

MODELAMIENTO DE LA EVACUACIÓN DE UN COLEGIO EN IQUIQUE

F. Tocornal^(1,6), A. Poulos^(2,6), J. C. de la Llera^(3,6), J. Mitrani-Reiser⁽⁴⁾, F. Rivera^(5,6)

⁽¹⁾ Alumno de Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile, ftocorn1@uc.cl

⁽²⁾ Alumno de Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile, ajpoulos@uc.cl

⁽³⁾ Profesor Titular, Pontificia Universidad Católica de Chile, jlclera@ing.puc.cl

⁽⁴⁾ Profesora Asistente, Johns Hopkins University, jmitrani@jhu.edu

⁽⁵⁾ Investigador, Pontificia Universidad Católica de Chile, fnrivera@uc.cl

⁽⁶⁾ Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales CONICYT/FONDAP/15110017

Resumen

La evacuación de personas en ciudades costeras potencialmente inundables por tsunamis que ocurren como resultado de terremotos de gran magnitud, es una actividad social crítica y compleja que necesita ser ejecutada en muy poco tiempo por las personas y coordinada por las oficinas de emergencia. Esta investigación se centra únicamente en lo que ocurre dentro de los edificios que están en la zona de inundación, desarrollando un modelo basado en agentes para simular evacuaciones de edificios. La metodología utilizada integra los efectos físicos del movimiento de los agentes con distintos comportamientos sociales que se han observado en evacuaciones reales. El modelo se aplicó al caso de un simulacro real de evacuación de un colegio en la ciudad de Iquique, en el norte de Chile. Los flujos y tiempos de evacuación medidos en el simulacro fueron utilizados para cuantificar la capacidad predictiva del modelo propuesto, obteniendo diferencias entre lo predicho y real de 13.6% y 5.9%, respectivamente. Esta capacidad de modelar evacuaciones de personas de forma realista puede ser utilizada en el futuro en diversas aplicaciones, en particular, para predecir los posibles problemas en la evacuación de un edificio y cuantificar los efectos de posibles medidas de mitigación que se pueden tomar para mejorar la respuesta de las personas y comunidades involucradas.

Palabras Clave: simulacro de evacuación, modelo de evacuación, modelación basada en agentes

Abstract

Evacuating people from potential tsunami inundation zones as a result of large earthquakes in cities and towns along the shoreline is a critical and complex social activity that needs to be executed in very short time by people while coordinated by emergency offices. This research focuses in the evacuation process inside the buildings that are located in inundation zones, developing an agent-based model to simulate building evacuations. The methodology that was used integrates the physical effects of agent motion with different social behaviors that have been observed in real evacuations. The model was applied to a real evacuation drill of a school in the city of Iquique, in northern Chile. The flow rates and evacuation times that were measured in the drill were used to quantify the predictive capacity of the proposed model, obtaining differences of 13.6% and 5.9%, respectively. This ability to model human evacuations in a realistic way can be used in the future to wide variety of applications, including the prediction of concerns in the evacuation process of a building, and assess the positive effects of possible mitigation actions that communities and people can undergo to improve their emergency evacuation response.

Keywords: evacuation drill, evacuation model, agent-based modeling

1 Introducción

La evacuación de personas en ciudades costeras potencialmente inundables por tsunamis, producto de terremotos de gran magnitud, es una actividad social crítica y compleja que necesita ser ejecutada en muy poco tiempo por las personas y comunidades, y coordinada por las oficinas de emergencia. El estudio de este problema puede ser abordado computacionalmente por medio de simulaciones, o experimentalmente, usando simulacros de evacuación. Las simulaciones basadas en modelos numéricos tienen varias ventajas como la posibilidad de someter un sistema a múltiples escenarios de amenaza y prever problemas con el diseño de simulacros. Pero a la vez, también tienen desventajas, como la necesidad de que dichos modelos deben ser calibrados con datos reales. Aparte de efecto positivo en el entrenamiento y preparación de la población, los simulacros son una buena fuente de calibración de modelos computacionales, lo que coincide precisamente con el enfoque que se utilizará en esta investigación.

Considerando las metodologías existentes para simular los procesos de evaluación [1], en este estudio se utilizó la modelación basada en agentes, denominada en inglés como Agent Based Modeling, o ABM. ABM es una herramienta de simulación que concibe un sistema como un conjunto de entidades que toman decisiones, llamadas agentes. En cada instante de tiempo, los agentes evalúan su entorno y actúan según un conjunto de reglas predefinidas [2]. Esta técnica tiene la ventaja de poder agregar heterogeneidad y variabilidad a nivel de agente con bastante facilidad. ABM se ha utilizado previamente en varias disciplinas, tales como las ciencias sociales [3], la ecología [4] y la economía [5]. También se ha usado para estudiar el comportamiento de las personas antes diversas amenazas, como ataques químicos [6], inundaciones [7] y terremotos [8].

