



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

## Entrega 4

---

**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 noviembre de 2024

# Índice

<b>1. Descripción del problema</b>	<b>3</b>
1.1. Problemática . . . . .	3
1.2. Descripción del modelo . . . . .	3
<b>2. Modelación del problema</b>	<b>4</b>
2.1. Conjuntos . . . . .	4
2.2. Parámetros . . . . .	4
2.3. Variables de decisión . . . . .	5
2.4. Restricciones . . . . .	5
2.5. Función Objetivo . . . . .	7
2.6. Naturaleza de las variables . . . . .	8
<b>3. Definición de datos</b>	<b>8</b>
3.1. Costo de oportunidad . . . . .	8
3.2. Costo fijo por despliegue de trabajo . . . . .	8
3.3. Costo por hora de trabajo de cada equipo . . . . .	9
3.4. Horas que se demora cada reparación en sitio . . . . .	9
3.5. Capacidad de los equipos de encargarse del daño . . . . .	10
<b>4. Modelación mediante Software</b>	<b>10</b>
<b>5. Análisis de resultados</b>	<b>10</b>
<b>6. Análisis de sensibilidad</b>	<b>11</b>
6.1. Justificación de atributos a modificar: . . . . .	11
<b>7. Conclusión</b>	<b>12</b>
<b>8. Anexos</b>	<b>13</b>
<b>9. Bibliografía</b>	<b>23</b>

# 1. Descripción del problema

## 1.1. Problemática

Los desastres naturales son eventos recurrentes que generan un alto riesgo para las poblaciones, las infraestructuras y los recursos. Chile es un país especialmente vulnerable a estos eventos debido a su geografía y clima. En agosto de 2024, un temporal afectó gravemente a la Región Metropolitana, causando daños en la infraestructura y dejando a más de 700,000 personas sin electricidad. Además de los costos directos de reparación, los desastres naturales tienen un impacto económico significativo debido a la paralización de actividades y el aumento de costos logísticos. En promedio, Chile pierde el 1,2 por ciento de su PIB cada año debido a estos eventos (Rojas, 2024).

Frente a estas situaciones, es crucial contar con estrategias que permitan priorizar la reparación de infraestructuras clave en el menor tiempo posible. Las decisiones sobre qué reparar primero, como una avenida principal o un poste de luz caído, afectan directamente la calidad de vida de los ciudadanos. El Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED), a través del Plan Comunal de Emergencia, coordina la respuesta y reparación en los territorios afectados (Farías, 2024).

Los municipios enfrentan el desafío de gestionar los recursos de manera eficiente, ya que un retraso en la recuperación de las zonas afectadas puede afectar otros proyectos importantes, como la política habitacional, y aumentar los costos indirectos. Por ejemplo, el reciente temporal en Santiago paralizó el tráfico en la Alameda, afectando el acceso a servicios esenciales y aumentando el caos social (Rodríguez, 2024).

Este problema exige un enfoque sistemático que permita priorizar la reparación de infraestructuras críticas de forma rápida y económica. El modelo de optimización propuesto busca apoyar a los responsables municipales en la toma de decisiones, minimizando los costos por daños a la infraestructura y acelerando la recuperación de las áreas afectadas.

## 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  $e \in E = \{1, \dots, n_e\}$ . Estos equipos deben ser asignados a los diferentes sitios afectados  $s \in S = \{1, \dots, n_s\}$  tras la ocurrencia de un desastre cuyas. Cada equipo debe trabajar dentro de un horizonte de tiempo definido para la planificación, que abarca un total de dos semanas. Dichas semanas están definidas en el conjunto  $t_s \in TS = \{0, 1\}$ , el periodo de días por semana será  $t_d \in TD = \{0, \dots, 6\}$  y el total de horas dentro de este lapso de tiempo será en total  $t_h \in TH = \{0, \dots, 335\}$ .

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

- $e \in E = \{1, \dots, n_e\}$ : Existe un conjunto de equipos de servicio de reparación.
- $th \in TH = \{0, \dots, 335\}$ : Período en horas del horizonte de planificación.
- $td \in TD = \{0, \dots, 6\}$ : Período en días de una semana.
- $ts \in TS = \{0, 1\}$ : Período en semanas del horizonte de planificación.
- $s \in S = \{1, \dots, n_s\}$ : 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  $s$ .
- $CH_e$ : Costo por hora de trabajo del equipo  $e$  trabajando.
- $CO_s$ : Costo de oportunidad por hora por no haber reparado el sitio  $s$ .
- $TR_{e,s}$ : 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

- $X_{e,s,th} \in \{0, 1\} : \begin{cases} 1 & \text{Si el equipo } e \text{ trabaja en el sitio } s \text{ en la hora } th. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$
- $U_{e,s,th} \in \{0, 1\} : \begin{cases} 1 & \text{Si el equipo } e \text{ comienza a trabajar en el sitio } s \\ & \text{en la hora } th. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$
- $UE_{e,th} \in \{0, 1\} : \begin{cases} 1 & \text{Si el equipo } e \text{ comienza a trabajar en la hora } th. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$
- $Z_{e,td,ts} \in \{0, 1\} : \begin{cases} 1 & \text{Si el equipo } e \text{ trabaja en el en el día } td \text{ en la semana } ts. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$
- $TU_{e,s,th}$ : Tiempo acumulado en horas que un equipo  $e$  ha estado trabajando dentro de un 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.

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

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

$$HD_{e,th} \geq HD_{e,th-1} + \left(1 - 336 \cdot \sum_{s \in S} X_{e,s,th}\right) \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (2)$$

$$HD_{e,th} \leq HD_{e,th-1} + 1 \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (3)$$

$$HD_{e,0} = 16 \quad \forall e \in E \quad (4)$$

$$HD_{e,th-1} \geq 16 \cdot UE_{e,th} \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (5)$$

$$HD_{e,th} \leq 335 \cdot \left(1 - \sum_{s \in S} X_{e,s,th}\right) \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (6)$$

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

$$HW_{e,th} \geq HW_{e,th-1} + 1 + 11 \cdot \left(\sum_{s \in S} X_{e,s,th} - 1\right) \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (7)$$

$$HW_{e,th} \leq HW_{e,th-1} + 1 \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (8)$$

$$HW_{e,0} = \sum_{s \in S} X_{e,s,0} \quad \forall e \in E \quad (9)$$

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

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

$$TU_{e,s,th} \geq TU_{e,s,th-1} + 1 + 11 \cdot (X_{e,s,th} - 1) \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (11)$$

$$TU_{e,s,th} \leq TU_{e,s,th-1} + 1 + (1 - X_{e,s,th}) \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (12)$$

$$TU_{e,s,th} \leq 11 \cdot X_{e,s,th} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (13)$$

$$TU_{e,s,0} = X_{e,s,0} \quad \forall e \in E, s \in S \quad (14)$$

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

$$TU_{e,s,th} \leq TR_{e,s} \quad \forall e \in E, th \in TH, \forall s \in S \quad (15)$$

$$U_{e,s,th} \cdot TR_{e,s} \leq TU_{e,s,th+TR_{e,s}-1} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{0, \dots, 335 - TR_{e,s}\} \quad (16)$$

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

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

7. Si el equipo  $e$  no trabajó en el sitio  $s$  en la hora  $th - 1$  y trabaja en ese sitio en la hora  $th$ , entonces el equipo  $e$  comienza a trabajar en el sitio  $s$  en la hora  $th$

$$U_{e,s,th} \geq X_{e,s,th} - X_{e,s,th-1} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (18)$$

$$U_{e,s,th} \leq 1 - X_{e,s,th-1} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (19)$$

$$U_{e,s,0} = X_{e,s,0} \quad \forall e \in E, s \in S \quad (20)$$

$$U_{e,s,th} \leq X_{e,s,th} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (21)$$

8. Si el equipo  $e$  no trabajó en ningún sitio en la hora  $th - 1$  y trabaja en algún sitio en la hora  $th$ , entonces el equipo  $e$  comienza a trabajar en la hora  $th$ .

$$UE_{e,th} \geq \sum_{s \in S} X_{e,s,th} - \sum_{s \in S} X_{e,s,th-1} \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (22)$$

$$UE_{e,th} \leq 1 - \sum_{s \in S} X_{e,s,th-1} \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (23)$$

$$UE_{e,0} = \sum_{s \in S} X_{e,s,0} \quad \forall e \in E \quad (24)$$

$$UE_{e,th} \leq \sum_{s \in S} X_{e,s,th} \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (25)$$

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

$$TM_s = \sum_{th \in TH} \sum_{e \in E} (th + TR_{e,s}) \cdot U_{e,s,th} \quad \forall s \in S \quad (26)$$

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

$$\sum_{th \in TH} U_{e,s,th} \leq EP_{e,s} \quad \forall e \in E, s \in S \quad (27)$$

