



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL

## **Modelo de asignación de vehículos de recolección de escombros en desastres naturales**

Isaac Eliseo Montero Jara

Samantha Camila Reid Calderón

TRABAJO DE TESIS PRESENTADO EN CONFORMIDAD  
A LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

SANTIAGO - CHILE  
2020



FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y PROPIEDAD

Yo, Isaac Eliseo Montero Jara, declaro que este documento no incorpora material de otros autores sin identificar debidamente la fuente.

Santiago, 25 de Marzo del 2020

---

Firma del alumno

*"La educación es la llave para abrir el mundo, un pasaporte a la libertad.  
Oprah Winfrey"*

## Agradecimientos

En primero lugar agradezco a mi padre Hernán Montero Gonzalez, que me ha brindado las herramientas y amor necesario para poder lograr mis objetivos propuestos en la vida.

Agradezco a mi madre Jacqueline Jara Pérez, sólo el hecho de creer en mí durante mi niñez y darme a entender que puedo ser capaz de todo lo que me proponga.

Agradezco a mi novia Valentina Calderón, la cual me brindó la energía y apoyo incondicional para lograr mis objetivos profesionales.

Agradezco a mis familiares, los cuales me ayudaron en etapas donde más lo necesitaba.

Agradezco a mi profesor de tesis Samantha Reid, y también a Franco Menares, los cuales fueron un apoyo fundamental para lograr esta investigación.

# Índice

<b>1. CONTEXTO</b>	<b>6</b>
1.1. INTRODUCCIÓN . . . . .	6
1.2. LOGÍSTICA HUMANITARIA . . . . .	6
1.3. FASE DE RECUPERACIÓN . . . . .	6
1.4. CONTEXTO NACIONAL . . . . .	7
<b>2. IMPORTANCIA DEL TRABAJO</b>	<b>7</b>
<b>3. DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>8</b>
3.1. RUTEO VEHICULAR . . . . .	8
3.2. PLANIFICACIÓN Y ASIGNACIÓN . . . . .	8
3.3. RECICLAJE . . . . .	8
<b>4. CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO</b>	<b>9</b>
<b>5. HIPÓTESIS</b>	<b>9</b>
<b>6. OBJETIVO GENERAL</b>	<b>9</b>
<b>7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>9</b>
<b>8. Caso de Estudio</b>	<b>10</b>
8.1. Área de estudio . . . . .	10
8.2. Recopilación de datos . . . . .	10
8.2.1. Red vial y obtención de escombros . . . . .	10
8.2.2. Edificios . . . . .	11
8.2.3. Equipamiento vehicular . . . . .	11
8.2.4. Software . . . . .	12
<b>9. RESULTADOS</b>	<b>12</b>
9.1. Confección de los escenarios . . . . .	12
9.1.1. Extracto de la zona . . . . .	12
9.1.2. Escenarios propuestos . . . . .	13
<b>10. Análisis de la situación inicial (Escenario 0)</b>	<b>14</b>
<b>11. Análisis de la metodología sin factor de preferencia (Escenario 1)</b>	<b>15</b>
<b>12. Análisis de variación en el recurso vehicular (Escenarios 2 y 3)</b>	<b>16</b>
<b>13. Análisis de variación en la cantidad de escombros (Escenarios 4, 5 y 6)</b>	<b>19</b>
<b>14. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>21</b>
<b>15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>23</b>
<b>16. ANEXOS</b>	<b>25</b>
16.1. Detalle de edificios . . . . .	25

## Índice de cuadros

1.	Revisión de la literatura; Fuente: Elaboración propia . . . . .	9
2.	Historial de terremotos Región de Tarapacá, a partir del año 1900. Fuente: (GUC, 2019) . . . . .	11
3.	Detalle de modelamiento Escenario 0, Fuente: Elaboración propia. . .	14
4.	Detalle comparación Escenarios 0 y 1, Fuente: Elaboración propia. . .	15
5.	Detalle comparación Escenarios 0, 2 y 3, Fuente: Elaboración propia. .	17
6.	Detalle comparación Escenarios 0, 4, 5 y 6 Fuente: Elaboración propia. .	20
7.	Detalle de edificios relevantes en la zona ; Fuente: (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2017) . . . . .	26

## Índice de figuras

1.	Totalidad de personas muertas por desastres naturales última década. Fuente: EM-DAT (2019) . . . . .	7
2.	Mapa de Iquique. Fuente: Google Maps (2019) . . . . .	10
3.	Centros de Salud y Establecimientos de Educación en Iquique. Fuente: Elaboración Propia en base a datos del CENSO (2017) . . . . .	12
4.	Extracto de la zona. Fuente: Elaboración propia. . . . .	13
5.	Detalle del extracto de la zona con cantidad de escombros. Fuente: Elaboración propia. . . . .	13
6.	Detalle de edificios limpios (Escenario 0), Fuente: Elaboración propia .	14
7.	Visualización de edificios limpios (Escenario 0), Fuente: Elaboración propia . . . . .	15
8.	Detalle de edificios limpios (Escenarios 0 y 1), Fuente: Elaboración propia . . . . .	16
9.	Visualización de edificios limpios (Escenarios 0 y 1), Fuente: Elabo- ración propia . . . . .	17
10.	Detalle de edificios limpios (Escenarios 0, 2 y 3), Fuente: Elaboración propia . . . . .	18
11.	Visualización de edificios limpios (Escenarios 0, 2 y 3), Fuente: Elabo- ración propia . . . . .	19
12.	Detalle de edificios limpios (Escenarios 0, 4, 5 y 6), Fuente: Elabora- ción propia . . . . .	20
13.	Visualización de edificios limpios (Escenarios 0, 2 y 3), Fuente: Elabo- ración propia . . . . .	21

# 1. CONTEXTO

## 1.1. INTRODUCCIÓN

Históricamente se han registrado numerosos eventos, denominados desastres. Van Wassenhove (2006) los define como interrupciones que afectan físicamente a un sistema en su conjunto y amenaza sus prioridades y objetivos. Existen dos tipos de desastres: los provocados por el hombre (tecnológicos, ataques terroristas, entre otros); y los ocasionados de forma natural. Estos últimos se clasifican en: meteorológicos (tornados, huracanes, incendios); hidrográficos (inundaciones, tormentas, tsunamis); y geofísicos (volcánicos y terremotos).

Según EM-DAT (2019), en la última década, a nivel global, se realizó un registro de 3155 desastres naturales, produciendo más de 430.000 fallecidos, 1.300 millones de personas afectadas, y daños aproximados 1.340 billones de dólares.

## 1.2. LOGÍSTICA HUMANITARIA

La logística humanitaria se define como el proceso de planificación, implementación y control, del flujo eficiente, rentable y almacenamiento de bienes y materiales, así como la información relacionada, desde el punto de origen hasta el punto de consumo con el fin de aliviar el sufrimiento de las personas vulnerables (Overstreet et al., 2013). Por otra parte, Kumar and Kushwaha (2018) establece que, si bien la logística humanitaria desempeña un papel importante en la consecución de los objetivos de la ayuda humanitaria, existen grandes diferencias y desafíos en comparación con la logística en las aplicaciones comerciales. En resumen, la logística humanitaria se centra en brindar atención a personas frente a un desastre natural.

Según Kumar and Kushwaha (2018), la gestión de desastres se puede dividir en cuatro fases, cada una correspondiente al ciclo de vida de un desastre: mitigación, preparación, respuesta, recuperación. En las dos primeras fases se ven los temas orientados a gestionar antes de un desastre; en respuesta se ven las primeras 72 horas después de un desastre; y en recuperación las actividades orientadas después de haber transcurrido estas 72 horas. El objetivo principal en recuperación es restaurar y estabilizar el sistema en la sociedad y las actividades realizadas son: eliminación y reciclaje de desechos tanto como de la población como del desastre, restauración de la red e infraestructura y la distribución de productos básicos de socorro.

## 1.3. FASE DE RECUPERACIÓN

La recuperación comienza cuando la emergencia se ha estabilizado, por lo que ya no existe una amenaza latente a la población, y termina cuando la comunidad se ha recuperado. El objetivo de la mayoría de las personas es reanudar sus vidas exactamente antes de que ocurriera el desastre, tanto en el ámbito material como psicológico. Además las entidades deben reparar los daños correspondientes a sus instalaciones físicas, tanto comerciales, públicas e industriales (Lindell et al., 2006).

Según Feng and Wang (2003) existen dos tipos de actividades en la fase de recuperación. Las primeras comienzan posterior a un desastre y en un transcurso de 72 horas posteriores y se centran en despejar las vías de locomoción para agilizar el traslado de la población afectada, disminuyendo el daño a la sociedad. Posteriormente, se realizan actividades a largo plazo, cuyo objetivo es eliminar el rastro

físico que dejó el evento, enfocándose en reciclar, trasladar, almacenar, reducir los desechos, mencionando que estas actividades pueden tardar meses o años.

