

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO - CHILE



EVALUACIÓN DE LA EVACUACIÓN POR TSUNAMI
UTILIZANDO DOS MODELOS DE AGENTES: STOC-AGENT Y NETLOGO
CASO DE ESTUDIO VALPARAÍSO
REGIÓN DE VALPARAÍSO

JOSÉ IGNACIO OTEIZA GARRIDO

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil

Profesora Guía
Alejandra Gubler Labayru

Marzo de 2020

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO - CHILE



EVALUACIÓN DE LA EVACUACIÓN POR TSUNAMI
UTILIZANDO DOS MODELOS DE AGENTES: STOC-AGENT Y NETLOGO
CASO DE ESTUDIO VALPARAÍSO
REGIÓN DE VALPARAÍSO

Memoria de titulación presentada por
JOSÉ IGNACIO OTEIZA GARRIDO

Como requisito parcial para optar al Título de
Ingeniero Civil

Profesora Guía
Alejandra Gubler Labayru

Profesores Correferentes
Patricio Catalán Mondaca
Jorge León Canales

Marzo de 2020

Agradecimientos

Luego de este largo proceso universitario sólo queda agradecer, en primer lugar, a Dios por acompañar siempre mi caminar. A mis padres Juan y Marisol por darme todas las herramientas necesarias para sortear los obstáculos que se fueron presentando en el camino y por siempre entregarme ese amor incondicional que tanto se extraña al estudiar lejos de casa. A mi hermano Cristian por motivarme en mis estudios y apoyarme en todo momento. Al resto de mi familia por apoyarme constantemente a través de los años. A mis compañeros de carrera y amigos, Cristian Monyes, Evelyn, Claudio, Valeria y Nicole por siempre estar ahí tanto para los estudios como para las risas, sobre todo en esos momentos de traspasos donde era necesario un empujoncito de ánimo mutuo. A mis amigos del colegio y la vida en especial Gonzalo, Catalina, Frois, Carlos, Lalo, Felipe, Nacho, Monse, Maca y Camila por siempre estar pendientes de mis progresos y entregarme bellos momentos. A mi guía Alejandra que confió en mí y me dio la oportunidad y las herramientas para embarcarme en este viaje. A la danza que me permitió conocer personas maravillosas durante el tiempo que duró mi carrera. Y finalmente y no menos importante a mi mejor amiga y confidente Mariela Collao, quien me ha acompañado sobre todo en los momentos más frustrantes y estresantes de este último periodo universitario.

En resumidas cuentas, quiero agradecer a todo aquel que de alguna forma logró aportar con un granito de amor a mi vida, porque si no fuera por eso, quizá no estaría redactando este texto en la actualidad.

Dedicatoria

Memoria dedicada a mis padres
Juan Bernardo Oteiza y Marisol Garrido Cáceres

Resumen

La alta sismicidad de Chile lo convierte en uno de los países más propensos a sufrir grandes terremotos, los cuales, en zonas cercanas a la costa, se pueden volver eventos tsunamigénicos, pues son capaces de generar tsunamis que inundan las ciudades costeras arrasando con todo a su paso. En este aspecto, estudiar y analizar el comportamiento humano al momento de realizar una evacuación en caso de tsunami se vuelve muy importante para los investigadores, pues está comprobado que una pronta evacuación y una buena reacción de la población puede aumentar con creces sus posibilidades de sobrevivir ante una tragedia de estas dimensiones.

Analizar el comportamiento humano es una tarea que presenta muchas dificultades, pues los humanos son capaces de tomar decisiones, lo que permite que se produzca un entramado de posibilidades imposibles de analizar en su totalidad. Con la creación de modelos computacionales basados en agentes se ha avanzado mucho en aspectos relacionados al comportamiento humano, sobre todo cuando se trata de situaciones en las que existe una gran cantidad de personas concentradas en un mismo espacio.

A lo largo del tiempo, se han creado modelos para analizar el comportamiento de peatones al momento de evacuar un espacio debido a emergencias ya sean provocadas por fenómenos naturales o por la intervención del ser humano, como accidentes aéreos, hundimientos de barcos, atentados de bomba en espacios públicos, etc. Algunos de estos modelos son los que analizan la evacuación en caso de tsunami, los llamados “Modelos de Evacuación de Tsunamis Basados en Agentes”, los cuales son capaces de trabajar en un nivel macro y a la vez micro, dependiendo de cuales sean los objetivos para analizar.

Por lo anterior es que con ayuda del programa NetLogo se desarrolla un modelo llamado VALPOEVAC, el cual busca analizar la evacuación por tsunami específicamente en el sector del Almendral, ubicado en la ciudad de Valparaíso. Para ello se evalúan dos escenarios: uno diurno con 32492 agentes (incluyendo la población flotante) y uno nocturno con 13347 agentes. Adicional a esto, se consideran 3 tiempos medios de partida (μ), es decir, el promedio en que los agentes tardan en comenzar su evacuación, los cuales corresponden a 3, 8 y 12 minutos.

Lo obtenido de las simulaciones con VALPOEVAC, se compara con los resultados de Stoc-Agent (un modelo empalmado de evacuación e inundación) y en base a esto, se comprueba que efectivamente NetLogo resulta ser una excelente herramienta para analizar la evacuación por tsunami en Valparaíso, pues a pesar de sus limitaciones logra considerar varias de las aristas que afectan en una situación de esta naturaleza.

De las principales conclusiones se resume que la congestión peatonal es un parámetro importante a considerar durante una evacuación, pues condiciona considerablemente los resultados que se obtienen de las simulaciones. Es por esta razón que este trabajo de título deja a disposición de quien lee, el código diseñado en NetLogo (VALPOEVAC), para editarlo y utilizarlo en futuras investigaciones relacionadas al tema, corrigiendo posibles errores y/o incluyendo nuevos parámetros que permitan análisis mucho más completos.

Abstract

The high seismicity of Chile makes it one of the most prone countries to suffer major earthquakes. In areas near to the coast, earthquakes can become tsunamigenic events since they are capable of generate tsunamis that flood coastal cities by sweeping everything in their path. In this regard, studying and analyzing human behavior when carrying out an evacuation in case of a tsunami becomes very important for researchers, since it is proven that a rapid evacuation and a good reaction of the population can greatly increase their chances of survival in case of a tragedy of these dimensions.

Analyzing human behavior is a task that presents many difficulties because humans are capable of make decisions, which allows a network of possibilities impossible to analyze them as a whole. With the creation of specific agent-based computational models, much progress has been made in aspects related to human behavior, especially when it comes to situations in which there is a large number of people concentrated in the same space.

Over time, models have been created to analyze the behavior of pedestrians when evacuating a space due to emergencies caused by natural phenomena or by the intervention of human beings, such as air accidents, sinking of ships, threat of pump in public spaces, etc. Some of these models are those that analyze the evacuation in case of a tsunami, so-called “Agent-based tsunami evacuation models”, which allow to work at a macro and micro level, depending on what are the objectives to analyze.

According to the information previously mentioned, a model called VALPOEVAC is developed with the help of the NetLogo program. This model seeks to analyze the evacuation in case of tsunami in a specific sector called “The Almendral”, located in the city of Valparaíso. Therefore, two scenarios are evaluated: one at daytime with 32492 agents (including the floating population) and one nocturnal with 13347 agents. In addition, 3 average starting times (μ) are considered, which is the average time the agents take to begin their evacuation, they correspond to 3, 8 and 12 minutes.

What is obtained of the simulations with VALPOEVAC is compared to the results of Stoc-Agent (a spliced evacuation and flood model) and based on this, it is proven that the model effectively turns out to be an excellent tool to analyze the evacuation for tsunami in Valparaíso, because despite its limitations it manages to consider several of the parameters that affect in a situation of this nature.

From the main conclusions it is summarized that pedestrian congestion is an important parameter to consider during an evacuation, because it conditions the results obtained from the simulations. For this reason, this title work makes available to readers the code designed in NetLogo (VALPOEVAC), in order to edit and use it in future investigations related to the topic, correcting possible errors and/or including new parameters that allow much more complete analyzes.

Índice General

Agradecimientos	i
Dedicatoria	iii
Resumen.....	v
Abstract	vii
Índice General	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Gráficos	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Acrónimos	xix
Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos de la Memoria	2
1.2.1. Objetivos Generales	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
Capítulo 2: Revisión Literaria	3
2.1. Antecedentes Generales: Contexto Nacional	3
2.1.1. Distribución Demográfica	3
2.1.1.1. Descripción General.....	3
2.1.1.2. Descripción Regional	3
2.1.2. Características Zona de Interés.....	4
2.1.3. Sismicidad y Terremotos.....	5
2.1.3.1. Visión General.....	5
2.1.3.2. Tipos de Sismos	5
2.1.3.3. Sismicidad Histórica: Región de Valparaíso.....	6
• Terremoto de 1730	7
• Terremoto de 1906	7
• Terremoto de 2017	8
2.2. Comportamiento humano ante situaciones de emergencia	9
2.3. Modelos de Evacuación de Tsunamis Basados en Agentes	11
Capítulo 3: Metodología de Trabajo	12
3.1. NetLogo.....	12

3.1.1.	Descripción del Programa	12
3.1.2.	Descripción del modelo: VALPOEVAC	13
3.1.2.1.	Interfaz Gráfica del Modelo	14
•	<i>Botones y Controles</i>	15
•	<i>Pantalla de Visualización de Escenario</i>	16
•	<i>Gráficos y Monitores de Salida</i>	16
3.1.2.2.	Configuración y Procesamiento de Datos	17
3.1.2.3.	Datos de Entrada	26
3.1.2.3.1.	Base de Datos Espaciales	26
3.1.2.3.2.	Base de Datos de Agentes	28
	Selección de punto de encuentro como destino final	28
3.1.2.3.3.	Base de Datos de Tsunami	30
3.1.2.4.	Estimación de Víctimas.....	32
3.1.2.5.	Datos de Salida.....	32
3.1.2.6.	Parámetros Default del Modelo.....	33
3.1.2.7.	Limitaciones del Modelo.....	34
3.1.3.	Resumen	36
3.2.	Stoc-Agent.....	36
3.2.1.	Descripción del Programa	36
•	STOC-ML y STOC-IC.....	36
3.2.1.1.	Funcionamiento del modelo Stoc-Agent.....	38
3.2.1.2.	Datos de Entrada de Stoc-Agent	39
3.2.1.3.	Datos de Salida de Stoc-Agent.....	40
3.2.2.	Limitaciones de Stoc-Agent	41
3.3.	Configuración de las simulaciones.....	41
3.3.1.	Población que Evacúa	41
3.3.2.	Tiempo de Partida (td).....	42
3.3.3.	Velocidad Inicial	44
Capítulo 4: Resultados: Modelación Stoc-Agent y NetLogo		47
4.1.	Modelación con Stoc-Agent.....	48
4.1.1.	Resultados y Comentarios caso de estudio en Valparaíso.....	48
4.2.	Modelación en NetLogo.....	50
4.2.1.	Resultados y Comentarios caso de estudio en Valparaíso.....	51
4.3.	Comparación de Resultados entre Modelos	54
4.4.	Comparación con Simulacro de Evacuación de Tsunami	57
Capítulo 5: Conclusiones y Trabajos Futuros		60

5.1. Conclusiones	60
5.2. Trabajos Futuros.....	61
Referencias	63
ANEXOS	66
Anexo A	67
Anexo B	70

Índice de Figuras

FIGURA 2-1: PLANO DE EJES ESTRUCTURANTES DEL ALMENDRAL (FUENTE: ESCUELA ARQUITECTURA PUCV 2012).	4
FIGURA 2-2: PLACAS TECTÓNICAS Y ANILLO DE FUEGO DEL PACÍFICO (FUENTE: SEISMICSKNOWLEDGE)	5
FIGURA 2-3: ZONA DE SUBDUCCIÓN Y TIPOS DE SISMOS QUE OCURREN EN ELLA.....	5
FIGURA 2-4: PLANO DE VALPARAÍSO (FUENTE: TERREMOTO DE VALPARAÍSO DE 1906, WIKIPEDIA).	8
FIGURA 2-5: LOCALIZACIÓN DE LA SISMICIDAD ASOCIADA A LA SECUENCIA DE ABRIL DE 2017	8
FIGURA 2-6: A LA IZQUIERDA, LA ALERTA DE EMERGENCIA ENVIADA POR ONEMI A LOS TELÉFONOS CELULARES, PARA EL SIMULACRO VIVIDO EN VALPARAÍSO EL 5 DE SEPTIEMBRE DEL 2019. A LA DERECHA UN CARTEL INDICANDO VÍA DE EVACUACIÓN DE TSUNAMI.	10
FIGURA 3-1: ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL ENTORNO DE TRABAJO DEL MODELO DE EVACUACIÓN DE TSUNAMIS VALPOEVAC DESARROLLADO EN NETLOGO.....	14
FIGURA 3-2: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MODELO: A LA IZQUIERDA BOTONES Y CONTROLES – A LA DERECHA FORMATO DE SALIDA DE LOS RESULTADOS (PANTALLA DE VISUALIZACIÓN, GRÁFICOS Y MONITORES)	15
FIGURA 3-3: PRESENTACIÓN DE LA PANTALLA DE VISUALIZACIÓN DESPUÉS DE INICIALIZAR EL MODELO	16
FIGURA 3-4: ALGORITMO DE BÚSQUEDA A*	19
FIGURA 3-5: REPRESENTACIÓN BIDIMENSIONAL DISTANCIA EUCLIDIANA.....	20
FIGURA 3-6: ESQUEMA REPRESENTATIVO DE LO QUE OCURRE CON LA DISTANCIA MANHATTAN	21
FIGURA 3-7: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CÓMO EL AGENTE EVALÚA LA CONDICIÓN DE DENSIDAD EN CADA INSTANTE DE TIEMPO.	23
FIGURA 3-8: CÁLCULO DE LA PENDIENTE DEL TERRENO, INCORPORADO AL MODELO DESARROLLADO EN NETLOGO	25
FIGURA 3-9: EXTRACTO PLANO DE EVACUACIÓN, DISEÑADA POR ONEMI EN SU EDICIÓN DE JUNIO DE 2019 (FUENTE: COMITÉ COMUNAL DE PROTECCIÓN CIVIL Y EMERGENCIA)	27
FIGURA 3-10: REPRESENTACIÓN DE ARCHIVOS (.SHP) EN LA PLATAFORMA ARCGIS.	28
FIGURA 3-11: EJEMPLIFICACIÓN DE LO QUE SUCEDE CON LOS AGENTES QUE SE ENCUENTRAN EN LA ZONA DE PUERTO	29
FIGURA 3-12: PARÁMETROS TÍPICOS QUE INFLUYEN EN UN MODELO DE INUNDACIÓN	30
FIGURA 3-13: GRILLAS BATIMÉTRICAS	31
FIGURA 3-14: PRESENTACIÓN HERRAMIENTA DE VISUALIZACIÓN CADMAS-VR	40
FIGURA 3-15: ZONAS OD UTILIZADAS PARA EL ESCENARIO DIURNO Y NOCTURNO JUNTO CON ALGUNOS DE LOS PUNTOS DE ENCUENTRO UTILIZADOS COMO ZONA DE SEGURIDAD PARA EVACUAR.....	42
FIGURA 4-1: RECOPIACIÓN DE IMÁGENES EN PUNTO DE ENCUENTRO UBICADO EN CALLE BAQUEDANO, SIMULACRO DE EVACUACIÓN DE TSUNAMI EN VALPARAÍSO, 05 DE SEPTIEMBRE DE 2019.	58

Índice de Gráficos

GRÁFICO 3-1: (A) FUNCIÓN DE ESCALADA ORIGINAL (TOBLER, 1993), Y EN (B) FUNCIÓN DE ESCALADA ADIMENSIONAL UTILIZADA EN EL MODELO BASADO EN AGENTES PARA LA EVALUACIÓN DE LA PENDIENTE.....	24
GRÁFICO 3-2: CURVAS DE TIEMPO DE PARTIDAS, OBTENIDAS A PARTIR DE LA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE RAYLEIGH, PARA LOS TIEMPOS MEDIOS DE PARTIDA DE 3, 8 Y 12 MINUTOS.....	44
GRÁFICO 3-3: CORRELACIÓN ENTRE VELOCIDAD DE CAMINATA Y EDAD (FUENTE: WEIDMANN, 1993).	46
GRÁFICO 4-1: COMPARACIÓN GRÁFICA DEL PORCENTAJE DE EVACUADOS Y VÍCTIMAS EN EL TIEMPO PARA LAS DISTINTAS SIMULACIONES EN ESCENARIO DIURNO, SIN CONSIDERAR CONGESTIÓN, STOC-AGENT.	49
GRÁFICO 4-2: COMPARACIÓN GRÁFICA DEL PORCENTAJE DE EVACUADOS Y VÍCTIMAS EN EL TIEMPO PARA LAS DISTINTAS SIMULACIONES EN ESCENARIO NOCTURNO, SIN CONSIDERAR CONGESTIÓN, STOC-AGENT.....	49
GRÁFICO 4-3: COMPARACIÓN GRÁFICA DEL PORCENTAJE DE EVACUADOS EN PE (4) Y VÍCTIMAS EN EL TIEMPO PARA LAS DISTINTAS SIMULACIONES EN ESCENARIO DIURNO, CONSIDERANDO CONGESTIÓN, NETLOGO.	52
GRÁFICO 4-4: COMPARACIÓN GRÁFICA DEL PORCENTAJE DE EVACUADOS EN PE (4) Y VÍCTIMAS EN EL TIEMPO PARA LAS DISTINTAS SIMULACIONES EN ESCENARIO NOCTURNO, CONSIDERANDO CONGESTIÓN, NETLOGO.....	52
GRÁFICO 4-5: COMPARACIÓN DE SIMULACIÓN DE INUNDACIÓN CON STOC-ML (ROJO) Y HYSEA (AZUL).	54
GRÁFICO 4-6: COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE EVACUADOS EN EL TIEMPO PARA LAS DISTINTAS SIMULACIONES EN ESCENARIO NOCTURNO, NETLOGO (CON Y SIN CONGESTIÓN) V/S STOC-AGENT (SIN CONGESTIÓN).	55
GRÁFICO 4-7: COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE VÍCTIMAS EN EL TIEMPO PARA LAS DISTINTAS SIMULACIONES EN ESCENARIO NOCTURNO, NETLOGO (CON Y SIN CONGESTIÓN) V/S STOC-AGENT (SIN CONGESTIÓN)*.	55
GRÁFICO 4-8: PORCENTAJE DE EVACUADOS EN EL TIEMPO EN BASE AL TOTAL DE AGENTES QUE LOGRAN LLEGAR AL PE, PARA EL PUNTO DE ENCUENTRO EN BAQUEDANO, ESTADIO SAUSALITO Y LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON NETLOGO CONSIDERANDO LA CONGESTIÓN.....	59

Índice de Tablas

TABLA 3-1: BOTONES Y CONTROLES UTILIZADOS EN EL MODELO VALPOEVAC	15
TABLA 3-2: DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN SEGÚN RANGO ETARIO.....	45
TABLA 3-3: VELOCIDADES SEGÚN RANGO ETARIO	46
TABLA 4-1: RESUMEN DE RESULTADOS SIMULACIÓN STOC-AGENT PARA ESCENARIO DIURNO, NOCTURNO Y LOS RESPECTIVOS TIEMPOS MEDIOS DE PARTIDA (μ), SIN CONSIDERAR CONGESTIÓN.....	48
TABLA 4-2: RESUMEN DE RESULTADOS SIMULACIÓN NETLOGO PARA ESCENARIO NOCTURNO Y DIURNO, Y DISTINTOS TIEMPOS MEDIOS DE PARTIDA (u), CONSIDERANDO CONGESTIÓN.....	51
TABLA 4-3: COMPARACIÓN DE VÍCTIMAS EN LOS DISTINTOS ESCENARIOS DE LA.....	53
TABLA 4-4: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN ESCENARIO NOCTURNO, PARA STOC-AGENT Y NETLOGO (CON Y SIN CONSIDERACIÓN DE LA CONGESTIÓN).....	56

Índice de Acrónimos

ONEMI: Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior.

SHOA: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

INE: Instituto Nacional de Estadísticas.

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería.

SEREMIS: Secretarías Regionales Ministeriales.

SECTRA: Secretaría de Planificación de Transporte

CSN: Centro Sismológico Nacional.

UTFSM: Universidad Técnica Federico Santa María.

PUCV: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

CIGIDEN: Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres.

DEM: Digital Elevation Model (Modelo de Elevación Digital).

GIS: Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica).

UNESCO: United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura).

USGS: United States Geological Survey (Servicio Geológico de los Estados Unidos)

ABM's: Agent Based Models (Modelos Basados en Agentes).

GUI: Graphical User Interface (Interfaz Gráfica del Usuario).

PE: Punto de Encuentro.

SAE: Sistema de Alerta de Emergencia.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Chile es considerado uno de los países más sísmicos de la tierra, debido al proceso de subducción entre placas, principalmente las de Nazca y Sudamericana, que, sumado a la presencia de fallas geológicas, actividad volcánica y efectos de la geología local, permite que exista una alta actividad sísmica. Por otra parte, y debido a esto mismo, es que existe una gran probabilidad de ocurrencia de tsunamis, que se relacionan tanto al área de ruptura como la magnitud del sismo, entre otros factores (Madariaga, 1998).

Si se analiza el ranking de los terremotos más intensos ocurridos al rededor del mundo, Chile lidera la lista con el evento sísmico de mayor liberación de energía, que tuvo lugar en mayo de 1960. El terremoto de magnitud Mw 9,5 (USGS Earthquake Hazards Program, 2019) con epicentro en Valdivia, conocido también como el “Gran terremoto de Chile”, ha sido el movimiento de mayor magnitud registrado instrumentalmente en la historia de la humanidad, que además produjo un tsunami que alcanzó alturas de hasta 8 metros por sobre el nivel del mar, lo que dejó a más de 1600 víctimas y afectó a varios poblados y ciudades no sólo del país, sino también de otras localidades a lo largo del océano Pacífico (UNESCO, 2012).

El evento fue tan devastador, que dio origen a la ONEMI, institución encargada de planificar, coordinar, organizar, asesorar y supervisar las actividades del Sistema Nacional de Protección Civil, para disminuir el riesgo de desastres y catástrofes (de origen natural o provocadas por la acción humana), a través de la mitigación, preparación, alerta, respuesta y rehabilitación con el objeto de reducir la pérdida de vidas, disminuir los impactos económicos, los efectos medioambientales y proteger los modos de vida, contribuyendo al desarrollo sostenible y permitiendo establecer la Reducción de Riesgo de Desastres como prioridad nacional, fomentando una cultura preventiva¹.

¹ Ver <https://www.onemi.gov.cl/mision-y-vision/>

Pese a todo lo anterior, la población tanto del país como de otras localidades en el mundo, han continuado estableciéndose en zonas costeras a lo largo de los años, lo que aumenta su vulnerabilidad frente a tsunamis, es decir, hay una mayor exposición y con ello aumenta la susceptibilidad de la comunidad al impacto por este tipo de amenazas (Igualt, 2017). Si a esto se le suma la probabilidad de ocurrencia de terremotos tsunamigénicos en Chile, es posible generar un escenario bastante desfavorable, sobre todo en ciudades que poseen un gran porcentaje de la población que se encuentra constantemente en zonas potencialmente inundables.

La ciudad de Valparaíso es conocida como el centro histórico, administrativo, universitario y principal núcleo urbano de la región de Valparaíso. Además, es cuna de uno de los puertos más importantes del país. De aquí nace la inquietud de analizar el comportamiento de la población al evacuar frente a un evento catastrófico de tsunami, pues gran porcentaje de la población flotante se encuentra en la zona del Almendral, sector con altas probabilidades de ser inundado por el ingreso del mar.

1.2. Objetivos de la Memoria

1.2.1. Objetivos Generales

El propósito principal de la presente memoria es realizar una comparación entre dos modelos de evacuación de agentes en caso de tsunami: STOC-AGENT y NETLOGO, específicamente en la zona del Almendral que se encuentra en un sector de la ciudad de Valparaíso cuya cota de elevación es bajo los 30 [msnm].

Con lo anterior se espera comparar las diferencias y similitudes de ambos modelos, y así finalmente poder aportar con una herramienta capaz de simular de manera global lo que ocurre con la evacuación de la población durante una inundación provocada por un terremoto, para así buscar medidas que permitan la reducción del riesgo de desastres y que vayan en pro del bienestar de las personas frente a este tipo de escenarios.

1.2.2. Objetivos Específicos

A continuación, se detallan algunos de los objetivos específicos necesarios para lograr los objetivos generales propuestos:

- Recopilación de información histórica de la zona de análisis, sobre todo en lo referido a terremotos tsunamigénicos.
- Simulación del evento tsunamigénico de 1730 con el modelo numérico “Tsunami-HySEA”.
- Simular la evacuación de agentes por tsunami, para distintos escenarios de población y tiempos medios de partida, utilizando modelo codificado en NetLogo (materia de esta memoria).
- Comparar simulaciones de NetLogo con los resultados de simulaciones usando el modelo de Stoc-Agent (modificado por Cyril Mokrani), desarrollados en el marco del Proyecto Fondecyt 11170024, año 2017 (“Tsunami risk and urban form: a proposal for the examination and improvement of Chilean cities’ suitability for timely and safe evacuations”) de Geografía y Urbanismo, a cargo del profesor Jorge León Canales.
- Analizar el comportamiento global de la evacuación en ambos casos.
- Concluir al respecto.

Capítulo 2

Revisión Literaria

El siguiente capítulo tiene por finalidad reunir material bibliográfico para entender la situación actual del país en cuanto a la sismicidad y sus fenómenos tsunamigénicos, en particular en lo referente al sector de análisis en la región de Valparaíso. Además, habrá un primer acercamiento a lo que son los modelos de agentes y cómo analizar el comportamiento de las personas en situaciones masivas, sobre todo cuando se trata de fenómenos catastróficos como son los terremotos y tsunamis.

2.1. Antecedentes Generales: Contexto Nacional

2.1.1. Distribución Demográfica

2.1.1.1. Descripción General

De acuerdo con la síntesis de resultados del INE en base al censo de Población y Vivienda 2017, se pudo contar y caracterizar un total de 17.574.003 personas, de las cuales un 62,4% se concentra en las regiones Metropolitana (40,5%), Biobío (11,6%) y Valparaíso (10,3%) (INE, 2018).

2.1.1.2. Descripción Regional

Valparaíso es la tercera región más poblada del territorio nacional, con 1.815.902 habitantes y una densidad aproximada de 110,4 [habitantes/km²]. Existen tres principales ejes de ocupación urbana: Poblamiento Costero, Valle del Aconcagua y sobre las más importantes vías de comunicación.

De los anteriores, el costero es el más importante debido a sus funciones portuarias, turísticas, industriales y de servicios, destacando centros urbanos como el Gran Valparaíso, San Antonio, Quintero, Cartagena, El Quisco, Algarrobo, Papudo, Rocas de Santo Domingo y Zapallar.

2.1.2. Características Zona de Interés

La ciudad de Valparaíso, además de ser núcleo del Gran Valparaíso, es una de las ciudades más antiguas de Chile, remontando sus orígenes a 1536. Se considera sede del Poder Legislativo de la nación y debido a su valor arquitectónico, UNESCO declara a esta ciudad como “Patrimonio de la Humanidad” el año 2003². Adicional a esto, alberga al gobierno regional y a la mayoría de las SEREMIS del gobierno central y es asiento de la Armada de Chile, debido a lo cual es la principal oferente de los procesos de gestión y conducción en el sector público³.

Actualmente el puerto de Valparaíso es uno de los de mayor envergadura y el más importante del país, pues debido a su ubicación, permite la conexión de la capital (Santiago) con el resto del mundo, ubicándose a 120 kilómetros de ella.

El análisis que posteriormente se desarrollará en esta memoria, se realiza en un sector específico de la ciudad de Valparaíso, “El Almendral”. El Plan de Valparaíso se divide en dos grandes zonas: el “Barrio Puerto” (o casco histórico) y el “Almendral”. Este último corresponde al sector de mayor amplitud en la parte horizontal de Valparaíso, con aproximadamente 145,74 Hectáreas. Desde sus inicios era un lugar de paso, sin embargo, con el paso del tiempo se fueron trazando conectividades viales, mezclando amplias avenidas, con generosos espacios públicos, como el caso de Av. Argentina y Brasil, que forman parte de los ejes estructurantes de alto flujo vehicular (Silva & Moreno, 2014) (Ver Figura 2-1).

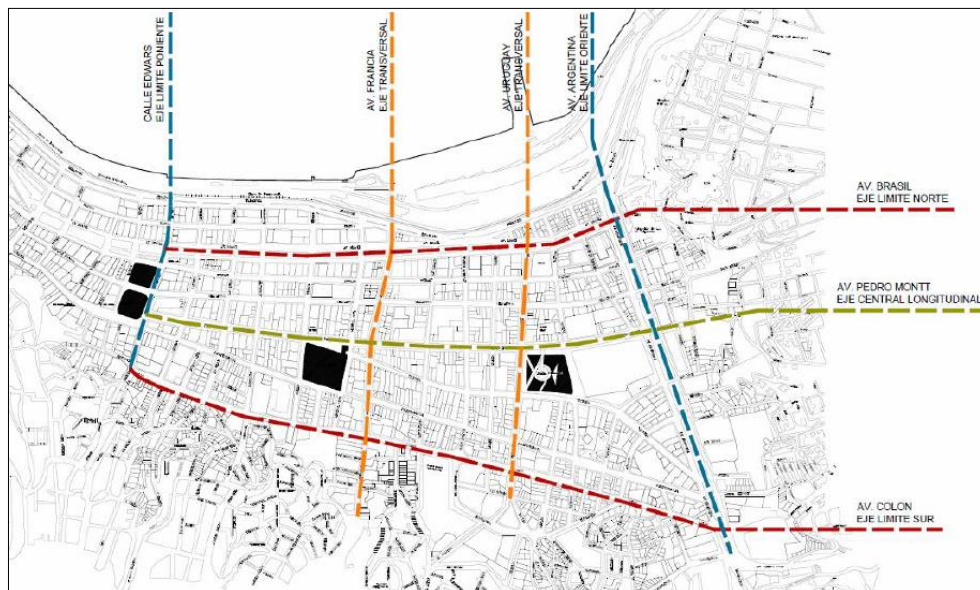


Figura 2-1: Plano de Ejes Estructurantes del Almendral (Fuente: Escuela Arquitectura PUCV 2012).

Actualmente el Almendral contiene a importantes universidades, centros comerciales, grandes avenidas y paseos peatonales, importantes estructuras como lo es el Congreso Nacional, fachadas y arquitectura de alto valor histórico, además de contener un gran porcentaje de población flotante, pues es muy común que las personas provenientes de zonas como Quilpué, Villa Alemana, Viña del Mar, entre otras comunas, pasen gran parte del día en este sector por distintos motivos.

² Ver <https://www.thisischile.cl/valparaiso-14-anos-como-patrimonio-de-la-humanidad/>

³ Ver https://www.municipalidaddevalparaiso.cl/valparaiso_sintesis.aspx#

2.1.3. Sismicidad y Terremotos

2.1.3.1. Visión General

Chile es uno de los países más propensos a sufrir terremotos pues se encuentra ubicado sobre el llamado “Anillo de Fuego del Pacífico”, un conjunto de fronteras de placas tectónicas ubicado en el Océano Pacífico, que delimita la zona con mayor actividad sísmica y volcánica del mundo (Figura 2-2).

