

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

Samantha Reid Calderón

MSc., Docente

Departamento de Ciencias de la Ingeniería

Universidad Andrés Bello

Santiago, Chile

Email: s.reid.cal@gmail.com

Isaac Montero Jara

Estudiante de Ingeniería

Facultad de Ingeniería

Universidad Andrés Bello

Santiago, Chile

Email: i.monterojara@uandresbello.edu

Abstract—Se aborda el problema de recolección de escombros de edificios posterior de un desastre natural. Se presenta un modelo de programación de tareas que entrega la planificación de los equipos de limpieza de escombros, maximizando el número de edificios limpiados, tales como los hospitales y colegios. El caso de estudio se presenta en la ciudad de Iquique, Chile. Los resultados se presentan el desarrollo del modelo propuesto, integrando un factor de preferencia en la limpieza de edificios hacia los primeros días del horizonte de planificación, posteriormente se realizan variaciones del modelamiento para verificar su comportamiento

Index Terms—Recolección de escombros, Logística humanitaria, Fase de recuperación, Ruteo vehicular.

I. INTRODUCCIÓN

Los desastres naturales se definen como “las interrupciones que afectan físicamente a un sistema en su conjunto y amenaza sus prioridades y objetivos” (Van Wassenhove, 2006). Se han registrado 3.155 eventos naturales a nivel mundial, produciendo pérdidas humanas, infraestructura y económicas (EM-DAT, 2019).

Estos presentan un ciclo de vida de cuatro etapas: mitigación, preparación, respuesta y recuperación. En las primeras dos etapas se ven todas las actividades relacionadas a la preparación ante un desastre (localización de alarmas o albergues, entre otros). En la fase de respuesta se ven las actividades relacionadas con las primeras 72 horas producido una eventualidad, tales como distribución de suministros o recolección de víctimas. En la última fase se organizan actividades de apoyo para devolver la infraestructura e actividades rutinarias a una comunidad (Feng and Wang, 2003). Esta fase comienza cuando la emergencia se ha estabilizado y ya no existe un peligro latente para la población, finalizando con la recuperación total de la comunidad (Lindell et al., 2006). Se realizan actividades de corto y largo plazo para eliminar todo rastro físico, dándole importancia al reciclaje, almacenamiento y reducción de desechos. Una de estas actividades es la recolección de escombros para mantener las vías de acceso a hospitales, albergues y otros edificios importantes.

Se propone un modelo lineal de asignación de vehículos en un horizonte de tiempo determinado, maximizando la cantidad de edificios limpiados. El caso de estudio tiene lugar en la

ciudad de Iquique, Chile, debido a la alta cantidad de desastres registrados en la zona (CNS, 2020).

La metodología considera priorizar los edificios según su importancia para la comunidad, contemplando una flota heterogénea de vehículos recolectores. Con ello se diseña un modelo lineal programado en AMPL Gurobi, con tiempos de cómputo de 18,000 segundos. En los resultados se muestra el comportamiento del modelo, integrando un factor de prioridad de limpieza hacia los primeros días del horizonte de planificación.

El resto del documento se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta la revisión de la literatura, donde se dan a conocer trabajos similares. En la sección 3 se presenta la metodología. En la sección 4 se presenta el caso de estudio con los datos utilizados. En la sección 5 se presentan los resultados y sus análisis. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones del trabajo y sus futuras investigaciones.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

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 tanto, se deben encontrar soluciones que permitan optimizar el uso de los recursos destinados a actividades de limpieza y recolección.

Existen 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.

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.

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.

El modelo presentado tiene como objetivo maximizar la preferencia de limpieza de los edificios hacia los primeros días de trabajo, brindando prioridad a los edificios a limpiar por día, agregando un ponderador de prioridad hacia los primeros días de jornada laboral, declarando como edificios a hospitales y colegios de la ciudad a estudiar.

El resumen, ésta tesis contribuye a la literatura en la remoción de escombros en: (a) agregar un ponderador al modelo, el cual beneficia a la limpieza de cada edificio hacia los primeros días de jornada laboral, asumiendo que durante el transcurso del tiempo las zonas con mayor prioridad serán limpiadas; (b) se efectúa el modelo con datos reales de la zona y simulaciones del software HAZUS.