## 1.4. CONTEXTO NACIONAL

Según (EM-DAT, 2019), durante la última década en Chile, se registraron 21 eventos. Estos han provocado 815 pérdidas humanas y más de 10.000 lesionados, además de afectar a 4.100.000 personas en su vida cotidiana y dejando a 834.500 personas sin hogar. Además, en lo económico, se han generado daños cercanos a los 34.200 millones de dólares. En la figura 1 se visualiza el total de personas por tipo de desastre, predominando el tipo geofísico.

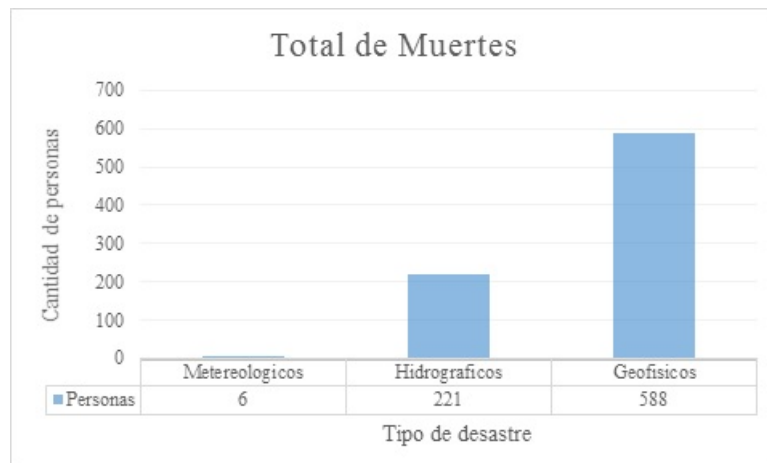


Figura 1: Totalidad de personas muertas por desastres naturales última década.  
Fuente: EM-DAT (2019)

## 2. IMPORTANCIA DEL TRABAJO

La importancia de este trabajo radica en un bienestar social para la población afectada posterior a un desastre, además de prestar apoyo a las actividades logísticas involucradas dentro de un desastre. Prestando el enfoque al tipo de desastre con mayor número de muertes 588 en la última década, este estudio se va a centrar en el tipo de desastre geofísico, además de presentar daños en infraestructura en cifras de billones de dólares (EM-DAT, 2019). La recolección de escombros en las primeras 72 horas de operación debe estar destinada a los edificios más importantes dentro de la logística humanitaria, considerando que es vital tener las vías de acceso tales como hospitales, colegios y albergues. Estos edificios impactan directamente a la ayuda de las personas afectadas, brindando atención de urgencia a los heridos y proporcionando albergues a las víctimas cuyos hogares han quedado inhabilitados. Asimismo, prestando importancia, al termino volver a la normalidad, favoreciendo a la población, a volver a sus actividades diarias, y restaurar la salud psicológica de la población (Kumar and Kushwaha, 2018).



### 3. DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA

Tras ocurrido un desastre, es importante recuperar la vida previa a la comunidad. Uno de los elementos a considerar son las políticas de reconstrucción y restauración de las redes Feng and Wang (2003). Por lo mismo, se deben encontrar soluciones que permitan optimizar el uso de los recursos destinados a actividades de limpieza y recolección.

#### 3.1. RUTEO VEHICULAR

Existen distintos autores que abordan el problema a través de ruteo vehicular. Karlaftis et al. (2007) proponen un modelo de tres etapas, donde maximiza la importancia de los nodos, asigna recursos y minimiza costos de reparación, enfocado en puentes. Liberatore et al. (2014) minimizan el tiempo necesario para las reparaciones de emergencia y distribución de artículos de ayuda a través de un modelo multicriterio, donde incorpora el tiempo, costo, confiabilidad, seguridad y satisfacción de la demanda. Aksu and Ozdamar (2014) maximiza la accesibilidad a la red para evacuar a los sobrevivientes y remover desechos de las rutas. Maya Duque et al. (2016) realizan una planificación de equipos de limpieza y su ruteo dentro de la red para limpiar edificios. Por último, Kasaei and Salman (2016) desarrollan un modelo lineal que limpia caminos bloqueados, minimizando el tiempo de reconexión de la red y maximizando el beneficio total de reconexión dentro de un tiempo dado.

#### 3.2. PLANIFICACIÓN Y ASIGNACIÓN

De manera similar, existen estudios que abordan el problema a través de planificación y asignación. Feng and Wang (2003) proponen un modelo multiobjetivo de limpieza de edificios, donde maximiza el largo de las rutas accesibles, el total de vidas salvadas y minimiza el riesgo. Brooks and Mendonc (2013) determinan la estrategia para asignar los vehículos entre los sitios de recogida y almacenamiento temporal de escombros, maximizando el flujo de la red. Ransikarbum and Mason (2016) desarrollan un modelo para decisiones estratégicas en la distribución de suministros y restauración de la red, maximizando equidad, minimizando demanda insatisfecha y costos. Akbari and Salman (2017) generan una planificación para equipos de limpieza para reconectar la red.

#### 3.3. RECICLAJE

Además, en los últimos años se ha incorporado el factor de reciclaje en esta fase. Boonmee et al. (2018) realizan un modelo de localización y asignación de centros de reciclaje, minimizando los costos y penalizando daños al ambiente. Wang et al. (2018) proponen un modelo de asignación multiobjetivo que minimiza costos de remoción de escombros, tiempo total de procesamiento y maximiza el reciclaje.

En la tabla 1 se resume toda la información de la revisión de la literatura, junto con las leyendas abajo.

Autor	Año	Objetivo(s)	Tipo	Decisión	Limpieza	1	2	3	4
Feng and Wang	2003	Maximizar largo de las rutas accesibles	M	A	E		x		
		Maximizar total de vidas salvadas							
		Minimizar riesgo							
Karlaftis et al.	2007	Maximizar importancia de los nodos	M	R	E				
		Maximizar asignación de recursos							
		Minimizar costos de reparación							
Brooks and Mendonc	2013	Maximizar flujo en la red	S	A	C		x	x	
Aksu and Ozdamar	2014	Maximizar accesibilidad en la red para evacuación para sobrevivientes y remover los desechos de las rutas	S	R	C		x		
Liberatore et al.	2014	Minimizar tiempo de reparaciones de emergencia y distribución	S	R	C		x		
Kasaei and Salman	2016	Maximizar tiempo de reconexión de la red	M	R	C				x
		Maximizar beneficio al reconectar la red							
Maya Duque et al.	2016	Maximizar cantidad de edificios limpiados	S	R	E		x		
Ransikarbum and Mason	2016	Maximizar equidad	M	A	C				x
		Minimizar demanda insatisfecha							
Akbari and Salman	2017	Maximizar cantidad de edificios limpiados	S	A	C		x	x	
Boonmee et al.	2018	Minimizar costos, penalizando daño al medio ambiente	S	A	E	x			
Wang et al.	2018	Minimizar los costos de remoción de escombros	M	A	E	x			
		Minimizar tiempo total							
		Maximizar reciclaje							
Propuesta	2020	Maximizar preferencia de limpieza en la red en los primeros días de trabajo	S	A	E		x		

Tipo: S - Modelo monobjetivo; M - Modelo multiobjetivo  
Decisión: R - Ruteo vehicular; A - Asignación y planificación  
Limpieza: E - Edificios; C - Caminos  
(1) Reciclaje  
(2) Tiempo  
(3) Almacenamiento Temporal  
(4) Distribución de suministros

Cuadro 1: Revisión de la literatura; Fuente: Elaboración propia

## 4. CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO

La contribución de este trabajo radica en: (a) agregar un ponderador de preferencia de limpieza y por día a los edificios, el cual beneficia la recolección en los primeros días; (b) el caso de estudio se efectúa con datos reales de la región de Iquique, en conjunto con datos de simulación del programa HAZUS.

## 5. HIPÓTESIS

Al incorporar un factor de preferencia por día y edificio, se puede planificar de mejor manera la recolección en un horizonte de tiempo.

## 6. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología que permita determinar la asignación de vehículos de recolección dentro de un horizonte de planificación, en la fase de recuperación temprana de un desastres natural.

## 7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar modelo de optimización para el problema.
- Obtener y depurar datos de Iquique.

- Obtener datos con software HAZUS.
- Obtener resultados y aplicar análisis de sensibilidad.

## 8. Caso de Estudio

### 8.1. Área de estudio

El caso de estudio se realizó en la región de Tarapacá en la ciudad de Iquique, Chile, visualizada en la 2. Esta ciudad cuenta con una población de 191.468 personas y una superficie de  $2,242 \text{ km}^2$  (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2017).