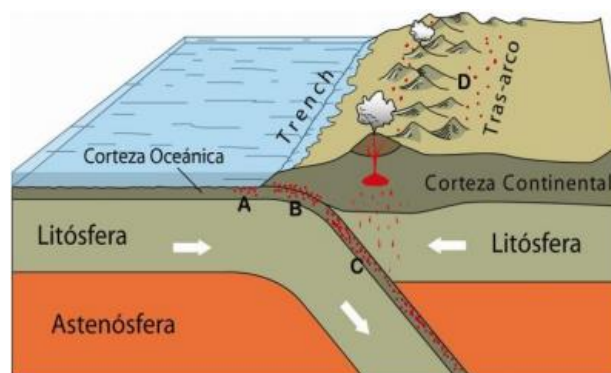
En particular, el país se ubica sobre la placa Sudamericana en su borde occidental, donde convergen y generan zonas de subducción tanto la placa de Nazca como la Antártica, produciendo grandes deformaciones del continente Sudamericano y generando terremotos a lo largo de su extensión.



Figura 2-2: Placas tectónicas y anillo de fuego del pacífico (Fuente: SeismicsKnowledge⁴)

2.1.3.2. Tipos de Sismos

Las zonas de subducción se producen en bordes de placas convergentes, donde la placa más densa (o pesada) penetra bajo la menos densa, debido al peso de la placa subductada. En el caso de Chile, la placa oceánica de Nazca es más densa que la placa continental de Sudamérica, lo que la hace penetrar bajo el continente, formando una zona de subducción y por consiguiente un valle profundo, llamado fosa o trinchera (“trench”), que en este caso se desarrolla bajo el océano costa afuera del continente.



ZONA DE SUBDUCCION

- A: Sismos “outer-rise”
- B: Sismos Interplaca
- C: Sismos Intraplaca-oceánica
- D: Sismos Intraplaca-continental

Figura 2-3: Zona de subducción y tipos de sismos que ocurren en ella (Fuente: Sismicidad y Terremotos en Chile, CSN).

⁴ <http://sites.ipleiria.pt/seismicknowledge/cinturon-de-fuego-del-pacifico/>

Como se muestra en la Figura 2-3, según el documento de “Sismicidad y Terremotos en Chile” (Centro Sismológico Nacional, CSN) existen 4 tipos de sismos que pueden ocurrir dentro del territorio nacional, y se describen brevemente a continuación:

- A. Sismo “outer-rise”:** Aquellos que se originan costa afuera de la fosa oceánica, debido a la deformación en la placa de Nazca al doblarse (“bending”) y tratar de meterse bajo el continente, cuando el contacto interplaca no se mueve por estar acoplado. En general sus magnitudes son menores que Mw 8,0. Un ejemplo puede ser el terremoto ocurrido el 2001 (Mw 6,7), frente a las costas de Valparaíso.
- B. Sismos Interplaca:** Ocurren cuando la fuerza neta en la zona interplaca (o entre placas) es mayor a la fuerza de roce que las traba, es decir, las placas logran desplazarse. Cada vez que esto ocurre se origina un terremoto de este tipo. La magnitud de estos eventos es proporcional al área de la zona que se mueve y a cuánto se mueve. Si adicionalmente se desplaza el fondo oceánico verticalmente, se produce una ola sobre la zona de ruptura que al propagarse se conoce como “tsunami”. Son los sismos de mayor magnitud registrados, siendo ejemplos de estos el terremoto de Valdivia 1960 (Mw 9,5) y el de Maule 2010 (Mw 8,8) (Saragoni, 2011).
- C. Sismos Intraplaca-oceánica:** Estos sismos se desarrollan dentro de la placa oceánica subductada, debido a su peso y fuerte acoplamiento interplaca, a profundidades mayores que 60 [km] (con un tope cercano a los 700 [km] de profundidad).
Producen mayores daños que los sismos interplaca de la misma magnitud, ejemplo de esto son los terremotos de Chillan en 1939 (Mw 8,3) y Punitaqui en 1997 (Mw 7,1).
- D. Sismos Intraplaca-continental:** Estos sismos se desarrollan dentro de la placa continental, en la corteza a profundidades menores que 30 [km]. Debido a este tipo de subducción se produce el alzamiento de la cordillera de los Andes. En general ocurren en torno a la cordillera, tanto en Chile como en Argentina. Ejemplos de estos sismos son el terremoto de Las Melosas de 1958 (Mw 6,3) en Cajón del Maipo, frente a Santiago.

2.1.3.3. Sismicidad Histórica: Región de Valparaíso

Con el paso del tiempo, la secuencia sísmica de Chile central (30°-34°S) ha recibido mucho menos atención que el estudio tanto de la zona sur como de la zona norte, aun cuando esta contiene al núcleo metropolitano del país, incluyendo sus tres principales ciudades y más del 80% de su población (Carvajal et. al., 2013).

Desde el año 1700 hasta la actualidad, la región de Valparaíso ha sufrido eventos sísmicos de características devastadoras, algunos de los cuales no sólo se caracterizan por la magnitud del movimiento sino también por el nivel de destrucción a su paso, que en algunos casos ha sido acompañado por tsunamis de grandes proporciones, sin embargo, no todos estos eventos han sido registrados instrumentalmente y muchos de ellos ni siquiera permanecen en la memoria de los habitantes de la región.

A continuación, se ordenan los movimientos telúricos más fuertes ocurridos en la región⁵, según información recopilada:

- Valparaíso	1730	(Mw 9,1/9,3 – Ms 8,7)
- Copiapó	1822	(Ms 8,5)
- La Ligua y Petorca	1873	(Superior a M _L 8,0)
- Valparaíso	1906	(Mw 8,2 – Ms 7,9)
- La Ligua	1965	(Ms 7,4)
- La Ligua y Petorca	1981	(Ms 7,5)
- Algarrobo	1985	(Mw 8,0 – Ms 7,8)
- Valparaíso	2017	(Mw 6,9)

Como se observa, tres de los grandes terremotos de la región ocurrieron en la ciudad de Valparaíso, es por esta razón que es importante analizar los registros históricos de estos movimientos, pues es de esperarse que nuevos terremotos se originen cerca o sobre las mismas zonas de rupturas y alcancen magnitudes similares o incluso mayores que eventos antiguos, algo que se conoce como “brecha sísmica”.

Según registros históricos de Chile central, se describen terremotos destructivos en los años 1575, 1580, 1647, 1730, 1822, 1906 y 1985 DC, dando como resultado una brecha sísmica con un intervalo recurrente de aproximadamente 80 años. Lo anterior, sugiere que el siguiente gran terremoto no ocurriría hasta mediados del siglo 21, sin embargo, las longitudes de las rupturas y cantidades de deslizamiento de las placas difieren sustancialmente entre un terremoto y otro (Dura et. al, 2015).

• Terremoto de 1730

El 8 de julio de 1730, la zona costera de Valparaíso y Viña del Mar sufre un gran movimiento sísmico, que, tras una serie de crónicas históricas, evidencias geológicas y modelación numérica, investigadores de la UTFSM, CIGIDEN y la PUCV, han logrado estimar como el segundo terremoto más grande del mundo, luego del ocurrido en 1960 en Valdivia, con una magnitud cercana a los Mw 9,3.

De acuerdo con los testigos en Valparaíso, el mar subió 81/2 varas (~7 [m]) respecto al nivel medio del mar, alcanzando el templo de los padres de San Agustín y la iglesia de los Mercedarios ubicada a 800 metros de la costa actual y a 8,7 [msnm]. Se reporta también que el agua habría alcanzado la mitad de la altura del cerro donde se emplazaba la iglesia La Matriz, la que no ha sido reubicada desde su construcción en el siglo XVII y se encuentra en la cota 12,7 [msnm] con un punto medio del cerro a 8,7 [msnm] (Carvajal et. al., 2013).

• Terremoto de 1906

El 16 de agosto de 1906 ocurrió uno de los peores terremotos que, en número de muertos, superó a todos los anteriores. El diario El Mercurio en su edición del día 17 decía lo siguiente: “El terremoto se produjo de una manera violenta desde su iniciación y llevó al ánimo de los cuatrocientos mil pobladores de Santiago un pánico indescriptible y un terror sin precedentes en los últimos años” (Terremoto de Anoche, 1906).

⁵ Ver <http://www.vregion.cl/datos/terremotos.php#terremoto-2017>

Si en Santiago la destrucción fue grande, en Valparaíso fue catastrófico. El barrio Almendral quedó casi totalmente en ruinas (Ver Figura 2-4). Se estima que el movimiento tuvo una magnitud Mw 8,2 aproximadamente con epicentro en el mar, frente a Valparaíso.

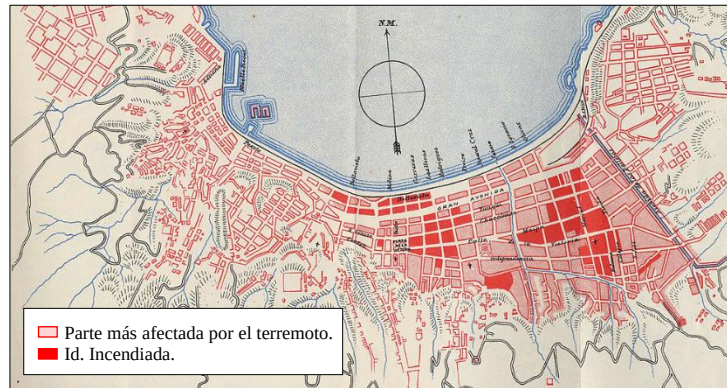


Figura 2-4: Plano de Valparaíso (Fuente: Terremoto de Valparaíso de 1906, Wikipedia).

- **Terremoto de 2017**

El terremoto de 2017 frente a las costas de Valparaíso no fue catastrófico ni traumático para los habitantes de la zona, sin embargo, causó mucha preocupación e incertidumbre pues el evento ocurrido el lunes 24 de abril de magnitud estimada de Mw 6,9 (Barrientos & CSN, 2017), fue el mayor de una secuencia de sismos ubicada hacia el oeste de la costa entre Valparaíso y Algarrobo, como se indica en la Figura 2-5.

Según reporte preparado por Sergio Barrientos y el equipo del CSN, más de 650 sismos se registraron frente a las costas de Valparaíso entre el 22 abril y el 1 de mayo de 2017, con magnitudes mayores a Mw 2,5. En esta secuencia, ocho de los sismos fueron de magnitud mayor o igual a Mw 5,0 y en cuanto a aceleraciones, el mayor produjo una máxima de 0,39g en la estación ubicada en Valparaíso, que de acuerdo a los análisis realizados, produjo una ruptura de 25 kilómetros de longitud y un desplazamiento de 2 metros de la placa de Nazca en relación a la Sudamericana, en el hipocentro⁶.



Figura 2-5: Localización de la sismicidad asociada a la secuencia de abril de 2017 (Fuente: Reporte Barrientos & CSN, 2017).

⁶ Ver <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2017/05/11/857939/640-sismos-afectaron-a-Valparaiso-en-solo-ocho-dias-y-el-mas-grande-desplazo-la-placa-en-dos-metros.html>

Debido a eventos recientes como Andaman-Aceh 2004 (Sumatra) y Tohoku-oki 2011 (Japón), se ha concluido que es incorrecto evaluar la amenaza de los mega terremotos basándose sólo en los eventos históricos bien documentados, lo que lleva a creer que la brecha sísmica estimada de 80 años puede ser algo engañosa (Dura et. al, 2015). Esto es preocupante pues se estima que existen “super ciclos” con largos y desconocidos tiempos de recurrencia (~ 300 años), que indican que no se ha producido un mega terremoto y tsunami como el de 1730, sólo ha habido algunos terremotos que quizá puedan haber retrasado la ocurrencia de algo similar debido a la redistribución de esfuerzos por el desplazamiento de placas, como ocurrió con el evento de Illapel 2015 Mw 8,3 (Klein et. al, 2017).

La información anterior da cuenta del porqué de la preocupación de algunos investigadores, pues dada la historia sísmica de la región, no se puede descartar la ocurrencia de sismos de gran magnitud, es más, expertos de la UTFSM advierten que un tsunami de similares proporciones al de 1730 podría repetirse en la zona central en un futuro cercano, aspecto analizado con la colaboración de investigadores de la Casa de Estudios antes mencionada, PUCV y CIGIDEN⁷.

Tan importante es el tema actualmente, que en Julio del presente año se realizó una Jornada de activación de la memoria, para conmemorar el terremoto y tsunami del 8 de julio de 1730, con charlas, ferias científicas y conversatorios sobre “Evacuación Vertical”, una nueva modalidad de evacuación que se espera conseguir en un futuro cercano, pues para un evento de tales características, la evacuación horizontal puede que no sea suficiente para resguardar la seguridad de la población afectada.

2.2. Comportamiento humano ante situaciones de emergencia

El comportamiento humano juega un rol importantísimo dentro del ámbito de la planificación y protección ante situaciones de emergencias, sobre todo ante la toma de decisiones.

Es casi un hecho que, en muchas situaciones de emergencia, el miedo a morir ha causado más víctimas que la emergencia como tal, pues el pánico es capaz de provocar daños de grandes proporciones.

Cuando se trata de ciencias del comportamiento humano, no existe un criterio simple que permita predecir al detalle la reacción de un individuo ante una situación crítica, pues existe una cantidad enorme de variables que pueden afectar las decisiones de una persona, ya que todo está en función del contexto en que se encuentre.

Al enfocarse en la conducta individual (Fidalgo V., 1995), algunos de los factores que pueden afectar el comportamiento entre un individuo y otro, pueden ser: personalidad, educación, sexo, edad, condiciones físicas, percepción del riesgo, entre otros.

Cuando el enfoque deja de ser individual y se convierte en algo colectivo, se producen las llamadas “multitudes”, donde la densidad de la población es tal que ocurren continuas interacciones o reacciones entre individuos, generando una inteligencia colectiva más que un razonamiento individual u optimización global. Si lo anterior se lleva a una situación de emergencia, fácilmente se origina el pánico, que produce multitudes turbulentas con movimientos irregulares, lo cual en algunos casos provoca violencia y destrucción (Helbing & Johansson, 2010).

⁷ Ver <https://noticias.usm.cl/2019/07/09/expertos-de-la-usm-advierten-que-tsunami-como-el-de-1730-podria-repetirse-en-la-zona-central/>,

Con esta investigación se pretende modelar y analizar el comportamiento de evacuación por tsunami en ciudades costeras altamente vulnerables a una inundación. Así es posible mitigar los efectos del tsunami, particularmente en lo referido al número de víctimas.

El desarrollo de sistemas de advertencia y estrategias de evacuación juegan un rol muy importante en cada ciudad y ayudan a mejorar las medidas de mitigación de los efectos del tsunami. En Chile la ONEMI (con la utilización de información técnica de entidades como SERNAGEOMIN, SHOA, entre otras) es la única institución encargada de emitir alertas para advertir a la población de un riesgo inminente, a través de sirenas de peligro del SAE, mensajes de texto y carteles (Figura 2-6), entre otras cosas.

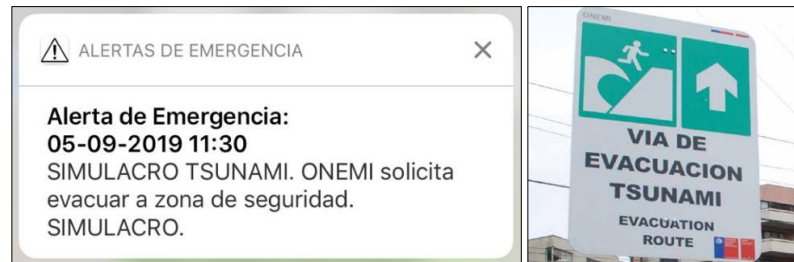


Figura 2-6: A la izquierda, la alerta de emergencia enviada por ONEMI a los teléfonos celulares, para el simulacro vivido en Valparaíso el 5 de septiembre del 2019. A la derecha un cartel indicando vía de evacuación de tsunami.

Pese a esto, algunas personas continúan sin evacuar de zonas que se encuentran amenazadas por tsunami. Las razones por las cuales no reaccionan de manera apropiada ante un movimiento telúrico o ante la información de amenaza de tsunami, pueden ser infinitas, sin embargo, a continuación, se resumen tres de ellas las cuales fueron rescatadas del documento de Erick Mas (Mas S., 2012):

- Los sistemas de emergencia son poco claros, no son recibidos correctamente, o simplemente no expresan una orden directa de la necesidad de evacuar. Sucede cuando hay mensajes ambiguos. Por ejemplo, para el terremoto de Maule de 2010 hubo varios problemas de comunicación entre autoridades y entidades importantes como SHOA y ONEMI, que desencadenó un retorno a las zonas de riesgo provocando un aumento considerable en el número de víctimas del tsunami, que se pudo haber evitado.
- Algunas veces existe una alta incertidumbre en saber cuáles son realmente las zonas de riesgo frente a una amenaza de tsunami, pues esto depende de muchos factores, como la intensidad del terremoto, punto de generación del tsunami, entre otras cosas. Debido a esto, es que en ocasiones las personas detienen su evacuación o retornan a sus hogares o lugres de estudio y trabajo, pues sienten una falsa seguridad, lo que puede resultar fatal en algunos casos.
- La confiabilidad de los métodos de percepción del peligro en base a la experiencia y lo que ocurre con el entorno, como sucede por ejemplo cuando el mar se recoge previo a un tsunami. Esto no es el mejor indicador de un tsunami pues el mar no tiene un comportamiento 100% definido, y en ocasiones no ocurre recogimiento previo de las aguas.

Es normal que las personas confíen plenamente en los sistemas de emergencia establecidos para la protección ciudadana ante emergencias, y es posible que no le den la importancia necesaria a una temprana evacuación, pues en sus memorias no existe un registro cercano de tragedias devastadoras, más que a través de registros fotográficos o de video.

Esto da cuenta de la importancia que tiene la educación de las personas respecto a este tema, pues está comprobado que ante una situación de emergencia de este tipo, el tiempo de reacción y el inicio de la evacuación de cada persona, son factores claves para que se produzca el menor número de víctimas posible.

2.3. Modelos de Evacuación de Tsunamis Basados en Agentes

La evacuación como tal, se refiere a la acción o al efecto de retirar un grupo de personas de un lugar determinado, debido a emergencias que se originan en diferentes escenarios, ya sean causadas de forma natural o debido a la intervención del ser humano.

Gran cantidad de modelos de evacuación se han desarrollado a lo largo del tiempo, sin embargo, sigue siendo muy complicado saber el comportamiento real que tendrá la población. Por esta razón han aumentado los estudios en este aspecto, pues la evacuación es el método más importante y efectivo para salvar vidas humanas, sobre todo en el caso de inundación por tsunami (Mas S., 2012).

Una de las formas usadas a lo largo del tiempo para analizar el comportamiento de la población evacuando por tsunami han sido los simulacros, sin embargo, los resultados que entregan estas intervenciones no son del todo reales, sin considerar lo complicado que resulta realizar uno, principalmente porque implica la movilización de recursos humanos y materiales. Por esta razón es que se realizan aproximadamente cada 3 o 4 años, pues pese a lo anterior, fomentan una cultura preventiva y de autocuidado en la sociedad, buscando aumentar la atención y la preparación frente a un escenario de riesgo (ONEMI, 2014).

Desde hace algunos años que se está poniendo mayor énfasis en entender las ciencias sociales para mitigar los efectos de los tsunamis. Para ello actualmente se está haciendo uso de simulaciones computacionales, usando Modelos Basados en Agentes (o por sus siglas en inglés, ABM's), pues económicamente son mucho más rentables y se pueden predefinir comportamientos de la población que se acercan bastante a la realidad (León et. al., 2019).

Los ABM's son la mejor alternativa para analizar el comportamiento de la población, pues son modelos computacionales que tratan con sistemas complejos, generando la simulación de acciones e interacciones de elementos discretos y autónomos (agentes) dentro de un entorno o sector particular.

El concepto básico de los ABM's es diseñar un modelo de agentes y uno de medio ambiente, los cuales se implementan en un código computacional que posteriormente se ejecuta en un ordenador para simular las interacciones de agentes, entre sí y con el medio que los rodea.

Los ABM's de evacuación de tsunamis, tienen diferentes consideraciones, como reglas de movimiento de agentes, embotellamientos, e incluso el concepto de víctima varía entre uno y otro (Mas S., 2012). A pesar de ello, todos los modelos apuntan a un mismo objetivo general, que es lograr entender el comportamiento humano frente a este tipo de catástrofes.

Para este tipo de modelos, no existen soluciones generales o teóricas, pues sólo es posible obtener soluciones particulares para problemas específicos que se estudian (Ginovart, 2015).

Capítulo 3

Metodología de Trabajo

El siguiente capítulo reúne la información asociada a la metodología de trabajo utilizada para lograr cumplir con los objetivos propuestos indicados en el Capítulo 1, es decir, analizar y comparar los resultados de una evacuación de agentes a través de dos modelos distintos.

Para evaluar esto, por un lado, se utilizará el software libre de modelación multi-agente “NetLogo” para desarrollar un modelo de agentes, tomando como base el trabajo de Erick Mas (Mas S., 2012) y algunas características de los inputs y configuraciones del modelo de Stoc-Agent, que fue modificado por el investigador de CIGIDEN Cyril Mokrani, en el marco del Proyecto Fondecyt 11170024.

Luego se procesará la información de inundación por tsunami y la configuración de los agentes mediante GIS utilizando el programa “ArcGis”, en el cual se introducirá un mapa del sector Almendral del plan de Valparaíso, que será la zona de análisis junto con las vías de evacuación y los puntos de encuentro propuestos por la ONEMI. Posteriormente se realizarán las simulaciones con NetLogo y obtendrán los resultados de evacuación por tsunami.

Por otro lado, se tomarán los resultados de las simulaciones con STOC-AGENT (modificado por Cyril Mokrani), realizadas con la misma información de mapeo de la zona de análisis. Con esto se asegura que los resultados de ambas modelaciones sean representativos y comparables.

3.1. NetLogo

3.1.1. Descripción del Programa

NetLogo es un software libre y de código abierto⁸ que se puede obtener gratuitamente a través de su sitio web oficial “<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>”.

Este programa es utilizado para la modelación multi-agente y corresponde a un lenguaje de programación simple y adaptado al modelado/simulación de fenómenos en los que aparecen muchos individuos interactuando (como, por ejemplo, en los fenómenos habituales que se dan en la naturaleza, las sociedades, o muchas áreas de las ciencias).

⁸ Los programas libres y de código abierto son aquellos en los cuales se permite ver, estudiar, modificar y mejorar su diseño mediante la disponibilidad de su *código fuente*.

A través de una serie de códigos, es posible modelar sistemas complejos que evolucionan en el tiempo, en los cuales existen centenares o miles de individuos (agentes) que interactúan entre sí y con el entorno, permitiendo explorar la conexión entre las interacciones locales a nivel de individuo y los patrones macroscópicos que emergen de dichas interacciones.

Además de lo anterior, posee un ambiente de programación sencillo e intuitivo de usar, el cual permite crear y probar nuevos modelos en un corto plazo y al ser de fácil acceso en la web, es posible encontrar información y tutoriales para agilizar el proceso de aprendizaje.

La modelación se realiza a través de agentes, que son individuos sintéticos, autónomos y dotados de reglas o características que gobiernan su comportamiento y su capacidad de tomar decisiones. Al ser flexibles, tienen la capacidad de aprender y adaptar su comportamiento basándose en la experiencia, pues desarrollan una suerte de memoria. Estos agentes, además, son capaces de interactuar entre sí y con el entorno que los rodea (Caparrini, 2019).

Por todo lo anterior, NetLogo resulta ser muy útil para la modelación de evacuación de tsunamis, pues a pesar de ser sencillo de utilizar y de tener una interfaz gráfica amigable con el usuario, no pone límites a la sofisticación de modelos que pueden ser creados en él, y resulta una excelente opción a la hora de intentar modelar o predecir el comportamiento humano frente a eventos catastróficos que involucren el movimiento de gran cantidad de personas en un corto plazo de tiempo.

3.1.2. Descripción del modelo: VALPOEVAC

VALPOEVAC (o Valparaíso-Evacuando) es un modelo multi-agente programado en NetLogo para simular la evacuación por tsunami en la ciudad de Valparaíso, sector del Almendral.

El modelo en cuestión requiere de 3 bases de datos (BD) mínimos para iniciar la simulación, los cuales serán llamados datos de entrada o inputs del modelo. Estos corresponden a datos espaciales (entorno o medio ambiente donde se encuentran los agentes), datos de agentes (los cuales se crean y distribuyen aleatoriamente en el espacio o según una distribución conforme a la modelación en Stoc-Agent) y datos de tsunamis (los cuales son archivos ráster extraídos de la modelación realizada con “Tsunami-HySEA” que simulan la inundación cada 10 segundos, utilizando como terremoto el evento histórico de 1730).

Luego de inicializada la plataforma NetLogo, se da comienzo a la simulación, en donde los agentes móviles (personas) interactúan entre sí y con el entorno para realizar la evacuación del sector y así evitar ser víctimas del tsunami. En esta etapa existen una serie de comportamientos que definen los patrones de movimiento, cambios de velocidad y características de los agentes en su proceso de evacuación.

Finalmente, la simulación se detiene transcurrido un tiempo definido y se obtienen distintos resultados los cuales serán guardados en una carpeta de salida que contendrá archivos de texto, videos, imágenes y gráficos, que serán útiles para analizar la estimación de víctimas, personas a salvo, tiempos de evacuación, entre otras cosas.

A continuación, en la Figura 3-1 se presenta un esquema representativo del procesamiento de datos:

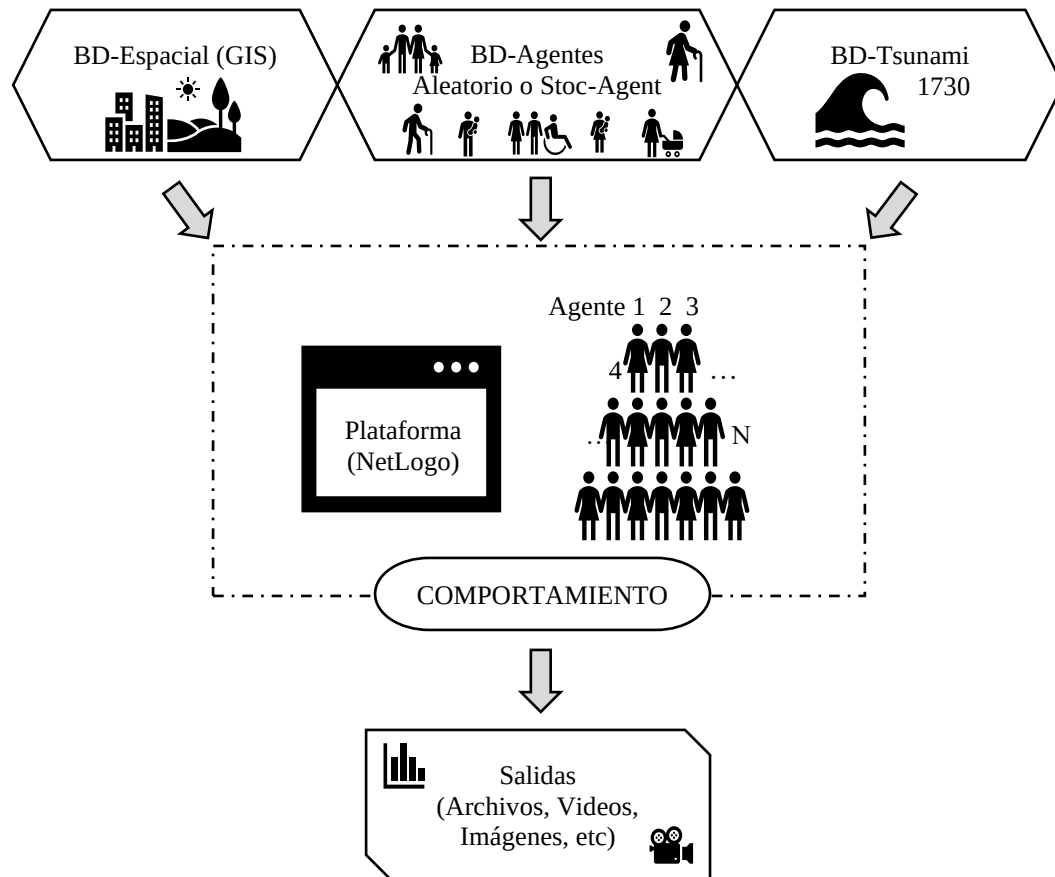


Figura 3-1: Esquema representativo del entorno de trabajo del modelo de evacuación de tsunamis VALPOEVAC desarrollado en NetLogo.

En las siguientes subsecciones se analizará en detalle el modelo diseñado en NetLogo, explicando todos los parámetros y consideraciones realizadas para su realización, es decir, se mostrarán las principales características del modelo, como su interfaz gráfica de fácil acceso, configuración de sistema, datos de entrada, datos de salida, entre otras cosas relevantes.

3.1.2.1. Interfaz Gráfica del Modelo

La Figura 3-2 muestra la interfaz gráfica de usuario del modelo (GUI, en inglés) que facilita la exploración de los diferentes escenarios posibles y la inmediata observación de los gráficos de salida e información relevante para el análisis de los resultados.

La GUI permite al usuario interactuar con el modelo a través de imágenes, ayudando a una mejor comprensión de la simulación. Además, acelera el análisis y discusión de los resultados de los escenarios analizados. Algunas de las características importantes de la GUI en VALPOEVAC serán presentadas a continuación, sin embargo para mayores detalles en el uso y la manipulación del modelo es posible revisar el Manual de Usuario descrito en el *Anexo A* o en el *Manual de Usuario de NetLogo*.

