

Simulador de evacuaciones masivas de personas basado en agentes

Gabriel Astudillo

Tesista

Doctorado en ciencias de la Informática

Universidad de Santiago

Dra. Verónica Gil-Costa

Co-guía tesis

Dr. Mauricio Marín

Guía tesis

Los planes de evacuación en las zonas costeras son fundamentales para orientar y ayudar a las personas lo antes posible ante las amenazas de tsunami. Por lo general, los planes de evacuación se crean basándose en la experiencia de los simulacros de evacuación. Los simulacros son procesos costosos que requieren coordinación, planificación y colaboración de diferentes instituciones y personas. Además, es difícil obtener datos suficientes para analizar de forma significativa las variables de interés del proceso de evacuación. Para solucionar este problema, recurrimos a la simulación por computador para ejecutar modelos de evacuación y obtener información de situaciones de emergencia artificiales. Sin embargo, modelar y desarrollar simulaciones realistas es una tarea compleja y los modelos de simulación más grandes que representan a miles de personas tienen una alta demanda computacional. En este artículo presentamos un simulador paralelo basado en agentes diseñado para modelar y simular el comportamiento de las personas en evacuaciones masivas ante una amenaza de tsunami. Nuestra propuesta logra resultados realistas mediante el uso de datos geográficos, datos del censo público y desglose por grupos de edad. Ayuda a reducir los errores en la toma de decisiones y estima la distancia de grupos de personas que no pueden llegar a los puntos seguros.

1. Introducción

Chile se caracteriza por una alta actividad sísmica y se tienen registros que desde 1562 han habido más de 100 tsunamis [1]. Planificar evacuaciones masivas en grandes áreas urbanas bajo estos eventos es una tarea difícil y altamente compleja. Depende de, por ejemplo, las características del sismo, el comportamiento humano, la geografía del área,

la distribución de la población.

Es necesario tener el conocimiento sobre cómo evacuar a la población y estas estrategias socializarlas adecuadamente, para mitigar la incertidumbre que se genera en estas situaciones y disponer de herramientas que permitan tomar buenas decisiones con respecto a las estrategias de evacuación. Debido al poco tiempo disponible para evacuar, es conveniente revisar y evaluar la política actual de evacuación, tomando en cuenta variables como la cantidad de población que puede evacuar a tiempo, el tipo de población, las rutas de evacuación, con el fin de reducir el riesgo hacia las personas.

En este contexto, el modelado y la simulación es una herramienta poderosa para analizar y evaluar diferentes políticas de evacuación para limitar el impacto de un tsunami a una población específica. Se pueden usar para (a) identificar problemas en el proceso de evacuación (por ejemplo, obstáculos o congestión en calles), (b) incorporar elementos de seguridad pública en la planificación urbana, (c) mejorar los procedimientos de evacuación y (d) reducir los tiempos de evacuación. Los resultados obtenidos de las simulaciones se pueden utilizar para que las autoridades evalúen las estrategias de evacuación y para capacitar a los habitantes sobre estos procedimientos.

Una evacuación es un fenómeno conductual y físico, influenciado por el comportamiento social de las personas y del entorno geográfico donde ocurre dicho proceso. En este contexto, diversos autores, como [2]-[4], modelan el comportamiento de personas utilizando Modelo Basado en Agentes (ABM, Agent-Based Model) en conjunto con el Modelo de Fuerza Social (SFM, Social Force Model). ABM es un enfoque que permite modelar sistemas en base a unidades autónomas, denominadas agentes y a un ambiente, donde se ubican e interactúan. La simulación de un ABM, se denomina ABS (Agent Based Simulation). El comportamiento de los agentes se describe mediante reglas de movimiento e interacción con otros agentes y con su ambiente. Debido a esto, se pueden observar los efectos que producen sus interacciones en el sistema completo, como patrones, estructuras y comportamientos que no estaban explícitamente programados [5]. SFM, propuesto por [6] y revisado por [7], establece que los cambios de comportamiento en el movimiento humano pueden explicarse por la combinación de sus interacciones sociales, objetivos individuales y la estructura física donde se desenvuelven.

Este trabajo presenta un simulador basado en agentes, denominado Disaster Evacuation and Mobility Patterns Simulator (DEMPS), que modela el comportamiento de personas en situaciones de evacuación masiva en áreas costeras. Los habitantes de la zona de estudio se modelan con dos tipos de agentes: Residentes y Visitantes. Cuando la evacuación se produce, los agentes Residentes seleccionan la ruta más rápida a las zonas seguras, utilizando el algoritmo de Dijkstra [8] implementado en la librería Open Source Routing Machine (OSRM) [9]. Los agentes Visitantes se clasifican inicialmente como Visitantes

Tipo II, que caminan en forma aleatoria, sin rumbo definido. Estos agentes pueden, eventualmente, seguir a grupos de Residentes, transformándose en Visitantes Tipo I. Ambos tipos de agentes se mueven en un espacio continuo que es construido en base a datos geográficos previos. Cada agente puede pertenecer a uno de cuatro grupo etáreos: menores de 14 años, 15 a 29 años, 30 a 64 años y mayores que 65 años. La distribución de agentes en estos grupos se basa en datos sensales. Los movimientos e interacciones de los agentes incluyen los detalles especificados en el Social Force Model (SFM) [6], [10] y el Required Safe Egress Time Evacuation Model (RSET) [11]. Además, cada agente toma en cuenta la densidad de personas en torno a él para determinar su velocidad. Si hay personas que están adelante, dentro de su área de cobertura, el agente disminuye su velocidad. El modelo de comportamiento de los agentes incluye el uso de un dispositivo móvil para solicitar rutas de evacuación desde su ubicación, por ejemplo. El conjunto de peticiones de estos dispositivos a través del tiempo permite predecir la carga que deben soportar los servidores que ofrecen el servicio. Finalmente, el simulador entrega reportes sobre variables de interés definidas como la distancia hacia las zonas seguras separadas por rangos etáreos. Esto puede ser útil para quienes toman las decisiones, ya que pueden brindar ayuda especial en estos puntos críticos a las personas que no pueden llegar a zonas seguras. El simulador está validado con datos empíricos del simulacro de evacuación de la ciudad de Iquique del año 2013.

El documento se estructura de la siguiente forma. En la sección 2 se presentan los trabajos relacionados. La sección 3 se resumen los conceptos en los que se sustenta el trabajo. El modelo conceptual y la arquitectura del simulador propuesta se presenta en las secciones 4 y 5, respectivamente. La sección 6 explica la validación con datos empíricos realizada. La sección 7 presenta tres casos de estudio donde se demuestra la versatilidad del simulador. Finalmente, la sección 8 presenta las conclusiones.

2. Trabajos relacionados

Diversos autores utilizan ABM para lograr simulaciones de evacuación más realistas, tanto en ambientes interiores [12]-[15] como en exteriores [2], [4], [16]. El trabajo presentado por [14] modelan el comportamiento de las personas evacuadas en una sala de concierto en base a tres componentes: selección de una salida, movimiento desde la zona de asientos hacia un pasillo y movimiento a lo largo del pasillo hacia la salida seleccionada. En [15] modelan a cada agente con un conjunto de atributos físicos (edad, sexo, capacidad de moverse, etc) y psicológicos (stress, pánico y rol que desempeña). Para los autores atributos psicológicos influyen en la comunicación, la colaboración y la competitividad. Una clase de agentes que adaptan su comportamiento en la evacuación en base a su experien-

cia se denominan *Agentes Inteligentes* [12]. La adaptación del comportamiento se puede lograr, por ejemplo, a través de genéticos, redes neuronales y lógica difusa, como en el trabajo de [12] o por medio de Autómatas Finitos, como en la simulación de evacuación presentado por [13].

En ambientes exteriores, [16] estudian la evacuación de una plaza de una ciudad de España, modelando el movimiento de cada agente a través de la integración de ABM y el Modelo de Fuerza Social. En el estudio de [4], los autores modelan la evacuación de la parte norte de New Jersey, USA. Las características de los agentes son estocásticos y se ajustan a datos de censo poblacional. El trabajo de [2] consiste en analizar la tasa de ocupación de refugios en el sector de Karoon Parishla en la ciudad de Theran, Irán. El modelo establece agentes móviles (ciudadanos civiles, paramédicos, policías) y agentes estáticos (refugios, calles). Las relaciones entre los distintos agentes se establecen a través de un modelo ontológico.

