



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



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

POR

Pablo Sebastián Jerez Agurto

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Industrial

Profesor Guía

Rodrigo De la Fuente Gallegos, Ph.D.

Enero, 2022
Concepción, Chile

©2022 Pablo Sebastián Jerez Agurto

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Resumen

En un momento de evacuación pre-tsunami, generalmente se recomienda tomar la ruta más corta al refugio más cercano en zona segura, sin embargo, un camino alternativo a un edificio cercano puede ser más corto. En este sentido, la planificación estratégica de la asignación de refugios y la selección de rutas podría ser potencialmente beneficiosa ya que maximizaría la supervivencia de la población. Este estudio tiene como objetivo desarrollar un modelo de simulación de evacuación de tsunami basado en eventos discretos integrado con GIS y población sintética para la ciudad de Antofagasta, Chile, el cual permita identificar las principales implicancias de incorporar distintos aspectos de una evacuación vertical mediante la creación de distintos escenarios. La evacuación vertical consiste en la evacuación hacia edificios, en contraparte de la evacuación horizontal, que corresponde a la evacuación hacia zonas de refugio. Los datos de entrada del modelo se construyeron a partir de una población sintética y la información georeferencia de la zona de estudio. El simulador por su parte consta de cuatro escenarios; el primero considera evacuación a puntos de encuentro, el segundo considera una elección estocástica de las familias a puntos de encuentro o edificios, el tercero asigna a las familias a edificios mediante un modelo de optimización y el cuarto representa lo mismo que el segundo escenario, pero con capacidades ilimitadas de edificios. Se calcularon tiempos de evacuación promedio y número de personas promedio en el sistema para evaluar que escenario era el mejor. Los resultados arrojaron que la evacuación vertical proporciona menores tiempos de evacuación y congestión en las calles de forma consistente en comparación a la evacuación horizontal. Por último, se concluyó que el modelo es capaz de proporcionar una herramienta de apoyo para la elaboración de planes de evacuación de tsunamis.

Abstract

At a time of pre-tsunami evacuation, it is generally recommended to take the shortest route to the nearest shelter in a safe zone, however, an alternative route to a nearby building may be shorter. In this sense, the strategic planning of the reservation of refuges and the selection of routes could be very beneficial since it would maximize the survival of the population. This study aims to develop a tsunami evacuation simulation model based on discrete events integrated with GIS and synthetic population for the city of Antofagasta, Chile, which allows identifying the main implications of incorporating different aspects of a vertical evacuation by creating of different scenarios. Vertical evacuation consists of evacuation towards buildings, as opposed to horizontal evacuation, which corresponds to evacuation towards refuge areas. The input data of the model was built from a synthetic population and the georeference information of the study area. The simulator for its part consists of four scenarios; the first considers evacuation to meeting points, the second considers a stochastic choice of families to meeting points or buildings, the third assigns families to buildings through an optimization model, and the fourth represents the same as the second scenario, but with unlimited building capacities. The average evacuation times and the average number of people in the system were calculated to evaluate which scenario was the best. The results showed that vertical evacuation consistently provides shorter evacuation times and street congestion compared to horizontal evacuation. Finally, it was concluded that the model is capable of providing a support tool for the development of tsunami evacuation planes.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	4
2. Revisión Bibliográfica	5
2.1. Modelos de evacuación	5
2.1.1. Tipos de evacuación	7
2.1.2. Características de los Agentes	7
2.1.3. Características de la Red	8
2.1.4. Representación de la Población	9
2.1.5. Métodos de optimización	9
2.2. Revisión	10
3. Metodología	12
3.1. Caso estudio	12
3.2. Preprocesamiento de los datos	13
3.2.1. Obtención de familias en zona de evacuación	13
3.2.2. Obtención de edificios y puntos de encuentro	15
3.2.3. Implementación de la red nodal	17
3.2.4. Asociación de familias y refugios a la red	18
3.2.5. Rutas de escape	19
3.2.6. Elección rutas de escape	20
3.3. Modelo matemático	21
3.4. Simulación	23

3.4.1. Eventos	25
3.4.2. Escenarios	27
3.5. Métricas de comparación de escenarios	29
3.5.1. Tiempo evacuación promedio	29
3.5.2. Número total de evacuados	29
3.5.3. Número personas promedio en el sistema	30
3.5.4. Flujo de personas en calles	30
3.5.5. Personas en edificios y puntos de encuentro	31
4. Resultados experimentales y discusión	32
4.1. Tiempos de evacuación promedios	33
4.2. Número total de evacuados	35
4.3. Número de personas promedio en el sistema	36
4.4. Personas en edificios y puntos de encuentro	37
4.5. Flujo calles	39
4.6. Rendimiento computacional	39
4.7. Discusión	41
5. Conclusión	43
6. Anexo	44
6.1. Desglose refugiados en puntos de encuentro	45

Índice de figuras

3.1.	Área de estudio.	13
3.2.	Zona de evacuación y familias población sintética.	14
3.3.	Zona de evacuación, edificios y puntos de encuentro.	15
3.4.	Diagrama de flujo creación edificios.	16
3.5.	Ampliación de la red nodal.	18
3.6.	Asociación de familias a nodos.	18
3.7.	Rutas de escape.	21
3.8.	Diagrama de flujo simulador.	24
4.1.	Tiempos de evacuación promedios total.	33
4.2.	Número de evacuados promedio acumulado.	36
4.3.	Número de personas promedio en el sistema.	37
4.4.	Comparación de escenarios.	38

Índice de tablas

2.1. Resumen de enfoques utilizados en el estudio de evacuación de desastres	10
3.1. Estructura población sintética.	14
3.2. Rutas hogar - puntos de encuentros.	19
3.3. Rutas hogar - edificios.	19
3.4. Rutas edificio - puntos de encuentros.	20
3.5. Rutas de familias.	20
3.6. Rutas finales de familias.	21
3.7. Tiempos de salida según composición familiar.	25
4.1. Tiempos de evacuación promedio total.	33
4.2. Tiempos de evacuación promedios a edificios.	34
4.3. Tiempos de evacuación promedios a puntos de encuentro.	34
4.4. Tiempos de evacuación promedio último evacuado.	35
4.5. Número de personas promedio en el sistema.	36
4.6. Evacuados en edificios.	37
4.7. Evacuados en puntos de encuentro.	38
4.8. Flujo de personas total en calles.	39
4.9. Tiempo de cómputo escenarios.	40
6.1. Evacuados en puntos de encuentro, Escenario 1.	45
6.2. Evacuados en puntos de encuentro, Escenario 2.	46
6.3. Evacuados en puntos de encuentro, Escenario 3.	47
6.4. Evacuados en puntos de encuentro, Escenario 4.	48

Capítulo 1

Introducción

Durante los últimos 3600 años se han producido en el mundo 252 tsunamis que han provocado más de 540.000 muertes (Mendoza and Herrera, 2021). El tsunami en Océano Índico del 2004 dejó un total de más de 283.100 víctimas fatales, 14.100 de ellas catalogadas como desaparecidas (González and Figueras, 2005) y pérdidas monetarias de alrededor de 13.000 millones de dólares (Jayasuriya and McCawley, 2010). El terremoto y tsunami de Japón el año 2011 dejó alrededor de 30.000 muertos y desaparecidos y daños aproximados a los 235.000 millones de dólares (Gómez Quezada, 2011), en donde la mayor parte de las víctimas corresponde a los daños del tsunami.

En este contexto, Chile destaca por ser una de las regiones más sísmicas del mundo (Lomnitz, 2004) y una de las regiones más peligrosas del planeta (Red-Cross, 2018). El total de muertes ocasionadas por los terremotos en Chile bordea las 50.000 en toda su historia y tan sólo en los años 1960, 1971 y 1985 ocasionaron daños por más de 1000 millones de dólares. De esta extensa lista, destaca el terremoto en 1960 en Valdivia, siendo el mayor terremoto de la historia reciente de nuestro planeta, con 9.5 grados en la Escala de Richter. Recientemente el pasado 27 de Febrero de 2010 se registró el segundo terremoto más fuerte de la historia de Chile y uno de los cinco más potentes registrados a la fecha, el cual ocasionó posteriormente un tsunami de grandes proporciones. Se estiman alrededor de 512 muertos, 16 desaparecidos y 800.000 personas damnificadas, junto con un daño bruto total, público y privado de 30.000 millones de dólares en capital y patrimonio, equivalente al 18 % del PIB (Org, 2010).

Dado que Chile es un país que está expuesto a desastres de origen sísmico, es primordial contar con un plan de emergencias y un sistema de alarmas que permita a las autoridades gubernamentales gestionar la evacuación de la forma más eficaz posible. Producto de los desastres ocurridos en años anteriores, en particular el terremoto y posterior tsunami ocurrido en Chile el año 2010, la concientización acerca del peligro de tsunamis ha sido reforzada mediante la inversión en educación, colocación de señalización en vías de evacuación, mejoras en mapas de inundación, realización de simulacros y reconstrucción del borde costero incluyendo infraestructura de protección (Álvarez Castillo, 2017). Esto acompañado de una mejora en el sistema de alertas conducen a una evacuación más rápida y segura (Fritz et al., 2011). Mencionado esto, la evacuación vertical surge como una alternativa viable para incorporar a dicho plan de emergencias, ya que permite reducir los tiempos de evacuación, pero viene condicionada por la calidad de los edificios para resistir la catástrofe y su capacidad de albergar personas.

La motivación de este trabajo radica en crear una herramienta de apoyo a las entidades gubernamentales encargadas de la gestión de evacuación de tsunamis. Esto surge en base a la necesidad de crear un plan de emergencia acorde a la situación a fin de evitar al máximo posible el número de víctimas fatales, tomando como experiencia el historial de tsunamis y planes de emergencia ejecutados en el pasado. El objetivo principal es crear un modelo de simulación de evacuación de tsunami basado en población sintética y GIS (sistema de información geográfica) que modele los eventos previos a un tsunami para la ciudad de Antofagasta y que permita identificar factores críticos de la evacuación en la creación de un plan de emergencia, validando o descartando posibles escenarios que vienen dados principalmente por la decisión de evacuar hacia puntos de encuentro ubicados en zona segura o hacia edificios ubicados en zona de evacuación.

En cuanto a la línea de investigación sobre los modelos de evacuación, actualmente aún existen deficiencias principalmente relacionadas con la flexibilidad y eficiencia computacional, es decir, consideraciones más realistas requieren mayor tiempo de cómputo. Los modelos macroscópicos como el desarrollado por Wood and Schmidlein (2012) no incluyen descripciones exhaustivas sobre entidades individuales tales como características de los evacuados o vehículos, pero si logran capturar en alto nivel la red de transporte para modelar

el flujo de tráfico y poseen un costo computacional bajo. Los modelos microscópicos basados en autómatas celulares (CA) como el desarrollado por Chang et al. (2020) no son aplicables a la planificación de evacuaciones que modelan evacuaciones complejas e irregulares en la red de tráfico. Los modelos microscópicos de simulación basada en agentes (ABS) como el desarrollado por Mostafizi et al. (2019) logran capturar el comportamiento humano e incorporar aspectos reales de la red de tráfico, sin embargo son computacionalmente costosos. Por otro lado, una práctica habitual en evacuaciones verticales como la desarrollada por Mas et al. (2012) es asignar a las personas a edificios según nivel de proximidad, sin considerar las capacidades reales de éstos durante la evacuación.

En el presente trabajo se pretende implementar un modelo de simulación basado en eventos discretos integrado con GIS y población sintética que permita capturar aspectos realistas tanto de la red como de las personas a un costo computacional razonable. A cada familia se le asigna una ruta de evacuación y un tiempo de salida en base a su composición familiar. Se incluye un escenario de optimización en donde se asignan familias a edificios limitados por las capacidades de éstos, y se utiliza como base de la red la información proporcionada por GIS, considerando las particularidades de cada familia durante la evacuación, obtenidas directamente de la población sintética. En definitiva, las contribuciones a la línea de investigación de modelos de simulación de evacuación de tsunamis son: i) incorporación de agentes como familias y asignación de tiempos de salida según composición familiar, ii) incorporación de elección de rutas, iii) método de optimización que asigna familias a edificios en evacuación vertical, e iv) incorporación de capacidades reales de edificios en función de su ocupación.

Dicho esto, lo que se presenta en los siguientes capítulos está estructurado de la siguiente manera: En el Capítulo 2 se presenta una revisión de literatura relevante y actualizada sobre modelos de evacuación y sus principales consideraciones, en el Capítulo 3 se presenta la línea de trabajo realizada, desde la recolección de los datos hasta el desarrollo mismo del modelo computacional, en el Capítulo 4 se presentan los resultados, discusión, limitaciones del modelo y trabajos. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones generales del trabajo realizado.

1.1. Objetivos

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.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1. Modelos de evacuación

Dentro de los modelos de evacuación que se han propuesto para situaciones de emergencia se encuentran; (1) Cellular automata (Chang et al., 2020; Chen et al., 2020; Kitamura et al., 2020; Li et al., 2021), las cuales discretizan el dominio computacional en pequeñas celdas, que pueden estar vacías u ocupadas por exactamente un peatón. Cada uno de estos peatones puede desplazarse a una de sus celdas vecinas desocupadas en cada paso de tiempo discreto basado en ciertas probabilidades de transición (Kirchner and Schadschneider, 2002). Los modelos son altamente eficientes y muestran un gran potencial para simulaciones de evacuación a gran escala (Chu, 2009). Sin embargo, el modelo CA no puede representar adecuadamente los comportamientos de caminata de los peatones ya que se formula a partir de espacios y tiempos discretos (Lu et al., 2017). (2) En los modelos basados en agentes (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) cientos o miles de agentes pueden operar simultáneamente para explorar las conexiones entre el comportamiento a nivel micro de los individuos y los patrones de nivel macro que surgen de sus interacciones (Mas et al., 2012), sin embargo presentan un alto costo computacional. (3) La simulación basada en eventos discretos (DES) consiste en una serie de eventos separados y discretos, que ocurren a lo largo de cierto tiempo, y que alteran el estado de un sistema. A pesar de las limitaciones de flexibilidad y

practicidad en el modelado, no solo pueden lograr un rendimiento razonable si no que también pueden tener un tiempo de computación bastante bajo en comparación con los modelos ABS (Suk Na and Banerjee, 2019). (4) Los modelos Low Cost Distance (LCD) (Wood and Schmidlein, 2012) utilizan un archivo ráster (los rásteres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados que discretizan el espacio mediante celdas, las cuales poseen un valor numérico que representa alguna variable de interés) de costos en el que cada celda representa la dificultad de moverse a través de un paisaje. Mientras tanto, los algoritmos de software permiten el cálculo del costo acumulado más bajo entre cada celda de este archivo ráster y uno o más puntos seleccionados (León et al., 2020). (5) Integraciones entre distintos enfoques, Suk Na and Banerjee (2019) propone un modelo de evacuación de peatones en el que integra los enfoques de los modelos basados en agentes y simulación basada en eventos discretos (ABDES) el cual puede generar mejores resultados, proporcionar un entorno informático más eficiente y finalmente desarrollar un modelo de simulación de evacuación más práctico. Por otra parte Faucher et al. (2020) propone una integración entre un modelo anisotrópico LCD y un modelo basado en agentes (ALCD y ABS). Este permite incorporar a un modelo LCD, todas las particularidades de un modelo ABS, principalmente el comportamiento de los agentes según sus atributos.

El nivel de detalle e incorporación de aspectos realistas al modelo computacional (principalmente características de los agentes y de la red en donde éstos se mueven) va a variar en función del modelo de simulación que se implemente, los cuales se mencionaron en el párrafo anterior. Sin embargo, es importante tener en consideración los siguientes puntos a fin de establecer un marco de trabajo estándar que permita identificar los elementos esenciales de la simulación, estos son: i) tipo de evacuación y su estrategia (Sección 2.1.1), ii) las características de los agentes que se piensan considerar (Sección 2.1.2), iii) las características de la red, principalmente las calles y refugios (Sección 2.1.3), iv) la distribución de la población (Sección 2.1.4) y por último v) modelos de optimización que permitan reducir los tiempos de evacuación (Sección 2.1.5).

2.1.1. Tipos de evacuación

En el contexto del estudio de evacuación de tsunamis, el principal problema es que todas las personas alcancen a evacuar antes de la llegada de la primera ola, pero como bien se mencionó en el Capítulo 1, muchas veces el resultado es trágico en el sentido del número de fallecidos y damnificados. Es por esto que algunos estudios sugieren una alternativa que permita la reducción de los tiempos de evacuación y consecuentemente el número de víctimas fatales. Esto es evacuación vertical, en donde las personas tienen la opción de dirigirse hacia algún edificio en zona de evacuación con la ventaja de recorrer una menor distancia y así evitar el contacto con la primera ola. Por ejemplo, en el trabajo de Hsiao et al. (2021) se implementa una estrategia de refugio en el lugar (SIP), incluyendo a edificios en zona de evacuación como refugios, estos están diseñados para ser más accesibles a pie en el contexto de una ocurrencia de desastre repentino. Mostafizi et al. (2019) presentan un modelo basado en agentes para evaluar distintas ubicaciones de refugios verticales y como esto impacta en el comportamiento de los evacuados y en la tasa de mortalidad esperada. Mas et al. (2013) realizaron una simulación numérica integrada con un modelo de evacuación multi-agente, para aproximar un posible terremoto en Perú. Utilizando una simulación estocástica de la distribución espacial de los residentes y el tiempo de evacuación, evaluaron la relación capacidad-demanda en cada edificio designado como punto de evacuación para tsunami y se introduce el índice de capacidad-demanda para mapear e identificar áreas de mitigación.