A continuación, se presentan los datos de entrada y plataforma de salida del modelo según la interfaz gráfica propuesta:

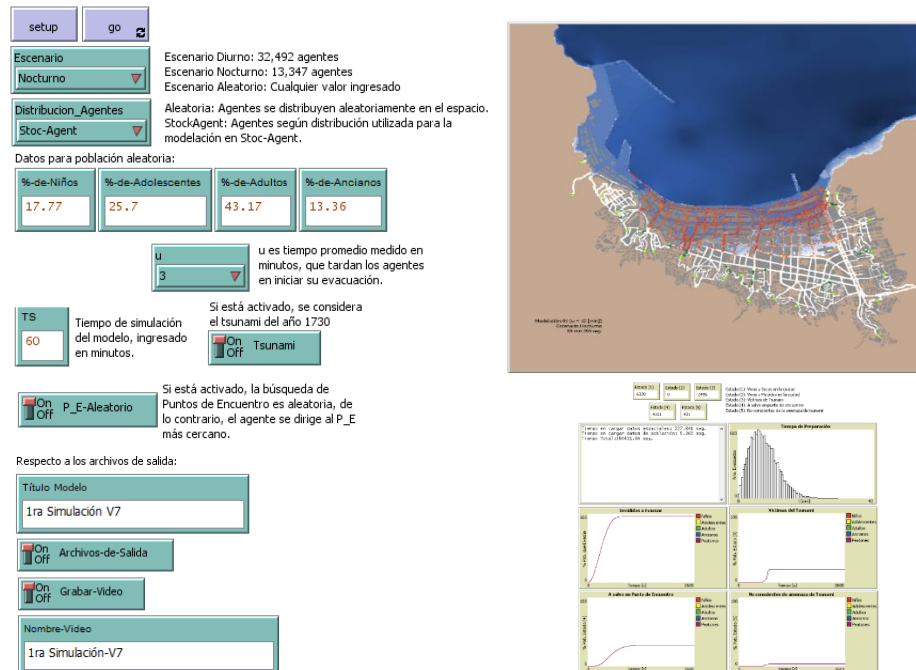


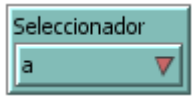
Figura 3-2: Representación Gráfica del Modelo: A la izquierda botones y controles – A la derecha formato de salida de los resultados (Pantalla de Visualización, Gráficos y Monitores)

• Botones y Controles

En NetLogo existen distintos tipos de botones disponibles para la interacción del usuario con el modelo, en VALPOEVAC se utilizaron 4 tipos de botones y controles con los cuales el usuario puede ingresar valores y realizar consideraciones en la simulación. En la Tabla 3-1 se resumen las características de estos elementos.

Tabla 3-1: Botones y Controles utilizados en el modelo VALPOEVAC

Nombre/Ícono	Descripción
	Los botones se utilizan para llevar a cabo instrucciones dentro de la simulación. En este caso hay dos, uno simple (SETUP: que carga la base de datos espacial y de agentes) y uno continuo (GO: que inicia la simulación propuesta). El botón tipo continuo se utiliza para que las instrucciones se repitan una y otra vez hasta detenerlo manualmente o hasta que se alcance una condición preestablecida, que en este caso la da el tiempo de la simulación.
	Los interruptores son una representación visual de variables globales las cuales se pueden setear como verdaderas (ON) o falsas (OFF) moviendo el interruptor arriba o abajo, respectivamente. Parámetros como la consideración de tsunami, búsqueda aleatoria de puntos de encuentro, obtención de archivos de salida y grabación videos, son interruptores que dan la opción al usuario de elegir.
	Las cajas de entrada se utilizan para ingresar datos específicos determinados por el usuario según su criterio, lo que permite mayor flexibilidad a la hora de simular. Parámetros como el porcentaje de población según rango etario, tiempo de simulación (TS), título del modelo y nombre del archivo de salida de video, son datos de entrada que pueden ser modificados por el usuario fácilmente.

Nombre/Ícono	Descripción
	Los seleccionadores son cajas con opciones dentro, que permiten al usuario seleccionar parámetros y cambiar así los escenarios de simulación. Parámetros como el tipo de escenario (Diurno, Nocturno o Aleatorio), tipo de distribución (Aleatoria o Stoc-Agent) y tiempo medio de partida (μ igual a 3, 8 o 12 minutos), son consideraciones que se pueden modificar para analizar el problema desde distintos ángulos.

Fuente: Elaboración Propia.

- **Pantalla de Visualización de Escenario**

La pantalla de visualización es una representación visual en 2 dimensiones del mundo de NetLogo, que está compuesto de agentes, es decir, seres capaces de seguir instrucciones. Estos pueden ser “tortugas” (agentes que se mueven por el mundo), “parcelas” (pieza cuadrada de “tierra” donde las tortugas se pueden mover), “enlaces” (agentes que conectan dos tortugas, que no aplican en VALPOEVAC) y “el observador”.

La apariencia inicial del mundo previo a cargar los elementos es de color negro, pues por defecto las parcelas son negras. Luego de setear la información con el botón SETUP, es posible visualizar un escenario como el presentado en la Figura 3-3.

Es posible cargar imágenes satelitales para tener otra visión del problema, sin embargo, el modelo no considera la utilización de estas imágenes. Es importante destacar que el proceso de simulación es demoroso, por lo tanto, es imposible apreciar el movimiento de los agentes sólo mirando la pantalla, razón por la cual se crea un video que une todos los instantes de tiempo (ticks) y muestra la pantalla de visualización a tiempo acelerado, el cual será guardado en la carpeta de salidas del modelo, siempre y cuando esté activado el interruptor “Grabar-Video”.



Figura 3-3: Presentación de la pantalla de visualización después de inicializar el modelo

- **Gráficos y Monitores de Salida**

Como se observa a la derecha en la Figura 3-2, la interfaz gráfica del usuario contiene gráficos y monitores de salida. Dentro de los datos de salida, se encuentra la cantidad de agentes en cada estado⁹ al momento de finalizar la simulación.

⁹ Un estado en el marco del modelo VALPOEVAC, indica la situación final en la que se encuentra un agente luego de un determinado tiempo (tick), según posición y nivel de inundación bajo él. En VALPOEVAC se definen 5 estados que serán explicados más adelante en la sección “3.1.2.5: Datos de Salida”.

Los gráficos de línea muestran el porcentaje de agentes en los estados 3, 4 y 5 en determinado instante de tiempo durante el tiempo de simulación (TS), además del porcentaje de agentes que ya han iniciado su evacuación. Por otra parte, el gráfico de barras muestra la distribución de agentes según su tiempo de inicio de evacuación.

Finalmente, el monitor de salida más grande indica el tiempo que tarda el modelo en cargar los datos espaciales y de agentes, además de indicar el tiempo total que tarda la simulación en ejecutarse completamente.

3.1.2.2. Configuración y Procesamiento de Datos

Como se explicó en la sección anterior, el modelo cuenta con una interfaz gráfica que permite distintas simulaciones asociadas a parámetros que se pueden modificar al antojo del usuario, por lo tanto, previo a que la simulación comience a ejecutarse, es necesario que se seleccionen y definan estos parámetros. VALPOEVAC permite al usuario definir la presencia o no de tsunami, la opción de guardar o no los datos de salida y la grabación de un video, la forma en que el agente móvil buscará el punto de encuentro (PE), la duración total de la simulación (TS), la distribución de los agentes, el porcentaje de agentes según rango etario y el tiempo medio (μ) que tardan los agentes en comenzar su evacuación (que será definido posteriormente).

El modelo está codificado de manera que luego de que comience a ejecutarse la simulación, los agentes sean capaces de procesar la información y ejecutar su evacuación a través de un comportamiento simple dividido en etapas de procesamiento. A continuación, se describe la arquitectura del agente y las etapas o reglas de comportamiento que debe seguir:

- *Etapas 0 (Decisión de Comienzo Evacuación):* En esta etapa el agente decide cuando comenzar su evacuación a través del tiempo de partida (t_d) asignado aleatoriamente a cada uno en base al tiempo medio de partida (μ) de la simulación, lo que será explicado en mayor detalle en la sección “3.3 : Configuración de las simulaciones”. Esto ocurre al inicializar el programa.
- *Etapas 1 (Elección de Punto de Encuentro):* Dependiendo de que condición de escenario se desee evaluar, hay dos opciones que tiene el agente para encontrar la zona de seguridad. La primera alternativa es buscar de entre todos los PE, el más cercano¹⁰, mientras que la segunda alternativa, en cambio, selecciona un PE al azar, independiente de la distancia a la que se encuentre del agente. Esto ocurre al inicializar el programa.
- *Etapas 2 (Búsqueda de Ruta):* Para buscar la ruta óptima hacia la zona de seguridad, muchos modelos de evacuación de tsunami han utilizado previamente el camino más corto, sin embargo, no todos los evacuados utilizan necesariamente el camino más corto, pues simplemente es probable que no lo conozcan. Para manejar esto, VALPOEVAC incluye en su codificación el algoritmo de búsqueda A Estrella (A^*) propuesto por Erick Mas en su tesis de doctorado (Mas S., 2012) para resolver el problema de encontrar las rutas de evacuación para cada agente, al tiempo en que estos deciden evacuar según lo establecido en la Etapa 0.
A continuación, se presenta en detalle la lógica de este algoritmo:

¹⁰ Para ello se evalúa la distancia euclidiana entre la posición inicial del agente y los PE disponibles para la evacuación, distancia deducida a partir del teorema de Pitágoras, como se indica más adelante en esta sección.

Algoritmo de Búsqueda Heurística¹¹ A*

El algoritmo de búsqueda, también conocido como “A Asterisco” o “A Estrella” fue presentado por Peter Hart y otros investigadores (Hart et. al., 1968) como un mejoramiento del algoritmo de búsqueda punto-a-punto Dijkstra’s.

La función de este algoritmo es encontrar el camino de menor costo entre un nodo de origen y un objetivo, siempre y cuando se cumplan determinadas condiciones, pues en caso de existir una solución, siempre se dará con ella. Es la forma más conocida en algoritmos de búsqueda e incluso tiene una cuota de uso muy alta en la industria de los video juegos (Mas S., 2012).

El principio de funcionamiento básico de este algoritmo de búsqueda se describe a continuación (Lester, 2005):

En primera instancia es necesario saber que A* se clasifica dentro de los algoritmos de búsqueda en grafos, es decir, en espacios de búsqueda que pueden ser representados como áreas divididas por grillas (en este caso cuadradas), reduciendo el entorno a un arreglo simple en dos dimensiones donde cada elemento del arreglo representa uno de los cuadrados de la grilla, los que a su vez se registran como caminables (calles) o no caminables (edificios, obstáculos, agua, muros, terrenos ilegales, etc).

Los cuadrados en NetLogo son llamados patches (o parcelas) y el centro de cada uno de ellos se representa por un “nodo”. Para iniciar el algoritmo es necesario seleccionar dos nodos importantes: El origen (A) y el destino (B), como se observa en la Figura 3-4 (1). Una vez ubicado el origen, se deben revisar los cuadrados adyacentes hasta encontrar el objetivo, de la siguiente forma:

La búsqueda se comienza con la localización inicial del agente o punto de origen, añadiendo este nodo a una “lista abierta” junto con los nodos caminables adyacentes.

La lista abierta se comporta como una lista de compras, es decir, en un comienzo existe sólo un elemento, que luego irá siendo acompañado por el resto de los cuadrados que pueda haber a lo largo de la ruta que se desea tomar, o quizá no. Básicamente, es una lista de cuadrados que necesitan ser revisados.

El centro de este grupo de nodos, en este caso el origen (A), se guarda como el “nodo padre” de los 8 vecinos a su alrededor y cada cuadro vecino apunta hacia su padre. Luego, el padre actual es borrado de la “lista abierta” para ser añadido a una “lista cerrada”, lo que indica que ya no es necesario explorar más dicho nodo, como se muestra en la Figura 3-4 (2).

El proceso anterior se repite para cada uno de los cuadrados adyacentes pertenecientes a la lista abierta, pero: ¿Cómo saber que cuadrado se debe escoger primero para continuar el proceso de búsqueda?

Para ello, el algoritmo utiliza una función de evaluación de nodos “F(n)”, que indica básicamente el costo que implica utilizar un nodo para generar la ruta de evacuación, así, mientras menor sea el costo, mejor será el nodo para ser explorado.

¹¹ La capacidad heurística es un rasgo característico de los humanos, desde cuyo punto de vista puede describirse como el arte y la ciencia del descubrimiento y de la invención o de resolver problemas mediante la creatividad y el pensamiento lateral o divergente.

En la Figura 3-4 (3) se observa que el análisis se amplía al nodo de menor F, sin embargo, existe otro nodo con las mismas características, elegir uno u otro es aleatorio pues va a depender del orden en que los nodos ingresan a la “lista abierta”.

$$F(n) = G(n) + H(n) \quad (3.1)$$

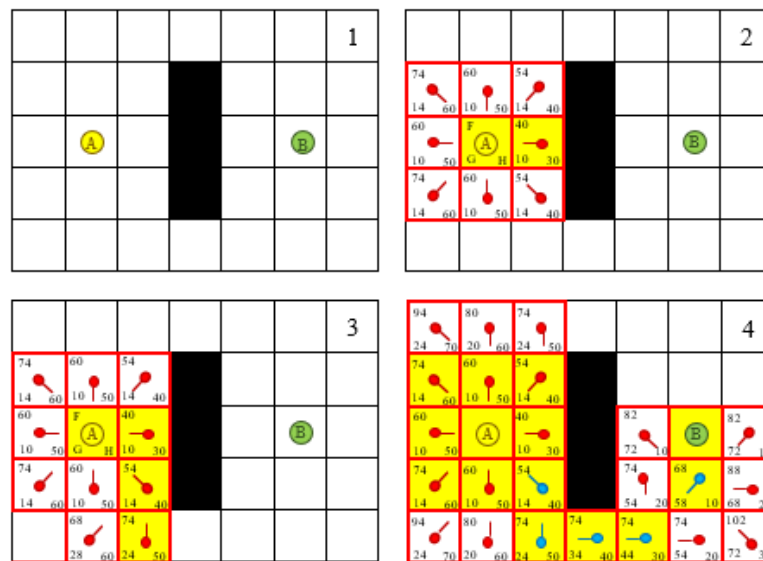
Donde:

$G(n)$: Representa el costo real de moverse desde un punto de origen (A) hasta un nodo (n) determinado, siguiendo la ruta generada para llegar a él, en base a la relación padre-hijo en retroceso.

$H(n)$: Representa el costo estimado de moverse desde el mismo nodo determinado (n) hasta el punto final de la ruta (B). Esto es comúnmente conocido como la heurística del modelo, que será explicada más adelante en esta sección.

Finalmente, la ruta es generada moviendo los cuadros entre la “lista abierta” y la “lista cerrada”, escogiendo los nodos con menor valor de $F(n)$. Aquellos en la “lista abierta” además son comparados en el proceso de verificar un mejor camino. Así se van encontrando los nodos que finalmente formarán la ruta del agente hasta el objetivo (B), como se muestra en puntos azules en la Figura 3-4 (4), los cuales se guardan en una lista llamada “camino” que el agente deberá posteriormente recorrer para alcanzar su destino.

Es importante destacar que si $H(n)$ es distinta de cero, se obtiene algo adecuado a la realidad, pero no necesariamente la ruta más corta.



- 1) Origen (nodo A) y objetivo (nodo B) separados por un obstáculo (celdas negras)
- 2) Exploración de los cuadros adyacentes calculando los valores de F, G, y H
- 3) Generación cuadro a cuadro de la ruta, resultado de la exploración de nodos (celdas amarillas)
- 4) Ruta óptima encontrada que se muestra con puntos azules y su dirección a través de la relación padre-hijo

Figura 3-4: Algoritmo de Búsqueda A*

Heurísticas

En el algoritmo propuesto por Mas (Mas S., 2012), la heurística del modelo es básicamente la estimación del mínimo costo entre cualquier nodo y el objetivo o meta final, pues esto no se sabe realmente hasta conseguir la ruta real a seguir.

La heurística en este caso se utiliza como una forma de controlar el comportamiento del modelo A*. Por ejemplo, si $H(n)$ es cero, sólo $G(n)$ será calculado en cada cuadro y A* se vuelve un algoritmo Dijkstra's, que encuentra siempre el camino más corto, sin embargo, el procesamiento de datos puede resultar muy largo. Por otra parte, si $H(n)$ es siempre una estimación acertada de la distancia a la meta, el algoritmo logra explorar los nodos de manera rápida, aunque sin asegurar la ruta más corta.

En el mundo real, los peatones a pesar de buscar optimizar su ruta e intentar escoger la más corta, muchas veces terminan siendo influenciados por otros aspectos como el movimiento en masa de personas, indicaciones de autoridades, obstáculos en las vías, congestiones, evasión de riesgos. Todo esto, provoca que los peatones no siempre escojan el camino más corto. Por esta razón es que en VALPOEVAC se utiliza la heurística, no tan sólo para optimizar la velocidad del procesamiento, sino más bien para intentar reproducir de la mejor forma lo que ocurre en una evacuación real.

A continuación, se presentan las distintas alternativas de exploración de escenarios, en cuanto a la búsqueda de ruta y diferentes tiempos de procesamiento:

Distancia Euclidiana

Es la distancia “ordinaria” entre dos puntos de un espacio euclídeo, la cual se deduce a partir del teorema de Pitágoras. Para el caso estudiado, como el espacio es bidimensional, la distancia euclidiana entre dos puntos P_i (Inicio) y P_m (Meta), de coordenadas cartesianas, queda determinada por la expresión 3.2:

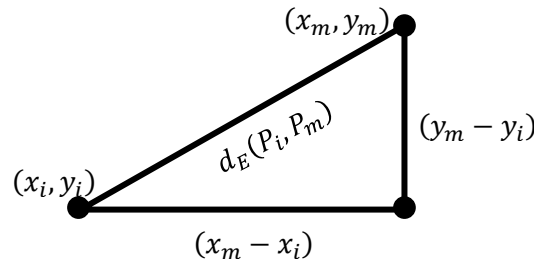


Figura 3-5: Representación bidimensional distancia euclidiana

$$d_E(P_i, P_m) = \sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2} \quad (3.2)$$

Donde:

(x_i, y_i) : Es la coordenada cartesiana de la posición inicial del agente

(x_m, y_m) : Es la coordenada cartesiana del punto de encuentro escogido

Distancia Manhattan

También conocida como la geometría del taxista, esta distancia reemplaza la métrica usual de la geometría euclidiana por una nueva, en que la distancia entre dos puntos es la suma de las diferencias (absolutas) de sus coordenadas. Se le denomina así en base al diseño en cuadrícula de la mayoría de las calles de la isla de Manhattan.

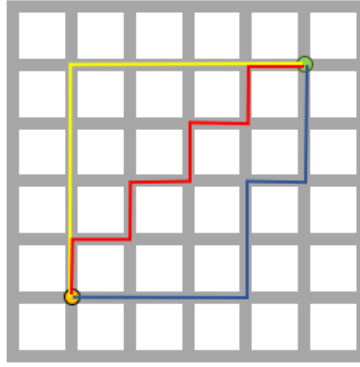


Figura 3-6: Esquema representativo de lo que ocurre con la distancia Manhattan

Como se aprecia en la Figura 3-6, independiente del camino a elegir, la distancia siempre es la misma, 4 espacios a la derecha y 4 espacios hacia arriba, lo que comparado a la distancia euclidiana será siempre un valor mayor, sin embargo, es muy representativo de lo que realmente ocurre con una distribución urbana de calles y pasajes peatonales. Lo anterior en términos matemáticos se expresa de la siguiente forma:

$$d_M(P_i, P_m) = |(x_m - x_i)| + |(y_m - y_i)| \quad (3.3)$$

Donde:

(x_i, y_i) : Es la coordenada cartesiana de la posición inicial del agente

(x_m, y_m) : Es la coordenada cartesiana del punto de encuentro escogido

Distancia Diagonal

La distancia diagonal se produce como una combinación de movimientos rectos y diagonales, los cuales se consideran a través de pesos con un costo determinado.

A continuación, se presentan las ecuaciones asociada a esta distancia:

$$d_{diagonal} = \min (|(x_m - x_i)|, |(y_m - y_i)|) \quad (3.4)$$

$$d_{recta} = d_M(P_i, P_m) = |(x_m - x_i)| + |(y_m - y_i)| \quad (3.5)$$

$$d_D(P_i, P_m) = D_2 * d_{diagonal} + D * (d_{recta} - 2 * d_{diagonal}) \quad (3.6)$$

Donde:

(x_i, y_i) : Es la coordenada cartesiana de la posición inicial del agente

(x_m, y_m) : Es la coordenada cartesiana del punto de encuentro escogido

D_2 : Es el costo de moverse diagonal igual a $\sqrt{2}$

D : Es el costo de moverse en línea recta 1

Tie Breakers (Desempates)

Los Tie Breakers son un empuje en el escalamiento de H, lo que ayuda en la optimización del modelo. En este caso es conveniente escalar hacia arriba el valor de H, pues así la expansión de nodos se produce cercana al objetivo y no al punto de origen, es decir, se reduce el número de nodos a explorar.

Para realizar el escalamiento de la distancia se utiliza la siguiente expresión:

$$he = 1 + p \quad (3.7)$$

$$p < \frac{\text{Costo mínimo de dar un paso}}{\text{Máximo de pasos esperados}} \quad (3.8)$$

En este caso se utilizaron los valores del ancho y alto del espacio en NetLogo para el cálculo de la distancia euclidiana máxima. Asumiendo que el costo de dar un paso es igual a 1, y el máximo de pasos según el espacio es cercano a 1000, finalmente el valor para escalar las distancias resulta ser igual a 1,001.

El modelo en sí considera 5 heurísticas diferentes en base a la utilización de las distancias antes mencionadas con y sin desempates, sin embargo, para efectos prácticos de procesamiento se utilizó sólo la distancia euclidiana escalada con “Tie Breaker” para optimizar la búsqueda de las rutas de evacuación y disminuir el tiempo de simulación.

- ***Etapa 3 (Seguimiento de Ruta):*** Luego de que el agente seleccione su punto de encuentro (Etapa 1) y genere su ruta de evacuación (Etapa 2), comienza un proceso de seguimiento de ruta, en el cual el agente se mueve a través del espacio utilizando como guía los elementos de una lista que contiene todos los nodos que forman el camino hasta alcanzar la zona de seguridad. Esto lo hace a través de distintos comandos e indicaciones primitivas de NetLogo junto con una serie de modificaciones de la velocidad, que serán descritas más adelante en esta sección.

A pesar de que el modelo busca simular lo más cercano a la realidad, es imposible incluir todas las aristas y factores que afectan a los agentes, debido a que el procesamiento de datos sería demasiado largo y lo haría poco eficiente, además del hecho que la mayoría son parámetros demasiado arbitrarios.

Por esta razón es que VALPOEVAC considera dos ajustes de velocidad en base a la velocidad inicial indicada más adelante en la sección “3.3.3: Velocidad Inicial”, un ajuste debido a la densidad peatonal (congestión de agentes) y otro debido a la pendiente del terreno. Además, se considera un parámetro de caminata random, asociado a la incertidumbre al andar.

Es importante tener en consideración que los agentes no necesariamente “saltan” de un cuadro de la grilla a otro estrictamente al centro (nodo) de este (coordenadas enteras), sino más bien puede pisar los bordes o en cualquier lugar dentro del cuadro (coordenadas reales).

Ajuste de velocidad por Densidad Peonatal

Al momento de iniciar su evacuación, cada agente evaluará las condiciones de su entorno en cada instante de tiempo. En el caso de NetLogo el tiempo se representa por un “tick” de procesamiento, que finalmente equivale a 1 segundo de modelación en la vida real.

Las velocidades posteriormente descritas en la sección “3.3.3: Velocidad Inicial” corresponden a velocidades en flujos libres, es decir, donde no se produzca congestión ni embotellamiento. En una condición de evacuación por tsunami esto es imposible, pues con densidades superiores a 0,5 [Personas/m²], la velocidad de caminata de los peatones decrece y con densidades sobre las 5 [Personas/m²], los peatones difícilmente se pueden mover.

La relación entre velocidad de caminata y densidad de peatones se describe a través del “Kladek”, fórmula desarrollada por Weidmann en 1993 para flujos unidireccionales, según indica el reporte de Buchmueller y Weidmann (Buchmueller & Weidmann, 2006), la cual se muestra a continuación:

$$v(k) = V_{agente} * \left[1 - e^{-1,913 * \left[\frac{1}{k} - \frac{1}{k_m} \right]} \right] [m/s] \quad (3.9)$$

Donde:

- $v(k)$: Es la velocidad de caminata según densidad en [m/s]
 V_{agente} : Es la velocidad de caminata de cada agente en flujo libre en [m/s]
 k : Es la densidad de peatones en cada instante de tiempo
 k_m : Es la densidad máxima considerada igual a 5,4 [P/m²]

Es importante destacar que en caso de densidades superiores a 5,4 [P/m²] el modelo considera un factor de reducción de 0,01 y no así la detención total, pues a pesar de las dificultades de avanzar, es muy difícil que los peatones se detengan completamente durante un proceso de evacuación, a no ser que influyan factores externos como bloqueos por derrumbe o incapacidad física debido a accidentes.

El método para calcular la densidad peatonal consiste en determinar la cantidad de peatones vecinos que se encuentran evacuando en un determinado instante de tiempo. Los “peatones vecinos” son definidos como aquellos que se encuentran ubicados a una distancia menor a 3¹² metros respecto del agente que realiza la evaluación. Luego la densidad k de peatones se obtiene de la siguiente relación:

$$k = N_v / (\pi * d^2) \quad [Personas/m^2] \quad (3.10)$$

Donde:

- d : Es el diámetro de la circunferencia igual a 3 metros (escalado a NetLogo)
 N_v : Es la cantidad de peatones dentro de la circunferencia cuyo tiempo de partida (td) es menor al td del agente que evalúa la densidad (td calculado como se indica en la sección “3.3.2: Tiempo de Partida”).

Si se observa la Figura 3-7, los agentes vecinos son 15, sin embargo, sólo 7 de ellos cumplen con la condición del tiempo de partida, por lo tanto, la densidad se obtiene en base a un N_v igual a 7.

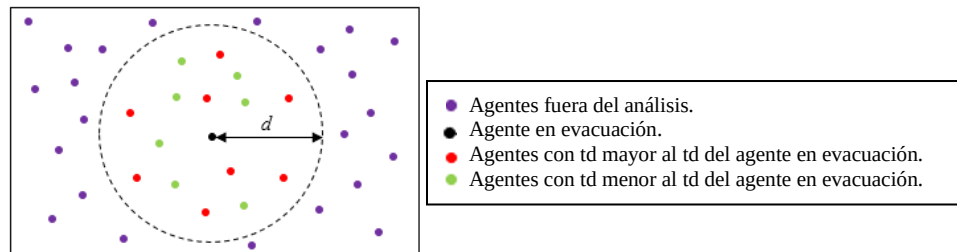


Figura 3-7: Representación gráfica de cómo el agente evalúa la condición de densidad en cada instante de tiempo.

¹² Se definió una distancia de 3 metros pues se considera un radio razonable para que el agente pueda verse afectado por la congestión en su entorno cercano.

Ajuste de Velocidad por Pendiente del Terreno

El efecto de la pendiente en las rutas de evacuación es un factor que influencia considerablemente a la velocidad de los agentes que evacúan, debido a que las zonas inclinadas dificultan o retardan el proceso de caminata lo que conduce a mayores tiempos de llegada a zonas seguras.

Valparaíso al ser una ciudad compuesta por muchos cerros, tiene una configuración espacial que permite que sus calles a medida que se alejan del mar tiendan a aumentar su elevación, provocando rutas inclinadas, sobre todo al acercarse a los puntos de encuentro, que básicamente se encuentran en los cerros que circundan el plan de la ciudad, en este caso el sector del Almendral.

El modelo propuesto considera esta condición con ayuda del archivo tipo ráster de topobatimetría que será mencionado posteriormente en la sección “3.1.2.3.1: Base de Datos Espaciales”, el cual permite asignar a cada parcela un valor de elevación con el cual posteriormente es posible determinar la inclinación que el agente debe sortear para continuar con su evacuación.

Para evaluar este factor, se ha utilizado una función de escalada exponencial que sirve para representar la reducción de la velocidad cuando la pendiente del terreno aumenta. En el Gráfico 3-1 (a) se muestra la función de escalada formulada por Waldo Tobler (Tobler, 1993), estimada a partir de datos experimentales. La curva se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$v = 6 * e^{(-3,5 * |\frac{dh}{dx} + 0,05|)} \quad [km/hr] \quad (3.11)$$

Donde:

v : Corresponde a la velocidad de caminata según la inclinación del terreno en grados, asumiendo una velocidad máxima de 6 [km/hr].

$\frac{dh}{dx}$: Corresponde a la pendiente del terreno obtenida de la división de la diferencia de altura sobre la distancia en planta recorrida, es decir, es la tangente del ángulo θ mostrado en el Gráfico 3-1.

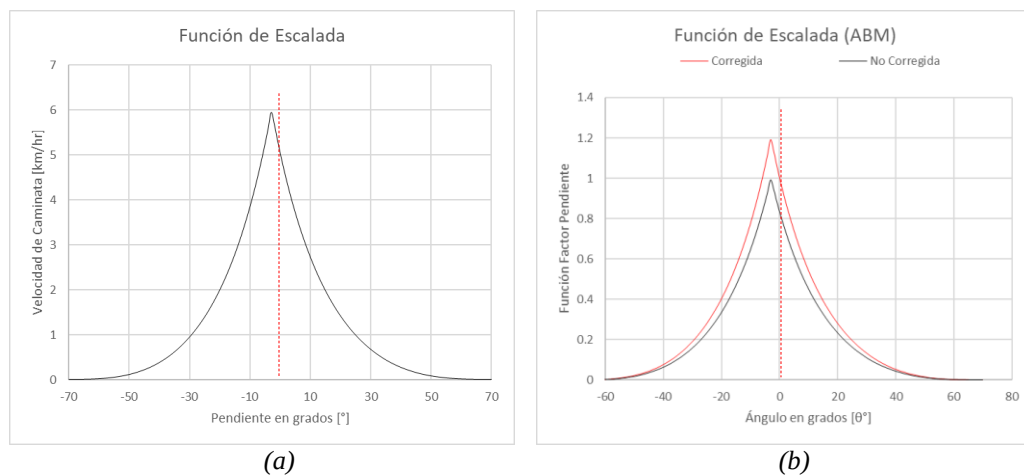


Gráfico 3-1: (a) Función de escalada original (Tobler, 1993), y en (b) Función de escalada adimensional utilizada en el modelo basado en agentes para la evaluación de la pendiente.

Como se observa en el Gráfico 3-1 (a), la función de escalada derivada por Tobler (Tobler, 1993) es asimétrica respecto a una pendiente de cero grados de inclinación, esto es debido a que una persona típicamente camina más rápido en una pendiente ligeramente inclinada que en un terreno completamente plano. En este caso, la máxima velocidad se obtiene con una pendiente negativa de unos 3 grados y para pendientes nulas, sólo es posible obtener velocidades de caminata de unos 5 [km/hr], es decir, cerca del 83% de la velocidad máxima.

Por otra parte, en el Gráfico 3-1 (b) se muestra una curva negra que corresponde a una modificación realizada por Cyril Mokrani a la función original de Tobler, permitiendo dejar la curva sin dimensiones, pues el modelo utiliza esta función como un coeficiente que pondera la máxima velocidad de cada agente, con resultados que corresponden a valores adimensionales entre el rango de 0 y 1,2.

En este mismo gráfico también se aprecia una curva roja, la que se usará finalmente en el modelo propuesto en NetLogo, y está corregida pues se considera que sobre terrenos planos el agente es capaz de mantener su velocidad sin ser influenciado por la pendiente, así mismo como lo planteó Cyril Mokrani en el modelo de Stoc-Agent modificado en el marco del proyecto Fondecyt 11170024. En este ámbito, con pendientes negativas pequeñas el agente logrará aumentar su velocidad en 1,2 veces como máximo y luego para valores mayores de pendiente (negativos o positivos), la velocidad del agente se verá reducida y tenderá hacia un valor nulo.