Figura 2: Mapa de Iquique. Fuente: Google Maps (2019)

Esta región está propensa a sufrir catástrofes naturales debido a su ubicación sobre la placa Sudamericana la cual produce un movimiento contrario a la placa de Nazca (CNS, 2020). Según EM-DAT (2019), se cuenta con un historial de cuatro sismos de gran magnitud en los últimos 25 años, debido a que superan los 7.0 grados de magnitud. En la Tabla 2 se muestran los eventos sísmicos desde 1900, cuyas leyendas son: Magnitud de ondas superficiales ( $M_s$ ) y Magnitud del momento ( $M_w$ ) (CNS, 2020).

### 8.2. Recopilación de datos

#### 8.2.1. Red vial y obtención de escombros

La red vial se obtuvo a través del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones de Chile, la cual se compone de 1655 manzanas censales Biblioteca del Congreso

Fecha	Latitud	Longitud	Magnitud Ms / Mw	Profundidad (km)
15-09-1911	-20	-72	7.3 (Ms)	-
23-02-1933	-20	-71	7.6 (Ms)	40
01-12-1943	-21	-69	7 (Ms)	100
25-04-1949	-19.75	-69	7.3 (Ms)	110
08-01-1956	-19	-70	7.1 (Ms)	11
13-06-1959	-20.42	-69	7.5 (Ms)	83
29-11-1976	-20.52	-68.919	7.3 (Ms)	82
08-08-1987	-19	-70	7.1 (Ms)	42
13-06-2005	-19.895	-69.125	7.8 (Ms/Mw)	108
01-04-2014	-19.572	-70.908	8.2 (Mw)	38.9

Cuadro 2: Historial de terremotos Región de Tarapacá, a partir del año 1900. Fuente: (GUC, 2019)

Nacional de Chile (2017). Estos datos fueron procesados en el software ArcGis 10.1, del cual se obtuvo la matriz de distancia entre los nodos de la red.

Por otro lado, la cantidad de escombros para cada una fue obtenida a través del software HAZUS 2.1, a partir de una simulación de un escenario de magnitud 8.0 Mw. Se tomó en consideración sólo los escombros de tipo madera y ladrillos, puesto que los demás requieren de equipamiento más avanzado (Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, 2020).

### 8.2.2. Edificios

Durante la fase de recuperación es importante mantener las vías de acceso despejadas a hospitales, colegios y otros edificios de interés. Estos se utilizan como recurso para la comunidad con el fin de albergar personas y/o prestar servicios de primeros auxilios Lindell et al. (2006). En total, se consideraron 16 centros de salud y 65 establecimientos de educación, cuyo detalle se presenta en el Anexo 16.1 y su distribución espacial en la Figura 3.

### 8.2.3. Equipamiento vehicular

Durante las labores de recolección de escombros se necesitan equipos de limpieza, los cuales deben tener las capacitaciones necesarias para poder utilizar maquinaria pesada tal como bulldozers, vehículos livianos y camiones recolectores (Kasaei and Salman, 2016).

El vehículo seleccionado es un camión IVECO modelo CAMIÓN TOLVA AD410 de potencia 420 HP y tracción 8x4. Se considera este camión transportador de escombros, el cual tiene una capacidad de transporte de  $20 m^3$  por viaje. Además, se considera una velocidad estándar de limpieza de  $250[m^3/h]$  (Feng and Wang, 2003) y una velocidad de desplazamiento de  $20000[m/h]$ . Finalmente, los vehículos cuentan con una capacidad de  $4m^3$  aproximadamente (CAT-LATIN, 2020).

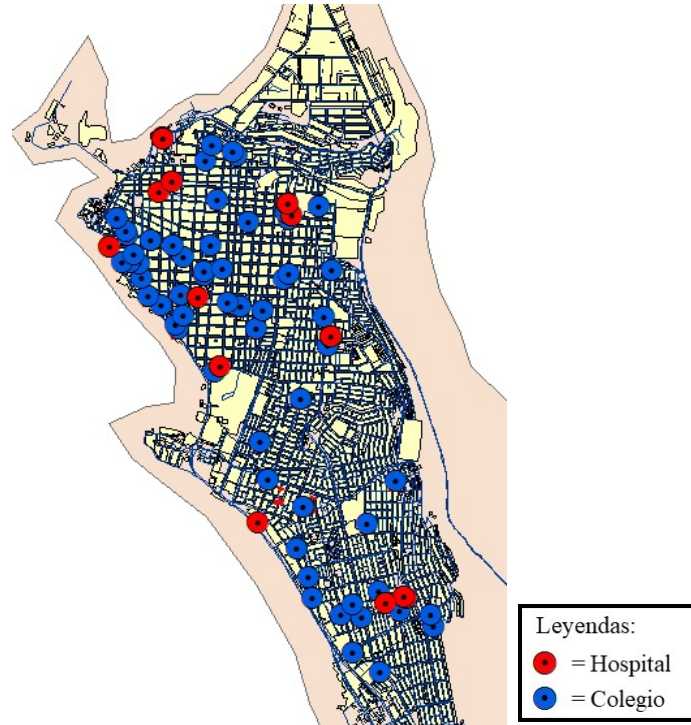


Figura 3: Centros de Salud y Establecimientos de Educación en Iquique. Fuente: Elaboración Propia en base a datos del CENSO (2017)

#### 8.2.4. Software

Los modelos de optimización y simulación fueron ejecutados en AMPL Gurobi 8.1.0 y HAZUS 2.1, respectivamente. Además las instancias fueron desarrolladas por un computador con procesador Intel(R) Core (TM) i7-6700HQ @ 2.60 Hz (8 CPUs), con 12 GB en memoria RAM.

## 9. RESULTADOS

### 9.1. Confección de los escenarios

#### 9.1.1. Extracto de la zona

Debido a que la metodología es un modelo matemático NP-Hard, se trabajó con un extracto de la zona de estudio, la cual corresponde a la zona norte de la ciudad. Se elige esta área debido a la existencia de los edificios con mayor prioridad de ser limpiados en los primeros días de trabajo, como Hospitales y colegios, siendo estos considerados con un factor de preferencia de limpieza en el modelamiento propuesto. La visualización del extracto se muestra en la Figura 4 y el detalle de la zona, junto con la cantidad de escombros por manzana censal, está en la Figura 5. El área está conformada por 109 manzanas, 2 centros de salud, 5 establecimientos educacionales y un depósito.

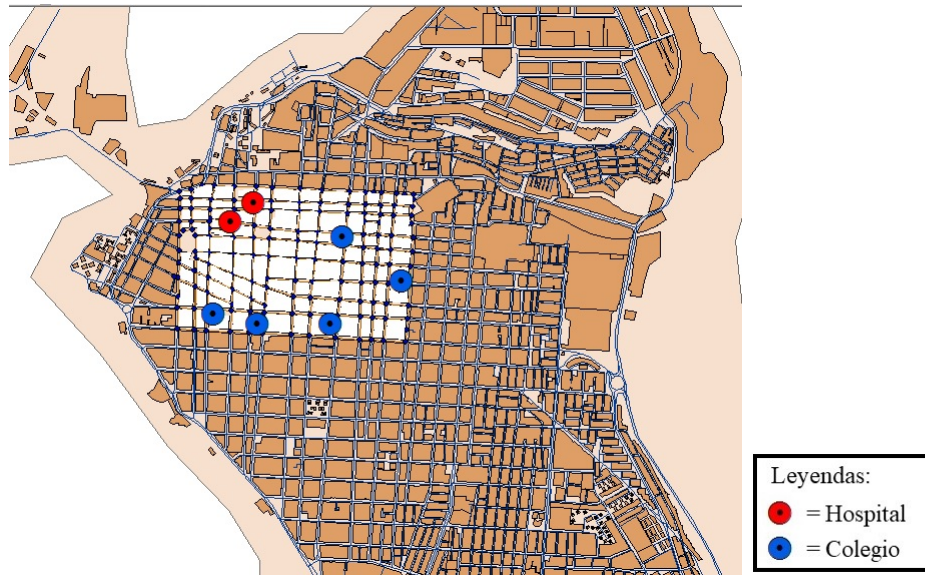


Figura 4: Extracto de la zona. Fuente: Elaboración propia.