III. METODOLOGÍA

A. Descripción del problema

Se cuenta con un grafo $G(N, A)$, donde N son los nodos de la red y A los arcos. Además, el conjunto de nodo está conformado por un conjunto de edificios E y un depósito O . Por otro lado, se cuenta con una flota homogénea de K vehículos que prestan un servicio de recolección de escombros, los cuales realizan V vueltas dentro de D días en un horizonte de planificación.

Cada edificio cuenta con un ponderador de preferencia α_e , el cual es mayor según la importancia que otorga este edificio a la comunidad dentro de un desastre; cantidad C_e de escombros que deben ser recolectados; y un tiempo de trabajo de carga de retiro de escombros θ_{e_e} . Con respecto a los camiones, estos cuentan con una capacidad q para recolectar escombros.

Además, se cuenta con un ponderador β^d , cuyo valor disminuye a medida que avanzan los días; y con un tiempo de máximo de trabajo T_{MAX} para cada camión.

B. Supuestos

- i. La red vial, distancias, tiempos de operación y cantidad de escombros son datos previamente conocidos.
- ii. Se establece previamente una jornada laboral limitada.
- iii. Un nodo representa un único edificio.
- iv. Todos los vehículos se encuentran disponibles dentro del horizonte de planificación.
- v. Para cada vuelta, un vehículo debe iniciar y terminar el recorrido en el depósito.
- vi. En cada edificio se encuentra operativa una máquina para cargar los escombros al vehículo.
- vii. No se permite el traslado entre edificios.
- viii. No se considera el re-abastecimiento de combustible.
- ix. No se consideran los tiempos de operación en el depósito.

C. Formulación del Modelo

D. Conjuntos

Se consideraron los siguientes conjuntos:

- N : Conjunto de nodos.
- $E \subseteq N$: Conjunto de edificios.
- $O \subseteq N$: Conjunto de depósitos.
- $A = \{o, i\} \cup \{i, o\} / i \in E, o \in O$: Conjunto de arcos.
- K : Conjunto de camiones.
- V : Conjunto de vueltas.
- D : Conjunto de días.

E. Parámetros

Los parámetros considerados son los siguientes:

- α_e : Escalar de preferencia del edificio $e \in E$.
- β^d : Ponderador de día $d \in D$.

$$\beta^d = \frac{|D| - (d - 1)}{|D|}$$

- q : Capacidad del vehículo.
- c_e : Cantidad de escombros de cada edificio $e \in E$.
- γ_{ij} : Tiempo de desplazamiento de nodo $(i, j) \in A$.
- θ_e : Tiempo de trabajo de retiro de escombros del edificio $e \in E$.
- $tmax$: Tiempo máximo de trabajo diario para un camión.
- λ_e : Cantidad de vueltas necesarias para limpiar completamente edificio $e \in E$.

$$\lambda_e = \left\lceil \frac{c_e}{q} \right\rceil$$

- M : Número muy grande.

F. Variables

Las variables de decisión elaboradas se presentan a continuación.

- x_{ij}^{kvd} : 1 si se desplaza desde el arco $(i, j) \in A$ con el camión $k \in K$ en la vuelta $v \in V$ y en el día $d \in D$, 0 si no.
- y_e^d : 1 si el edificio $e \in E$ se limpia completamente el día $d \in D$, 0 si no.

- w_e^{kvd} : Cantidad de escombros retirados del edificio $e \in E$ por el camión $k \in K$, en la vuelta $v \in V$ y en el día $d \in D$.
- t^{kd} : Tiempo de trabajo del camión $k \in K$ en el día $d \in D$.