Considerando que NetLogo trabaja como un modelo en 2 dimensiones, fue necesario definir un método para obtener la pendiente en la dirección de evacuación del agente. Para ello, a cada parcela se le asignó un valor de cota de terreno (Z_b) obtenido del Modelo de Elevación Digital (DEM, en inglés), mismo archivo utilizado en la simulación del tsunami. A través de comandos de programación se encuentra la diferencia de alturas y distancia entre una parcela y otra, así es posible determinar la pendiente del terreno en cada instante de tiempo para finalmente obtener el factor que modificará la velocidad del agente, con la siguiente expresión corregida:

$$F_v = 1,2 * \exp \left(-3,5 * \left| \frac{dh}{dx} + 0,05 \right| \right) [km/hr] \quad (3.12)$$

En la siguiente figura se ejemplifica lo anteriormente descrito, asumiendo que el agente avanza del nodo 1 al 2:

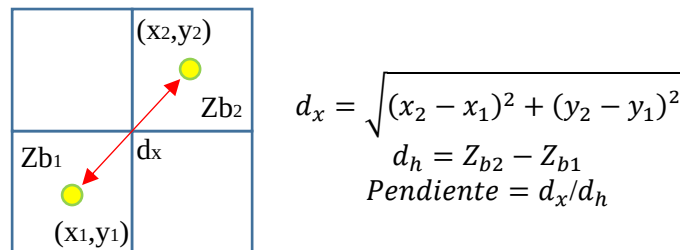


Figura 3-8: Cálculo de la pendiente del terreno, incorporado al modelo desarrollado en NetLogo

Caminata Aleatoria

El parámetro de caminata aleatoria es muy útil para el modelo de evacuación pues introduce una fluctuación aleatoria en la dirección de la evacuación del agente. Esto permite una situación más realista considerando que logra en cierta forma, representar la incertidumbre de los peatones al intentar seguir sus caminos hacia las zonas de seguridad, pues incluso si la ruta de evacuación es bien conocida, puede ser difícil o casi imposible seguirla sin desvíos (debido a la congestión en las calles, pérdida de parientes cercanos, presencia de escombros, etc).

A través de primitivas de NetLogo, el modelo logra representar esta situación introduciendo una fluctuación de 10° en la orientación del agente antes de avanzar, permitiendo una caminata menos limpia, lo que en algunos casos puede incluso aumentar los tiempos de llegada de los agentes.

3.1.2.3. Datos de Entrada

Los datos de entradas son aquellos cuya información es el requerimiento mínimo para que la simulación funcione correctamente. En este modelo hay 3 bases de datos de entrada importantes a considerar: Espaciales, De Agentes y Tsunami.

3.1.2.3.1. Base de Datos Espaciales

Para realizar una simulación de la evacuación frente a un tsunami, es necesario en primera instancia cargar el espacio en el cual se desarrollará. Para ello VALPOEVAC utiliza Sistemas de Información Geográfica (GIS, en inglés) que conforman el espacio intentando representar la realidad de la mejor manera posible.

Como se dijo anteriormente, la plataforma de simulación es NetLogo y corresponde a un ambiente de modelamiento programable para simular fenómenos tanto naturales como sociales. Como parte de las capacidades de este programa, existe la posibilidad de procesar información a través de extensiones, dentro de las cuales se encuentra la “Extensión GIS”¹³.

Con la extensión GIS es posible procesar dos tipos de datos: Datos Vectoriales y Datos Ráster. Los primeros, proporcionan una forma de representar las características del mundo real dentro del entorno GIS, es decir, cualquier cosa relacionada al paisaje.

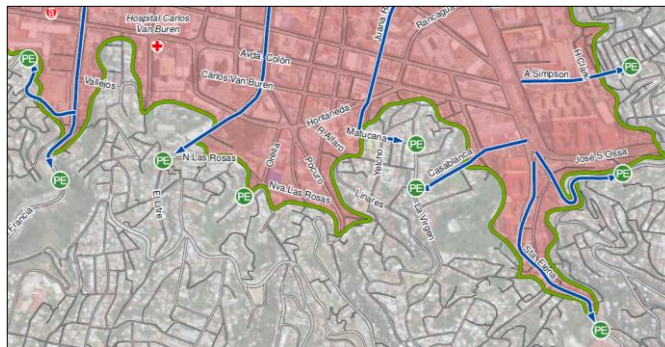
Para ello se crean distintos archivos de forma (o shapefiles) en formato “.shp”, conformados por puntos, líneas o polígonos que definen el entorno, considerando características y atributos particulares de ser necesario. Por otra parte, los datos tipo ráster permiten el procesamiento de imágenes en formato de texto “.asc”, permitiendo transmitir la información al modelo.

A través de estos archivos, el tiempo de preparación de la simulación se reduce al mínimo y es posible además darle al modelo mayor universalidad, pues muchas personas trabajan con este tipo de información de georreferenciada. Los datos GIS requeridos para este modelo en particular se describen a continuación:

- *Tierra.shp*: Corresponde al espacio donde se posicionan los elementos urbanos y en algunos casos los agentes al inicio de la simulación. Es un archivo de polígonos.

¹³ Para más información ver <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/gis.html>

-
-
- Página | 27



- *P_Puerto.shp*: Los puntos de puerto se utilizan para la evacuación de los agentes que se encuentran en la zona del puerto. Con ayuda de estos puntos referenciales, los agentes pueden evaluar sus posibilidades de evacuación de mejor forma, disminuyendo en lo posible las víctimas al término de la simulación.
- *batimetría.asc*: En este caso el archivo que se carga al modelo es de tipo ráster y es el DEM, que contiene la elevación del terreno. Con esto es posible asignarle una pendiente a la ruta, lo que dificulta y aumenta los tiempos de la evacuación.

Se recomienda que todos los datos ingresados estén proyectados en el mismo formato de proyección (en este caso Datum WGS84 Zona 19S). A continuación, en la Figura 3-10, se muestra una representación de los inputs en la plataforma ArcGis:



Figura 3-10: Representación de archivos (.shp) en la plataforma ArcGis.

3.1.2.3.2. Base de Datos de Agentes

Para que el modelo funcione correctamente es necesario ingresar en él una base de datos de agentes adecuada de modo que, al realizar la simulación, los resultados obtenidos sean representativos de lo que podría ocurrir realmente. Antes de inicializar VALPOEVAC, es necesario definir aspectos como cantidad de agentes a modelar y porcentaje de agentes según rango etario, luego al inicializar, los agentes son creados arbitrariamente con características como posición inicial aleatoria, en cualquier lugar dentro de las zonas blancas destinadas a calles como se indica en la Figura 3-10 y velocidad inicial aleatoria en base a una estimación que depende de la edad de los agentes y el porcentaje de agentes por rango etario. A demás, se les asigna arbitrariamente un tiempo de partida, que indica el momento exacto de la simulación en que cada agente debe comenzar su evacuación. Todo esto, se explicará más adelante en la sección “3.3: Configuración de las simulaciones”, puesto que aplica para ambos modelos. Es importante destacar que el modelo en NetLogo permite la utilización de los mismos agentes modelados en Stoc-Agent, los cuales son cargados al programa a través de un archivo .shp que incluye los parámetros aleatorios antes mencionados.

Otro aspecto que se define al momento de inicializar VALPOEVAC, es el punto de encuentro que utilizará cada agente como destino final de su evacuación, según se indica a continuación:

Selección de punto de encuentro como destino final

El modelo identifica en el sector de análisis los 21 puntos de encuentro establecidos por la ONEMI como destinos para realizar la evacuación, sin embargo, es fácil pensar que al momento de evacuar las personas no siempre se dirijan a un punto de encuentro, pues es probable que vayan a zonas cercanas en altura, zonas intermedias o cualquier lugar en que sientan seguridad según su percepción del riesgo. Por otra parte, se ha reportado que en algunos casos las personas no evacúan inmediatamente a una zona de seguridad, sino que se dirigen a sus casas o a colegios en búsqueda de sus hijos, independiente a que estén en lugares con riesgo de inundación (Mas S., 2012). Además, luego de un gran terremoto, es posible que muchas de las rutas de evacuación se encuentren bloqueadas por escombros, o que, debido al pánico, la gente no logre dar con sus rutas preestablecidas o conocidas, y se dirijan donde vaya la mayor cantidad de evacuados, a pesar de esto, el modelo no considera destinos intermedios.

En base a lo anterior, para simplificar el aspecto de búsqueda de ruta, VALPOEVAC considera como objetivo final de la evacuación, el punto de encuentro más cercano respecto de la posición inicial del agente¹⁴, salvo para agentes con posición inicial en la zona de puerto. La zona de puerto o zona costera (mostrada en amarillo en la Figura 3-11), se encuentra prácticamente privada de acceso para la mayor parte de la población, salvo en sectores de muelle y paseos costeros. Sin embargo, una gran cantidad de personas trabajan diariamente en estas dependencias, y las distancias para evacuar a una zona segura aumentan debido a que no existe un acceso directo a las rutas de evacuación conocidas. El modelo intenta simular lo que ocurriría con la evacuación de las personas que se encuentran en dicha zona, pues en este caso, no importa el punto de encuentro más cercano respecto de la posición inicial, sino más bien, importa el punto de encuentro más cercano a alguna de las salidas establecidas de la zona de puerto.



Figura 3-11: Ejemplificación de lo que sucede con los agentes que se encuentran en la zona de puerto

Según la representación esquemática mostrada en la Figura 3-11, si el agente buscara el PE más cercano respecto a su posición inicial, la Ruta 1 sería la indicada para llegar al PE1 rápidamente, no obstante, para salir del sector amarillo, el agente debe dirigirse obligadamente a la estrella roja marcada en la imagen.

Desde este punto, si se considera el PE1, la ruta de evacuación sería muy larga, razón por la cual el agente debe buscar en este punto (estrella), el PE más cercano, que resulta ser PE2. Finalmente, la Ruta 2 se convierte en el tramo de menor distancia entre el agente y su zona de seguridad.

La primera versión del modelo no consideraba este aspecto, y al revisar los resultados fue posible notar que muchos agentes realizaban evacuaciones casi paralelas al mar, ya que se movían en búsqueda del punto de encuentro más cercano a ellos respecto de su posición inicial, resultando en un mayor número de víctimas que se podrían haber evitado.

Por esta razón y luego de modificaciones realizadas en el modelo, se decidió replantear la búsqueda de PE de los agentes, dependiendo de su posición inicial, incluyendo así el análisis de esta situación de la mejor manera posible.

¹⁴ Si se desea, el programa también permite una búsqueda aleatoria del punto de encuentro y no el más cercano.

3.1.2.3.3. Base de Datos de Tsunami

Los tsunamis son eventos naturales de alto impacto y potencial larga duración, que se manifiestan en la costa como una gran masa de agua que en muchos casos puede inundar y causar destrucción en las zonas costeras, incluso arribando con apenas unos minutos de ocurrido el fenómeno que los genera, pudiendo ser un sismo que ocurre bajo o cerca del fondo oceánico, remoción en masa, derrumbe submarino y/o erupción volcánica (ONEMI, 2018).

Si se logran dar las condiciones óptimas, el tiempo que tarda un tsunami en arribar a la costa puede estar entre los 15 a 20 minutos e incluso se ha estudiado que, en algunos casos, y dependiendo de qué tan cerca de la costa esté el mecanismo de generación, las olas pueden tardar hasta menos de 12 minutos en llegar (Aránguiz et. al., 2016).

Lo anterior es muy preocupante, pues luego del terremoto el tsunami puede ser un evento casi inmediato, dejando a la población con pocas probabilidades de supervivencia.

Para lograr mitigar los daños materiales y pérdidas de vidas durante un evento de este tipo, es necesario conocer los niveles máximos de inundación que provoca. Para ello, se han creado mapas de inundación, que muestran la vulnerabilidad de una zona a inundarse frente a un evento tsunamigénico. Estos mapas se desarrollan en base a la experiencia y escenarios hipotéticos, a través del uso de modelos numéricos que logran calcular con precisión la propagación del tsunami desde su fuente de emisión hasta las zonas costeras de interés y el subsecuente run-up, altura e intrusión del tsunami, para producir estimaciones de inundación realistas y de confianza.

La Figura 3-12 muestra un esquema de los principales parámetros que influyen en una inundación por tsunami.

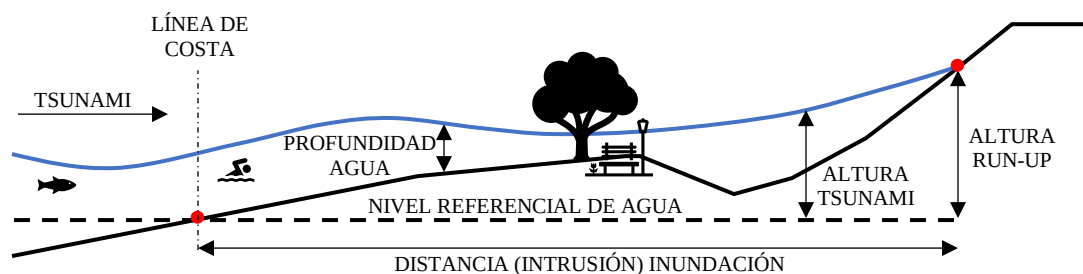


Figura 3-12: Parámetros típicos que influyen en un modelo de inundación

Para modelar el tsunami, se utilizó el evento histórico de 1730 producido en las costas de Valparaíso, cuya magnitud estimada es entre los Mw 9,1 y 9,3 (Carvajal et. al., 2017). Se utiliza este evento en particular por dos razones principales: La primera de ellas es que los estudios realizados en base a su magnitud lo posicionan como el segundo terremoto más grande luego de Valdivia 1960. La segunda razón es que en la conmemoración del desastre que afectó a la Región de Valparaíso hace 289 años, investigadores de la UTFSM, junto a la PUCV y CIGIDEN, demostraron que un evento de similares proporciones puede ocurrir en un futuro cercano, lo que lo vuelve un fenómeno interesante de analizar.

Para la simulación de la inundación por tsunami se utilizó el modelo numérico “Tsunami-HySEA” (Hyperbolic Systems and Efficient Algorithms), específicamente designado para simulaciones de tsunami. El código desarrollado por el Grupo EDANYA de la Universidad de Málaga, combina robustez, fiabilidad y una buena precisión en un modelo que está implementado para ser integrado utilizando GPUs y así poder realizar simulaciones en tiempos muy por debajo del tiempo real (Faster Than Real Time, FTTR).

El modelo implementa en un mismo código las tres fases que componen la simulación de un tsunami generado por un terremoto submarino: 1) generación a partir de la fuente sísmica, 2) propagación e 3) inundación de la zona costera (Castro et. al., 2015).

Tsunami-HySEA trabaja en base a un “2D non linear one-layer Shallow Water System (SWS)”, que es un sistema de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas/parabólicas que gobiernan el flujo superficial o de poca profundidad. En general los modelos numéricos basados en SWS son muy eficientes al simular tsunamis transoceánicos, debido al uso de esquemas numéricos explícitos y la no necesidad de resolver derivadas de alto orden asociadas a la no linealidad y frecuencia de dispersión.

La característica principal de los SWS es que la dimensión vertical es mucho más pequeña que la escala típica horizontal (como ocurre en un tsunami al llegar a la costa en la mayoría de los casos). Además, el sistema de ecuaciones deriva de las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el movimiento de los fluidos, las que a su vez derivan de las ecuaciones de conservación de masa y momentum (Dawson & Mirabito, 2008).

Para lograr una representación lo más realista posible, se utilizó la batimetría del sector analizado, que se obtuvo de una recopilación de datos a través de: Cartografía de Valparaíso, planos de borde costero y cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), información de satélites avanzados de observación de la tierra (ALOS) de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) y la carta de batimetría general de los océanos (GEBCO). Finalmente, luego del procesamiento el programa arroja entre sus resultados, archivos tipo ráster los cuales entregan el nivel de la inundación cada 10 segundos. Se completó una simulación de 3600 segundos (1 hora), es decir, 360 archivos de inundación, los cuales son leídos por NetLogo. La simulación de la inundación fue realizada por Alejandra Gubler en el marco del desarrollo de esta memoria.

Para el modelo de propagación e inundación se utilizaron 4 grillas anidadas, con los siguientes espaciamientos: 30, 7,5, 1,87 y 0,23 segundos de arcos (aproximadamente 900, 230, 57 y 7 metros), como se muestra en la Figura 3-13. Para el terremoto se utilizó el modelo seleccionado de Carvajal et. al. (2017), y se utilizó el modelo de Okada (1985) para la estimación de la deformación del fondo marino, la que se asumió idéntica a la de la superficie libre de mar.

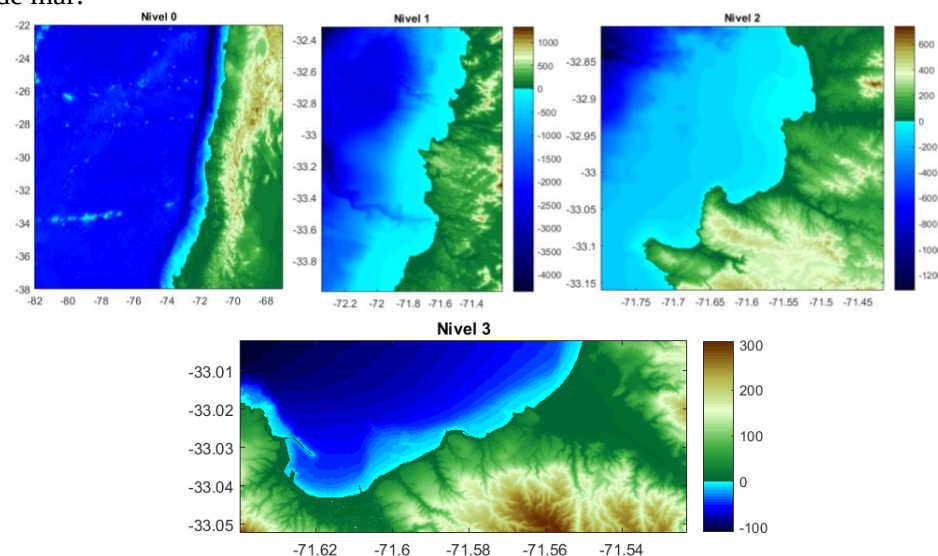


Figura 3-13: Grillas Batimétricas

Es importante destacar que el tsunami no sirve para inicializar el modelo (como lo hacen los datos espaciales y de agentes), sin embargo, al momento de comenzar a ejecutar la simulación, el modelo lee los archivos cada 10 segundos, permitiendo la caracterización de la inundación en la interfaz del modelo, pues toma los valores de la profundidad de inundación y los traspasa a las parcelas utilizadas en la representación del entorno, así es posible indicar si un agente puede continuar con su evacuación o ya ha sido víctima del tsunami.

3.1.2.4. Estimación de Víctimas

Diversos estudios se han realizado con relación al análisis de la estabilidad de las personas frente a flujos de agua. Algunos de estos se han desarrollado para estimar la peligrosidad de la escorrentía pluvial en las zonas urbanas, pues en una tormenta grande es muy probable que el drenaje urbano no sea capaz de evacuar toda el agua, permitiendo que esta quede en la superficie y dificulte el tránsito de las personas, sobre todo al momento de cruzar las calles o intersecciones. En este aspecto Nanía (Nanía-Escobar, 2006) realiza un estudio en el cual analiza la estabilidad de las personas de forma numérica y experimental.

Uno de los criterios utilizados por él es el Criterio de Mendoza, que indica que el calado máximo admisible de una calle se considera en 30 [cm], limitando la profundidad máxima de agua. Con esto es posible concluir que con una velocidad apropiada de flujo y altura de 30 [cm] una persona perfectamente puede perder la estabilidad por completo.

También se han realizado otros estudios en materias similares, dentro de ellas algunos con relación al tema de estimación de víctimas debido a un tsunami. Mas S. (2012) en su tesis de doctorado considera los resultados experimentales de Takahashi et. Al. (1992) para la obtención de víctimas, pues así logra caracterizar la estabilidad humana bajo fuerzas hidrodinámicas. De esta forma, considerando la velocidad del flujo y la profundidad de agua del tsunami, es posible determinar la condición de los agentes en determinados rangos de estos valores.

Como ya se ha dicho, tanto la velocidad como el flujo del agua son parámetros muy importantes a la hora de llegada de un tsunami, por la fuerza y la profundidad con la que el agua ingresa a la costa, lo que sumado a la rapidez con que lo hace, puede transformarse en un escenario catastrófico en zonas con grandes concentraciones de habitantes.

En VALPOEVAC no se considera el aspecto de la velocidad del flujo, por lo tanto, la estimación de víctimas está asociada directamente a la profundidad del flujo en cada instante de tiempo. Como se explicará en la siguiente sección, se definen 5 estados finales del agente y para evaluar cuando éste es víctima del tsunami, se considera una profundidad de agua superior a 10 [cm]. Este valor fue considerado pues, si bien la profundidad es aún muy baja y posiblemente no desestabilice en su totalidad al peatón, es fácil pensar que si el agua entra en contacto con él, es muy probable que signifique que pronto habrán problemas, considerando la velocidad con la que irrumpe el tsunami, por lo tanto lo que busca el modelo es analizar el peor escenario, pues en una situación real muchas cosas pueden suceder y considerar una baja altura de agua es más conservador para la estimación de fatalidades.

3.1.2.5. Datos de Salida

Con el modelo VALPOEVAC es posible obtener varios resultados simultáneamente, los que en algunos casos incluso se pueden observar a medida que la simulación está siendo procesada. Para analizar la situación final de cada agente se consideran 5 estados distintos:

- Estado (1): Agentes vivos y secos en la ciudad: Aquellos agentes que se encuentran vivos en cualquier zona de la ruta de evacuación que no haya alcanzado el agua, al momento de finalizar la simulación.
- Estado (2): Agentes vivos y mojados en la ciudad: Aquellos agentes que se encuentran vivos en cualquier zona de la ruta de evacuación que haya alcanzado el agua con una profundidad menor a 10[cm], al momento de finalizar la simulación.
- Estado (3): Agentes víctimas conscientes de la amenaza de tsunami: Aquellos agentes que son alcanzados por el agua con una profundidad mayor a 10 [cm] y mueren, en cualquier momento de la simulación y en cualquier zona de la ruta de evacuación.
- Estado (4): Agentes a salvo en el punto de encuentro: Aquellos agentes que logran llegar a su objetivo de evacuación (punto de encuentro), en cualquier momento de la simulación.
- Estado (5): Agentes víctimas no conscientes de la amenaza de tsunami: Aquellos agentes que son alcanzados por el agua con una profundidad mayor a 10 [cm] y mueren, en cualquier momento de la simulación y en cualquier zona de la ruta de evacuación, sin que haya iniciado su evacuación, es decir, agentes que posean un tiempo de inicio t_d mayor al tiempo de la simulación en que son alcanzados por el tsunami.

Uno de los datos de salida del modelo es arrojar la cantidad de agentes en cada estado al finalizar la simulación, los que debiesen sumar la totalidad de agentes modelados. Por otra parte, en la interfaz gráfica del modelo también se pueden apreciar como datos de salida las curvas del proceso de decisión de evacuación de toda la población (evacuados v/s tiempo), curvas de porcentaje de la población que ha alcanzado un punto de encuentro (porcentaje de evacuados en Estado (4) v/s tiempo), curvas de porcentaje de la población que ha sido víctima del tsunami en su proceso de evacuación (porcentaje de evacuados en Estado (3) v/s tiempo), curvas de porcentaje de la población que ha sido víctima del tsunami sin ser conscientes de su llegada (porcentaje de evacuados en estado (5) v/s tiempo) y curvas que indican los tiempos de partida (t_d) de los agentes según los tiempos medios (μ) de la simulación y la distribución de Rayleigh, como se explica más adelante en la sección “3.3.2: Tiempo de Partida”. Además, es posible obtener los tiempos que tarda el modelo en cargar la información espacial y de los agentes, por un visor de salida en la misma interfaz gráfica.

Todo lo anterior se guarda en una carpeta llamada “Salidas” la cual inicialmente estará vacía y al finalizar la simulación contendrá archivos en formato texto y planillas de Excel, que resumen las gráficas y resultados que se muestran en la interfaz gráfica, los cuales se graban en cada paso o “ticks” en NetLogo. Adicional a eso, y si la opción de video está activada, también se guarda un archivo de video de la simulación a tiempo acelerado, que muestra el proceso de la evacuación en su totalidad, lo que permite una mayor comprensión de lo que ocurre en el procesamiento de datos.

3.1.2.6. Parámetros por Defecto del Modelo

El modelo considera algunos valores que se definirán como constantes, los cuales deberán tenerse en consideración al momento de simular, pues fueron definidos en base al criterio del autor y a algunas consideraciones del modelo de Erick Mas (Mas S., 2012). Pese a esto, los valores pueden ser modificados por el usuario del modelo en caso de ser necesario.

- El análisis de evacuación realizado en Valparaíso involucra una superficie de aproximadamente 16,84 [km²], correspondiente a un rectángulo de 4080x4128 [m]. Considerando que el mundo de NetLogo se conforma por parcelas cuadradas y debido a las dimensiones del área analizada, es necesario realizar un escalamiento para que los archivos cargados puedan ser correctamente visualizados en la interfaz gráfica y aspectos como distancias y velocidades, puedan ser considerados correctamente.

La escala de conversión se fija en 6, en base a que los archivos raster cargados tienen una resolución de celdas de 6x6 [m], lo anterior deja una superficie en NetLogo de 680x688. Por otra parte, el tamaño de las parcelas de NetLogo se mide en pixeles, por lo tanto, para obtener una imagen de un tamaño adecuado para la interfaz gráfica propuesta por el autor, se fija un tamaño de celda de 1,2 pixeles. Lo anterior en otras palabras significa que un metro en NetLogo de 1,2 pixeles, equivale a 6 metros en la vida real.

- Como se mencionó en la sección 3.1.2.2 “Configuración y Procesamiento de Datos”, existen distintas formas de calcular la distancia entre dos puntos, sin embargo, debido a los objetivos de la memoria, se optó por fijar la distancia euclidiana para calcular la longitud entre un agente y el punto de encuentro más cercano, esto para lograr resultados comparables entre modelos y al mismo tiempo, optimizar el procesamiento de datos.
- Para la estimación de densidad peatonal, se considera un radio de 3 metros alrededor del agente.

Para el efecto de la caminata random, se considera una fluctuación de 10°, en los cuales el agente puede modificar su orientación 5° a la derecha o 5° a la izquierda de su orientación original.

- La estimación de víctimas considera una fatalidad cuando el agua ha alcanzado al agente con una profundidad mayor o igual a 10 [cm], qué si bien es baja, se fija como un valor conservador considerando que en una eventualidad del tipo tsunami, se estima que el contacto con el agua es un indicador para creer que el agente se encuentra en problemas, por lo que las simulaciones buscan analizar el peor escenario en este aspecto.

3.1.2.7. Limitaciones del Modelo

VALPOEVAC intenta simular de la mejor forma el comportamiento de la población en la ciudad de Valparaíso a la hora de realizar una evacuación debido a un tsunami, sin embargo, muchos tópicos y consideraciones fueron dejadas de lado debido a la complejidad de procesamiento y estudio. Las personas son seres de naturaleza muy compleja, por lo que resulta casi imposible reproducir una situación real a través de procesamientos computacionales. A continuación, se nombran las principales limitaciones del modelo:

- ✓ El modelo sólo considera la evacuación peatonal, es decir, aquellos agentes que se mueven caminando (o a través de medios de discapacidad como sillas de rueda, si es el caso), sin embargo, no incluye un análisis de la población que evacúa a través de automóviles, motocicletas o cualquier vehículo motorizado.
- ✓ Para la estimación de víctimas el modelo no incluye la consideración de la velocidad del flujo, aspecto que es importante, pero que debido a la baja profundidad que condiciona los resultados finales de víctimas (10 [cm]), no afecta en mayor grado. Por lo anterior, es importante analizar los resultados teniendo esto en consideración.

- ✓ Las personas poseen cierto volumen que les impide pasar por todos los lugares disponibles en las rutas, el modelo no considera esto pues al caminar, los agentes no realizan un proceso de adelantamiento o algo por el estilo, ni tampoco hay un límite máximo de agentes en un espacio, sólo la condición de densidad poblacional que simula en parte la congestión en una zona colapsada de gente.
- ✓ Los tiempos de partida están condicionados a curvas de partida desarrolladas en base a experiencia y estudios previos, sin embargo, a pesar de que se puede evaluar diferentes comportamientos posibles de la población, no logran caracterizar los factores individuales que gatillan el inicio de la evacuación. Por esta razón, el modelo no mostrará qué factores contribuyen en la decisión de evacuación individual de cada agente, sino más bien, servirá para analizar las consecuencias de los diferentes comportamientos iniciales a la hora de evacuar.
- ✓ El tsunami considerado en la base de datos es sólo uno, y corresponde a uno de los peores escenarios estudiados a lo largo del tiempo (tsunami de 1730), que, si bien no tiene un respaldo instrumental, existen simulaciones de inundación que logran alertar a los investigadores de los posibles efectos que podría tener en una ciudad muy poblada como lo es Valparaíso, sobre todo en el sector de estudio.
- ✓ El modelo no considera situaciones o destinos intermedios, como puede ser el caso que ocurre cuando las personas no llegan al punto de encuentro como tal, pues ya se sienten seguras en zonas de menor altura o bien desconocen la ubicación exacta de las zonas seguras. Tampoco analiza el caso en que la alerta de evacuación fuera cancelada.
- ✓ El modelo analiza las rutas de evacuación como una vía libre y sin obstáculos, sin permitir que el agente cambie su ruta de evacuación en medio del proceso, sin embargo, esto escapa de la realidad pues en un principio, la existencia de aceras, calles, postes, autos y otro tipo de microvulnerabilidades, afectan considerablemente la congestión y la velocidad de los peatones, provocando que estos tiendan a seleccionar rutas más despejadas. Además, una emergencia de tsunami generalmente viene luego de un terremoto de grandes proporciones, lo que implica que es muy probable que muchas de las rutas de evacuación conocidas se encuentren bloqueadas por escombros u otro tipo de elementos.
- ✓ En una situación real existen muchas rutas de evacuación que pueden ser seguidas en distintas direcciones. El modelo considera básicamente la dirección que permite que el agente se aleje del mar y se acerque en lo posible a las zonas de seguridad. Así, comportamientos irracionales como evacuar hacia la zona de riesgo de inundación no son modelados. Pese a ser irracional, no es extraño que esto suceda, pues muchas veces los peatones realizan paradas intermedias por ejemplo para recoger a sus hijos en las escuelas, pasar por algo importante en sus casas, entre otras cosas, aspectos que podrían terminar en un mayor aumento de víctimas, por lo que podría ser modelado en un futuro.
- ✓ Uno de los mayores problemas con modelo es el tiempo que tarda en ejecutarse una simulación, aunque esto dependa netamente de aspectos relacionados al procesador del computador, memoria gráfica o acceso a memoria RAM. Desde este punto de vista, más que una limitación del modelo es una desventaja de hardware.

Para optimizar el tiempo de simulación, se podría utilizar paralelización para múltiples procesadores, sin embargo, NetLogo a pesar de ser un poderoso sistema multi-agente, tiene limitaciones respecto a este aspecto, lo que le da al modelo la misma limitación.