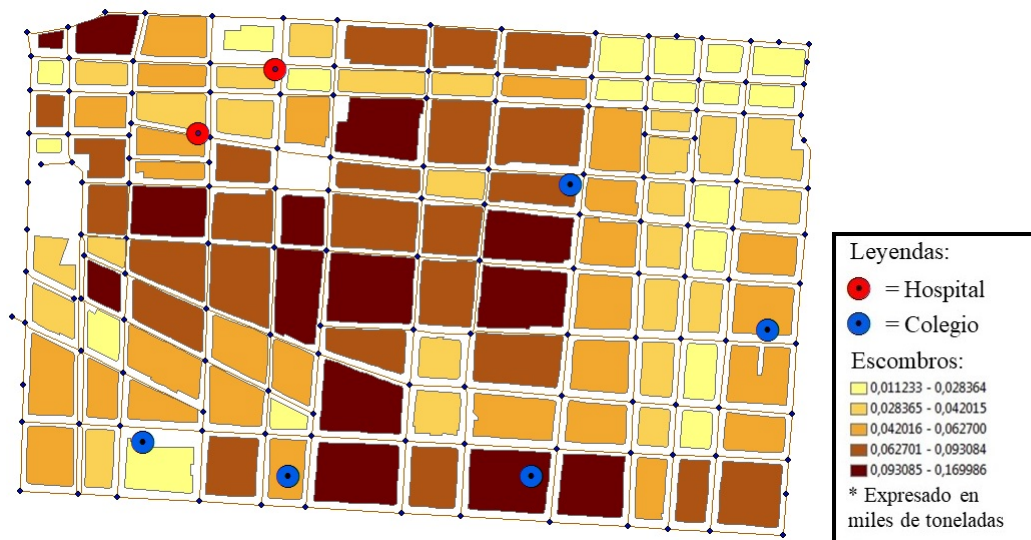


Figura 5: Detalle del extracto de la zona con cantidad de escombros. Fuente: Elaboración propia.

### 9.1.2. Escenarios propuestos

La ejecución del modelo se proponen siete escenarios, los cuales se detallan a continuación:

- Escenario 0: Escenario Base.
- Escenario 1: Sin considerar el ponderador de prioridad.
- Escenario 2: 5 camiones operativos.
- Escenario 3: 15 camiones operativos.
- Escenario 4: Aumento del 10 % volumen de escombros.

- Escenario 5: Aumento del 20 % volumen de escombros.
- Escenario 6: Aumento del 30 % volumen de escombros.

El Escenario 0 se analiza la situación actual, considerando una flota homogénea de 10 vehículos, 7 vueltas y un horizonte de planificación de 5 días. En el escenario 1 se analizan los resultados sin el factor de prioridad, para comparar su impacto. En los escenarios 2 y 3 se disminuye y aumenta el nivel en la flota, respectivamente. Por último, en los escenarios 4, 5 y 6 se analiza la variación aumentando los niveles en los volúmenes de escombros en 10 %, 20 % y 30 %, respectivamente.

## 10. Análisis de la situación inicial (Escenario 0)

En la situación actual, al considerar un terremoto de 8.0 Mw de magnitud, se obtienen los resultados de la Tabla 3

Escenario	Función objetivo	Tiempo CPU (seg)	GAP (%)	Edificios Limpios	Cant. prom. de escombros recolectados por día $M^3$	No. prom. de días para limpiar un edificio	Cant. de días promedio de limpieza		
							Hospitales	Colegios	Otros
0	103	18000	1.33	108	1,254.97	2.26	1	1	1.67

Cuadro 3: Detalle de modelamiento Escenario 0, Fuente: Elaboración propia.

El modelo matemático se ejecutó por 5 horas, obteniendo un GAP del 1,33 %. En esta instancia, se limpiaron 108 edificios, la cantidad de escombros recolectada es  $3.761,23 m^3$ . En la Figura 6 se presenta el gráfico de la cantidad de edificios limpiados por día, donde se aprecia que, a medida que pasan los días, se limpia una menor cantidad de edificios. Esto se justifica debido a que se le da prioridad al primer día de limpiar la mayor cantidad de nodos. Además se puede destacar que el modelo propuesto sólo utilizó 3 días de los 5 propuestos en el horizonte de planificación.

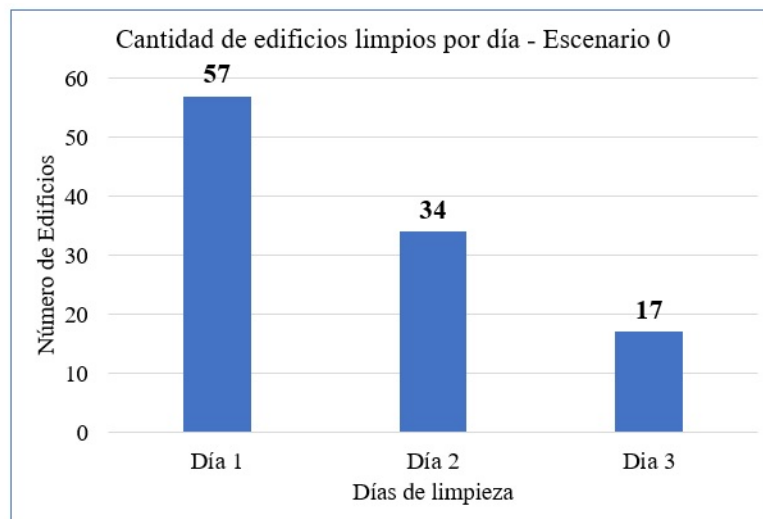


Figura 6: Detalle de edificios limpios (Escenario 0), Fuente: Elaboración propia

La distribución espacial de limpieza de los edificios se ve representada en la Figura 7, donde se visualiza cómo se van limpiando los edificios a medida que pasan



los días. Aquí se observa la representación del factor de preferencia, limpiando una mayor cantidad de edificios el día 1 que al término de los días de limpieza.

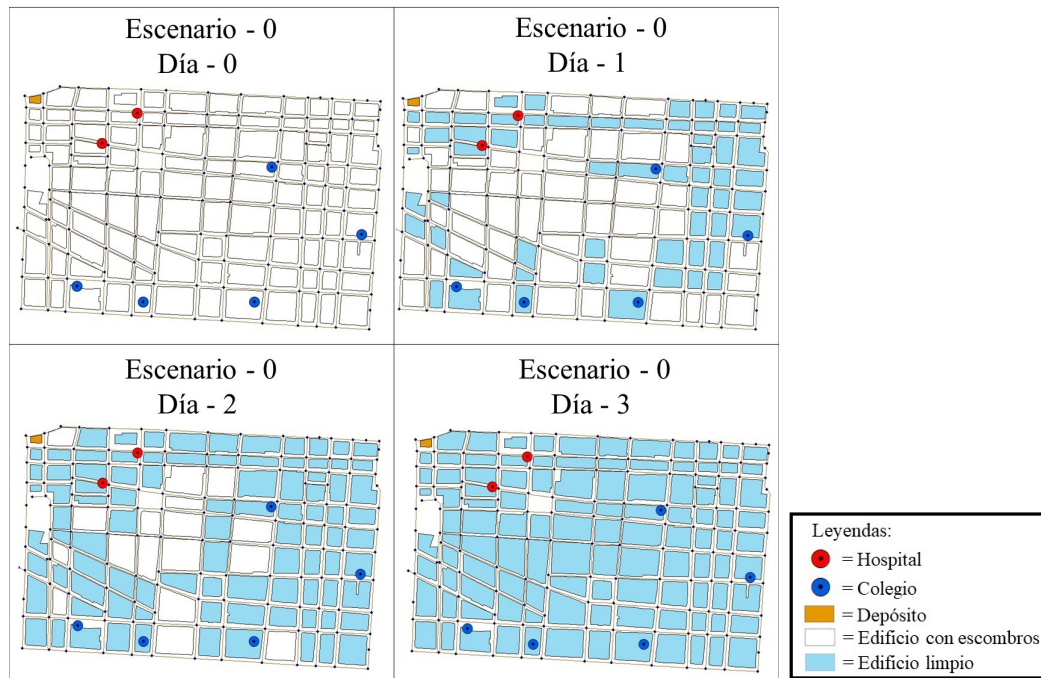


Figura 7: Visualización de edificios limpios (Escenario 0), Fuente: Elaboración propia

En resumen, del escenario 0 se puede concluir que el modelo sí realiza una priorización exitosa al considerar los ponderadores de tipo de edificio y día, puesto que en la Figura 6 se muestra cómo se agrupa la mayor cantidad de edificios en los primeros días y en la Figura 7 que los primeros en limpiarse son los de mayor prioridad y luego los que presentan mayores escombros. Asimismo, mediante los indicadores se vuelve a verificar el coeficiente de prioridad limpiando los hospitales y colegios en el primer día de trabajo.

## 11. Análisis de la metodología sin factor de preferencia (Escenario 1)

En este análisis se detalla cómo se comporta el modelo sin los factores de preferencia. En la Tabla 4 se muestran los resultados.