2.1.2. Características de los Agentes

Las características de los agentes vienen dadas por el comportamiento de las personas, éstas determinan la capacidad del agente para moverse y tomar decisiones en el modelo computacional. Para la evacuación de tsunami, como regla general se pueden considerar los siguientes tres puntos: velocidad de escape, tiempo de salida y estrategia de elección de destino. Diversos autores sugieren distintas velocidades de escape en función de los atributos físicos y/o psicológicos de las personas. Por ejemplo, Kitamura et al. (2020) sugieren una velocidad de escape constante de $0.74 \frac{m}{s}$ y un tiempo de salida de 14 minutos después de ocurrido el terremoto, basados en resultados de investigaciones en la zona de estudio, Barnes

et al. (2021) proponen velocidades en función de la edad y sexo (niños y adultos varones poseen velocidades de $0.8 \frac{m}{s}$ y $1.34 \frac{m}{s}$ respectivamente), adicionalmente consideran índices de velocidad en función del tamaño del grupo de escape (los individuos tienen un índice de velocidad de 1.0 y los grupos de cuatro personas poseen un índice de 0.79) y no especifican tiempo de salida por lo que se asume es constante y cero. En el trabajo de Faucher et al. (2020) la información de eventos deportivos de Puerto Rico fue usada para estimar percentiles que permitieron representar distintos escenarios de velocidad de carrera, mientras que el tiempo de salida fue calculado en base a una distribución Rayleigh. Con respecto a la elección del destino, se puede modelar desde una elección de ruta simple como entrada al modelo (Kubisch et al. (2020); Takabatake et al. (2020b); Tamakloe et al. (2021) utilizan el camino más corto utilizando el algoritmo de Dijkstra), hasta decisiones más complejas asociadas incluso a modelos predictivos que intentan describir el actuar de cada persona (Song et al. (2020) intentan predecir la trayectoria de los peatones con una red convolucional LSTM).

2.1.3. Características de la Red

El sistema de información geográfica permite dar realismo a cualquier modelo y obtener resultados representativos del mismo. Actualmente, es una herramienta estándar en el área de investigación de evacuación de tsunami y se utiliza principalmente para incluir aspectos geográficos en un modelo computacional, como ubicación de refugios y hogares, características de las calles (largo y ancho), topografía del terreno (pendiente), entre otras. En definitiva, proporciona toda la información necesaria para la creación de la red en donde interactúan los agentes, siendo su principal contribución la determinación de rutas de evacuación a través de pesos y costos. Barnes et al. (2021); Faucher et al. (2020); Kitamura et al. (2020); Kubisch et al. (2020); León et al. (2020); Nakanishi et al. (2020); Suk Na and Banerjee (2019); Wang and Jia (2021), entre otros trabajos, utilizan GIS como base de la red, el factor común en estos trabajos es calcular las rutas más cortas. Típicamente se utiliza el algoritmo de Djikstra, pero puede variar dependiendo de la zona de estudio y preferencia del autor, por ejemplo Nakanishi et al. (2020) utilizan el algoritmo A* y Kitamura et al. (2020) emplean un algoritmo propuesto k2018 basado en Djikstra. Mientras que la consideración de factores topográficos como las pendientes de las

calles o características como el largo y ancho de éstas van a depender netamente del enfoque del modelo de simulación propuesto. Por ejemplo, Kitamura et al. (2020) consideran solo la pendiente de la calle, mientras que Suk Na and Banerjee (2019) consideran tanto la pendiente, como el ancho y largo estas, lo que permite incorporar también un factor de congestión (Faucher et al., 2020) dependiente directamente del flujo de personas en las calles. En resumen, GIS es una herramienta que permite la integración de factores del mundo real al modelo computacional de forma simplificada.

2.1.4. Representación de la Población

Debido a la falta de información exacta y desagregada que proporciona el Censo sobre la población, es una práctica usual generar la población de forma estocástica a partir de registros agregados, ya que es lo más simple y directo. Por ejemplo, León et al. (2020); Muhammad et al. (2021); Takabatake et al. (2020a); Wang and Jia (2021) utilizan una población generada de forma estocástica, es decir, ubican aleatoriamente a las personas dentro sus zonas respectivas. Sin embargo, algunos autores profundizan más en este aspecto y partir de la información disponible generan una población sintética, que se acerca mucho más a la realidad que se quiere modelar. Por ejemplo, Nakanishi et al. (2020) generan una población sintética basada en la información demográfica regional. Adicionalmente, es posible considerar distintas distribuciones espaciales de la población. Por ejemplo, Álvarez Castillo (2017) utilizó la matriz origen-destino en donde a partir de las variaciones porcentuales de la población durante el mayor periodo de movilidad, logró generar un escenario diurno.

2.1.5. Métodos de optimización

En general el comportamiento de las personas durante una evacuación de tsunami es muy incierto debido a muchos factores que influyen a la hora de tomar decisiones en una situación de crisis como ésta. Sin embargo, los objetivos de un plan de emergencia deben apuntar a minimizar al máximo posible el número de víctimas fatales. En ese sentido, los modelos de optimización son capaces de proporcionar las directrices de un plan de emergencia, que si bien en la vida real es poco probable que suceda, sirven como escenarios ideales y guías para la creación de dicho

plan. Chen et al. (2020) buscan minimizar los coeficientes de influencia de las fuerzas sociales, que apunta a reducir la congestión en la evacuación. Hsiao et al. (2021), tal como se mencionó en la Sección 2.1.1, utilizan una estrategia SIP y su modelo busca maximizar la asignación de evacuados para el caso de evacuación vertical. Kitamura et al. (2020) utilizan una mejora del algoritmo k2018 de ruta más corta acorde a la zona de estudio para evitar las olas durante el recorrido de la evacuación.

La Tabla 2.1 compara la literatura clasificando cada estudio según los aspectos considerados.

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

Tabla 2.1: Resumen de enfoques utilizados en el estudio de evacuación de desastres

2.2. Revisión

Una de las principales limitantes de los trabajos revisados es que no logran integrar las componentes señaladas en la Tabla 2.1. Por ejemplo, Hsiao et al. (2021) 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. La brecha de literatura que busca cerrar este trabajo es implementar un modelo que

permite hacer un trade off entre flexibilidad y eficiencia computacional, ya que de esta forma es posible considerar algunos aspectos reales claves como la incorporación de características reales de la red, elección de rutas de evacuación de las familias y la implementación de un método de asignación a edificios limitados por sus capacidades mediante un modelo de optimización.

Capítulo 3

Metodología

Esta sección explica en detalle el procedimiento realizado en este trabajo, desde la recolección de los datos hasta el desarrollo del modelo de simulación. En primer lugar, se presenta el preprocesamiento de los datos, que incluye la integración de la población sintética e información georeferenciada de la ciudad de Antofagasta como entrada al modelo de simulación. Luego, se presenta el modelo de optimización desarrollado para la asignación de familias a edificios. Posteriormente se presenta el modelo de simulación implementado con sus respectivos escenarios. Finalmente se presentan las métricas utilizadas para la comparación y análisis de resultados. Se utilizó el software QGIS en su versión 3.16 en conjunto con Python en su versión 3.8 para el preprocesamiento de los datos, mientras que el modelo de optimización y simulación se implementó en Python en su versión 3.8.

3.1. Caso estudio

En este trabajo se seleccionó como zona de estudio la ciudad de Antofagasta. Ésta es una ciudad portuaria y capital regional en un área minera del Desierto de Atacama, en el norte de Chile. Es una de las ciudades más grandes y con mayor población del país, cuenta con alrededor de 390.000 habitantes y se encuentra en una zona costera, por lo que está fuertemente expuesta ante un eventual tsunami. En la Figura 3.1 se presenta la zona de estudio.

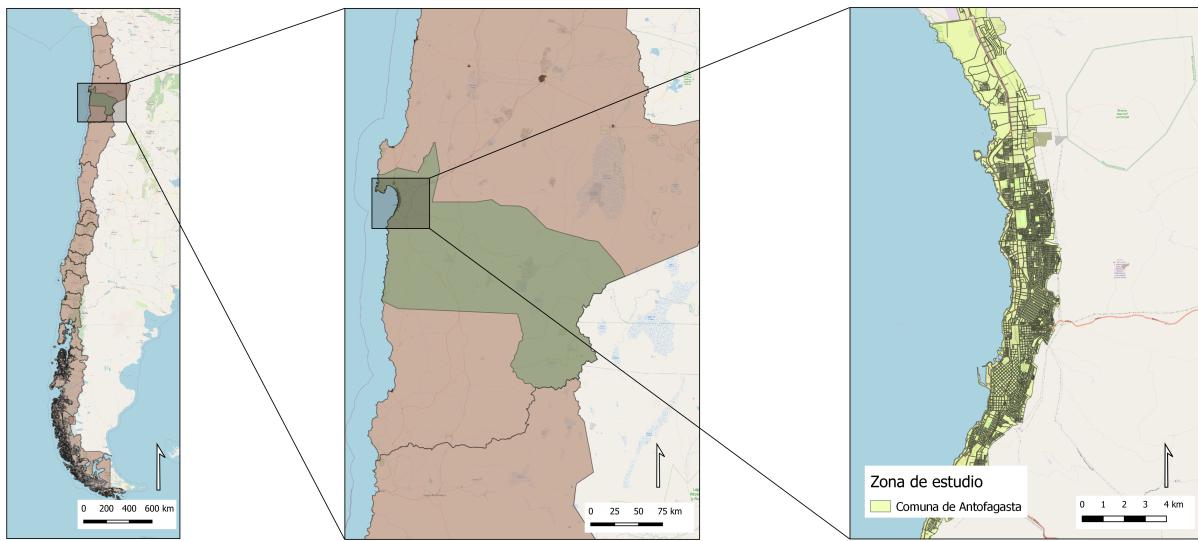


Figura 3.1: Área de estudio.

3.2. Preprocesamiento de los datos

Para incorporar la información georeferenciada de la zona de estudio, fue necesario recolectar y preprocesar los datos para su posterior ingreso al simulador, lo que se describe en las siguientes secciones.

3.2.1. Obtención de familias en zona de evacuación

La zona evacuación se utilizó para identificar a las familias que les corresponde evacuar ante una situación de tsunami. La información de los evacuados que corresponden a las familias de Antofagasta, se obtuvo directamente de la población sintética generada con el modelo propuesto por Moreno and De La Fuente (2021) a partir de los datos del Censo 2017 (INE, 2017). En la Tabla 3.1 se presenta la estructura de la población, en donde cada fila corresponde a una familia, con el desglose de sus integrantes considerando número de hombres y mujeres, número de integrantes por rangos etarios, tipo de vivienda e información sobre su geolocalización. Finalmente se filtró a las familias que se encuentran en zona de evacuación y que se consideraron para el escape. En la Figura 3.2 se presenta a modo de ejemplo una

familia seleccionada para la evacuación junto con el desglose de su composición.

ID_ZONA_LOC	ID_MANZENT	NVIV	Hombres	Mujeres	Edad_0A5	Edad_6A14	Edad_15A64	Edad_65ymás	Casa	Depto	Geolocalización
13740	8112011003501	1	0	1	0	0	1	0	1	0	(x,y)
13740	8112011003503	2	1	2	0	0	2	1	1	0	(x,y)
13740	8112011003021	3	2	3	0	1	4	0	1	0	(x,y)
13740	8112011003028	4	2	2	0	2	2	0	1	0	(x,y)
13740	8112011003032	5	1	0	0	0	0	1	1	0	(x,y)
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
12627	8112011004901	1607	1	2	0	0	2	1	1	0	(x,y)
12627	8112011004005	1608	0	2	0	0	2	0	0	1	(x,y)
12627	8112011004901	1609	3	2	0	2	3	0	1	0	(x,y)
12627	8112011004036	1610	2	1	1	0	2	0	1	0	(x,y)
12627	8112011004013	1611	2	3	1	1	3	0	1	0	(x,y)

Tabla 3.1: Estructura población sintética.

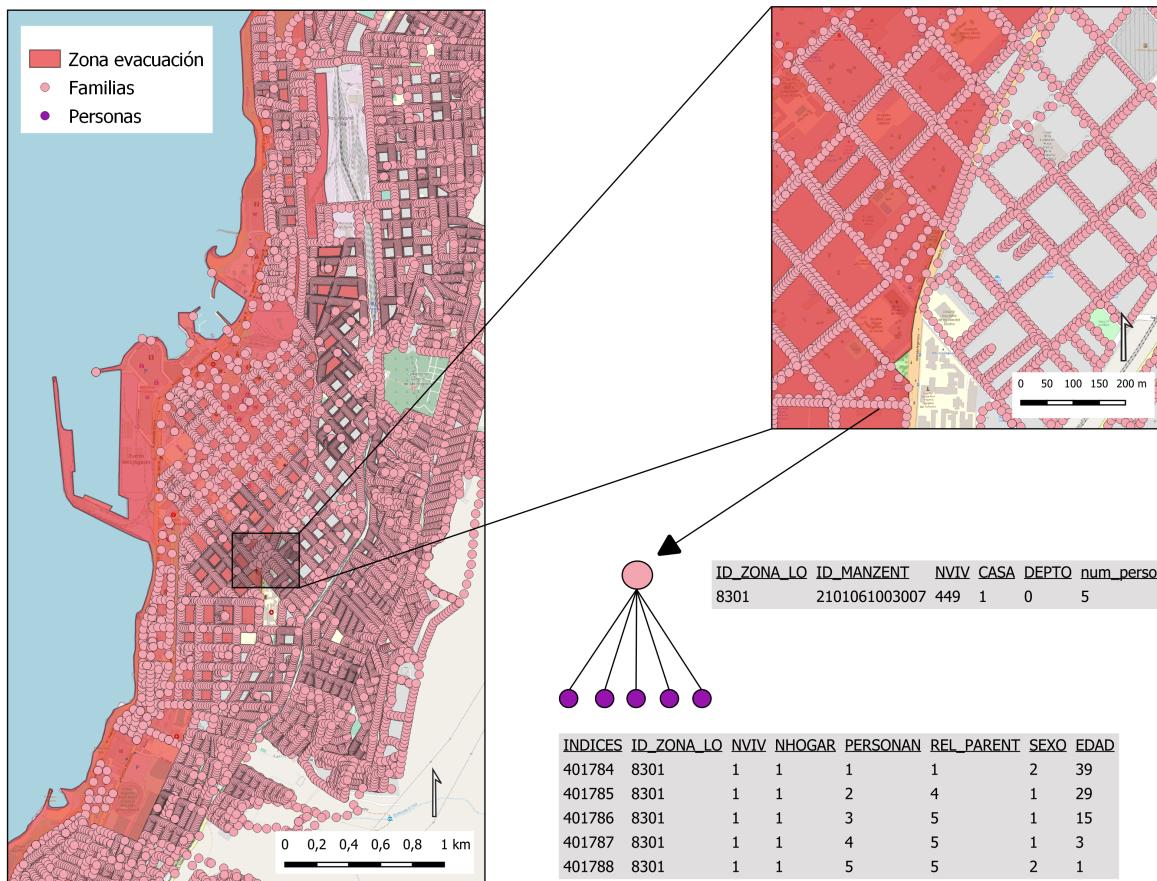


Figura 3.2: Zona de evacuación y familias población sintética.

3.2.2. Obtención de edificios y puntos de encuentro

Para este trabajo se consideraron dos tipos de refugios; puntos de encuentro para evacuación horizontal y edificios para evacuación vertical, presentados en la Figura 3.3. La información georeferenciada relacionada a los puntos de encuentro y zona de evacuación fue obtenida de ONEMI. Esta entidad gubernamental es responsable de crear los planes de evacuación y controlar la situación en casos de crisis en las ciudades de Chile.