Debido a los costos de cómputo que requieren las simulaciones de evacuación para miles o millones de personas, se hace necesario utilizar herramientas que permitan utilizar técnicas de Computación de Alto Desempeño (HPC, High Performance Computing) para obtener soluciones en un tiempo razonable. Si bien algunos trabajos, como [4], [17], [18], utilizan software de terceros (MatSim, Transmodeler), existen varios autores que utilizan herramientas estándares de programación para la implementación paralela de los modelos, como OpenMP [19] para memoria compartida y MPI para memoria distribuida [20] (ver 1). Esto es coherente con los hallazgos de la revisión de herramientas para implementar ABM realizada en [21] y en [22], entre las que se destacan Repast-HPC, FLAME, D-MASON y Pandora para el caso de frameworks que implementan modelos en sistemas de alto desempeño en alto nivel y OpenMP/MPI en el caso de herramientas de programación de más bajo nivel. OpenMP, es un conjunto de directivas del compilador, librerías y variables de ambiente que permiten obtener paralelismo en programas escritos en Fortran y C/C++. MPI, por otro lado, permite la sincronización de procesos en múltiples procesadores distribuidos en una red de datos, para lenguajes como C y C++, entre otros. Por ejemplo, en [16] presentan un simulador basado en agentes cuyo modelo de comportamiento se basa en el Social Force Model (SFM). El sistema planteado realiza una cierta cantidad de simulaciones paralelas, del mismo escenario de evacuación, en distintos nodos de una red para luego analizarlas y generar mapas de calor de la ocupación de las vías de escape. La sincronización se realizada a través de MPI. Para incrementar aún más el desempeño, trabajos como [23], [24] implementan simuladores distribuidos con MPI, acelerando la ejecución en cada nodo a través de paralelización bajo memoria compartida con OpenMP.

Tabla 1. Modelos de agentes de gran escala.

Paper	Base model	Case study	Number of evacuees	Tool used
[16]	Agents, Cellular Automata	The Piazza del Campo, Siena	28378	C, MPI
[25]	Agents	Fira de Barcelona building.	15000	Netlogo C, MPI
[26]	Agents	588km ² region, bot specified.	$10 \cdot 10^6$	C++, MPI
[27]	Agents	18km ² region , not specified.	$2 \cdot 10^6$	C++, MPI
[24]	Agents	Región de 20km ² Ciudad de Kesennuma, Japón.	25869	C, MPI, OpenMP
[23]	Agents	81km ² region in Tokio.	$2 \cdot 10^6$	MPI, OpenMP

3. Antecedentes

3.1 Modelos Basados en Agentes

El Modelado Basado en Agentes (ABM, Agent-Based Model), es una técnica que permite modelar sistemas complejos que están compuestos por agentes interactivos y autónomos, desde una metodología Bottom-Up [28]. Un ABM, normalmente consta de tres elementos: Agentes, Relaciones entre ellos y el Ambiente donde se ubican [5]. Los comportamientos de estos agentes se describen mediante reglas e interacciones con otros agentes en el sistema. Estas reglas e interacciones a su vez influyen en sus comportamientos. Al modelar los agentes individualmente (Bottom-Up) se pueden observar los efectos que producen sus interacciones en el sistema completo, como patrones, estructuras y comportamientos que no estaban explícitamente programados [28]. En el caso de los ABM geoespaciales enfocados a las evacuaciones masivas, estos comportamientos emergentes pueden ser utilizados para identificar problemas en el proceso de evacuación, mejorar procedimientos de evacuación y reducir los tiempos en que las personas tardan en llegar a los lugares de encuentro.

En [14] modelan el comportamiento de las personas evacuadas en una sala de concierto en base a tres componentes: selección de una salida, movimiento desde la zona de asientos hacia un pasillo y movimiento a lo largo del pasillo hacia la salida seleccionada. En forma similar, [3], [12], [13], [29] presentan estudios sobre evacuación para ambientes interiores.

Para ambientes exteriores, un ejemplo es [26], donde los autores analizan el movimiento de personas y su interacción en una evacuación de tsunami en una región de aproximadamente 58.8 km^2 . Los trabajos de [24], [26], [27] utilizan ABM para representar evacuaciones en zonas geográficas extensas. Es común que este último tipo de modelos utilice algún módulo GIS para apoyar lo relacionado con las decisiones de índole geográfica de una evacuación. Un Sistema de Información Geográfica (SIG, Geographic Information System) es un conjunto de herramientas que permiten recuperar, visualizar y analizar información espacial.

■3.2 Modelos de movimiento

Para comprender cómo las personas evacúan una zona geográfica, es necesario modelar el movimiento individual. Para esto, se puede utilizar el Modelo de Fuerza Social (SFM, Social Force Model), propuesto por [6]. Postula que el movimiento de las personas es determinado por diversos tipos fuerzas que representan, por ejemplo: el movimiento de la persona hacia el destino seleccionado; la interacción con otras personas; el efecto del roce entre las personas y el efecto que tienen los obstáculos sobre las personas. Diversos autores utilizan como base modelo y lo modifican para situaciones particulares. Por ejemplo, [3] estudian evacuaciones bajo condiciones de visibilidad limitada, [30] analizan el traspaso de información entre las personas evacuadas y [31] lo utiliza como base para un ABM.

SFM representa el desplazamiento de las personas utilizando una combinación de fuerzas (Figura 1). Una persona i de masa m_i tiende a moverse con una rapidez deseada \vec{v}_i^0 . Además, modifica su velocidad actual \vec{v}_i para dirigirse en una dirección deseada \vec{e}_i . El tiempo que toma esta decisión se denomina τ_i . En paralelo a este proceso, la persona trata de mantener una cierta distancia con otra persona j y de un muro u obstáculo w , a través de fuerzas de interacción denominadas $\vec{f}_{i,j}$ y $\vec{f}_{i,w}$, respectivamente.

Las Ecuaciones (1) y (2) describen este principio [6], [32]. Ecuación (1) indica que el movimiento de la i -ésima persona queda establecido por tres componentes: la fuerza deseada \vec{f}_i , que representa cómo la persona trata de llegar a su destino, a pesar de las posibles fluctuaciones que puede tener su ruta debido a la interacción con sus vecinos y obstáculos; la fuerza de interacción $\vec{f}_{i,j}$ entre la persona i y j , que permite evitar colisiones entre personas; y la fuerza de interacción $\vec{f}_{i,w}$, que agrega al modelo la capacidad de mantener a las personas lejos de los muros y obstáculos. Ecuación (2) representa la variación de la velocidad de la persona. El parámetro τ_i sirve para suavizar este proceso. Si es pequeño, significa que la persona toma decisiones muy apresuradas y este componente tendrá un gran impacto. Al contrario, representa una persona que es conservadora y su tiempo de decisión es mayor, por lo que costará más tome la dirección correcta. Las fuerzas $\vec{f}_{i,j}$ y $\vec{f}_{i,w}$ dependen inversamente de la distancia $d_{i,j}$. Implementaciones recientes de este modelo se

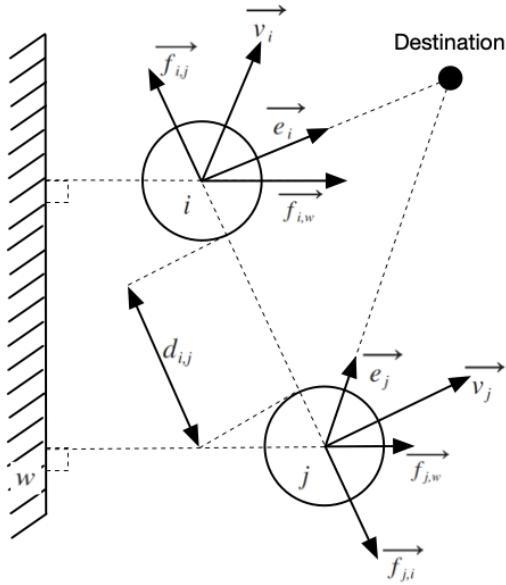


Figura 1. Esquema del Modelo de Fuerza Social.

pueden encontrar en [3], [33].

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{f}_i + \sum_{j \neq i} \vec{f}_{i,j} + \sum_w \vec{f}_{i,w} \quad (1)$$

$$\vec{f}_i = m_i \frac{\vec{v}_i^0 \cdot \vec{e}_i - \vec{v}_i}{\tau_i} \quad (2)$$

Si bien SFM es un modelo aceptado y ampliamente utilizado [3], [4], [16], [25], [34]-[37], hay autores que implementan modelos de comportamiento genéricos, lo que son creados en forma adhoc. Por ejemplo, [26], [27] modelan el movimiento de las personas en base al algoritmo de evasión de colisiones ORCA (Optimal Reciprocal Collision Avoidance) [38] y los autores de [39] utilizan la metaheurística Particle Swarm Optimization. Otras implementaciones genéricas se pueden encontrar en [14] y [40].

3.3 Required Safe Egress Time Evacuation model

El modelo *Required Safe Egress Time* (RSET) [11], [41] representa el proceso de evacuación en dos fases (Figura 2). La primera fase se denomina *Fase de Respuesta*, donde las

personas eventualmente se mueven, pero no para trasladarse a un sitio seguro, sino para buscar información, definir el plan de acción, buscar a otras personas, etc. La segunda fase (*Fase de Movimiento*), las personas toman la decisión de trasladarse hacia el lugar seguro que decidió en la fase anterior.

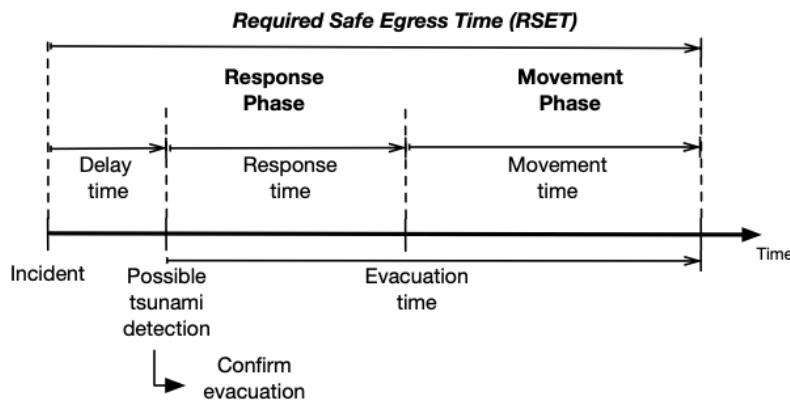


Figura 2. Framework RSET para describir el proceso de evacuación.