11. Un equipo puede trabajar máximo 44 horas semanales.

$$\sum_{th' = ts*168}^{(ts+1)*168-1} \sum_{s \in S} X_{e,s,th'} \leq 44 \quad \forall e \in E, ts \in TS \quad (28)$$

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

$$\sum_{td \in TD} Z_{e,td,ts} \leq 6 - Z_{e,7,ts} \quad \forall e \in E, ts \in TS \quad (29)$$

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.

$$\sum_{k = td*24 + ts*168}^{(td+1)*24 + ts*168-1} \sum_{s \in S} X_{e,s,k} \leq 24 * Z_{e,td,ts} \quad \forall e \in E, ts \in TS, td \in TD \quad (30)$$

$$\sum_{k = td*24 + ts*168}^{(td+1)*24 + ts*168-1} \sum_{s \in S} X_{e,s,k} \geq Z_{e,td,ts} \quad \forall e \in E, ts \in TS, td \in TD \quad (31)$$

14. Un equipo e se considerará de vuelta en el trabajo si atiende cualquier sitio s luego de haber descansado.

$$UE_{e,th} \geq \sum_{s \in S} X_{e,s,th} - \sum_{s \in S} X_{e,s,th-1} \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (32)$$

$$UE_{e,th} \leq 1 - \sum_{s \in S} X_{e,s,th-1} \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (33)$$

$$UE_{e,th} \leq \sum_{s \in S} X_{e,s,th} \quad \forall e \in E, th \in \{1, \dots, 335\} \quad (34)$$

$$UE_{e,0} = \sum_{s \in S} X_{e,s,0} \quad \forall e \in E \quad (35)$$

## 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.

$$\min \sum_{s \in S} (CO_s * TM_s) + \sum_{th \in TH} \sum_{s \in S} \sum_{e \in E} (CD_{e,s} * U_{e,s,th}) + \sum_{th \in TH} \sum_{s \in S} \sum_{e \in E} (CH_e * X_{e,s,th}) \quad (36)$$

## 2.6. Naturaleza de las variables

- $X_{e,s,th} \in \{0, 1\} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in TH$
- $U_{e,s,th} \in \{0, 1\} \quad \forall e \in E, s \in S, th \in TH$
- $UE_{e,th} \in \{0, 1\} \quad \forall e \in E, th \in TH$
- $Z_{e,td,ts} \in \{0, 1\} \quad \forall e \in E, td \in TD, ts \in TS$
- $TU_{e,s,th} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall e \in E, s \in S, th \in TH$
- $TM_s \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall s \in S$
- $HW_{e,th} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall e \in E, th \in TH$
- $HD_{e,th} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall e \in E, th \in TH$

## 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 “Conjuntos y Parámetros”, adjunto en la carpeta de esta entrega.

### 3.1. Costo de oportunidad

Para calcular el costo de oportunidad  $CO_s$  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.

Un ejemplo de los cálculos realizados para procesar estos datos se encuentra 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.

### 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 20 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.

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.

### 3.5. Capacidad de los equipos de encargarse del daño

Para el parámetro  $EP_{e,s}$ , se consideró que, dada la amplia variedad de posibles daños asociados a un desastre, sería más práctico estimarlo de manera aleatoria. Esto se debe a que, en un evento de desastre, es común que se presenten múltiples tipos de daños simultáneamente. Por ejemplo, la caída de un árbol podría requerir una reparación rápida, pero también podría ocasionar daños colaterales, como la rotura de una cañería de agua, lo que implicaría la necesidad de asistencia por parte del equipo encargado del suministro de agua potable.

Con el fin de modelar esta incertidumbre y reflejar la variabilidad en la asignación de equipos, se desarrolló un código que genera valores aleatorios de 0 y 1 para determinar si un equipo específico está capacitado o no para atender un daño particular. Este enfoque permite simular de manera efectiva la disponibilidad y especialización de los equipos ante diferentes escenarios de reparación.

## 4. Modelación mediante Software

Dentro de la implementación de un código Python-Gurobi, se pondrá en funcionamiento el modelo que determinará el orden de distribución de equipos de reparación para múltiples sitios dañados. Antes de procesar los resultados, es necesario analizar las múltiples variables involucradas. Se utilizarán siete variables en total: las variables binarias  $X_{e,s,th}$ ,  $U_{e,s,th}$ ,  $UE_{e,th}$ ,  $Z_{e,td,ts}$ , que se emplean en las restricciones 1, 6, 7, 8, 10, 11, 12 y 13 para controlar el trabajo de los equipos de reparación y registrar los tiempos en horas ( $th$ ) y días ( $td$ ) de la semana ( $ts$ ). La variable  $X_{e,s,th}$  se relaciona con las variables enteras positivas  $HD_{e,th}$ ,  $HW_{e,th}$ ,  $TU_{e,s,th}$  a través de las restricciones 2, 3 y 4, regulando el conteo de horas de descanso, horas activas y tiempo de reparación. La variable  $U_{e,s,th}$  se utiliza en las restricciones 2 y 5 para confirmar los límites de horas de descanso  $HD_{e,th}$  y tiempo de reparación  $TU_{e,s,th}$ . Además, define el tiempo transcurrido hasta la reparación de un sitio  $TM_s$  en la restricción 9 y asegura que un equipo no abarque ciertos sitios según el contexto en 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 por ciento, 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. Esta solución óptima se ve evidenciada ya que al obtener los resultados del gráfico de la figura 1 se observa que cada equipo cumple con la jornada laboral de 10 horas y se descansa lo suficiente (16 horas) para volver a sus funciones en su nueva jornada. A continuación en las figuras 1 y 2 se muestra de manera gráfica la solución identificada en la cual se puede observar una predominancia del equipo de índice 4 en sitios trabajados en comparación a los demás, esto es un resultado esperado independiente de los costos adicionales que conlleva su actividad, es el equipo con mayor disponibilidad de reparar 17 sitios de los 20, además de esto se observa en la figura 2 de los resultados que los sitios reparados por dicho equipo tenían un menor tiempo de realización lográndose trabajar 4 sitios antes de un descanso de 16 horas. En el otro lado, los equipos 0, 2 y 3 dentro de los parámetros tienen más tiempo de trabajo por sitio en promedio y menos disponibilidad de sitios por reparar lo cual se retrata en los resultados disponibles, esto

señala una gran dependencia de este modelo por el tiempo y capacidad sobre los costos señalados.

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 por ciento 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 por ciento a 20 por ciento 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. Análisis de sensibilidad

### 6.1. Justificación de atributos a modificar:

Un primer atributo del modelo a modificar es la jornada laboral. En el modelo, un equipo no puede superar la cantidad de horas diarias dictadas por la jornada laboral actual (10 horas). En un contexto de emergencia, esta cantidad podría aumentar o disminuir dependiendo de la municipalidad involucrada y los estándares laborales que esta maneje. Por lo tanto, se decidió modificar la cantidad de horas de jornada laboral en dos casos: 8 horas y 12 horas diarias. Este cambio se implementó ajustando la restricción número dos, obteniendo resultados relevantes.

Con una jornada laboral más larga (12 horas), se observa una disminución en los costos debido a que se logra resolver todos los sitios con daños de manera anticipada, obteniendo un valor objetivo de: \$44.963.805. Por el contrario, al reducir la jornada laboral a 8 horas, se necesitan más turnos para reparar los sitios afectados, lo que incrementa el costo a \$64.256.507. Esto evidencia una clara diferencia entre el modelo original y los resultados del análisis de sensibilidad realizado.

Las figuras 4 y 6 del anexo muestran la asignación de sitios por jornada laboral para 12 y 8 horas respectivamente. Para el caso de 12 horas, la mayoría de las reparaciones se completan en las primeras 12 horas del desastre, mientras que con jornadas de 8 horas, este tiempo aumenta hasta las 30 horas. Aunque existe una diferencia en el tiempo total de reparación, las figuras 5 y 7 demuestran que las cargas de trabajo por equipo se mantienen constantes en ambos casos. Finalmente, en la figura 16 del anexo se comparan los valores de la función objetivo para cada escenario. Se observa que reducir la jornada laboral a 8 horas incrementa significativamente el costo, con un aumento de aproximadamente 12 millones respecto al valor original, mientras que ampliarla a 12 horas genera una reducción de alrededor de 5 millones.

Un segundo atributo a modificar es el costo de oportunidad, específicamente el parámetro  $CO_s$ . Este parámetro es crucial en la priorización de reparaciones, ya que incrementa el costo cuanto mayor sea el tiempo en que un sitio no es atendido por un equipo. Sin embargo, pueden existir desviaciones

en este valor debido a estimaciones imprecisas de costos o a diferencias en la demanda de cada sitio. Para evaluar este atributo, se realizaron dos escenarios:

1. En el primer escenario, se aumentó en un 25 % el costo de oportunidad de 4 de los 20 sitios, cuyo costo inicial oscilaba entre 173.333 CLP y 220.000 CLP.
2. En el segundo escenario, se redujo en un 25 % el costo de oportunidad de 3 de los 20 sitios, cuyo costo inicial era de 783.333 CLP.