La evacuación de personas puede ser separada en dos etapas: la primera, dentro de los edificios ubicados en las zonas inundables, y la segunda, desde la salida de las personas de los edificios hasta su llegada a las zonas seguras. Esta investigación se centra en la primera etapa, utilizando ABM para simular la evacuación dentro de una propiedad o edificio. En el proceso de evacuación de un edificio se pueden identificar dos efectos relevantes. El primero es físico, en que los agentes seleccionan una ruta global para evacuar según el conocimiento que tienen sobre la geometría de su entorno. En cada paso de tiempo, los agentes siguen la ruta global elegida moviéndose a una nueva posición en su dominio factible de movimiento, lo que no es otra cosa que un problema de optimización de una función objetivo preestablecida [9]. Las lógicas del movimiento evitan colisiones locales entre agentes y con obstáculos estáticos (e.g., tabiques, muros y muebles). El segundo efecto está relacionado con los comportamientos sociales de los agentes durante la evacuación. La evidencia empírica de simulacros y evacuaciones de incendios reales han demostrado que las personas pueden evacuar en grupo, imitar lo que hace el resto, transmitir el conocimiento de las rutas de evacuación, y presentar otros comportamientos sociales que afectan su movimiento [10,11].

Esta investigación propone un modelo basado en agentes para simular la evacuación de personas en edificios y lo aplica al caso de una evacuación real de un colegio en la costa de la ciudad de Iquique, Chile, durante un simulacro de evacuación realizado en agosto del 2013 para la ciudad completa. En primer lugar, se explica el marco conceptual del modelo utilizado para simular la evacuación del colegio. A continuación se describe el simulacro de evacuación y el análisis de los datos recolectados. Luego, los resultados del simulacro, en términos de flujos y tiempos de evacuación, se utilizan para validar el modelo propuesto. Finalmente, se estudia el impacto que tienen los parámetros físicos y sociales sobre la capacidad que tiene el modelo para predecir lo ocurrido en el simulacro.

2 Modelo de evacuación

El modelo de evacuación propuesto se resume gráficamente en el diagrama de flujo de la Fig. 1. Cada agente tiene distintos atributos que influyen en la evacuación, lo que permiten modelar poblaciones heterogéneas. Los atributos considerados son: rapidez preferida, nivel de conocimiento del edificio, red social, posición y velocidad. La rapidez preferida se define como la rapidez que las personas tendrían en campo libre (sin obstáculos y otros agentes) y depende de la edad de las personas. En el modelo es seleccionada para cada agente a partir de una distribución Weibull con media 1.34 m/s propuesta en la literatura a partir de datos experimentales [11]. Adicionalmente, se ajustó otra distribución Weibull especial para niños de 4-6 años con media 0.85 m/s, observado experimentalmente también en la literatura [12]. El nivel de conocimiento corresponde a la familiaridad que los agentes tienen con las rutas de evacuación en el edificio y se modela asignándole salidas conocidas a cada agente. La red social representa las relaciones que existían entre las personas antes de la evacuación y se modela asignando a cada agente un conjunto de agentes que conoce (e.g., compañeros de curso en el caso de estudio).

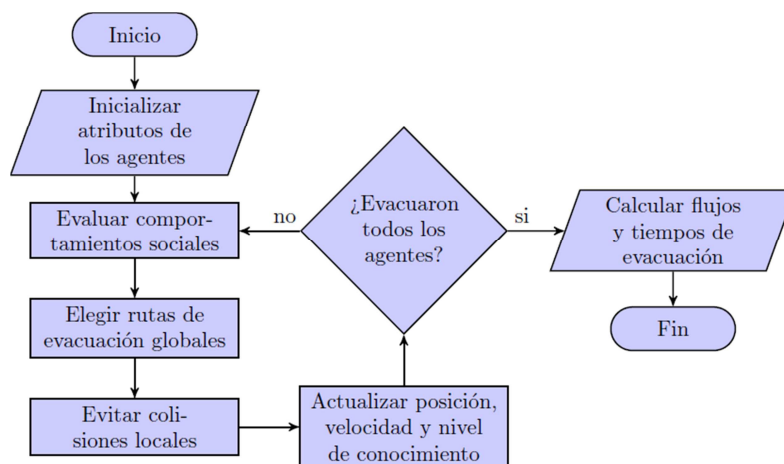


Fig. 1 – Diagrama de flujo resumido del modelo de evacuación.

Los atributos personales se inicializan al comienzo de la simulación e impactan en los comportamientos sociales que presentan los agentes. Estos comportamientos incluyen evacuar en grupo, imitar al resto y transmitir el conocimiento de las rutas de evacuación. El comportamiento de grupo consiste en la evacuación conjunta de varios agentes que se conocen previamente. Las personas del grupo comparten el conocimiento del edificio y se mueven a la rapidez del agente más lento del grupo. Los agentes que no están en un grupo pueden imitar lo que hace el resto, especialmente si su conocimiento del edificio es bajo. Un agente que presenta este comportamiento selecciona la ruta de evacuación que va a seguir como la más usada por los agentes que puede ver a su alrededor. Por último cada agente puede compartir el conocimiento que tiene del edificio con los agentes que lo rodean. Este último comportamiento social no es excluyente de los dos anteriores.

El desplazamiento de cada agente en cada instante de tiempo está compuesto por dos etapas. En primer lugar, cada agente selecciona una ruta global de evacuación, que corresponde a la ruta más corta a las salidas que conoce. Para esto, el edificio es transformado en un grafo (como el mostrado en el ejemplo simple de la Fig. 2), en que los nodos son las salidas y los vértices convexos de los obstáculos (e.g., tabiques, muros y muebles). Los arcos del grafo existen entre los nodos que tienen visibilidad (esto es, si la línea recta que los une no intersecta el interior de un obstáculo), y los costos asociados a los arcos corresponden a la distancia euclidiana entre sus nodos. La ruta más corta desde

cada salida hasta todos los nodos del grafo es calculada utilizando el algoritmo de Dijkstra [13]. Un agente selecciona de todos los nodos que ve, el que minimiza la suma entre la distancia del agente al nodo y la distancia mínima del nodo a las salidas que el agente conoce. A partir del nodo seleccionado, se calcula la dirección que debe seguir el agente y se multiplica por su rapidez preferida para obtener su velocidad preferida v_i^p .