4. Modelo del Simulador

El simulador basado en agentes implementado utiliza el paradigma de avance de tiempo a través de intervalos de tiempo discretos. La Figura 3 muestra la estructura general del simulador. El ambiente se modela como un espacio 2D continuo. Para reducir los costos de computación para encontrar los vecinos de un agente determinado, el ambiente de discretiza en celdas de tamaño $10\text{ m} \times 10\text{ m}$. Cada celda tiene una lista actualizada con los agentes que se encuentran de ella. Cuando un agente solicita la lista de vecinos, el ambiente envía la lista de agentes que están dentro de la celda del agente y de las celdas que se encuentran en una vecindad de Moore. Además, el ambiente ajusta la posición inicial de los agentes para que en $t = 0$ todos los agentes se ubiquen en las calles. Contiene la ubicación de áreas, calles y rutas seguras de la ciudad. En cada paso de la simulación, calcula la zona segura más cercana a cada agente residente y actualiza los estados de evacuación de los agentes. Es decir, el entorno alerta a los agentes si se encuentran dentro de una zona segura o no y actualiza su tiempo de evacuación.

El ciclo de vida de los agentes se modela en base a las dos fases del modelo RSET: a) fase de respuesta, donde el agente espera un tiempo aleatorio, emulando el proceso psicológico que significa prepararse para el proceso de evacuación; y b) fase de movimiento, donde el

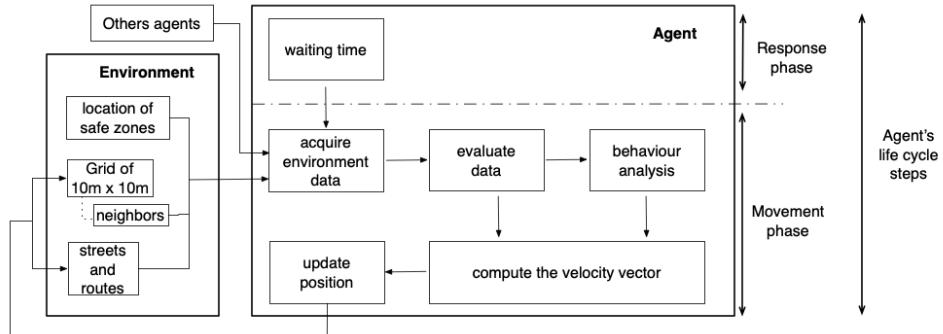


Figura 3. Estructura y componentes de nuestro simulador.

agente se traslada hacia el lugar que decidió en la fase anterior. El tiempo asociado a la fase de respuesta ($t_{response}$) se implementa a través de una variable aleatoria del tipo Rayleigh, con $t_{response} \sim Rayleigh(\tau, sigma)$, donde τ es el retardo y $sigma$ representa qué tan rápido las personas inician su fase de movimiento [42]. La probabilidad $P_{mov}(t)$ de iniciar la fase de movimiento de un agente en el instante de tiempo t está dada por la Ecuación (3) y el tiempo medio de inicio de la fase de movimiento μ está determinada por la Ecuación (4).

$$P_{mov}(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau \\ 1 - e^{(t-\tau)^2/2\sigma^2}, & t > \tau \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (4)$$

Durante la Fase de Movimiento, el componente *evaluate data* de la Figura 3 se utiliza para analizar los datos del ambiente tales como la densidad de personas alrededor del agente. La densidad es determinada en una vecindad circular de radio 5 metros (ver Figura 4). Este radio es un parámetro que puede ser configurado por el usuario. Si T_{ag} es el total de agentes en la vecindad del agente j y r_{cov} su radio de cobertura, entonces la densidad ρ_j es calculada como:

$$\rho_j = \frac{T_{ag}}{\pi \cdot r_{cov}^2} \quad (5)$$

Trabajos como [43]-[46] han demostrado que la densidad impacta negativamente en la velocidad de las personas. Nosotros proponemos que la velocidad de los agentes esté

multiplicada por un factor $\beta = [0, 1]$. Si la densidad $\rho_j \leq 2 \text{ agentes}/m^2$, entonces $\beta = 1$. En caso contrario, el factor β decrece exponencialmente a medida que la cantidad de vecinos aumenta.

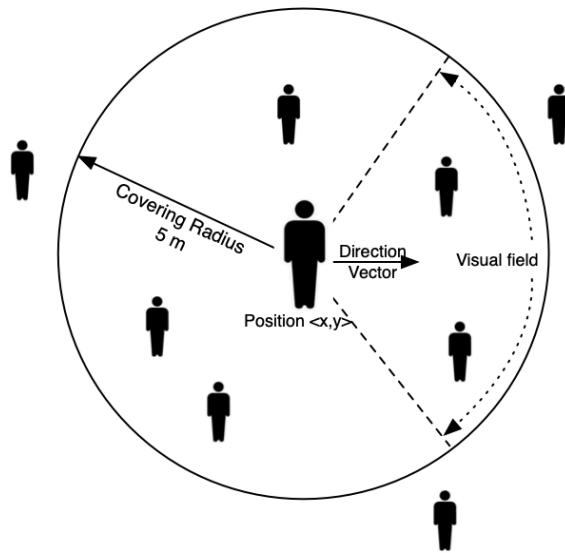


Figura 4. La velocidad de los agentes depende de la densidad de personas dentro de su radio de cobertura y su campo de visión.

El componente *behaviour analysis* modela la interacción entre los agentes. Este bloque implementa una modificación del Modelo de Fuerza Social propuesto en [32], que incluye el efecto de las personas que se encuentran en el *campo de visión* de la persona de interés (ver Figura 4). Este campo es de 120° y comprende un arco circular en un ángulo de -60° a $+60^\circ$ en torno al vector de dirección, que se utiliza como referencia. En nuestro modelo, para determinar el nuevo vector de dirección, se incluyen todas las fuerzas de repulsión de todos agentes que están en la vecindad del agente j , ponderando con mayor peso las fuerzas que provienen de los agentes que están dentro del campo de visión del agente j . El campo de visión es de 120° y se toma como referencia el vector de dirección. La fuerza resultante, en conjunto con la densidad de la vecindad del agente, son utilizadas para modificar su velocidad. Los agentes se modelan como círculos de radio 0.25 m para adultos y círculos de 0.45 m para niños menores de 14 años, ya que se asume que están acompañados por un adulto ([24], [37]).

Acorde al trabajo de [47], los habitantes de la zona de estudio se modelan con dos tipos de agentes: Residentes y Visitantes. Cuando la evacuación se produce, los agentes

Residentes seleccionan la ruta más rápida a las zonas seguras, utilizando el algoritmo de Dijkstra [8]. Los agentes Visitantes se clasifican inicialmente como Visitantes Tipo II, que caminan en forma aleatoria, sin rumbo definido. Estos agentes pueden, eventualmente, seguir a grupos de Residentes, transformándose en Visitantes Tipo I.

Para establecer la velocidad de los agentes, se utilizan los rangos de velocidad de personas presentados en [13], [29], [39] en conjunto con los rangos etáreos establecidos en [24], [47], [48]. Los rangos de velocidad y edad propuestos en este trabajo, se muestran en la Tabla 2. La distribución de estos grupos se ajusta utilizando dos que provienen de censos poblacionales.

Tabla 2. Caracterización de la velocidad de las personas y radio de representación según su edad.

Group	Age Range	Velocity m/s	Radius m
G0	≤ 14	1.22 ± 0.18	0.45
G1	15 – 29	1.48 ± 0.20	0.25
G2	30 – 64	1.34 ± 0.26	0.25
G3	≥ 65	0.67 ± 0.26	0.25

5. Arquitectura del Simulador

El simulador propuesto se implementó en C++14 utilizando un modelo de programación basada en agentes del tipo ad-hoc con el apoyo de la librería OpenMP¹ [19] para paralelizar. La arquitectura del simulador se muestra en la Figura 5. El simulador se ejecuta sobre un computador multicore, con sistema operativo Linux Ubuntu 20.04. El funcionamiento del simulador está definido a través de dos conjuntos de archivos. El primero, tiene relación con los parámetros de la simulación (tiempo de simulación, cantidad de cores a utilizar, ubicación de los archivos de configuración geográficos, ubicación de los archivos de salida, etc). El otro conjunto de archivos definen la zona geográfica a simular, las zonas de inicio donde se ubican los agentes y las zonas seguras donde tienen que llegar.

