

Un Modelo de Simulación Discreta basada en GIS y Población Sintética para la evaluación de planes de evacuación pre-tsunami en la comuna de Antofagasta

A L U M N O : P A B L O J E R E Z A G U R T O

P R O F E S O R S U P E R V I S O R : R O D R I G O
D E L A F U E N T E G A L L E G O S , P H . D





Introducción



Revisión de literatura



Metodología



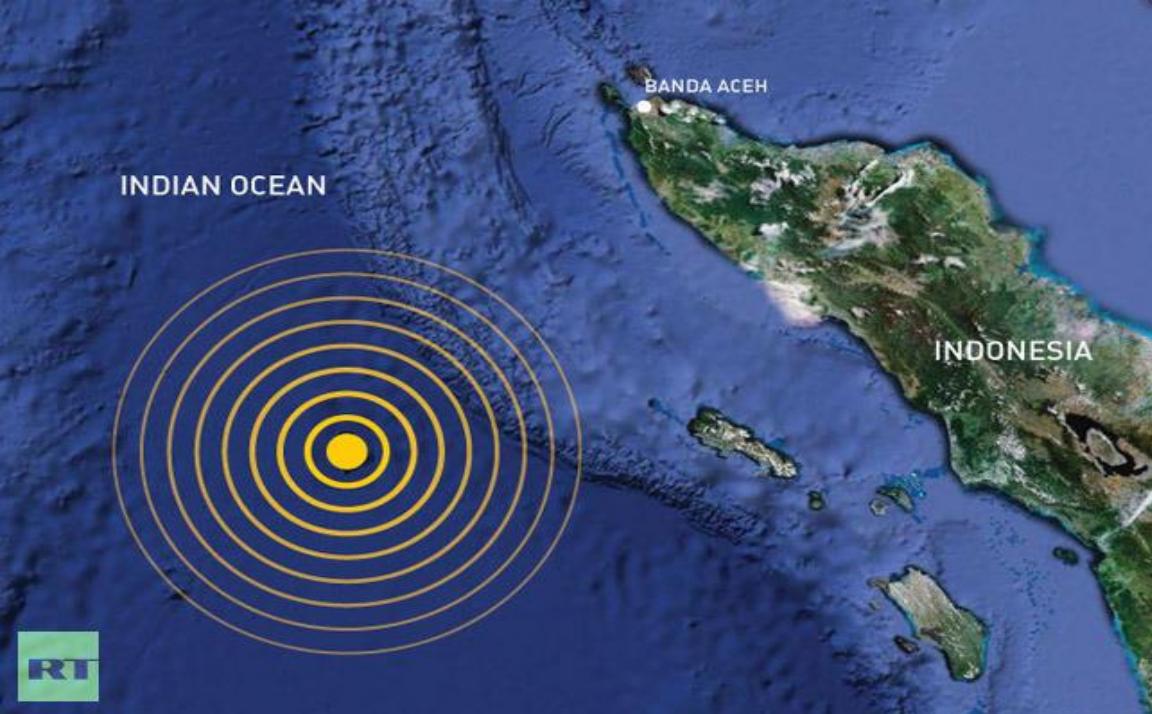
Resultados



Discusión, conclusión
y trabajos futuros

Grandes terremotos en el Mundo...





283.100 víctimas fatales



\$13.000 millones
pérdidas económicas



En este contexto, Chile no
se queda atrás...





Magnitud 9,5
22 de mayo de 1960

PLACA DE NAZCA



512 víctimas fatales

16 desaparecidos

800.000 damnificados

\$30.000 millones pérdidas
económicas



BBC

2000 víctimas fatales

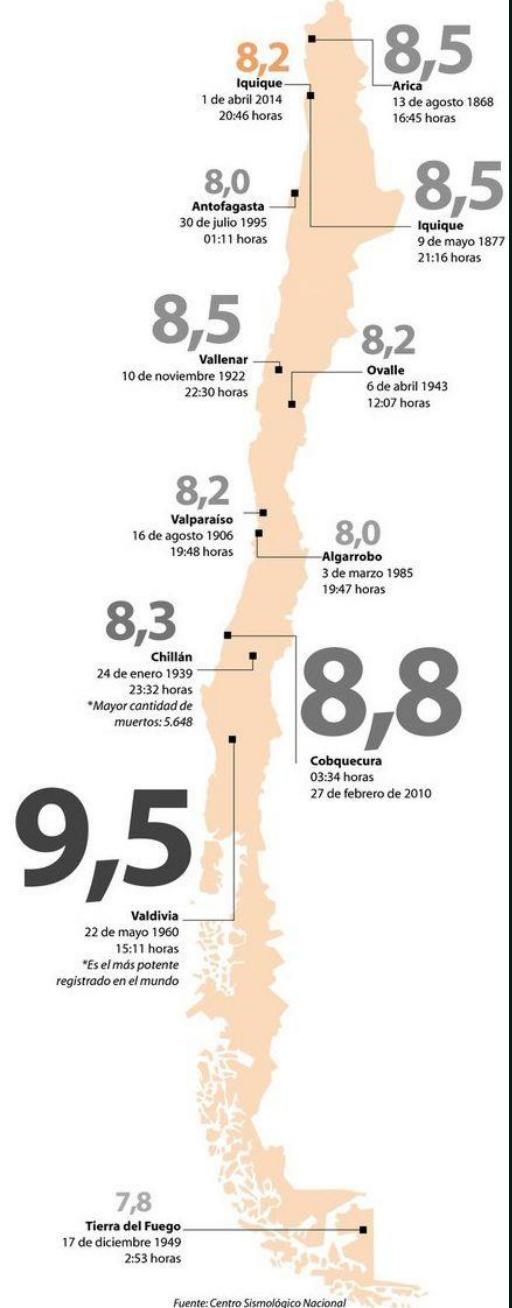
2 millones damnificados

\$700 millones pérdidas
económicas



ARGENTINA

Los doce terremotos más grandes de Chile



Problema / Necesidad



- Chile país sísmico.
- A su vez, es un país expuesto a tsunamis.
- Necesidad de un plan de emergencia adecuado.

Solución



- Herramienta de apoyo en la elaboración de planes de evacuación de tsunamis mediante el desarrollo de un modelo de simulación.

Revisión de literatura

Referencia	Evacuación Vertical	Método Optimización	Población Sintética	GIS - based	Escenario noche y día	Zona estudio
Suk Na and Banerjee (2019)				x		San Francisco, Estados Unidos
Hsiao et al. (2021)	x	x		x		New Taipei, Taiwán
Mostafizi et al. (2019)	x			x		Cascadia, Canadá - Estados Unidos
Kitamura et al. (2020)		x		x		Shikoku, Japón
Barnes et al. (2021)				x		Newcastle, Inglaterra
Rozo et al. (2019)		x		x		Barranquilla, Colombia
Faucher et al. (2020)				x		Rincón, Puerto Rico
Tamakloe et al. (2021)				x	x	Yeouido, Corea del Sur
Takabatake et al. (2020b)	x			x	x	Isla de Vancouver, Canadá
Kubisch et al. (2020)				x		Talcahuano, Chile
León et al. (2020)				x		Viña del Mar, Chile
Wang and Jia (2021)				x		Seaside, Estados Unidos
Nakanishi et al. (2020)			x	x	x	Takamatsu, Japón
Takabatake et al. (2020a)				x		Tagajyo, Japón
Álvarez Castillo (2017)				x	x	Iquique, Chile
Este trabajo	x	x	x	x		Antofagasta, Chile

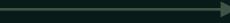
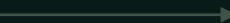
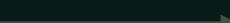


En Hsiao et al. (2021) se implementa un modelo de optimización considerando las capacidades reales de los refugios en una evacuación vertical, sin embargo no incorpora la incertidumbre en la elección de rutas de las personas.



Por otra parte, en el trabajo propuesto por Nakanishi et al. (2020), se implementa un modelo basado en agentes que integra una población sintética, sin embargo, las decisiones de los agentes son homogéneas con respecto a la elección de rutas y estos modelos presentan un costo computacional más elevado.

Modelos de simulación

1. CA (Cellular Automata)   Chang et al., 2020; Chen et al., 2020; Kitamura et al., 2020; Li et al., 2021
2. ABS (Agent Based Simulation)   Barnes et al., 2021; Mostafizi et al., 2019; Muhammad et al., 2021; Nakanishi et al., 2020; Takabatake et al., 2020a,b; Wang and Jia, 2021
3. DES (Discrete Event Simulation)   Suk Na and Banerjee, 2019
4. LCD (Low Cost Distance)   Wood and Schmidlein, 2012
5. Integraciones entre distintos enfoques   Suk Na and Banerjee , 2019; Faucher et al. (2020)

Principal brecha

Flexibilidad



Eficiencia



Contribución a la línea
de investigación

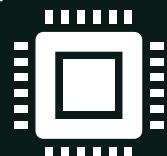
Características reales
de la red



Elección de rutas



Modelo de
optimización



Capacidades de
edificios reales



Objetivo general



- Construir un modelo de simulación de evacuación de tsunami integrado con población sintética y GIS para la ciudad de Antofagasta.

Objetivos específicos



- Recolectar y pre-procesar datos georeferenciados de la ciudad de Antofagasta.
- Generar población sintética con el modelo que mejor se ajuste a los datos.
- Diseñar e implementar un modelo de simulación de evacuación de tsunami.
- Diseñar e implementar un modelo de optimización para asignar familias a edificios.
- Identificar las principales implicancias de incorporar evacuación vertical en un plan de evacuación de tsunami.
- Crear una herramienta de apoyo para la elaboración de planes de evacuación de tsunamis