Escenario	Función objetivo	Tiempo CPU (seg)	GAP (%)	Edificios Limpios	Cant. prom. de escombros recolectados por día $m^3$	No. prom. de días para limpiar un edificio	Cant. de días promedio de limpieza		
							Hospitales	Colegios	Otros
0	103	18000	1.33	108	1,254.97	2.26	1	1	1.67
1	117	40	0.00	108	752.25	2.26	2.53	3	2.5

Cuadro 4: Detalle comparación Escenarios 0 y 1, Fuente: Elaboración propia.

El modelo matemático se ejecutó por 40 segundos, obteniendo un GAP del 0,00 % debido que al quitar el factor de preferencia se simplifica ejecutar el modelamiento. En esta instancia, al igual que en la anterior se limpiaron 108 edificios y la cantidad de escombros recolectada es 3.761,23  $m^3$ .



En la Figura 8 se presenta el gráfico de la cantidad de edificios limpiados por día, donde se aprecia que, al eliminar el factor de preferencia se realiza una limpieza constante, distinto lo que hace el escenario 0. Además se puede confirmar la limpieza contante a causa de la utilización de los 5 días del horizonte de planificación. Asimismo mediante los indicadores, se verifica una menor cantidad de escombros recolectados por día, destacando un rendimiento uniforme durante el horizonte de planificación.

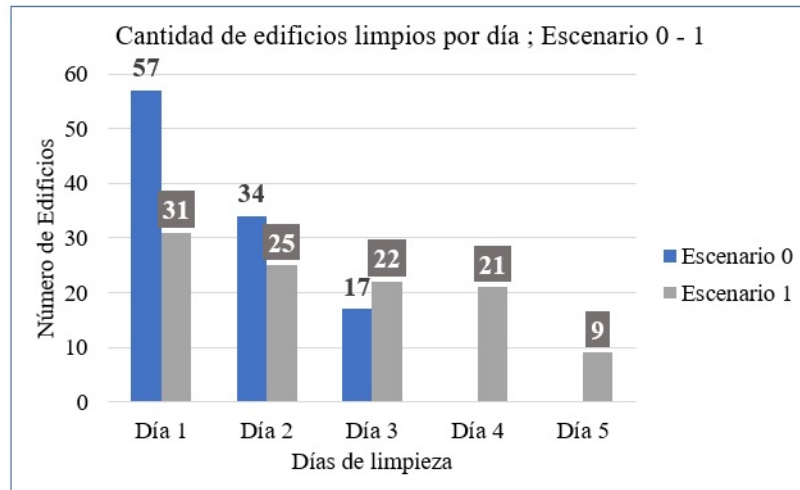


Figura 8: Detalle de edificios limpios (Escenarios 0 y 1), Fuente: Elaboración propia

La distribución espacial de limpieza de los edificios se ve representada en la Figura 9, donde se visualiza cómo se van limpiando los edificios a medida que pasan los días. Aquí se observa la comparación de los primeros 3 días del horizonte de planificación demostrando la limpieza constante versus el comportamiento de la limpieza con el factor de preferencia de limpieza hacia los primeros días de trabajo.

En resumen, del escenario 1 se puede concluir que el modelo realiza un rendimiento constante en cuanto a limpieza puesto que en la Figura 8 se muestra una comparación del horizonte de planificación, representando un número de limpieza constante en el escenario 1 y la priorización de la limpieza hacia los primeros días en el escenario 0. Además en la Figura 9 se realiza la comparación respectiva de los primeros 3 días del horizonte de planificación, donde representa la falencia en la limpieza del escenario 1. Asimismo, mediante los indicadores se puede comprobar que la variación afecta directamente a la prioridad de limpiar Hospitales y colegios, aumentando considerablemente el tiempo en habilitar los edificios mencionados.

## 12. Análisis de variación en el recurso vehicular (Escenarios 2 y 3)

En este análisis se detalla cómo se comporta el modelo variando la cantidad de vehículos operativos. En la Tabla 5 se muestran los resultados.

Ambos modelos matemáticos de los escenarios 2 y 3 se ejecutaron por 5 horas, obteniendo un GAP de 7,21 % y 1,48 % respectivamente. En estas instancias, se limpiaron 99 y 107 edificios y la cantidad de escombros recolectada es de 3.291,71  $m^3$  y 3.726,81  $m^3$  respectivamente. En la Figura 10 se presenta el gráfico de la cantidad

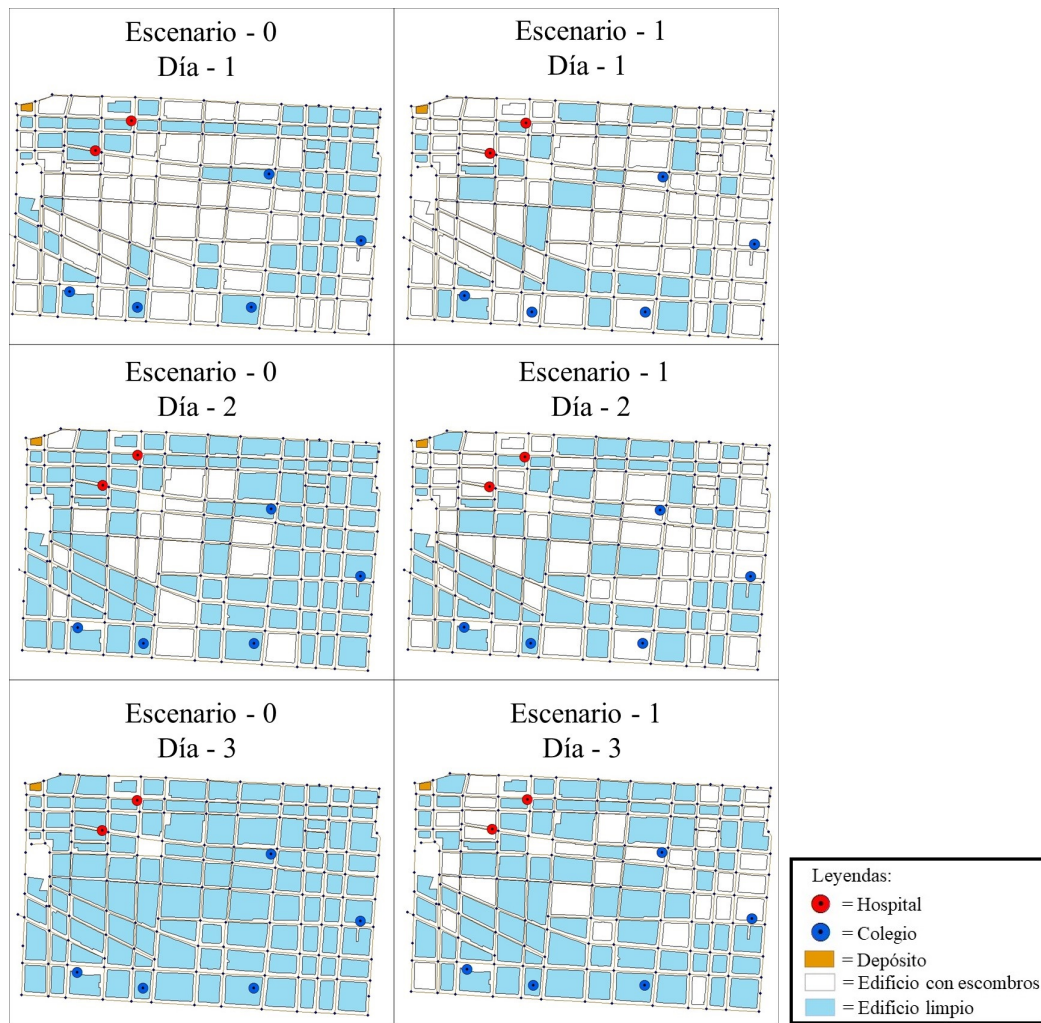


Figura 9: Visualización de edificios limpios (Escenarios 0 y 1), Fuente: Elaboración propia

Escenario	Función objetivo	Tiempo CPU (seg)	GAP (%)	Edificios Limpios	Cant. prom. de escombros recolectados por día m <sup>3</sup> (3)	No. prom. de días para limpiar un edificio	Cant. de días promedio de limpieza		
							Hospitales	Colegios	Otros
0	103	18000	1.33	108	1,254.97	2.26	1	1	1.67
2	78	18000	7.21	99	658.34	1.99	1	1.4	2.57
3	109	18000	1.48	107	1,863.41	2.24	1	1	1.32

Cuadro 5: Detalle comparación Escenarios 0, 2 y 3, Fuente: Elaboración propia.

de edificios limpiados por día, donde se aprecia que, existe dificultad de trabajar con 5 camiones en el escenario 2 y la facilidad del escenario 3 en cumplir el objetivo de realizar la limpieza global en solo 2 días, debido que cuenta con 15 camiones operativos. Además se puede destacar que los modelos propuestos utilizaron de excelente manera los recursos proporcionados, limpiando los edificios de mayor prioridad en el primer día del horizonte de planificación.