Las figuras 8 y 10 del anexo muestran que las variaciones en los costos de oportunidad afectan la distribución de los equipos en los sitios dañados. Sin embargo, estas modificaciones solo producen una disminución marginal de una hora en el tiempo total de atención de la emergencia. En cuanto al impacto en los costos, la figura 16 revela que una disminución del costo de oportunidad reduce el valor objetivo en cerca de 8 millones respecto al original. En cambio, un aumento de este costo genera un reordenamiento de prioridades que reduce el valor objetivo aproximadamente en 2 millones.

Un tercer atributo evaluado es la capacidad de los equipos para encargarse de un sitio, representado por el parámetro  $EP_{e,s}$ . Este parámetro define la flexibilidad del modelo para asignar equipos a sitios según sea conveniente para minimizar los costos. Una menor capacidad de los equipos implica restricciones en las decisiones posibles del modelo, mientras que una mayor capacitación de los equipos permite abarcar más desastres.

Las modificaciones realizadas se dividieron en dos casos:

1. En el primer caso, se redujo en un 25 % los sitios asignables a los equipos 0 y 1, mientras que se aumentó en un 75 % los sitios asignables a los equipos 4 y 5.
2. En el segundo caso, se redujo en un 25 % los sitios asignables a los equipos 0 y 1, y se disminuyó en un 50 % los sitios asignables a los equipos 4 y 5.

En ambos casos, los cambios principales se observaron en las asignaciones de trabajo entre equipos, sin afectar significativamente el tiempo total de atención del desastre. Las figuras 12 y 14 muestran que las diferencias más importantes se presentan en las primeras 10 horas tras el desastre. Esto se confirma en las figuras 13 y 15, donde se aprecian las variaciones en las cargas de trabajo por equipo. Según la figura 16 del anexo, el primer caso resulta en una reducción de aproximadamente 10 millones en el valor objetivo, mientras que el segundo caso genera un aumento de alrededor de 5 millones en comparación con el modelo original.

## 7. Conclusión

El modelo puede considerarse como una versión idealizada del problema, a causa de parámetros como los costos de oportunidad que aunque estén basados en valores reales, siguen siendo un promedio de la realidad, al igual que con los valores estimados de tiempo de arreglo por equipo y otras características estudiadas en el análisis de sensibilidad. Sin embargo puede ser una herramienta muy útil en la realización de planes durante un periodo de emergencia sabiendo los recursos disponibles que tiene una municipalidad. A pesar de estas idealizaciones, se logra evidenciar que el modelo cumple con las condiciones básicas de asignación de personal en tareas determinadas, siempre respetando la jornada laboral y las respectivas horas de descanso. En cuanto al resultado arrojado por el modelo una vez implementado en Gurobi, se puede ver que esta solución tiene mucho sentido en cuanto a la realidad, siendo respaldada con el posterior análisis de sensibilidad, ya que por ejemplo, al momento de variar la jornada laboral de los equipos, se ve muy afectada la función objetivo, disminuyendo o aumentando su valor objetivo dependiendo del caso, debido a que esto genera que los equipos traba-

jen en más o menos jornadas, lo cual tiene un costo por despliegue, oportunidad y hora de trabajo diferente para cada caso. Esto refleja que es muy útil para la toma de decisiones en situaciones en las que se necesite distribuir equipos a distintas emergencias, variando los parámetros dependiendo del caso en el que se encuentren, ya que el modelo responde muy bien a estos cambios.

En cuanto a reflexiones respecto al rendimiento del equipo, se destaca la disminución de una integrante del equipo (debido a que congeló sus estudios), la distribución de tiempos y tareas que cada miembro debía realizar se vio alterada. Por otro lado, al no poseer mucho conocimiento en un principio sobre la modelación, se hizo algo complicado el definir ciertos parámetros y/o conjuntos para trabajar, como por ejemplo en cuanto a nuestras distintas medidas del tiempo (horas, días y semanas), las cuales antes era mucho más complicado de trabajar. Dentro de todo, el grupo trabajó muy bien, definiendo claramente las tareas que debería realizar y cumpliendo con los plazos establecidos (una vez hecha la modificación por la reducción del grupo) y aunque fue un poco complicado, se logró modelar la solución al problema planteado al principio del proyecto.

## 8. Anexos

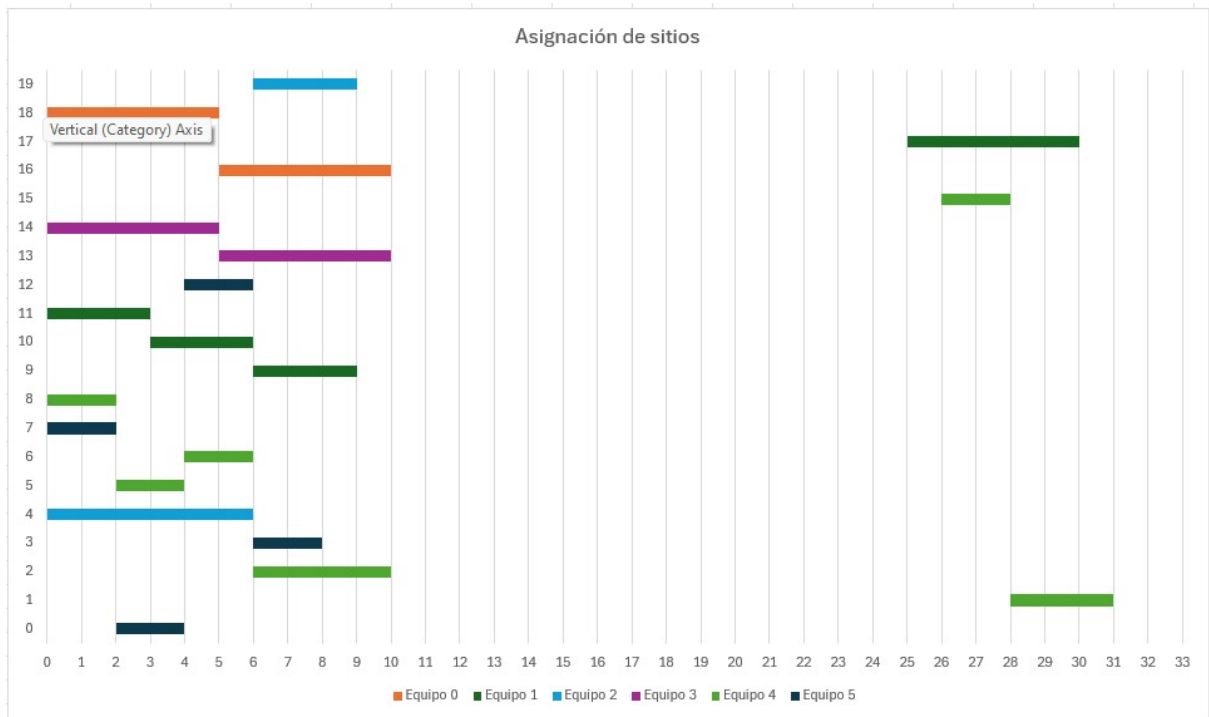


Figura 1: Asignación de equipos y turnos del modelo original.