Metodología

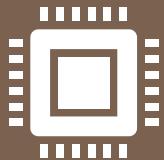
01

Preprocesamiento
de los datos



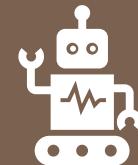
02

Modelo de
Optimización



03

Simulación



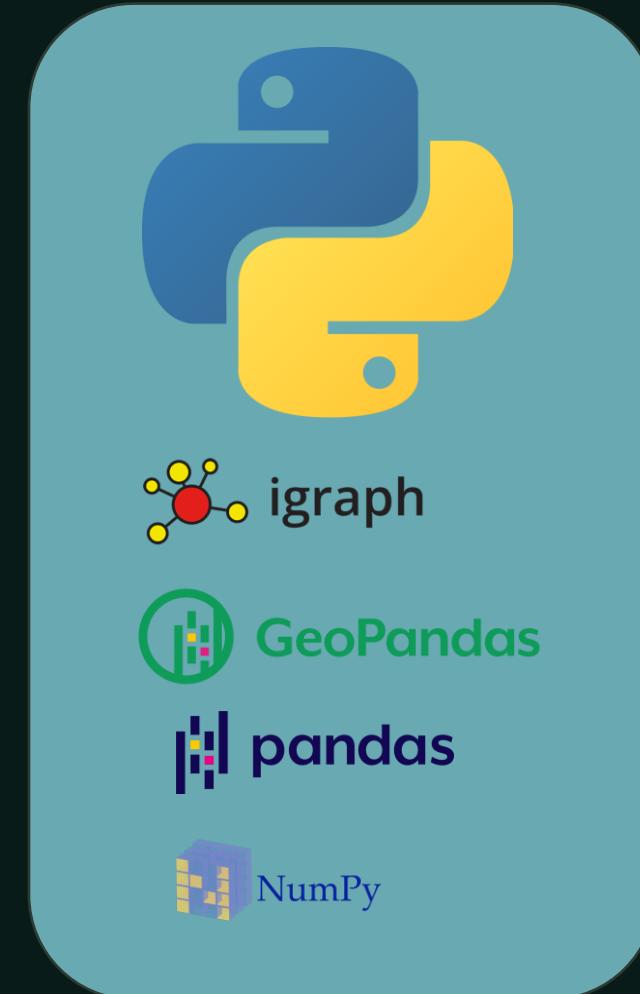
04

Métricas de
Rendimiento

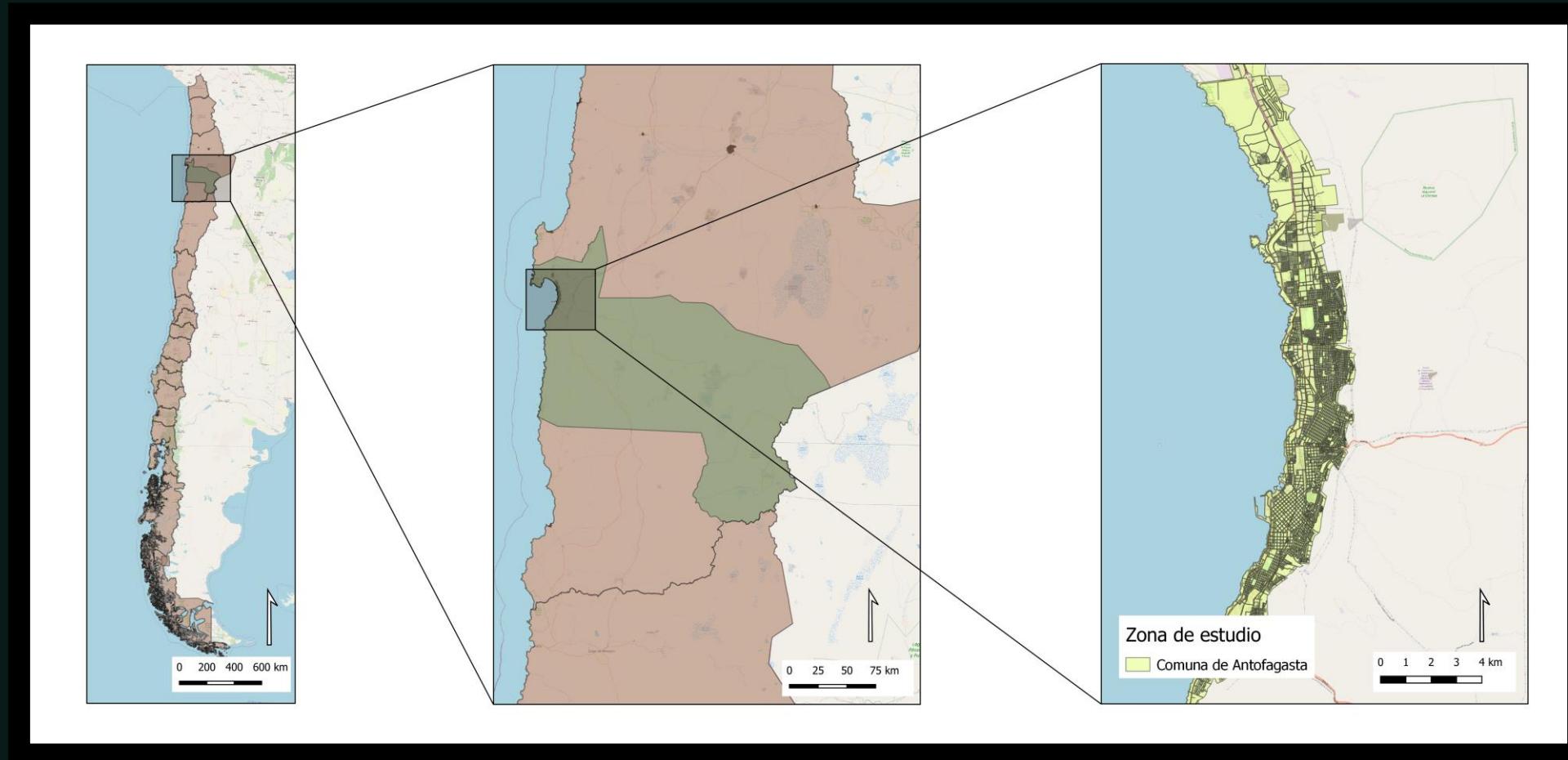


Softwares utilizados

QGIS +



Zona de estudio: Comuna de Antofagasta

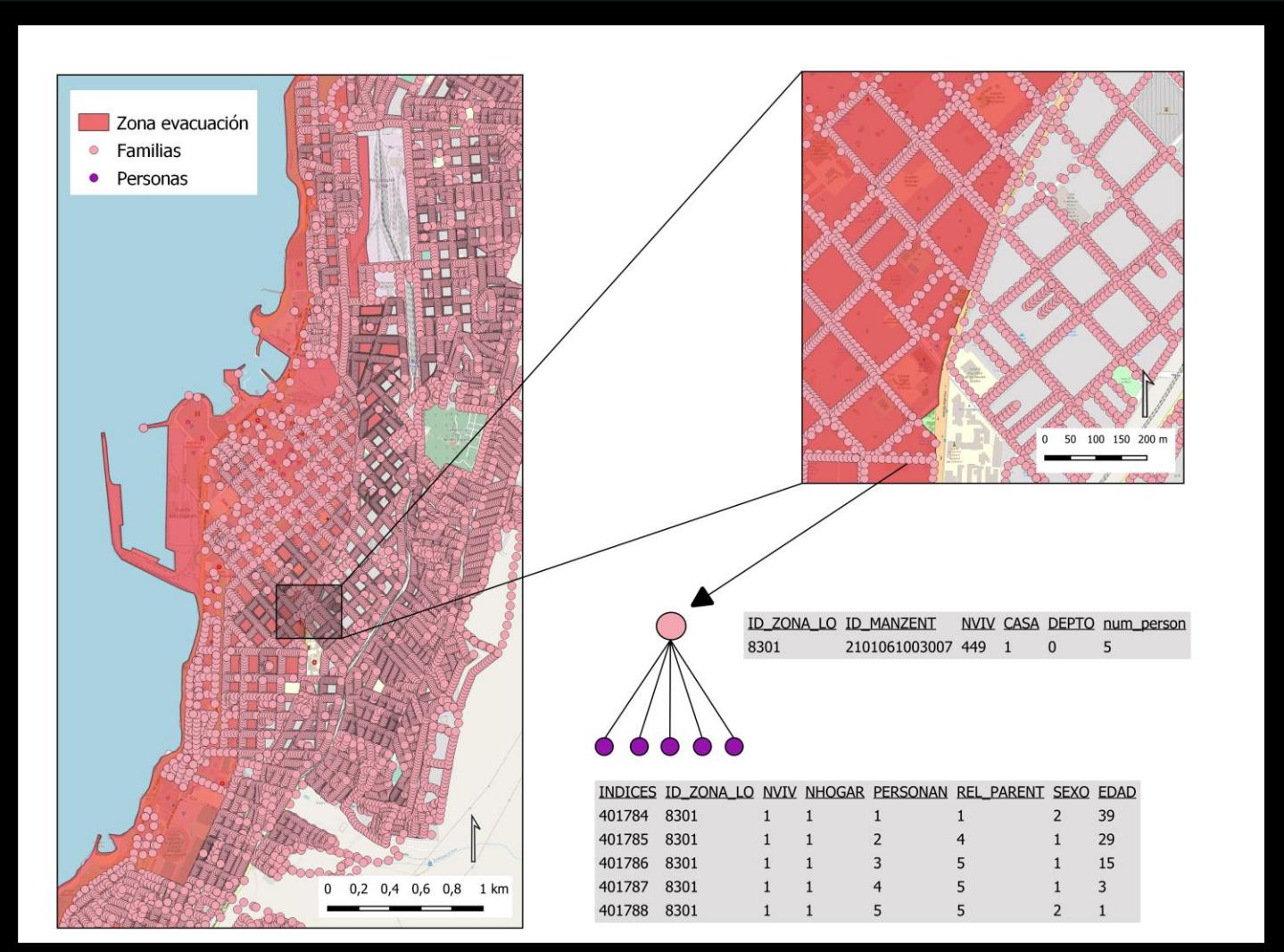


Preprocesamiento

1. Familias en zona de evacuación

Población sintética

Moreno and De la Fuente (2021)