G. Modelo Matemático

A continuación, se presenta el modelo matemático:

$$\max \sum_{d \in D} \sum_{e \in E} \beta^d \alpha_e z_e^d \quad (1)$$

La función (1) maximiza la preferencia de limpieza de los edificios hacia los primeros días del horizonte de planificación.

$$\sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} x_{ie}^{kvd} \leq \lambda_e \quad \forall i \in O, e \in E \quad (2)$$

$$x_{ie}^{kvd} = x_{ei}^{kvd} \quad \forall i \in O, e \in E, k \in K, v \in V, d \in D \quad (3)$$

La restricción (2) limita que un edificio se puede visitar, a lo más, la cantidad de veces necesarias para limpiarlo completamente. La restricción (3) indica que el vehículo debe devolverse al depósito cada vez que visita un edificio.

$$\sum_{e \in E} \sum_{v \in V} x_{ei}^{kv(d+1)} \leq \sum_{e \in E} \sum_{v \in V} x_{ei}^{kvd} \quad \forall i \in O, k \in K, d \in D / (d+1) \in D \quad (4)$$

$$\sum_{e \in E} x_{ei}^{k(v+1)d} \leq \sum_{e \in E} x_{ei}^{kvd} \quad \forall i \in O, k \in K, v \in V, d \in D / (v+1) \in V \quad (5)$$

La restricción (4) establece la secuencia de días, mientras que (5) establece la secuencia de vueltas.

$$\sum_{e \in E} w_e^{kvd} \leq q \quad \forall k \in K, v \in V, d \in D \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} w_e^{kvd} \leq c_e \quad \forall e \in E \quad (7)$$

La restricción (6) establece que la carga retirada de un edificio no puede sobrepasar la capacidad del camión, mientras que (7) establece que no se puede retirar más que la disponibilidad de escombros que presente el edificio.

$$t^{kd} = \sum_{(i,j) \in A} \sum_{v \in V} \gamma_{ij} x_{ij}^{kvd} + \sum_{e \in E} \sum_{v \in V} \theta_e w_e^{kvd} q \quad (8)$$

$$t^{kd} \leq T_{MAX} \quad \forall k \in K, d \in D \quad (9)$$

$$y_e^d \leq \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \frac{w_e^{kvd}}{c_e} \quad \forall e \in E, d \in D \quad (10)$$

La restricción (8) calcula el tiempo de trabajo diario de un vehículo. La restricción (9) limita la jornada laboral diaria. La restricción (10) identifica el día que se termina de limpiar cada edificio.

$$w_e^{kvd} \leq M x_e^{kvd} \quad \forall k \in K, e \in E, v \in V, d \in D \quad (11)$$

$$x_{ij}^{kvd}, y_e^{kvd} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, e \in E, k \in K, v \in V, d \in D \quad (12)$$

$$w_e^{kvd}, t^{kd} \geq 0 \quad \forall e \in E, k \in K, v \in V, d \in D \quad (13)$$

Las restricciones (11) relacionan las variables. Las restricciones (12) y (13) indican el dominio de las variables.

IV. CASO DE ESTUDIO

A. Área de estudio

El caso de estudio se realizó en la región de Tarapacá en la ciudad de Iquique, Chile, visualizada en la 1. Esta ciudad cuenta con una población de 191.468 personas y una superficie de 2,242 km² (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2017).



Fig. 1. 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 I se muestran los eventos sísmicos desde 1900, cuyas leyendas son: Magnitud de ondas superficiales (Ms) y Magnitud del momento (Mw) (CNS, 2020).

B. Recopilación de datos

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 Nacional de Chile (2017). Estos datos

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

TABLE I

HISTORIAL DE TERREMOTOS REGIÓN DE TARAPACÁ, A PARTIR DEL AÑO 1900. FUENTE: (GUC, 2019)

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).

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 (Tabla VI) y su distribución espacial en la Figura 2.