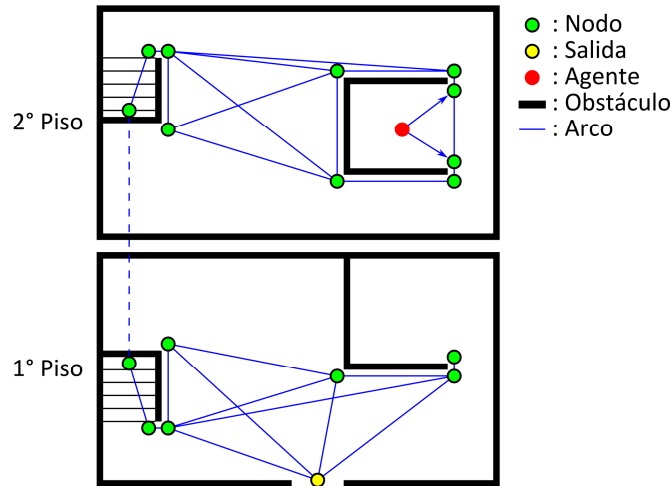


Fig. 2 – Planta de un edificio esquemático de dos pisos y su transformación en un grafo

En una segunda etapa, luego que las velocidades preferidas de todos los agentes han sido calculadas, las velocidades son ajustadas para evitar colisiones con otros agentes y obstáculos estáticos. Esto se realiza utilizando la metodología propuesta en [9], en que cada agente selecciona de forma simultánea la velocidad v_i^n más cercana a su velocidad preferida, evitando colisiones según:

$$v_i^n = \arg \min_{v \in \mathcal{V}_i} \|v - v_i^p\| \quad (1)$$

donde \mathcal{V}_i es el conjunto de todas las velocidades que aseguran que el agente i no colisionará, cuyo cálculo es explicado en detalle en [9]. Las nuevas posiciones r_i^n de los agentes son calculadas usando las velocidades calculadas según:

$$r_i^n = r_i + v_i^n \Delta t \quad (2)$$

donde r_i es la posición del agente i en el instante anterior y Δt es el paso de tiempo del modelo (se usó 0.05s). Una vez que todos los agentes han evacuado el edificio, se calculan los tiempos de evacuación y los flujos en escaleras y salidas.

3 Caso de estudio: simulacro de evacuación

3.1 Descripción del simulacro

El 8 de agosto del 2013 se realizó un simulacro de evacuación en la ciudad de Iquique que formó parte de un simulacro de terremoto y tsunami organizado por la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI), que se llevó a cabo simultáneamente en las ciudades costeras de las cuatro regiones del norte de Chile [14]. A raíz de este simulacro se trabajó meses antes con los protocolos de evacuación de un colegio en Iquique con alrededor de 1500 alumnos de entre 4 y 18 años de edad. El colegio está ubicado a solo 70 m del Océano Pacífico (Fig. 3),

en una zona de alta amenaza causada por la conocida *brecha* sísmica ubicada aproximadamente entre las latitudes 18 y 23°S, en la convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana [15]. Debido a la geometría de las placas, los terremotos de gran magnitud en esta región son seguidos normalmente por tsunamis.

La razón principal para elegir un colegio fue poder calibrar y validar el modelo debido a que tiene la ventaja de que se conocen con alguna certeza los atributos de los agentes (e.g., edad y posición al inicio de la evacuación), lo que hace más realista la comparación entre lo medido en terreno con lo predicho por el modelo. El colegio cuenta con cinco edificios, los que aparecen nombrados en la planta esquemática de la Fig. 4. De ellos, cuatro contenían personas al inicio del simulacro. Las escaleras se identifican con la inicial del edificio al que pertenecen y desembocan directamente en el patio del colegio, sin pasar por el primer piso del edificio. Durante un simulacro o evacuación real se utilizan únicamente dos salidas de emergencia, nombradas E1 y E2 en la Fig. 4.

Para registrar lo ocurrido durante el simulacro se instalaron cámaras en diversos puntos de interés del Colegio (Fig. 4). Las cámaras fueron usadas principalmente para medir el flujo de personas en las escaleras y en las dos salidas principales E1 y E2, como también para conocer el tiempo que transcurrió entre el inicio del simulacro hasta que cada curso empezó a salir desde su respectiva sala. El experimento incluyó también una serie de intervenciones que alteraban el flujo normal de personas, y que trataron de representar condiciones reales como la presencia de heridos, colapso de algunos elementos, condiciones de desconcierto, etc.