La distribución espacial de limpieza de los edificios se ve representada en la Figura 11, donde se visualiza cómo se van limpiando los edificios a medida que pasan los 2 primeros días de trabajo. Aquí se observa la comparación de los edificios completamente limpios durante el horizonte de planificación de los 3 escenarios, representando la diferencia en cuanto a proporción de recursos utilizados, presentando un deficit de

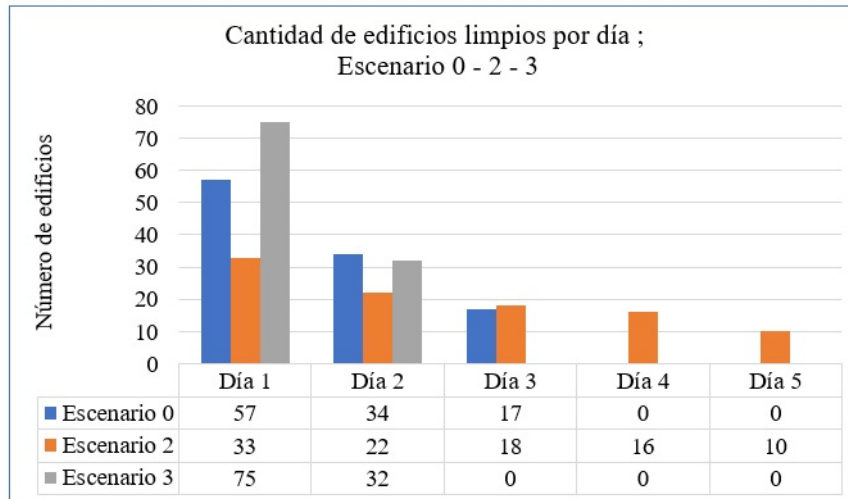


Figura 10: Detalle de edificios limpios (Escenarios 0, 2 y 3), Fuente: Elaboración propia

cantidad de edificios limpios en el escenario 2 y una ventaja en cuanto a la limpieza de edificios en el escenario 3 ambos siendo comparados con el escenario 0.

En resumen, de los escenarios 2 y 3 se puede concluir que los modelos si realizan una priorización exitosa de los ponderadores de tipo de edificio y día, puesto que en la Figura 10 se muestra una comparación del horizonte de planificación, representando la priorización de limpieza en el primer día del horizonte de planificación. Además en la Figura 11 se realiza la comparación respectiva de los primeros 2 días del horizonte de planificación, donde representa la importancia de contar con los recursos suficientes para realizar los trabajos respectivos de limpieza. Asimismo, mediante los indicadores se puede comprobar que la variación no afecta la priorización de limpieza de los edificios tales como Hospitales y colegios.

### 13. Análisis de variación en la cantidad de escombros (Escenarios 4, 5 y 6)

En este análisis se detalla cómo se comporta el modelo aumentando la cantidad de volumen de escombros de cada edificio. En la Tabla 6 se muestran los resultados.

Escenario	Función objetivo	Tiempo CPU (seg)	GAP (%)	Edificios Limpios	Cant. prom. de escombros recolectados por día $m^3$ (3)	No. prom. de días para limpiar un edificio	Cant. de días promedio de limpieza		
							Hospitales	Colegios	Otros
0	103	18000	1.33	108	1,254.97	2.26	1	1	1.67
4	99	18.000	3.83	104	1.204,30	2.29	1	1.2	1.69
5	98	18.000	2.65	106	738.44	2.59	1	1.2	1.83
6	96	18.000	2.34	106	926.04	2.75	1	1.2	1.92

Cuadro 6: Detalle comparación Escenarios 0, 4, 5 y 6 Fuente: Elaboración propia.

Los 3 modelos matemáticos de los escenarios 4, 5 y 6 se ejecutaron por 5 horas, obteniendo un GAP de 3,83 %, 2,65 % y 2,34 % respectivamente. En estas instancias, se limpiaron 104 edificios en el escenario 4 y 106 edificios en los escenarios 5 y 6. La cantidad de escombros recolectada es de  $3,612.89 m^3$ ,  $3.692,21 m^3$  y  $3.704,18 m^3$  respectivamente. En la Figura 12 se presenta el gráfico de la cantidad de edificios

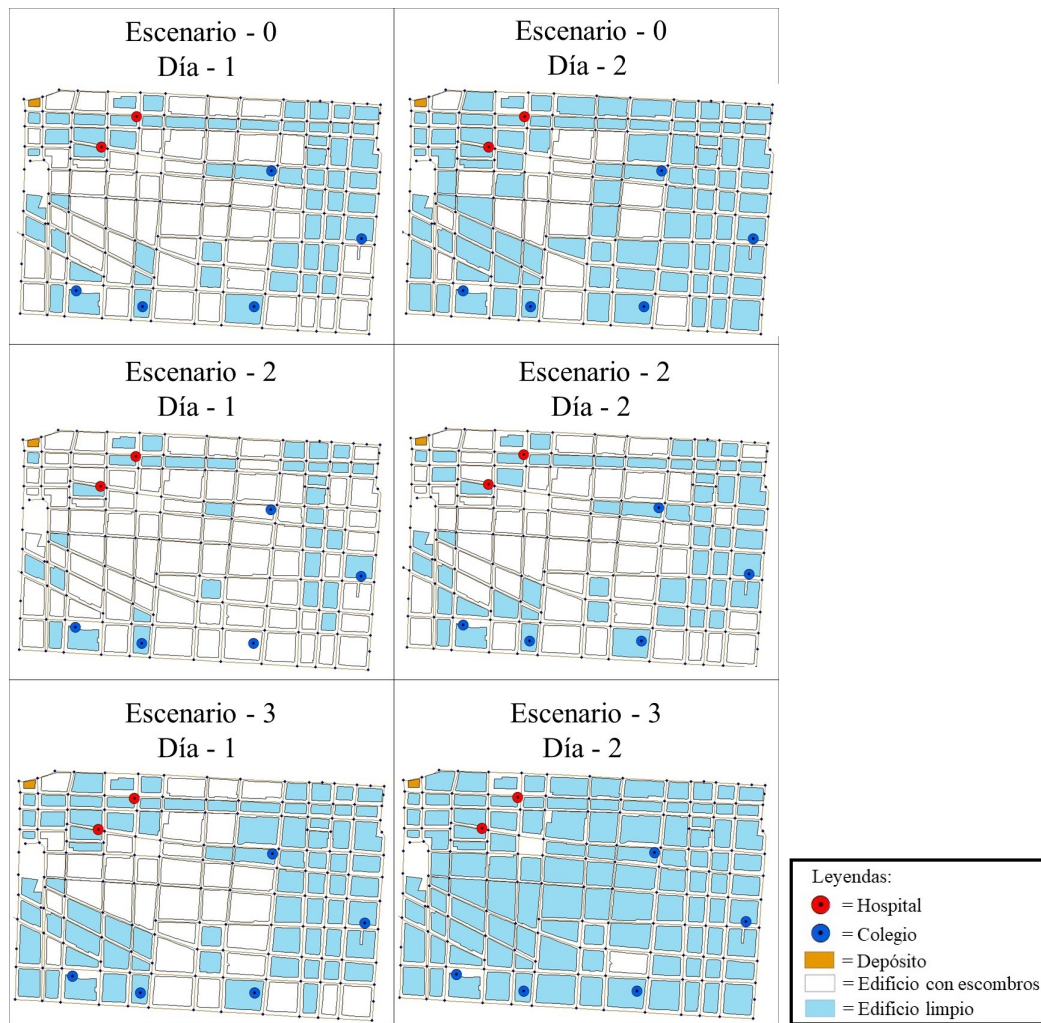


Figura 11: Visualización de edificios limpios (Escenarios 0, 2 y 3), Fuente: Elaboración propia

limpiados por día, donde se aprecia que, al aumentar la cantidad de volumen de escombros por edificio, se presenta una menor cantidad de edificios limpios en comparación al escenario 0 y a la vez se puede visualizar la priorización correcta, de limpieza de los edificios hacia los primeros días del horizonte de planificación siendo comprobado por la cantidad de edificios completamente limpios en los primeros 3 días de trabajo.

La distribución espacial de limpieza de los edificios se ve representada en la Figura 13, donde se visualiza cómo se van limpiando los edificios durante el primer y tercer día de trabajo. Aquí se observa la comparación de los edificios completamente limpios durante el horizonte planificación de los 4 escenarios, representando como aumenta la dificultad al incrementar el volumen de escombros por edificio, presentando una visualización del decrecimiento de edificios completamente limpio en cada escenario respectivo.