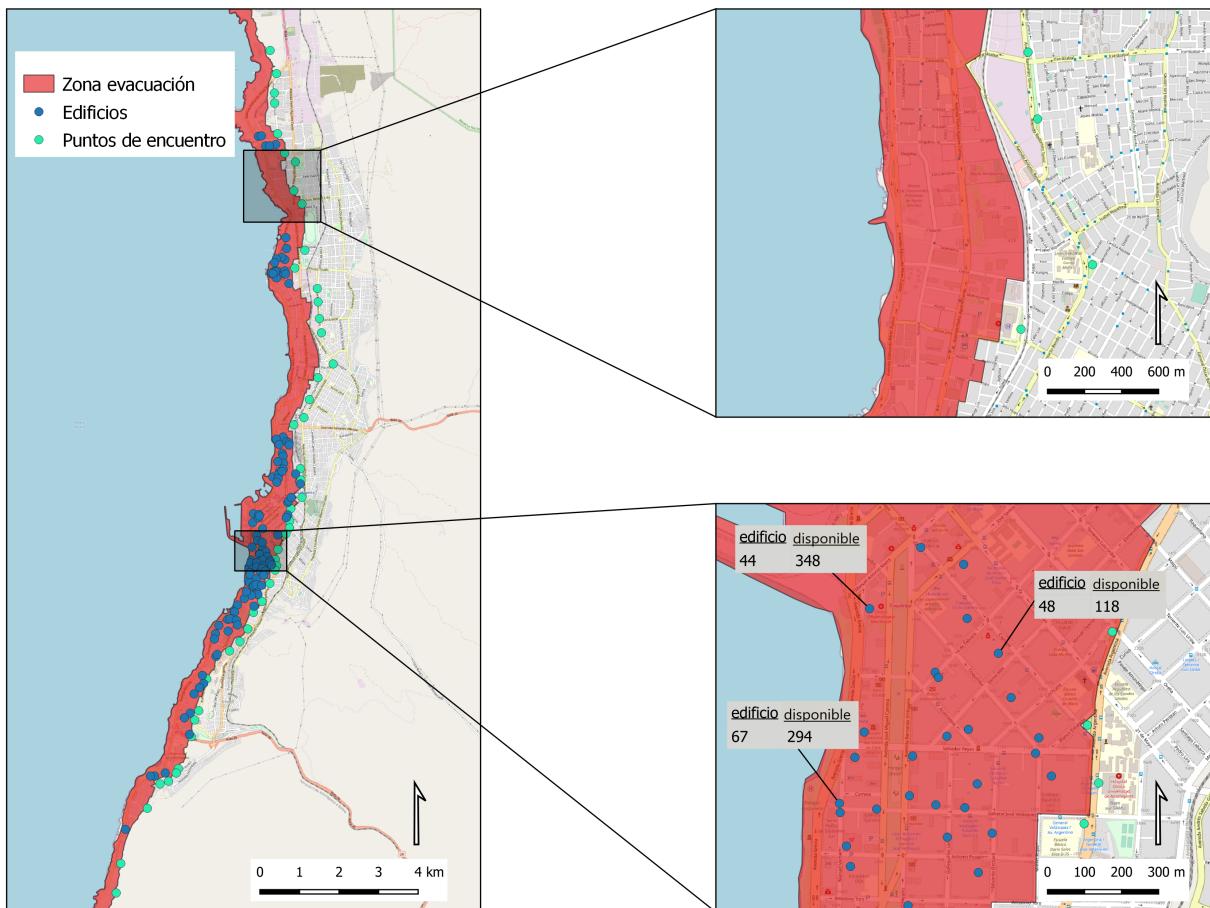


Figura 3.3: Zona de evacuación, edificios y puntos de encuentro.

Por un lado, se consideraron en total 52 puntos de encuentro los cuales se ubican fuera o en el límite de la zona de evacuación distribuidos a lo largo de toda la comuna. En cuanto a los edificios, éstos se crearon a partir de la población sintética generada, lo que se presenta en

el diagrama de flujo de la Figura 3.4. En primer lugar se filtró a las familias que viven en departamentos, luego se agrupó a dichas familias según sus manzanas. A partir de esto se generaron edificios con ubicación aleatoria dentro de la manzana, dependiendo del número de departamentos existentes al interior de ésta. Se tomó como base que un edificio tiene máximo 15 pisos y como mínimo tres para ser considerado en evacuación vertical. Cada piso tiene ocho departamentos por lo que un edificio posee un máximo de 128 departamentos y un mínimo de 24. Por ejemplo, si en una manzana existen 280 departamentos, corresponde generar tres edificios aleatorios dentro de la manzana, dos de éstos con 128 departamentos y un edificio con 24 departamentos. En total se crearon 119 edificios aptos para la evacuación vertical.

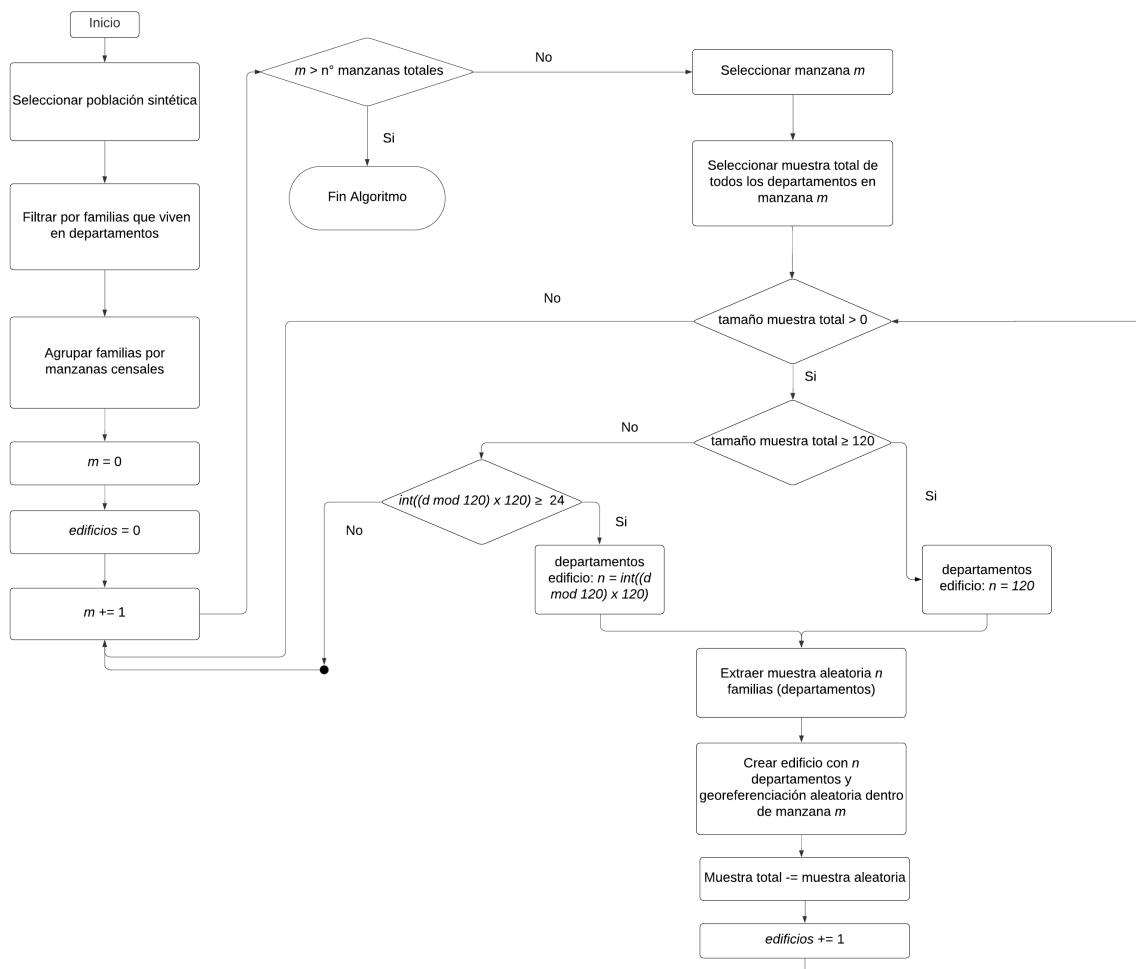


Figura 3.4: Diagrama de flujo creación edificios.

En cuanto a la capacidad, ésta fue calculada considerando un 30 % de la ocupación real del edificio, idea que surgió a partir del índice capacidad-demanda elaborado por Mas et al. (2013). Finalmente se restó el número de personas que estaban asignadas a dos pisos aleatorios, esto ya que se consideró por simplicidad que los primeros dos pisos de un edificio son vulnerables ante las olas de un tsunami. Las Ecuaciones 3.1 y 3.2 presentan el cálculo realizado para obtener las capacidades de cada edificio.

O_j : Número 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 .

$$C_j = \text{Max}(O_j; O_j \times 1,3 - 2 \times N_j) \quad (3.1)$$

$$D_j = C_j - O_j \quad (3.2)$$

3.2.3. Implementación de la red nodal

Con el objetivo de calcular las rutas de escape en base al algoritmo de la ruta más corta (Djikstra), se obtuvo la estructura de la red para asignar las familias y refugios a nodos. Cada calle posee la información de su largo y tipo de calle que determina el ancho (residencial, primaria y terciaria corresponden a cuatro, ocho y dos metros respectivamente).

Un problema que surge de la red original, es que algunas familias se encuentran muy distantes de su nodo más cercano, esto no es muy realista ya que, por ejemplo, si una familia está a la mitad de una cuadra, el algoritmo asumirá que la persona se ubica en alguna esquina. Para resolver en parte este asunto, se realizó una ampliación de la red, agregando nodos en medio de cada calle, lo que se observa en las imágenes de la izquierda y centro de la Figura 3.5. De esta forma, existe más flexibilidad para poder asociar cada familia a su nodo más cercano.

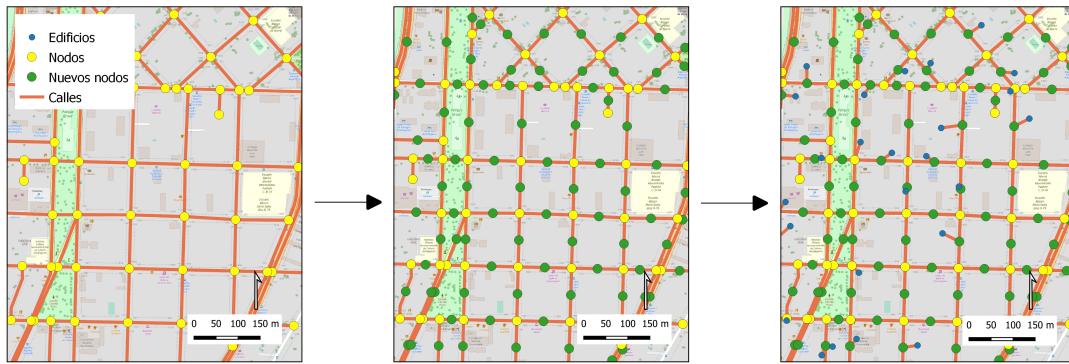


Figura 3.5: Ampliación de la red nodal.

3.2.4. Asociación de familias y refugios a la red

Con la estructura de la red modificada, en primer lugar, se mantuvo la georeferenciación original de los edificios, generadas en el proceso de creación de los mismos (Figura 3.4) y nuevamente se realizó una ampliación de la red, agregando dichos nodos junto con sus calles respectivas, lo que se ve representado en la imagen derecha de la Figura 3.5. En cuanto a las familias y puntos de encuentro, se realizó la asociación a sus nodos más cercanos, proceso graficado en la Figura 3.6. De esta forma, se obtuvo la identificación de nodos de cada familia y refugio, necesaria para calcular las rutas de escape a través de la red nodal.

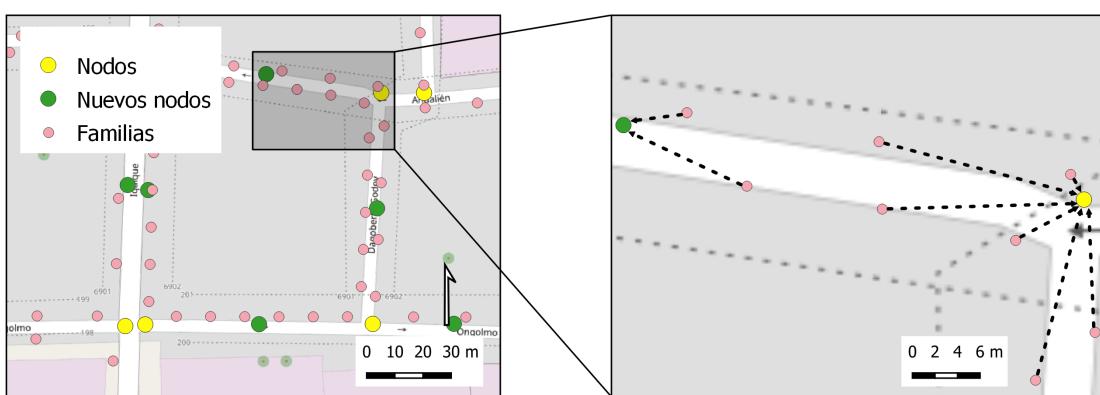


Figura 3.6: Asociación de familias a nodos.

3.2.5. Rutas de escape

Los pesos W utilizados para cada calle en el algoritmo de la ruta más corta se calcularon dividiendo la distancia por el ancho ($W = Distancia/Ancho$).

Para cada familia, se consideraron tres tipos de escape:

- **Hogares a Puntos de encuentro (H2S)** : Se calcularon las rutas de cada hogar hacia los 52 puntos de encuentro tal como se presenta en la Tabla 3.2 .

Familia	H2S
1	(ruta _{1,1} , $dist_{1,1}$, ..., ruta _{1,52} , $dist_{1,52}$)
:	(ruta _{...,1} , $dist_{...,1}$, ..., ruta _{...,52} , $dist_{...,52}$)
n	(ruta _{n,1} , $dist_{n,1}$, ..., ruta _{n,52} , $dist_{n,52}$)

Tabla 3.2: Rutas hogar - puntos de encuentros.

- **Hogares a Edificios (H2B)** : De la misma forma que en el punto anterior, se calcularon las rutas de cada hogar hacia los 119 edificios aptos para evacuación vertical, tal como se presenta en la Tabla 3.3.

Familia	H2B
1	(ruta _{1,1} , $dist_{1,1}$, ..., ruta _{1,119} , $dist_{1,119}$)
:	(ruta _{...,1} , $dist_{...,1}$, ..., ruta _{...,119} , $dist_{...,119}$)
n	(ruta _{n,1} , $dist_{n,1}$, ..., ruta _{n,119} , $dist_{n,119}$)

Tabla 3.3: Rutas hogar - edificios.

- **Edificios a Puntos de Encuentro (B2S)** : Se calcularon las rutas de cada edificio a todos los puntos de encuentro, lo que se presenta en la Tabla 3.4. Esto tiene como finalidad tener la opción de evacuar hacia un punto de encuentro en caso de que una familia haya evacuado hacia un edificio y este se encuentre en su capacidad límite.

Edificio	B2S
1	(ruta _{1,1} , $dist_{1,1}$, ..., ruta _{1,52} , $dist_{1,52}$)
:	(ruta _{...,1} , $dist_{...,1}$, ..., ruta _{...,52} , $dist_{...,52}$)
119	(ruta _{119,1} , $dist_{119,1}$, ..., ruta _{119,52} , $dist_{119,52}$)

Tabla 3.4: Rutas edificio - puntos de encuentros.

3.2.6. Elección rutas de escape

En esta etapa se determinó la configuración de los escenarios con respecto a la decisión de rutas de escape, lo que se divide en dos etapas:

Elección de posibles rutas:

En primer lugar, se escogieron las posibles rutas de escape, en base a algún criterio (por ejemplo el refugio de menor distancia) a definir en escenario, resumidas en la Tabla 3.5. Esto quiere decir que cada familia va a tener asociadas tres rutas, las cuales son H2S ,H2B y consecuentemente una ruta BS linkeada a la ruta H2B, tal como se presenta en la Figura 3.7.

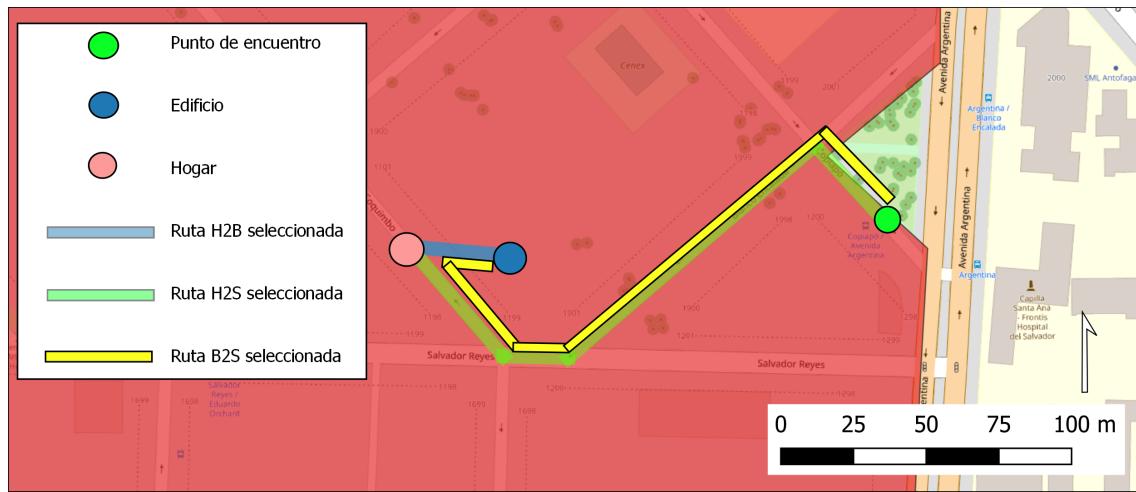
Familia	H2S	H2B	B2S
1	(ruta _{1,S_seleccionado} , $dist_{1,S_seleccionado}$)	(ruta _{1,B_seleccionado} , $dist_{1,B_seleccionado}$)	(ruta _{B,1_S_seleccionado} , $dist_{B,1_S_seleccionado}$)
:	(ruta _{...,S_seleccionado} , $dist_{...,S_seleccionado}$)	(ruta _{...,B_seleccionado} , $dist_{...,B_seleccionado}$)	(ruta _{B,..._S_seleccionado} , $dist_{B,..._S_seleccionado}$)
n	(ruta _{n,S_seleccionado} , $dist_{n,S_seleccionado}$)	(ruta _{n,B_seleccionado} , $dist_{n,B_seleccionado}$)	(ruta _{B,n_S_seleccionado} , $dist_{B,n_S_seleccionado}$)

Tabla 3.5: Rutas de familias.