Las principales clases se muestran en la Figura 6b. La clase Simulator es la que ejecuta la simulación. La librería OSRM (Open Source Routing Machine)² [9] permite calcular los desplazamientos de los agentes dentro del mapa, el que es obtenido desde la plataforma OpenStreetMap³. La librería GeographicLib⁴ permite realizar conversiones entre coordenadas geográficas WGS84 (World Geodetic System 1984), utilizadas por los mapas, a

¹<https://www.openmp.org>

²<http://project-osrm.org>

³<http://www.openstreetmap.org>

⁴<https://geographiclib.sourceforge.io>

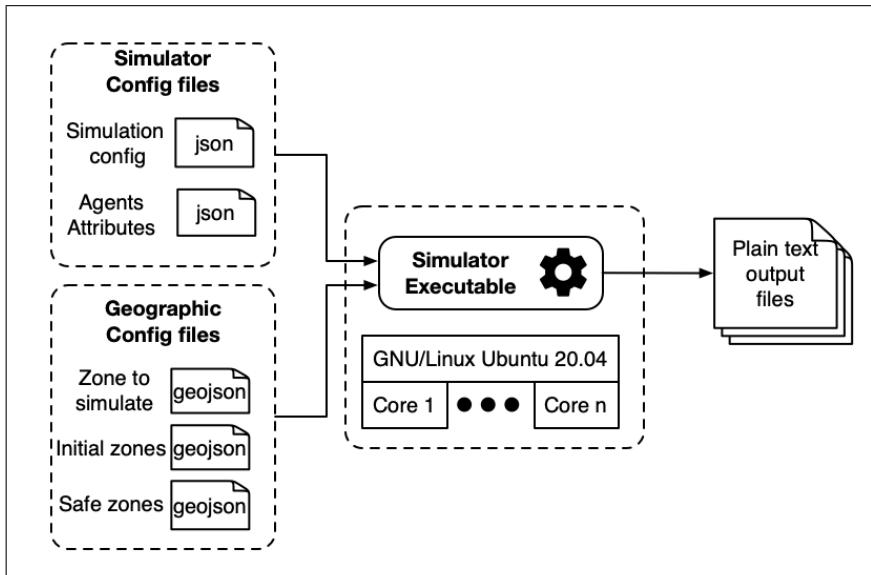


Figura 5. Arquitectura del simulador propuesto.

coordenadas cartesianas ENU (East, North, UP), que es el sistema utilizado por el simulador. Finalmente, la librería CGAL (Computational Geometry Algorithms Library)⁵ [49] se utiliza para determinar posición de agentes dentro de las zonas que son representadas a través de polígonos y generar coordenadas dentro de las zonas iniciales y de encuentro. Las otras clases tales como Environment, Zone y Route implementan los componentes del modelo mostrado en la Figura 3.

La simulación se ejecuta en seis etapas (Figura 6a): (1) Al principio se carga el archivo de inicialización para configurar los parámetros de la simulación. (2) Luego, se crean e inicializan el ambiente, las áreas o zonas y rutas en base a datos de archivos que especifican las áreas geográficas a simular, las áreas iniciales donde se crean los agentes y las áreas seguras donde deben llegar las personas. (3) Despues se crean los agentes, los que son colocados en forma aleatoria en las zonas iniciales, en base a los atributos especificados en el archivo de configuración respectivo. (4) Se ajusta la posición de los agentes y se mueven hacia las calles del mapa. (5) Se realiza la simulacion, donde que ejecuta el ciclo de vida de cada agente en forma repetitiva hasta un tiempo de simulación determinado, utilizando un enfoque de avance de tiempo por intervalos de tiempos discretos. (6) Una vez terminada la simulación, las trazas de movimiento de las personas, tiempos de evacuación, ocupación

⁵<https://www.cgal.org>

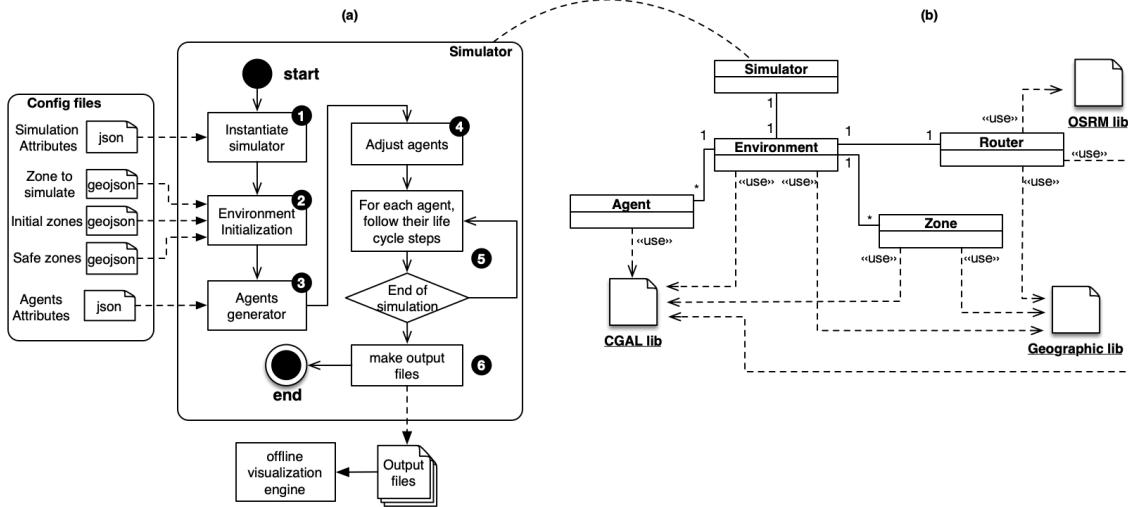


Figura 6. Esquema general del simulador propuesto.

de las zonas seguras, etc, se almacenan en archivos de texto que pueden ser utilizados por aplicaciones de visualización externas.

6. Validación del simulador

6.1 Configuración del escenario experimental

Para validar el modelo de evacuación, se compararon los resultados del simulador propuesto con los resultados del simulacro de evacuación realizado el año 2013 en la ciudad de Iquique [50] y los resultados de un estudio basado en simulación basada en agentes presentados en [51]. La Figura 7 muestra el área geográfica simulada de 20 km^2 . La zona inicial (área gris) es una zona de 5.5 km^2 . La distribución etaria del año 2013 se estima en base a datos censales de los años 2012 y 2017. La Tabla 3 muestra el tamaño de la población en los años 2012 y 2017 para diferentes grupos etarios (G0, G1, G2 and G3) y la población estimada para el año 2013.

Según los datos entregados por [50], alrededor de 75000 personas participaron en el simulacro de evacuación. El tiempo establecido por ONEMI para la detección de un posible tsunami y enviar a la población la respectiva confirmación de evacuación es de 3 min . El tiempo máximo de evacuación desde puntos estratégicos (lugar de alta afluencia de personas, como edificios públicos, escuelas o centros comerciales) fue de 11 min . Tal como en [51], se asume que (1) todas las personas conocen sus rutas y zonas de seguridad

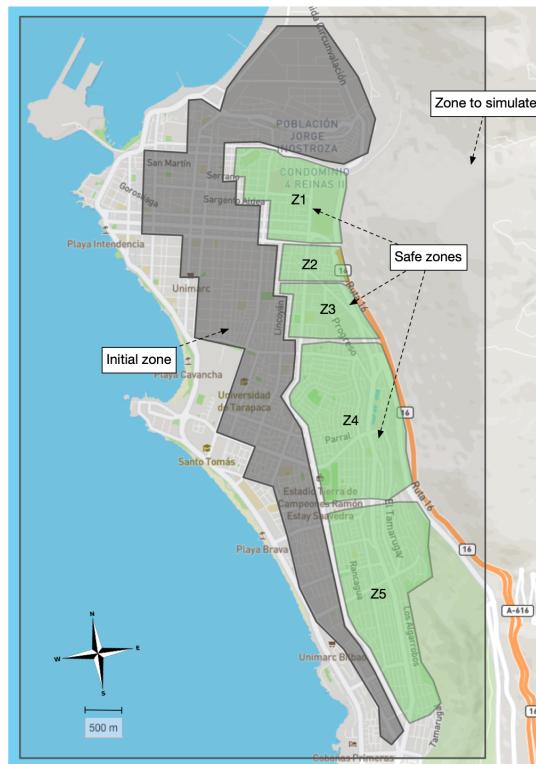


Figura 7. Ciudad de Iquique, Chile. El área gris representa la zona inicial donde los agentes son colocados. Las áreas verdes representan zonas seguras.

Tabla 3. Tamaño de la población y su distribución según rangos de edad obtenidos de datos censales del Instituto Nacional de Estadística (INE) de Chile. Los valores para el año 2013 son estimados.