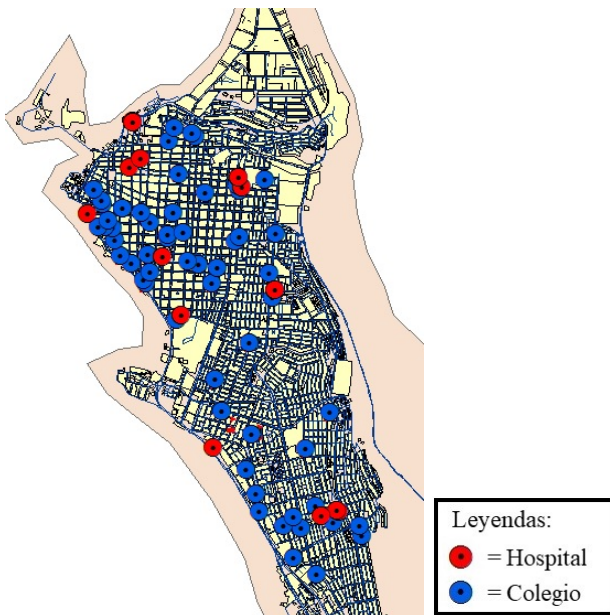


Fig. 2. Centros de Salud y Establecimientos de Educación en Iquique. Fuente: Elaboración Propia en base a datos del CENSO (2017)

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).

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.

V. RESULTADOS

A. Confección de los escenarios

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 3 y el detalle de la zona, junto con la cantidad de escombros por manzana censal, está en la Figura 4. El área está conformada por 109 manzanas, 2 centros de salud, 5 establecimientos educacionales y un depósito.

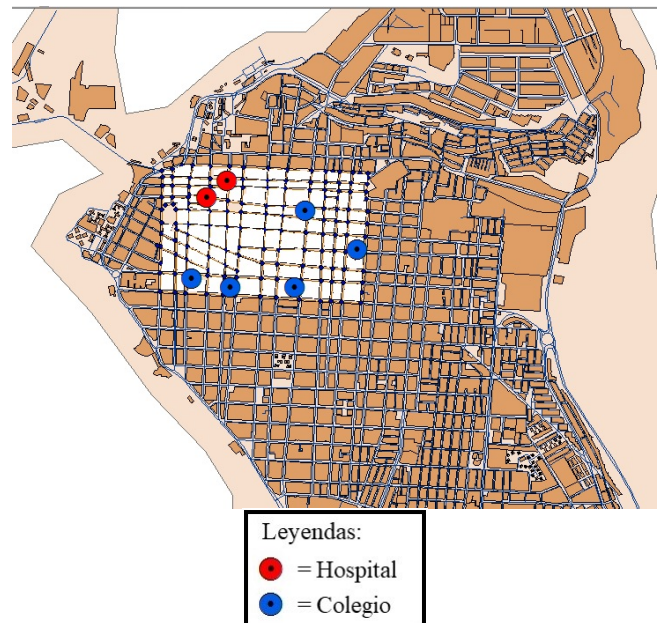


Fig. 3. Extracto de la zona. Fuente: Elaboración propia.

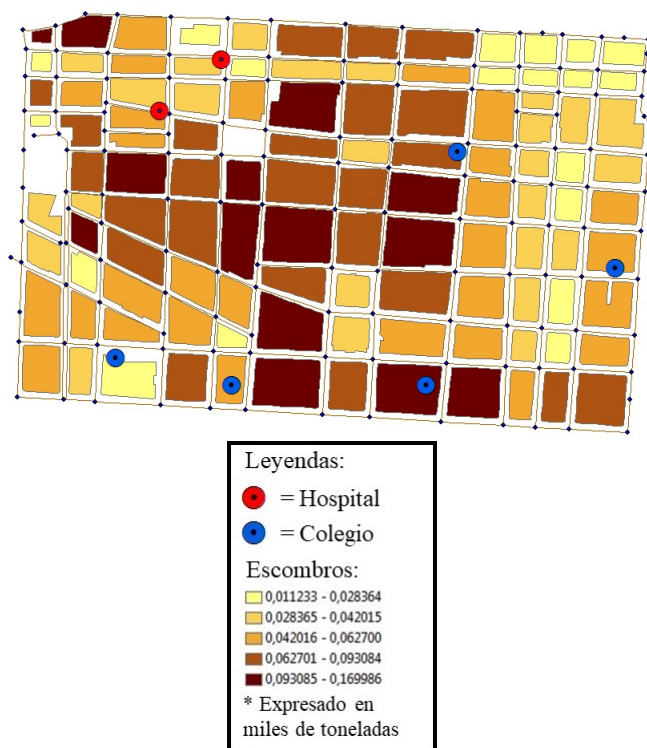


Fig. 4. Detalle del extracto de la zona con cantidad de escombros. Fuente: Elaboración propia.

