande con un rendimiento de 8 a 10 km por litro de combustible, basado en las especificaciones de vehículos utilizados comúnmente en operaciones de emergencia (Lira, 2024). El cálculo del costo por kilómetro se realizó de la siguiente manera:

Combustible consumido: La cantidad de combustible necesario para cada despliegue se calculó dividiendo la distancia entre el rendimiento del vehículo (kilómetros por litro).

Costo de combustible: Multiplicamos el consumo de combustible por el precio por litro de diésel o gasolina, que en 2024 rondaba los 1,200 CLP por litro (Ministerio de Energía, 2024).

Mantenimiento: Estimamos un costo adicional de mantenimiento de 100 a 150 CLP por kilómetro recorrido, considerando el desgaste del vehículo y los costos de operación asociados (Lira, 2024).

Finalmente, se sumaron los costos de combustible y mantenimiento para obtener el costo total por kilómetro. Este costo fijo se multiplicó por la distancia simulada para cada uno de los puntos de la comuna, lo que permitió obtener un estimado por cada despliegue.

3.3. Costo por hora de trabajo de cada equipo

El cálculo del costo por hora de trabajo de cada equipo se realizó considerando la composición de 5 personas por equipo, un estándar en proyectos de infraestructura y servicios públicos (Mella et al, 2023). Considerando la jornada laboral de 8 horas diarias en Chile, conforme al Código del Trabajo (Ministerio del Trabajo y Previsión Social, 2020), se utilizaron salarios promedio obtenidos de estudios sobre sueldos en los sectores de electricidad, agua potable, infraestructura, seguridad vial y reparaciones rápidas. El procedimiento consistió en multiplicar el salario promedio por el número de integrantes del equipo y dividir el total por las horas de la jornada laboral, obteniendo así el costo por hora de cada equipo (Reyes, 2024).

3.4. Horas que se demora cada reparación en sitio

Las estimaciones sobre el tiempo que tomarán las reparaciones deben realizarse considerando diversos aspectos como el nivel de daño, el tipo de reparación necesaria o la dificultad, por lo que no se pueden entregar valores exactos. Debido a lo anterior, se seleccionaron categorías de tiempo, que son: Rápido, Leve, Medio, Grave, Muy Grave. A mayor gravedad, mayor será el tiempo que toma la reparación, con un máximo de 8 horas por intervención.

4. Modelación mediante Software

Dentro de la implementación de un código Python-Gurobi el cual considerando los datos definidos anteriormente, se pondrá en funcionamiento el modelo que entregará como respuesta el orden de distribución de equipos de reparación para múltiples sitios dañados. Antes de poder procesar los resultados se debe entender mediante un análisis las múltiples variables que permitirán darle una solución al problema, se tendrá un total de siete variables, la variables binarias $X_{e,s,th}$, $U_{e,s,th}$, $Z_{e,td,ts}$ son utilizadas para las restricciones 1, 6, 7, 8, 10, 11, 12 y 13 las cuales controlan que los equipos de reparación trabajen en todos los sitios y registrar los tiempos en horas th y días td de la semana ts los cuales un equipo e a empezado o continua trabajando en algún sitio s además de cumplir las horas y días límite de trabajo por equipo según las leyes de trabajo. De forma más particular, la variable $X_{e,s,th}$ se relaciona con las variables enteras positivas $HD_{e,th}$, $HW_{e,th}$, $TU_{e,s,th}$

en gran medida por medio de las restricciones 2, 3 y 4 para regular el conteo de horas descanso seguidas, horas que han estado activos y finalmente tiempo que han estado reparando un sitio respectivamente. Para confirmar los límites de estas variables enteras se utiliza la variable $U_{e,s,th}$ en las restricciones 2 y 5 que confirma que se siga el mínimo de horas descansadas $HD_{e,th}$ y el límite de tiempo $TU_{e,s,th}$ que se va a demorar en un sitio, además de definir el valor de tiempo que ha transcurrido desde el inicio del problema hasta su reparo en un sitio TM_s en la restricción 9 y asegurar que un equipo no puede abarcar ciertos sitios debido al contexto por medio de la restricción 10.