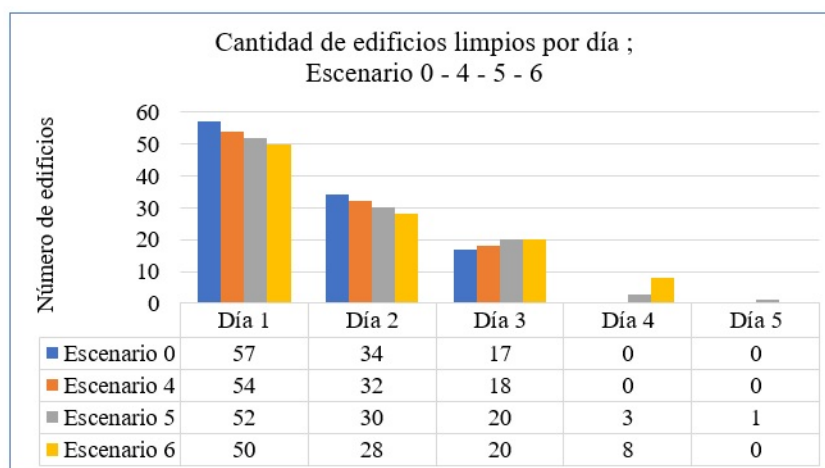


Figura 12: Detalle de edificios limpios (Escenarios 0, 4, 5 y 6), Fuente: Elaboración propia

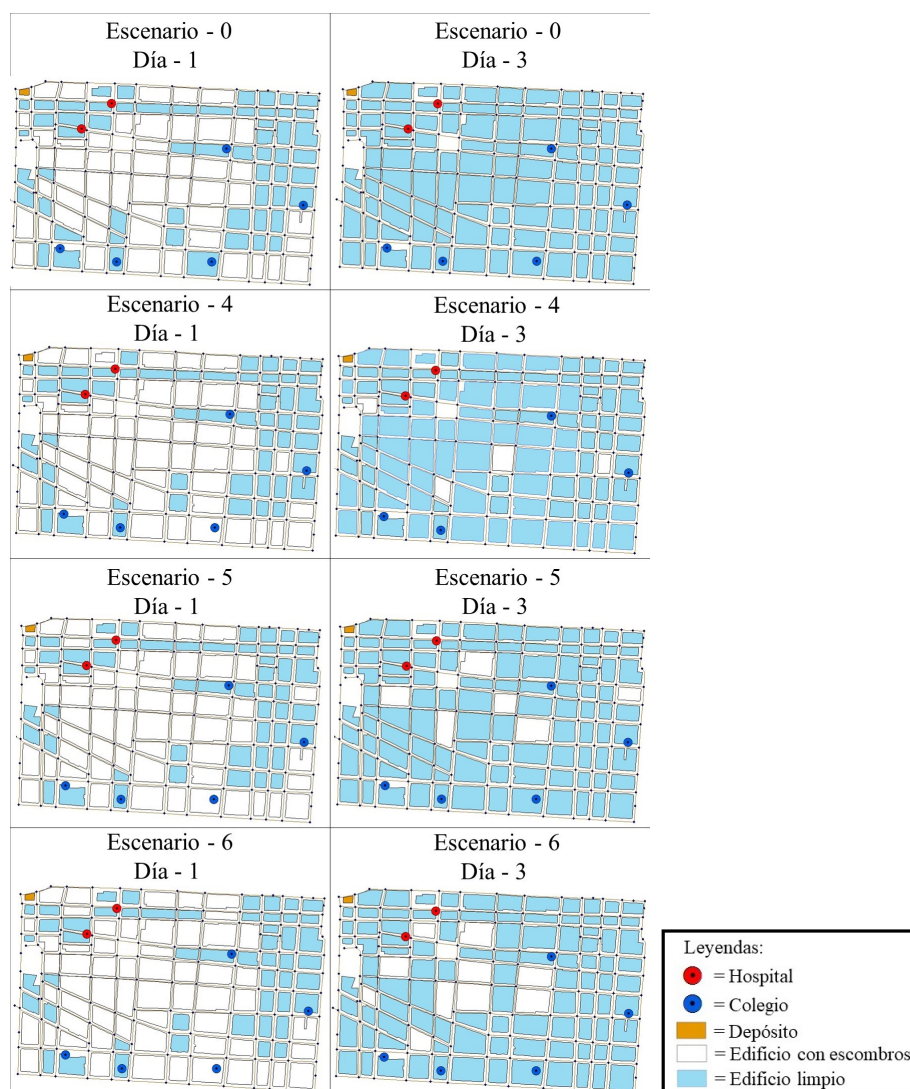


Figura 13: Visualización de edificios limpios (Escenarios 0, 2 y 3), Fuente: Elaboración propia

En resumen, de los escenarios 4, 5 y 6 se puede concluir que los modelos si realizan una priorización exitosa de los ponderadores de tipo de edificio y día, puesto que en la Figura 12 se muestra una comparación del horizonte de planificación, representando la priorización de limpieza en el primer día del horizonte de planificación. Además en la Figura 13 se realiza la comparación respectiva de los primer y tercer día del horizonte de planificación, donde representa dificultad de realizar la limpieza al aumentar el volumen de escombros, disminuyendo considerablemente el número de edificios completamente limpio. Además mediante los indicadores, se verifica que el modelo responde correctamente a la priorización de limpieza de los edificios en el primer día de trabajo.

## 14. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

En esta investigación se desarrolló una metodología que permite tomar decisiones tácticas y operativas, puesto que es capaz de planificar la asignación de recursos claves posterior de ocurrir un desastre natural y dentro de un horizonte de planificación. Además, el modelo realiza consideraciones de elementos como capacidad de carga de camión, volumen de escombros por edificio, distribución espacial de los edificios con prioridad de estar completamente limpios. Asimismo, considera el objetivo de realizar la preferencia de limpieza de los edificios hacia los primeros días del horizonte de planificación, además de priorizar los edificios que más ayudan a la población en el caso de un desastre, los cuales son los hospitales y centros de educación.

Posteriormente, se comprueba el modelo propuesto en un escenario base, en una instancia menor a la totalidad de la ciudad propuesta en el caso de estudio, con características experimentales tales como número de camiones, número de vueltas y número de días. Consecutivamente, se realiza diversos análisis de variación del escenario base, presentando variaciones en quitar el factor de preferencia, variar la cantidad de camiones operativos y aumentar la cantidad de volumen de escombros.

Los resultados de cada escenario propuesto fueron comparados con el escenario base, para verificar cómo se comporta el modelo y comprobar que la cantidad de edificios completamente limpios no afecte en el objetivo general, limpiando la mayor cantidad de edificios hacia los primeros días del horizonte de planificación. Los resultados en general se consideran favorables para la modelación, a causa de que la mayoría de los modelos limpia favorablemente los edificios con priorización, es decir hospitales y colegios.

Si bien el problema se puede resolver computacionalmente en un tiempo razonable, cuando se tiene una instancia mayor presenta prolongados tiempos de computo, por lo cual en un trabajo a futuro se podría presentar una heurística que permita desarrollar resultados en menores tiempos de modelación. A la vez se debería considerar incluir el rendimiento de bulldozer para obtener tiempos en la operación completa y finalmente completando el equipo de limpieza con la inclusión de una retroexcavadora para remover los materiales distintos de madera y ladrillos. También para obtener un mejor provecho de la remoción de escombros en general, se podría considerar algún tipo de zonas de almacenamiento temporal, ya sean plazas y/o terrenos sin habitantes ni construcciones, para poder recolectar de manera provisional escombros, cuyo beneficio se reflejaría en el tiempo de tránsito de los camiones recolectores. En este caso no se mencionan aspectos de reciclajes, por lo

cual se consideraría una desventaja al largo plazo, es importante incluir los equipos que podrían realizar reciclaje para reutilizar los materiales de construcción. Asimismo, se deberían considerar múltiples depósitos para gestionar una mayor capacidad de escombros, en el mejor caso agregar un parámetro de generación de depósitos de ser necesario. Finalmente, se debería incorporar el traslado de escombros entre nodos para agilizar la habilitación de los edificios con mayor priorización tales como hospitales, colegios y albergues.