Fig. 3 – Vista satelital del colegio y sus alrededores (Fuente: Google Earth)

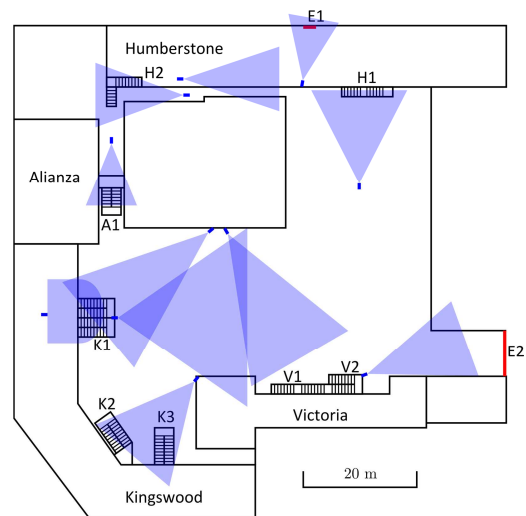


Fig. 4 – Distribución de las cámaras de monitoreo del simulacro y cobertura indicada sobre la planta del colegio

3.2 Resultados

Las dos salidas y ocho escaleras que considera el Colegio se indican en la Fig. 4 con una letra mayúscula y un número. El número total de personas que atravesaron estas ocho escaleras y dos salidas como función del tiempo definen una curva de evacuación, la que fue calculada a partir de las imágenes de los videos obtenidos durante el registro del simulacro. En base a esta información se obtuvo el número total de personas que atravesaron cada sección de escalera y salida (columna 4 de la Tabla 1). Adicionalmente, en cada escalera y salida se estimó el flujo de personas como la pendiente de la recta que mejor se ajusta a la curva de evacuación en su sección de pendiente constante. El flujo se dividió por el ancho útil de la escalera (o salida) para obtener el flujo

normalizado que se indica en la columna 6 de la Tabla 1. Este resultado permite comparar vías de distintos anchos.

Tabla 1 – Resultados del simulacro y de las simulaciones en escaleras y salidas

Nombre	Tipo	Ancho [m]	N° personas		Flujo Norm. [P/s/m]	
			Simulacro	Modelo	Simulacro	Modelo
H1	Escalera	1.40	145	145	2.17	2.22
H2	Escalera	1.30	91	91	1.92	2.06
A1	Escalera	1.45	167	167	1.49	1.70
K1	Escalera	1.25	207	172	1.82	1.57
K2	Escalera	1.25	115	163	1.30	1.72
K3	Escalera	1.25	218	205	1.91	2.06
V1	Escalera	1.40	82	97	1.51	2.05
V2	Escalera	1.40	85	70	1.37	1.60
E1	Salida	2.10	536	534	3.24	3.35
E2	Salida	4.40	1009	1011	1.45	1.42

Los resultados de la Tabla 1 muestran que los flujos predichos por el modelo de agentes realizado en la plataforma Netlogo [16] son bastante parecidos a los valores medidos del simulacro. En particular, durante el simulacro se observó que la salida E1 experimentó un alto nivel de congestión, indicando que estuvo cercana a su capacidad con un flujo normalizado de 3.24 P/s/m. Este valor es consistente con el obtenido experimentalmente para la población de un colegio en la literatura existente [17]. La salida E2 tuvo un flujo normalizado más pequeño debido a su mayor ancho, no llegando a congestionarse.

En la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** se pueden observar las propiedades geométricas de cada edificio del colegio, junto con la cantidad de personas que había en su interior al inicio del simulacro, y los tiempos que tardaron la primera y la última persona en salir de cada edificio (t_i y t_f , respectivamente). Cada edificio se compone de la suma de todas sus escaleras, y no incluye el primer piso cuyas salas dan directamente al patio del Colegio. La Tabla 2 también presenta el número total de personas que evacuaron el colegio completo, considerando las escaleras, los primeros pisos de los edificios, y las personas que se encontraba en el patio cuando la evacuación comenzó.

Tabla 2 – Características de cada edificio del colegio y sus tiempos de evacuación

Edificio	N° pisos	Área/piso [m ²]	N° personas	t_i		t_f	
				Simulacro	Modelo	Simulacro	Modelo
Humberstone	3	754	236	0:39	0:39	1:58	2:06
Alianza	3	331	167	1:00	1:04	2:22	2:18
Kingswood	4	766	540	0:31	0:32	2:39	2:34
Victoria	3	210	167	0:27	0:30	1:31	1:20
Colegio	-	-	1545	0:06	0:20	3:51	3:49

4 Modelación del simulacro

El modelo fue implementado en el software Netlogo [16] que es un lenguaje de programación basado en agentes. Netlogo es una herramienta abierta y es ampliamente utilizada en diversas aplicaciones de procesos de agentes. Para poder estudiar el Colegio, fue necesario primero reconstruir mediante un levantamiento laser los planos del colegio, los que no se encontraban disponibles. Para el análisis en Netlogo los planos de cada edificio fueron transformados en una grilla con separaciones de 10 x 10 cm. El contenido inicial de cada celda representa alguno de los siguientes componentes: piso, escalera, salida, o muro/tabique. Las celdas de tipo escalera son utilizadas para transportar agentes entre puntos que están alejados entre sí. Esto con el objetivo de poder representar edificios 3D con varios pisos en una única grilla 2D. Cada agente humano utiliza un área de influencia definida por un círculo de 45 cm de diámetro. La cantidad y edad de las personas que hay en cada una de las salas del colegio es conocida de antemano, y su posición dentro de las salas fue asignada aleatoriamente usando una distribución uniforme. El tiempo que tarda cada curso en comenzar a evacuar fue ajustado en el modelo usando los datos reales obtenidos a partir del simulacro. El resto del personal del colegio y los alumnos que estaban en el patio fueron ubicados según lo observado en los videos, o en caso de no conocerse, de forma aleatoria.