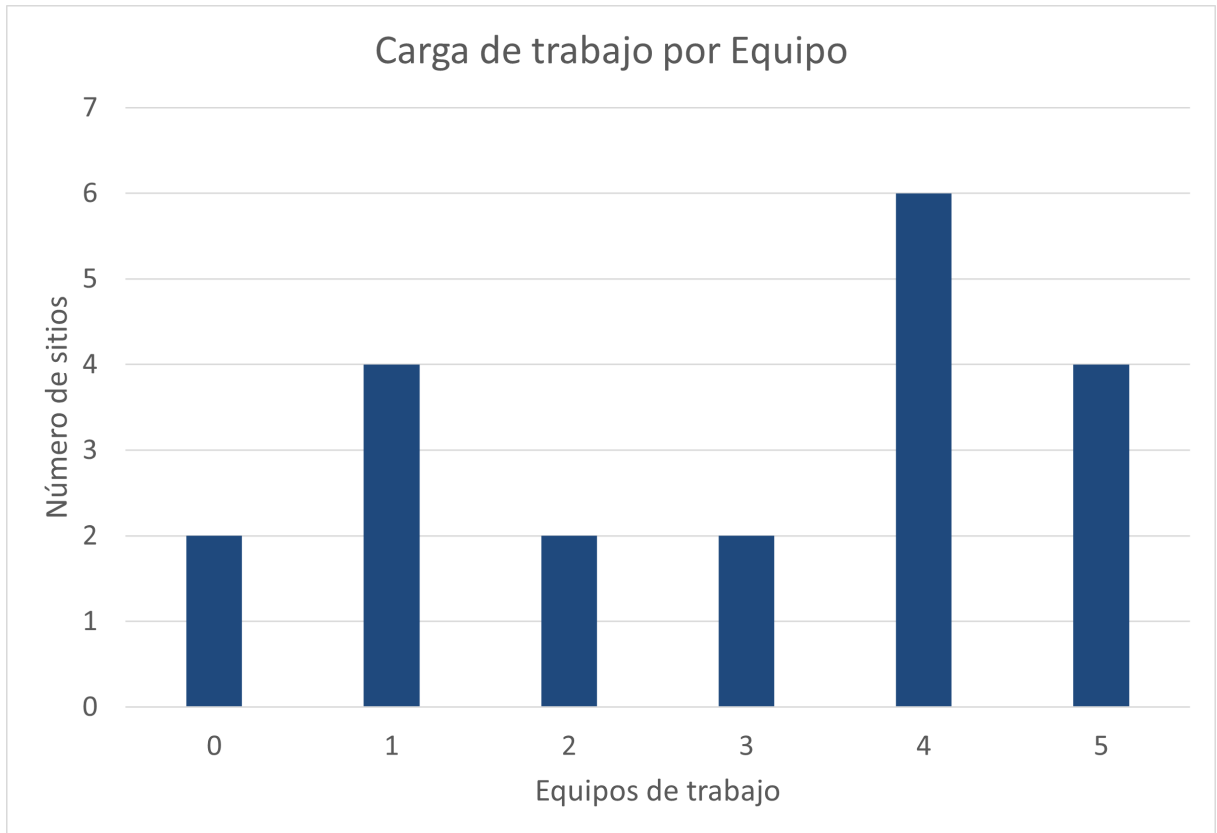


Figura 2: Carga de trabajo por equipo

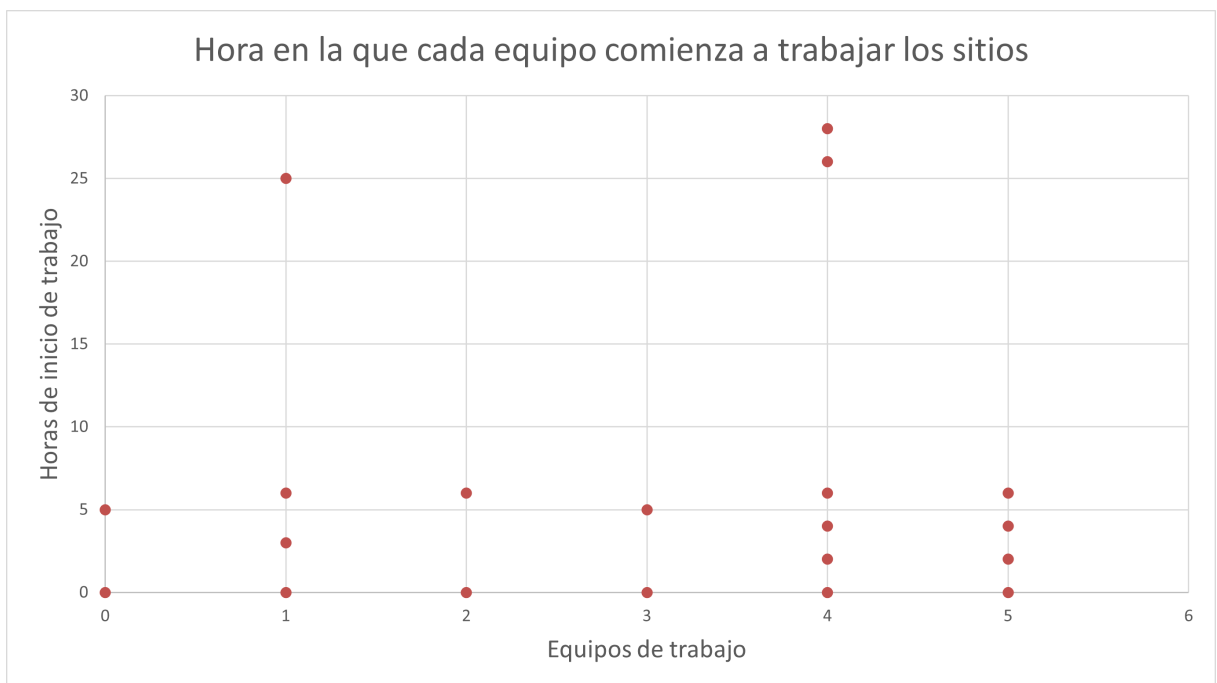


Figura 3: Hora a la que comienza a trabajar cada

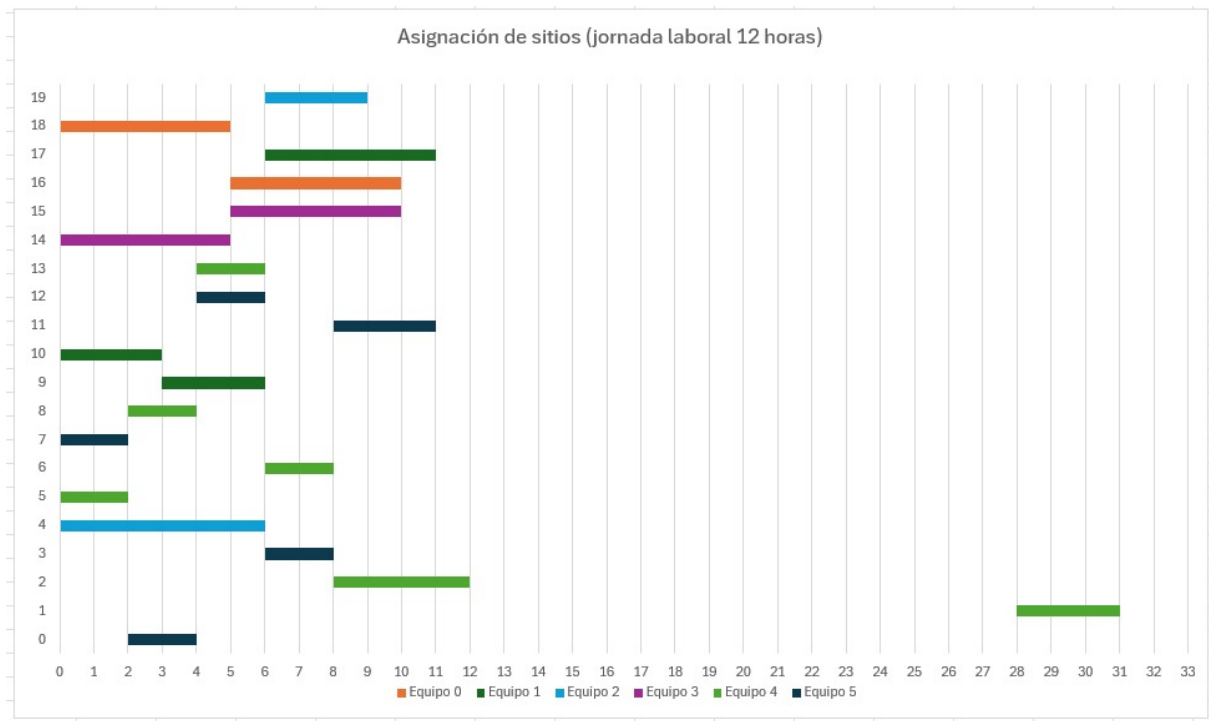


Figura 4: Asignación de equipos y sitios con jornada laboral de 12 horas.