Elección ruta final:

Luego, se decidió el destino final para cada familia, lo que corresponde a escoger entre H2S y H2B en base a algún criterio a definir en escenario. En caso de escoger H2B, el simulador tiene disponible la ruta B2S para utilizar en caso de que el edificio seleccionado se encuentre con capacidad máxima. De esta forma, los datos están listos para ser ingresados al simulador, estructura que se ve representada en la Tabla 3.6 a modo de ejemplo.

Familia	Elección ruta final
1	Punto de encuentro: (H2S)
2	Punto de encuentro: (H2S)
3	Edificio: (H2B),(B2S)
4	Edificio: (H2B),(B2S)
5	Punto de encuentro: (H2S)

Tabla 3.6: Rutas finales de familias.**Figura 3.7:** Rutas de escape.

3.3. Modelo matemático

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 : Número de niños en familia i .

A_i : Número de adultos en familia i .

N_i : Número 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.

PF : 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.

Formulación:

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

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

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

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

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

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

La función objetivo (3.3) busca maximizar la asignación de familias a edificios (parte izquierda) y a su vez dar prioridad a los edificios más cercanos (parte derecha). El conjunto de restricciones (3.4) aseguran que cada familia sea asignada a un sólo edificio j o bien a su punto de encuentro más cercano. El conjunto de restricciones (3.5) aseguran que las capacidades de los edificios j no sean excedidas. El conjunto de restricciones (3.6) por su parte descartan la asignación de familias a edificios j más lejanos que sus puntos de encuentro más cercanos. El

conjunto de restricciones (3.7) aseguran que cada familia que vive en departamento sea asignada a su edificio correspondiente. Por último, el conjunto de restricciones (3.8) establece que la variable x_{ij} sea binaria.

3.4. Simulación

En este trabajo se propone un modelo de simulación basado en eventos discretos con distintos escenarios. El concepto general del funcionamiento del simulador es la ejecución de una lista de eventos ordenada previamente según algún criterio a especificar, en este caso por tiempo. A medida que éstos se ejecutan van generando nuevos eventos hasta alcanzar la condición que marca el fin de la simulación. La generación de nuevos eventos dependerá de criterios a definir en la configuración del simulador. Es en los eventos en donde interactúan los agentes y todos los elementos de la red. En este caso, las familias, calles y refugios. Cada familia recorrerá su ruta predefinida, pasando calle por calle, hasta que lleguen a sus refugios respectivos. En la Figura 3.8 se presenta el diagrama de flujo explicando el funcionamiento general del simulador, desde la inicialización de los parámetros y eventos (varían dependiendo el escenario y réplica), hasta la ejecución en detalle de éstos.

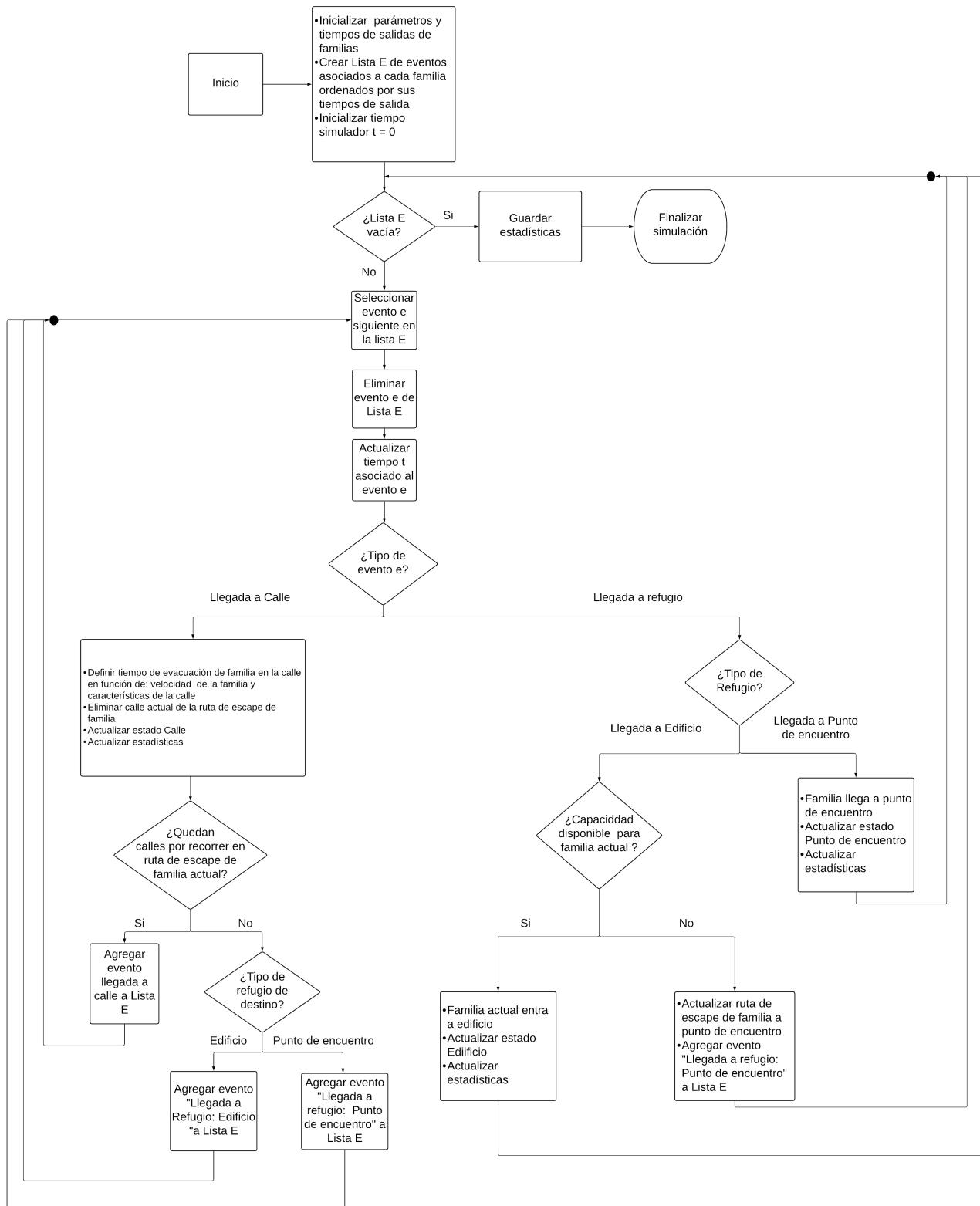


Figura 3.8: Diagrama de flujo simulador.

3.4.1. Eventos

El simulador posee un inicializador de eventos, el cual se encarga de generar la lista inicial de eventos a ejecutar. Por otra parte, los eventos pueden ser clasificados en tres tipos; llegada a calle, llegada a edificio y llegada a punto de encuentro.

- **Inicializador de eventos:** En base a las rutas de escape de cada familia, se generan los primeros eventos de éstas, los que irán generando nuevos eventos de forma encadenada hasta que todas las familias lleguen a sus destinos. El instante de tiempo en que se ejecutará cada evento inicial viene dado por el tiempo de salida de cada familia, en el caso de qué el evento sea de tipo llegada a calle. Este se define según la composición familiar descrita en la Tabla 3.7.

Composición familiar	2	3	4	5	6	7	8	9
Niños=0, Adultos mayores=0	0,2	0,3	0,3	0,15	0,05	0	0	0
Niños>0, Adultos mayores=0	0	0,1	0,15	0,3	0,3	0,15	0	0
Niños=0, Adultos mayores>0	0	0	0	0,1	0,3	0,3	0,15	0,15
Niños>0, Adultos mayores>0	0	0	0	0	0,2	0,3	0,3	0,2

Tabla 3.7: Tiempos de salida según composición familiar.

En el caso de las familias que viven en un edificio, cuando el escenario corresponda a evacuación vertical, por simplicidad se consideró tiempo de salida cero y el único evento asociado a esas familias será llegada a edificio, éste se ejecutará en el instante de tiempo cero, es decir, se quedan en sus edificios.

- **Llegada a calle:** Abarca la llegada, recorrido y salida de una familia a una calle perteneciente a su ruta de escape. La familia entra a la calle en un instante de tiempo definido previamente y el tiempo que transcurre durante el recorrido de cada calle se define en base a la velocidad final y el largo de la calle. La velocidad final fue calculada en función de la velocidad de la familia (Ecuación 3.9) y la capacidad de la calle (Ecuación 3.10).

- **Velocidad de la familia:**

V : Velocidad de la familia.

K : 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.

$$V = \frac{(K \times 1,3 + Y \times 1,5 + A \times 1,5 + E \times 0,98)}{T} \quad (3.9)$$

- **Capacidad de la calle:**

C : Capacidad de la calle.

W : Ancho de la calle.

L : Largo de la calle.

F : 1.55. (Peatones por metro cuadrado)

$$C = (W \times A) \times F \quad (3.10)$$

Una vez realizado el cálculo de la velocidad de la familia y la capacidad de la calle, la velocidad final se calculó en base a las Ecuaciones (3.11) y (3.12). Cabe destacar que para este trabajo se asumió el terreno plano dada la topografía de la zona de estudio, por lo que no se incorporó la pendiente del terreno para el cálculo de la velocidad final.

- **Velocidad final:**

VF : Velocidad final.

D : Flujo de personas en calle.

$$\text{Si } C \leq D \Rightarrow VF = 0,751 \frac{m}{s} \quad (3.11)$$

$$\text{e.o.c. } VF = V \quad (3.12)$$

Los eventos se van ejecutando a medida que las familias recorren cada calle de su ruta de escape, ya sea H2S, H2B o B2S, éstos se van creando en forma encadenada hasta que el siguiente destino en la ruta de escape sea un refugio (edificio o punto de encuentro). En ese caso el algoritmo genera un nuevo evento de llegada a edificio o punto de encuentro. La simulación finaliza cuando todas las familias llegan a su refugio definido previamente en sus rutas de escape.

- **Llegada a edificio:** Es generado por el evento de llegada a calle, correspondiente a la calle previa al edificio. Cuando las familias llegan a un edificio, definido en sus rutas de escape H2B, éstas solo pueden entrar si el número de miembros de la familia no excede el número disponible de personas en el edificio. En caso que esto suceda, el algoritmo genera un evento del tipo llegada a calle y se inicia nuevamente la evacuación, pero esta vez con destino al punto de encuentro siguiendo la ruta de escape B2S, asociada al edificio que estaba definido previamente.
- **Llegada a punto de encuentro:** Es generado por el evento llegada a calle, correspondiente a la calle previa al punto de encuentro. Corresponde a cuando las familias llegan a un punto de encuentro, definido en sus rutas de escape (H2S o B2S).

3.4.2. Escenarios

- **Escenario 1:** En este escenario todas las familias evacuan a uno de sus tres puntos de encuentro más cercanos, en base a la siguiente probabilidad (Ecuación 3.13):

PS_i : Probabilidad de evacuar a i -ésimo punto de encuentro más cercano.

DS_i : Distancia al i -ésimo punto de encuentro más cercano.

$$PS_i = \frac{(DS_i)^{-1}}{\sum_{i=1}^3 (DS_i)^{-1}} \quad (3.13)$$

- **Escenario 2:** En este escenario las familias evacuan a un punto de encuentro o a un

edificio. En primer lugar, se escogen las posibles rutas hacia puntos de encuentro (H2S) y edificios (H2B y B2S). Para el caso de las rutas hacia puntos de encuentro, se escoge uno de los tres puntos de encuentro más cercanos en base a la probabilidad presentada en el Escenario 1 (3.13). Para el caso de las rutas a edificios, se escoge el edificio más cercano. La elección final para evacuar hacia un edificio o punto de encuentro viene dada por las probabilidades presentadas en las Ecuaciones 3.14 y 3.15:

PB_1 : Probabilidad de evacuar a edificio más cercano.

PS_i : Probabilidad de evacuar a i -ésimo punto de encuentro más cercano seleccionado previamente.

DB_1 : Distancia de ruta H2B seleccionada, edificio más cercano.

DS_i : Distancia de ruta H2S seleccionada, i -ésimo punto de encuentro más cercano seleccionado previamente.

$$PB_1 = \frac{DS_i}{DB_1 + DS_i} \quad (3.14)$$

$$PS_i = \frac{DB_1}{DB_1 + DS_i} \quad (3.15)$$

Si una de las dos opciones excede el 85 % , dicha opción es asignada automáticamente. Si la familia llega a un edificio y este se encuentra sin capacidad disponible, la ruta de escape se actualiza a la del punto de encuentro más cercano.

- **Escenario 3:** En este escenario se asignan las familias a los edificios mediante un modelo de optimización (Sección 3.3), el que busca maximizar la asignación a edificios de adultos mayores y niños, junto con priorizar aquellos edificios que se encuentren más cercanos. Esto viene condicionado por la restricción de que el edificio asignado debe estar a menor distancia que el punto de encuentro más cercano, caso contrario se asigna automáticamente la familia al punto de encuentro más cercano. Al optimizar la asignación respetando las capacidades de los edificios, se asegura que ninguna familia tendrá que reevacuar desde un edificio lleno a algún punto de encuentro.

- **Escenario 4:** Este escenario es idéntico al escenario 2 con la excepción de que acá se considera que los edificios tienen capacidades ilimitadas. Esto a fin de evaluar cómo repercute su capacidad en la evacuación. Al igual que en el Escenario 3, las familias que evacuen a su edificio más cercano, no tendrán que reevacuar hacia puntos de encuentro, pero en este caso se debe a la capacidad ilimitada de los edificios.

3.5. Métricas de comparación de escenarios

A modo de establecer un punto de comparación entre los escenarios, se utilizaron distintas métricas para evaluar sus rendimientos para posterior análisis, las cuales se calcularon global y desglosadamente, de acuerdo a clasificaciones de los evacuados según rango etario, sexo y/o refugio destino.

3.5.1. Tiempo evacuación promedio

Para comparar los tiempos de evacuación de cada escenario, se calculó el tiempo de evacuación promedio, que consiste en sumar los tiempos de evacuación de cada persona y promediarlos (Ecuación 3.16).

e_i : Tiempo evacuación persona i .

N : Número total personas evacuadas.

AT : Tiempo evacuación promedio.

$$AT = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^m e_i \quad (3.16)$$

3.5.2. Número total de evacuados

El cálculo del número de evacuados acumulado consiste en ir sumando el número de evacuados desde la primera persona hasta el última evacuada, y así obtener para cada instante de tiempo guardado el valor del número de personas totales que evacuaron hasta este momento. Lo anterior se presenta en la Ecuación (3.17). A partir de esto se puede crear la curva del número de evacuados totales en relación al tiempo.

EA_t : N° de evacuados totales hasta el momento t.

E_i : N° de evacuados en el momento i.

$$EA_t = \sum_{i=0}^t E_i \quad (3.17)$$

3.5.3. Número personas promedio en el sistema

El cálculo del número de personas promedio en el sistema consiste en ponderar el número de personas que se mantienen recorriendo alguna ruta de escape en función del tiempo en que se mantiene dicho valor. Para esto, se deben obtener los rangos de tiempos en que se mantienen diferentes valores de personas en el sistema, y como ya se mencionó, obtener el promedio mediante la suma ponderada de éstos, tal como se presenta en la Ecuación 3.18.

n_i : N° personas en el sistema en el rango de tiempo i .

r_i : Rango de tiempo i .

T : Tiempo total de evacuación.

AP : N° personas promedio.

$$AP = \frac{1}{T} \times \left(\sum_{i=1}^m n_i \times r_i \right) \quad (3.18)$$

3.5.4. Flujo de personas en calles

El cálculo del flujo total de personas que pasaron por las calles, consiste en sumar el número de evacuados cada vez que recorren su calle respectiva. De esta forma, cada calle posee un flujo acumulado de personas, el cual se va actualizando hasta el término de la simulación. El resultado obtenido es el flujo total de personas para cada calle, presentado en la Ecuación 3.19.

$f_{i,j}$: Flujo de personas de familia i que pasaron por calle j

SF_j : Flujo total de calle j

$$SF_j = \sum_{i=1}^m f_{i,j}, \quad \forall j \in J \quad (3.19)$$

3.5.5. Personas en edificios y puntos de encuentro

El cálculo de personas refugiadas en edificios y puntos de encuentro consiste en obtener el número de evacuados acumulados hasta el momento en que evacúa la última persona, lo que equivale a identificar a los evacuados totales en los refugios. Esta información se obtiene directamente del número de evacuados acumulado EA_t presentado en la Subsección 3.5.2, con t el momento de la última persona evacuada a edificio o punto de encuentro.

Capítulo 4

Resultados experimentales y discusión

Esta sección presenta los resultados obtenidos en las diez réplicas ejecutadas para cada escenario presentados en la Sección 3.4.2. En primer lugar se presentan los tiempos de evacuación promedio y tiempos promedio de las últimas familias evacuadas (Sección 4.1). En segundo lugar se presenta el número de evacuados promedios acumulados (Sección 4.2). Luego se presenta el número de personas promedio en el sistema (Sección 4.3). Posteriormente se presenta el número de personas en edificios y puntos de encuentro (Sección 4.4) y el flujo de personas total por calle recorrida (Sección 4.5). Finalmente, se discuten limitaciones y trabajos futuros para un posible mejor modelo de evacuación de tsunami (Sección 4.7).