4.1 Comparación entre las simulaciones y el simulacro

El principal medio usado para comparar los datos reales del simulacro con las simulaciones del modelo fue mediante el desarrollo de las denominadas curvas de evacuación. Por ejemplo, la Fig. 5 compara 25 simulaciones del modelo ABM con el simulacro, y para cada uno de los edificios. La misma comparación se presenta en la Fig. 6 para el colegio completo. Estas simulaciones no consideran ninguno de los comportamientos sociales que se describieron anteriormente en la sección 2, ya que serán analizados más adelante por medio de un análisis paramétrico de sensibilidad. Se puede observar que los resultados de las simulaciones son bastante cercanas a lo observado en la realidad. También se observa en general que los resultados de las distintas simulaciones presentan poca variabilidad.

Para comparar escaleras y salidas, se puede utilizar como referencia el flujo normalizado de la curva de evacuación promedio de todas las simulaciones (columna 7 de la Tabla 1). En tal caso, los resultados son bastante similares a los obtenidos del simulacro real, con un error promedio de 13.6%. Las mayores diferencias se observan en aquellas escaleras en las que el modelo no es capaz de predecir correctamente el número de personas que llegan a ellas, como por ejemplo en los edificios Kingswood y Victoria. Tal es el caso cuando existen salas de clases con dos o más rutas alternativas de evacuación y con largos similares. En estos casos el modelo predice la ruta más corta, pero en la realidad las personas no son capaces de discernir entre pequeñas diferencias en longitud y distancia, eligiendo cualquiera de las salidas indistintamente. El error promedio de los flujos normalizados se reduce a 5.8% cuando no se consideran estos casos que comprometen a 5 escaleras. Por otra parte, si se suman los flujos de las escaleras de los edificios para obtener las curvas de evacuación de los edificios, las diferencias se reducen significativamente tal como se muestra en la Fig. 5. Esto también se puede apreciar en los tiempos totales de evacuación (t_f) para los edificios presentados en la Tabla 2, donde el error promedio es de 5.9% y de solo un 1.0% para el colegio completo. Consecuentemente, aparece como un tema de mucho interés científico el poder entender y modelar el proceso de toma de decisión de individuos y grupos cuando aparecen alternativas similares de salida para una o más personas.

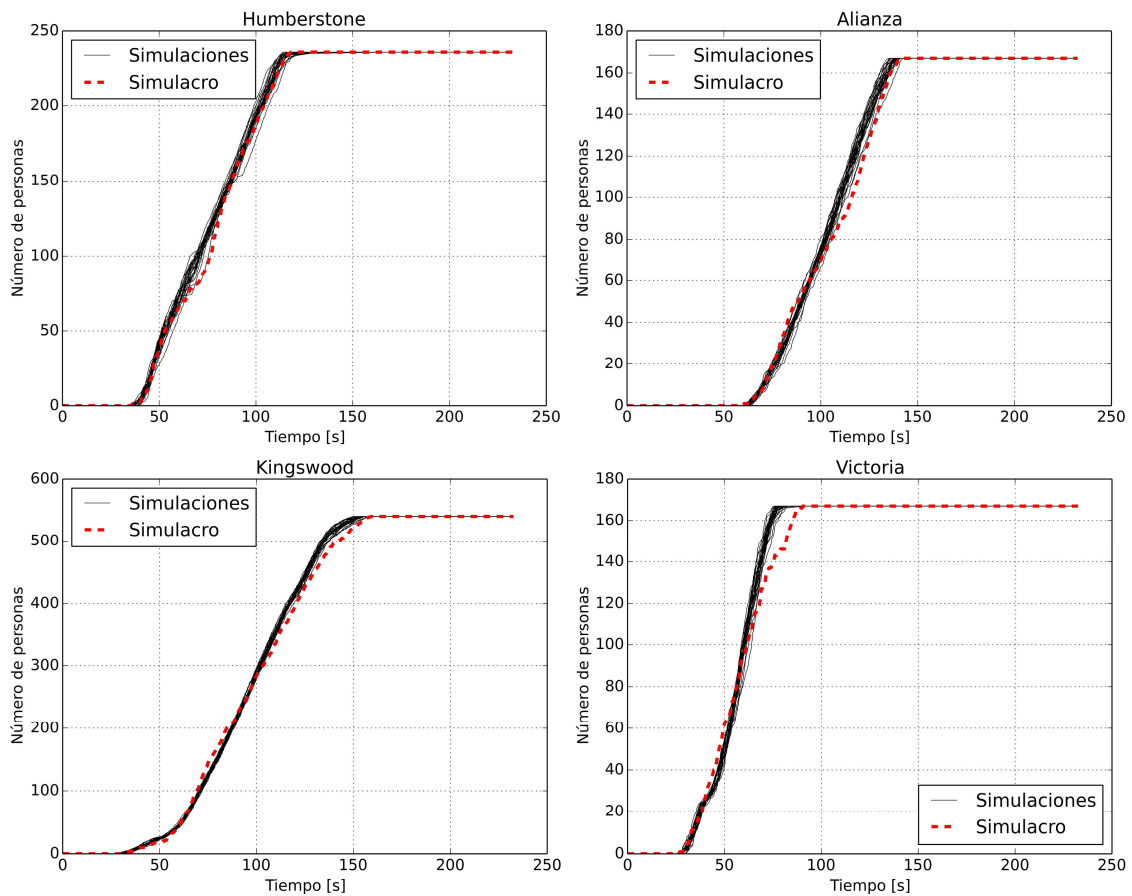


Fig. 5 - Curvas de evacuación del simulacro y de las simulaciones del modelo para cada uno de los edificios