Preprocesamiento

2. Edificios y puntos de encuentro

- 119 edificios
- 52 puntos de encuentro

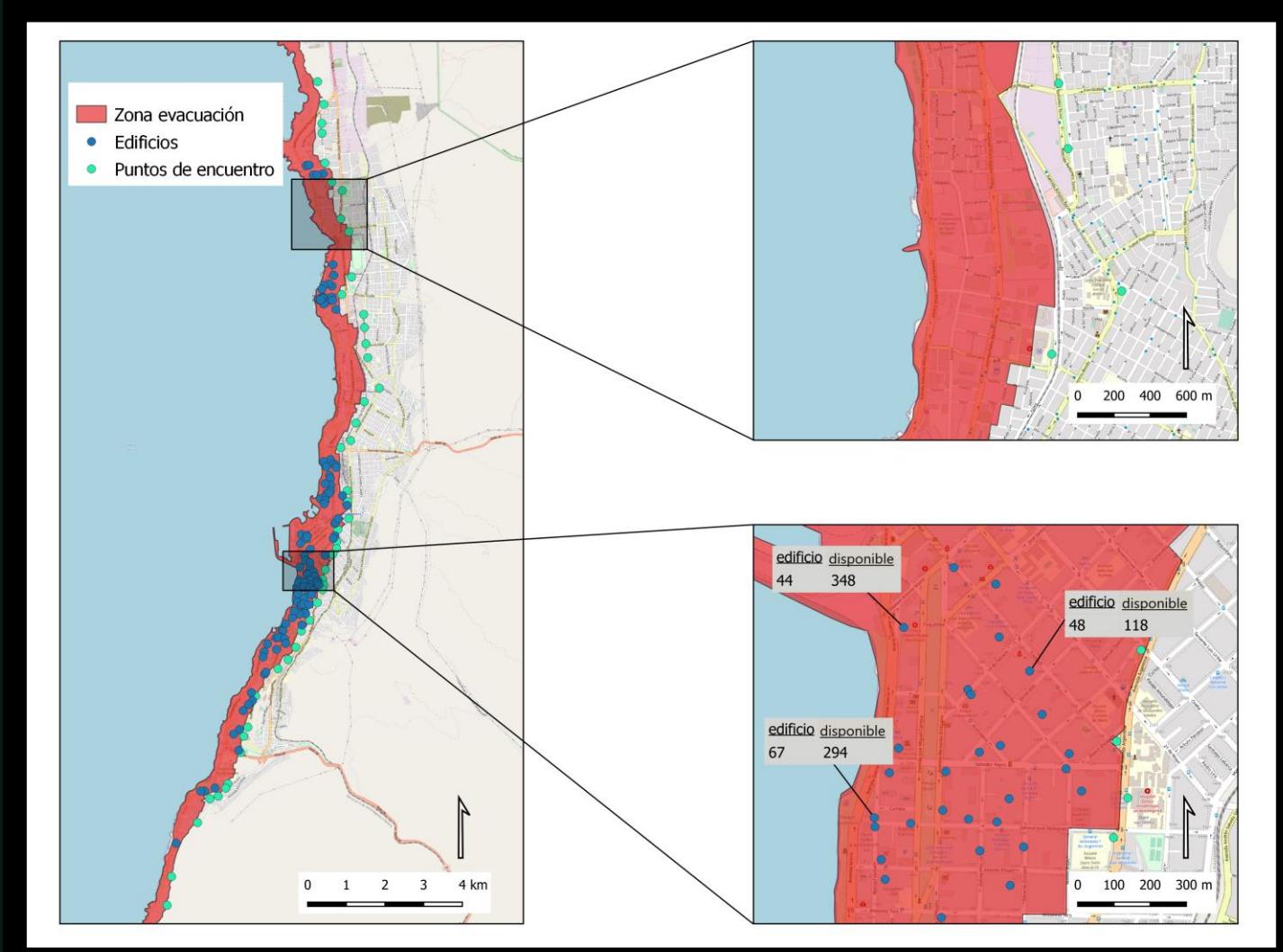
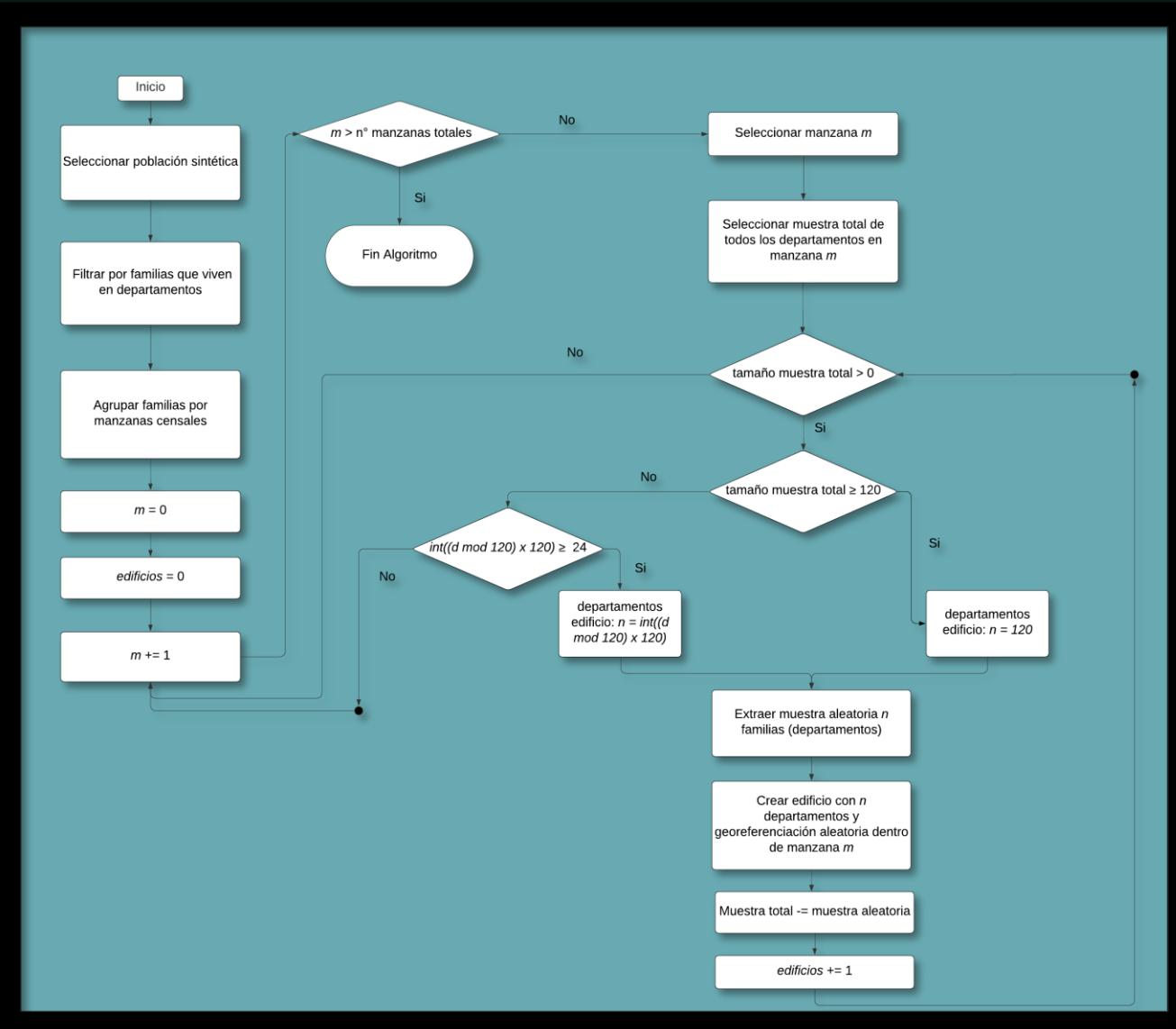


Diagrama de flujo creación de edificios



Capacidad

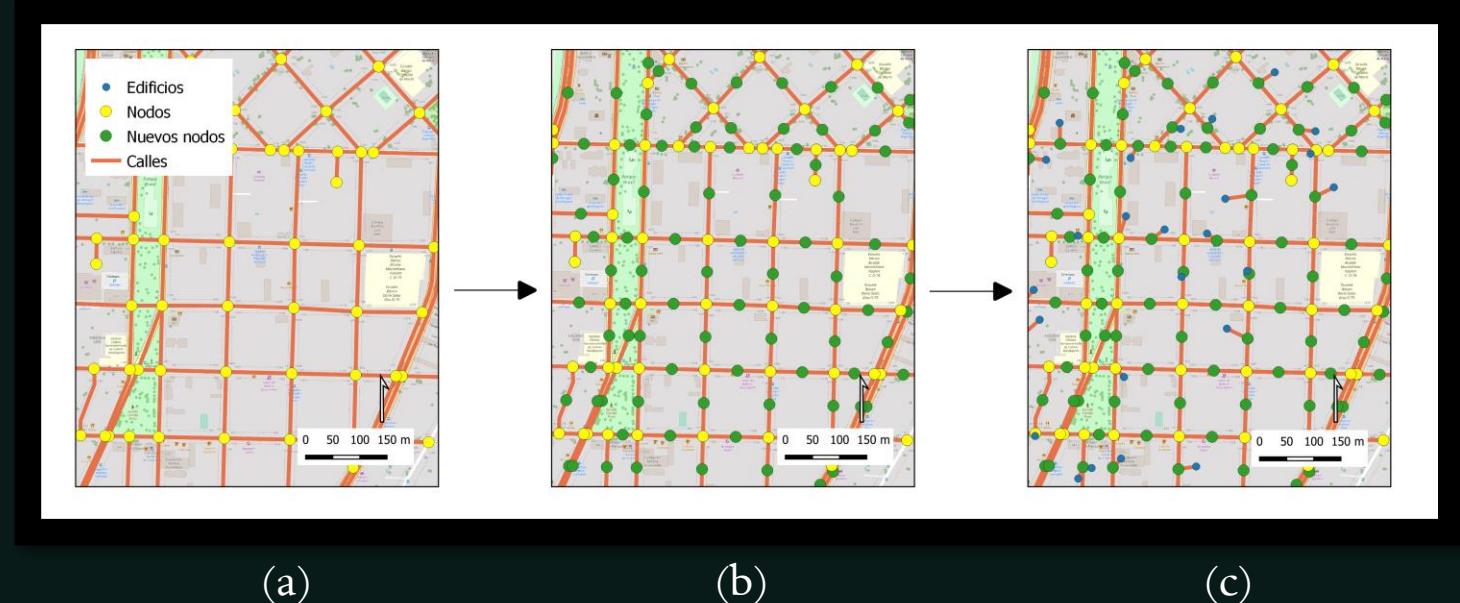
- O_j : N° personas que viven en edificio j .
- N_j : N° personas que viven en dos departamentos seleccionados aleatoriamente en edificio j .
- C_j : Capacidad total edificio j .
- D_j : Capacidad disponible edificio j .

$$C_j = \text{Max}(O_j ; O_j \times 1,3 - 2 \times N_j)$$

$$D_j = C_j - O_j$$

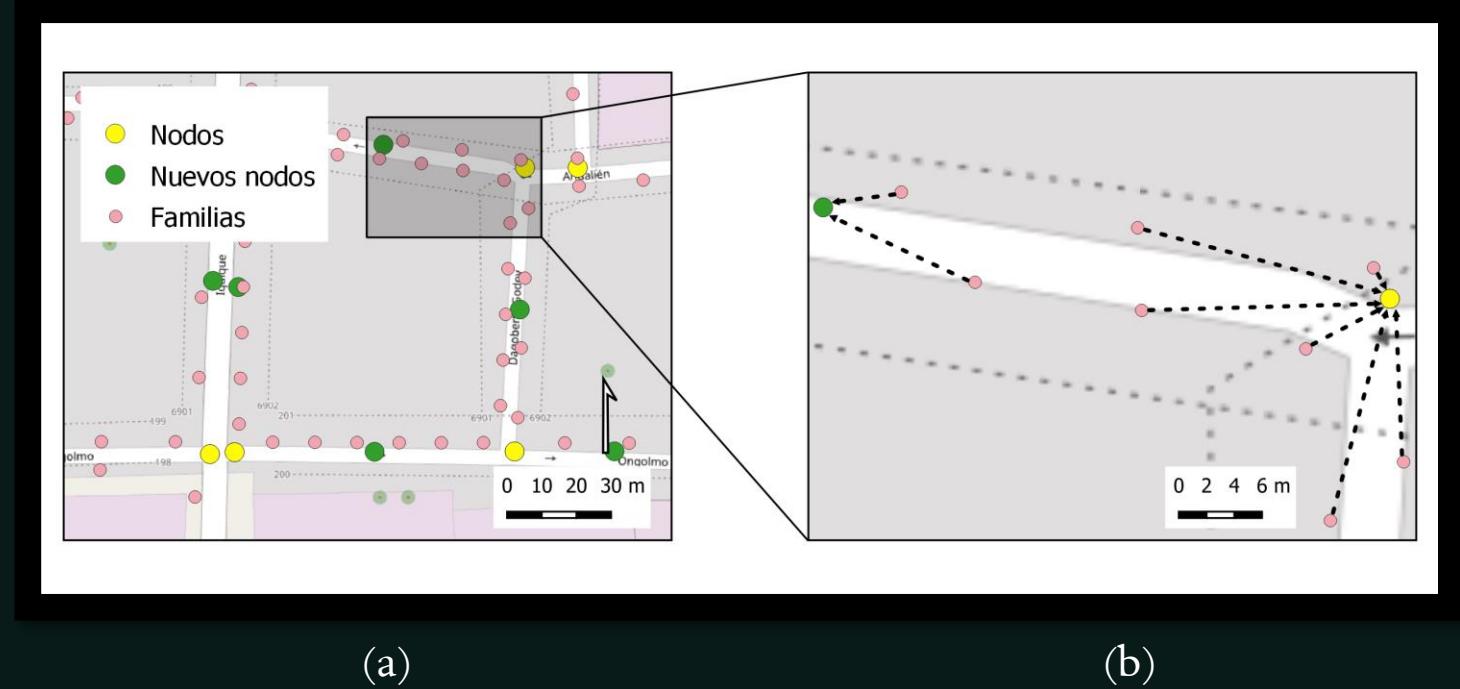
Preprocesamiento

3. Implementación de la red nodal



Preprocesamiento

4. Asociación de familias y refugios a la red



(a)