Para cada una de las métricas mencionadas, se calculó su promedio y desvación estándar respectiva, con el formato: $\mu(\sigma)$. Para los tiempos de evacuación promedio y número de personas promedio para las categorías totales y edificios, se consideró un caso ‘a’, el cual no contempla a las personas que viven en edificios y un caso ‘b’ que si las considera, éstas poseen un tiempo de evacuación igual a cero. El grupo de personas que no se consideran en el caso ‘a’ representan un 36,7 % de la población a evacuar y un 88,5 % de la capacidad total de edificios, por lo que la incidencia real de la evacuación a edificios en los resultados finales se ve reflejada en el caso ‘b’. Por este motivo solo se consideró para el análisis los casos ‘b’ de los escenarios 2, 3 y 4.

4.1. Tiempos de evacuación promedios

De los tiempos promedios de evacuación presentados en la Tabla 4.1 y Figura 4.1a, el Escenario 4 obtuvo los mejores resultados con un tiempo de evacuación promedio total $\mu = 403,1$ s, en segundo lugar se encuentra el Escenario 2 con $\mu = 491,0$ s, en tercer lugar se encuentra el Escenario 3 con $\mu = 531,2$ s y finalmente los tiempos de evacuación más altos los obtuvo el escenario 1, con un tiempo de evacuación promedio total de $\mu = 878,0$ s. Este orden se mantuvo para los tiempos de evacuación promedios categorizados según sexo (Figura 4.1b) y según rango etario a excepción de los adultos mayores (Figura 4.1c), en este caso se mantuvo el mejor ($\mu = 557,4$ s) y peor ($\mu = 1.096,4$ s) tiempo para los escenarios 4 y 1 respectivamente, sin embargo el segundo tiempo más bajo corresponde al Escenario 3 con $\mu = 691,9$ s, mientras que el tercer lugar corresponde al escenario 2 con $\mu = 741,3$ s.

Escenario	Tiempo evacuación promedio total (segundos)						
	Niños	Jóvenes	Adultos	Adultos mayores	Mujeres	Hombres	Total
1	942,2 (1,3)	861,1 (0,9)	844,9 (0,2)	1096,4 (0,7)	883,9 (0,4)	871,7 (0,4)	878,0 (0,3)
2	a 825,4 (2,7)	735,7 (1,6)	739,9 (1,2)	1012,6 (1,9)	781,1 (1,3)	769,3 (1,3)	775,4 (1,2)
	b 478,9 (1,5)	492,3 (1,0)	458,7 (0,8)	741,3 (1,4)	493,0 (0,8)	488,9 (0,8)	491,0 (0,7)
3	a 907,4 (2,0)	845,0 (0,6)	814,4 (0,4)	945,2 (1,3)	843,1 (0,6)	834,5 (0,4)	838,9 (0,4)
	b 526,4 (1,2)	565,4 (0,4)	505,0 (0,3)	691,9 (0,9)	532,1 (0,4)	530,3 (0,3)	531,2 (0,2)
4	a 698,5 (5,2)	639,4 (4,0)	610,3 (1,4)	761,4 (4,3)	639,7 (2,1)	633,1 (1,5)	636,5 (1,7)
	b 405,2 (3,0)	427,8 (2,7)	378,4 (0,9)	557,4 (3,1)	403,8 (1,3)	402,3 (0,9)	403,1 (1,1)

Tabla 4.1: Tiempos de evacuación promedio total.

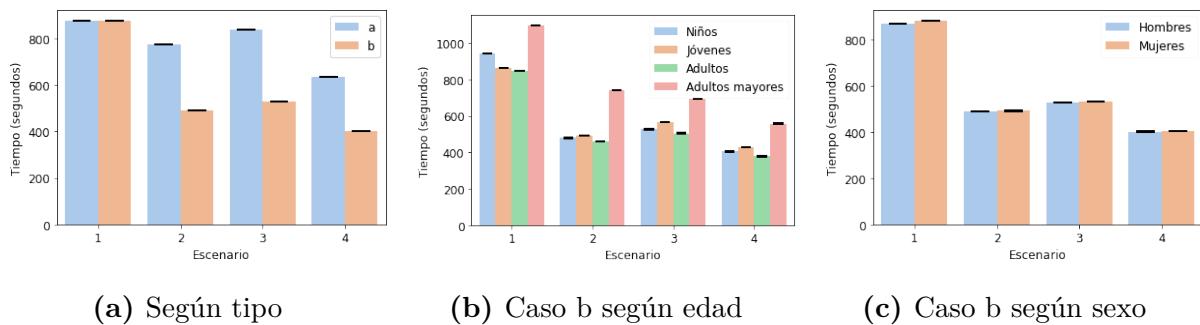


Figura 4.1: Tiempos de evacuación promedios total.

En cuanto a los tiempos de evacuación a edificios, en la categoría de niños, adultos, mujeres,

hombres y total, el Escenario 2 obtuvo los mejores resultados, seguido del Escenario 3 y en último lugar el Escenario 4. Para la categoría jóvenes, el Escenario 3 obtuvo el mejor resultado con $\mu = 16,6$ s, seguido del Escenario 2 con $\mu = 24,5$ s y luego el Escenario 4 con $\mu = 276,4$ s. Para la categoría adultos mayores el Escenario 2 obtuvo el mejor tiempo $\mu = 20,0$ s, seguido del Escenario 4 con $\mu = 399,7$ y finalmente el Escenario 3 con $\mu = 408,3$ s (Tabla 4.2). El Escenario 1 no se consideró en este desglose dado que no considera evacuación a edificios.

Escenario	Tiempo evacuación promedio a edificios (segundos)						
	Niños	Jóvenes	Adultos	Adultos mayores	Mujeres	Hombres	Total
1	-	-	-	-	-	-	-
2	a 347,5 (8,8)	281,4 (4,9)	280,0 (1,4)	487,2 (13,2)	292,8 (2,2)	289,0 (3,0)	290,9 (1,8)
	b 10,7 (0,6)	24,5 (1,2)	20,6 (0,2)	20,0 (1,8)	20,3 (0,3)	20,0 (0,4)	20,1 (0,2)
3	a 658,3 (8,8)	601,6 (10,2)	735,1 (2,5)	876,6 (2,3)	807,0 (1,7)	814,9 (2,4)	810,6 (1,9)
	b 24,6 (0,3)	16,6 (0,3)	36,2 (0,1)	408,3 (1,1)	80,5 (0,2)	73,9 (0,2)	77,4 (0,2)
4	a 601,3 (5,8)	542,6 (4,4)	516,5 (3,0)	641,4 (3,9)	543,8 (3,4)	536,9 (2,6)	540,5 (2,9)
	b 251,2 (3,1)	276,4 (3,3)	241,0 (2,1)	399,7 (3,1)	261,8 (2,1)	259,7 (2,0)	260,8 (2,0)

Tabla 4.2: Tiempos de evacuación promedios a edificios.

En lo que respecta los tiempos de evacuación promedio a puntos de encuentro presentados en la Tabla 4.3, el Escenario 4 obtuvo los mejores resultados, seguido del Escenario 2, luego el Escenario 3 y finalmente el Escenario 1. Se mantuvo este orden a excepción de los tiempos de evacuación de adultos mayores, en donde el Escenario 4 obtuvo el mejor tiempo con $\mu = 945,3$ s, seguido esta vez del Escenario 3 con $\mu = 977,3$ s, luego el Escenario 2 con $\mu = 1.021,0$ s y finalmente el Escenario 1 con $\mu = 1.096,4$ s.

Escenario	Tiempo evacuación promedio a puntos de encuentro (segundos)						
	Niños	Jóvenes	Adultos	Adultos mayores	Mujeres	Hombres	Total
1	942,2 (1,3)	861,1 (0,9)	844,9 (0,2)	1.096,4 (0,7)	883,9 (0,4)	871,7 (0,4)	878,0 (0,3)
2	836,6 (2,2)	758,1 (1,9)	763,4 (1,3)	1.021,0 (1,6)	803,3 (1,4)	790,6 (1,2)	797,1 (1,2)
3	914,6 (1,9)	848,5 (0,6)	817,1 (0,5)	977,3 (1,4)	845,6 (0,7)	835,7 (0,4)	840,7 (0,4)
4	803,4 (7,9)	741,6 (4,3)	718,7 (2,0)	945,3 (9,2)	753,3 (1,8)	744,8 (3,0)	749,1 (2,3)

Tabla 4.3: Tiempos de evacuación promedios a puntos de encuentro.

En cuanto a los tiempos promedio de evacuación de la última familia evacuada para cada escenario presentados en la Tabla 4.4, el que obtuvo menor tiempo fue el Escenario 2 con 3.108,7

s, seguido del Escenario 4 con 3.685,1 s y finalmente el Escenario 1 y 3 los cuales igualaron con 3.743,5 s.

Escenario	Tiempo evacuación promedio último evacuado (segundos)		
	Edificios	Puntos de encuentro	Total
1	0,0 (0,0)	3.743,5 (29,0)	3.743,5 (29,0)
2	856,8 (107,1)	3.108,7 (169,2)	3.108,7 (169,2)
3	2.357,7 (43,5)	3.743,5 (29,0)	3.743,5 (29,0)
4	2.698,5 (66,2)	3.685,1 (98,5)	3.685,1 (98,5)

Tabla 4.4: Tiempos de evacuación promedio último evacuado.

4.2. Número total de evacuados

En las curvas de número de personas evacuadas totales acumuladas presentadas en la Figura 4.2a se observa una brecha inicial entre el Escenario 1 y los otros escenarios, dada por las familias que viven en edificios correspondiente a 23.341 personas, ya que su tiempo de evacuación se estableció como cero. Por contraparte, el Escenario 4 presentó una curva por sobre los otros escenarios, lo que se traduce en que mayor cantidad de familias evacuaron en menor cantidad de tiempo. En cuanto los escenarios 2 y 3, mantuvieron una brecha acotada en comparación a las brechas entre los demás escenarios, la cual se observa en la Figura 4.2a en donde la curva del Escenario 2 está por sobre la del Escenario 3, es decir, tuvo una tasa de evacuados por segundo mayor.

En cuanto a el número acumulado de personas evacuadas a edificios, en la Figura 4.2b en primer lugar se observan las diferencias de evacuados totales a edificios, representados por el valor que toman la curvas cuando estas se vuelven totalmente horizontales, lo que quiere decir que todas las familias evacuaron a sus lugares de destino. En segundo lugar se observa como las curvas del escenario 2 y 3 poseen una brecha pequeña, dada justamente por la cantidad de evacuados totales a edificios, en la que en un inicio el Escenario 2 posee una tasa de evacuados por segundos mayor al escenario 3 hasta aproximadamente los 800 s, momento en el cual ocurre un punto de inflexión ya que en el Escenario 2 las familias ya se encontraban refugiadas en los edificios, mientras que en el Escenario 3 aún quedaban familias por evacuar.

En lo que respecta a el número acumulado de personas evacuadas a puntos de encuentro, en la Figura 4.2c se observa que en el Escenario 1 evaca la totalidad de la población, seguidos del Escenario 2 y 3 en los que evacuan aproximadamente un 65 % y finalmente en el Escenario 4 evaca un 24 % de la población. Las tasas de evacuados por segundo en los escenarios 2 y 3 se observan muy similares, mientras que en el Escenario 4 es evidentemente más baja, pero con menor cantidad de personas evacuadas a puntos de encuentro.

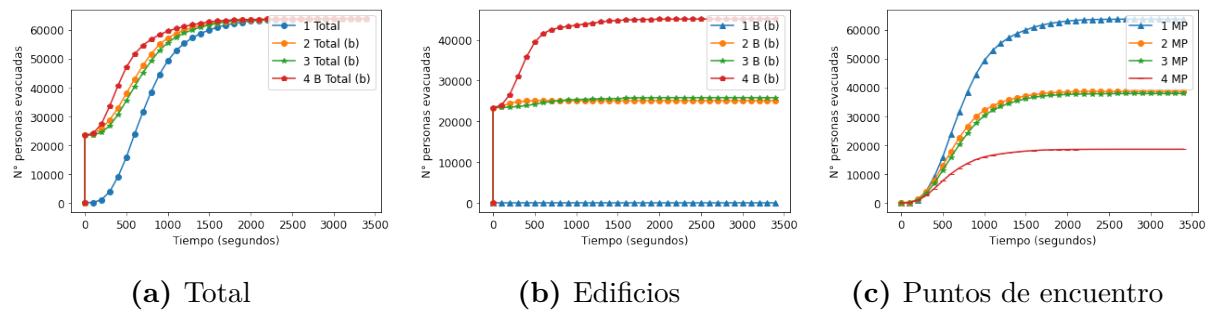


Figura 4.2: Número de evacuados promedio acumulado.

4.3. Número de personas promedio en el sistema

El número de personas promedio total en el sistema fue menor en el Escenario 4 con $\mu = 3.548,0$ y mayor en el Escenario 1 con $\mu = 9.510,1$, lo mismo ocurrió en todas las categorías (niños, jóvenes, adultos, adultos mayores, hombres y mujeres) en donde el Escenario 1 superó por más del doble al Escenario 4. En cuanto al Escenario 3 y 2, presentaron diferencias menores en relación a las del escenario 1 y 4, ya que no sobrepasan el 6 % de diferencia a excepción de los adultos mayores, en donde el Escenario 2 sobrepasa en un 36 % al Escenario 3. La Tabla 4.5 y Figura 4.3 presentan los números promedios para cada categoría en cada escenario.

Escenario	Personas promedio en el sistema						
	Niños	Jóvenes	Adultos	Adultos mayores	Mujeres	Hombres	Total
1	783,7 (6,2)	1.137,4 (8,9)	7.066,9 (55,4)	1.097,3 (8,6)	5.199,1 (40,8)	4.886,3 (38,3)	9.510,1 (73,9)
2	715,1 (35,9)	4.239,3 (209,3)	849,5 (43,8)	3.211,4 (157,9)	3.032,4 (153,0)	5.849,5 (290,4)	440,0 (22,0)
3	425,7 (3,3)	732,8 (5,7)	4.079,3 (31,8)	623,3 (4,9)	3.004,4 (23,4)	2.856,6 (22,2)	5.525,4 (44,4)
4	275,1 (7,8)	477,1 (14,0)	2.576,3 (72,0)	412,7 (10,6)	1.913,0 (52,4)	1.828,3 (50,3)	3.548,0 (98,1)

Tabla 4.5: Número de personas promedio en el sistema.

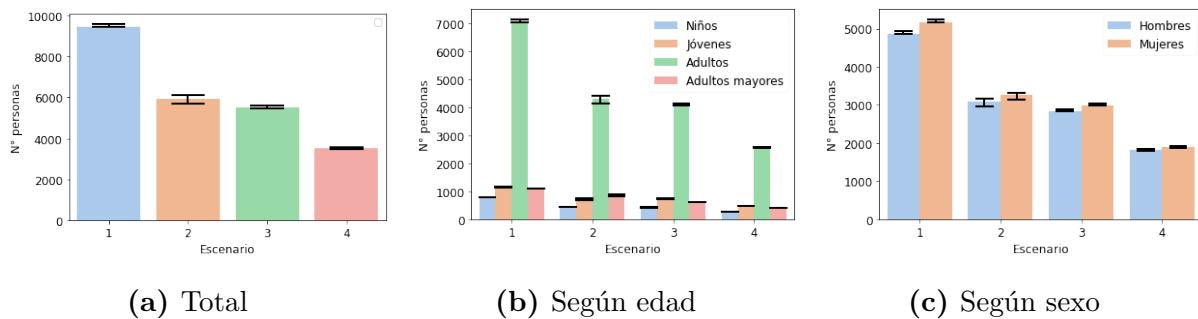


Figura 4.3: Número de personas promedio en el sistema.

4.4. Personas en edificios y puntos de encuentro

El Escenario 4 fue el que presentó mayor cantidad de personas evacuadas en edificios con $\mu = 45.099,4$, seguido del Escenario 3 con $\mu = 25.804,0$, luego el Escenario 2 con $\mu = 25.075,4$. Este orden se mantuvo en todas las categorías, en donde el Escenario 4 superó entre un 50 % hasta más del 100 % al resto de los escenarios a excepción de los jóvenes y adultos, en este caso, el Escenario 4 se mantuvo con la mayor cantidad de personas en edificios, sin embargo el Escenario 2 superó al Escenario 3 en un 6 % y 3 % respectivamente. Las diferencias más estrechas se dieron entre los escenarios 2 y 3, las cuales no superaron el 10 % en todas las categorías a excepción de adultos mayores en donde el Escenario 3 superó en un 80 % al Escenario 2. El Escenario 1 no fue considerado para el cálculo de personas evacuadas en edificios debido a que solo considera evacuados a puntos de encuentro. Los resultados se presentan en la Tabla 4.6.