3.1.3. Resumen

El modelo desarrollado en NetLogo que lleva por nombre VALPOEVAC, se ha introducido a lo largo de esta sección, como una herramienta para analizar y manejar desastres de tipo inundación por tsunami, y con ello mejorar la educación en cuanto a la prevención y la auto evacuación de la población en riesgo. El modelo utiliza archivos GIS y resultados de modelos de inundación de tsunami como base de datos de ingreso que, junto con la integración de peatones, forman un escenario para simular la evacuación. El comportamiento de los agentes sigue un proceso determinado desde el inicio de su evacuación, pasando por el seguimiento de ruta, hasta su destino en las zonas de seguridad. Finalmente, la interfaz gráfica del usuario (GUI) permite que personas no expertas e investigadores locales puedan utilizar este modelo como una herramienta educativa y contribuir así con investigaciones futuras y mejoramientos del código.

3.2. Stoc-Agent

3.2.1. Descripción del Programa

Stoc-Agent es una modelación que permite la consideración de dos aspectos que son muy importantes en un proceso de evacuación por tsunami. En primera instancia se modela la inundación a través de un Simulador de Marejadas y Tsunamis en Océanos y Áreas Costeras (Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal Areas, STOC) para luego ser acoplada al modelo multi-agente formando una simulación empalmada.

Para comprender el funcionamiento de Stoc-Agent es necesario conocer superficialmente el funcionamiento del modelo de inundación STOC, el cual se describe brevemente a continuación:

- **STOC-ML y STOC-IC**

El simulador de tsunamis fue desarrollado por el Instituto de Investigación de Puerto y Aeropuerto (Port and Airport Research Institute, PARI), una institución administrativa independiente en Japón, dedicada a promover la creación de nuevas tecnologías para un efectivo y eficiente desarrollo de puertos y aeropuertos a través de la investigación. En marzo del año 2015 se presentó un “Manual de Usuario” de STOC (PARI, 2015), que resume la información necesaria para comprender el proceso de modelamiento dentro de esta plataforma.

El sistema de simulación STOC, consiste en dos programas principales:

- a) STOC-ML (multi-layered static dynamics model): Modelo cuasi tridimensional que calcula la dinámica de fluidos que resultan de un tsunami, utilizando una aproximación hidrostática¹⁵, para calcular tsunamis que se propagan a través del Océano Pacífico y otros océanos, debido a que es un hecho conocido que este tipo de aproximación es válida en tsunamis que ocurren fuera de la costa. En STOC-ML el fluido se puede dividir en múltiples capas a lo largo de la profundidad del agua, aunque usualmente se usan modelos de una sola capa en cálculos de tsunamis.
- b) STOC-IC (3-dimensional non-static model): Modelo tridimensional que calcula la dinámica de fluidos que resultan de un tsunami, basándose en las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos, para calcular variaciones en tsunamis que resultan debido a estructuras encontradas en zonas costeras.

A continuación, se mencionan las funciones principales de STOC. Es importante destacar que es posible acoplar varios STOC-MLs y finalmente un STOC-IC para permitir cálculos más sofisticados, sobre todo cuando se quiere calcular con gran precisión el comportamiento de un tsunami que ocurre fuera de la costa y luego se propaga.

Lo anterior se realiza utilizando el programa externo STOC-DM (Debris Model), que ensambla la información a través de un protocolo de comunicación llamado Message Passing Interface (MPI).

Funciones de STOC

- a) Análisis: Funciona para marejadas y tsunamis. STOC-ML cubre la propagación de olas sobre un extenso rango de cuerpos de agua, desde mar abierto hacia la costa. Por otra parte, STOC-IC cubre principalmente el cálculo detallado del comportamiento de las corrientes de agua en los puertos.
- b) Ecuaciones Fundamentales: Se utiliza una ecuación extendida proveniente de las ecuaciones de Navier-Stokes, usando la aproximación porosa para fluidos viscosos incompresibles en 3 dimensiones. Además, se involucran la ecuación de continuidad, conservación de momento, superficies libres y condiciones hidrostáticas.
- c) Modelo Físico:
 - Modelo Run-up límite (Run-up tip)
 - Modelo de estructura permeable (Permeable structure)
 - Modelo de flujo turbulento (Turbulent flow)
 - Modelo de bordes transparentes (Transparent boundary)
 - Modelo de onda dispersiva (Dispersive wave)
 - Modelo de rompimiento de olas (Breaking wave)
 - Modelo de desbordamiento (Overflow)
 - Modelo para un cambio en el nivel de agua por un terremoto.
- d) Discretización:
 - Ecuaciones diferenciales con grillado (mesh) escalonado
 - Aproximación de forma usando el modelo poroso

¹⁵ La ecuación de movimiento vertical se simplifica para producir el balance supuesto entre el peso del agua y el gradiente de presión vertical. Esta aproximación sólo funciona bien con fenómenos cuya longitud horizontal (L) es mayor que su profundidad vertical (Z) así se produce el equilibrio estático $dp/dz = -\rho g$.

- e) Término de Advección¹⁶: Esquema de diferenciación central precisa de segundo orden, esquema de viento ascendente preciso de primer orden y diferencia híbrida, con promedio ponderado de los parámetros antes mencionados.
- f) Integración del Tiempo: A través del método de salto de rana y método SMAC (Simplified Marker and Cell)
- g) Método para resolver ecuaciones lineales simultáneamente: MILU-BiCGStab.

Cabe destacar que otros tres (3) programas externos se pueden acoplar con STOC, estos serían: CADMAS-SURF/3D, STOC-OIL y AGENT, de aquí surge Stoc-Agent.

El simulador multi-agente utiliza los datos de salida de STOC como datos de entrada del tsunami, a través del archivo “data.ma”. Luego se cargan una serie de inputs que son asignados a medida que el programa se ejecuta, posteriormente se resuelve la evacuación con la utilización de distintos modelos y se finaliza con la obtención de resultados.

Como se mencionó anteriormente, Stoc-Agent utiliza distintos modelos para ejecutar la simulación, los cuales se describen brevemente a continuación, en base al manual:

a) Modelo de Potencial

Debido a que muchos factores influyen en la configuración de dirección de viaje de los agentes, se define un potencial para cada factor y se introduce un modelo que determina la dirección de viaje utilizando una superposición de estos potenciales en base a ciertos pesos asignados. Así, cada agente analiza el potencial de su entorno para tomar una dirección donde este sea menor y con la utilización del algoritmo de búsqueda A* logra dar con la mejor ruta. A continuación, se describen estos potenciales:

- Potencial de rutas de evacuación: Para cada celda en el análisis multi-agente, se calcula la distancia (no lineal) más corta al refugio más cercano, del mismo modo en que se realiza con el modelo en NetLogo.
- Potencial de congestión: Para cada celda en el análisis multi-agente, se calcula un grado de congestión en el entorno cercano y se fija un potencial de congestión. Esto se hace de manera similar a como se calcula la densidad peatonal antes mencionada.

b) Modelo de señaléticas

Se introduce el efecto de las señaléticas, que pueden afectar la dirección de evacuación de un agente pues indica la ubicación de los refugios. Es importante aclarar que esto no fue considerado en las simulaciones realizadas para la comparación de resultados.

c) Modelo de caminata random

Este modelo les entrega a los agentes cierta incertidumbre a medida que se mueven, modificando levemente su dirección de evacuación, como se indicó anteriormente en la descripción de NetLogo.

3.2.1.1. Funcionamiento del modelo Stoc-Agent

La estructura del modelo numérico utilizado en este estudio se describe a continuación y se puede resumir en 3 pasos principales:

¹⁶ Es la variación de un escalar en un punto dado, por efecto de un campo vectorial.

- i. El primer paso consiste en leer todos los parámetros numéricos que serán usados durante la simulación, especialmente los tiempos de inicio y término, el contador de tiempo (constante), el número de refugios y señaléticas, las dimensiones del dominio numérico, la localización del archivo de inundación y algunos parámetros para formar los archivos de salida. Básicamente, leer los inputs antes mencionados.
- ii. El segundo paso consiste en inicializar el cálculo de la evacuación. En este aspecto, el código lee los 3 archivos para obtener la información de la batimetría, el tiempo de inicio y el estado de cada agente respectivamente. La inicialización también permite calcular la ruta óptima de evacuación para cada agente, dada su posición inicial y la localización del refugio más cercano. Para ello, el código utiliza el algoritmo de búsqueda llamado A Star, al igual como sucede con NetLogo. Al finalizar este paso, los archivos de salida se abren.
- iii. El paso final consiste en mover la posición del agente en cada paso de tiempo (según el contador). Para ello, el modelo primero lee la altura del agua desde el archivo de inundación y calcula la velocidad de cada agente en base a varios parámetros (pendiente del terreno, edad del agente, densidad peatonal, caminata random, presencia de señaléticas o la influencia de grupo). Una vez que las nuevas posiciones son asignadas, el código actualiza el estado de cada agente.
El ABM considera 5 estados: (0) Escapado, (1) Moviéndose hacia el refugio por una calle “seca”, (2) Nadando hacia el refugio por una calle “inundada”, (3) Muerto, y (5) Sin movimiento ($t_{simulación} < t_p \text{ agente}$). El segundo estado es alcanzado si el agente está en el agua con una profundidad menor al valor límite, nombrado línea de muerte. El valor de la línea de muerte depende del sitio de estudio y las características del tsunami, sin embargo, para casos críticos (evento de tsunami extremo), es muy común tomar un valor muy bajo, que significa que el agente muere tan pronto como el agua lo alcanza.
Luego, el estado del agente es actualizado y escrito en los archivos de salida. Es importante destacar que el quinto estado está condicionado por el tiempo de partida, en otras palabras, todos los agentes son inicializados como no conscientes hasta que el tiempo de la simulación iguala al tiempo de partida. Una vez que el tiempo de la simulación sobrepase el tiempo final, el cálculo se termina.

3.2.1.2. Datos de Entrada de Stoc-Agent

A continuación, se presentan los inputs del modelo los cuales son archivos en formato ASCII:

- ✓ namelist.inp: Contiene los datos para la condición básica de análisis, es decir, la configuración inicial y de salidas, además de contener algunas de las reglas de comportamiento del movimiento de los agentes como parámetros para la caminata aleatoria u otras cosas.
- ✓ agent.inp: Contiene la base de datos de los agentes, es decir, los atributos específicos de cada agente modelado. Estos archivos se ingresan en filas de texto distintas para cada agente, y en ellas se representa el número del agente, las coordenadas de la posición inicial, velocidad máxima de movimiento, el nivel de agua que juzga la condición de víctima, la desviación estándar para la incertidumbre en la dirección de la caminata, el factor de ponderación del potencial de multitud, el refugio elegido para evacuar, entre otras cosas.

- ✓ shelter.inp: Contiene la base de datos de los refugios, es decir, los atributos de los refugios, que básicamente serían el número de identificación, y la posición en x e y.
- ✓ signpost.inp: Contiene la base de datos de las señaléticas, que se utilizan para orientar a los agentes en su caminata. Este parámetro no se utiliza en la modelación final pues en Valparaíso no hay una presencia clara de señaléticas que puedan interferir en la evacuación.
- ✓ move_boundary.inp: Contiene los límites dentro de los cuales se moverán los agentes.
- ✓ data.ma: Contiene los datos de salida de la simulación de inundación por tsunami obtenidos de STOC-ML (CADMAS-SURF).

3.2.1.3. Datos de Salida de Stoc-Agent

A continuación, se presentan los outputs o salidas del modelo los cuales son archivos en formato BINARY:

- ✓ agent.out: Contiene los datos de los resultados de la modelación.

Las estadísticas de los resultados se entregan en archivos con extensión .csv, que muestra la cantidad de personas que llegan al refugio en el tiempo y la cantidad de muertos en ese instante (statistics_i.csv y statistics_r.csv).

Finalmente, la información de los cálculos se entrega en un archivo formato ASCII llamado log.ma.

Existe una herramienta de visualización llamada CADMAS-VR que muestra los resultados de los agentes y sus rutas de evacuación, y es posible indicar si están muertos o vivos. En la Figura 3-14 se presenta un ejemplo de visualización de esta herramienta.

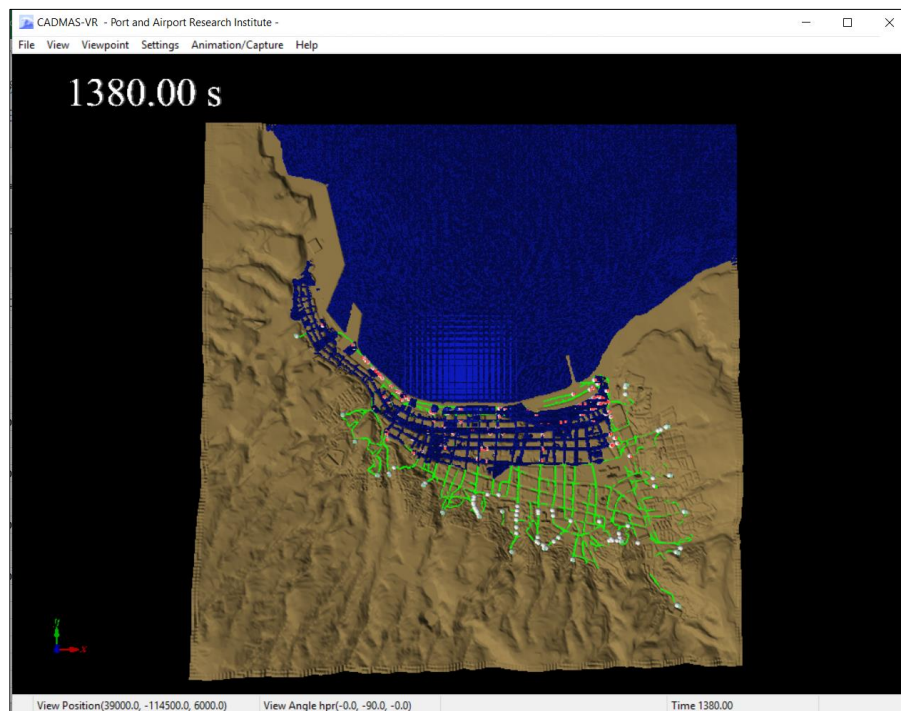


Figura 3-14: Presentación herramienta de visualización CADMAS-VR

3.2.2. Limitaciones de Stoc-Agent

Una de las limitaciones del modelo, es que se utiliza un grillado en dos dimensiones para determinar la dirección de viaje del agente, por lo tanto, el movimiento en sí de cada agente se lleva a cabo en coordenadas continuas en lugar de unidades de celda (mesh), lo que restringe el tamaño del mallado por la cantidad de movimiento por un paso. Pues el paso del tiempo debe ser menor o igual al tamaño diferencial de la celda sobre la velocidad máxima del agente (Instituto de Información e Investigación de Mizuho, Inc., 2010).

Otra de las limitaciones es la dificultad de uso y la poca información disponible para aprender a utilizarlo, como tutoriales, ejemplos entre otras cosas. Además, para ejecutar las simulaciones es necesario contar con muchos archivos de entrada y datos que deben estar previamente adaptados para la simulación, lo que vuelve más tedioso el proceso de simular una evacuación distinta cada vez, en caso de querer realizar distintas iteraciones. Lo anterior imposibilita al usuario a realizar diversas simulaciones, si es que este no es altamente conocedor del programa y sus posibilidades.

3.3. Configuración de las simulaciones

La siguiente sección reúne los parámetros utilizados para establecer los distintos escenarios con los cuales posteriormente se realizarán las simulaciones para analizar los aspectos y cumplir con los objetivos de esta memoria. Estos parámetros y características fueron establecidos de la misma forma para ambos modelos, es más, en cuanto a NetLogo se utilizó exactamente la misma base de datos de agentes simulada en Stoc-Agent, para lograr resultados lo más comparables posibles.

Para realizar esto, fue necesaria una base de datos de agentes con su posición y velocidades iniciales además de sus tiempos de partida, los cuales fueron obtenidos aleatoriamente y guardados en archivos shape (.shp). Así, cada vez que el modelo se inicializa con esta distribución de agentes, muestra resultados iguales, pues los parámetros no se modifican en un mismo escenario, por lo que sólo basta con realizar una simulación de cada escenario para posteriormente analizar, comparar los resultados y concluir al respecto.

3.3.1. Población que Evacúa

Cuando se trata de exposición frente a la amenaza de tsunami, el horario es un factor crucial, pues por razones obvias la distribución espacial de la población en un sector determinado cambia considerablemente entre un horario y otro. Por esta razón es que se consideraron dos escenarios de población, uno diurno y uno nocturno.

Para analizar ambos escenarios, se utilizaron los resultados de “Población total por sexo y área urbana-rural, según edad simple”, obtenidos del CENSO de 2017¹⁷ realizado por el INE y la matriz origen-destino (OD) de la ciudad de Valparaíso, encuesta realizada por el programa de Vialidad y Transporte Urbano del SECTRA el 2015, algo muy relevante puesto que dicho estudio considera a la población flotante del Almendral, es decir, todos aquellos que pasan gran parte del día allí y durante la noche se mueven a otras zonas (En su mayoría estudiantes universitarios y trabajadores).

¹⁷ Visite <http://resultados.censo2017.cl/Home/Download>, para acceder a la información más detallada.

En primer lugar, se dividió el sector de análisis en 15 Zonas, correspondientes a Plan Valparaíso, Valparaíso Alto y Barón Placeres según la clasificación para Zonas OD del SECTRA, como se observa en la Figura 3-15.

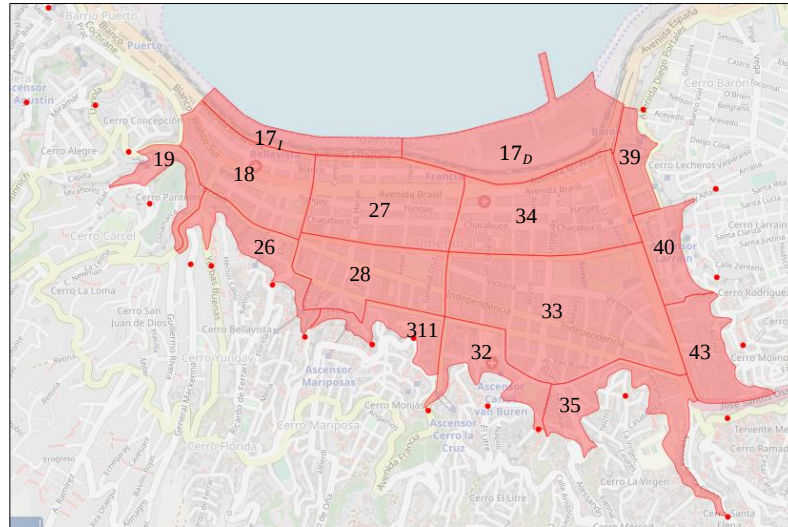


Figura 3-15: Zonas OD utilizadas para el escenario diurno y nocturno junto con algunos de los Puntos de Encuentro utilizados como zona de seguridad para evacuar.

Para el caso diurno, se establece la población total por zona según la encuesta OD y luego se hace una relación entre el área total de la Zona OD y el área de interés, cuya ubicación es bajo la cota 30 [msnm], para efectos de obtener los sectores más vulnerables de inundación. Es importante destacar que a medida que se subdivide un área, la población se calcula proporcional al área. Con lo anterior se obtiene una población diurna total de **32492** habitantes.

Por otra parte, para el caso nocturno se utilizan los datos censales. Con una relación de población total por manzana sobre el área de la manzana, se obtiene una densidad poblacional la cual se asocia a cada Zona OD considerando así el área de interés. Finalmente se obtiene una población nocturna total de **13347** habitantes.

3.3.2. Tiempo de Partida (td)

Si bien los modelos no consideran las razones por las cuales los agentes evacúan más temprana o tardíamente, el tiempo de partida de evacuación se utiliza como un parámetro aleatorio de cada agente, el cual dependerá directamente del tiempo medio en que tarde el total de la población a analizar.

Para lograr encontrar el tiempo de partida de cada agente, los modelos utilizan una metodología basada en curvas probabilísticas de tiempo de partida, específicamente la función de distribución de probabilidad de Rayleigh, de la siguiente forma:

$$F_t = 1 - e^{-t^2/T} \quad (3.13)$$

Donde F_t es el porcentaje de población movilizad a al tiempo t y T es un parámetro de análisis que se ajusta para controlar el aspecto de la curva.

Si se analiza la distribución de forma teórica, el parámetro T corresponde a un valor modificado del parámetro σ , el cual a su vez está relacionado a la media de la distribución. Finalmente, la distribución de Rayleigh puede ser expresada como sigue:

$$D(t) = 1 - e^{-t^2/2\sigma^2} \quad (3.14)$$

$$\mu = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (3.15)$$

$$D(t) = 1 - e^{-\pi t^2/4\mu^2} \quad (3.16)$$

Si se multiplica la distribución $D(t)$ por 100 (ecuación 3.16), se obtiene el porcentaje de agentes que se encuentran movilizados al tiempo t , que se relaciona directamente al tiempo medio de partida estimado (μ). Para lograr cuantificar el efecto de la utilización del parámetro μ en la determinación de los tiempos de partida de los evacuados y cómo estos influyen en los resultados finales de cada simulación, se realizó un análisis de sensibilidad considerando 3 escenarios:

- **$\mu = 3 \text{ min}$**
Este escenario se utiliza para analizar lo que ocurriría en el mejor de los casos, en donde la auto evacuación de los agentes se realiza de manera inmediata luego del terremoto, cuya duración se estima en 3 minutos. En la actualidad es adecuado pensar en un comportamiento de la población de este nivel, gracias a la consciencia sísmica generada tras eventos tsunamigénicos anteriores como Maule 2010 (Mw 8,8), Iquique 2014 (Mw 8,2) o Illapel 2015 (Mw 8,4), junto con el desarrollo de campañas educativas y realización de simulacros como el de agosto de 2013 en el norte de Chile o septiembre de 2019 en Valparaíso (Álvarez Castillo, 2017).
- **$\mu = 8 \text{ min}$**
Este escenario analiza el caso de evacuación cuando la población espera la emisión de alarmas o alertas de tsunami, para iniciar su evacuación. Este valor se estimó en base al tiempo promedio de emisión de las últimas alarmas de tsunami en Chile (Iquique 2014 Mw 8,2, Illapel 2015 Mw 8,4 y Chiloé 2016 Mw 7,6), por parte de los organismos encargados de dictar esta información, SHOA y ONEMI (Álvarez Castillo, 2017).
- **$\mu = 12 \text{ min}$**
Este escenario se utiliza para analizar lo que ocurriría en el peor de los casos, en donde los agentes comienzan a evacuar luego de llegada la primera ola del tsunami. Para el caso del tsunami de 2014, se determinó que el tiempo de llegada del primer peak del registro fue de 19 minutos (Álvarez Castillo, 2017), sin embargo, considerando los registros y la historia sísmica de la zona en análisis (2.1.3.3 Sismicidad Histórica: Región de Valparaíso), se decidió reducir este tiempo a 12 minutos, para ser consistentes con el tiempo medio de llegada de las olas en la simulación del tsunami de 1730.

A continuación, se presentan las curvas de tiempo de partida de evacuación de tsunami, asumiendo los 3 tiempos medios antes descritos.

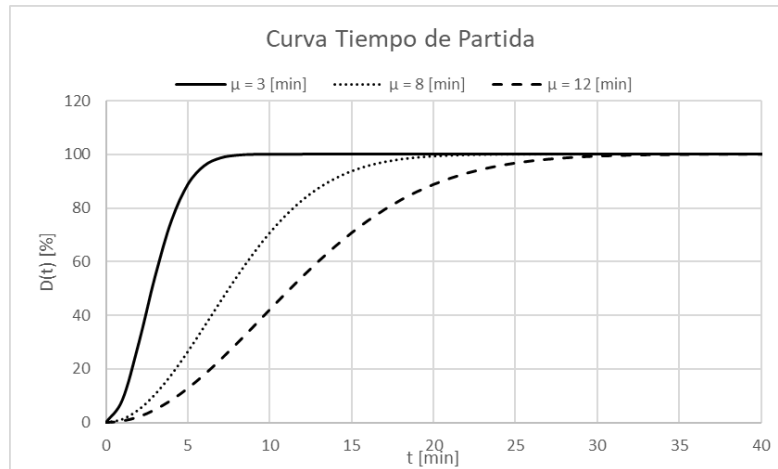


Gráfico 3-2: Curvas de tiempo de partidas, obtenidas a partir de la distribución de probabilidad de Rayleigh, para los tiempos medios de partida de 3, 8 y 12 minutos

Como se observa, en el Gráfico 3-2, mientras menor sea el tiempo medio de partida (μ), más rápido los agentes se encuentran movilizados, pues su reacción y sentido de evacuación se activa más tempranamente. Según las curvas mostradas, para el caso de una media de 3 minutos, la población se encuentra en su totalidad movilizada y evacuando antes de los 10 minutos, mientras que, para el caso de una media de 12 minutos, esto sucede en un plazo de casi 40 minutos desde el inicio de la evacuación.

Según esto, no resulta extraño creer que existirá una mayor cantidad de víctimas para la simulación con μ igual a 12 minutos, pues la ola probablemente alcanzará a más de algún agente que ni siquiera esté al tanto de que debe iniciar su movilización por tsunami.

3.3.3. Velocidad Inicial

Como se mencionó anteriormente en esta sección, se utilizaron los resultados tanto del Censo de 2017 realizado por el INE como de la encuesta origen-destino realizada por SECTRA, para la obtención de la población en escenario diurno y nocturno, sin embargo, además de eso también se extrajo la información necesaria para clasificar a la población según rango etario. Para ello, se distribuyó a la población encuestada, de la siguiente forma:

- Niños : Población entre 0 y 14 años
- Adolescentes : Población entre 15 y 29 años
- Adultos Jóvenes : Población entre 30 y 44 años
- Adultos : Población entre 45 y 64 años
- Ancianos (o Adultos Mayores) : Población desde los 65 años en adelante

Con esta consideración y los resultados del Censo, fue posible encontrar el porcentaje de cada rango en base a la totalidad de la encuesta, y con ello finalmente es posible distribuir la población total en los distintos escenarios según rango etario como se indica en la Tabla 3-2, para luego utilizar dicha información en la determinación de la velocidad inicial de cada agente.

Tabla 3-2: Distribución de la población según rango etario

CLASIFICACIÓN	PORCENTAJE POBLACIÓN ¹⁸ (%)	ESCENARIO	
		DIURNO (agentes)	NOCTURNO (agentes)
Niños	17,77	5774	2372
Adolescentes	25,70	8350	3430
Adultos Jóvenes	19,51	6339	2604
Adultos	23,66	7688	3158
Ancianos	13,36	4341	1783
Total	100,00	32492	13347

Fuente: Elaboración Propia.

De estudios previos se ha estimado que la velocidad de caminata de peatones que se mueven a través de un flujo no impedido, parece seguir una distribución normal con una media estimada de 1,34 [m/s] y una desviación estándar de 0,37 [m/s] (Buchmueller & Weidmann, 2006), sin embargo, la velocidad máxima que puede alcanzar un peatón en particular va a depender de muchos factores de influencia, como los que se describen a continuación:

- Condición Física:
 - Origen cultural y racial
 - Edad
 - Género
 - Altura y longitud del paso al caminar
 - Discapacidad
- Propósito de la caminata:
 - Viaje de placer (Equipaje)
 - Trabajo
 - Simulacros
 - Emergencias reales
- Condiciones del entorno:
 - Temperatura del medioambiente
 - Clima
 - Horario del día (Hora punta)
- Atributos de las rutas:
 - Áreas inclinadas
 - Escaleras
 - Escalas mecánicas

En base a la información mostrada en la Tabla 3-2, se decidió utilizar la edad de los agentes como un factor para definir la velocidad inicial al momento de realizar las simulaciones. Para ello, tomando los rangos etarios antes mencionados, se ingresa a una curva de “velocidad v/s edades” definida por Weidmann (1993) (Ver Gráfico 3-3), y se obtiene una velocidad máxima y mínima para cada rango, las que se resumen posteriormente en la Tabla 3-3. Finalmente, a través de la siguiente ecuación (3.17) es posible determinar la velocidad para cada agente según un criterio de aleatoriedad:

$$V_{agente} = (V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n}) * x_1 + V_{m\acute{i}n} \text{ [m/s]} \quad (3.17)$$

¹⁸ Se utilizó la misma distribución porcentual por rango etario para el caso diurno y nocturno.

Donde:

$V_{\text{máx}}$: Velocidad máxima del rango etario al cual pertenece el agente
 $V_{\text{mín}}$: Velocidad mínima del rango etario al cual pertenece el agente
 x_1 : Corresponde a un valor real aleatorio comprendido entre 0 y 1

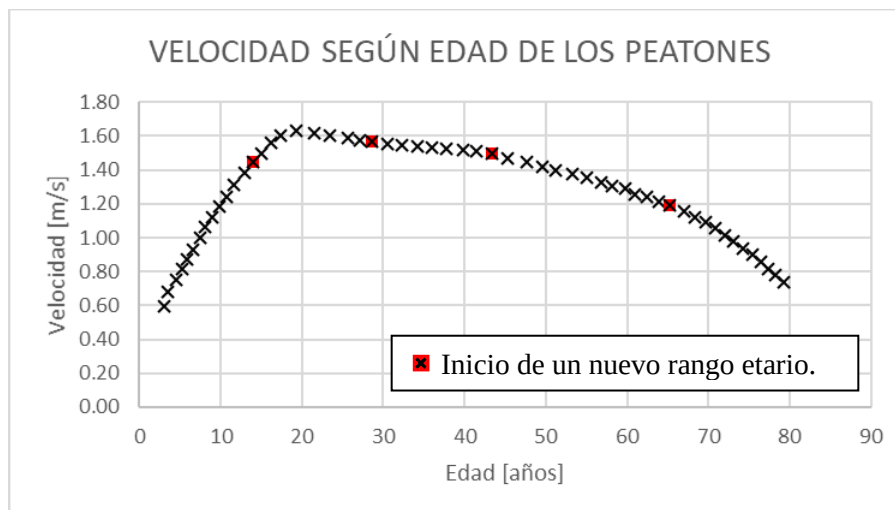


Gráfico 3-3: Correlación entre velocidad de caminata y edad (Fuente: Weidmann, 1993).

Tabla 3-3: Velocidades según rango etario

CLASIFICACIÓN	VELOCIDAD DE CAMINATA [m/s]	
	MÍNIMA	MÁXIMA
Niños	0,59	1,44
Adolescentes	1,5	1,62
Adultos Jóvenes	1,49	1,55
Adultos	1,21	1,47
Ancianos	0,74	1,19

Fuente: Elaboración Propia.

Capítulo 4

Resultados: Modelación Stoc-Agent y NetLogo

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el objetivo principal de este estudio es comparar los resultados de dos modelos de evacuación de agentes. Esto se realiza con el fin de evaluar si NetLogo, siendo un software libre multi-agente, es capaz de representar el comportamiento de los evacuados de forma similar a como se realiza en Stoc-Agent, el cual funciona como una modelación empalmada de inundación y evacuación de agentes en un mismo proceso. Para ello el código de NetLogo se desarrolló en base a todas las consideraciones realizadas en Stoc-Agent, procurando que las reglas de comportamiento de los agentes fuesen lo más cercanas posibles a lo que ocurre con la modelación empalmada.