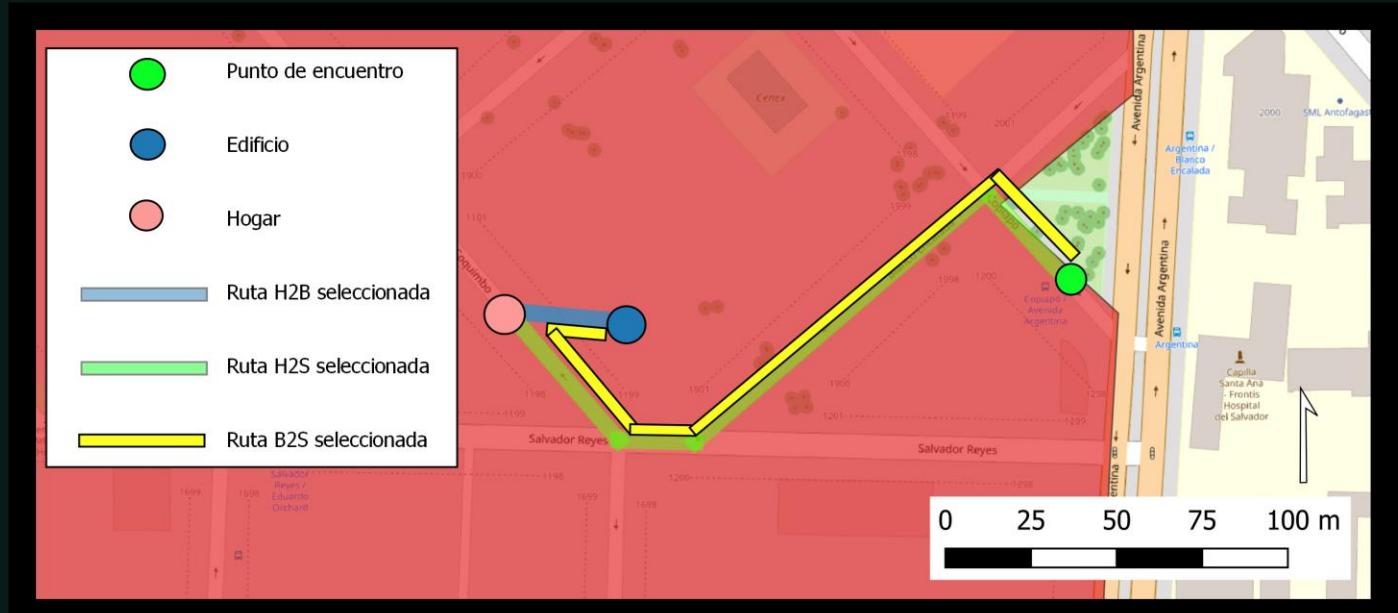
(b)

Preprocesamiento

5. Rutas de escape

- Hogares a Puntos de encuentro (H2S)
- Hogares a Edificios (H2B)
- Edificios a Puntos de Encuentro (B2S)

Djikstra, algoritmo ruta más corta
W = Distancia / Ancho



Modelo de optimización

Índices:

- I: Conjunto de familias $\{i = 1, \dots, n\}$.
- J: Conjunto de edificios $\{j = 1, \dots, m\}$.

Parámetros:

- E_i : Número de adultos mayores en familia i. K_i : N° de niños en familia i.
- A_i : N° de adultos en familia i.
- N_i : N° de miembros en familia i.
- WE: Peso adultos mayores.
- WK: Peso niños.
- WA: Peso adultos.
- CB_j : Capacidad edificio j.
- $BD_{i,j}$: Distancia entre familia i y edificio j.
- MD_i : Distancia entre familia i y punto de encuentro más cercano.
- $DT_{i,j}$: 1 si familia i vive en edificio j ($BD_{i,j} = 0$), 0 e.o.c.
- DPF: Factor de penalización de distancias entre familias y edificios.

Variables de decisión:

- $x_{i,j}$: 1 si familia i es asignada a edificio j, 0 e.o.c.
- y_i : 1 si familia i es asignada a punto de encuentro más cercano, 0 e.o.c.

Priorizar asignación de personas según rango etario
(en este caso fue a adultos mayores)

Priorizar menores distancias hacia edificios

Formulación:

$$\text{maximize} \quad \sum_{i=1}^n \left((WE \times E_i + WK \times K_i + WA \times A_i) \times \sum_{j=1}^m x_{ij} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{BD_{i,j}}{DPF} \right)^{-1} \times x_{ij} \right) \quad (3.3)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j=1}^m x_{ij} + y_i = 1, \quad \forall i \in I, \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \times NM_i \leq CB_j, \quad \forall j \in J, \quad (3.5)$$

$$x_{ij} = 0, \quad \text{si } BD_{ij} \geq MD_i, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad (3.6)$$

$$x_{ij} = 1, \quad \text{si } DT_{i,j} > 0, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad (3.7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (3.8)$$

Simulación



1. Creación simulador básico
basado en eventos discretos



2. Simulación aplicada a
evacuación de tsunami



3. Creación de escenarios

1. Simulador básico

- Creación de lista de eventos
- Ordenadas según criterio a definir (en este caso tiempo)
- Ejecución de eventos

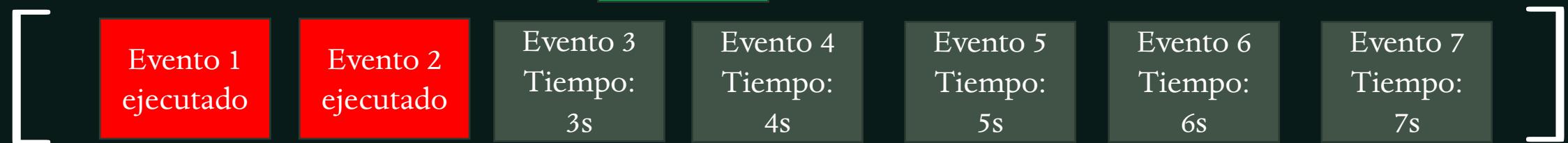
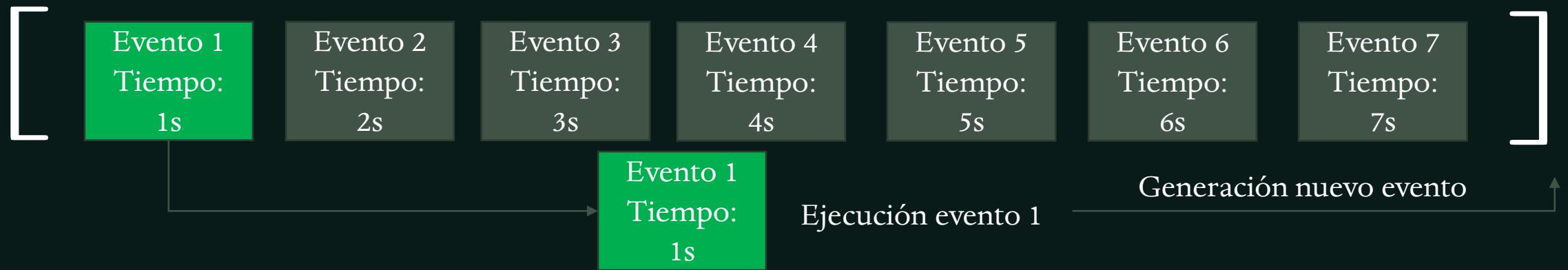
1. Inicializador de eventos



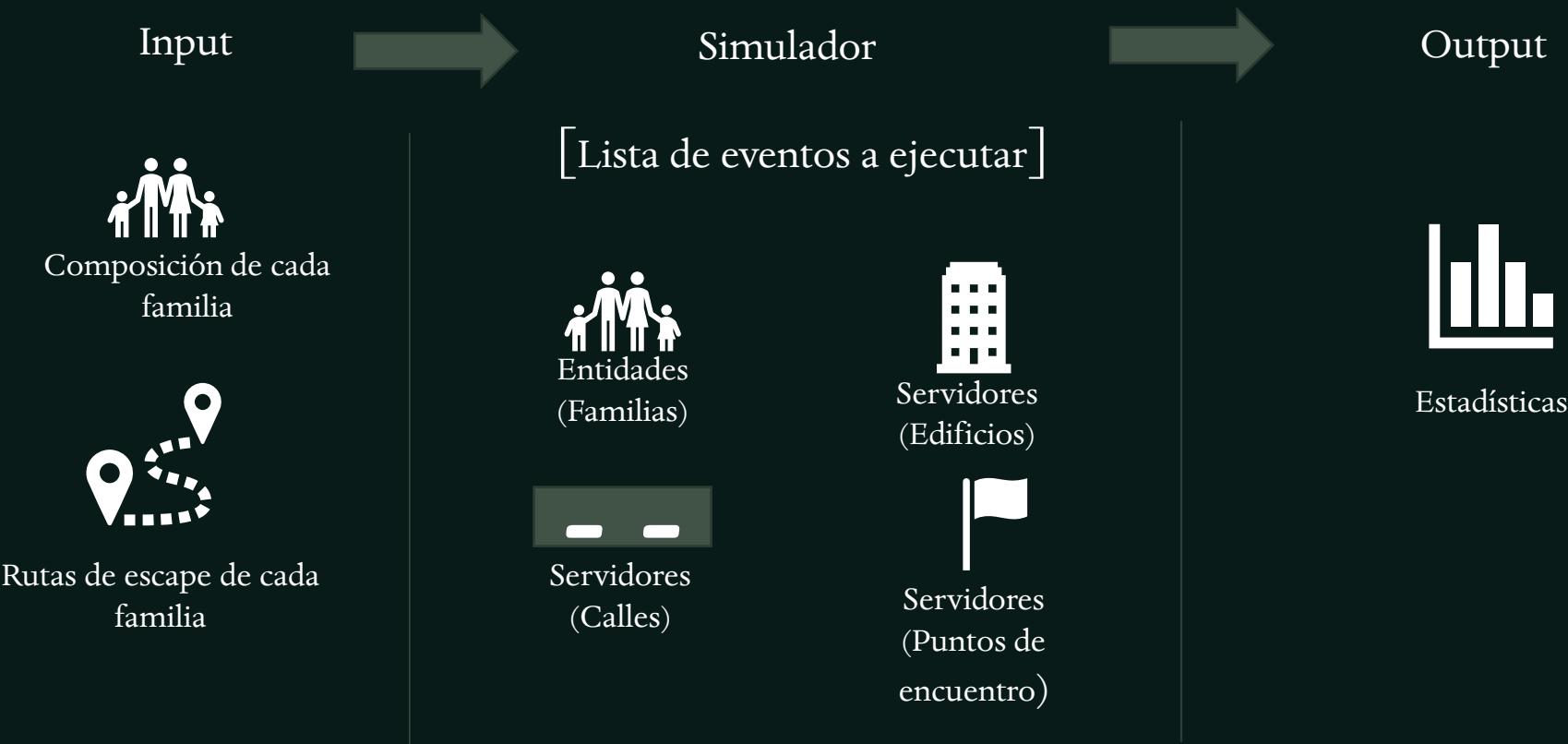
2. Ordenar eventos según criterio a definir (en este caso tiempo)



3. Ejecución de eventos



2. Simulación aplicada a evacuación de tsunami



2. Simulación aplicada a evacuación de tsunami

- Inicializador de eventos

- Tipos de evento:

- Llegada a calle



- Llegada a edificio

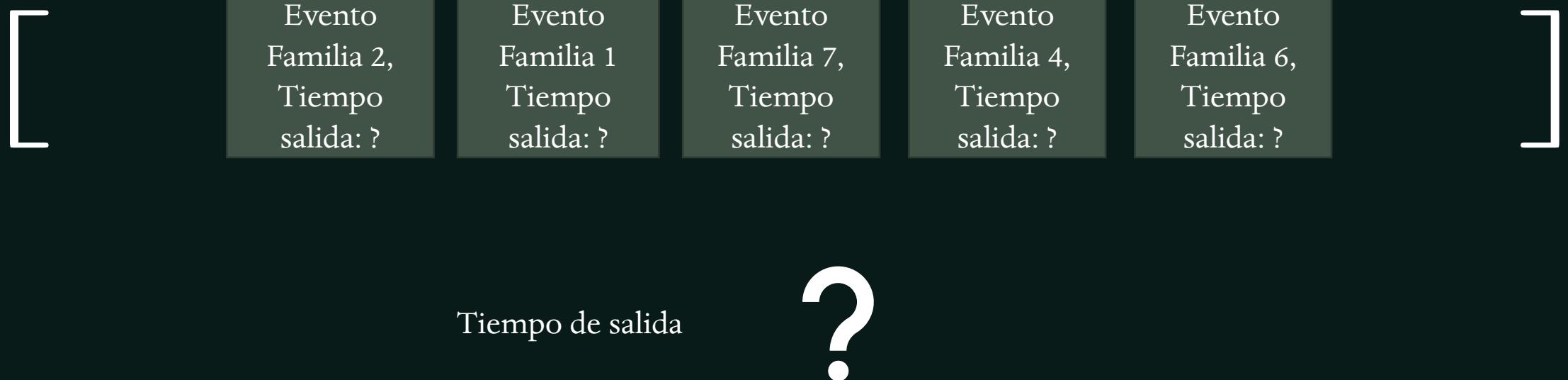


- Llegada a punto de encuentro

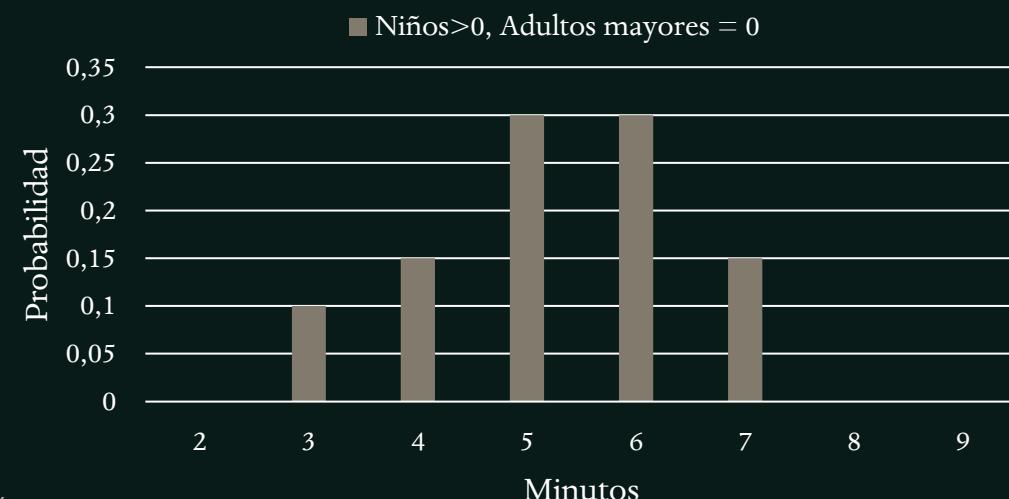
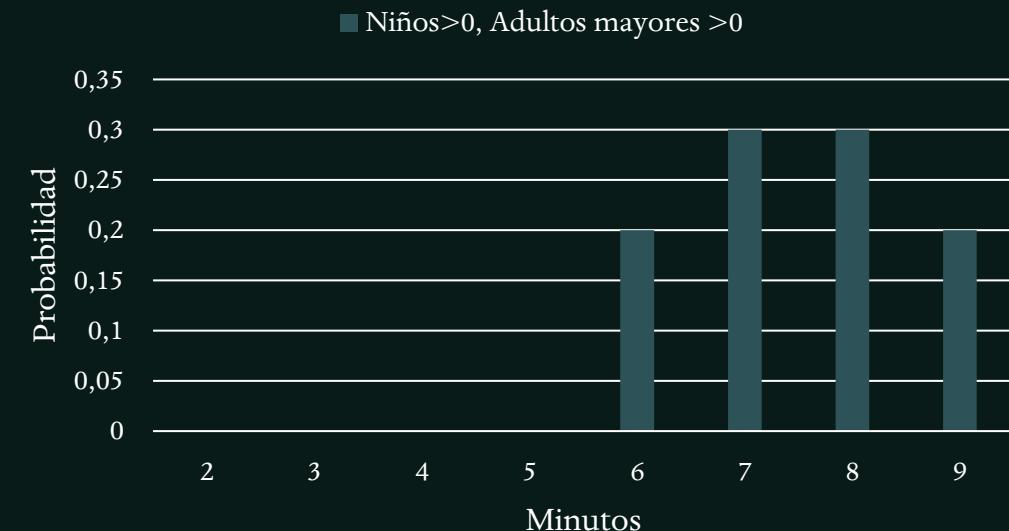
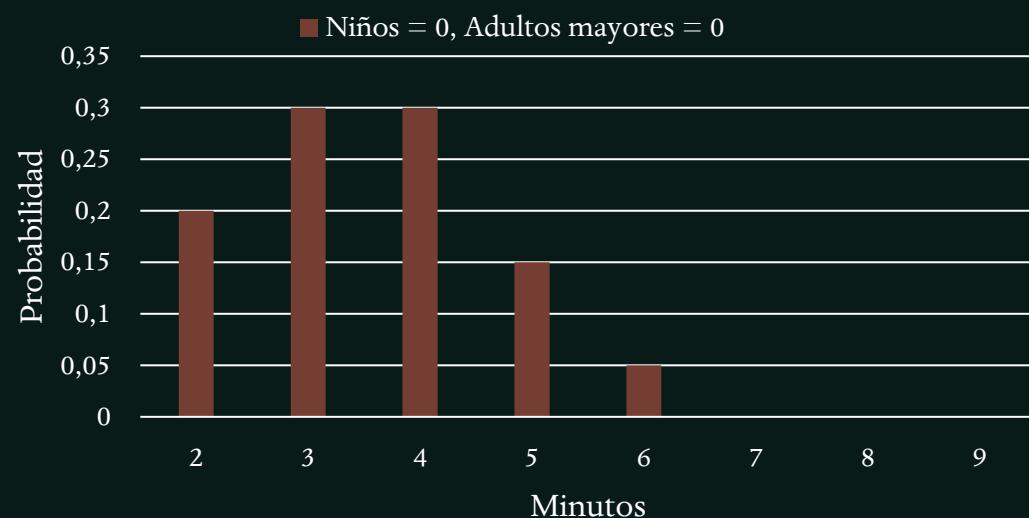


Inicializador de eventos

- 20.000 familias a evacuar.
- Cada evento asociado a una familia.



Distribución de probabilidad de tiempos de salida según composición familiar



Tipos de eventos

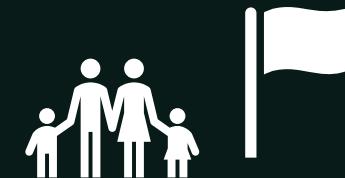
Llegada a calle



Llegada a edificio



Llegada a punto
de encuentro



- Llegada a calle

Calle



Capacidad calle:

- C: Capacidad de la calle
- W: Ancho de la calle
- L: Largo de la calle
- F: 1.55 (Peatones por metro cuadrado)

$$C = (W \times A) \times F$$

Familia



Velocidad de la familia:

- V: Velocidad de la familia
- N: N° niños en la familia
- Y: N° jóvenes en la familia
- A: N° adultos en la familia
- E: N° adultos mayores en la familia
- T: N° total de integrantes en la familia

$$V = \frac{K \times 1,3 + Y \times 1,5 + A \times 1,5 + E \times 0,98}{T}$$



Velocidad final:

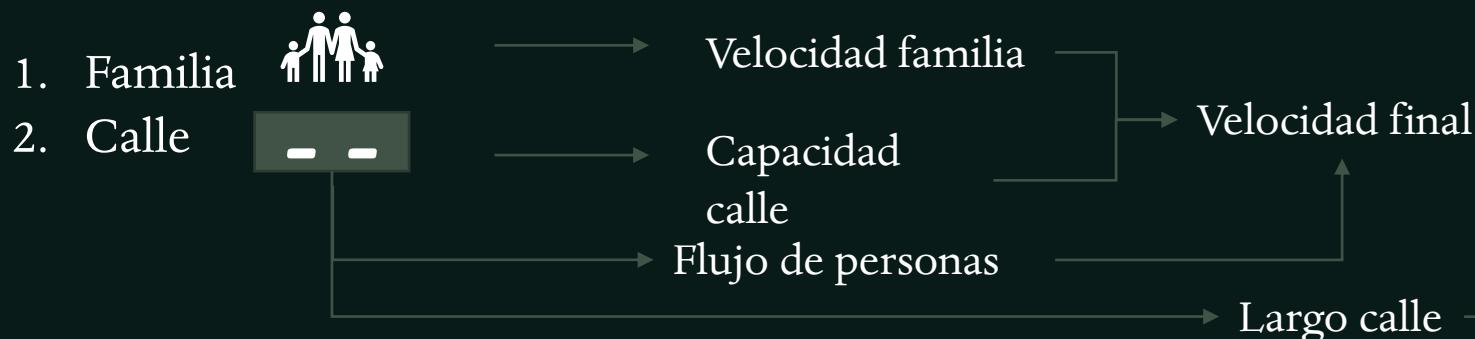
- VF: Velocidad final
- D: Flujo de personas en calle

$$\text{Si } C \leq D \Rightarrow VF = 0,751 \frac{m}{s}$$

e.o.c. $VF = V$

- Llegada a calle

Elementos asociados al evento:



Parámetros del evento:

- Momento de ejecución
- Duración



1



2



3



Creación próximo evento



- Llegada a edificio

Elementos asociados al evento:

Edificio



Familia



1



2



Sin capacidad
disponible



3



Creación próximo evento
Ruta a punto encuentro



Familia refugiada en
edificio



- Llegada a punto de encuentro

Elementos asociados al evento:

Punto de
encuentro



Familia



1



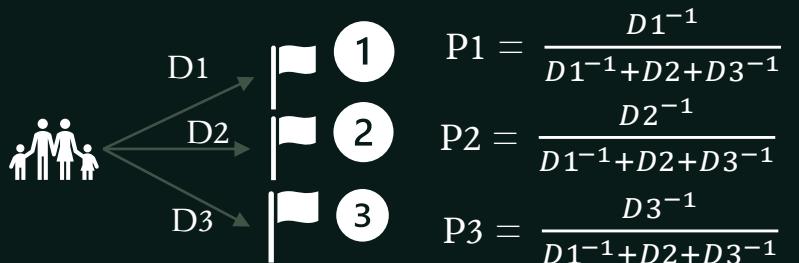
2



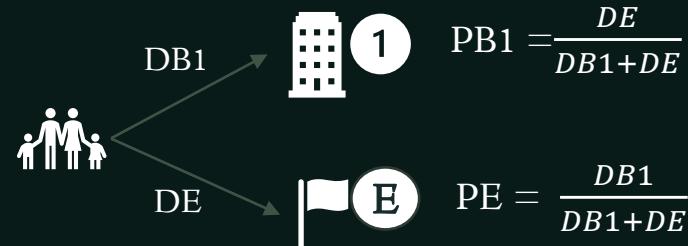
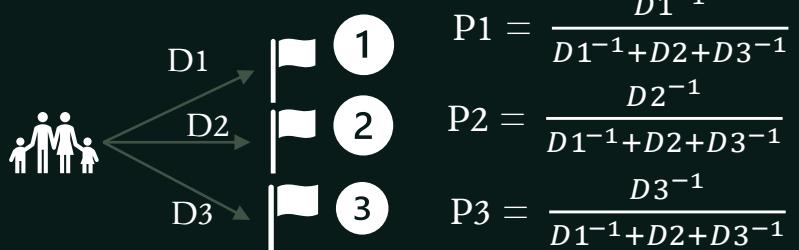
Familia refugiada en punto
de encuentro