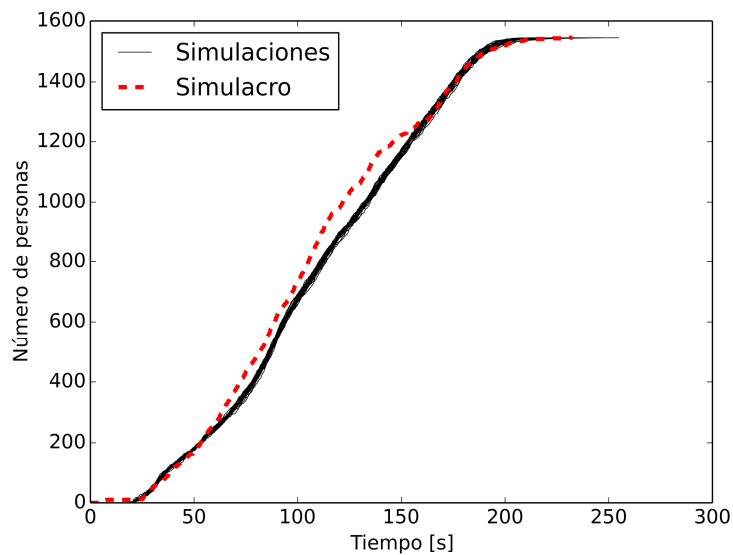


Fig. 6 – Comparación entre las curvas de evacuación del simulacro y las simulaciones, al nivel del colegio completo

4.2 Análisis paramétrico

La razón de realizar un análisis paramétrico es para estudiar la sensibilidad de la respuesta de evacuación a dos parámetros físicos que influyen sobre la capacidad predictiva del modelo: (i) la rapidez preferida de los agentes, y (ii) el diámetro del área de influencia de los agentes. El efecto de

estos parámetros se cuantifica utilizando como medida del error el área definida entre la curva de evacuación del simulacro y el promedio de las curvas de las simulaciones de acuerdo con la Ec. 3:

$$D(\theta) = \int_0^{t_f} |p_m(t, \theta) - p_s(t)| dt \tag{3}$$

donde θ es el valor del parámetro considerado, $p_s(t)$ representa la curva de evacuación del simulacro, $p_m(t, \theta)$ es la curva de evacuación promedio de las simulaciones del modelo, y t_f es el tiempo en que registra el paso de la última persona en el simulacro. El efecto de los parámetros se cuantifica utilizando el error normalizado, el que se calcula dividiendo el valor de la Ec. 3 por el mismo error obtenido utilizando el valor inicial θ_0 del parámetro, esto es:

$$E(\theta) = \frac{D(\theta)}{D(\theta_0)} \tag{4}$$

Los resultados del error normalizado para distintos valores de ambos parámetros físicos se presentan en la Fig. 7, desagregado además los resultados para cada uno de los edificios. Se puede observar que los valores iniciales de rapidez normal de 1.34 m/s y el diámetro de 45 cm, son bastante cercanos a los valores que minimizan el error, lo que aparece como un resultado muy positivo porque implica que la solución generada es robusta. Más precisamente, la rapidez que minimiza el error para el colegio completo es entre 0.1 y 0.2 m/s veces mayor a la de cada edificio por separado, lo que sugiere que eventualmente las personas prefieren usar rapidezces mayores en espacios abiertos que dentro de los edificios. Es importante notar que las curvas de rapidezces poseen una importante pendiente a ambos lados del óptimo, lo que permite concluir que el valor de este parámetro es relevante en las simulaciones. En cuanto al diámetro del área de influencia de los agentes, queda en evidencia de los resultados que el modelo es mucho más sensible a aumentos en este parámetro que a disminuciones. Esto se debe a que para diámetros menores la congestión disminuye y la evacuación queda controlada por la rapidez nominal de los agentes, en cambio al aumentar el diámetro se genera mayor congestión, aumentando el tiempo de evacuación.