## 15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Referencias

- Akbari, V. and Salman, F. S. (2017). Multi-vehicle synchronized arc routing problem to restore post-disaster network connectivity. *European Journal of Operational Research*, 257(2):625–640.
- Aksu, D. T. and Ozdamar, L. (2014). A mathematical model for post-disaster road restoration : Enabling accessibility and evacuation. *Transportation Research Part E*, 61:56–67.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2017). Reporte estadísticos comunales 2017. <http://reportescomunales.bcn.cl/2017/index.php/Iquique/Poblaci%C3%B3n> [Accessed: 01/01/2020].
- Boonmee, C., Arimura, M., and Asada, T. (2018). Location and allocation optimization for integrated decisions on post-disaster waste supply chain management: On-site and off-site separation for recyclable materials. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31:902–917.
- Brooks, J. D. and Mendonc, D. (2013). Dynamic Allocation of Entities in Closed Queueing Networks : An Application to Debris Removal. pages 504–510.
- CAT-LATIN (2020). Cargadores de cadenas 973k. [https://www.cat.com/es\\_MX/products/new/equipment/track-loaders/track-loaders/1000033102.html](https://www.cat.com/es_MX/products/new/equipment/track-loaders/track-loaders/1000033102.html) [Accessed: 01/01/2020].
- CNS (2020). Sismos. <http://sismologia.cl/> [Accessed: 01/01/2020].
- Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency (2020). Hazus®-mh 2.1. [https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1820-25045-1179/hzmhs2\\_1\\_eq\\_um.pdf](https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1820-25045-1179/hzmhs2_1_eq_um.pdf) [Accessed: 01/01/2020].
- EM-DAT (2019). Data-base. [https://www.emdat.be/emdat\\_db/](https://www.emdat.be/emdat_db/), [Accessed: 01/01/2019].
- Feng, C.-M. and Wang, T.-c. (2003). Highway Emergency Rehabilitation Scheduling in Post-Earthquake 72 Hours. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5:3276–3285.
- GUC (2019). Sismos. <http://www.csn.uchile.cl/sismologia/grandes-terremotos-en-chile/> [Accessed: 01/01/2019].
- Karlaftis, M. G., Kepaptsoglou, K. L., and Lambropoulos, S. (2007). Fund Allocation for Transportation Network Recovery Following Natural Disasters. *Journal of Urban Planning and Development*, 133(1):82–89.
- Kasaei, M. and Salman, F. S. (2016). Arc routing problems to restore connectivity of a road network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 95:177–206.



- Kumar, A. and Kushwaha, G. (2018). Humanitarian Logistics. *Journal of Information Technology Research*.
- Liberatore, F., Ortuño, M. T., Tirado, G., Vitoriano, B., and Scaparra, M. P. (2014). A hierarchical compromise model for the joint optimization of recovery operations and distribution of emergency goods in Humanitarian Logistics. *Computers and Operations Research*, 42:3–13.
- Lindell, M. K., Prater, C., and Perry, R. W. (2006). *Wiley pathways introduction to emergency management*. John Wiley & Sons.
- Maya Duque, P. A., Dolinskaya, I. S., and Sörensen, K. (2016). Network repair crew scheduling and routing for emergency relief distribution problem. *European Journal of Operational Research*, 248(1):272–285.
- Overstreet, R., Hall, D., Hanna, J., and Rainer, J. (2013). Research in humanitarian logistics. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 1.
- Ransikarbum, K. and Mason, S. J. (2016). Multiple-objective analysis of integrated relief supply and network restoration in humanitarian logistics operations. *International Journal of Production Research*, 54(1):49–68.
- Van Wassenhove, L. N. (2006). Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear. *Journal of the Operational research Society*, 57(5):475–489.
- Wang, Z., Hu, H., Guo, M., and Gong, J. (2018). Optimization of Temporary Debris Management Site Selection and Site Service Regions for Enhancing Postdisaster Debris Removal Operations. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 34(3):230–247.

## 16. ANEXOS

### 16.1. Detalle de edificios

Código	Nombre	Descripción
H1	PRAIS SS IQUIQUE	Hospital
H2	H. DR ERNESTO TORRES GALDAMEZ	Hospital
H3	CESFAM CIRUJANO AGUIRRE	Hospital
H4	CESFAM CIRUJANO VIDELA	Hospital
H5	CESFAM SUR DE IQUIQUE	Hospital
H6	SAPU CIRUJANO AGUIRRE	Hospital
H7	SAPU CIRUJANO VIDELA	Hospital
H8	SAPU SUR DE IQUIQUE	Hospital
H9	POLI TRABAJADOR ACHS IQUIQUE	Hospital
H10	C.A. DE INSTITUTO DE SEGURIDAD	Hospital
H11	POLI. CARABINEROS DE IQUIQUE	Hospital
H12	CLINICA DENTAL MOVIL SIMPLE	Hospital
H13	C. S. DE MUTUAL CCHC IQUIQUE	Hospital
H14	CLINICA TARAPACA	Hospital
H15	CLINICA IQUIQUE	Hospital
H16	CENTRO CLINICO MILITAR IQUIQUE	Hospital
C1	L. ALMIRANTE CARLOS CONDELL	Colegio
C2	COL. LIRIMA	Colegio
C3	ESC. DE LENGUAJE NUEVO INTI	Colegio
C4	COL. SAMCA ARUMANTI	Colegio
C5	COL. ANTAMARA	Colegio
C6	COL. LATINOAMERICANO LAS PARINAS	Colegio
C7	COL. HISPANO BRITANICO IQUIQUE	Colegio
C8	COL. MAHATMA GANDHI	Colegio
C9	L. COL. DEPORTIVO	Colegio
C10	EAGLES COLLEGE	Colegio
C11	COL. SUEÑO DEL MAÑANA	Colegio
C12	COL. NIMARA	Colegio
C13	ESC. BASICA CHIPANA	Colegio
C14	COL. DE LA COSTA	Colegio
C15	COL. GOLDEN NORTH	Colegio
C16	ACADEMIA NERUDIANA	Colegio
C17	COL. HUMBERSTONE	Colegio
C18	COL. MARIA REINA	Colegio
C19	ESC. PR.L CASTRO RAMOS	Colegio
C20	COL. REPUBLICA DE ITALIA	Colegio
C21	L. LUIS CRUZ MARTINEZ	Colegio
C22	COL. ESPANA	Colegio
C23	COL. LITTLE STARS	Colegio
C24	ESC. THILDA PORTILLO OLIVARES	Colegio
C25	COL. NIMARA	Colegio

C26	COL. REPUBLICA DE CROACIA	Colegio
C27	ESC. GABRIELA MISTRAL	Colegio
C28	L. JOSE GUTIERREZ DE LA FUENTE	Colegio
C29	COL. ADVENTISTA DE IQUIQUE	Colegio
C30	ESC. DOMINGO SANTA MARIA	Colegio
C31	L. PARTICULAR MIXTO ESCASCE	Colegio
C32	L. PR. ANIBAL PINTO GARMENDIA	Colegio
C33	COL. IQUIQUE YOUNG SCHOOL	Colegio
C34	COL. SALESIANO DE IQUIQUE	Colegio
C35	COL. NORTH COLLEGE	Colegio
C36	COL. INGLES	Colegio
C37	L. MARIA AUXILIADORA	Colegio
C38	COL. HISPANO ITALIANO	Colegio
C39	L. SUPERIOR GABRIELA MISTRAL	Colegio
C40	ESC. P.JARAQUEMADA ALQUIZAR	Colegio
C41	ESC. ARTISTICA VIOLETA PARRA	Colegio
C42	COL. ACADEMIA TARAPACA ORELLA	Colegio
C43	COL. HUANTAJAYA	Colegio
C44	ESC. PLACIDO VILLAROEL	Colegio
C45	L. LIBERTADOR BERNARDO OHIGGINS	Colegio
C46	I.COMEX BALDOMERO WOLNITZKY	Colegio
C47	L.COMEX MIRADA DE COLORES	Colegio
C48	COL. BULNES	Colegio
C49	COL. NUSTA KORI	Colegio
C50	ESC. BASICA CORONA SCHOOL	Colegio
C51	COL. ACADEMIA TARAPACA ORELLA	Colegio
C52	COL. UNIVERSITARIO UNAP	Colegio
C53	L. ELENA DUVAUCHELLE CABEZON	Colegio
C54	ESC. JAVIERA CARRERA VERDUGO	Colegio
C55	COL. IRQUILLARIY	Colegio
C56	ESC. BASICA FRANCISCO FORGIONE	Colegio
C57	L. ATENEA	Colegio
C58	COL. LITTLE COLLEGE	Colegio
C59	ESC. EDUARDO LLANOS	Colegio
C60	ESC. CENTENARIO	Colegio
C61	COL. SAINT MARGARET ROSE GARDEN	Colegio
C62	SEMILLA DE CRISTO L. ARTURO	Colegio
C63	LIC. COMEX Y TECNICO ARTURO PRAT	Colegio
C64	COL. DIOCESANO OBISPO LABBE	Colegio
C65	ESC. ALMIRANTE PATRICIO LYNCH	Colegio

Cuadro 7: Detalle de edificios relevantes en la zona ; Fuente: (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2017)