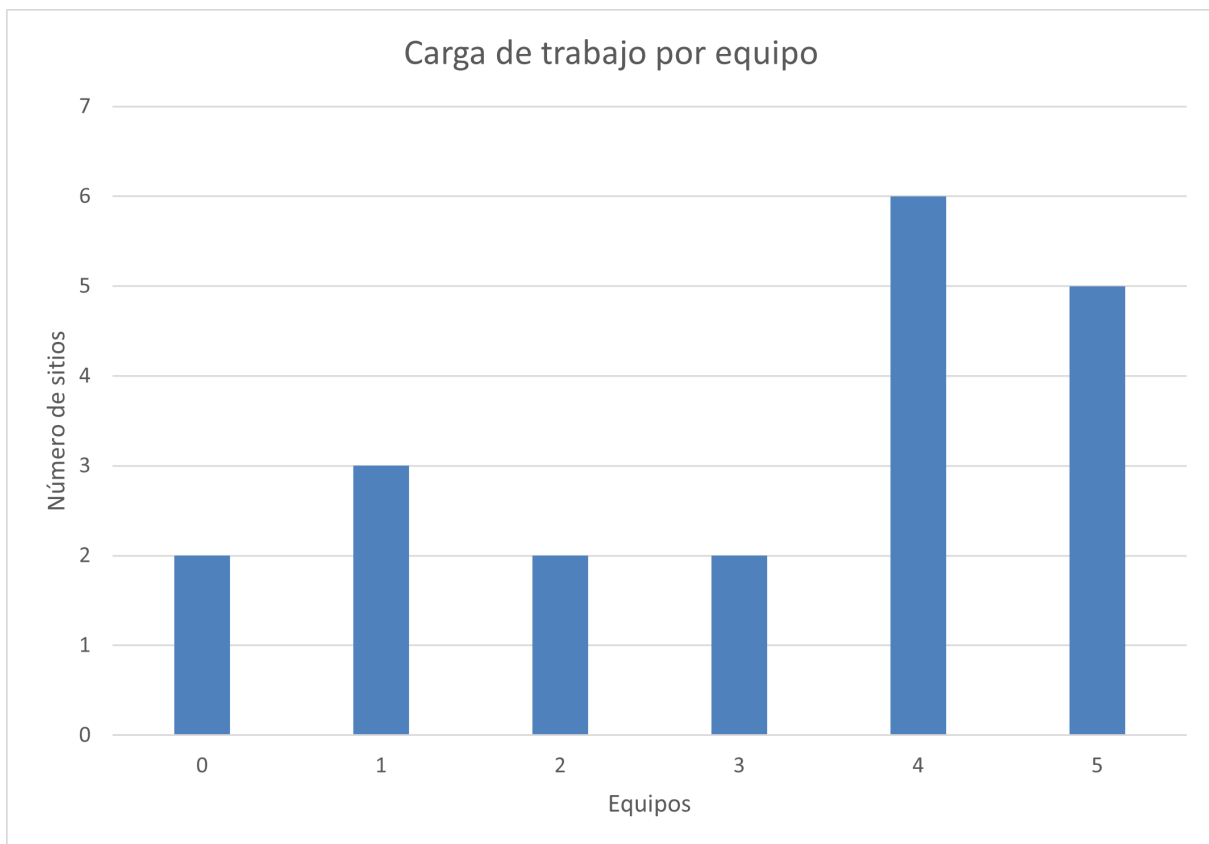


Figura 5: Carga de trabajo por equipo con jornada de 12 horas laborales.

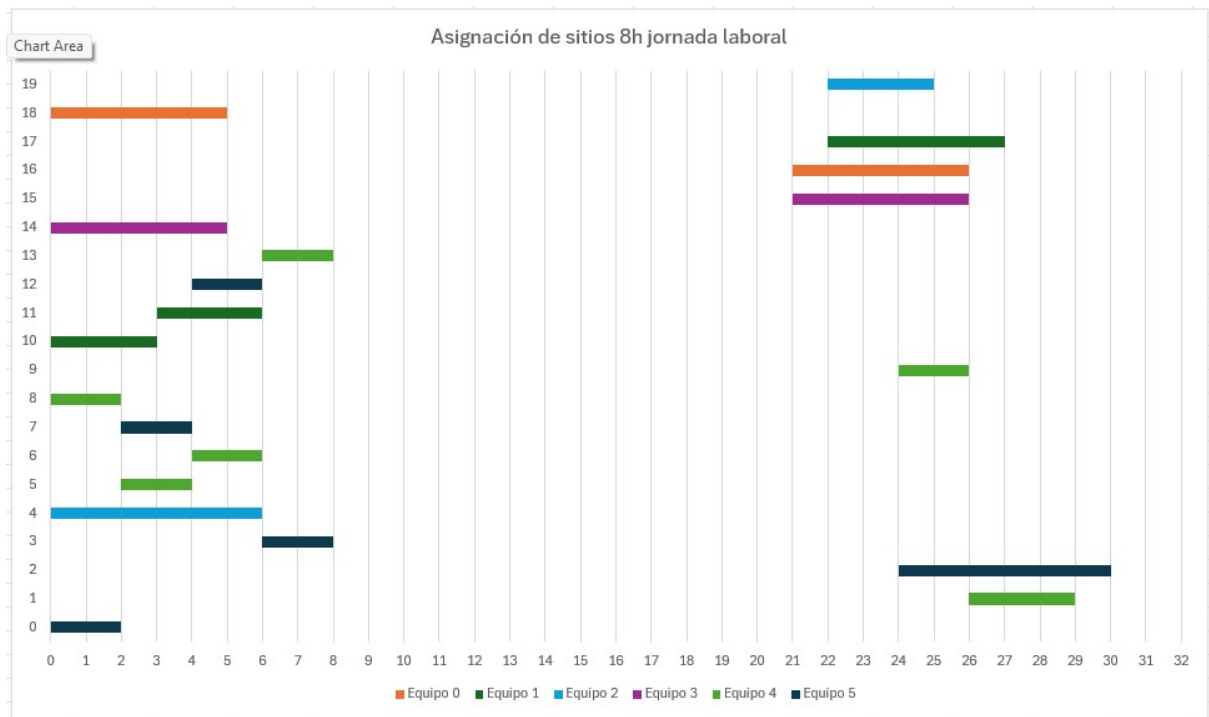


Figura 6: Asignación de equipos y sitios con jornada laboral de 8 horas.

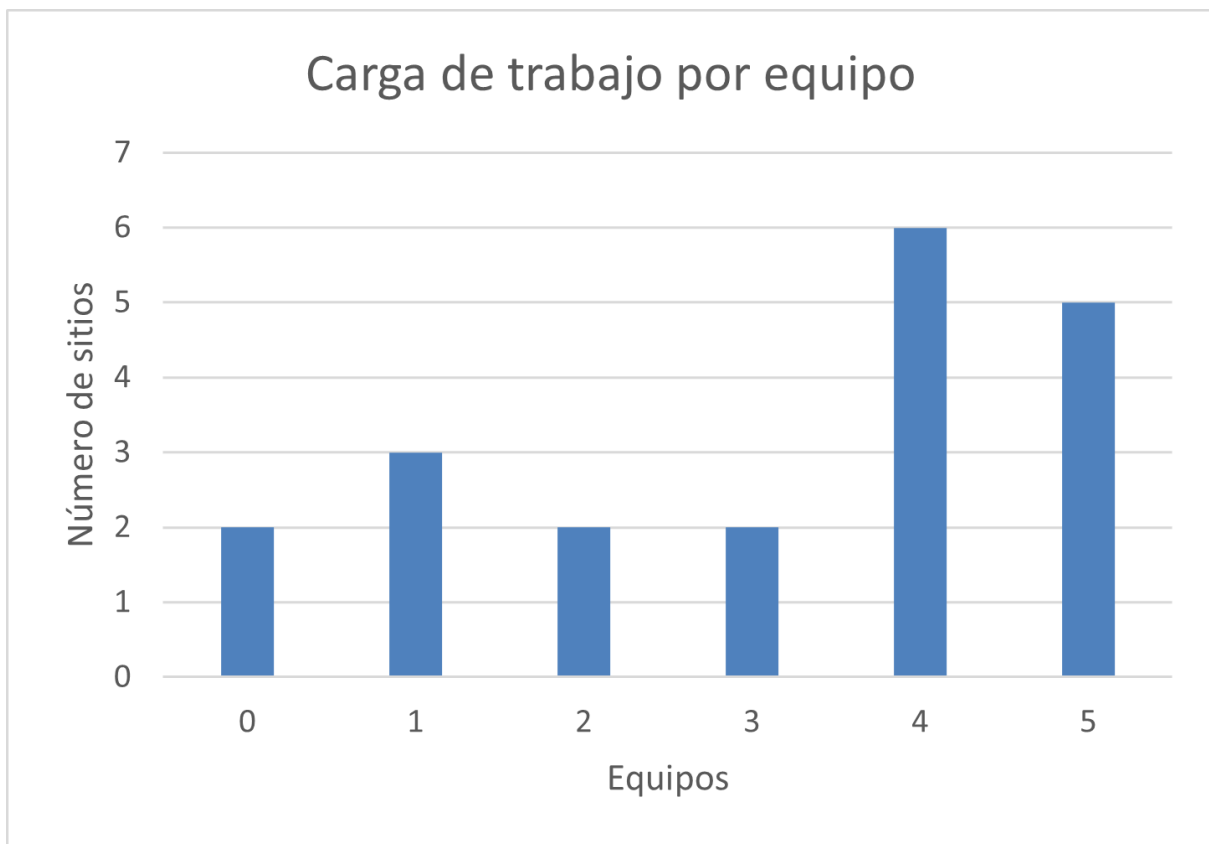


Figura 7: Carga de trabajo por equipo con jornada de 8 horas laborales.