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.

VI. 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 II

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 $3.761,23 \text{ m}^3$. En la Figura 5 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 solo utilizó 3 días de los 5 propuestos en el horizonte de planificación.

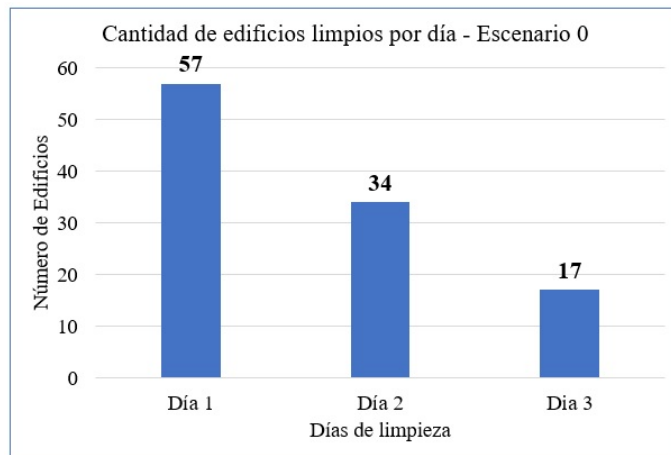


Fig. 5. Detalle de edificios limpios (Escenario 0), Fuente: Elaboración propia

La distribución espacial de limpieza de los edificios se ve representada en la Figura 6, 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.

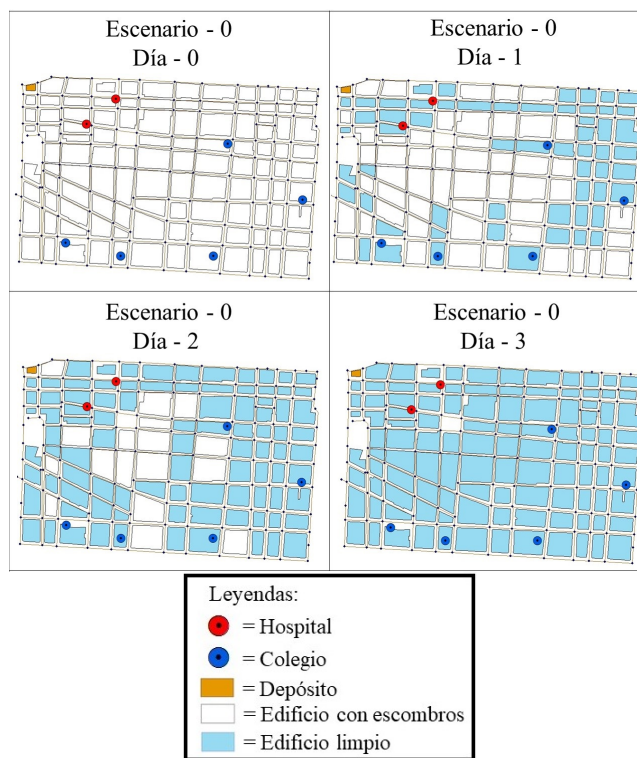


Fig. 6. Visualización de edificios limpios (Escenario 0), Fuente: Elaboración propia

En resumen, del escenario 0 se puede concluir que el

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

TABLE II

DETALLE DE MODELAMIENTO ESCENARIO 0, FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

modelo sí realiza una priorización exitosa al considerar los ponderadores de tipo de edificio y día, puesto que en la Figura 5 se muestra cómo se agrupa la mayor cantidad de edificios en los primeros días y en la Figura 6 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.

VII. 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 III se muestran los resultados.

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 7 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.