Tag	Age Range	2012	2017	2013*	Percentage*
G0	0 – 14	41,842	40,588	40,922	21.15 %
G1	15 – 29	42,745	45,457	44,734	24.22 %
G2	30 – 44	39,465	44,757	43,346	23.46 %
	45 – 64	31,231	42,936	39,815	21.55 %
G3	≥ 65	10,921	17,730	15,914	8.61 %
	Total	166,204	191,468	184,731	100.00 %

y (2) priorizan la evacuación por sobre otras actividades. De acuerdo a estos datos, se configuraron 75000 agentes residentes en el simulador. El retardo del modelo RSET es

$\tau = 3 \text{ min}$. Para ajustar la probabilidad de que a las 11 min hayan iniciado su fase de movimiento el 99.99 % de los agentes, se determina $\sigma = 2.5 \text{ min} = 150 \text{ s}$ en la Ecuación (3). La Figura 8 muestra un ejemplo del archivo de configuración utilizado para crear los agentes. La simulación se discretiza en intervalos de $\Delta t = 1 \text{ s}$ y la velocidad de los agentes se expresan en m/s . El tiempo de simulación total se fija en $T_{\text{sim}} = 3600 \text{ s}$ y se realizan 100 simulaciones.

```

"agents": [
    {
        "model" : "Residents",
        "number" : 7500,
        "responseTime" : {"tau" : 180,"sigma" : 150},
        "ageRange":{
            "G0": {"prob": 0.2120,"minSpeed": 1.04,"maxSpeed": 1.40},
            "G1": {"prob": 0.2374,"minSpeed": 1.28,"maxSpeed": 1.68},
            "G2": {"prob": 0.4580,"minSpeed": 1.08,"maxSpeed": 1.60},
            "G3": {"prob": 0.0926,"minSpeed": 0.41,"maxSpeed": 0.93}
        }
    },
    {
        "model" : "Visitors",
        "number" : 0,
        "responseTime" : {"tau" : 180,"sigma" : 150},
        "ageRange":{
            "G0": {"prob": 0.2120,"minSpeed": 1.04,"maxSpeed": 1.40},
            "G1": {"prob": 0.2374,"minSpeed": 1.28,"maxSpeed": 1.68},
            "G2": {"prob": 0.4580,"minSpeed": 1.08,"maxSpeed": 1.60},
            "G3": {"prob": 0.0926,"minSpeed": 0.41,"maxSpeed": 0.93}
        }
    }
]

```

Figura 8. Archivo de configuración utilizado para crear los agentes de la simulación.

■6.2 Resultados

Los tiempos de evacuación reportados por nuestro simulador se compararon con los tiempos de evacuación obtenidos en el simulacro de evacuación en la ciudad de Iquique el año 2013 [50]. Estos datos se obtuvieron utilizando un subconjunto de las zonas seguras y la participación de 12650 personas (16,8 % del total de la población). Los mismos datos fueron utilizados en el trabajo presentado en [51].

La Tabla 4 muestra el promedio del tiempo de evacuación en minutos obtenidos por nuestra herramienta de simulación DEMPS, el trabajo presentado por [51] y los datos empíricos obtenidos en el simulacro de evacuación. Los tiempos de evacuación del simulacro son tabulados en términos de los deciles de personas evacuadas. Por ejemplo, el 10 % de las personas son evacuadas en promedio en 4,5 m. Nuestra propuesta reporta un Error Cuadrático Medio (RMSE) de $RMSE_{\text{demps}} = 2.79 \text{ min}$. El trabajo presentado en [51]

reporta un $RMSE_{solis} = 11.56 \text{ min}$. La Figura 9 muestra el porcentaje de personas que alcanzan una zona segura a través del tiempo. Esta figura muestra que las curvas que representan nuestra propuesta y los datos empíricos son casi las mismas.

Tabla 4. Tiempo de Evacuacion en minutos.

Escenario	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	RMSE
Iquique drill	4.5	6.0	7.0	8.5	11.0	12.5	14.0	16.0	22.0	38.5	
Solis & Gazmuri	4.5	7.0	9.5	13.0	16.5	21.5	27.0	34.0	40.0	58.0	11.56
demps	4.6	6.2	7.7	9.2	10.8	12.5	14.4	16.7	20.0	47.0	2.79

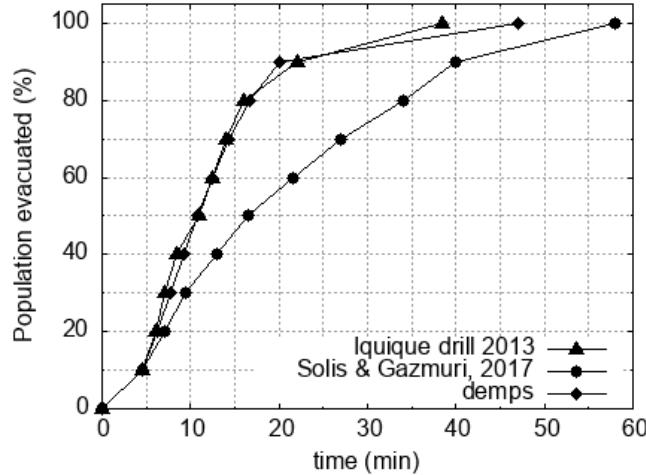


Figura 9. Porcentaje de la población de Iquique que alcanza las zonas seguras.

7. Casos de estudio

7.1 Evacuación de la zona costera de la ciudad de Iquique, Chile

7.1.1 Configuración del escenario experimental

Tomando como base el simulador ya validado, se evaluó una evacuación de 75000 personas ubicadas en la costa de la ciudad de Iquique, tal como se muestra en la Figura 10). Se utilizó la misma distribución etarea de la sección anterior (Tabla 3). Se simuló un total de $T_{sim} = 3,600 \text{ s}$ y se realizaron 30 experimentos.



Figura 10. Nuevo escenario de simulación para la ciudad de Iquique, Chile. El área gris representa la zona inicial donde los agentes son colocados. Las áreas verdes representan zonas seguras.

7.1.2 Resultados

La Figura 11 muestra el porcentaje de personas evacuadas a medida que transcurre el proceso de evacuación. El 50 % de la población logra evacuar en $25 \pm 0.5 \text{ min}$. El 75 % evacúa en $32 \pm 1 \text{ min}$. Los resultados indican que el 2.5 % de la población total (1895 ± 30 personas) no alcanza a llegar a las zonas seguras. Para este caso, interesa conocer a qué distancia quedaron de sus zonas segura. La Figura 12a muestra la distribución de las distancias a las zonas seguras para las personas no evacuadas. El eje vertical representa la distancia en metros (m) y el eje horizontal muestra los identificadores de las zonas seguras. Los círculos representan outliers. Este gráfico muestra que las zonas Z1, Z2 y Z3 presentan distancias mayores, con promedios $\mu_{Z1} = 687 \text{ m}$, $\mu_{Z2} = 701 \text{ m}$, $\mu_{Z3} = 637 \text{ m}$. La distancia máxima es cercana a los 2200 m para la zona Z2. La Figura 12b muestra por cada zona la misma información pero separadas por grupo etáreo. En este caso, el eje horizontal representa el grupo etáreo. Como era de esperar, este gráfico muestra que

el grupo G3 (personas mayores que 65 años) presentan las mayores distancias a las zonas seguras.

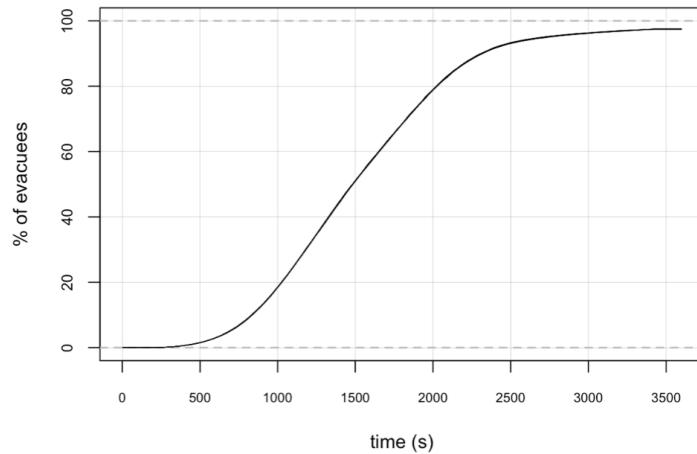


Figura 11. Porcentaje de la población que alcanza las zonas seguras a medida que transcurre la evacuación.

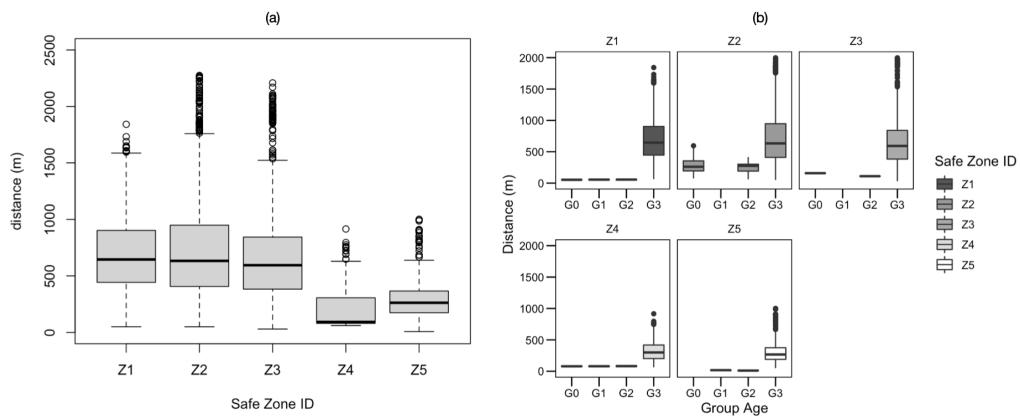


Figura 12. Distancia a las zonas seguras de las personas no evacuadas. a) Distribución por Zona Segura. b) Distribución por Zona Segura y Grupo Etareo.