A pesar de que Stoc-Agent es una simulación más completa, es necesario analizar otras opciones que sean más amigables con el usuario, debido a los códigos computacionales para simular con este software, que es un programa complejo y no posee mucha información de fácil acceso acerca de él.

En este aspecto, como ya se ha descrito previamente en este documento, NetLogo al ser de fuente libre y código abierto, permite al usuario tener acceso a un centenar de información de forma gratuita, lo que permite ir aprendiendo y mejorando los modelos cada vez más. Además, su interfaz gráfica es muy dinámica y permite al usuario tener una relación directa con la simulación e interactuar con ella de diversas formas. Por estas y otras razones es que se considera a NetLogo como una excelente oportunidad para tener una visión global a cerca de lo que ocurre durante una inundación por tsunami, para así buscar medidas que permitan la reducción del riesgo de desastres y que vayan en pro del bienestar de las personas frente a este tipo de escenarios.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados de las simulaciones en los distintos escenarios de ambos modelos para luego realizar una comparación entre modelos y finalmente analizar las semejanzas y diferencias en el apartado de conclusiones.

4.1. Modelación con Stoc-Agent

4.1.1. Resultados y Comentarios caso de estudio en Valparaíso

En el siguiente ítem se presentan los resultados para los distintos tiempos medios de inicio de la evacuación (μ) mencionados anteriormente (3, 8 y 12 minutos), en los escenarios diurno y nocturno, modelados con Stoc-Agent. Es importante destacar que la simulación en Stoc-Agent se realizó sin considerar el efecto de la congestión, para así reducir el tiempo de las simulaciones, por lo que hay que tenerlo en consideración al momento de comparar los resultados. Como se mencionó en el ítem “3.2.1.1: Funcionamiento del modelo Stoc-Agent”, al término de la simulación los agentes pueden encontrarse en 5 estados posibles:

- Estado (0): Escapados
- Estado (1): Moviéndose hacia el refugio por una calle “seca”
- Estado (2): Nadando hacia el refugio por una calle “inundada”
- Estado (3): Muerto (Víctimas Conscientes)
- Estado (5): Sin movimiento “ $t_{\text{simulación}} < t_{\text{p agente}}$ ” (Víctimas No Conscientes)

En la siguiente tabla, se resumen los resultados obtenidos de las simulaciones con Stoc-Agent, donde en rojo se destaca el total de víctimas (conscientes y no conscientes) y en azul se destaca el total de evacuados que efectivamente lograron llegar a la zona de seguridad seleccionada.

Posteriormente en los Gráficos 4-1 y 4-2, se reúne la información de víctimas (curvas rojas) y evacuados (curvas azules) en el tiempo. Se destaca que los agentes vivos secos o mojados (estados 1 y 2), quedan fuera del análisis gráfico pues el valor tabulado se obtiene sólo al tiempo final de la simulación, por lo tanto, no es posible realizar una curva con este dato.

Tabla 4-1: Resumen de resultados simulación Stoc-Agent para escenario Diurno, Nocturno y los respectivos tiempos medios de partida (μ), sin considerar congestión.

Tiempo medio partida μ [min]	Estado	Escenario Diurno		Escenario Nocturno	
		Agentes	%	Agentes	%
3	Evacuados (0)	31969	98,4	13106	98,2
	Vivos y Secos (1)	0	0	0	0
	Vivos y Mojados (2)	0	0	0	0
	Víctimas Conscientes (3)	523	1,6	241	1,8
	Víctimas No Conscientes (5)	0	0	0	0
	Total	32492	100	13347	100
8	Evacuados (0)	29653	91,3	12051	90,3
	Vivos y Secos (1)	0	0	0	0
	Vivos y Mojados (2)	0	0	0	0
	Víctimas Conscientes (3)	2839	8,7	1296	9,7
	Víctimas No Conscientes (5)	0	0	0	0
	Total	32492	100	13347	100
12	Evacuados (0)	25537	78,595	10378	77,8
	Vivos y Secos (1)	16	0,049	4	0,03
	Vivos y Mojados (2)	1	0,003	0	0
	Víctimas Conscientes (3)	6938	21,4	2965	22,2
	Víctimas No Conscientes (5)	0	0	0	0
	Total	32492	100	13347	100

Fuente: Elaboración Propia.

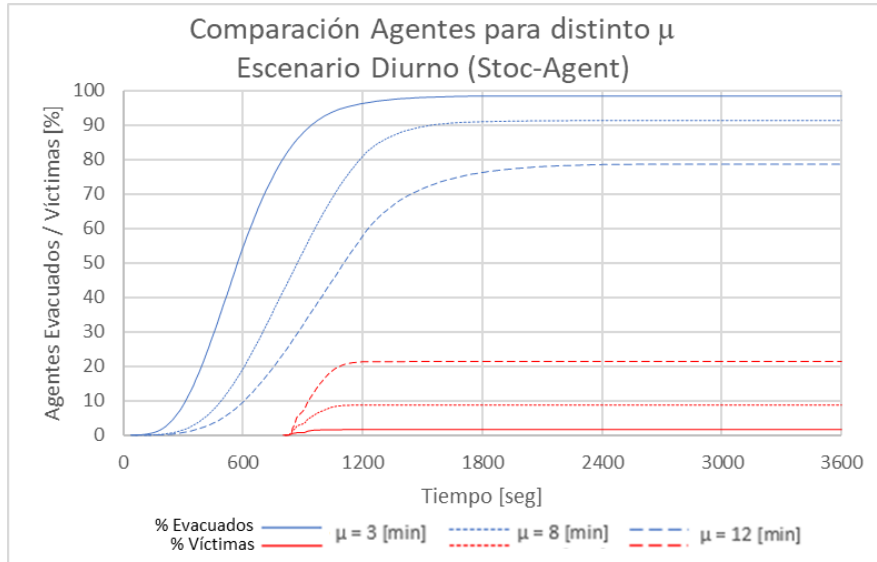


Gráfico 4-1: Comparación gráfica del porcentaje de evacuados y víctimas en el tiempo para las distintas simulaciones en escenario Diurno, sin considerar congestión, Stoc-Agent.

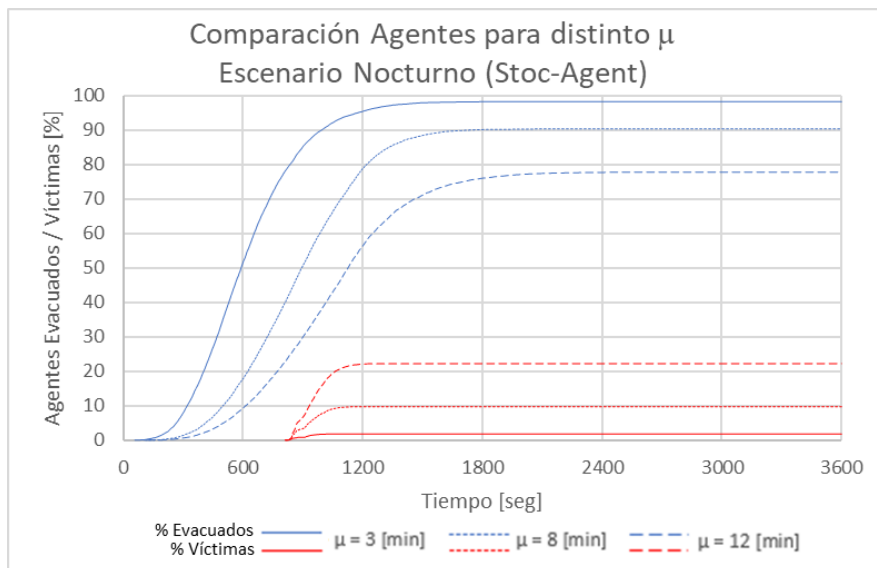


Gráfico 4-2: Comparación gráfica del porcentaje de evacuados y víctimas en el tiempo para las distintas simulaciones en escenario Nocturno, sin considerar congestión, Stoc-Agent.

De los estados 3 y 5 de la Tabla 4-1 y las curvas rojas de los Gráficos 4-1 y 4-2 (víctimas), se puede extraer claramente que a medida que aumenta el tiempo medio de partida (μ), la cantidad de víctimas conscientes es mayor, pues los agentes tardan más en iniciar su evacuación. Ahora, resulta extraño el hecho de que no existan víctimas no conscientes, pues el tsunami debería llegar antes de que todos comiencen su evacuación, sobre todo en el caso de μ igual a 12 minutos, pues es un escenario que busca evaluar lo que sucede cuando la mayoría de los agentes comienzan a evacuar luego de llegada la primera ola.

Además, se rescata que el escenario diurno presenta un menor porcentaje de víctimas comparado con el escenario nocturno, sin embargo, las diferencias son mínimas y no superan el 1% por lo que es posible considerar los resultados casi idénticos entre un escenario y otro.

Por otra parte, del estado 0 de la Tabla 4-1 y las curvas azules de los Gráficos 4-1 y 4-2 (evacuados), se aprecia que el porcentaje de evacuados que efectivamente logra llegar al PE, aumenta notoriamente con la disminución del tiempo medio de partida (μ), algo esperable considerando que a menor μ , los agentes comienzan su evacuación antes y por ende tienen más tiempo para escapar del tsunami y no ser víctimas de él.

Sumado a lo anterior se comprueba que, entre escenarios diurno y nocturno, los resultados son casi idénticos, con diferencias muy bajas entre sí. Esto puede no ser muy representativo de lo que sucede en la realidad, pues al momento de una evacuación, a mayor cantidad de población debiese ser mayor la congestión que se produce, por lo tanto, no sería erróneo pensar que el porcentaje de víctimas debiese ser mayor en un escenario diurno v/s el nocturno.

En cuanto a los estados 1 y 2, correspondientes a los agentes vivos (secos o mojados) que no logran llegar al PE al término de la simulación, se obtuvieron resultados cercanos a cero. Esto en la práctica tampoco es representativo, pues en una situación de este tipo es imposible que casi el total de la población “no víctima del tsunami” logre llegar a sus zonas de seguridad, pues muchas veces los obstáculos y la misma congestión peatonal, limita las velocidades de los peatones, impidiendo que alcancen del todo sus objetivos.

Finalmente, de los resultados obtenidos se puede rescatar que en todos los escenarios hay un mayor porcentaje de evacuados que víctimas, y que, entre escenarios diurno y nocturno, los porcentajes son muy similares entre sí. Por ejemplo, analizando un tiempo medio de partida (μ) de 3 minutos para el escenario diurno, un 98,4% de los agentes son evacuados v/s un 1,6% que son víctimas, mientras que para el escenario nocturno un 98,2% son evacuados v/s un 1,8% que son víctimas. Esto indica que la modelación tiende a tener un comportamiento similar sin importar la cantidad de agentes a simular, sin embargo, hay que considerar que las simulaciones en Stoc-Agent no contemplan la congestión peatonal, por lo tanto, es importante tenerlo en consideración a la hora de comparar los resultados con NetLogo.

4.2. Modelación en NetLogo

Para la simulación ejecutada en esta memoria, se utilizó la versión 6.1.0 de NetLogo, pues era la última disponible a la fecha de realización del código. El funcionamiento del modelo se explicó previamente en el Capítulo 3 mientras que el código como tal se presenta en el *Anexo B*, que estará disponible para futuros usos y modificaciones. Es importante destacar que a diferencia de la simulación con Stoc-Agent, en NetLogo si se consideró el efecto de la congestión, sin embargo, también se modeló el escenario Nocturno sin considerar este efecto, para apreciar de mejor forma la influencia de este parámetro en los resultados obtenidos. A continuación, se presentan los distintos resultados obtenidos.

4.2.1. Resultados y Comentarios caso de estudio en Valparaíso

En el siguiente ítem se presentan los resultados para los distintos tiempos medios de inicio de la evacuación mencionados anteriormente (3, 8 y 12 minutos), en los escenarios diurno y nocturno, modelados con NetLogo. Como se mencionó en el ítem “3.1.2.5: Datos de Salida”, en la situación final al término de la simulación en NetLogo, los agentes pueden encontrarse en 5 estados, los cuales se recuerdan a continuación:

- Estado (1): Agentes vivos y secos en la ciudad
- Estado (2): Agentes vivos y mojados en la ciudad
- Estado (3): Agentes víctimas conscientes de la amenaza de tsunami
- Estado (4): Agentes a salvo en el punto de encuentro
- Estado (5): Agentes víctimas no conscientes de la amenaza de tsunami

En la siguiente tabla, se resumen los resultados obtenidos de las simulaciones con NetLogo, donde en rojo se destaca el total de víctimas (conscientes y no conscientes) y en azul se destaca el total de evacuados que efectivamente lograron llegar a la zona de seguridad seleccionada.

Posteriormente en los Gráficos 4-3 y 4-4, se reúne la información de víctimas (curvas rojas) y evacuados (curvas azules) en el tiempo. Se destaca que los agentes vivos secos o mojados (estados 1 y 2), quedan fuera del análisis gráfico pues el valor tabulado se obtiene sólo al tiempo final de la simulación, por lo tanto, no es posible realizar una curva con este dato.

Tabla 4-2: Resumen de resultados simulación NetLogo para escenario Nocturno y Diurno, y distintos tiempos medios de partida (μ), considerando congestión.

Tiempo medio partida μ [min]	Estado	Escenario Diurno		Escenario Nocturno	
		Agentes	%	Agentes	%
3	Vivos y Secos (1)	18176	55,9	8239	61,7
	Vivos y Mojados (2)	356	1,1	78	0,6
	Víctimas Conscientes (3)	11222	34,5	2419	18,1
	Evacuados en PE (4)	2738	8,4	2611	19,6
	Víctimas No Conscientes (5)	0	0	0	0
	Total	32492	100	13347	100
8	Vivos y Secos (1)	17618	54,2	7284	54,6
	Vivos y Mojados (2)	257	0,8	104	0,8
	Víctimas Conscientes (3)	9391	28,9	1672	12,5
	Evacuados en PE (4)	4320	13,3	3926	29,4
	Víctimas No Conscientes (5)	906	2,8	361	2,7
	Total	32492	100	13347	100
12	Vivos y Secos (1)	16578	51,022	6325	47,4
	Vivos y Mojados (2)	211	0,649	4	0,03
	Víctimas Conscientes (3)	5613	17,275	1029	7,7
	Evacuados en PE (4)	5610	17,266	4341	32,5
	Víctimas No Conscientes (5)	4480	13,8	1648	12,3
	Total	32492	100	13347	100

Fuente: Elaboración Propia.



Gráfico 4-3: Comparación gráfica del porcentaje de evacuados en PE (4) y víctimas en el tiempo para las distintas simulaciones en escenario Diurno, considerando congestión, NetLogo.

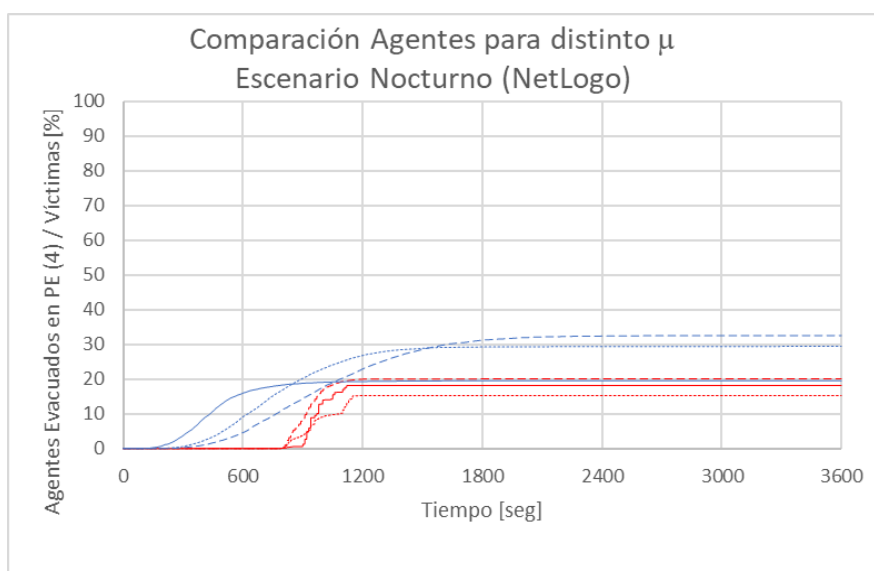


Gráfico 4-4: Comparación gráfica del porcentaje de evacuados en PE (4) y víctimas en el tiempo para las distintas simulaciones en escenario Nocturno, considerando congestión, NetLogo.

Las víctimas no conscientes de la amenaza de tsunami (estado 5) en conjunto con aquellas conscientes (estado 3), forman el total de víctimas analizadas, tanto en los Gráficos 4-3 y 4-4 (curvas rojas), como en la Tabla 4-2. En base a esto, del análisis de víctimas se puede extraer que, a medida que aumenta el tiempo medio de evacuación (μ), aumentan las víctimas no conscientes y disminuyen las víctimas conscientes. Lo anterior se explica ya que un mayor μ implica un inicio de evacuación más tardío, dejando una mayor cantidad de agentes detenidos en su posición de origen, lo que permite que el agua los alcance sin que hayan siquiera iniciado su proceso de evacuación.

Para continuar con el análisis de víctimas, se tabularon los datos obtenidos de la suma de valores de los estados 3 y 5, correspondiente al total de víctimas, obteniéndose la siguiente información:

Tabla 4-3: Comparación de víctimas en los distintos escenarios de la modelación en NetLogo, considerando congestión.

Tiempo medio partida μ [min]	Estado (5) + (3)	Escenario Nocturno		Escenario Diurno	
		Nº Agentes	% Agentes	Nº Agentes	% Agentes
3	Víctimas	2419	18,1	11222	34,5
8	Víctimas	2033	15,2	10297	31,7
12	Víctimas	2677	20,1	10093	31,1

Fuente: Elaboración Propia.

De lo anterior se aprecia que no existe un patrón definido entre el total de víctimas y la variación de μ . Por un lado, en el caso diurno el porcentaje de víctimas disminuye con el aumento de μ , mientras que, en el caso nocturno, disminuye y luego aumenta. Ahora, si se compara entre escenarios diurno y nocturno, es posible apreciar que los porcentajes de víctimas son mayores en escenario diurno. Las razones para una situación de este tipo pueden ser varias, sin embargo, es posible pensar que la congestión peatonal afecta de manera considerable en el proceso de evacuación, pues con NetLogo si se consideró este parámetro. Ahora, si se analizan los agentes evacuados que logran llegar a un PE, es posible rescatar que los porcentajes de agentes evacuados en escenario nocturno son mayores a los valores obtenidos de las simulaciones en escenario diurno, como se logra apreciar claramente en el estado 4 de la Tabla 4-2 (destacado en azul). Por ejemplo, para un μ de 8 minutos, los evacuados ascienden a un 13,3% en el escenario diurno, mientras que este valor aumenta a un 29,4% en el caso del escenario nocturno.

Si a lo anterior se suma el análisis gráfico de evacuados (curvas azules en Gráficos 4-3 y 4-4), es posible notar que mientras menor es el tiempo medio de partida μ , las curvas tienen una mayor inclinación, indicando que los evacuados comienzan a llegar al punto de encuentro en un menor tiempo, algo lógico considerando que los agentes comienzan su evacuación más tempranamente. No obstante, si se analiza el porcentaje máximo de evacuados, es posible notar, en un mismo escenario, que a mayor μ mayor es el porcentaje de evacuados.

Al igual que como ocurre con las víctimas, es posible pensar que el comportamiento de los resultados respecto a los evacuados también está condicionado al efecto de la congestión peatonal, pues en el escenario nocturno la cantidad de agentes en movimiento es menor, por lo tanto, se genera una menor congestión a la hora de evacuar y con ello se produce una mayor libertad de movimiento para que los agentes logren alcanzar los PE, completando así su evacuación. Similar a lo que ocurre con las variaciones del tiempo medio de partida, pues a mayor μ , menor será la cantidad de agentes en movimiento en un mismo instante, lo que reduce la congestión a la hora de evacuar.

Para analizar la influencia de la congestión en los resultados de las simulaciones con NetLogo, se decidió realizar una simulación para cada tiempo medio de partida (μ), en escenario nocturno, adaptando el código para no considerar la congestión. Con esto será posible obtener conclusiones más concretas respecto a este factor y la influencia que tiene en los resultados. Este análisis se llevará a cabo en el siguiente ítem de comparación entre modelos.

4.3. Comparación de Resultados entre Modelos

La siguiente sección busca reunir y comparar los resultados de ambos modelos utilizados para la simulación de la evacuación por tsunami en el sector del Almendral en la ciudad de Valparaíso, los cuales fueron expresados en secciones anteriores.

Es importante destacar que la inundación es muy similar en ambas modelaciones, tanto la simulada con STOC-ML para el modelo de Stoc-Agent, como la simulada con HySEA para el modelo de NetLogo. Existen ciertas sutilezas en cuanto al desplazamiento vertical de la superficie libre y el desfase respecto del tiempo en el cual se alcanzan los niveles mayores de desplazamiento, no obstante, se logran inundaciones que finalmente se traducen en inputs semejantes, lo que permite que los resultados sean comparables entre sí, como se muestra en el Gráfico 4-5, según la serie de tiempo del desplazamiento vertical de la superficie libre del mar, registrado en una boya virtual cercana a la costa en Valparaíso ($-71.61692118^{\circ}W$ - $33.04145559^{\circ}S$).

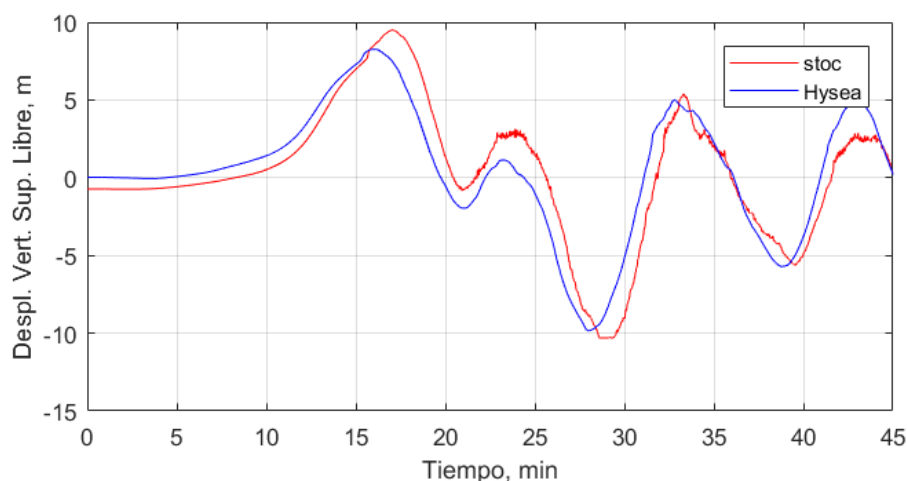


Gráfico 4-5: Comparación de simulación de inundación con STOC-ML (rojo) y HySEA (azul).

A continuación, se presenta una comparación gráfica entre las simulaciones con Stoc-Agent y NetLogo. Es importante destacar que esta comparación se realizará sólo en escenario nocturno, pues también se pretende analizar cómo afecta el parámetro de la congestión en el cálculo de víctimas y evacuados, y así observar las principales diferencias y semejanzas en ambos modelos.

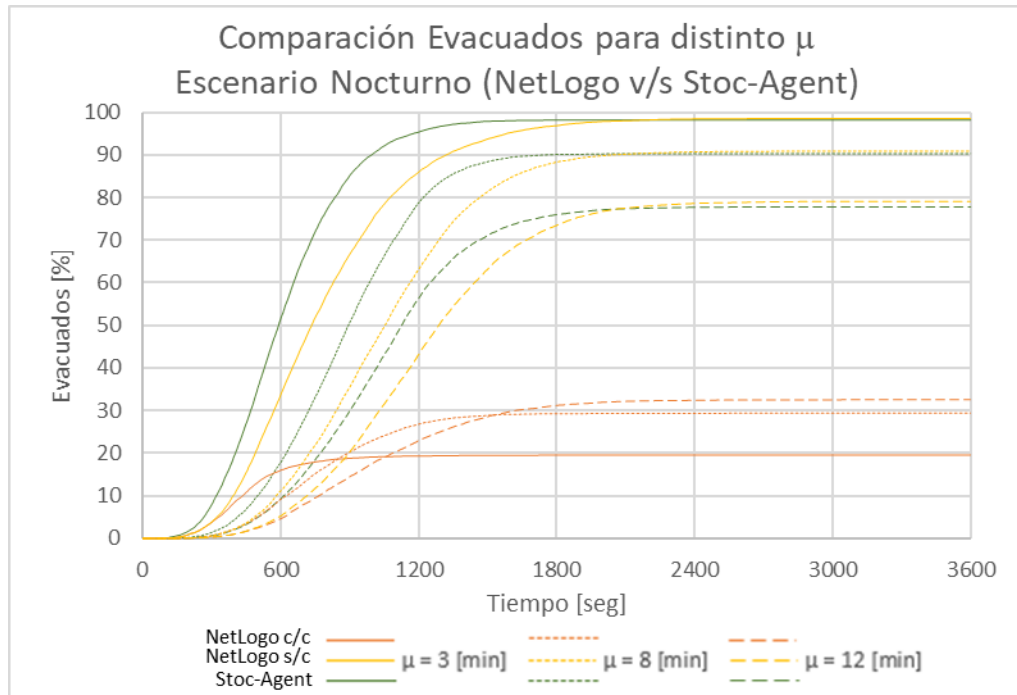


Gráfico 4-6: Comparación del porcentaje de evacuados en el tiempo para las distintas simulaciones en escenario Nocturno, NetLogo (con y sin congestión) v/s Stoc-Agent (sin congestión).

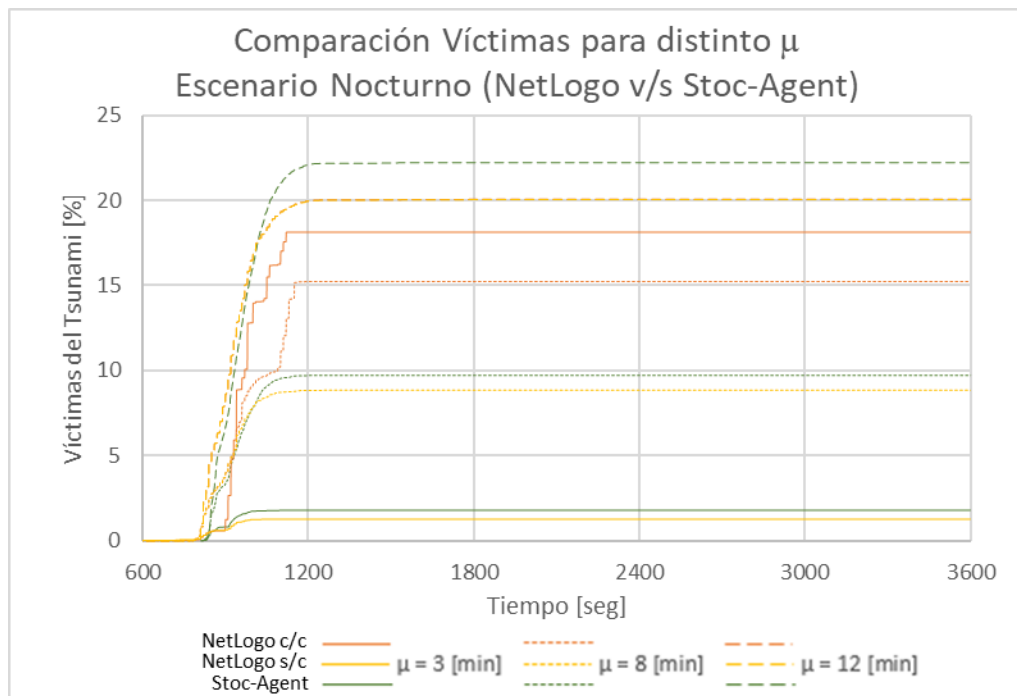


Gráfico 4-7: Comparación del porcentaje de víctimas en el tiempo para las distintas simulaciones en escenario Nocturno, NetLogo (con y sin congestión) v/s Stoc-Agent (sin congestión)*.

* Debido al bajo porcentaje máximo de víctimas, se decidió mostrar el Gráfico 4-7 con un eje vertical máximo de 25%. En cuando al eje horizontal, inicia en 600 pues las olas del tsunami no alcanzan a sus primeras víctimas sino hasta aproximadamente los 800 segundos.

De los Gráficos 4-6 y 4-7, se observan a simple vista las diferencias y semejanzas entre las simulaciones de los modelos, las cuales se explican a continuación:

- Analizando el Gráfico 4-6, en el inicio de las curvas de porcentaje de evacuados, es posible notar que tanto en Stoc-Agent como en NetLogo (con y sin congestión), la inclinación de las curvas aumenta a medida que disminuye el tiempo medio de inicio de la evacuación (μ). En ambos casos, para un μ de 3 minutos, la curva es más inclinada, es decir, los agentes alcanzan el punto de encuentro (o zona de seguridad) en un menor tiempo.

Si se observa la zona en que las curvas se estabilizan, es posible notar que a menor μ es menor el tiempo que tardan los agentes en alcanzar el equilibrio, lo que en otras palabras significa que a menor μ menor será el tiempo en que los agentes lleguen a la zona de seguridad. Esto es un comportamiento teóricamente esperable, pues si el tiempo medio (μ) es bajo, se entiende que los agentes se encuentran en movimiento en un corto lapso contando desde el inicio del movimiento telúrico, permitiendo así que gran porcentaje de la población logre alcanzar sus zonas de seguridad rápidamente.

Si se analiza el porcentaje máximo de evacuados, existen diferencias obvias entre modelos, pues con Stoc-Agent (curvas verdes) se observa que a mayor μ , menor es el porcentaje de evacuados, pues puede que muchos de los agentes hayan sido víctimas del tsunami sin siquiera iniciar su evacuación. Esto no se aprecia en los resultados de NetLogo con congestión (curvas naranjas), sin embargo, cuando se analizan las simulaciones de NetLogo sin considerar la congestión (curvas amarillas), es posible notar que son muy similares a lo obtenido con Stoc-Agent.

- Analizando las víctimas, a simple vista se aprecia que en el Gráfico 4-7, las curvas tienen un comportamiento similar entre ambos modelos, sin embargo, para un tiempo medio (μ) de 3 minutos (línea continua), el porcentaje de víctimas de NetLogo con congestión se dispara alcanzando valores cercanos a un 18% en comparación con lo que arroja Stoc-Agent y NetLogo sin congestión, que es menor a un 5% de la población. Como se mencionó anteriormente, esto se debe a la consideración de la congestión, pues existe una mayor cantidad de gentes moviéndose al mismo tiempo.

A continuación, se muestra una tabla resumen con los resultados de evacuados y víctimas en escenario nocturno, para Stoc-Agent y NetLogo con y sin evaluación de la congestión, que permitirá poder realizar un mejor análisis de los gráficos antes presentados:

Tabla 4-4: Comparación de resultados de las simulaciones en escenario nocturno, para Stoc-Agent y NetLogo (con y sin consideración de la congestión).

u [min]	Escenario Nocturno					
	% Evacuados			% Víctimas		
	Stoc-Agent	NetLogo con Congestión	NetLogo sin Congestión	Stoc-Agent	NetLogo con Congestión	NetLogo sin Congestión
3	98,2	19,6	98,5	1,8	18,1	1,3
8	90,3	29,4	90,9	9,7	15,2	8,9
12	77,8	32,5	79,1	22,2	20,1	20,0

Fuente: Elaboración Propia.