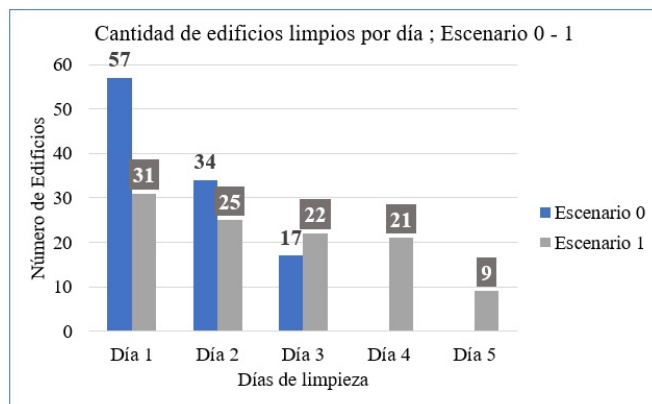


Fig. 7. Detalle de edificios limpios (Escenarios 0 y 1), Fuente: Elaboración propia

La distribución espacial de limpieza de los edificios se ve representada en la Figura 8, 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.

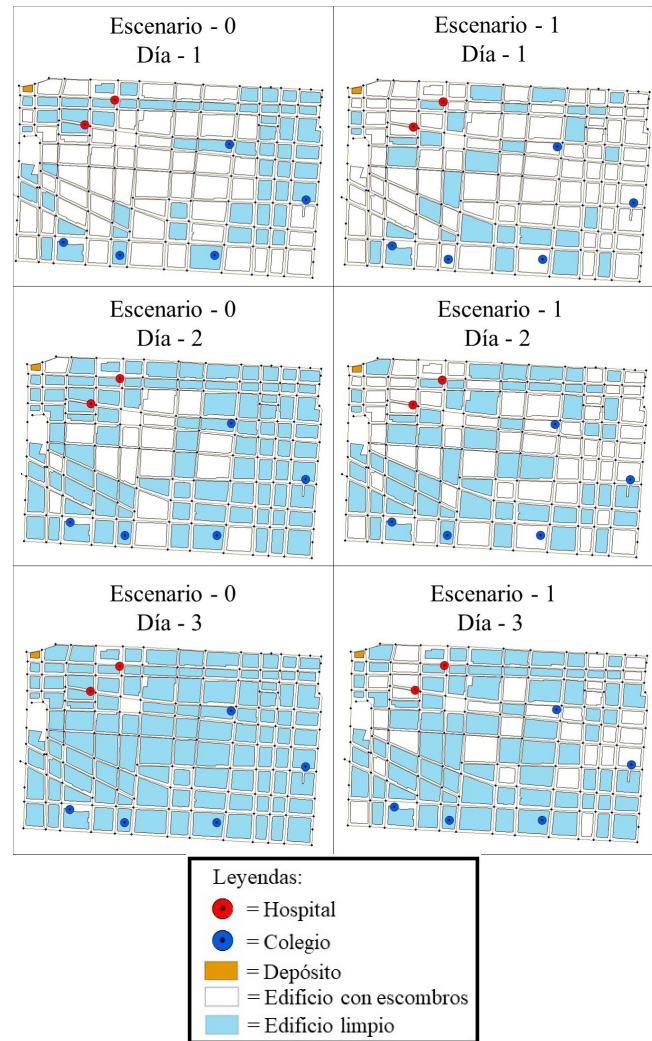


Fig. 8. Visualización de edificios limpios (Escenarios 0 y 1), Fuente: Elaboración propia

En resumen, del escenario 1 se puede concluir que el modelo realiza un rendimiento constante en cuanto a limpieza puesto que en la Figura 7 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 8 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,

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

TABLE III
DETALLE COMPARACIÓN ESCENARIOS 0 Y 1, FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

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.

VIII. 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 IV 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 9 se presenta el gráfico de la cantidad 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.

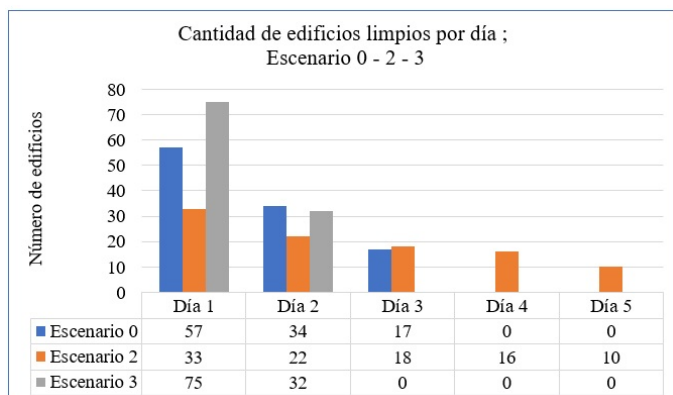


Fig. 9. Detalle de edificios limpios (Escenarios 0, 2 y 3), Fuente: Elaboración propia

La distribución espacial de limpieza de los edificios se ve representada en la Figura 10, 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 déficit de

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.