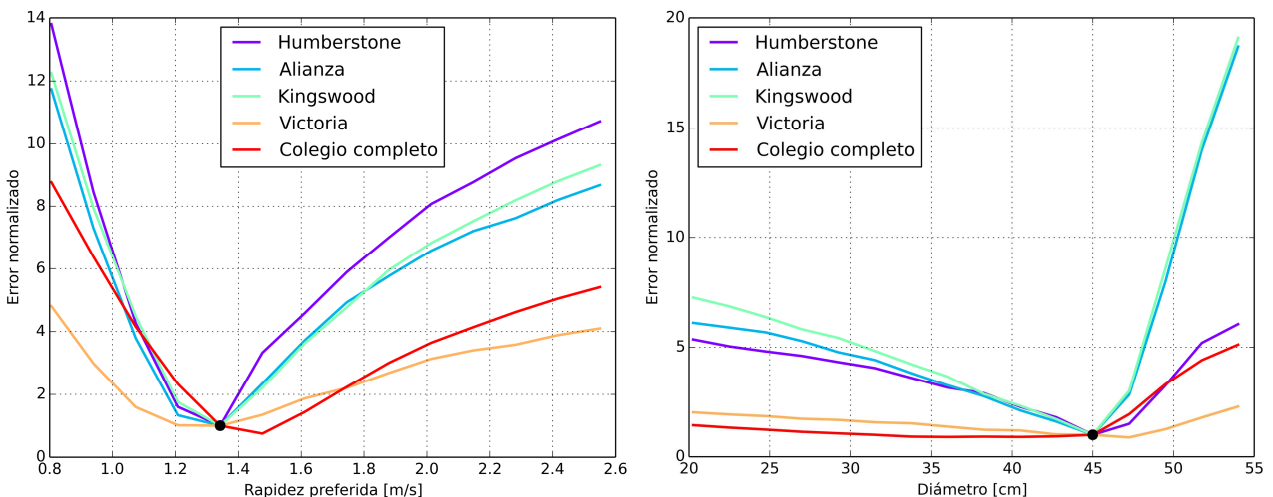


Fig. 7 – Análisis de paramétrico de la rapidez y diámetro de los agentes

En este análisis de sensibilidad también se analizó el impacto sobre las simulaciones de dos parámetros sociales de forma independiente: (i) el porcentaje de agentes que evacúan del colegio en grupo (*grouping*), y (ii) el porcentaje que sigue la ruta más usada por los agentes que están a su

alrededor (*herding*). Los resultados del error normalizado en función de estos parámetros sociales se presentan en la Fig. 8 para los distintos edificios y el Colegio completo. El valor original considerado para los parámetros es 0% (caso base), es decir, en que no ocurre ningún comportamiento social. Tal como se observa, ambos parámetros tienen un impacto bastante menor que los parámetros físicos de la Fig. 7. Además, no es posible apreciar un porcentaje claro de ambos comportamientos en que el error sea menor al considerado en el caso base, ya que las tendencias de cada edificio varían entre sí. Este resultado puede estar influido de forma importante por dos hechos. Primero, que los estudiantes del colegio conocen bien el procedimiento de salida y no requieren mayormente de estos comportamientos sociales en un simulacro como el realizado. Y segundo, es intuitivo pensar que este tipo de comportamientos debiera ocurrir más en situaciones de verdadera incertidumbre y angustia.

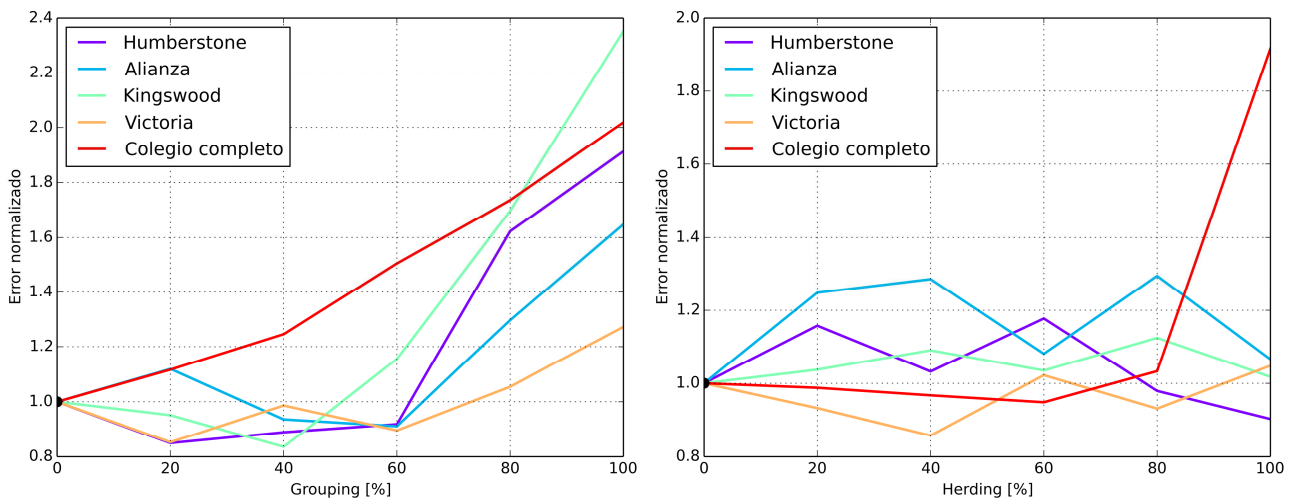


Fig. 8 – Análisis paramétrico de la cantidad de gente que presenta comportamientos sociales

5 Conclusiones y trabajo futuro

En esta investigación se desarrolla un modelo de evacuación según la lógica de la modelación basada en agentes, el que fue validado usando datos reales de un simulacro en un colegio realizado en la ciudad de Iquique en el año 2013.

Las diferencias entre los resultados obtenidos de las simulaciones de los modelos en Netlogo y de los datos obtenidos del simulacro son relativamente bajas, con un error promedio en los tiempos de evacuación de los cuatro edificios del colegio de un 5.9%, y en los flujos en escaleras y salidas de un 13.6%.

A pesar de las buenas predicciones, aparece como un aspecto importante en las fuentes de error la indefinición que causa en la realidad la opción de los agentes de optar por dos caminos alternativos y similares desde el punto de vista de la función objetivo de tiempos de evacuación. Este es un tema que aún requiere bastante trabajo para descubrir las lógicas, si es que hay alguna, de los agentes en estos casos.