Si se comparan los valores obtenidos en la Tabla 4-4, es posible darse cuenta de la importancia de la congestión peatonal en las simulaciones con NetLogo, pues si esta no se considera, la cantidad de víctimas obtenidas sigue un patrón bastante marcado y muy similar a los resultados obtenidos de las simulaciones con Stoc-Agent. Así para los tiempos medios de 3, 8 y 12 minutos, con Stoc-Agent se obtuvieron resultados de víctimas de 1,8%, 9,7% y 22,2% de la población, mientras que con NetLogo (sin congestión) las víctimas resultaron ser un 1,3%, 8,8% y 20,0% de la población. Sin embargo, al considerar la congestión, estos valores aumentan a un 18,1%, 15,2% y un 20,1% del total de agentes evacuados.

Lo mismo ocurre en el caso de los resultados de evacuados, pues para un μ de 3, 8 y 12 minutos, los evacuados obtenidos de Stoc-Agent ascienden a un total 98,2%, 90,3% y 77,8% de la población, respectivamente, lo que se asemeja bastante a lo obtenido con las simulaciones de NetLogo sin consideración de la congestión (98,5%, 90,9% y 79,1% de la población), y difiere completamente de los porcentajes de evacuados obtenidos al considerar la congestión (19,6%, 29,4% y 32,5%).

En base a todo lo anterior, queda demostrado que los resultados de las simulaciones en NetLogo son absolutamente sensibles a lo que ocurre con la consideración de la congestión o variación de la densidad peatonal, pues en una situación de pánico como sucede con una evacuación por tsunami, aumenta el estrés y la desesperación de la población, lo que conduce a mayor cantidad de zonas de embotellamiento.

Finalmente, en base a esto se comprueba que la congestión es un parámetro muy importante a evaluar, y no considerarla puede generar escenarios poco conservadores, pues los resultados son absolutamente sensibles a la variación de este factor.

4.4. Comparación con Simulacro de Evacuación de Tsunami

El jueves 05 de septiembre del 2019, se realizó un simulacro Sismo-Tsunami del borde costero en la región de Valparaíso, con cobertura en las ciudades: Algarrobo, Cartagena, Puchuncaví, San Antonio, Santo Domingo, Viña del Mar, Valparaíso, entre otras. El objetivo principal del simulacro a cargo de la ONEMI era simular un escenario “real” de un sismo con posterior tsunami en las costas de la región, donde los habitantes y población flotante evacuaran hacia zonas seguras (puntos de encuentro predefinidos), para así practicar y poner a prueba los planes de emergencia de los procesos de evacuación de la ciudadanía. Además, buscaba fomentar una cultura preventiva y de autocuidado.

Aproximadamente a las 11:30 horas (hora local, UTC-4), fue recibido el mensaje SAE con la alerta de emergencia que dio inicio al simulacro, junto con sirenas de emergencia e indicaciones de las autoridades locales.

El término según información enviada por ONEMI fue a las 12:07 pm, lo que indica un tiempo aproximado de 30 minutos en los cuales se realizó efectivamente la evacuación.

Entre Viña del Mar y Valparaíso, se desplegó un equipo de 14 personas, entre investigadores, alumnos y memoristas de la UTFSM, los cuales registraron los tiempos de salida de los evacuados de algunos establecimientos educacionales y el tiempo de llegada de evacuados (incluyendo peatones en general, no sólo de los establecimientos educacionales) a los Puntos de Encuentro, además del registro de las trayectorias de las rutas de evacuación del primer y último evacuado de los establecimientos educacionales.

De este trabajo de campo se obtuvieron resultados y videos que se pudieron utilizar para validar el trabajo realizado con VALPOEVAC y la modelación en Stoc-Agent.

La Figura 4-1 muestra imágenes del video grabado en la evacuación realizada en Valparaíso hacia la zona de seguridad ubicada al término de Av. Francia subiendo por calle Baquedano. Como se observa en la figura, no todos los peatones alcanzaron el punto de encuentro, muchos quedaron en el camino por subida Baquedano.



Figura 4-1: Recopilación de imágenes en punto de encuentro ubicado en calle Baquedano, simulacro de evacuación de tsunami en Valparaíso, 05 de septiembre de 2019.

Se desconoce realmente la cantidad total de evacuados en el sector costero, sin embargo, los peatones que fueron contabilizados en este punto de encuentro o cerca de él, ascienden a aproximadamente 1350, en base a esto se formó una curva de porcentaje de evacuados v/s tiempo de llegada (Ver Gráfico 4-8), la cual sirve para comparar y contrastar la información obtenida de los modelos.

A continuación, se muestra un gráfico que representa algunos de los datos obtenidos del simulacro junto con los resultados obtenidos de la simulación de NetLogo para un escenario diurno. Se destaca que los peatones comienzan a evacuar luego de que la ONEMI haya dado inicio al simulacro a través de alertas telefónicas y alarmas.

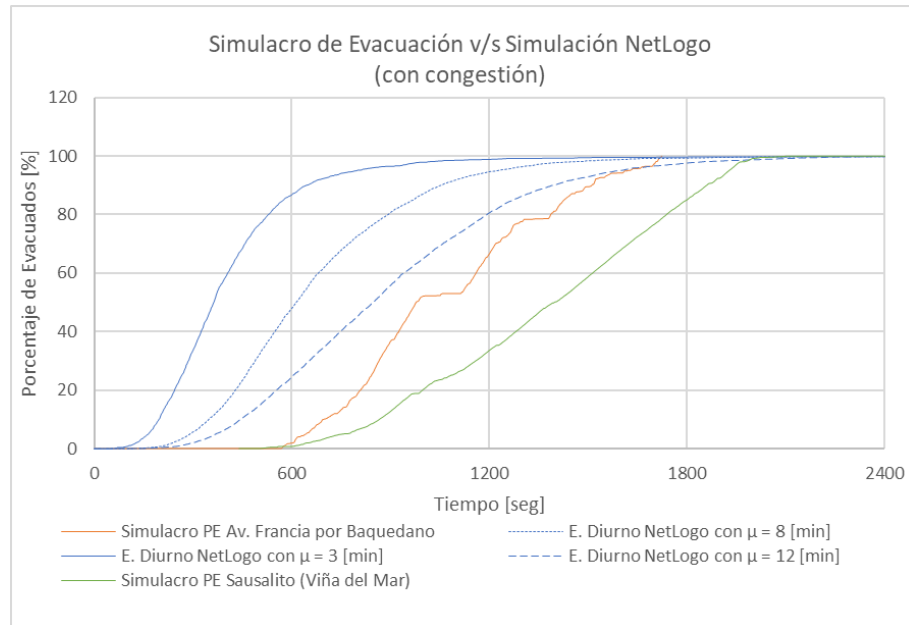


Gráfico 4-8: Porcentaje de evacuados en el tiempo en base al total de agentes que logran llegar al PE, para el punto de encuentro en Baquedano, Estadio Sausalito y los resultados de la simulación con NetLogo considerando la congestión.

Del Gráfico 4-8, correspondiente a los datos del simulacro realizado, se puede apreciar que los primeros evacuados comenzaron a llegar a los punto de encuentro luego de aproximadamente 10 minutos desde que se lanzó la alarma del simulacro, tanto en el PE de Baquedano como el de Sausalito.

A simple vista se aprecia que el modelo al ser más idealizado entrega mejores resultados, es decir, los agentes comienzan a llegar a los puntos de encuentro en un menor tiempo, lo que puede deberse a muchas de las razones discutidas en capítulos anteriores, pues en el caso real existen factores que no fueron considerados en los modelos.

Es importante tener en consideración que un simulacro de evacuación en general es un proceso organizado. Sin embargo, ante una situación de emergencia real el caos podría provocar un desorden difícil de cuantificar, por la cantidad de personas que involucra la evacuación, así que esto también se tuvo en consideración a la hora de comparar los resultados.

Además, no hay que olvidar que estas curvas son representativas pues el modelo representa el porcentaje en base a la totalidad de agentes y puntos de encuentro (PE), sin embargo, el simulacro controla sólo un porcentaje de la población que evacuó (la cual es desconocida) y dos PE en específico, uno ubicado en Valparaíso y otro en Viña del Mar, para contrastar la información.

Finalmente, se destaca que la curva del simulacro se asemeja bastante a los resultados obtenidos de la simulación con NetLogo, lo que permite demostrar que el modelo es una buena aproximación a la realidad y puede ser una buena base para continuar con estudios posteriores y así seguir analizando los parámetros que afectan las evacuaciones en caso de tsunami.

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajos Futuros

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones del trabajo de investigación realizado, las que finalmente serán acompañadas de trabajos futuros relacionados al mejoramiento del modelo antes descrito.

5.1. Conclusiones

Uno de los mayores problemas que se apreciaron del modelo VALPOEVAC es el tiempo que tarda en ejecutarse una simulación, aunque esto dependa netamente de aspectos relacionados al procesador del computador, memoria gráfica o acceso a memoria RAM, es decir, una desventaja de hardware. Se intentó realizar las simulaciones con paralelización para múltiples procesadores, sin embargo, NetLogo tiene limitaciones respecto a esto.

La línea límite de muerte no es un parámetro escogido a la ligera, pues a pesar de que la profundidad mínima de inundación que mata a un agente sea de 10 [cm], se asume que cuando el agua alcanza a una persona, ésta ya se encuentra en un peligro inminente.

Del análisis comparativo de modelos, la principal conclusión que se puede rescatar es la influencia que tiene la congestión (o densidad peatonal) en la obtención de los resultados, pues puede modificar considerablemente la velocidad de evacuación de los agentes, considerando que, a mayor densidad peatonal, menor será la velocidad máxima a la que se podrán mover los agentes.

Esto se ve reflejado en muchos de los gráficos presentados en el capítulo anterior, pues los resultados son muy sensibles a la congestión, es decir, una ligera variación en este parámetro puede significar un porcentaje de víctimas subestimado o sobre estimado. Por ejemplo, en una misma simulación en NetLogo, para un escenario diurno con tiempo medio de evacuación (μ) igual a 3 minutos, el porcentaje de víctimas corresponde a un 1,3% cuando no se evalúa la congestión, sin embargo, al considerar la congestión este valor asciende a un 18,1% del total de la población analizada.

Stoc-Agent quizá sea un programa más completo considerando que puede evaluar tanto la inundación como la evacuación de agentes, sin embargo, esto lo vuelve mucho más difícil de comprender y ejecutar, debido a que es un software de uso restringido, con poca documentación y un bajo o casi nulo acceso de información en la web. Por otra parte, NetLogo al ser de fuente libre y código abierto, permite un mayor acceso a información, incluso tutoriales, por lo tanto, es más sencillo de utilizar y aun siendo un programa más simple, que sólo evalúa la evacuación y no así la inundación, NetLogo permite crear modelos de alta complejidad en base a lo que se desee analizar, que en este caso en particular, fue la importancia de la evacuación temprana ante una emergencia de inundación por tsunami, pues mientras menor sea el tiempo que tarde la población en iniciar su evacuación, mayores serán sus oportunidades de sobrevivencia, disminuyendo así la tasa de víctimas en la mayoría de los casos. En cuanto al modelo VALPOEVAC en particular, se destaca que tiene una GUI amigable, lo que permite generar distintas simulaciones a través de la interacción directa entre el modelo y el usuario, sin la necesidad de que este último tenga un alto conocimiento del funcionamiento del programa.

Todo lo anterior da entender que NetLogo es una excelente herramienta para comenzar a analizar este tipo de fenómenos de comportamiento humano, pues es un método de fácil acceso y económico, a diferencia de lo que ocurre, por ejemplo, con los simulacros de tsunami, que involucran un gran esfuerzo humano. En cuanto a los resultados de las simulaciones es necesario recalcar que se trata de modelos, y por lo tanto es posible que no sean 100% representativos, pero se intentan acercar a la realidad dentro de sus limitaciones, sin embargo, lo principal para tener en cuenta y que se rescata de este análisis, es la importancia que tiene la congestión peatonal ante una eventualidad de este tipo, pues los resultados fueron absolutamente sensibles a este parámetro.

5.2. Trabajos Futuros

Como se vio en capítulos anteriores, VALPOEVAC tiene varias limitaciones, algunas asociadas directamente al programa NetLogo y otras en base a las capacidades del modelo como tal. Por esta razón es que a continuación se presentan algunos de los trabajos futuros que sería interesante abordar para mejorar los análisis de este tipo de fenómenos:

- Uno de los mayores problemas fue el tiempo de procesamiento de las simulaciones, que en algunos casos fue de 12 días. Por esta razón es que resulta sumamente importante mejorar este aspecto del modelo.
- Como se dijo anteriormente, la congestión o densidad peatonal juega un rol muy importante en los resultados de las simulaciones, por lo tanto, sería prudente probar con otros métodos de evaluación de congestión para así lograr analizar este parámetro de mejor forma.

Respecto a este mismo tema, otro aspecto interesante a evaluar podría ser la ubicación de los lugares donde ocurre la mayor congestión y en donde los agentes casi no se pueden mover. Para ello sería necesario incorporar una rutina en el código fuente, que permita “marcar” en el plano las zonas donde se producen los comúnmente llamados “cuellos de botella”, para así tener una visión global de las rutas más colapsadas al momento de la evacuación.

- El modelo asume que las rutas son vías completamente despejadas, sin embargo, esto en realidad no es así. En el marco del proyecto FONDECYT N° 11170024, Jorge León Canales busca analizar la importancia de las microvulnerabilidades y cuánto afectan en un proceso de evacuación (Álvarez et. al., 2018). En este aspecto, sería interesante incluir esta información al modelo VALPOEVAC para analizar cómo se alteran los resultados y generar una mayor base de datos a ser utilizados en futuras investigaciones al respecto.
- Incluir en la modelación un set de rutas alternativas y no sólo asignar la ruta de evacuación como la más cercana respecto de la posición inicial del agente.
- Analizar la cantidad de agentes que logran evacuar a determinado PE, esto se podría integrar a VALPOEVAC para así realizar análisis de capacidad de PE.
- Evaluar qué sucede con el volumen que ocupa un agente en el espacio. Así habría que integrar al modelo la evasión de personas cuando un agente adelanta a otro.
- La utilización de más tsunamis también podría ser beneficioso de analizar, así no sólo se utilizaría el evento de 1730 sino que se podrían considerar otros eventos y que al simular fueran escogidos de manera aleatoria por el código.

Como se aprecia, queda claro que hay un largo camino por recorrer en cuanto a la evaluación de evacuación por tsunami, sin embargo, VALPOEVAC es una excelente herramienta que puede ser utilizada para la investigación, sobre todo considerando que es la primera vez que se evalúa esto en la ciudad de Valparaíso.

Referencias

- Álvarez Castillo, G. A. (Diciembre de 2017). Simulación de evacuación por tsunami a micro-escala usando modelo basado en agentes, caso de estudio, Iquique, Chile (Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería). Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. Santiago de Chile.
- Álvarez, G., Quiroz, M., León, J., & Cienfuegos, R. (2018). Identification and classification of urban micro-vulnerabilities in tsunami evacuation routes for the city of Iquique, Chile. *Natural Hazards and Earth Sustem Sciences*, 2027-2039.
- Aránguiz, R., González, G., González, J., Catalán, P. A., Cienfuegos, R., Yagi, Y., . . . Rojas, C. (2016). "The 16 September 2015 Chile Tsunami from the Post-Tsunami Survey and Numerical Modeling Perspectives". *Pure and Applied Geophysics*. 173 (2), 333-348.
- Barrientos, S., & CSN. (02 de Mayo de 2017). *Centro Sismológico Nacional Universidad de Chile*. Obtenido de Informe sobre la secuencia sísmica en reg. de Valparaíso, abril de 2017: <http://www.csn.uchile.cl/informe-sobre-la-secuencia-sismica-en-reg-de-valparaiso-abril-de-2017/>
- Buchmueller, S., & Weidmann, U. (2006). *Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities*.
- Caparrini, F. S. (10 de Octubre de 2019). *cs.us.es*. Recuperado el 25 de Octubre de 2019, de NetLogo: Fundamentos: <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=179>
- Carvajal, M., Cisternas, M., & Catalán, P. A. (2017). *Source of the 1730 Chilean earthquake from historical records: Implications for the future tsunami hazard on the coast of Metropolitan Chile*. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 122, 3648-3660. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/2017JB014063>
- Carvajal, M., Cisternas, M., Catalán, P., & Gorigoitía, N. (2013). Estimación de la magnitud del terremoto de 1730 de Chile central, mediante modelación numérica, crónicas históricas y evidencias geológicas de su tsunami. *XXXIV Congreso Nacional y XIX Internacional de Geografía*, (págs. 42-47). Chillán.
- Castro, M. J., González, J. M., Macías, J., & Ortega, S. (2015). Tsunami-HySEA: A GPU-based model for Tsunami Early Warning Systems. *Proceedings of the XXIV Congress on Differential Equations and Applications XIV Congress on Applied Mathematics*, (págs. 1-6). Cádiz.
- Centro Sismológico Nacional, CSN. (s.f.). Sismicidad y Terremotos en Chile.
- Dawson, C., & Mirabito, C. M. (29 de September de 2008). The Shallow Water Equations. Obtenido de https://users.oden.utexas.edu/~arbogast/cam397/dawson_v2.pdf
- Dura, T., Cisternas, M., Horton, B. P., Ely, L. L., Nelson, A. R., Wesson, R. L., & Pilarczyk, J. E. (2015). Coastal evidence for Holocene subduction-zone earthquakes and tsunamis in central Chile. *Quaternary Science Reviews* 113, 93-111.
- Fidalgo V., M. (1995). *NPT 390: La conducta humana ante situaciones de emergencia: análisis de proceso en la conducta individual*.
- Ginovart, M. (2015). ¿Qué pueden ofrecer los modelos basados en agentes vivos en el contexto docente? *Modelling in Science Education and Learning - Volume 8(2)*, 5 - 25.
- Hart, P., Nilsson, N., & Raphael, B. (1968). "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minumum Cost Paths". *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetic*, Vol. 4, No. 2, (págs. 100-107).

- Helbing, D., & Johansson, A. (2010). Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics. En R. A. Meyers, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science 16* (págs. 6476-6495). Springer.
- Igualt, F. (2017). Evaluación de vulnerabilidad física y adaptabilidad post-tsunami en Concón, zona central de Chile. *Revista AUS* (22), 53-58.
- INE. (2018). *Síntesis de resultados Censo 2017*.
- Instituto de Información e Investigación de Mizuho, Inc. (22 de Diciembre de 2010). *Trabajo complementario de la función modelo multiagente. Manual de Usuario*.
- Klein, E., Vigny, C., Fleitout, L., Grandin, R., Jolivet, R., Rivera, E., & Métis, M. (2017). A comprehensive analysis of the Illapel 2015 Mw8.3 earthquake from GPS and InSAR data. *Earth and Planetary Science Letters* 469, 123-134.
- León, J., Mokrani, C., Catalán, P., Cienfuegos, R., & Femenías, C. (2019). The Role of Built Environment's Physical Urban Form in Supporting Rapid Tsunami Evacuations: Using Computer-Based Models and Real-World Data as Examination Tools. *Frontiers in Built Environment*, 1-15.
- Lester, P. (18 de July de 2005). A* Pathfinding for Beginners.
- Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra n. 10 ISSN 0214-4557*, 221-258.
- Mas S., E. A. (2012, Agust). Development of an Integrated Simulator for Tsunami Inundation and Agent Based Evacuation. Tohoku.
- Nanía-Escobar, L. S. (abril-junio de 2006). Análisis de la peligrosidad de la escorrentía pluvial en zonas urbana utilizando un enfoque numérico-experimental. *Ingeniería hidráulica en México*, vol. XXI, núm. 2, pp. 5-15.
- ONEMI. (2014). *Guía para la planificación y ejecución de simulacros de terremoto y tsunami, Sector Educación*.
- ONEMI. (2018). *Plan específico de emergencia por variable de riesgo - Tsunami V0.0*.
- PARI, I. A. (2015, March). STOC User's Manual. *Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal Areas*.
- Saragoni, R. (2011). El mega terremoto del Maule de 2010 : una lección de buena ingeniería, pero con sorpresas y nuevos desafíos. *Revista Anales, Séptima Serie, N°1*.
- Silva, L., & Moreno, C. (2014). *Proposición Modificación del Plan Regulador Comunal de Valparaíso: Sector el Almendral*. Valparaíso.
- Terremoto de Anoche. (17 de Agosto de 1906). *El Mercurio*.
- Tobler, W. (1993). *Three presentations on geographical analysis and modeling: Non-Isotropic Modeling, Speculations on the Geometry of Geography and Global Spatial Analysis*.
- UNESCO. (2012). ANÁLISIS DE RIESGOS DE DESASTRES EN CHILE. Santiago.
- USGS Earthquake Hazards Program. (7 de Agosto de 2019). Obtenido de https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official19600522191120_30/region-info

ANEXOS

Anexo A

VALPOEVAC: MANUAL DE USUARIO

A.1. Introducción

El modelo VALPOEVAC con el cual se realizaron las simulaciones en la presente memoria de título, es la versión final luego de una serie de modificaciones y correcciones, de un código realizado en NetLogo para la simulación de la evacuación por tsunami en la ciudad de Valparaíso como área de riesgo.

Este Manual de Usuario explica cómo utilizar VALPOEVAC para ejecutar modelos simples en base a lo que se mencionó anteriormente y para personalizar modelos futuros. Para conocer los aspectos del modelo en detalle se debe revisar el Capítulo 3 del presente documento.

El manual será realizado en tres secciones: 1) Inicialización del modelo, instalación, directorios, etc., 2) Se explicará cómo utilizar el modelo y cómo representar las salidas. 3) Finalmente, una sección de personalización para explicar cómo utilizar la herramienta para simular diferentes áreas.

A.2. Inicialización del Modelo

A.2.1. Estructura de los directorios y archivos

Para inicializar el programa, se proveerá de una carpeta llamada “*Modelo NetLogo 2019*” que contendrá las siguientes subcarpetas:

- **Salidas:** Es una carpeta que sólo posee el archivo “registro de evacuación 0” el cual se va sobre escribiendo. La carpeta es necesaria para recibir y guardar las salidas del programa. Si se modifica el nombre de esta carpeta y se ejecuta el modelo, aparecerá un mensaje de error. Es necesario asegurarse siempre tener la carpeta de salidas. Es importante destacar que los nuevos archivos de salida sobre escriben a cualquier archivo existente, por eso se recomienda limpiar la carpeta en cada simulación para no perder resultados.
- **BDEspacial:** Es una carpeta que contiene la información en formato GIS (.shp o raster) del área a simular.
- **BDTsunami:** Es una carpeta que contiene la información del Tsunami modelado en “Tsunami-HySEA”. Contiene 360 archivos que simulan la inundación cada 10 segundos.
- **BDAgentes:** Es una carpeta que contiene los agentes que fueron modelados en Stoc-Agent. Son archivos en formato .shp.

- VALPOEVAC.nlogo: Es un archivo de NetLogo que contiene la fuente del código del modelo y la interfaz gráfica de usuario ejecutable.
- Extensiones: Una carpeta que contiene las extensiones utilizadas en el modelo. Estas vienen por defecto con NetLogo, sin embargo, si alguna de ellas estuviese perdida, es posible copiarla desde aquí a la carpeta de extensión (*C:\Program Files\NetLogo 6.1.0\app\extensions*).

A.2.2. Instalación

1. Descargar e Instalar NetLogo 6.1.0 ¹⁹, es necesario pues versiones muy antiguas o muy nuevas podrían requerir pequeñas modificaciones en el código.
2. Copiar la carpeta “*Modelo NetLogo 2019*” el computador de quien desee ejecutar el modelo.
3. VALPOEVAC utiliza algunas extensiones de NetLogo que podrían no venir incluidas por defecto. Revisar la carpeta de extensiones y copiar aquellas faltantes en la carpeta de extensión de NetLogo. (*C:\Program Files\NetLogo 6.1.0\app\extensions*).

A.2.3. Licencia

NetLogo es un software gratis y de código abierto, el cual funciona bajo una licencia pública general (GNU General Public License). VALPOEVAC también es gratis y de fuente abierta siguiendo las licencias de NetLogo y las extensiones asociadas a él.

A.3. Uso del Modelo

A.3.1. Setup

Tal como se muestra en la Figura 3-2, el panel de control posee un botón llamado “Setup” que es el encargado de cargar el escenario a simular. Es posible seleccionar el escenario de simulación, es decir, la cantidad de agentes que se desee simular (Diurno, Nocturno o Aleatorio), seleccionar la distribución de los agentes en el espacio (según Stoc-Agent o Aleatoria), añadir los porcentajes correspondientes a cada grupo de agentes separados según rango etario, además del porcentaje de personas discapacitadas. Se puede definir el tiempo total de la simulación (TS), el tiempo medio de partida de los agentes (μ) basado en las curvas de partida. Se puede estimar víctimas considerando el interruptor de Tsunami y se puede crear un video cuyo título es posible ingresar manualmente. Por otra parte, se puede decidir la forma en que el modelo considera los puntos de encuentro a los que el agente deberá dirigirse para evacuar, modificar el título del modelo que aparece en la pantalla de simulación y finalmente se decide si se desea o no obtener archivos de salida. Todo lo anterior se debe realizar antes de presionar “Setup”.

¹⁹ NetLogo home page.

A.3.2. Corriendo el Modelo

Para ejecutar el modelo sólo es necesario presionar “go”. Los cálculos comienzan inmediatamente y la pantalla del mundo irá mostrando poco a poco el progreso de la evacuación. Además, gráficos y monitores irán mostrando los respectivos valores y línea de tiempo de los reportes. Para acelerar el cálculo debido a la memoria gráfica consumida, es posible desactivar la caja de “actualizar de la vista”, pues el modelo ya considera la opción de video y pantallazos al finalizar la simulación.

A.3.3. Formato de los datos de salida

Además de los pantallazos y el video, se obtienen además archivos que contienen la información de los gráficos en un formato .csv. También, se obtienen reportes de estados finales de los agentes y reportes de decisión en formato .txt. Finalmente, en este último formato se obtiene un registro de la evacuación, que mostrará variables de cada agente en la simulación, como coordenadas iniciales, longitud de la ruta seleccionada, posición final del agente, condición o estado final.

A.3.4. Análisis de Salidas

Esto será de acuerdo con los objetivos y necesidades del usuario. Es posible observar fácilmente la cantidad de agentes en cada estado al final de la simulación, la combinación de comportamientos de la población involucrada, diversos escenarios distintos de análisis, entre otras cosas.

A.4. Personalización del Modelo

VALPOEVAC está codificado en base al lenguaje de programación de NetLogo, sin embargo, es fácil de aprender y modificar para lograr objetivos específicos de simulación. Cada etapa de comportamiento de los agentes puede ser modificada para obtener diferentes comportamientos en la simulación.

A.4.1. Creando Nuevos Modelos

Para crear un nuevo escenario, es necesario incluir nuevos archivos espaciales GIS y de Tsunami (.asc) en las respectivas carpetas mencionadas anteriormente, con el área deseada a analizar. Como Valparaíso tiene una zona de puerto, su codificación para la evacuación tiende a ser algo particular, sin embargo, es posible modificar el código en la sección de búsqueda de ruta principalmente. Luego de esto, el nuevo modelo puede ser explorado de manera similar a lo que se ha hecho con Valparaíso.