7.2 Ciudad de Kesennuma, Japan

7.2.1 Configuración del escenario experimental

En esta sección, se comparan los resultados obtenidos por nuestro simulador DEMPS y los resultados presentados en [24]. Este trabajo simula una evacuación de 25869 personas en la ciudad de Kesenuma, Japón (ver Figura 13). Los agentes son colocados en las áreas grises. El tiempo de respuesta de los agentes son modelados a través de una distribución Log-normal con un promedio $E = 10 \text{ min}$ y una varianza $\sigma^2 = 2,8 \text{ min}$. Adicionalmente, la población es dividida en dos grupos etarios. El primero, con personas bajo 65 años y el segundo con personas con 65 años o más.

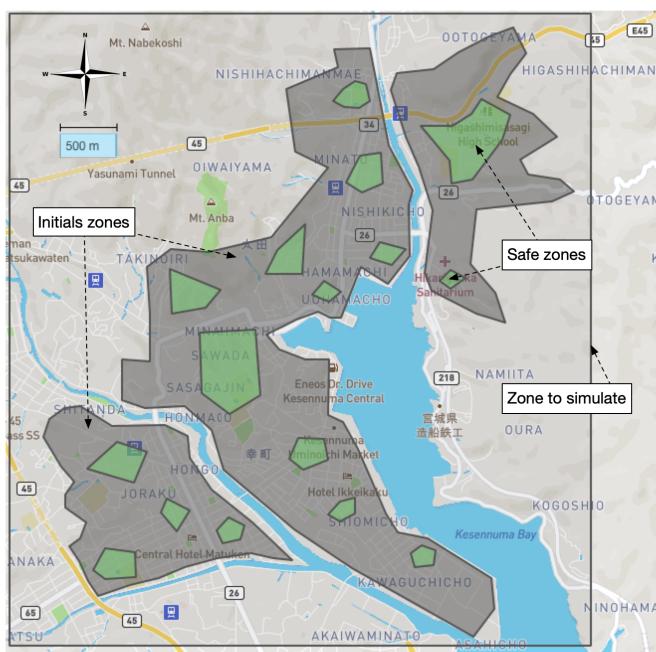


Figura 13. Ciudad de Kesennuma, Japón. Las áreas grises representan las zonas iniciales donde los agentes son colocados. Las áreas verdes representan zonas seguras.

7.2.2 Resultados

La Figura 14 muestra el porcentaje acumulado de personas evacuadas. La Figura 14(a) muestra los resultados obtenidos a través de nuestro simulador DEMPS y la Figura 14(b) muestra los resultados presentados en [24]. Se grafican los resultados de 500 simulaciones. Se observa que las simulaciones presentan variabilidad del porcentaje de personas evacuadas, pero que está totalmente acotada. La curva sube rápidamente debido a que las zonas

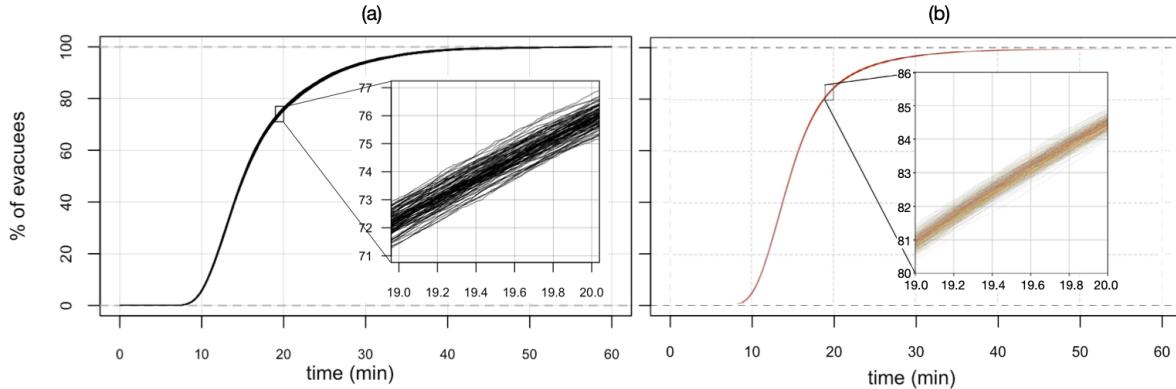


Figura 14. Porcentaje acumulado de personas evacuadas en la ciudad de Kesennuma. Resultados obtenidos por (a) nuestro simulador DEMPS simulator y (b) resultados presentados en [24].

seguras están dentro de las zonas iniciales, por lo que los agentes llegan rápidamente a ellas.

En forma adicional, la Tabla 5 muestra el porcentaje de personas evacuados reportada por DEMPS y por [24]. Estos valores son obtenidos a través de un análisis geométrico de la Figura 14(b). Nuestro simulador reporta un error de $RMSE = 4.13\%$ comparados con [24].

Tabla 5. Average percentage of evacuated people reported by Demps and the work in [24].

time (min)	Demps	Makinoshima et al.
0	0 %	0 %
10	5.72 %	5.1 %
20	75.87 %	84.6 %
30	93.99 %	96.9 %
40	98.81 %	99.0 %
RMSE	4.13 %	

El tiempo de ejecución es muy importante en simulaciones de gran escala, debido a que se deben realizar muchas simulaciones de un mismo escenario para que los resultados sean estadísticamente significativos. A esto hay que agregarle que las simulaciones de evacuación de personas contiene un gran número de agentes. Para la ciudad en estudio, los autores de [24] simularon $T_{sim} = 3600\text{ s}$ con un avance de tiempo de $\Delta t = 0.01\text{ s}$. Los experimentos fueron realizados en un sistema computacional de 400 cores, organizados en 20 servidores, cada uno con dos procesadores Intel Xeon E5-2690v2 (25MB Cache, 3.0

GHz). Los resultados reportan un tiempo de ejecución de $t_{exec} \approx 900$ s. En contraste, nuestro simulador alcanza un tiempo de ejecución de $t_{exec} \approx 770$ s en un computador con cuatro Intel cores i5-9400 (9MB Cache, 3.0Ghz) (ver Fig. 15.(a)).

Si se incrementa el intervalo de tiempo de simulación a $\Delta t = 1.00$ s, nuestro simulador reporta un tiempo de ejecución de $t_{exec} \approx 25$ s. La Figura 15(b) muestra el porcentaje acumulado de personas evacuadas para las simulaciones con intervalo de tiempo de $\Delta t = 0.01$ s y $\Delta t = 1.00$ s. El RMSE obtenido entre ambos resultados es menor que 1.0 %. Esto significa que no es necesario realizar simulaciones de evacuación con una granularidad tan fina, ya que la gran cantidad de cómputo realizado no implica una mayor precisión en los resultados.

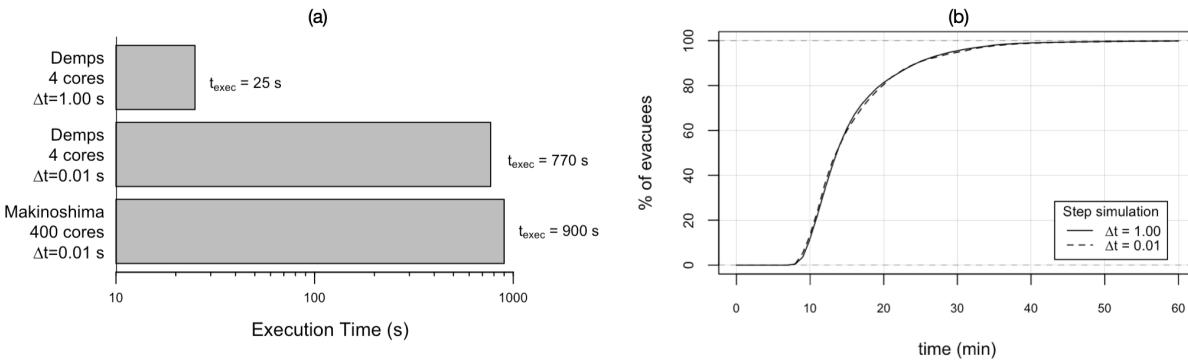


Figura 15. Demps vs. el simulador presentado en [24]. (a) Tiempo de ejecución. (b) Porcentaje acumulado de personas evacuadas en la ciudad de Kesennuma de simulaciones realizadas con un $\Delta t = 1.0$ and a $\Delta t = 0.01$. El RMSE es menor que 1.0 %.

7.3 Predicción de peticiones de servicio

Una de las preguntas que permite contestar este simulador, es cómo se puede caracterizar el uso de un teléfono móvil durante una evacuación. Para esto, se diseña un experimento con 10000 agentes en la ciudad de Valparaíso, Chile. Se asume que el deseo de utilizar el teléfono del i -ésimo agente A_i es un proceso de Poisson, cuyos intervalos de tiempo entre los eventos son independientes y distribuidos bajo una distribución exponencial de parámetro $\lambda = 5$ s. Cada vez que ocurre el evento de querer utilizar el teléfono, el agente A_i observa a su alrededor y determina su cantidad de vecinos v_i . Esta cantidad está relacionada con la probabilidad P_{uso} de utilizar realmente el teléfono, donde $P_{uso} = e^{-v_i/k}$, donde k es un parámetro del modelo y se ajusta a $k = 10$ personas. Esto permite asegurar que si $v_i \leq 5$, entonces $P_{uso} > 60$ %. El tiempo de simulación se ajusta a $T_{sim} = 2000$ s.