Escenario	Evacuados en edificios							
	Niños	Jóvenes	Adultos	Adultos mayores	Mujeres	Hombres	Total	
1	-	-	-	-	-	-	-	
2	a	63,8 (3,9)	225,2 (9,7)	1.375,8 (10,1)	69,6 (7,2)	898,2 (15,5)	836,1 (10,6)	1.634,4 (13,5)
	b	2.069,8 (3,9)	2.590,2 (9,7)	18.717,8 (10,1)	1.697,6 (7,2)	12.966,2 (15,5)	12.109,1 (10,6)	25.075,4 (13,5)
3	a	78,0 (0,0)	67,0 (0,0)	899,0 (0,0)	1.419,0 (0,0)	1.338,0 (0,0)	1.125,0 (0,0)	2.363,0 (0,0)
	b	2.084,0 (0,0)	2.432,0 (0,0)	18.241,0 (0,0)	3.047,0 (0,0)	13.406,0 (0,0)	12.398,0 (0,0)	25.804,0 (0,0)
4	a	1.439,8 (22,0)	2.456,0 (45,6)	15.170,2 (127,5)	2.692,4 (21,9)	11.199,5 (91,9)	10.558,9 (94,3)	21.658,4 (180,3)
	b	3.445,8 (22,0)	4.821,0 (45,6)	32.512,2 (127,5)	4.320,4 (21,9)	23.267,5 (91,9)	21.831,9 (94,3)	45.099,4 (180,3)

Tabla 4.6: Evacuados en edificios.

En la Figura 4.4a se observa que en el Escenario 3 se utilizó el 98 % de la capacidad total los edificios, que corresponde a un 41 % de la población a evacuar, mientras que en el Escenario 2 se

utilizó un 95 % de la capacidad total de los edificios, que corresponde a un 39 % de la población a evacuar. Por otra parte, en el Escenario 4 el 71 % de la población en zona de peligro evacuó a edificios, porcentaje que representa aproximadamente al total de personas que se encontraban más cercanos a un edificio que a un punto de encuentro. En cuanto al Escenario 1, todos los evacuados se refugiaron en puntos de encuentro.

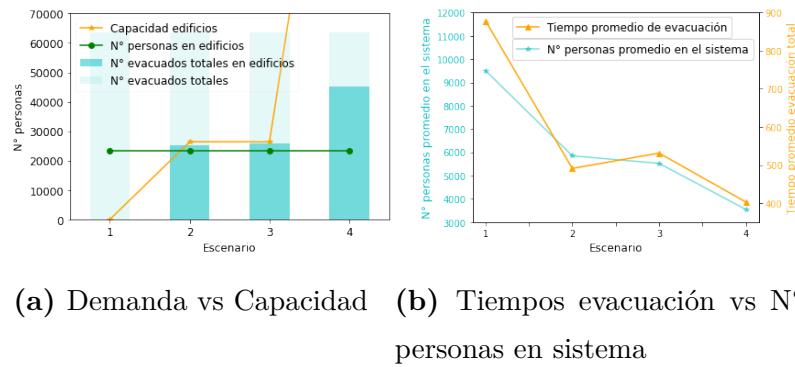


Figura 4.4: Comparación de escenarios.

En lo que respecta a el número de personas evacuadas a puntos de encuentro presentado en la Tabla 4.7, dado que las personas que no evacuaron a edificios, evacuaron a puntos de encuentro, el orden de los escenarios en relación a las personas evacuadas en puntos de encuentro es inverso al orden de los escenarios en relación a las personas evacuadas en edificios. En este caso los evacuados a puntos de encuentro en el Escenario 1 corresponden a la población completa.

Escenario	Evacuados en puntos de encuentro						
	Niños	Jóvenes	Adultos	Adultos mayores	Mujeres	Hombres	Total
1	4.778,0 (0,0)	7.148,0 (0,0)	45.642,0 (0,0)	6.076,0 (0,0)	32.719,0 (0,0)	30.925,0 (0,0)	63.644,0 (0,0)
2	2.708,3 (3,9)	4.557,8 (9,7)	26.924,25 (10,1)	4.378,4 (7,2)	19.752,8 (15,5)	18.815,9 (10,6)	38.568,6 (13,5)
3	2.694,0 (0,0)	4.716,0 (0,0)	27.401,0 (0,0)	3.029,0 (0,0)	19.313,0 (0,0)	18.527,0 (0,0)	37.840,0 (0,0)
4	1.332,3 (22,0)	2.327,0 (45,6)	13.129,8 (127,5)	1.755,6 (21,9)	9.451,5 (91,9)	9.093,1 (94,3)	18.544,6 (180,3)

Tabla 4.7: Evacuados en puntos de encuentro.

4.5. Flujo calles

La distribución de la congestión en las calles se presenta en la Tabla 4.8. El Escenario 1 presentó el número de calles con más personas en todos los rangos a excepción del rango $[0,100]$. Esto ratifica que fue el escenario con más congestión en las vías de evacuación. El Escenario 4 presenta el mayor número de calles en el rango de personas de personas de $]0,100]$ con $\mu = 4.520,4$, y desde el rango $[300,1000[$ presenta los menores números de calles para dichos rangos, lo que ratifica que es el escenario con menos congesitón en las vías de evacuación. Por otra parte, el Escenario 3 presenta mayor número de calles ($\mu = 4.364,4$) en el rango $[0,100[$ que el Escenario 2 ($\mu = 3.127,0$), lo contrario ocurrió en la mayoría de demás rangos, lo que ratifica que el Escenario 3 presentó menor congestión en las calles que que el Escenario 2.

Número de personas	Número de calles			
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
$]0, 100[$	3.398,8 (48,3)	3.127,0 (66,7)	4.364,4 (120,8)	4.520,4 (200,6)
$[100, 200[$	548,0 (0,0)	328,4 (4,7)	435,0 (0,0)	345,3 (8,6)
$[200, 300[$	288,0 (0,0)	193,5 (5,6)	184,0 (0,0)	192,1 (3,9)
$[300, 400[$	186,0 (0,0)	116,9 (6,3)	126,0 (0,0)	86,9 (5,8)
$[400, 500[$	89,0 (0,0)	70,9 (4,8)	81,0 (0,0)	45,3 (6,1)
$[500, 600[$	76,0 (0,0)	52,8 (3,3)	48,0 (0,0)	30,1 (5,0)
$[600, 700[$	57,0 (0,0)	34,7 (3,4)	42,0 (0,0)	31,0 (2,8)
$[700, 800[$	44,0 (0,0)	28,9 (3,9)	24,0 (0,0)	23,3 (2,2)
$[800, 900[$	40,0 (0,0)	18,9 (1,5)	29,0 (0,0)	17,4 (1,7)
$[900, 1000[$	46,0 (0,0)	7,6 (1,2)	24,0 (0,0)	10,1 (2,0)

Tabla 4.8: Flujo de personas total en calles.

4.6. Rendimiento computacional

Todos los algoritmos fueron programados en Python 3.8 y ejecutados en un Asus Notebook X405U con procesador i5 de séptima generación con 2.5GHz y 8GB de RAM. El rendimiento computacional calculado para cada escenario se presenta en la Tabla 4.9. El Escenario 1 presentó el tiempo de cómputo más elevado con un máximo 221 minutos debido principalmente a que

las familias recorrían distancias mayores y que las familias que vivían en edificios evacuaron a puntos de encuentro. El Escenario 3 presentó el segundo tiempo más elevado con un máximo de 102 minutos. Luego se encuentra el Escenario 2 con un máximo de 88 minutos, y finalmente el Escenario 4 el mejor tiempo de cómputo con un máximo de 60 minutos.

Escenario	Tiempo (minutos)		
	μ (σ)	Mínimo	Máximo
1	209,3 (18,8)	159,0	221,0
2	67,8 (6,8)	64,0	88,0
3	77,8 (8,4)	72,0	102,0
4	46,5 (5,6)	42,0	60,0

Tabla 4.9: Tiempo de cómputo escenarios.

4.7. Discusión

De los resultados se desprenden puntos bastante concluyentes respecto a las ventajas de realizar una evacuación vertical. En primer lugar y como era de esperarse, el Escenario 1 fue el que presentó peores resultados, debido a que las familias tenían que recorrer distancias más largas para llegar a sus destinos. En contraparte, el Escenario 4 arrojó los mejores resultados, presentando a su vez la mayor cantidad de evacuados a edificios debido a que éstos contaban con capacidad ilimitada. En cuanto a los escenarios 2 y 3, presentaron mejores resultados que el Escenario 1, sin embargo peores que el Escenario 4, lo cual se explica principalmente por la capacidad limitada de los edificios que llevó a evacuar a menos familias a dichos edificios. Otro punto importante es el cómo impactó notoriamente en los tiempos de evacuación y congestión en calles el hecho de que las familias que vivían en edificios tuvieran tiempo de evacuación cero debido a que se mantuvieron en sus respectivos edificios. Éstas familias representaron el 36.7 % de la población a evacuar, por lo que incluso en un plan de evacuación ‘simple’ que contempla la evacuación de todas las familias a sus puntos de encuentro más cercanos a excepción de las familias residentes en edificios aptos para resistir un tsunami, se obtendrían mejores resultados que el Escenario 1.

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.

Ahora bien, los escenarios que representan mejor la realidad en ese sentido son el 2 y 3, por lo que resulta interesante discutir sus resultados. El Escenario 2 obtuvo mejores tiempos de evacuación promedio, mientras que el Escenario 3 obtuvo un menor número de personas promedio en el sistema (ver Figura 4.4b) junto con una mayor cantidad de personas refugiadas en edificios (ver Figura 4.4a). 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 en las calles junto con priorizar la asignación de adultos mayores a edificios, pero en un rango de tiempo razonable (8 minutos). Sería interesante observar que tan determinante

sería esa diferencia en relación a la llegada de la primera ola en un tsunami, ya que en base a esto se podría determinar qué escenario es mejor.

Otro aspecto relevante del modelo es la información que proporciona respecto al desglose de personas reunidas en los puntos de encuentro presentados en la Tablas 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 del Anexo, ya que puede ser de gran utilidad en la asignación óptima de alimentos e insumos a refugiados.

En términos de ventajas, el modelo presentado incorpora aspectos realistas en el preprocesamiento, principalmente; i) cálculo de rutas más cortas a destinos, ii) aleatoriedad en elección de rutas y destino en función de composición familiar, e iii) 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. Por otro lado, una de las desventajas es que 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. Otra desventaja es 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.

En lo que respecta a trabajos futuros, existen algunos aspectos interesantes a investigar y/o integrar al modelo propuesto en este trabajo, de los cuales destacan; i) incorporación de un escenario día mediante la modificación de la distribución de la población en base a una matriz-origen destino, ii) incorporación del comportamiento de las personas en base a modelos predictivos, iii) integración de un modelo de simulación de tsunamis al modelo de evacuación para añadir la estimación de víctimas fatales, e iv) incorporación de evacuación en vehículos de emergencia mediante un modelo de optimización que maximice el número de evacuados y minimice las distancias recorridas junto con la congestión en las calles. De esta forma es posible suministrar una herramienta capaz de proporcionar la información necesaria para la elaboración de un plan de evacuación de tsunamis.

Capítulo 5

Conclusión

En este trabajo se revisó el problema de simular una evacuación de tsunami en la ciudad de Antofagasta, mediante el desarrollo de un modelo de simulación de evacuación de tsunami basado en eventos discretos integrado con GIS y población sintética.

Los resultados fueron consistentes acerca de los beneficios que proporciona una evacuación vertical, ya que como era de esperarse reduce los tiempos de evacuación y congestión en las calles debido a los recorridos más cortos hacia edificios y a que gran parte de la familias en zona de evacuación no tuvieron que evacuar debido a que eran residentes en edificios. Por otra parte, 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. De esta forma, es posible proporcionar una herramienta confiable para la elaboración de planes de evacuación de tsunami.

En lo que respecta a trabajos futuros, existen aspectos interesantes a considerar, los cuales se resumen en; en incorporar un escenario día, incorporar modelos predictivos del comportamiento humano, integrar modelo actual con simulación de tsunami, e incorporar nueva estrategia de evacuación con vehículos. El profundizar en alguno de estos puntos contribuiría enormemente tanto a la elaboración de un plan de evacuación de tsunami como a la línea de investigación de modelos de simulación de evacuación. Por otra parte, el replicar este trabajo es factible en otras zonas del territorio nacional, por lo que un desafío a futuro es automatizar el proceso desarrollado en este proyecto y escalarlo a todas las costas del país.

Capítulo 6

Anexo

6.1. Desglose refugiados en puntos de encuentro

Punto de encuentro	Niños	Jóvenes	Adultos	Adultos mayores	Mujeres	Hombres	Total
0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.8 (0.6)	0.0 (0.0)	0.9 (0.3)	0.9 (0.3)	1.8 (0.6)
1	55.1 (19.5)	74.7 (26.4)	518.2 (183.2)	99.6 (35.2)	405.3 (143.3)	342.2 (121.0)	747.6 (264.3)
2	160.9 (56.9)	251.6 (88.9)	1969.8 (696.4)	341.3 (120.7)	1370.7 (484.6)	1352.9 (478.3)	2723.6 (962.9)
3	49.8 (17.6)	76.4 (27.0)	326.2 (115.3)	32.0 (11.3)	255.1 (90.2)	229.3 (81.1)	484.4 (171.3)
4	96.9 (34.3)	122.7 (43.4)	1010.7 (357.3)	188.4 (66.6)	742.2 (262.4)	676.4 (239.2)	1418.7 (501.6)
5	9.8 (3.5)	21.3 (7.5)	115.6 (40.9)	16.9 (6.0)	77.3 (27.3)	86.2 (30.5)	163.6 (57.8)
6	23.1 (8.2)	41.8 (14.8)	199.1 (70.4)	12.4 (4.4)	143.1 (50.6)	133.3 (47.1)	276.4 (97.7)
7	63.1 (22.3)	110.2 (39.0)	525.3 (185.7)	15.1 (5.3)	357.3 (126.3)	356.4 (126.0)	713.8 (252.4)
8	181.3 (64.1)	223.1 (78.9)	1661.3 (587.4)	276.4 (97.7)	1210.7 (428.0)	1131.6 (400.1)	2342.2 (828.1)
9	73.8 (26.1)	110.2 (39.0)	432.9 (153.0)	48.9 (17.3)	357.3 (126.3)	308.4 (109.1)	665.8 (235.4)
10	40.9 (14.5)	70.2 (24.8)	322.7 (114.1)	34.7 (12.3)	248.9 (88.0)	219.6 (77.6)	468.4 (165.6)
11	16.9 (6.0)	32.9 (11.6)	160.9 (56.9)	17.8 (6.3)	112.0 (39.6)	116.4 (41.2)	228.4 (80.8)
12	236.4 (83.6)	357.3 (126.3)	1720.0 (608.1)	70.2 (24.8)	1223.1 (432.4)	1160.9 (410.4)	2384.0 (842.9)
13	3.6 (1.3)	6.2 (2.2)	45.3 (16.0)	8.0 (2.8)	31.1 (11.0)	32.0 (11.3)	63.1 (22.3)
14	48.0 (17.0)	80.0 (28.3)	471.1 (166.6)	43.6 (15.4)	321.8 (113.8)	320.9 (113.5)	642.7 (227.2)
15	33.8 (11.9)	63.1 (22.3)	289.8 (102.5)	40.0 (14.1)	208.0 (73.5)	218.7 (77.3)	426.7 (150.8)
16	60.4 (21.4)	81.8 (28.9)	528.9 (187.0)	59.6 (21.1)	358.2 (126.7)	372.4 (131.7)	730.7 (258.3)
17	41.8 (14.8)	83.6 (29.5)	576.0 (203.6)	118.2 (41.8)	425.8 (150.5)	393.8 (139.2)	819.6 (289.8)
18	234.7 (83.0)	370.7 (131.1)	2131.6 (753.6)	222.2 (78.6)	1496.9 (529.2)	1462.2 (517.0)	2959.1 (1046.2)
19	154.7 (54.7)	144.0 (50.9)	1142.2 (403.8)	131.6 (46.5)	785.8 (277.8)	786.7 (278.1)	1572.4 (555.9)
20	99.6 (35.2)	135.1 (47.8)	1215.1 (429.6)	228.4 (80.8)	836.4 (295.7)	841.8 (297.6)	1678.2 (593.3)
21	146.7 (51.9)	207.1 (73.2)	1643.6 (581.1)	245.3 (86.7)	1174.2 (415.2)	1068.4 (377.8)	2242.7 (792.9)
22	73.8 (26.1)	107.6 (38.0)	907.6 (320.9)	147.6 (52.2)	624.0 (220.6)	612.4 (216.5)	1236.4 (437.1)
23	72.0 (25.5)	94.2 (33.3)	706.7 (249.8)	121.8 (43.1)	525.3 (185.7)	469.3 (165.9)	994.7 (351.7)
24	102.2 (36.1)	244.4 (86.4)	1083.6 (383.1)	60.4 (21.4)	801.8 (283.5)	688.9 (243.6)	1490.7 (527.0)
25	56.0 (19.8)	86.2 (30.5)	312.0 (110.3)	8.0 (2.8)	243.6 (86.1)	218.7 (77.3)	462.2 (163.4)
26	101.3 (35.8)	144.9 (51.2)	1184.0 (418.6)	169.8 (60.0)	820.4 (290.1)	779.6 (275.6)	1600.0 (565.7)
27	43.6 (15.4)	31.1 (11.0)	178.7 (63.2)	7.1 (2.5)	139.6 (49.3)	120.9 (42.7)	260.4 (92.1)
28	148.4 (52.5)	254.2 (89.9)	1897.8 (671.0)	334.2 (118.2)	1377.8 (487.1)	1256.9 (444.4)	2634.7 (931.5)
29	57.8 (20.4)	99.6 (35.2)	662.2 (234.1)	114.7 (40.5)	470.2 (166.2)	464.0 (164.0)	934.2 (330.3)
30	113.8 (40.2)	178.7 (63.2)	1459.6 (516.0)	237.3 (83.9)	1053.3 (372.4)	936.0 (330.9)	1989.3 (703.3)
31	103.1 (36.5)	156.4 (55.3)	1426.7 (504.4)	307.6 (108.7)	1028.4 (363.6)	965.3 (341.3)	1993.8 (704.9)
32	141.3 (50.0)	177.8 (62.9)	1431.1 (506.0)	216.9 (76.7)	1036.4 (366.4)	930.7 (329.0)	1967.1 (695.5)
33	118.2 (41.8)	203.6 (72.0)	928.0 (328.1)	80.9 (28.6)	670.2 (237.0)	660.4 (233.5)	1330.7 (470.5)
34	32.9 (11.6)	30.2 (10.7)	172.4 (61.0)	3.6 (1.3)	128.9 (45.6)	110.2 (39.0)	239.1 (84.5)
35	9.8 (3.5)	18.7 (6.6)	106.7 (37.7)	8.0 (2.8)	75.6 (26.7)	67.6 (23.9)	143.1 (50.6)
36	50.7 (17.9)	98.7 (34.9)	372.4 (131.7)	30.2 (10.7)	280.9 (99.3)	271.1 (95.9)	552.0 (195.2)
37	18.7 (6.6)	33.8 (11.9)	160.9 (56.9)	13.3 (4.7)	110.2 (39.0)	116.4 (41.2)	226.7 (80.1)
38	56.0 (19.8)	47.1 (16.7)	291.6 (103.1)	8.0 (2.8)	193.8 (68.5)	208.9 (73.9)	402.7 (142.4)
39	71.1 (25.1)	97.8 (34.6)	669.3 (236.6)	134.2 (47.5)	497.8 (176.0)	474.7 (167.8)	972.4 (343.8)
40	311.1 (110.0)	461.3 (163.1)	2684.4 (949.1)	270.2 (95.5)	1919.1 (678.5)	1808.0 (639.2)	3727.1 (1317.7)
41	73.8 (26.1)	140.4 (49.7)	563.6 (199.2)	44.4 (15.7)	424.9 (150.2)	397.3 (140.5)	822.2 (290.7)
42	38.2 (13.5)	85.3 (30.2)	337.8 (119.4)	16.0 (5.7)	268.4 (94.9)	208.9 (73.9)	477.3 (168.8)
43	49.8 (17.6)	59.6 (21.1)	616.9 (218.1)	86.2 (30.5)	394.7 (139.5)	417.8 (147.7)	812.4 (287.2)
44	86.2 (30.5)	128.9 (45.6)	972.4 (343.8)	235.6 (83.3)	744.9 (263.4)	678.2 (239.8)	1423.1 (503.1)
45	419.6 (148.3)	604.4 (213.7)	3487.1 (1232.9)	344.0 (121.6)	2466.7 (872.1)	2388.4 (844.4)	4855.1 (1716.5)
46	4.4 (1.6)	12.4 (4.4)	106.7 (37.7)	30.2 (10.7)	76.4 (27.0)	77.3 (27.3)	153.8 (54.4)
47	62.2 (22.0)	92.4 (32.7)	842.7 (297.9)	120.0 (42.4)	568.0 (200.8)	549.3 (194.2)	1117.3 (395.0)