Una vez aplicado todas las características del modelo ya descritos, se obtuvieron los resultados del orden aplicado de equipos e que empezaron su trabajo de reparación en los sitios s en las horas th los cuales se pueden encontrar en el documento "resultados.txt" una vez activado el código del modelo.

5. Análisis de resultados

Con la implementación del software, se evidenció que este problema posee solución óptima, debido a que una vez finalizado el proceso se obtuvo con un GAP de cero porciento, lo cual se traduce en que esta última solución calculada logra el mínimo valor de la función objetivo posible sin soluciones iguales, justificando que el valor obtenido de esta solución sería el mínimo costo que se tendría por solucionar esta serie de problemas.

Con los resultados obtenidos, se tiene que este modelo puede facilitar el planeamiento y, por tanto, el procedimiento de reparaciones por parte de organizaciones como lo son municipios y compañías de servicios públicos en caso de emergencia. Para probarlo, se observa el caso reciente en el cual las fuertes lluvias y corrientes de viento rompieron postes de luz principalmente en la región metropolitana y posteriormente hubo atrasos en las reparaciones de todos los sectores afectados por parte de la compañía eléctrica Enel: "El plan de reposición iba del viernes 2 al martes 6. Al miérco-les 7, Enel tiene pendiente 95 mil clientes." (Senado, 2024). Esto llevó finalmente a una multa por los atrasos en la reposición de postes de 4 mil millones de pesos. En el caso de la implementación del modelo propuesto, la planificación y acción de Enel ante este mismo problema pudo haber sido reducida en tiempo para las múltiples comunas afectadas ante personal limitado para así cumplir la fecha límite del plan y reducir los gastos de oportunidad traducidos en dicha multa.

Además, este tipo de planificación optimizada puede reducir costos asociados a la falta de gestión adecuada de recursos en momentos de alta demanda. Según el Consejo CTCI (2022), las emergencias por catástrofes naturales en Chile representan millones de pesos en pérdidas anuales, especialmente en daños a infraestructura pública y privada, con cifras que superan el 1 porciento del PIB en algunos eventos críticos. Este modelo no solo ayuda a reducir el tiempo de inactividad de infraestructuras críticas, sino que mejora la distribución de equipos en base a su disponibilidad y prioridad de reparación, lo que podría traducirse en un ahorro considerable. En el contexto municipal, como menciona el estudio de AMUCH (2022), los municipios enfrentan dificultades para gestionar las emergencias por catástrofes debido a la falta de recursos y planificación adecuada, lo que resulta en costos adicionales y en mayores tiempos de recuperación para las comunidades afectadas. La implementación de modelos optimizados de asignación de recursos, como el propuesto, no solo reduciría los costos directos de reparación, sino que también disminuiría las pérdidas económicas relacionadas con la falta de servicios críticos, mejorando la resiliencia general ante desastres naturales.

Por último, al utilizar datos históricos y analíticos, como sugiere CITRID (2017), este modelo permite anticiparse a escenarios de catástrofe con mayor precisión, optimizando el uso de recursos y, por lo tanto, minimizando costos de oportunidad y daños colaterales. Las mejoras en la planificación y gestión podrían también traducirse en una reducción del 15 porciento a 20 porciento en los tiempos de respuesta, permitiendo a las empresas y gobiernos locales recuperar rápidamente la normalidad

en las áreas afectadas, como lo demuestran implementaciones similares en otros contextos.

6. Bibliografía

Coddou, B., Alejandra, A., De Ciencias Físicas y Matemáticas, F., De Ingeniería Industrial, D., Patricio, A. G., & Marcelo, L. L. (2006). Políticas públicas para enfrentar los desastres naturales en Chile. Recuperado de: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102822

Meganoticias. (2024b, agosto 2). Corte de luz en Santiago. Recuperado de: https://www.meganoticias.cl/nacional/4546 cortes-de-luz-en-santiago-comunas-region-metropolitana-lluvias-viento-hoy-viernes-brk-02-08-2024.html

Farías, S., (2024, Febrero 21). Solo diez de los 38 municipios de Valparaíso confirman que cuentan con un plan de emergencia aprobado por el Senapred. https://www.ciperchile.cl/2024/02/21/solo-diez-de-los-38-municipios-de-valparaiso-confirman-que-cuentan-con-un-plan-de-emergencia-aprobado-por-el-senapred/