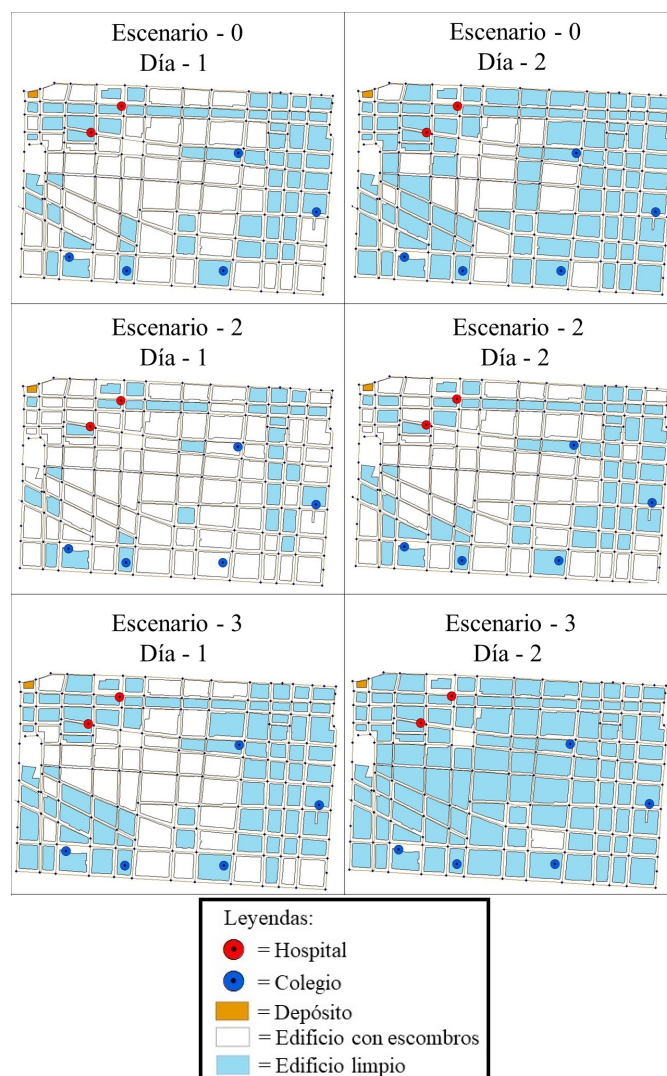


Fig. 10. Visualización de edificios limpios (Escenarios 0, 2 y 3), Fuente: Elaboración propia

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 9 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 10 se realiza la comparación respectiva de los primeros 2 días del

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
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

TABLE IV
DETALLE COMPARACIÓN ESCENARIOS 0, 2 Y 3, FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

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.

IX. 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 V se muestran los resultados.

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 11 se presenta el gráfico de la cantidad de edificios 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.

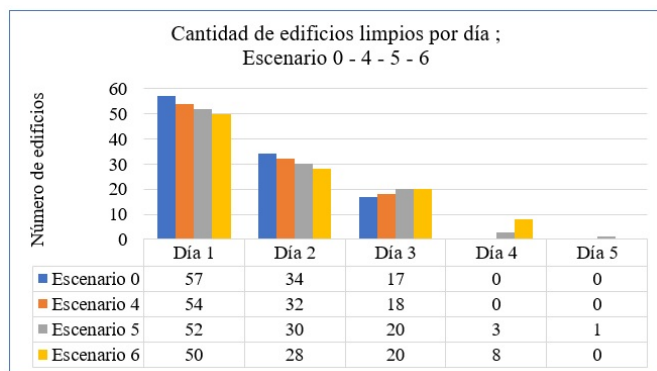


Fig. 11. Detalle de edificios limpios (Escenarios 0, 4, 5 y 6), Fuente: Elaboración propia

La distribución espacial de limpieza de los edificios se ve representada en la Figura 12, 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.