Tabla 6.1: Evacuados en puntos de encuentro, Escenario 1.

Punto de encuentro	Niños	Jóvenes	Adultos	Adultos mayores	Mujeres	Hombres	Total
0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
1	22.3 (8.2)	37.3 (13.8)	266.0 (94.6)	51.2 (18.3)	209.6 (74.4)	167.3 (59.5)	376.9 (133.6)
2	136.9 (48.5)	216.6 (76.6)	1773.4 (627.1)	479.0 (169.4)	1314.8 (464.9)	1291.1 (456.5)	2605.9 (921.4)
3	4.1 (1.9)	16.7 (6.1)	59.1 (21.4)	8.6 (3.3)	47.2 (17.0)	41.2 (14.9)	88.4 (31.8)
4	18.2 (6.6)	46.4 (16.6)	340.3 (120.4)	86.3 (30.6)	255.9 (90.5)	235.4 (83.4)	491.3 (173.8)
5	8.0 (2.8)	17.8 (6.3)	104.0 (36.8)	10.7 (3.8)	68.4 (24.2)	72.0 (25.5)	140.4 (49.7)
6	16.0 (5.7)	27.6 (9.7)	146.7 (51.9)	10.7 (3.8)	96.0 (33.9)	104.9 (37.1)	200.9 (71.0)
7	25.8 (9.1)	18.7 (6.6)	103.1 (36.5)	0.9 (0.3)	65.8 (23.3)	82.7 (29.2)	148.4 (52.5)
8	171.2 (60.5)	232.8 (82.3)	1667.2 (589.5)	386.0 (136.5)	1274.3 (450.6)	1182.9 (418.2)	2457.2 (868.8)
9	70.7 (25.1)	130.7 (46.3)	500.7 (177.2)	60.4 (21.4)	400.8 (141.8)	361.7 (128.0)	762.4 (269.8)
10	8.4 (3.2)	12.0 (4.4)	59.1 (21.2)	7.6 (2.7)	51.3 (18.5)	35.8 (12.8)	87.1 (31.3)
11	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
12	229.9 (81.4)	415.3 (147.0)	1625.1 (574.7)	88.9 (31.5)	1247.2 (441.0)	1112.0 (393.3)	2359.2 (834.3)
13	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.9 (0.3)	0.9 (0.3)	0.0 (0.0)	0.9 (0.3)
14	0.1 (0.3)	0.1 (0.3)	7.7 (3.9)	1.7 (1.1)	4.1 (2.8)	5.4 (2.5)	9.6 (5.1)
15	40.8 (14.5)	73.7 (26.1)	369.3 (130.6)	61.7 (21.8)	268.4 (95.0)	277.0 (98.0)	545.4 (192.9)
16	51.3 (18.6)	73.3 (26.2)	423.9 (150.6)	51.0 (18.2)	292.8 (104.1)	306.8 (109.3)	599.6 (213.1)
17	13.1 (4.7)	21.4 (8.0)	167.7 (59.5)	42.7 (15.3)	134.2 (47.8)	110.7 (39.2)	244.9 (87.0)
18	16.7 (6.1)	26.3 (9.6)	164.2 (58.3)	13.4 (5.4)	114.6 (41.2)	106.1 (37.7)	220.7 (78.5)
19	57.0 (20.3)	76.0 (27.0)	375.2 (134.4)	44.1 (16.8)	267.4 (95.3)	284.9 (102.0)	552.3 (196.9)
20	29.8 (10.7)	47.0 (16.8)	436.1 (154.3)	136.7 (48.5)	350.2 (124.0)	299.3 (106.0)	649.6 (229.9)
21	67.9 (24.1)	102.8 (36.5)	907.8 (321.1)	223.3 (79.1)	681.3 (241.1)	620.4 (219.5)	1301.8 (460.4)
22	33.2 (11.9)	40.2 (14.3)	476.7 (168.6)	84.4 (29.9)	318.7 (112.8)	315.9 (111.8)	634.6 (224.5)
23	11.8 (4.2)	21.6 (7.6)	94.7 (33.6)	18.0 (6.4)	76.7 (27.3)	69.3 (24.5)	146.0 (51.8)
24	91.6 (32.5)	213.9 (75.7)	915.4 (323.7)	59.8 (21.2)	667.4 (236.0)	613.2 (216.9)	1280.7 (452.9)
25	77.3 (27.4)	125.0 (44.2)	520.4 (184.1)	22.3 (8.1)	385.9 (136.5)	359.2 (127.1)	745.1 (263.6)
26	29.4 (10.6)	57.3 (20.5)	338.4 (120.1)	64.2 (22.9)	247.7 (87.8)	241.8 (85.6)	489.4 (173.3)
27	0.2 (0.4)	0.4 (0.5)	2.7 (1.6)	0.0 (0.0)	1.4 (0.8)	1.9 (1.3)	3.3 (2.0)
28	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
29	28.4 (10.1)	46.2 (16.3)	256.9 (90.8)	51.6 (18.2)	181.3 (64.1)	201.8 (71.3)	383.1 (135.5)
30	43.6 (15.5)	70.9 (25.4)	591.0 (209.5)	123.2 (44.0)	418.4 (148.4)	410.2 (145.5)	828.7 (293.7)
31	89.2 (31.6)	129.0 (45.7)	1306.4 (462.4)	278.6 (98.7)	910.4 (322.1)	892.8 (316.1)	1803.2 (638.0)
32	26.1 (9.5)	32.8 (12.0)	286.1 (101.5)	105.2 (37.5)	238.4 (84.5)	211.8 (75.2)	450.2 (159.6)
33	46.2 (16.3)	88.9 (31.4)	487.1 (172.2)	30.2 (10.7)	343.1 (121.3)	309.3 (109.4)	652.4 (230.7)
34	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
35	8.4 (3.0)	10.2 (3.8)	69.2 (24.5)	3.8 (1.5)	55.4 (19.7)	36.2 (12.9)	91.7 (32.6)
36	22.6 (8.0)	53.4 (19.0)	195.4 (69.1)	20.3 (7.2)	152.0 (53.8)	139.8 (49.4)	291.8 (103.2)
37	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
38	1.2 (1.1)	0.3 (0.5)	5.1 (2.8)	0.0 (0.0)	3.7 (2.3)	3.0 (2.0)	6.7 (4.0)
39	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
40	285.6 (101.0)	489.8 (173.2)	2511.0 (887.8)	251.9 (89.1)	1788.8 (632.5)	1749.4 (618.6)	3538.2 (1251.0)
41	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
42	60.3 (21.3)	144.2 (51.0)	463.2 (163.8)	35.2 (12.5)	391.1 (138.3)	311.9 (110.3)	703.0 (248.6)
43	71.9 (25.5)	88.9 (31.6)	833.1 (294.7)	155.0 (54.9)	556.8 (197.1)	592.1 (209.4)	1148.9 (406.4)
44	71.2 (25.2)	129.4 (45.8)	1030.0 (364.2)	296.3 (104.9)	784.8 (277.5)	742.2 (262.5)	1527.0 (539.9)
45	418.1 (147.9)	707.3 (250.2)	3959.4 (1400.0)	511.2 (180.8)	2836.1 (1002.9)	2760.0 (975.9)	5596.1 (1978.7)
46	2.7 (0.9)	7.2 (2.7)	78.4 (27.9)	10.4 (4.0)	42.0 (15.1)	56.8 (20.2)	98.8 (35.2)
47	0.0 (0.0)	1.8 (0.6)	15.1 (5.3)	4.4 (1.6)	12.4 (4.4)	8.9 (3.1)	21.3 (7.5)

Tabla 6.2: Evacuados en puntos de encuentro, Escenario 2.

Punto de encuentro	Niños	Jóvenes	Adultos	Adultos mayores	Mujeres	Hombres	Total
0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.8 (0.6)	0.0 (0.0)	0.9 (0.3)	0.9 (0.3)	1.8 (0.6)
1	28.4 (10.1)	52.4 (18.5)	306.7 (108.4)	40.9 (14.5)	236.4 (83.6)	192.0 (67.9)	428.4 (151.5)
2	86.2 (30.5)	153.8 (54.4)	1274.7 (450.7)	196.4 (69.5)	833.8 (294.8)	877.3 (310.2)	1711.1 (605.0)
3	26.7 (9.4)	47.1 (16.7)	177.8 (62.9)	17.8 (6.3)	145.8 (51.5)	123.6 (43.7)	269.3 (95.2)
4	13.3 (4.7)	28.4 (10.1)	240.9 (85.2)	23.1 (8.2)	161.8 (57.2)	144.0 (50.9)	305.8 (108.1)
5	9.8 (3.5)	21.3 (7.5)	115.6 (40.9)	16.9 (6.0)	77.3 (27.3)	86.2 (30.5)	163.6 (57.8)
6	16.0 (5.7)	32.0 (11.3)	153.8 (54.4)	7.1 (2.5)	104.0 (36.8)	104.9 (37.1)	208.9 (73.9)
7	34.7 (12.3)	72.0 (25.5)	276.4 (97.7)	4.4 (1.6)	199.1 (70.4)	188.4 (66.6)	387.6 (137.0)
8	100.4 (35.5)	133.3 (47.1)	936.9 (331.2)	142.2 (50.3)	672.9 (237.9)	640.0 (226.3)	1312.9 (464.2)
9	56.0 (19.8)	97.8 (34.6)	339.6 (120.1)	35.6 (12.6)	283.6 (100.3)	245.3 (86.7)	528.9 (187.0)
10	20.4 (7.2)	47.1 (16.7)	198.2 (70.1)	15.1 (5.3)	157.3 (55.6)	123.6 (43.7)	280.9 (99.3)
11	16.0 (5.7)	32.9 (11.6)	156.4 (55.3)	10.7 (3.8)	105.8 (37.4)	110.2 (39.0)	216.0 (76.4)
12	168.0 (59.4)	283.6 (100.3)	1149.3 (406.4)	30.2 (10.7)	843.6 (298.2)	787.6 (278.4)	1631.1 (576.7)
13	3.6 (1.3)	6.2 (2.2)	45.3 (16.0)	8.0 (2.8)	31.1 (11.0)	32.0 (11.3)	63.1 (22.3)
14	39.1 (13.8)	73.8 (26.1)	393.8 (139.2)	10.7 (3.8)	264.0 (93.3)	253.3 (89.6)	517.3 (182.9)
15	33.8 (11.9)	63.1 (22.3)	289.8 (102.5)	40.0 (14.1)	208.0 (73.5)	218.7 (77.3)	426.7 (150.8)
16	59.6 (21.1)	81.8 (28.9)	503.1 (177.9)	35.6 (12.6)	331.6 (117.2)	348.4 (123.2)	680.0 (240.4)
17	12.4 (4.4)	28.4 (10.1)	152.0 (53.7)	21.3 (7.5)	120.9 (42.7)	93.3 (33.0)	214.2 (75.7)
18	127.1 (44.9)	250.7 (88.6)	1328.0 (469.5)	103.1 (36.5)	912.0 (322.4)	896.9 (317.1)	1808.9 (639.5)
19	70.2 (24.8)	82.7 (29.2)	631.1 (223.1)	73.8 (26.1)	421.3 (149.0)	436.4 (154.3)	857.8 (303.3)
20	51.6 (18.2)	93.3 (33.0)	837.3 (296.0)	136.0 (48.1)	544.9 (192.6)	573.3 (202.7)	1118.2 (395.4)
21	40.0 (14.1)	68.4 (24.2)	575.1 (203.3)	70.2 (24.8)	387.6 (137.0)	366.2 (129.5)	753.8 (266.5)
22	48.0 (17.0)	68.4 (24.2)	614.2 (217.2)	103.1 (36.5)	406.2 (143.6)	427.6 (151.2)	833.8 (294.8)
23	21.3 (7.5)	29.3 (10.4)	182.2 (64.4)	20.4 (7.2)	122.7 (43.4)	130.7 (46.2)	253.3 (89.6)
24	75.6 (26.7)	214.2 (75.7)	892.4 (315.5)	46.2 (16.3)	661.3 (233.8)	567.1 (200.5)	1228.4 (434.3)
25	56.0 (19.8)	86.2 (30.5)	309.3 (109.4)	5.3 (1.9)	240.9 (85.2)	216.0 (76.4)	456.9 (161.5)
26	59.6 (21.1)	85.3 (30.2)	672.0 (237.6)	101.3 (35.8)	467.6 (165.3)	450.7 (159.3)	918.2 (324.6)
27	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.9 (0.3)	0.0 (0.0)	0.9 (0.3)	0.0 (0.0)	0.9 (0.3)
28	37.3 (13.2)	72.9 (25.8)	564.4 (199.6)	69.3 (24.5)	354.7 (125.4)	389.3 (137.7)	744.0 (263.0)
29	45.3 (16.0)	80.9 (28.6)	504.0 (178.2)	83.6 (29.5)	353.8 (125.1)	360.0 (127.3)	713.8 (252.4)
30	56.9 (20.1)	101.3 (35.8)	786.7 (278.1)	104.0 (36.8)	552.0 (195.2)	496.9 (175.7)	1048.9 (370.8)
31	75.6 (26.7)	128.9 (45.6)	1087.1 (384.4)	203.6 (72.0)	774.2 (273.7)	720.9 (254.9)	1495.1 (528.6)
32	25.8 (9.1)	40.0 (14.1)	316.4 (111.9)	24.0 (8.5)	215.1 (76.1)	191.1 (67.6)	406.2 (143.6)
33	118.2 (41.8)	203.6 (72.0)	928.0 (328.1)	80.9 (28.6)	670.2 (237.0)	660.4 (233.5)	1330.7 (470.5)
34	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1.8 (0.6)	0.0 (0.0)	0.9 (0.3)	0.9 (0.3)	1.8 (0.6)
35	3.6 (1.3)	8.0 (2.8)	45.3 (16.0)	6.2 (2.2)	32.0 (11.3)	31.1 (11.0)	63.1 (22.3)
36	29.3 (10.4)	81.8 (28.9)	271.1 (95.9)	19.6 (6.9)	211.6 (74.8)	190.2 (67.3)	401.8 (142.0)
37	18.7 (6.6)	33.8 (11.9)	160.0 (56.6)	11.6 (4.1)	109.3 (38.7)	114.7 (40.5)	224.0 (79.2)
38	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
39	47.1 (16.7)	69.3 (24.5)	470.2 (166.2)	79.1 (28.0)	329.8 (116.6)	336.0 (118.8)	665.8 (235.4)
40	235.6 (83.3)	381.3 (134.8)	2123.6 (750.8)	208.0 (73.5)	1506.7 (532.7)	1441.8 (509.7)	2948.4 (1042.4)
41	65.8 (23.3)	131.6 (46.5)	517.3 (182.9)	40.0 (14.1)	390.2 (138.0)	364.4 (128.9)	754.7 (266.8)
42	33.8 (11.9)	84.4 (29.9)	294.2 (104.0)	12.4 (4.4)	240.9 (85.2)	184.0 (65.1)	424.9 (150.2)
43	27.6 (9.7)	33.8 (11.9)	344.0 (121.6)	52.4 (18.5)	220.4 (77.9)	237.3 (83.9)	457.8 (161.8)
44	47.1 (16.7)	79.1 (28.0)	559.1 (197.7)	135.1 (47.8)	438.2 (154.9)	382.2 (135.1)	820.4 (290.1)
45	215.1 (76.1)	360.0 (127.3)	1987.6 (702.7)	147.6 (52.2)	1389.3 (491.2)	1320.9 (467.0)	2710.2 (958.2)
46	4.4 (1.6)	12.4 (4.4)	106.7 (37.7)	30.2 (10.7)	76.4 (27.0)	77.3 (27.3)	153.8 (54.4)
47	33.8 (11.9)	55.1 (19.5)	534.2 (188.9)	69.3 (24.5)	358.2 (126.7)	334.2 (118.2)	692.4 (244.8)

Tabla 6.3: Evacuados en puntos de encuentro, Escenario 3.