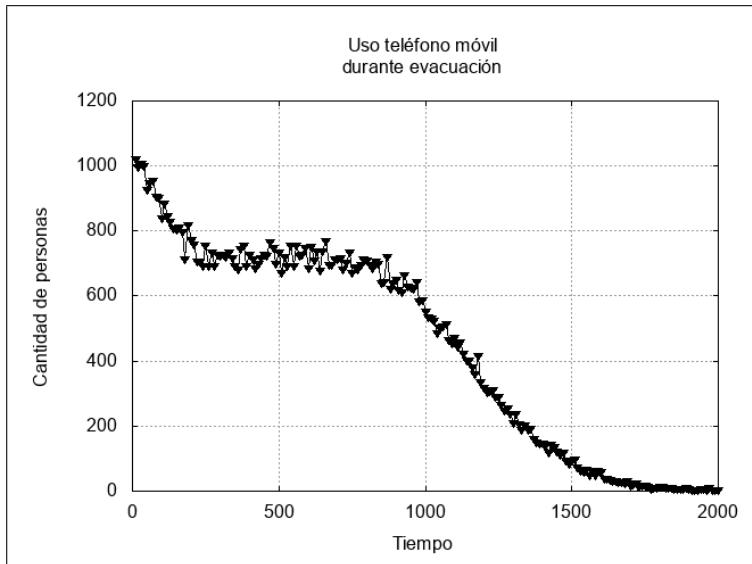


Figura 16. Ejemplo de uso del teléfono móvil durante una evacuación.

En la Figura 16 se muestra la cantidad de personas que utilizan su teléfono móvil en el escenario descrito. Se puede observar que el proceso de caminar hacia los puntos de encuentro se localiza en el intervalo de tiempo [100 – 1000], donde la cantidad de personas que usan su dispositivo se mantiene dentro de un rango acotado (Figura 17a). Después de ese tiempo ($T_{sim} > 1000 \text{ s}$), las personas dejan de utilizar su teléfono debido a que empiezan a llegar a las zonas de encuentro respectivas (Figura 17b y 17c).

8. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una herramienta de simulación eficiente y precisa para evaluar la evacuación de personas en ciudades costeras. El modelo desarrollado se basa en una simulación basada en agentes con un modelo de fuerza social para modelar el movimiento de personas. Desde esta perspectiva, los aportes del trabajo son: (1) modelar los agentes en grupos de edad que coinciden con los grupos de población proporcionados por el organismo gubernamental encargado de la estadística. Cada grupo tiene asociadas diferentes velocidades, lo que permite analizar los tiempos de evacuación desde la perspectiva de la edad de las personas y así utilizar esta información para crear políticas de evacuación articuladas con la realidad de la ciudad y (2) establecer una metodología que permita diseñar la estructura del agente en base al estándar RSET de procesos de evacuación. Esto favorece la inclusión de parámetros como el tiempo de alerta de tsunami y

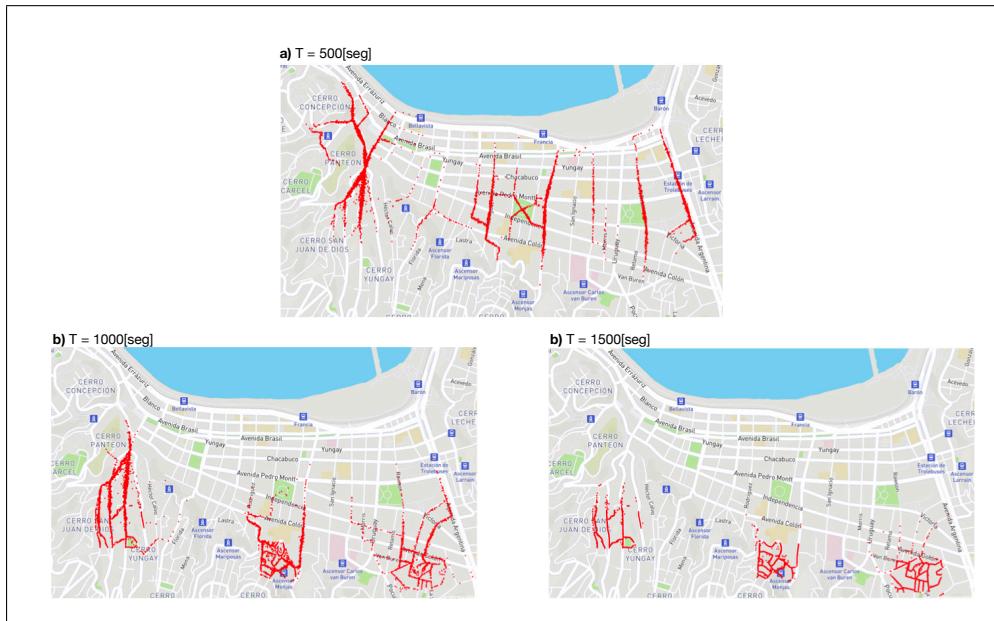


Figura 17. Estado de la simulación para $T_{sim} = \{500, 1000, 1500\}$ s.

el tiempo de preparación de la población con base en informes de simulación técnica de organizaciones de protección civil.

El modelo implementado se validó con datos experimentos obtenidos en el simulacro de evacuación en la ciudad de Iquique en el año 2013. Los resultados indican que el error de predicción es aproximadamente 2.5 min , lo que indica que nuestro simulador puede ser utilizado para estimar tiempos de evacuación y población evacuada.

Referencias

- [1] M. Lagos, «Tsunamis de origen cercano a las costas de Chile,» *Revista de Geografía Norte Grande*, 2000.
- [2] M. Hashemi y A. A. Alesheikh, «GIS: Agent-based modeling and evaluation of an earthquake-stricken area with a case study in Tehran, Iran,» *Natural Hazards*, 2013, ISSN: 0921030X. DOI: 10.1007/s11069-013-0784-x.
- [3] P. Wang y S. Cao, *Simulation of pedestrian evacuation strategies under limited visibility*, 2019. DOI: 10.1016/j.physleta.2018.12.017.
- [4] Y. Zhu, K. Xie, K. Ozbay y H. Yang, «Hurricane Evacuation Modeling Using Behavior Models and Scenario-Driven Agent-based Simulations,» en *Procedia Computer Science*, 2018. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.074.

- [5] C. Macal y M. North, «Introductory tutorial: Agent-based modeling and simulation,» en *Proceedings - Winter Simulation Conference*, vol. 2015-Janua, 2015, págs. 6-20, ISBN: 9781479974863. DOI: 10.1109/WSC.2014.7019874. arXiv: arXiv:1105.4823v1.
- [6] D. Helbing y P. Molnar, «Social Force Model for Pedestrian Dynamics,» *Physical Review E*, vol. 51, n.º 5, págs. 4282-4286, 1998, ISSN: 1063651X. DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282. arXiv: 9805244 [cond-mat]. dirección: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/9805244>.
- [7] D. Helbing y A. Johansson, «Pedestrian, crowd and evacuation dynamics,» en *Encyclopedia of complexity and systems science*, Springer, 2009, págs. 6476-6495.
- [8] E. W. Dijkstra, «A note on two problems in connexion with graphs,» *Numerische Mathematik*, vol. 1, n.º 1, págs. 269-271, 1959. DOI: 10.1007/BF01386390. dirección: <https://doi.org/10.1007/BF01386390>.
- [9] D. Luxen y C. Vetter, «Real-time routing with OpenStreetMap data,» en *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems*, ACM, 2011, págs. 513-516.
- [10] L. Chen, T. Q. Tang, H. J. Huang, J. J. Wu y Z. Song, «Modeling pedestrian flow accounting for collision avoidance during evacuation,» *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 82, págs. 1-11, 2018, ISSN: 1569190X. DOI: 10.1016/j.smpat.2017.12.011.
- [11] J. D. Averill, P. Reneke y R. D. Peacock, «Required Safe Egress Time,» en *7 th International Conference on Performance-Based and Fire Safety Design Methods*, 2008.
- [12] S. Sharma, K. Ogunlana, D. Scribner y J. Grynovicki, «Modeling human behavior during emergency evacuation using intelligent agents: A multi-agent simulation approach,» *Information Systems Frontiers*, 2018, ISSN: 15729419. DOI: 10.1007/s10796-017-9791-x.
- [13] P. C. Tissera, A. Castro, A. M. Printista y E. Luque, «Evacuation simulation supporting high level behaviour-based agents,» en *Procedia Computer Science*, 2013. DOI: 10.1016/j.procs.2013.05.317.
- [14] N. Wagner y V. Agrawal, «An agent-based simulation system for concert venue crowd evacuation modeling in the presence of a fire disaster,» *Expert Systems with Applications*, 2014, ISSN: 09574174. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.10.013.
- [15] C. Şahin, J. Rokne y R. Alhajj, «Human behavior modeling for simulating evacuation of buildings during emergencies,» *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 528, pág. 121432, 2019, ISSN: 0378-4371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121432>. dirección: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437119308362>.
- [16] A. Gutierrez-Milla, F. Borges, R. Suppi y E. Luque, «Crowd evacuations SaaS: An ABM approach,» en *Procedia Computer Science*, 2015. DOI: 10.1016/j.procs.2015.05.271.