Agouborde, M. V., & Dote, S. (2023, 23 agosto). Cuatro días de temporal en Chile. El País Chile. Recuperado de: https://elpais.com/chile/2023-08-23/cuatro-dias-de-temporal-en-chile-las-lluvias-no-dan-tregua-y-la-emergencia-llega-a-santiago.html

Rojas, I. (2024, 1 julio). Pérdida de Bienestar Post-Desastre: Modelo de Estimación a partir de los Aluviones de Atacama en el 2015, Chile. Rojas — REDER. https://www.revistareder.com/ojs/index.php/reder/article/vi-

Joint Economic Committee. (2020). What's Next for Schools? Balancing the Costs of School Closures Against COVID-19 Health Risks. U.S. Congress. https://www.jec.senate.gov/public/index.cfm/republicans/2021/2/s-next-for-schools-balancing-the-costs-of-school-closures-against-covid-19-health-risks

Ministerio de Energía. (2024). Informe de Precios de Combustibles en Chile. Gobierno de Chile. Recuperado de: https://www.cne.cl/tarificacion/hidrocarburos/mecanismo-de-estabilizacion-de-precios-de-los-combustibles-mepco/2024-2/

Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (2019). Normativa sobre Protección Civil y Emergencias. Recuperado del decreto 62 de la Ley de Chile

Ministerio del Trabajo y Previsión Social. (2020). Código del trabajo de Chile. Recuperado de: https://www.dt.gob.cl/legislacion/1624/w3-article-95516.html

Orlando L, (2020). Costos en salud: Un asunto polémico. Recuperado de: https://www.scielosp.org/article/rcsp/2020.v

Aguayo I, (2019). Estadísticas de Jornada laboral de trabajadores del sector privado. Recuperado de: $https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id = repositorio/10221/27049/1/BCN_IA_032019_Etadisticas_Jornada$

Lira g, (2024). Kilómetros por litro: Cómo calcular el rendimiento de un auto. Recuperdado de: https://www.autofact.cl/blog/mi-auto/conduccion/kilometros-por-litro

Goldenberg et al (2013). Transantiago, la evolución de los primeros años. Recuperado de: https://www.bing.com/search Reyes V, (2024) INE revela últimos datos de cuánto es sueldo promedio de chilenos: sector público entre los más altos. Recuperado de: https: //www.biobiochile.cl/noticias/economia/actualidad – economica/2024/08/23/ine - revela - ultimos - datos - de - cuanto - es - sueldo - promedio - de - chilenos - sector - publico - entre - los - mas - altos

Mella et al (2023). Respuesta y recuperación ante desastres: Complejidades institucionales y técnicas en contextos de post-terremoto en Chile. Recuperado de: $https://www.researchgate.net/publication/372505587_RES$

$TERREMOTO_EN_CHILE$

Senado de la República de Chile, (2024). Cortes de electricidad tras temporal: respaldan término de la concesión de Enel: https://www.senado.cl/comunicaciones/noticias/cortes-de-electricidad-tras-temporal-respaldan-termino-de-la-concesion-de 600 mil afectados: "El plan de reposición iba del viernes 2 al martes 6. Al miércoles 7, Enel tiene pendiente 95 mil clientes y CGE 7 mil", continuó relatando."

Consejo CTCI (2022). COSTOS DE EMERGENCIAS POR CATÁSTROFES NATURALES EN CHILE. Recuperado de: Chttps://docs.consejoctci.cl/wp-content/uploads/2022/05/CREDEN-27122016-2.pdf

AMUCH (2022). QUÉ HAN HECHO LOS MUNICIPIOS EN GESTIÓN DE RIESGO. Recuperado de: $https://amuch.cl/wp-content/uploads/2022/05/ESTUDIO-AMUCH_QUE$

CITRID (2017). CUÁNTO CUESTAN LAS EMERGENCIAS POR CATÁSTROFES NATURA-LES EN CHILE. Recuperado de: https://citrid.uchile.cl/2017/05/15/cuanto-cuestan-las-emergenciaspor-catastrofes-naturales-en-chile/