Punto de encuentro	Niños	Jóvenes	Adultos	Adultos mayores	Mujeres	Hombres	Total
0	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.6 (0.7)	0.0 (0.0)	0.3 (0.5)	0.2 (0.4)	0.6 (0.7)
1	7.7 (3.5)	13.3 (5.4)	82.9 (31.4)	18.1 (8.9)	68.4 (27.5)	53.6 (20.2)	122.0 (47.0)
2	28.7 (10.9)	48.8 (18.0)	463.2 (166.6)	101.2 (37.0)	311.6 (112.3)	330.3 (119.0)	641.9 (230.9)
3	13.1 (4.8)	26.4 (9.7)	110.0 (39.4)	10.2 (4.3)	88.4 (31.6)	71.3 (25.7)	159.8 (57.2)
4	3.0 (1.3)	5.6 (2.5)	64.0 (23.6)	14.8 (6.4)	46.3 (17.1)	41.0 (15.7)	87.3 (32.5)
5	9.8 (3.5)	20.9 (7.4)	110.4 (39.1)	15.8 (5.7)	75.0 (26.5)	81.9 (29.1)	156.9 (55.6)
6	14.6 (5.2)	21.7 (7.8)	123.1 (43.9)	6.2 (2.2)	80.9 (28.9)	84.7 (30.1)	165.6 (59.0)
7	20.2 (7.7)	26.8 (10.3)	112.4 (40.2)	2.6 (1.4)	76.7 (27.6)	85.3 (30.6)	162.0 (58.0)
8	44.2 (16.1)	43.3 (15.9)	356.1 (126.4)	70.1 (25.2)	253.7 (90.2)	260.1 (92.5)	513.8 (182.6)
9	30.0 (11.3)	53.2 (19.8)	184.4 (66.6)	19.3 (7.6)	148.0 (53.8)	139.0 (50.1)	287.0 (103.7)
10	10.1 (4.3)	22.3 (8.4)	102.7 (37.1)	11.2 (4.6)	84.9 (30.4)	61.4 (23.2)	146.3 (52.9)
11	12.3 (4.4)	21.4 (8.0)	100.8 (36.3)	12.2 (4.6)	73.1 (26.2)	73.7 (26.5)	146.8 (52.7)
12	100.1 (35.6)	170.0 (60.4)	710.3 (251.7)	26.8 (9.7)	524.3 (185.6)	482.9 (171.3)	1007.2 (356.7)
13	2.4 (1.3)	6.2 (2.2)	42.3 (15.2)	7.6 (2.7)	28.9 (10.4)	29.7 (10.6)	58.6 (21.0)
14	11.8 (5.0)	19.1 (7.0)	125.7 (45.3)	13.1 (5.4)	88.7 (31.7)	81.0 (29.5)	169.7 (60.5)
15	32.3 (11.5)	55.8 (19.8)	267.6 (94.7)	36.6 (13.0)	192.1 (68.0)	200.1 (70.9)	392.2 (138.9)
16	44.0 (15.6)	55.3 (19.7)	344.1 (122.5)	42.1 (15.2)	235.7 (84.1)	249.9 (88.6)	485.6 (172.4)
17	4.7 (2.5)	9.0 (3.8)	48.6 (18.6)	10.3 (5.4)	42.3 (16.5)	30.2 (11.4)	72.6 (27.5)
18	37.2 (13.7)	71.1 (28.0)	420.6 (154.5)	47.0 (17.8)	287.6 (105.7)	288.3 (106.1)	575.9 (211.3)
19	14.2 (5.6)	20.7 (10.4)	138.3 (50.6)	20.0 (7.9)	93.9 (35.7)	99.3 (35.7)	193.2 (70.6)
20	13.7 (5.3)	24.2 (9.4)	222.6 (81.7)	53.0 (19.2)	159.6 (58.0)	153.9 (56.2)	313.4 (114.0)
21	12.4 (4.9)	16.9 (7.7)	190.3 (68.6)	40.4 (14.8)	126.4 (46.2)	133.7 (48.3)	260.1 (94.1)
22	18.0 (6.9)	24.9 (9.3)	264.2 (95.1)	48.1 (18.6)	175.7 (63.3)	179.6 (65.4)	355.2 (128.4)
23	11.2 (4.2)	17.8 (6.7)	89.0 (32.0)	18.1 (6.7)	67.1 (24.1)	69.0 (24.9)	136.1 (48.9)
24	45.9 (16.8)	139.8 (49.6)	569.4 (201.6)	36.7 (13.4)	431.0 (152.7)	360.8 (127.9)	791.8 (280.4)
25	40.8 (14.5)	60.1 (21.3)	230.8 (82.0)	5.1 (2.2)	179.2 (63.6)	157.6 (55.9)	336.8 (119.5)
26	14.8 (5.9)	20.3 (8.6)	181.9 (66.9)	37.6 (14.5)	128.6 (46.8)	126.0 (48.1)	254.6 (93.7)
27	0.4 (0.5)	0.4 (0.5)	2.2 (1.5)	0.0 (0.0)	1.6 (1.1)	1.6 (1.2)	3.1 (2.1)
28	8.7 (3.6)	17.2 (6.4)	154.2 (55.8)	38.1 (14.1)	108.6 (39.1)	109.7 (39.4)	218.2 (77.9)
29	26.2 (9.6)	47.8 (17.2)	255.8 (91.7)	49.2 (17.7)	182.7 (65.7)	196.3 (70.2)	379.0 (135.5)
30	26.3 (9.8)	48.4 (17.7)	355.9 (126.4)	64.9 (23.4)	256.2 (90.9)	239.3 (85.3)	495.6 (176.0)
31	20.3 (7.5)	44.8 (16.8)	376.4 (134.8)	93.8 (33.7)	277.2 (99.4)	258.1 (92.2)	535.3 (191.1)
32	4.1 (1.7)	7.2 (3.2)	60.4 (23.4)	10.8 (4.7)	40.1 (15.4)	42.4 (15.5)	82.6 (30.8)
33	93.8 (33.7)	162.8 (57.7)	753.8 (267.1)	66.7 (23.7)	540.9 (191.7)	536.1 (189.9)	1077.0 (381.5)
34	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.9 (1.0)	0.0 (0.0)	0.4 (0.5)	0.4 (0.5)	0.9 (1.0)
35	3.2 (1.2)	7.0 (2.8)	39.3 (14.6)	4.2 (1.7)	27.8 (10.2)	26.0 (9.7)	53.8 (19.9)
36	16.7 (6.4)	39.3 (14.3)	158.8 (56.5)	11.4 (4.3)	116.4 (41.4)	109.8 (39.3)	226.2 (80.5)
37	11.3 (4.6)	20.7 (7.9)	99.3 (37.0)	8.9 (3.8)	68.4 (25.2)	71.8 (27.1)	140.2 (52.2)
38	0.9 (1.0)	0.1 (0.3)	2.4 (1.6)	0.0 (0.0)	1.6 (1.1)	1.9 (1.3)	3.4 (2.3)
39	9.1 (4.0)	20.3 (8.1)	109.6 (40.8)	30.6 (11.2)	76.6 (28.4)	93.0 (34.2)	169.6 (62.6)
40	175.0 (61.9)	277.6 (98.3)	1621.0 (573.1)	163.4 (57.8)	1137.9 (402.3)	1099.1 (388.6)	2237.0 (790.9)
41	40.1 (14.6)	75.9 (26.9)	309.6 (110.1)	21.9 (8.3)	236.2 (84.0)	211.2 (75.1)	447.4 (158.8)
42	29.1 (10.4)	71.3 (25.3)	256.6 (90.8)	12.0 (4.3)	207.6 (73.5)	161.4 (57.2)	369.0 (130.6)
43	9.9 (4.1)	15.2 (6.4)	169.2 (61.1)	35.6 (13.9)	115.1 (41.8)	114.8 (42.1)	229.9 (83.1)
44	13.6 (6.4)	26.0 (10.3)	172.9 (63.7)	53.7 (19.4)	142.4 (52.3)	123.7 (45.8)	266.1 (97.8)
45	80.4 (28.7)	148.1 (53.2)	826.3 (295.4)	120.0 (42.7)	600.2 (213.4)	574.7 (205.7)	1174.9 (418.7)
46	2.6 (1.2)	4.7 (2.7)	64.1 (24.3)	12.2 (5.2)	38.2 (14.8)	45.3 (17.4)	83.6 (32.1)
47	15.2 (6.3)	18.6 (7.5)	225.8 (82.4)	39.0 (15.3)	156.9 (57.8)	141.7 (52.7)	298.6 (110.1)

Tabla 6.4: Evacuados en puntos de encuentro, Escenario 4.

Bibliografía

- G. A. Álvarez Castillo. Simulación de evacuación por tsunami a micro-escala usando modelo basado en agentes, caso de estudio, iquique, chile. 2017.
- B. Barnes, S. Dunn, C. Pearson, and S. Wilkinson. Improving human behaviour in macroscale city evacuation agent-based simulation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60: 102289, 2021.
- D. Chang, L. Cui, and Z. Huang. A cellular-automaton agent-hybrid model for emergency evacuation of people in public places. *IEEE Access*, 8:79541–79551, 2020.
- Y. Chen, C. Wang, H. Li, J. B. H. Yap, R. Tang, and B. Xu. Cellular automaton model for social forces interaction in building evacuation for sustainable society. *Sustainable cities and society*, 53:101913, 2020.
- C.-Y. Chu. A computer model for selecting facility evacuation design using cellular automata. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(8):608–622, 2009.
- J.-E. Faucher, S. Dávila, and X. Hernández-Cruz. Modeling pedestrian evacuation for near-field tsunamis fusing alcld and agent-based approaches: A case study of rincón, pr. *International journal of disaster risk reduction*, 49:101606, 2020.
- H. M. Fritz, C. M. Petroff, P. A. Catalán, R. Cienfuegos, P. Winckler, N. Kalligeris, R. Weiss, S. E. Barrientos, G. Meneses, C. Valderas-Bermejo, et al. Field survey of the 27 february 2010 chile tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 168(11):1989–2010, 2011.
- R. Gómez Quezada. Medios de comunicación, terremotos y tsunamis: Los casos de chile y japon. *Universidad Católica del Norte. Antofagasta, Chile. Recuperada de:*

- http://publicacionescienciassociales. ufro. cl/index. php/perspectivas/article/vi ew/113*, 19, 2011.
- M. González and S. Figueras. Tsunami de sumatra del 26 de diciembre de 2004, el. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 13(1):2–14, 2005.
- C.-C. Hsiao, M.-C. Sun, A. Y. Chen, and Y.-T. Hsu. Location problems for shelter-in-place deployment: A case study of vertical evacuation upon dam-break floods. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 57:102048, 2021.
- INE. Microdatos censo 2017, Julio 2017. URL <http://www.censo2017.cl/microdatos/>.
- S. K. Jayasuriya and P. McCawley. *The Asian tsunami: aid and reconstruction after a disaster*. Edward Elgar Publishing, 2010.
- A. Kirchner and A. Schadschneider. Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 312(1-2):260–276, 2002.
- F. Kitamura, D. Inazu, T. Ikeya, and A. Okayasu. An allocating method of tsunami evacuation routes and refuges for minimizing expected casualties. *International journal of disaster risk reduction*, 45:101519, 2020.
- S. Kubisch, J. Guth, S. Keller, M. T. Bull, L. Keller, and A. C. Braun. The contribution of tsunami evacuation analysis to evacuation planning in chile: applying a multi-perspective research design. *International journal of disaster risk reduction*, 45:101462, 2020.
- J. León, S. Castro, C. Mokrani, and A. Gubler. Tsunami evacuation analysis in the urban built environment: a multi-scale perspective through two modeling approaches in viña del mar, chile. *Coastal Engineering Journal*, 62(3):389–404, 2020.
- Y. Li, C. Lu, and J. Jin. Simulation of a pediatric hospital in evacuation considering groups. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 107:102150, 2021.
- C. Lomnitz. Major earthquakes of chile: a historical survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters*, 75(3):368–378, 2004.

- L. Lu, C.-Y. Chan, J. Wang, and W. Wang. A study of pedestrian group behaviors in crowd evacuation based on an extended floor field cellular automaton model. *Transportation research part C: emerging technologies*, 81:317–329, 2017.
- E. Mas, A. Suppasri, F. Imamura, and S. Koshimura. Agent-based simulation of the 2011 great east japan earthquake/tsunami evacuation: An integrated model of tsunami inundation and evacuation. *Journal of Natural Disaster Science*, 34(1):41–57, 2012.
- E. Mas, B. Adriano, and S. Koshimura. An integrated simulation of tsunami hazard and human evacuation in la punta, peru. *Journal of Disaster Research*, 8(2):285–295, 2013.
- S. Mendoza and C. Herrera. Día mundial de concienciación sobre los tsunamis. Technical report, Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2021.
- D. Moreno and R. De La Fuente. Construcción de una población sintética con distribución geoespacial para la provincia de concepción. Technical report, University of Concepcion, 2021.
- A. Mostafizi, H. Wang, D. Cox, and S. Dong. An agent-based vertical evacuation model for a near-field tsunami: Choice behavior, logical shelter locations, and life safety. *International journal of disaster risk reduction*, 34:467–479, 2019.
- A. Muhammad, R. De Risi, F. De Luca, N. Mori, T. Yasuda, and K. Goda. Are current tsunami evacuation approaches safe enough? *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(4):759–779, 2021.
- H. Nakanishi, S. Wise, Y. Suenaga, and E. Manley. Simulating emergencies with transport outcomes sim (setosim): Application of an agent-based decision support tool to community evacuation planning. *International journal of disaster risk reduction*, 49:101657, 2020.
- El terremoto y tsunami del 27 de febrero en Chile. Crónica y lecciones aprendidas en el sector salud.* Organización Panamericana de la Salud, 2010.
- F. Red-Cross. Informe mundial sobre desastres, 2018.

- K. R. Rozo, J. Arellana, A. Santander-Mercado, and M. Jubiz-Diaz. Modelling building emergency evacuation plans considering the dynamic behaviour of pedestrians using agent-based simulation. *Safety science*, 113:276–284, 2019.
- X. Song, K. Chen, X. Li, J. Sun, B. Hou, Y. Cui, B. Zhang, G. Xiong, and Z. Wang. Pedestrian trajectory prediction based on deep convolutional lstm network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(6):3285–3302, 2020.
- H. Suk Na and A. Banerjee. Agent-based discrete-event simulation model for no-notice natural disaster evacuation planning. *Computers Industrial Engineering*, 2019.
- T. Takabatake, K. Fujisawa, M. Esteban, and T. Shibayama. Simulated effectiveness of a car evacuation from a tsunami. *International journal of disaster risk reduction*, 47:101532, 2020a.
- T. Takabatake, I. Nistor, and P. St-Germain. Tsunami evacuation simulation for the district of tofino, vancouver island, canada. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 48:101573, 2020b.
- R. Tamakloe, J. Hong, J. Tak, and D. Park. Finding evacuation routes using traffic and network structure information. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 95:102853, 2021.
- Z. Wang and G. Jia. A novel agent-based model for tsunami evacuation simulation and risk assessment. *Natural Hazards*, 105(2):2045–2071, 2021.
- N. J. Wood and M. C. Schmidlein. Anisotropic path modeling to assess pedestrian-evacuation potential from cascadia-related tsunamis in the us pacific northwest. *Natural Hazards*, 62(2):275–300, 2012.