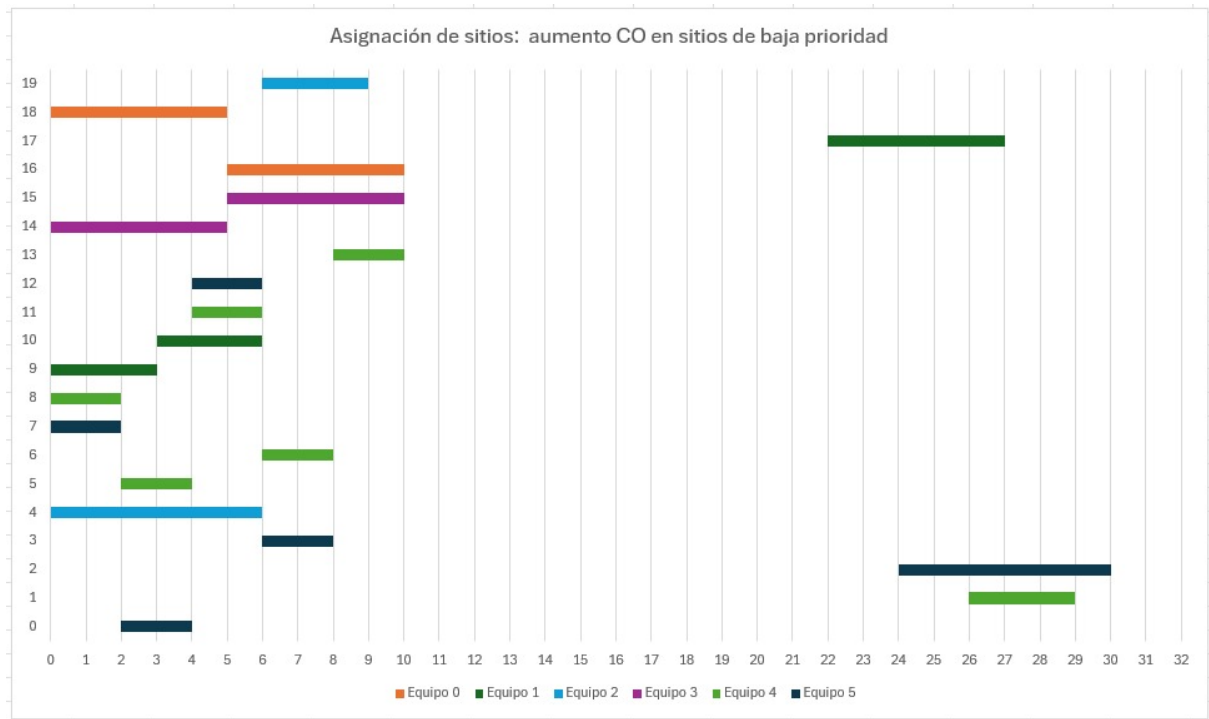


Figura 8: Asignación de equipos y sitios con aumento del 25 % del costo oportunidad.

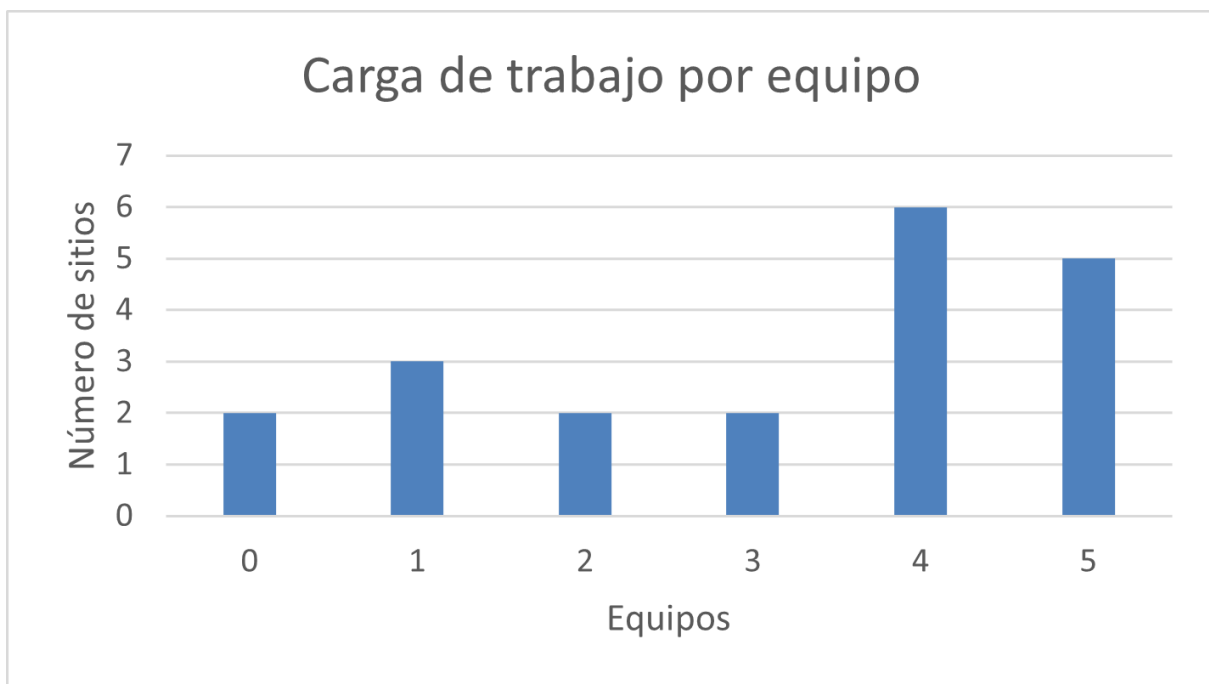


Figura 9: Carga de trabajo por equipo con aumento del 25 % del costo oportunidad.

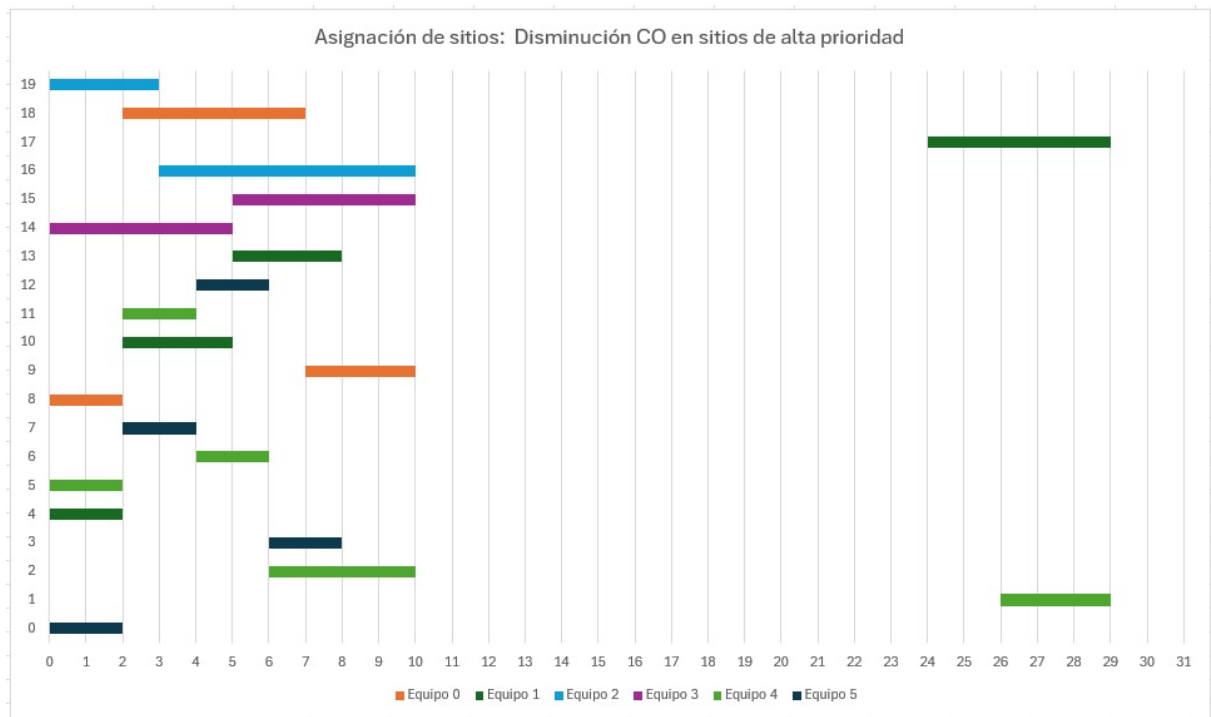


Figura 10: Asignación de equipos y sitios con disminución del 25 % del costo oportunidad.