- [17] G. Lämmel, D. Grether y K. Nagel, «The representation and implementation of time-dependent inundation in large-scale microscopic evacuation simulations,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 18, págs. 84-98, 2010, ISSN: 0968090X. DOI: 10.1016/j.trc.2009.04.020.
- [18] R. M. Robinson, A. J. Collins, C. A. Jordan, P. Foytik y A. J. Khattak, «Modeling the impact of traffic incidents during hurricane evacuations using a large scale microsimulation,» *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 31, págs. 1159-1165, 2018, ISSN: 22124209. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2017.09.013.
- [19] A. OpenMP, «OpenMP Application Program Interface V3. 0,» *OpenMP Architecture Review Board*, 2008.
- [20] T. Sterling, «Parallel Programming with MPI,» en *Beowulf Cluster Computing with Windows*, 2018. DOI: 10.7551/mitpress/1557.003.0014.
- [21] S. Abar, G. K. Theodoropoulos, P. Lemarinier y G. M. O'Hare, «Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software,» *Computer Science Review*, vol. 24, págs. 13-33, 2017, ISSN: 15740137. DOI: 10.1016/j.cosrev.2017.03.001. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- [22] A. Rousset, B. Herrmann, C. Lang y L. Philippe, «A survey on parallel and distributed multi-agent systems for high performance computing simulations,» *Computer Science Review*, vol. 22, págs. 27-46, 2016, ISSN: 15740137. DOI: 10.1016/j.cosrev.2016.08.001.
- [23] L. Aguilar, M. Lalith, T. Ichimura y M. Hori, «On the performance and scalability of an HPC enhanced Multi Agent System based evacuation simulator,» *Procedia Computer Science*, vol. 108, n.º Supplement C, págs. 937-947, 2017.
- [24] F. Makinoshima, F. Imamura e Y. Abe, «Enhancing a tsunami evacuation simulation for a multi-scenario analysis using parallel computing,» *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2018, ISSN: 1569190X. DOI: 10.1016/j.simpat.2017.12.016.
- [25] A. Gutierrez-Milla, F. Borges, R. Suppi y E. Luque, «Individual-oriented model crowd evacuations distributed simulation,» en *Procedia Computer Science*, 2014. DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.145.
- [26] L. Wijerathne, W. Petprakob, L. Aguilar, M. Hori y T. Ichimura, «Scalable HPC Enhanced Agent Based System for Simulating Mixed Mode Evacuation of Large Urban Areas,» en *Transportation Research Procedia*, 2018. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.11.042.
- [27] M. L. Wijerathne, L. A. Melgar, M. Hori, T. Ichimura y S. Tanaka, «HPC enhanced large urban area evacuation simulations with vision based autonomously navigating multi agents,» en *Procedia Computer Science*, 2013. DOI: 10.1016/j.procs.2013.05.319.

- [28] A. Quezada y E. Canesa, «Modelado basado en agentes: Una herramienta para complementar el análisis de fenómenos sociales,» *Avances en Psicología Latinoamericana*, vol. 28, n.º 2, págs. 226-238, 2010, ISSN: 17944724.
- [29] J. Joo, N. Kim, R. A. Wysk, L. Rothrock, Y. J. Son, Y. G. Oh y S. Lee, «Agent-based simulation of affordance-based human behaviors in emergency evacuation,» *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2013, ISSN: 1569190X. DOI: 10.1016/j.smpat.2012.12.007.
- [30] Y. Han y H. Liu, «Modified social force model based on information transmission toward crowd evacuation simulation,» *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, ISSN: 03784371. DOI: 10.1016/j.physa.2016.11.014.
- [31] M. D'Orazio, L. Spalazzi, E. Quagliaini y G. Bernardini, «Agent-based model for earthquake pedestrians' evacuation in urban outdoor scenarios: Behavioural patterns definition and evacuation paths choice,» *Safety Science*, 2014, ISSN: 09257535. DOI: 10.1016/j.ssci.2013.09.014.
- [32] D. Helbing, I. Farkas y T. Vicsek, «Simulating dynamical features of escape panic,» *Nature*, vol. 407, págs. 487-490, 2000, ISSN: 00280836. DOI: 10.1038/35035023. arXiv: 0009448 [cond-mat].
- [33] H. Zhang, H. Liu, X. Qin y B. Liu, «Modified two-layer social force model for emergency earthquake evacuation,» *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 492, págs. 1107-1119, 2018, ISSN: 03784371. DOI: 10.1016/j.physa.2017.11.041. dirección: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437117311172>.
- [34] Q. Liu, «A social force model for the crowd evacuation in a terrorist attack,» *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018, ISSN: 03784371. DOI: 10.1016/j.physa.2018.02.136.
- [35] B. Liu, H. Liu, H. Zhang y X. Qin, «A social force evacuation model driven by video data,» *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2018, ISSN: 1569190X. DOI: 10.1016/j.smpat.2018.02.007.
- [36] H. Dong, X. Gao, T. Gao, X. Sun y Q. Wang, «Crowd evacuation optimization by leader-follower model,» en *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2014, ISBN: 9783902823625.
- [37] G. Bernardini, M. D'Orazio, E. Quagliaini y L. Spalazzi, «An agent-based model for earthquake pedestrians' evacuation simulation in Urban scenarios,» en *Transportation Research Procedia*, 2014. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.09.050.
- [38] J. Van Den Berg, S. J. Guy, M. Lin y D. Manocha, «Reciprocal n-body collision avoidance,» en *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2011, ISBN: 9783642194566. DOI: 10.1007/978-3-642-19457-3_1.

- [39] B. Yang, B. Ren e Y. G. Wu, «The research of multi-resolution modeling and simulation of the emergency evacuation,» en *Procedia Engineering*, 2012. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.450.
- [40] S. Kasereka, N. Kasoro, K. Kyamakya, E. F. Doungmo Goufo, A. P. Chokki y M. V. Yengo, «Agent-Based Modelling and Simulation for evacuation of people from a building in case of fire,» en *Procedia Computer Science*, 2018. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.006.
- [41] V. Babrauskas, J. M. Fleming y B. Don Russell, «RSET/ASET, a flawed concept for fire safety assessment,» *Fire and Materials*, vol. 34, n.º 7, págs. 341-355, 2010. DOI: 10.1002/fam.1025. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/fam.1025>. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fam.1025>.
- [42] A. Mostafizi, H. Wang, D. Cox, L. A. Cramer y S. Dong, «Agent-based tsunami evacuation modeling of unplanned network disruptions for evidence-driven resource allocation and retrofitting strategies,» *Natural Hazards*, vol. 88, págs. 1347-1372, 2017, ISSN: 15730840. DOI: 10.1007/s11069-017-2927-y.
- [43] R. A. Smith, «Density, velocity and flow relationships for closely packed crowds,» *Safety Science*, vol. 18, n.º 4, págs. 321-327, 1995, ISSN: 09257535. DOI: 10.1016/0925-7535(94)00051-4.
- [44] H. Chizari, F. Malekinezhad, M. R. Embi, Y. M. Yatim, S. A. Razak, M. H. bin Haji Ahmad y M. Bakhtiari, «Agent-based approach for modeling evacuee uncertainty behavior using game theory model,» *Life Science Journal*, vol. 10, n.º 3, págs. 1350-1355, 2013, ISSN: 10978135.
- [45] T. Yamashita, H. Matsushima e I. Noda, «Exhaustive analysis with a pedestrian simulation environment for assistant of evacuation planning,» *Transportation Research Procedia*, vol. 2, págs. 264-272, 2014.
- [46] Y. Goto, M. Affan, Y. Nurdin, D. K. Yuliana y col., «Tsunami evacuation simulation for disaster education and city planning,» *Journal of Disaster Research*, vol. 7, n.º 1, págs. 92-101, 2012.
- [47] L. Aguilar, L. Wijerathne, S. Jacob, M. Hori y T. Ichimura, «Mass evacuation simulation considering detailed models: behavioral profiles, environmental effects, and mixed-mode evacuation,» *Asia Pacific Management Review*, vol. 24, n.º 2, págs. 114-123, 2019, ISSN: 10293132. DOI: 10.1016/j.apmrv.2019.05.001.
- [48] B. T. J. Gates, D. A. Noyce, A. R. Bill, N. Van Ee y T. J. Gates, «Recommended Walking Speeds for Pedestrian Clearance Timing Based on Pedestrian Characteristics,» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1982, n.º 1, págs. 38-47, 2006. DOI: 10.3141/1982-07.

- [49] P. Alliez y A. Fabri, «CGAL: The Computational Geometry Algorithms Library,» en *ACM SIGGRAPH 2016 Courses*, ép. SIGGRAPH '16, Anaheim, California: Association for Computing Machinery, 2016, ISBN: 9781450342896. DOI: 10.1145/2897826.2927362. dirección: <https://doi.org/10.1145/2897826.2927362>.
- [50] J. M. Walker Rousseau y col., «Informe técnico de evaluación simulacro macrozona norte de terremoto y tsunami (Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama)-8 de Agosto de 2013,» 2013.
- [51] I. A. Solís y P. Gazmuri, «Evaluation of the risk and the evacuation policy in the case of a tsunami in the city of Iquique, Chile,» *Natural Hazards*, vol. 88, págs. 503-532, 2017, ISSN: 15730840. DOI: 10.1007/s11069-017-2876-5.