3. Escenarios

Escenario 1



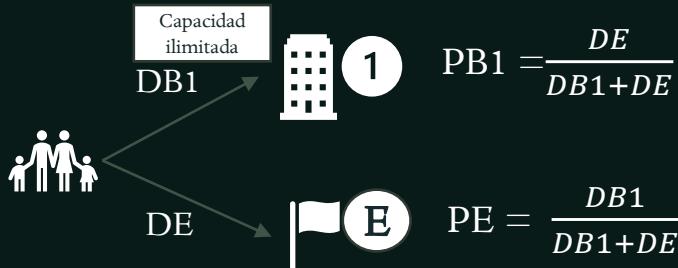
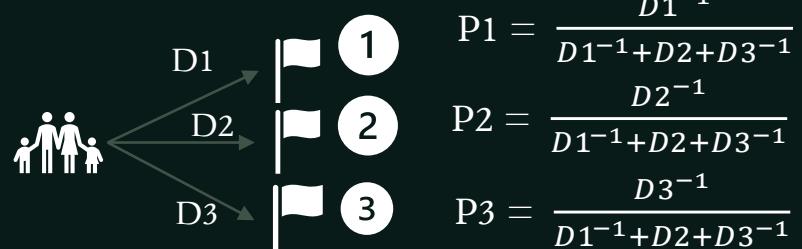
Escenario 2



Escenario 3



Escenario 4



Métricas de rendimiento

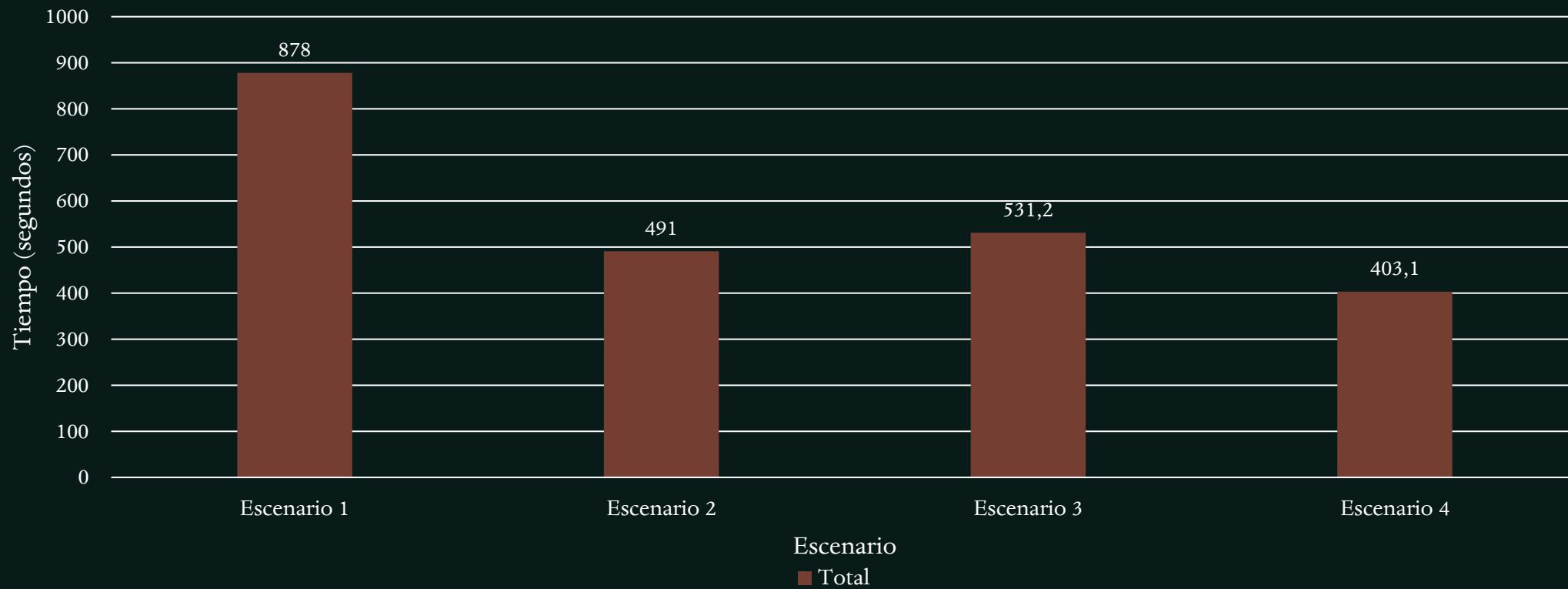


- Tiempo de evacuación promedio ✓
- N° total de evacuados ✓
- N° de personas promedio en el sistema ✓
- Flujo total de personas en calles ✓
- Personas en edificios y puntos de encuentro ✓

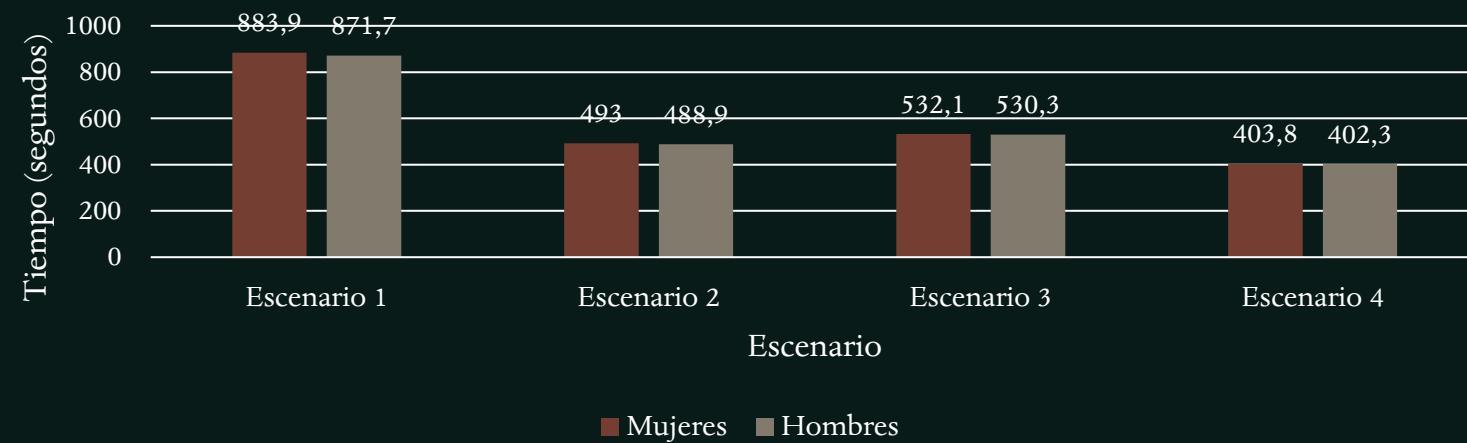
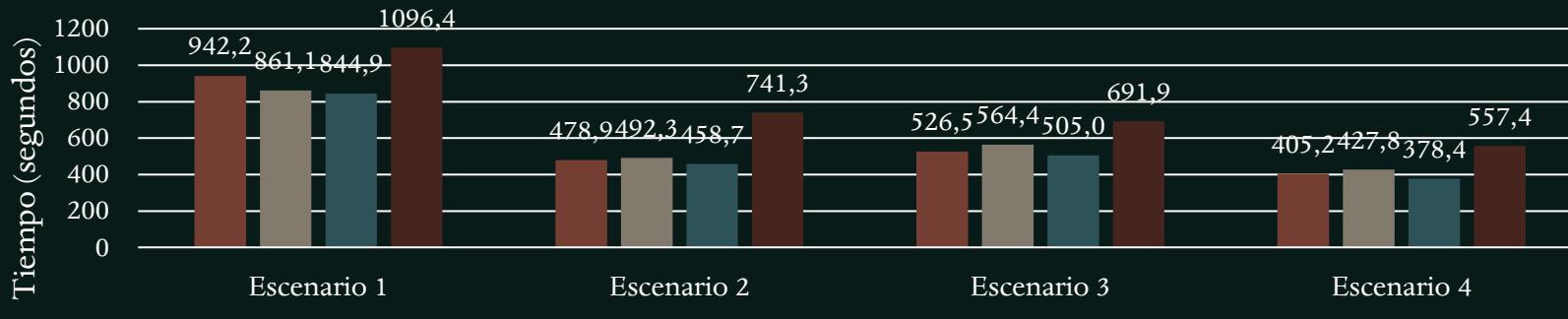
Resultados