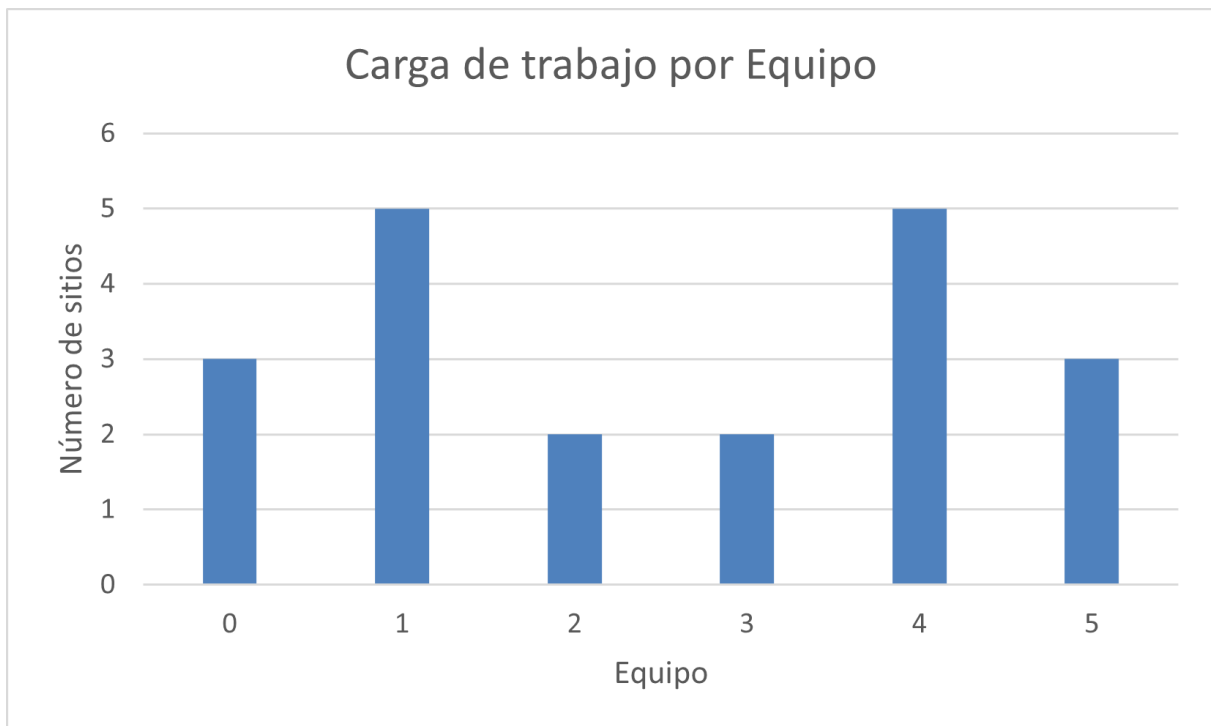


Figura 11: Carga de trabajo por equipo con disminución del 25 % del costo oportunidad.

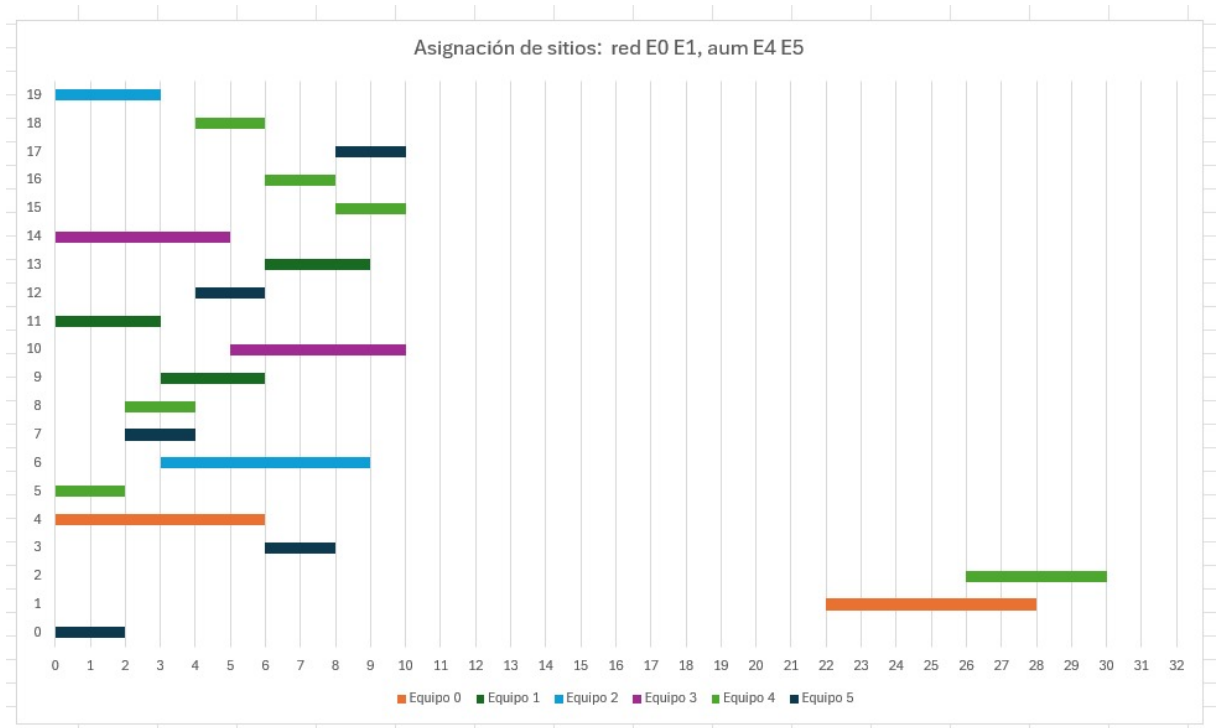


Figura 12: Asignación de equipos y sitios en caso 1 de capacidad de los equipos.

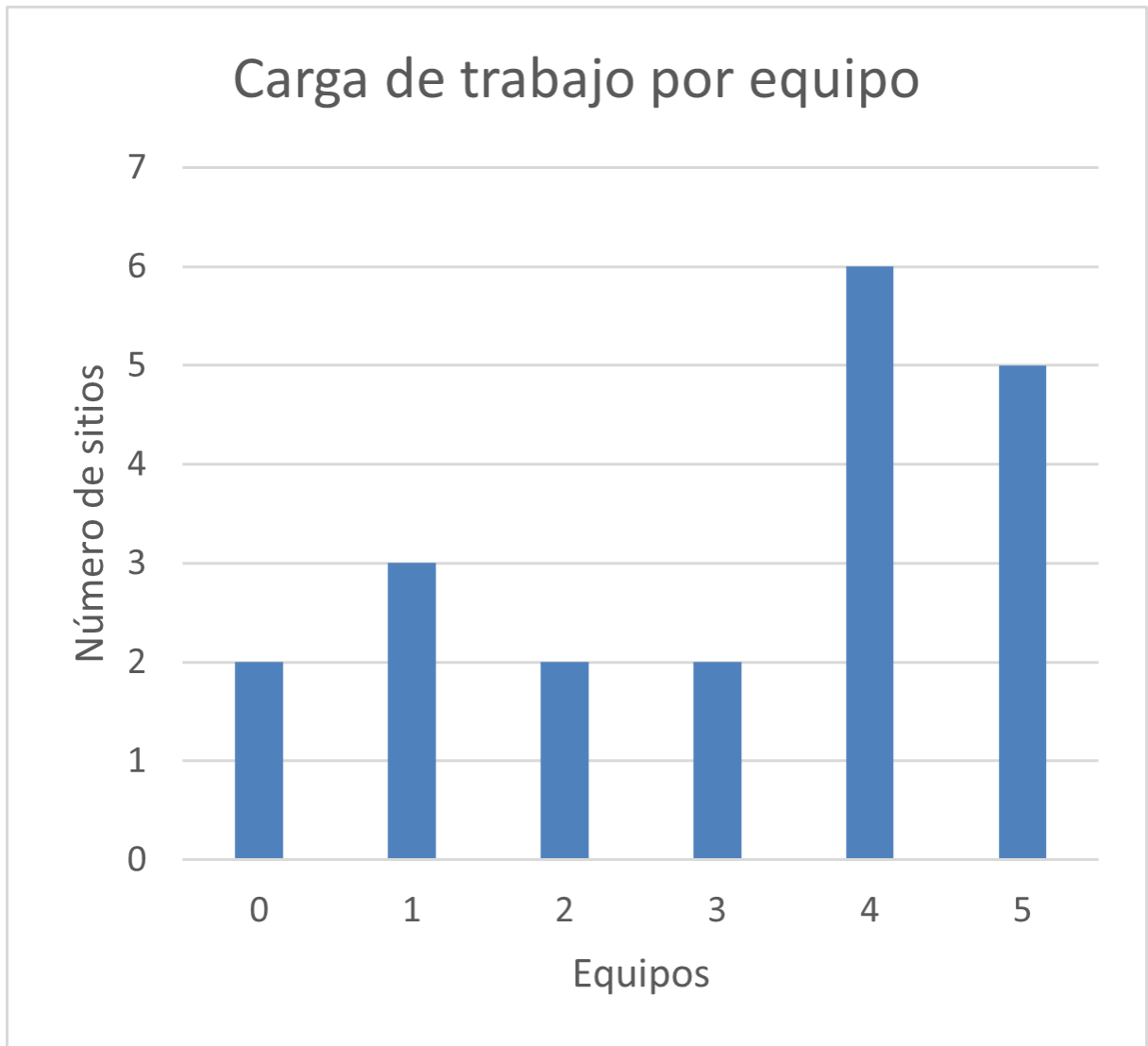


Figura 13: Carga de trabajo por equipo en caso 1 de capacidad de los equipos.