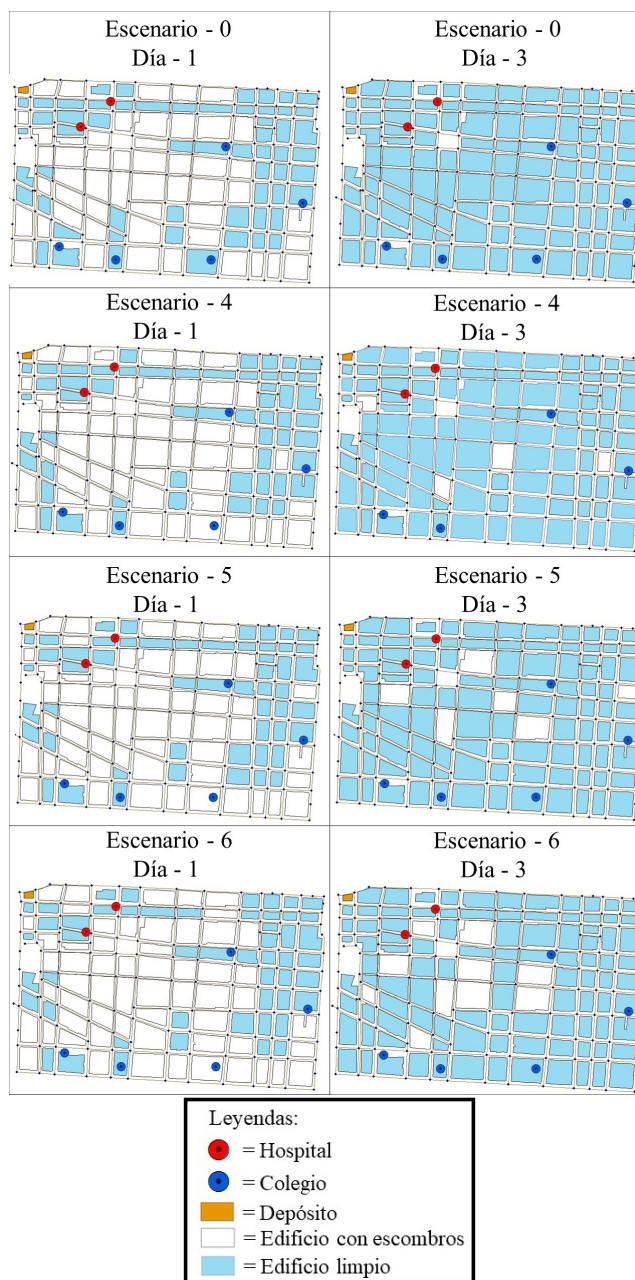


Fig. 12. Visualización de edificios limpios (Escenarios 0, 2 y 3), Fuente: Elaboración propia

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

TABLE V
DETALLE COMPARACIÓN ESCENARIOS 0, 4, 5 Y 6 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 11 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 12 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.

X. 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 cómputo, 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 a 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.

REFERENCES

- 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 Mendonça, 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 [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 [Accessed: 01/01/2020].

EM-DAT (2019). Data-base. 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.

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.

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.

XI. ANEXOS

A. 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. P.R.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. PJARAQUEMADA ALQUIZAR	Colegio
C41	ESC. ARTISTICA VIOLETA PARRA	Colegio
C42	COL. ACADEMIA TARAPACA ORELLA	Colegio
C43	COL. HUANTAJAYA	Colegio
C44	ESC. PLACIDO VILLARDEL	Colegio
C45	L. LIBERTADOR BERNARDO OHIGGINS	Colegio
C46	1.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. IRQUILLARY	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

TABLE VI

DETALLE DE EDIFICIOS RELEVANTES EN LA ZONA ; FUENTE: (BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE, 2017)