Se ejecutaron 10 réplicas para cada escenario

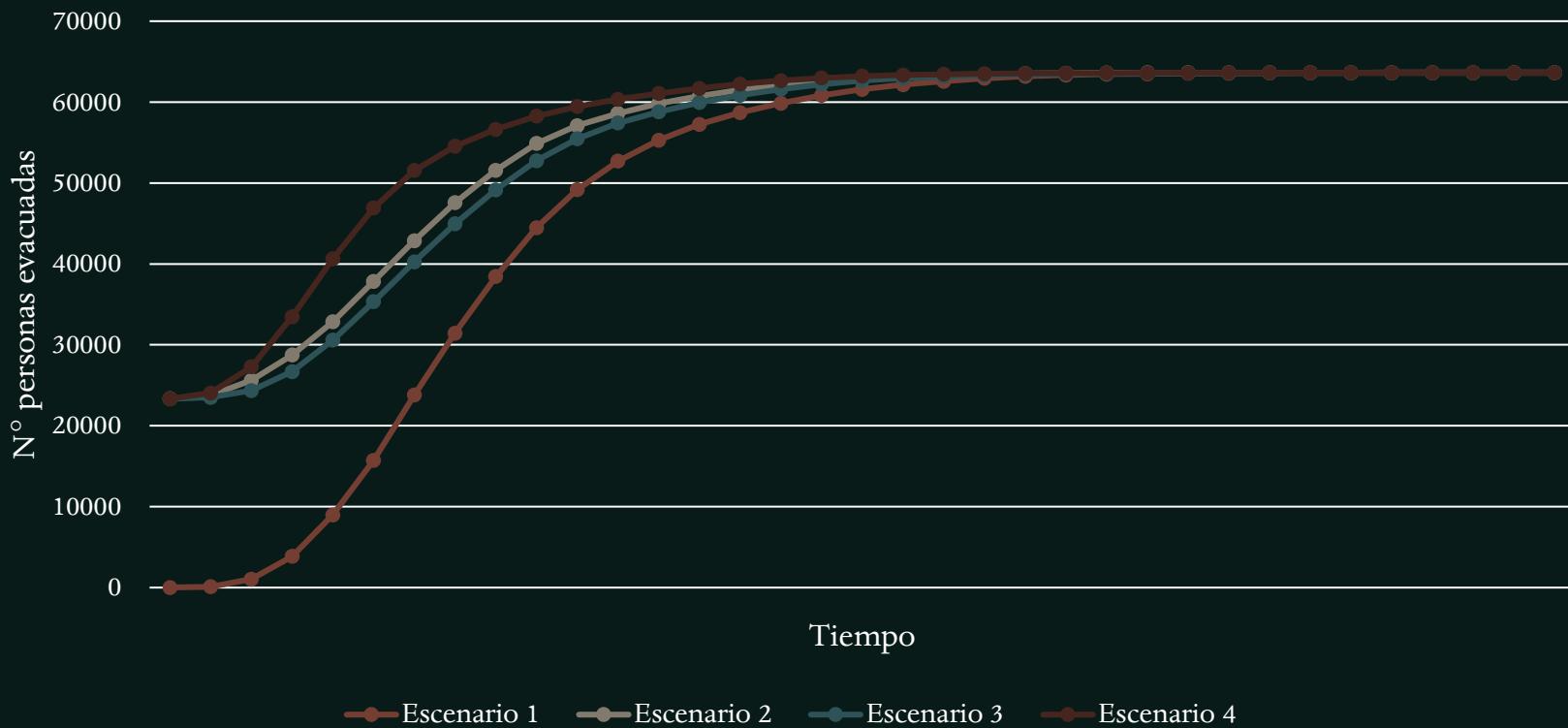
Tiempos de evacuación promedio



Tiempos de evacuación promedio



Nº total de evacuados

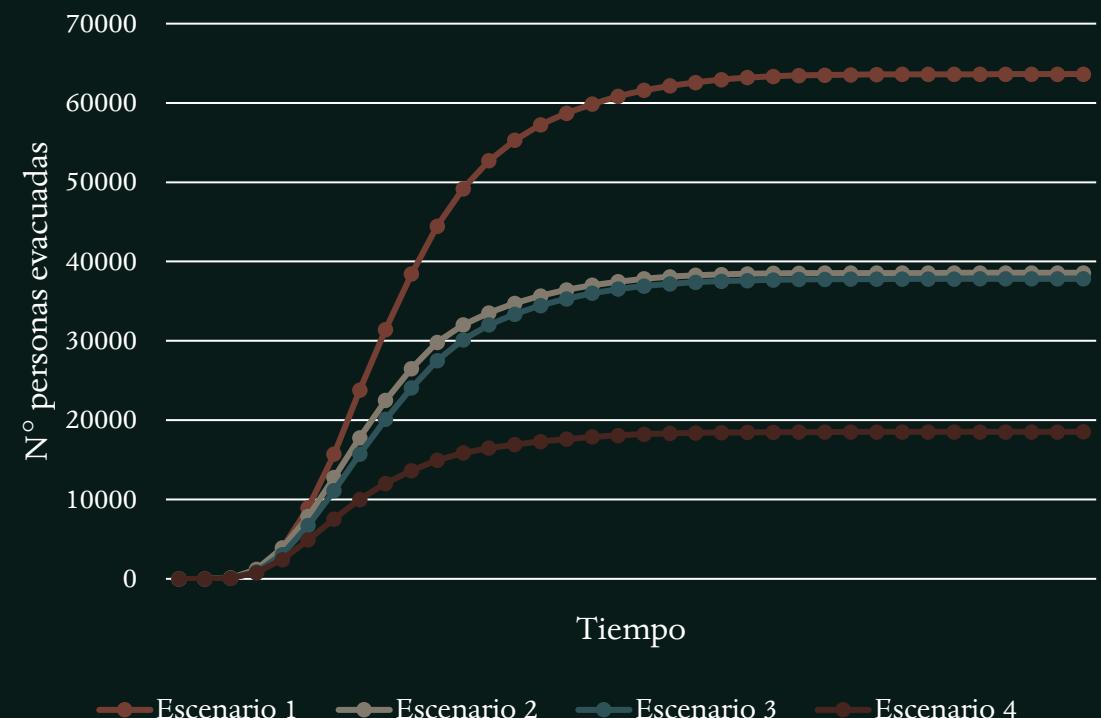


Nº total de evacuados

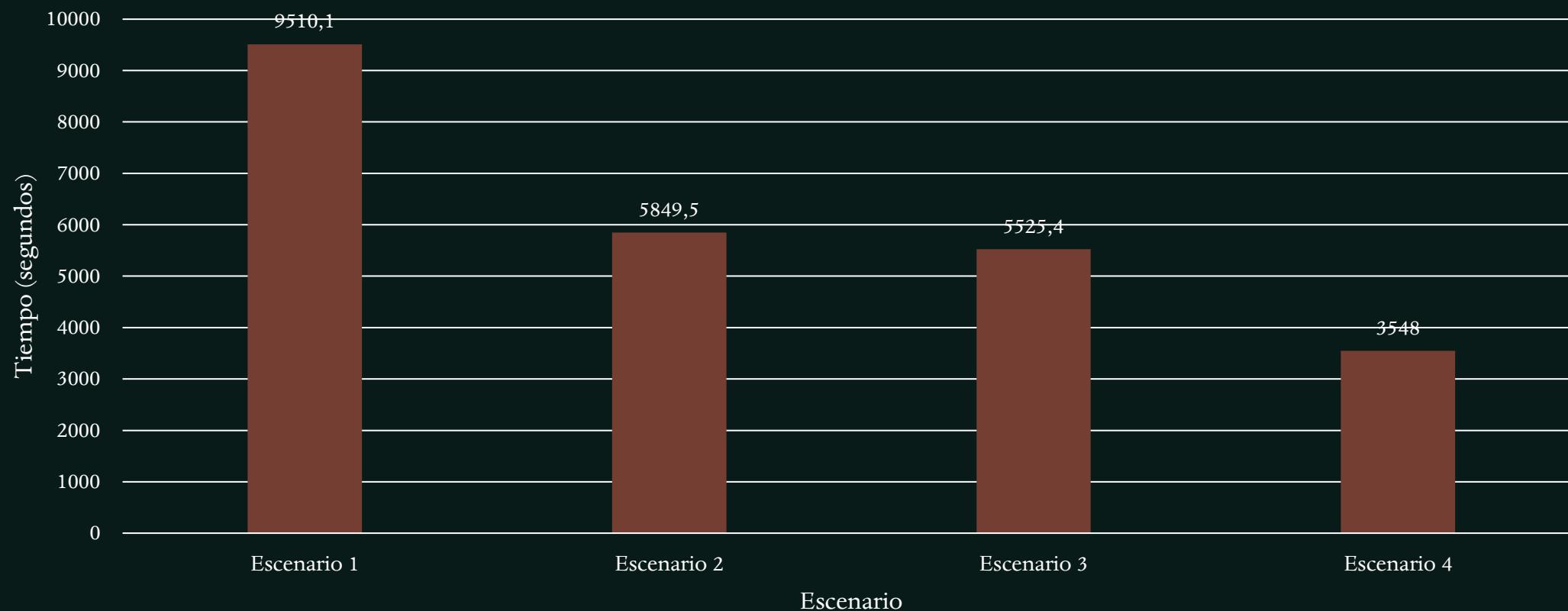
Edificios



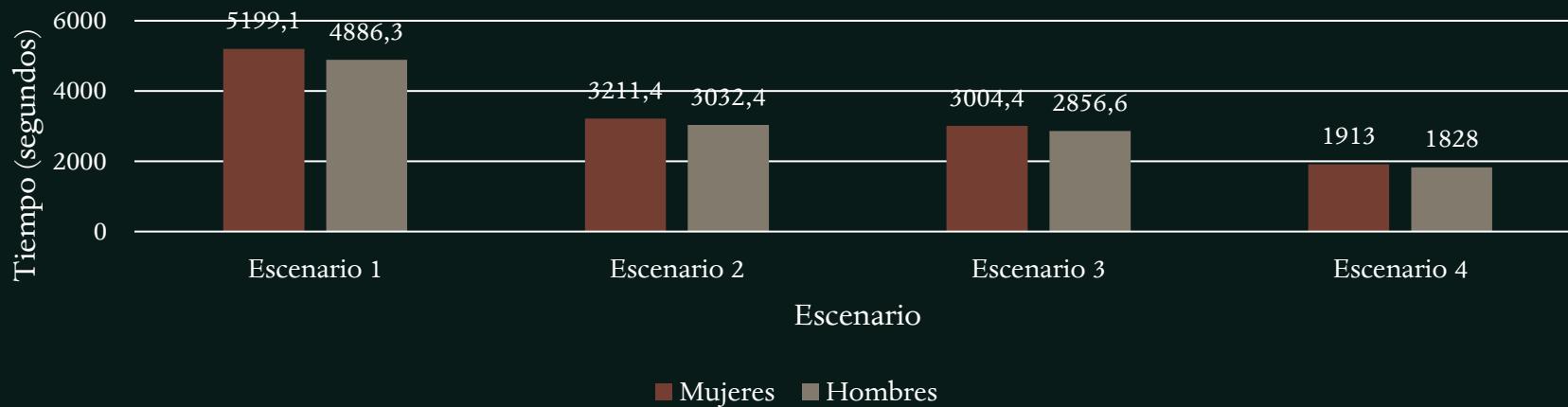
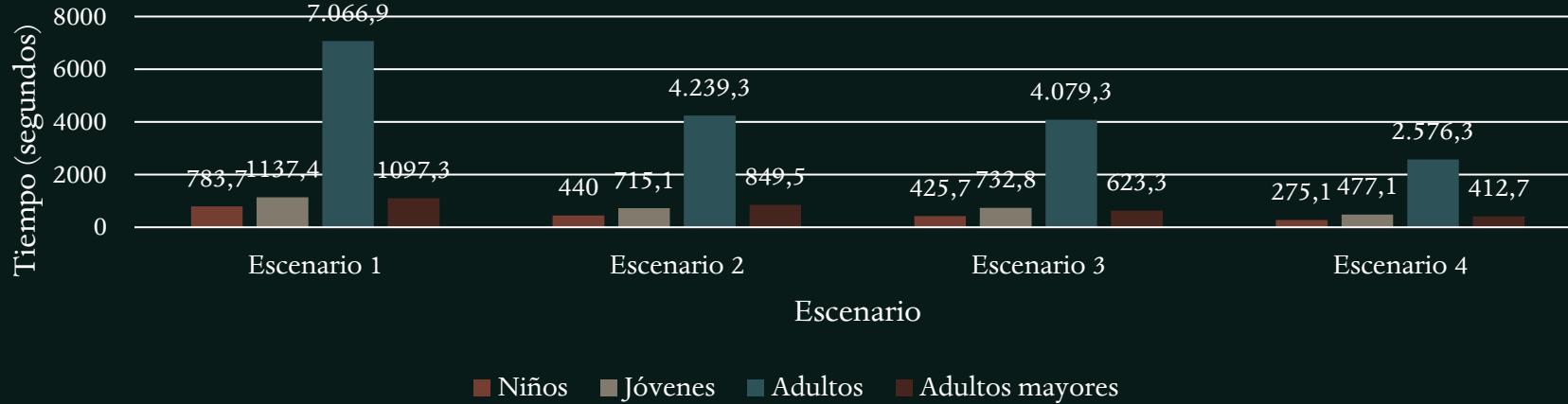
Puntos de encuentro