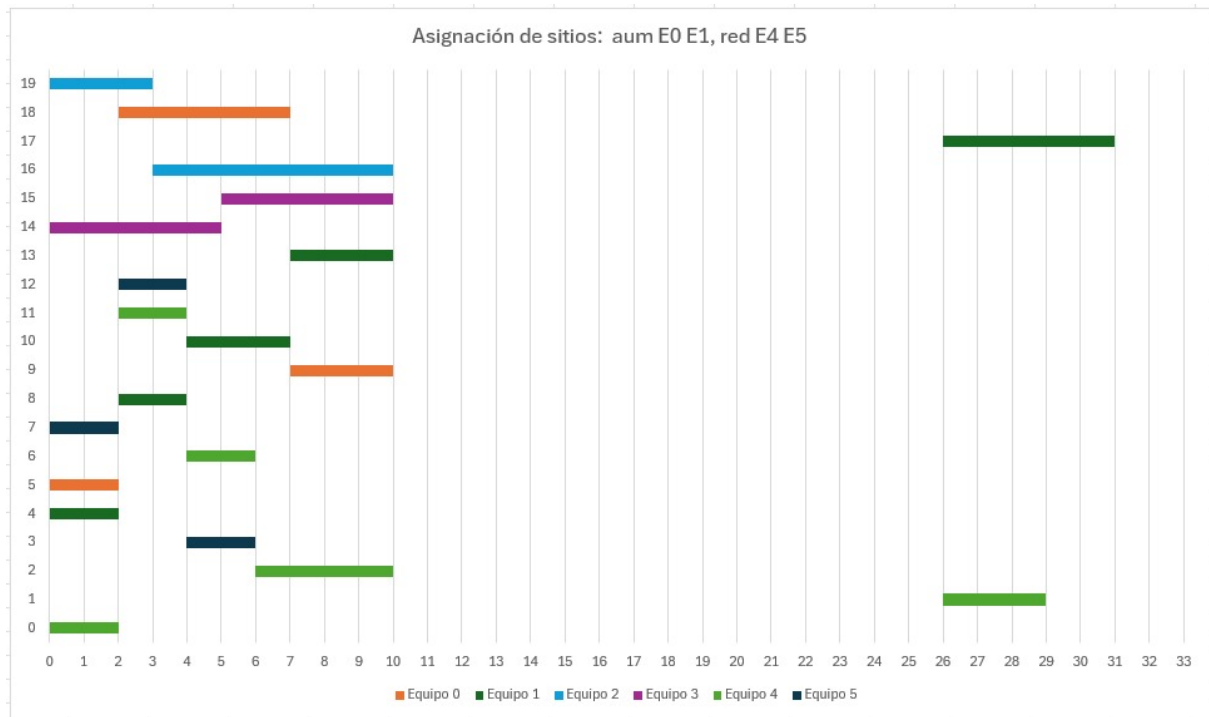


Figura 14: Asignación de equipos y sitios en caso 2 de capacidad de los equipos.

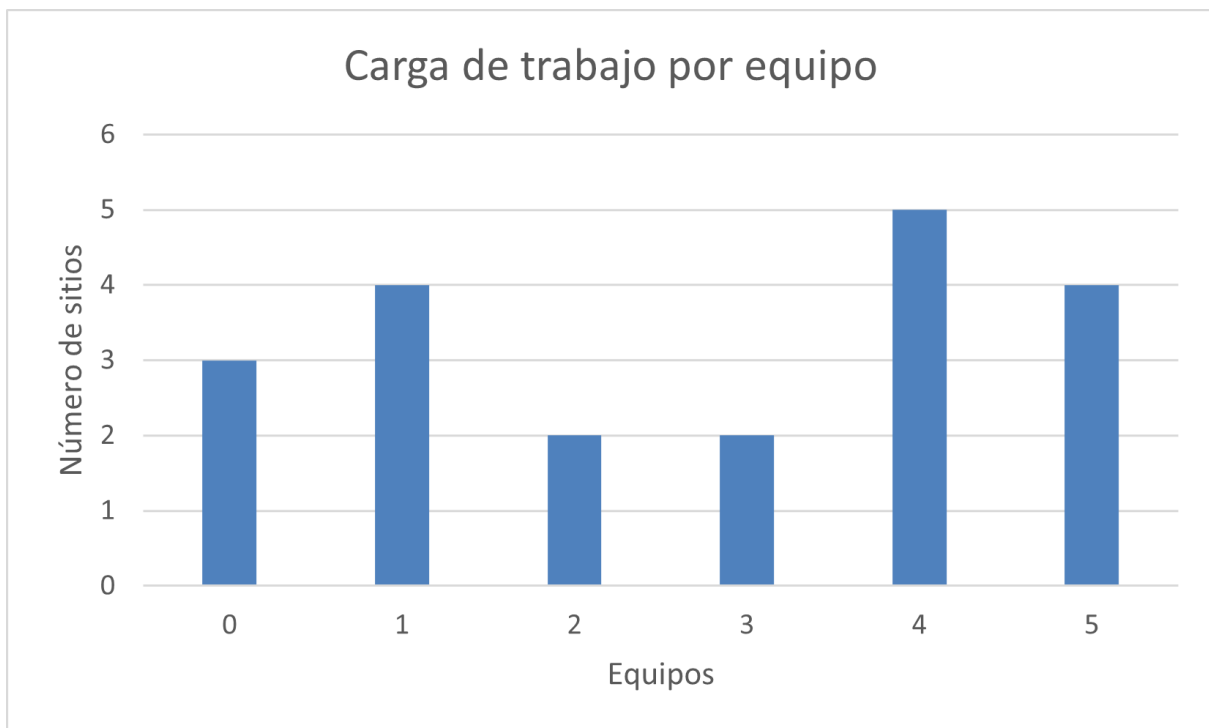


Figura 15: Carga de trabajo por equipos en caso 2 de capacidad de los equipos.

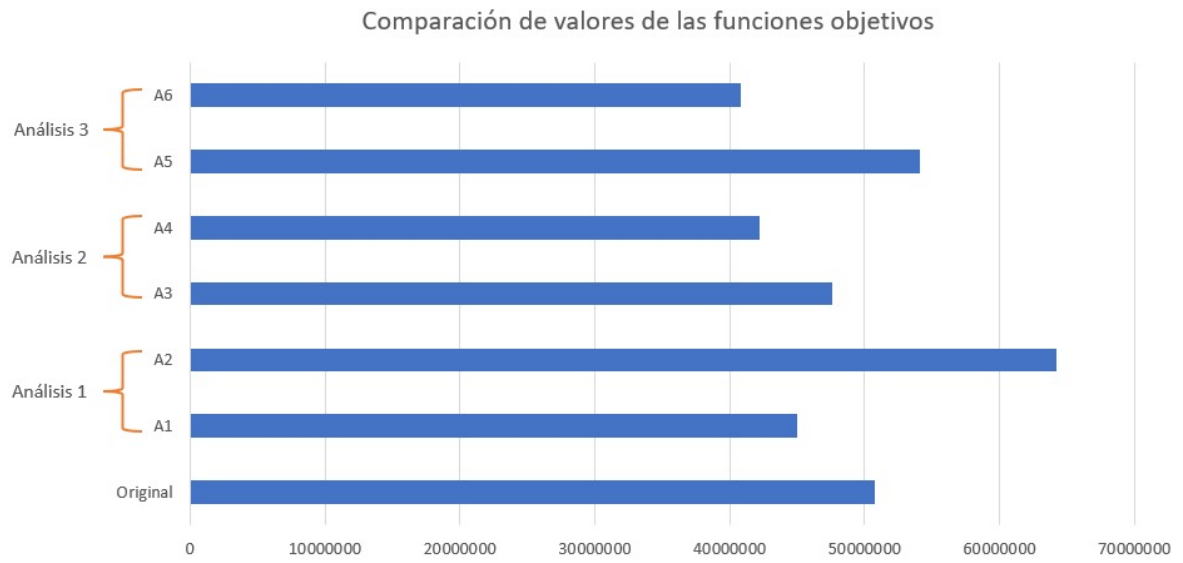


Figura 16: Comparación de valores objetivos por cada par de análisis de sensibilidad.



## *TERREMOTO<sub>EN</sub>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](https://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 NATURALES EN CHILE. Recuperado de: <https://citrid.uchile.cl/2017/05/15/cuanto-cuestan-las-emergencias-por-catastrofes-naturales-en-chile/>