Del análisis paramétrico realizado sobre algunas de las variables del modelo se concluye que los valores inicialmente seleccionados de rapidez preferida con media de 1.34 m/s y diámetro de los agentes de 45 cm son muy cercanos a los valores que generan la predicción de tiempos de evacuación

y flujos con mínimo error. También se observa que la rapidez nominal de los agentes es un parámetro relevante para las simulaciones.

Todos los resultados obtenidos del simulacro sugieren que el modelo desarrollado en Netlogo es una muy buena herramienta predictiva y de análisis del comportamiento de evacuación de los usuarios de un edificio frente a distintas amenazas que gatillen evacuaciones (e.g., terremotos, tsunamis y fuego). Algunas de las posibles aplicaciones futuras de esta herramienta son generar procesos de evacuación óptima en base a simulaciones, evaluar durante el diseño distintos *layouts* de los edificios, y estimar la vulnerabilidad de los ocupantes de un edificio frente a las distintas amenazas.

Si bien el trabajo presentado no incluye numerosos detalles de la implementación de estos complejos modelos de evacuación, como por ejemplo el algoritmo para la definición de rutas óptimas de evacuación de los agentes, o el algoritmo para evitar la colisión entre agentes, todos ellos son aspectos críticos a la hora de desarrollar un modelo de esta naturaleza. Es bastante notable que dada esta gran complejidad analítica y algorítmica, los resultados generales presentados tengan tan buena correlación con lo observado en el simulacro sin haber escogido parámetros que ajusten los modelos. Es cierto, sin embargo, que en este caso particular se conocía la ubicación de los agentes en el Colegio al momento del inicio del simulacro, lo que puede haber facilitado estos buenos resultados.

En etapas posteriores de esta investigación se pretende modelar procesos de evacuación masiva a escala urbana como resultado de terremotos, tsunamis, erupciones, etc., incorporando en dichas simulaciones el efecto a nivel urbano que tienen el daño y colapso de posibles estructuras y componentes, como también distintas medidas de mitigación. De esta forma se busca estimar de mejor manera el número de pérdidas humanas, heridos y pérdidas en otras variables sociales relevantes que mejoren la resiliencia de las comunidades a desastres naturales en zonas urbanas.

6 Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales CONICYT/FONDAP/15110017, y por el proyecto Fondecyt #1141187. También se agradece la ayuda de GEOCOM S.A., por realizar el levantamiento del colegio mediante escaneo laser, y el apoyo de todos los directivos, administrativos, y alumnos de este Colegio de Iquique por apoyar el estudio de este simulacro.

7 Referencias

- [1] Zheng X, Zhong T, Liu M (2009): Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*, **44** (3), 437-445.
- [2] Bonabeau E (2002): Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **99** (Suppl 3), 7280-7287.
- [3] Epstein JM (1996): *Growing artificial societies: social science from the bottom up*. Brookings Institution Press.
- [4] Caplat P, Anand M, Bauch C (2008): Symmetric competition causes population oscillations in an individual-based model of forest dynamics. *Ecological modelling*, **211** (3), 491-500.
- [5] Arthur WB (2006): Out-of-equilibrium economics and agent-based modeling. *Handbook of computational economics*, **2**, 1551-1564.
- [6] Mysore V, Narzisi G, Nelson L, Rekow D, Triola M, Shapiro A, Coleman C, Gill O, Daruwala RS, Mishra B (2006): Agent modeling of a sarin attack in manhattan. *Proceedings of the First International Workshop on Agent Technology for Disaster Management, ATDM*.
- [7] Dawson RJ, Peppe R, Wang M (2011): An agent-based model for risk-based flood incident management. *Natural Hazards*, **59** (1), 167-189.

- [8] Liu Z, Jalalpour M, Jacques C, Szyniszewski S, Mitrani-Reiser J, Guest J, Igusa T, Schafer B (2012): Interfacing Building Response with Human Behavior Under Seismic Events. *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal.
- [9] Van Den Berg J, Guy SJ, Lin M, Manocha D (2011): Reciprocal n-body collision avoidance. *Robotics research*, 3-19. Springer Berlin Heidelberg.
- [10] Jones BK, Hewitt JA (1986): Leadership and group formation in high-rise building evacuations. *Fire Safety Science - Proceedings of the First International Symposium*, 513-522.
- [11] Rinne T, Tillander K, Grönberg P (2010): Data collection and analysis of evacuation situations. *Research Notes 2562*, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland.
- [12] Larusdottir AR, Dederichs AS (2012): Evacuation of children: Movement on Stairs and on Horizontal plane. *Fire technology*, **48** (1), 43-53.
- [13] Dijkstra EW (1959): A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, **1** (1), 269-271.
- [14] Walker JM (2013): Informe técnico de evaluación, Simulacro macrozona de terremoto y tsunami, Evacuación del borde costero, Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, 8 de Agosto de 2013. Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Santiago, Chile.
- [15] Chlieh M, De Chabaliér JB, Ruegg JC, Armijo R, Dmowska R, Campos J, Feigl KL (2004): Crustal deformation and fault slip during the seismic cycle in the North Chile subduction zone, from GPS and InSAR observations. *Geophysical Journal International*, **158** (2), 695-711.
- [16] Wilensky U (1999) NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*, Northwestern University, Evanston, IL.
- [17] Daamen W, Hoogendoorn SP (2012): Emergency door capacity: influence of door width, population composition and stress level. *Fire technology*, **48** (1), 55-71.