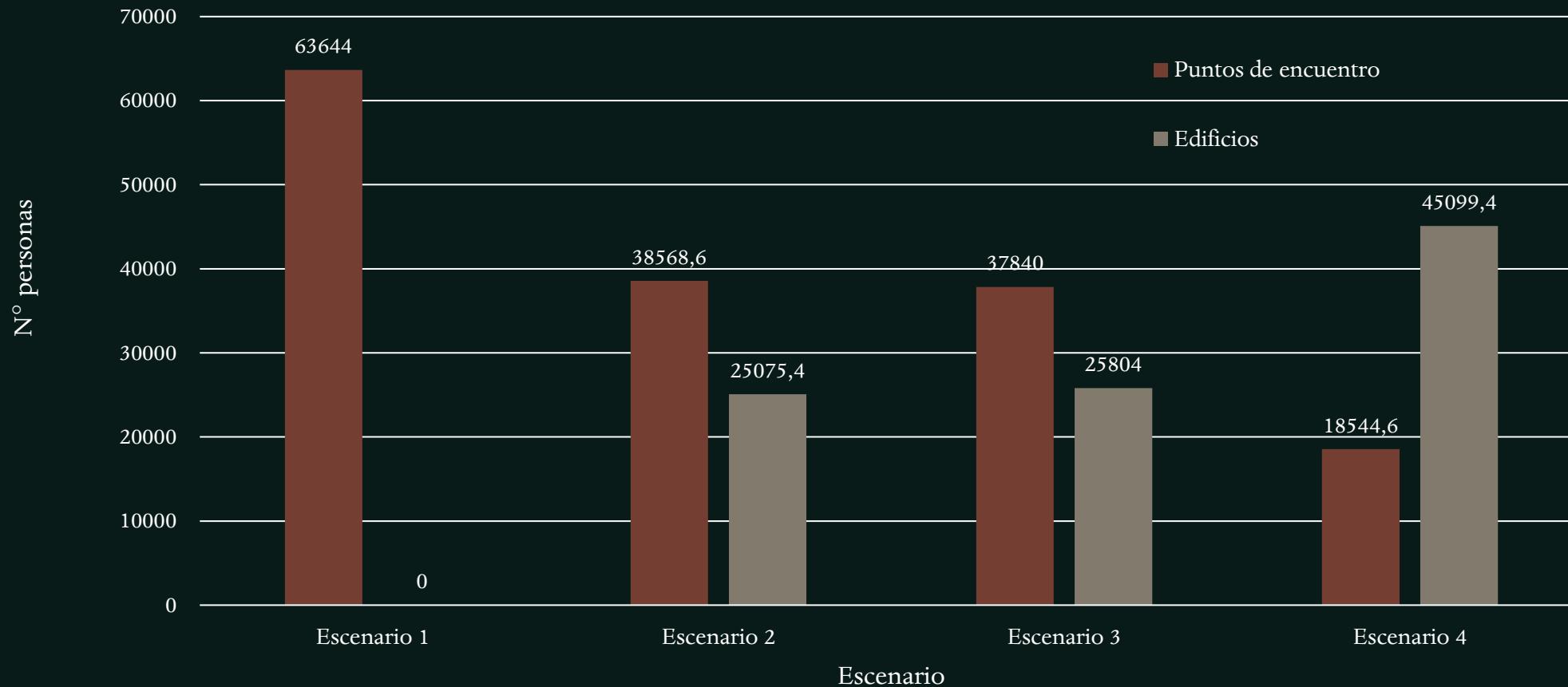
Nº personas promedio en el sistema



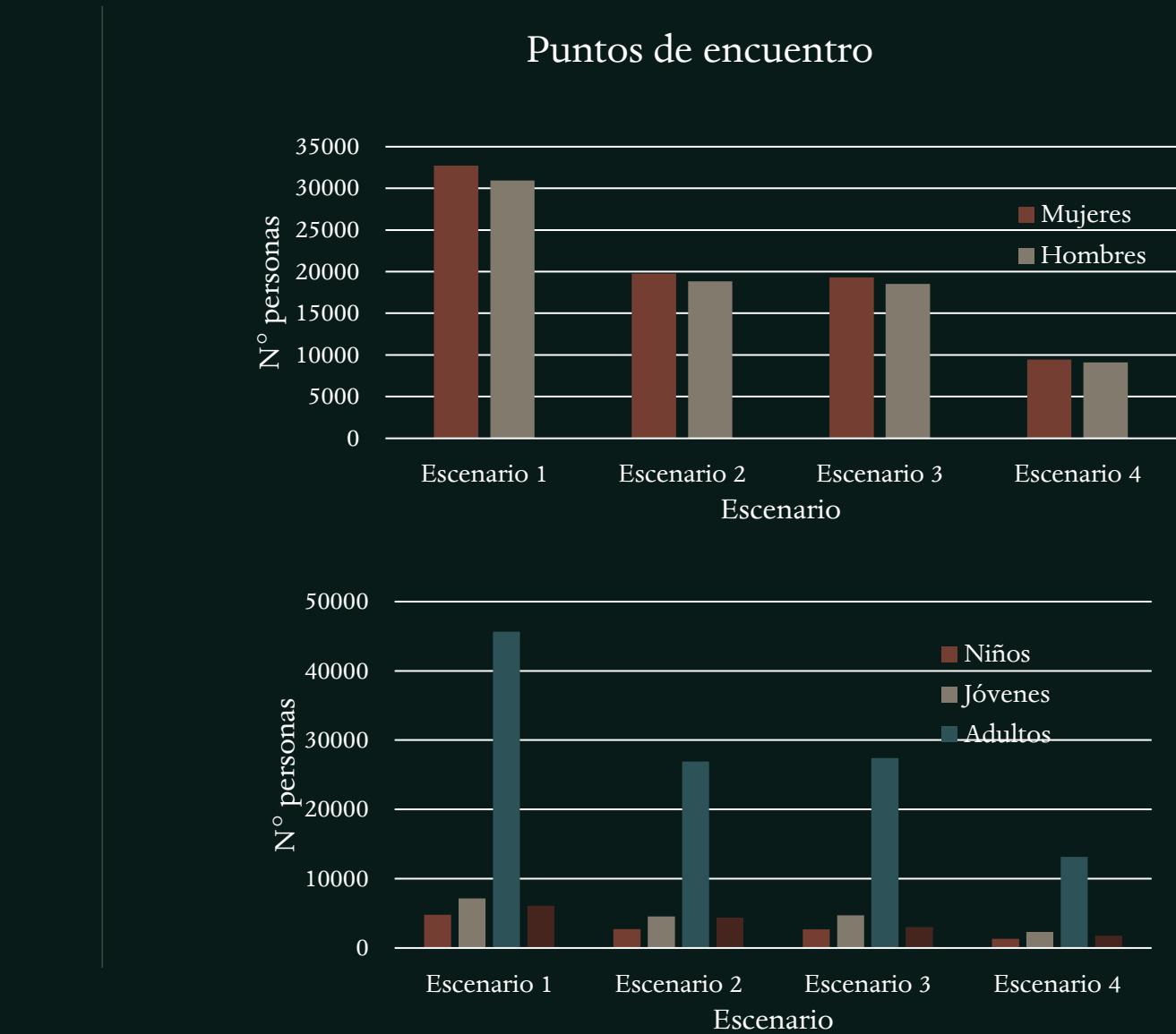
Nº personas promedio en el sistema



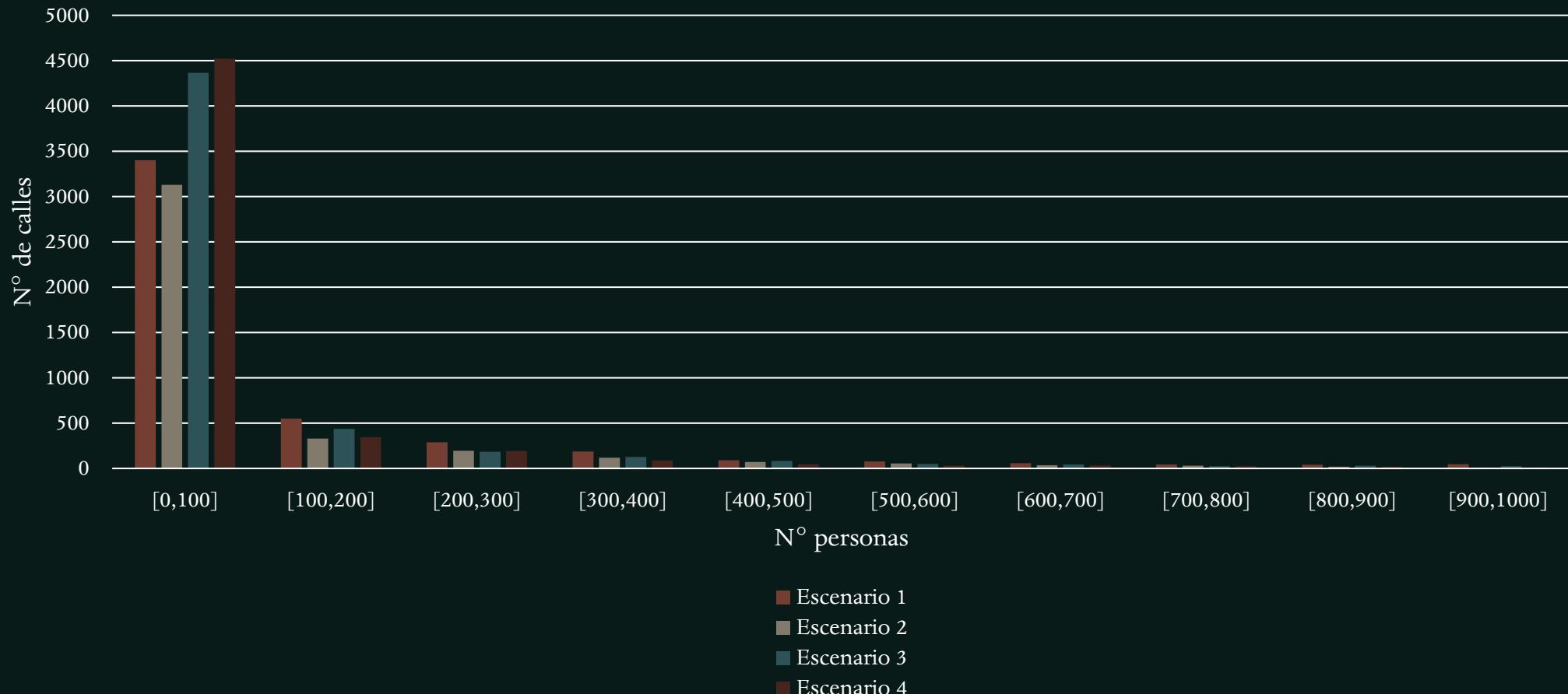
Personas en edificios y puntos de encuentro



Personas en edificios y puntos de encuentro



Flujo de personas en calles



Discusión

- Escenario 1 obtuvo peores resultados, mientras que el Escenario 4 obtuvo los mejores resultados, presentando a su vez la mayor cantidad de evacuados a edificios debido ya que estos contaban con capacidad ilimitada.
- Los resultados de los escenarios 2 y 3 se ubicaron en un punto intermedio, lo cual se explica principalmente por la capacidad limitada de los edificios que conllevó a evacuar a menos familias a dichos edificios, en comparación con el escenario 4.
- Impacto en la disminución de congestión en calles y tiempos de evacuación de las personas que viven en edificios, ya que corresponden a un 86,4 % de las personas que evacuan a edificios y a un 36,7% de la población total a evacuar.
- De aquí se ratifica la idea de que aumentar la capacidad de los edificios, junto con evacuar a la mayor cantidad de familias que se encuentren más cercanos a éstos, efectivamente producen una mejora en los resultados, reflejada principalmente en el Escenario 4, el cual fue llevado al extremo en cuanto a las capacidades ilimitadas de los edificios para evidenciar dicha mejora.
- El Escenario 2 obtuvo mejores tiempos de evacuación promedio, mientras que el Escenario 3 obtuvo un menor número de personas promedio en el sistema ,junto con una mayor cantidad de personas refugiadas en edificios. Adicionalmente, el Escenario 3 superó en cantidad de adultos mayores refugiados en edificios al Escenario 2, caso contrario ocurrió con los niños. En definitiva, el Escenario 3 presentó un mayor tiempo de evacuación promedio general en post de reducir la congestión.

Discusión

V E N T A J A S

El modelo incorpora aspectos realistas en el preprocesamiento, principalmente:

- Cálculo de rutas más cortas a destinos
- Aleatoriedad en elección de rutas y destino en función de composición familiar
- Incorporación de entidades que representan familias. Esto permite una mayor flexibilidad computacional sin perder eficiencia, lo que da pie a la posibilidad de testear muchas configuraciones escenarios de evacuación.

D E S V E N T A J A S

- Si bien se incorpora cierto grado de realismo en el preprocesamiento, no existe una toma de decisiones en tiempo real durante el recorrido de las rutas, ya que de ser así implicaría mayor costo computacional.
- La no implementación de una distribución diurna de la población, la cual cambia por completo el panorama de evacuación ya que existen otras variables a considerar (por ejemplo el tráfico de vehículos) y solo se contempló un escenario noche en donde se asume las familias se encuentran en sus hogares.

Conclusiones y trabajos futuros

CONCLUSIONES

- Evacuación vertical conduce a una reducción de los tiempos de evacuación y congestión en las calles.
- Se proporcionó la información desglosada con respecto a las personas evacuadas en puntos de encuentro, lo cual tiene como utilidad la mejora de asignación de recursos a las personas refugiadas.
- Mediante este trabajo es posible proporcionar una herramienta confiable para la elaboración de planes de evacuación de tsunami.

TRABAJOS FUTUROS

- Incorporar un escenario día.
- Incorporar modelos predictivos del comportamiento humano.
- Integrar modelo actual con simulación de tsunami.
- Incorporar nueva estrategia de evacuación con vehículos.
- Replicar y automatizar este trabajo en otras zonas del país.