Anexo B

VALPOEVAC: Código Fuente

El software utilizado fue NetLogo 6.1.0, con una primera versión del código en mayo de 2019, la versión final descrita a continuación, corresponde a la última actualización realizada en octubre de 2019. Es importante destacar que la información detrás de “;” corresponde a textos que no afectan en el funcionamiento del modelo.

```
,*****
;
extensions [gis pathdir vid] ; Activación de las extensiones utilizadas en el código, ubicadas en el directorio de instalación de NetLogo en
la carpeta "extensions".
,*****
;DEFINICIÓN DE VARIABLES
,*****
;
;VARIABLES GLOBALES
globals
[
  p-tierra    ; Parcelas de Tierra
  p-urbanas   ; Parcelas Urbanas (Edificaciones)
  p-mar       ; Parcelas de Mar
  p-calles    ; Parcelas de Calles
  p-c-puerto  ; Parcelas de Calles Puerto
  p-encuentro ; Parcelas de Puntos de Encuentro (o Salidas)
  p-e-puerto  ; Parcelas de Puntos de Encuentro ubicados en la salida de la zona de puerto o zona costera
  meta_parcial

  c-encuentro ; Capacidad de personas que tienen los puntos de encuentro (por ahora es infinita)

  escala      ; Escala para ajustar los parámetros de velocidad, tamaño, etc. al mundo NetLogo

  cont-tsu    ; Variable para ingresar el número del archivo de altura de la carpeta "BDTsunami"
  nombre-archivo-tsunami

  ; Variables para obtener la cantidad de peatones que decidieron evacuar, que va a depender de la distribución de probabilidad de "Rayleigh"
  para obtener el tiempo de inicio de la evacuación

  niños-decididos
  adolescentes-decididos
  ajovenes-decididos
  adultos-decididos
  ancianos-decididos
  peatones-decididos

  ; Variables para manejar la población a analizar

  pob          ; Indica la cantidad total de población a analizar
  pob-niños
  pob-adolescentes
  pob-ajovenes
  pob-adultos
  pob-ancianos

  ; El modelo asume 5 estados del agente: (1) Vivo y seco en la ciudad
  ;
  (2) Vivo y mojado en el agua en la ciudad
```

```

; (3) Víctima de Tsunami (Muerte)
; (4) Vivo en el Punto de Encuentro (Escape)
; (5) No consciente de la amenaza de tsunami
; "El quinto estado, se activa sólo si el agente no se decide a evacuar antes de la llegada de la primer ola, es decir, si su tiempo de inicio de
evacuación es mayor al tiempo de llegada de la ola"
; Con lo anterior se define la cantidad de peatones en los distintos estados

```

```

niños-1
adolescentes-1
ajovenes-1
adultos-1
ancianos-1
peatones-1

```

```

niños-2
adolescentes-2
ajovenes-2
adultos-2
ancianos-2
peatones-2

```

```

niños-3
adolescentes-3
ajovenes-3
adultos-3
ancianos-3
peatones-3

```

```

niños-4
adolescentes-4
ajovenes-4
adultos-4
ancianos-4
peatones-4

```

```

niños-5
adolescentes-5
ajovenes-5
adultos-5
ancianos-5
peatones-5

```

```

; Parámetros para el algoritmo de búsqueda A*

```

```

origen    ; Variable que entrega la posición de inicio del peatón (Inicio de la ruta de evacuación)
objetivo  ; Variable que entrega la posición del objetivo del peatón (Punto de Encuentro)
color-espacio ; Variable utilizada para definir el color de las parcelas por las cuales puede transitar el peatón para su evacuación
heurístico ; Para obtener el valor de costo de ir de una parcela al objetivo

```

```

; Parámetros para la disminución de la velocidad según la densidad de personas

```

```

km ; Variable para evaluar la reducción de velocidad del peatón según la densidad de congestión. Es el máximo valor de k
d ; Diámetro para definir circunferencia alrededor del agente y verificar la congestión
Nv ; Número total de vecinos alrededor del agente, en un radio de d/2 metros
k ; Parametro para evaluar la densidad, varía dependiendo del agente analizado y su entorno
]

```

```

; RAZAS O ESPECIES

```

```

breed [ niños niño ]
breed [ adolescentes adolescente ]
breed [ ajovenes ajoven ]
breed [ adultos adulto ]
breed [ ancianos anciano ]
breed [ peatones peaton ]

```

```

; VARIABLES INTRÍNECAS DE CADA RAZA O ESPECIE (CARACTERÍSTICAS)

```

```

niños-own [ dim velocidad stage camino inicio meta L heuri td estado vmax vmin]
adolescentes-own [ dim velocidad stage camino inicio meta L heuri td estado vmax vmin]

```

```
ajovenes-own [ dim velocidad stage camino inicio meta L heuri td estado vmax vmin]
adultos-own [ dim velocidad stage camino inicio meta L heuri td estado vmax vmin]
ancianos-own [ dim velocidad stage camino inicio meta L heuri td estado vmax vmin]
peatones-own [ dim velocidad stage camino inicio meta L heuri td estado vmax vmin]
```

; VARIABLES INTRÍNSECAS DE LAS PARCELAS

```
patches-own [ zt zb f g h padre abierto? ]
```

;Abierto? 0= No Disponible - 1= Abierto - 2= Cerrado

;zt es la altura que alcanza el tsunami - zb es la altura de la batimetría o terreno, para la modificación de la velocidad.

```
,*****
;
; CONDICIONES INICIALES (SETUP)
,*****
```

```
to setup ; PREPARACIÓN
  ca ; Limpia todas las variables
  reset-ticks ; Resetear los ticks del programa
  valores-iniciales
  cargar-espacio
  cargar-población
  display
end
```

```
,***** VALORES INICIALES *****
```

```
to valores-iniciales
  random-seed 100 ; Asegura repetición de escenarios, es decir, replicabilidad del modelo
  ; Las siguientes acciones son para establecer el contador de población en 0
```

```
set niños-decididos 0
set adolescentes-decididos 0
set adultos-decididos 0
set ancianos-decididos 0
set peatones-decididos 0
```

```
set niños-1 0
set adolescentes-1 0
set adultos-1 0
set ancianos-1 0
set peatones-1 0
```

```
set niños-2 0
set adolescentes-2 0
set adultos-2 0
set ancianos-2 0
set peatones-2 0
```

```
set niños-3 0
set adolescentes-3 0
set adultos-3 0
set ancianos-3 0
set peatones-3 0
```

```
set niños-4 0
set adolescentes-4 0
set adultos-4 0
set ancianos-4 0
set peatones-4 0
```

```
set niños-5 0
set adolescentes-5 0
set adultos-5 0
set ancianos-5 0
set peatones-5 0
```

```

set pob-niños 0
set pob-adolescentes 0
set pob-ajovenes 0
set pob-adultos 0
set pob-ancianos 0

if Distribucion_Agentes = "Aleatoria" [ ifelse Escenario = "Diurno" [set pob 32492] [ifelse Escenario = "Nocturno" [set pob 13347] [set
pob read-from-string user-input "Ingresa Población a analizar" ] ] ]

if Tsunami [set cont-tsu 0]

set escala 6 ; Parámetro muy importante! Sirve para escalar parámetros al mundo NetLogo (Se escoge esta escala pues el raster de
inundación y betimetría tienen celdas X,Y de 6x6

; Asigna a las parcelas una etiqueta vacía de color negro e inicializa algunas de sus variables intrínsecas
ask patches [set plabel "" set plabel-color black]

if Grabar-Video [vid:reset-recorder vid:start-recorder]

let dir-temp (word pathdir:get-model-path "//Salidas")
set-current-directory dir-temp
file-close-all
file-open (word "Registro de Evacuación " behaviorspace-run-number " .txt")
file-print "Tipo,ID,x-inicio,y-inicio,x-meta,y-meta,x-fin,y-fin,L0-Camino,L1-Camino,td [min],tsh [min],zt [m],Estado\r\n"
file-close
set-current-directory pathdir:get-model-path
end

;***** CARGAR EL ESPACIO *****

to cargar-espacio
; Lo primero que se hace es modificar el espacio de NetLogo
; Para ello se redefine el tamaño de la grilla según la escala utilizada
; Según el raster de inundación y topografía, el espacio definido es de 4080x4128 metros
let x (4080 / escala) - 1
let y (-1) * ((4128 / escala) - 1)
resize-world 0 x y 0 ; 0 680 -688 0

set-patch-size 1.2 ; Grilla con celdas (X,Y) de 6mx6m (Una parcela equivale a 1.2 pixeles)

;*** INFORMACIÓN DE GIS ***
let dir-temp (word pathdir:get-model-path "//BDEspacial")
set-current-directory dir-temp
let Tierra gis:load-dataset "Tierra.shp"
let Urbano gis:load-dataset "Urbano.shp"
let Calles gis:load-dataset "Calles Plan.shp"
let Callesp gis:load-dataset "Calles Puerto.shp"
let Mar gis:load-dataset "z_04_000000.asc"
let P-E gis:load-dataset "P_E.shp" ; Puntos de Encuentro
let P-Ep gis:load-dataset "P_Puerto.shp" ; Puntos de Encuentro puerto
let Batimetria gis:load-dataset "batimetria.asc"

; La siguiente primitiva se utiliza para crear una envolvente con los archivos .shp ingresados, para que se ajusten bien al mundo NetLogo
gis:set-world-envelope ( gis:envelope-union-of (gis:envelope-of Tierra)
(gis:envelope-of Urbano)
(gis:envelope-of Calles) Las calles no se considerarán en la envolvente, pues no es necesario, ya queda
contenida dentro del mundo
(gis:envelope-of Mar)
(gis:envelope-of P-E)
(gis:envelope-of Batimetria)
)

; A continuación, se procede a definir las propiedades de las parcelas, en base al archivo .shp que intersecten
set p-tierra patches gis:intersecting Tierra
set p-urbanas patches gis:intersecting Urbano
set p-calles patches gis:intersecting Calles
set p-c-puerto patches gis:intersecting Callesp
gis:apply-raster Batimetria zt
gis:apply-raster Mar zt
ask patches with [zt = 0][set zt -9999]

```

```

let min-mar gis:minimum-of Mar
let max-mar gis:maximum-of Mar
set p-mar patches with [(zt >= min-mar) and (zt <= max-mar)]
set p-encuentro patches gis:intersecting P-E
set p-e-puerto patches gis:intersecting P-Ep

; Posteriormente se le asignan características a las parcelas
ask p-mar [set pcolor scale-color blue zt min-mar max-mar]
ask p-tierra [set pcolor 37]
ask p-calles [set pcolor white]
ask p-c-puerto [set pcolor yellow]
gis:set-drawing-color gray gis:fill Urbano 0.05 ; Grosor de línea del .shp urbano de color plomo
ask p-encuentro [
    sprout 1 [set color lime set size 6 set shape "circle 2" stamp die]
]
ask p-e-puerto [sprout 1 [set color violet set size 6 set shape "star" stamp die]]
set-current-directory pathdir:get-model-path
output-print (word "Tiempo en cargar datos espaciales: " timer " seg.")
reset-timer
end

,***** CARGAR POBLACIÓN *****

to cargar-población
  if Distribucion_Agentes = "Stoc-Agent"
  [
    let dir-temp (word pathdir:get-model-path "//BDAgentes")
    set-current-directory dir-temp
    ifelse Escenario = "Aleatorio" [user-message "Debes escoger escenario diurno o nocturno para la distribución de agentes según StockAgent"]
    [
      let agentes gis:load-dataset (word "u_" u "_" Escenario ".shp")
      ; Se crean listas vacías con los valores del .shp ingresado
      let numero_agente []
      let XCord []
      let YCord []
      let Velocidad_agente []
      let tiempo_partida []

      ; Extrae un listado con cada vector de característica del .shp y se lo asigna a cada lista vacía
      let características gis:feature-list-of agentes
      foreach características [Vector-Feature -> set numero_agente lput gis:property-value Vector-Feature "Agente" numero_agente
                              set XCord lput gis:property-value Vector-Feature "XUTM19S" XCord
                              set YCord lput gis:property-value Vector-Feature "YUTM19S" YCord
                              set Velocidad_agente lput gis:property-value Vector-Feature "Velocidad" Velocidad_agente
                              set tiempo_partida lput gis:property-value Vector-Feature "td" tiempo_partida
                              ]
      let n (length numero_agente)
      clear-turtles
      create-ordered-peatones n + 1
      ask peatones with [who = 0] [die]
      ;Recorre la lista de numero_agente [1, 2, 3, ... n] y a cada agente le asigna los valores establecidos.
      foreach numero_agente
      [a ->
        ask peatones with [who = a] [
          let x-ini item (a - 1) XCord
          set xcor ((x-ini - 253618.8) / escala - 1)
          let y-ini item (a - 1) YCord
          set ycor ((6343058 - y-ini) / escala - 1) * (-1)
          set velocidad (item (a - 1) Velocidad_agente) / escala
          set td (item (a - 1) tiempo_partida) / 60 ; para pasarlo a minutos
        ]
      ]
      ask peatones [
        set color black set size (1 / escala) * 12 set shape "circle"
        set inicio patch-here
        set meta patch-here
        set heuri random 5
        set stage 0
      ]
    ]
  ]

```

```

set pob count peatones
set-current-directory pathdir:get-model-path
]
]
if Distribucion_Agentes = "Aleatoria"
[clear-turtles
create-niños (round(pob * %-de-Niños / 100)) [set dim 0.6 set vmin 0.59 set vmax 1.44 let x1 random-float 1 set velocidad ((vmax - vmin)
* x1 + vmin) / escala]
create-adolescentes (round(pob * %-de-Adolescentes / 100)) [set dim 1.0 set vmin 1.5 set vmax 1.62 let x1 random-float 1 set velocidad
((vmax - vmin) * x1 + vmin) / escala]
create-ajovenes (round(pob * %-de-AdultosJóvenes / 100)) [set dim 1.0 set vmin 1.49 set vmax 1.55 let x1 random-float 1 set velocidad
((vmax - vmin) * x1 + vmin) / escala]
create-adultos (round(pob * %-de-Adultos / 100)) [set dim 1.0 set vmin 1.21 set vmax 1.47 let x1 random-float 1 set velocidad ((vmax -
vmin) * x1 + vmin) / escala]
create-ancianos (round(pob * %-de-Ancianos / 100)) [set dim 1.0 set vmin 0.74 set vmax 1.19 let x1 random-float 1 set velocidad ((vmax
- vmin) * x1 + vmin) / escala]

let pea (turtle-set niños adolescentes ajovenes adultos ancianos)
ask pea [move-to one-of p-calles set color black set size (1 / escala * dim) * 12 set shape "circle"
set td floor ( random-td-rayleigh random-float 1 u )
set inicio patch-here
set meta patch-here
set heuri random 5
set stage 0
]
set pob-niños count niños
set pob-adolescentes count adolescentes
set pob-ajovenes count ajovenes
set pob-adultos count adultos
set pob-ancianos count ancianos
]
actualizar-texto
output-print (word "Tiempo en cargar datos de población: " timer " seg.")
set-current-plot "Tiempo de Preparación"
histogram [td] of turtles

end

;***** PROGRAMA *****

to go
if ticks = 0 [reset-timer no-display] ; Se resetea el cronómetro
if Grabar-Video [vid:record-view]
ask turtles
[decisión-de-comienzo
decisión-de-P_E
buscar-ruta
seguir-ruta
buscar-ruta-P_E
]

if Tsunami [if ticks >= 0 [correr-tsunami] ] ; Asumiendo que los raster se consideran desde el inicio de la modelación
Salidas
actualizar-texto
tick
Gráficos

; *** CONDICIÓN DE TÉRMINO ***

if ticks = (TS * 60) ; TS es el tiempo total de simulación del modelo ingresado en minutos
[ output-print (word "Tiempo Total:" timer " seg.")
if Archivos-de-Salida
[let dir-temp (word pathdir:get-model-path "//Salidas")
set-current-directory dir-temp

let nombre (word "A salvo en Punto de Encuentro _" behaviorspace-run-number ".csv")
export-plot "A salvo en Punto de Encuentro" nombre

set nombre (word "Víctimas del Tsunami _" behaviorspace-run-number ".csv")
export-plot "Víctimas del Tsunami" nombre

```

```

set nombre (word "No conscientes de amenaza de Tsunami _" behaviorspace-run-number ".csv")
export-plot "No conscientes de amenaza de Tsunami" nombre

set-current-directory pathdir:get-model-path
]

if Grabar-Video ; Comandos para guardar la grabación realizada durante la simulación
[
  let dir-temp (word pathdir:get-model-path "//Salidas")
  set-current-directory dir-temp
  ifelse file-exists? (word Nombre-Video ".mp4") [let nuevo-nombre user-input "El nombre del archivo ya existe! Tipea uno nuevo o
presiona detener"
                                         ifelse (word nuevo-nombre ".mp4") != nobody [set Nombre-Video nuevo-nombre vid:save-recording
Nombre-Video][vid:reset-recorder]]
                                         [vid:save-recording Nombre-Video]
  set-current-directory pathdir:get-model-path
]

display
Toma-Pantallazos
Reportes
no-display
stop
]
end

,*****

to decisión-de-comienzo
if stage = 0 and ( ticks = round (td * 60) ) ; Si los ticks son iguales al td de cada agente en segundos
[set stage 1
 ifelse Distribucion_Agentes = "Aleatoria"
 [
  if breed = niños [set niños-decididos niños-decididos + 1]
  if breed = adolescentes [set adolescentes-decididos adolescentes-decididos + 1]
  if breed = ajovenes [set ajovenes-decididos ajovenes-decididos + 1]
  if breed = adultos [set adultos-decididos adultos-decididos + 1]
  if breed = ancianos [set ancianos-decididos ancianos-decididos + 1]
 ]
 [set peatones-decididos peatones-decididos + 1]
]
end
,*****

to decisión-de-P_E
if stage = 1
[ifelse P_E-Aleatorio [set meta one-of p-encuentro] ; Deja la meta como uno de los puntos de encuentro
  [if [pcolor] of inicio = yellow
    [set meta_parcial one-of p-e-puerto with-min [distance myself]
    ifelse meta_parcial = patch 443 -371 [set meta patch 431 -543]
    [set meta one-of p-encuentro with-min [distance meta_parcial]]] ; Deja la meta como el punto de encuentro con menor
distancia al punto de puerto más cercano al agente
    if [pcolor] of inicio = white [set meta one-of p-encuentro with-min [distance myself]]
    if ([pcolor] of patch-here != yellow) and ([pcolor] of patch-here != white)[set meta_parcial min-one-of patches with [pcolor
= white] [distance myself] set meta one-of p-encuentro with-min [distance meta_parcial]]
  ]
  set stage 2]
end
,*****

to buscar-ruta
if stage = 2 [
  let ruta nobody
  if [pcolor] of patch-here = yellow
  [set ruta min-one-of patches with [pcolor = white] [distance meta_parcial] set stage 3 ; Deja la ruta como la parcela blanca más
cercana al agente y deja stage en 3
  set camino Astar patch-here ruta yellow 4]; Astar [setup-origen setup-objetivo setup-color comportamiento]
]

```

```

; Se considera el comportamiento como 4, es decir, distancia euclidiana con desempate, sin embargo, se puede dejar como "heuri"
para que quede aleatorio en cada agente.
; camino quedará como una lista que contiene la ruta hacia el objetivo (P_E)
if [pcolor] of patch-here = white
[set stage 5 set camino Astar patch-here meta white 4]; Deja la ruta como el punto de encuentro más cercano al agente, y deja
stage en 5
if ([pcolor] of patch-here != yellow) and ([pcolor] of patch-here != white) [set ruta min-one-of patches with [pcolor = white]
[distance myself] set stage 3 set camino Astar patch-here ruta 37 4]
]
end

,*****
,

to seguir-ruta
if stage = 3 [ifelse not empty? camino
[ let siguiente first camino
face siguiente

; Para obtener el factor de la pendiente
let dist 0
let pendiente 0
let factor 1
ask patch-here [set dist distance-nowrap siguiente]
let diffz ([zb] of siguiente - [zb] of patch-here) / escala
if dist != 0 [set pendiente (diffz / dist)]
if pendiente != 0 [set factor precision (1.2 * exp (-3.5 * abs (pendiente + 0.05))) 2]
let factor-pendiente factor
;

; Para una caminata random de 10 grados de fluctuación
let caminata ["iz" "der"]
ifelse one-of caminata = "iz" [lt random 6][rt random 6]
; Esto hace que en cada orientación a la siguiente parcela, el agente gire entre 0 y 5 grados a la izquierda o derecha aleatoriamente
;

fd ajustar-velocidad * factor-pendiente
if patch-here = siguiente
[set camino but-first camino]
]
[set stage 4]
]

if stage = 5 [ifelse not empty? camino ; Si la variable camino no está vacía
[ let siguiente first camino ; deja siguiente como el primer elemento de la lista
face siguiente ; El agente se orienta hacia siguiente

; Para obtener el factor de la pendiente
let dist 0
let pendiente 0
let factor 1
ask patch-here [set dist distance-nowrap siguiente]
let diffz ([zb] of siguiente - [zb] of patch-here) / escala
if dist != 0 [set pendiente (diffz / dist)]
if pendiente != 0 [set factor precision (1.2 * exp (-3.5 * abs (pendiente + 0.05))) 2]
let factor-pendiente factor
;

; Para una caminata random de 10 grados de fluctuación
let caminata ["iz" "der"]
ifelse one-of caminata = "iz" [lt random 6][rt random 6]
; Esto hace que en cada orientación a la siguiente parcela, el agente gire entre 0 y 5 grados a la izquierda o derecha aleatoriamente
;

fd ajustar-velocidad * factor-pendiente
if patch-here = siguiente
[set camino but-first camino] ; Elimina el primer elemento de camino
]
; La siguiente condición cuenta la cantidad de niños vivos en el refugio (Estado (4))
[if patch-here = meta [ifelse Distribucion_Agentes = "Aleatoria"
[

```

```

        if breed = niños [set niños-4 niños-4 + 1]
        if breed = adolescentes [set adolescentes-4 adolescentes-4 + 1]
        if breed = ajovenes [set ajovenes-4 ajovenes-4 + 1]
        if breed = adultos [set adultos-4 adultos-4 + 1]
        if breed = ancianos [set ancianos-4 ancianos-4 + 1]
        ]
        [set peatones-4 peatones-4 + 1]
        set color yellow
        stamp
        exportar-registro
        die]
    ]
]

end

,*****

to buscar-ruta-P_E
  if stage = 4 [set camino []
    set camino Astar patch-here meta white 4; Astar [setup-origen setup-objetivo setup-color]
    set L length camino ; L es la cantidad de elementos que tiene la lista camino
    set stage 5
  ]
end

,*****

to correr-tsunami
  let dir-temp (word pathdir:get-model-path "//BDTsunami")
  set-current-directory dir-temp
  if ticks mod 10 = 0 [ ; mod se utiliza para controlar que los ticks al correr el tsunami sean múltiplos de 10
    if cont-tsu = 0 [set nombre-archivo-tsunami ("z_04_000000.asc")]
    if cont-tsu > 0 and cont-tsu < 100 [set nombre-archivo-tsunami (word "z_04_0000" cont-tsu ".asc")]
    if cont-tsu >= 100 and cont-tsu < 1000 [set nombre-archivo-tsunami (word "z_04_000" cont-tsu ".asc")]
    if cont-tsu >= 1000 [set nombre-archivo-tsunami (word "z_04_00" cont-tsu ".asc")]

    let inundación gis:load-dataset nombre-archivo-tsunami
    gis:set-world-envelope (gis:envelope-of inundación)
    gis:apply-raster inundación zt
    ask patches with [zt = 0][set zt -9999]

    let min-inundación gis:minimum-of inundación
    let max-inundación gis:maximum-of inundación

    ask patches [if (zt >= min-inundación) and (zt <= max-inundación) [set pcolor scale-color blue zt min-inundación max-inundación]]
    display
    no-display
    set cont-tsu cont-tsu + 10
  ]
  set-current-directory pathdir:get-model-path
end

,*****

to Salidas
  ifelse Distribucion_Agentes = "Aleatoria"
  [
    let pea (turtle-set niños adolescentes adultos ancianos)
    ask pea [let HZ [zt] of patch-here
      ; Estado (1): Agente vivo y seco en la ciudad
      if HZ = -9999 and ticks = (TS * 60) - 1 [if breed = niños [set niños-1 niños-1 + 1]
        if breed = adolescentes [set adolescentes-1 adolescentes-1 + 1]
        if breed = ajovenes [set ajovenes-1 ajovenes-1 + 1]
        if breed = adultos [set adultos-1 adultos-1 + 1]
        if breed = ancianos [set ancianos-1 ancianos-1 + 1]
        set color 63
        stamp
        exportar-registro
        die]
      ]
  ]

```

```

; Estado (2): Agente vivo y mojado en el agua en la ciudad
if HZ > 0 and HZ < 0.1 and ticks = (TS * 60) - 1 [if breed = niños [set niños-2 niños-2 + 1]
    if breed = adolescentes [set adolescentes-2 adolescentes-2 + 1]
    if breed = ajovenes [set ajovenes-2 ajovenes-2 + 1]
    if breed = adultos [set adultos-2 adultos-2 + 1]
    if breed = ancianos [set ancianos-2 ancianos-2 + 1]
    set color violet
    stamp
    exportar-registro
    die]

if HZ >= 0.1 [
    ifelse ([td] of self) * 60 > ticks
; Estado (5): Agente víctima no consciente de la amenaza de tsunami (Casualty)
    [if breed = niños [set niños-5 niños-5 + 1]
    if breed = adolescentes [set adolescentes-5 adolescentes-5 + 1]
    if breed = ajovenes [set ajovenes-5 ajovenes-5 + 1]
    if breed = adultos [set adultos-5 adultos-5 + 1]
    if breed = ancianos [set ancianos-5 ancianos-5 + 1]
    set color orange
    stamp
    exportar-registro
    die
    ]
; Estado (3): Agente víctima consciente de la amenaza de tsunami (Casualty)
    [if breed = niños [set niños-3 niños-3 + 1]
    if breed = adolescentes [set adolescentes-3 adolescentes-3 + 1]
    if breed = ajovenes [set ajovenes-3 ajovenes-3 + 1]
    if breed = adultos [set adultos-3 adultos-3 + 1]
    if breed = ancianos [set ancianos-3 ancianos-3 + 1]
    set color red
    stamp
    exportar-registro
    die
    ]
]

]

[ask peatones [let HZ [zt] of patch-here
; Estado (1): Agente vivo y seco en la ciudad
if HZ = -9999 and ticks = (TS * 60) - 1 [
    set peatones-1 peatones-1 + 1
    set color 63
    stamp
    exportar-registro
    die]
; Estado (2): Agente vivo y mojado en el agua en la ciudad
if HZ > 0 and HZ < 0.1 and ticks = (TS * 60) - 1 [
    set peatones-2 peatones-2 + 1
    set color violet
    stamp
    exportar-registro
    die]

if HZ >= 0.1 [
    ifelse ([td] of self) * 60 > ticks
; Estado (5): Agente víctima no consciente de la amenaza de tsunami (Casualty)
    [
        set peatones-5 peatones-5 + 1
        set color orange
        stamp
        exportar-registro
        die
    ]
; Estado (3): Agente víctima consciente de la amenaza de tsunami (Casualty)
    [
        set peatones-3 peatones-3 + 1
        set color red
        stamp
    ]
]

```

```
        exportar-registro
        die
      ]
    ]
  end

,*****

to exportar-registro ; Procedimiento de tortugas
  let dir-temp (word pathdir:get-model-path "//Salidas")
  set-current-directory dir-temp
  file-close-all
  file-open (word "Registro de Evacuación " behaviorspace-run-number " .txt")
  if [color] of self = 63 [set estado 1]
  if [color] of self = violet [set estado 2]
  if [color] of self = red [set estado 3]
  if [color] of self = yellow [set estado 4]
  if [color] of self = orange [set estado 5]
  if camino = 0 [set camino []]
  file-print (word breed " " who " " [pxcor] of inicio " " [pycor] of inicio " "
    [pxcor] of meta " " [pycor] of meta " " [pxcor] of patch-here " "
    [pycor] of patch-here " " L " " (L - length camino) " " td " "
    precision (ticks / 60) 1 " " [zt] of patch-here " " estado "\r\n")
  file-close
  set-current-directory pathdir:get-model-path
end
```

```
,*****

to actualizar-texto
  ask patch 150 -588 [set plabel (word Título " (u = " u " [min]))"]
  ask patch 150 -598 [set plabel (word "Escenario " Escenario)]
  ask patch 150 -608 [set plabel reloj]
end
```

```
,*****

to Gráficos

  ifelse Distribucion_Agentes = "Aleatoria" [
    set-current-plot "Decididos a Evacuar"
    if pob-niños > 0
    [ set-current-plot-pen "Niños"
      plot (niños-decididos / pob-niños) * 100
    ]
    if pob-adolescentes > 0
    [ set-current-plot-pen "Adolescentes"
      plot (adolescentes-decididos / pob-adolescentes) * 100
    ]
    if pob-ajovenes > 0
    [ set-current-plot-pen "A-Jovenes"
      plot (ajovenes-decididos / pob-ajovenes) * 100
    ]
    if pob-adultos > 0
    [ set-current-plot-pen "Adultos"
      plot (adultos-decididos / pob-adultos) * 100
    ]
    if pob-ancianos > 0
    [ set-current-plot-pen "Ancianos"
      plot (ancianos-decididos / pob-ancianos) * 100
    ]
    set-current-plot "Víctimas del Tsunami"
    if pob-niños > 0
    [ set-current-plot-pen "Niños"
      plot (niños-3 / pob-niños) * 100
    ]
    if pob-adolescentes > 0
    [ set-current-plot-pen "Adolescentes"
```

```

    plot (adolescentes-3 / pob-adolescentes) * 100
  ]
  if pob-ajovenes > 0
  [ set-current-plot-pen "A-Jovenes"
    plot (ajovenes-3 / pob-ajovenes) * 100
  ]
  if pob-adultos > 0
  [ set-current-plot-pen "Adultos"
    plot (adultos-3 / pob-adultos) * 100
  ]
  if pob-ancianos > 0
  [ set-current-plot-pen "Ancianos"
    plot (ancianos-3 / pob-ancianos) * 100
  ]
  set-current-plot "A salvo en Punto de Encuentro"
  if pob-niños > 0
  [ set-current-plot-pen "Niños"
    plot (niños-4 / pob-niños) * 100
  ]
  if pob-adolescentes > 0
  [ set-current-plot-pen "Adolescentes"
    plot (adolescentes-4 / pob-adolescentes) * 100
  ]
  if pob-ajovenes > 0
  [ set-current-plot-pen "A-Jovenes"
    plot (ajovenes-4 / pob-ajovenes) * 100
  ]
  if pob-adultos > 0
  [ set-current-plot-pen "Adultos"
    plot (adultos-4 / pob-adultos) * 100
  ]
  if pob-ancianos > 0
  [ set-current-plot-pen "Ancianos"
    plot (ancianos-4 / pob-ancianos) * 100
  ]
  set-current-plot "No conscientes de amenaza de Tsunami"
  if pob-niños > 0
  [ set-current-plot-pen "Niños"
    plot (niños-5 / pob-niños) * 100
  ]
  if pob-adolescentes > 0
  [ set-current-plot-pen "Adolescentes"
    plot (adolescentes-5 / pob-adolescentes) * 100
  ]
  if pob-ajovenes > 0
  [ set-current-plot-pen "A-Jovenes"
    plot (ajovenes-5 / pob-ajovenes) * 100
  ]
  if pob-adultos > 0
  [ set-current-plot-pen "Adultos"
    plot (adultos-5 / pob-adultos) * 100
  ]
  if pob-ancianos > 0
  [ set-current-plot-pen "Ancianos"
    plot (ancianos-5 / pob-ancianos) * 100
  ]
]
[
; Para el caso de población con distribución Stoc-Agent
set-current-plot "Decididos a Evacuar"
set-current-plot-pen "Peatones"
plot (peatones-decididos / (pob)) * 100

set-current-plot "Víctimas del Tsunami"
set-current-plot-pen "Peatones"
plot (peatones-3 / (pob)) * 100

set-current-plot "A salvo en Punto de Encuentro"
set-current-plot-pen "Peatones"
plot (peatones-4 / (pob)) * 100

```

```
set-current-plot "No conscientes de amenaza de Tsunami"
set-current-plot-pen "Peatones"
plot (peatones-5 / (pob)) * 100
]
end

,*****

to Toma-Pantallazos
  let dir-temp (word pathdir:get-model-path "//Salidas")
  set-current-directory dir-temp
  let nombre (word behaviorspace-run-number "K_" ticks ".png")
  export-view nombre
  export-interface (word "Modelo_" behaviorspace-run-number "_K" ticks ".png")
  set-current-directory pathdir:get-model-path
end

,*****

to Reportes
  let dir-temp (word pathdir:get-model-path "//Salidas")
  set-current-directory dir-temp
  file-close-all

  ifelse Distribucion_Agentes = "Aleatoria" [
    file-open ("Reporte de Decisión.txt")
    file-print (niños-decididos + adolescentes-decididos + adultos-decididos + ancianos-decididos)
    file-close

    file-open ("Reporte de Estados.txt")
    file-print ("Estado,Cantidad Agentes\r\n")
    file-print (word 1 ",," (niños-1 + adolescentes-1 + ajovenes-1 + adultos-1 + ancianos-1) "\r\n")
    file-print (word 2 ",," (niños-2 + adolescentes-2 + ajovenes-2 + adultos-2 + ancianos-2) "\r\n")
    file-print (word 3 ",," (niños-3 + adolescentes-3 + ajovenes-3 + adultos-3 + ancianos-3) "\r\n")
    file-print (word 4 ",," (niños-4 + adolescentes-4 + ajovenes-4 + adultos-4 + ancianos-4) "\r\n")
    file-print (word 5 ",," (niños-5 + adolescentes-5 + ajovenes-5 + adultos-5 + ancianos-5) "\r\n")
    file-close
    set-current-directory pathdir:get-model-path
  ]
  [
    file-open ("Reporte de Decisión.txt")
    file-print (peatones-decididos)
    file-close

    file-open ("Reporte de Estados.txt")
    file-print ("Estado,Cantidad Agentes\r\n")
    file-print (word 1 ",," (peatones-1) "\r\n")
    file-print (word 2 ",," (peatones-2) "\r\n")
    file-print (word 3 ",," (peatones-3) "\r\n")
    file-print (word 4 ",," (peatones-4) "\r\n")
    file-print (word 5 ",," (peatones-5) "\r\n")
    file-close
    set-current-directory pathdir:get-model-path
  ]
end

,*****

to-report ajustar-velocidad
  let s 1
  set km 5.4 ; [agentes / m²] 1 mNL² = 36 m²
  set d 3 / escala ; 3 [m] = 3/escala = 3/6 = 0.5 [mNL]
  ifelse Distribucion_Agentes = "Aleatoria" [
    let pea (turtle-set other niños in-radius (d) other adolescentes in-radius (d) other adultos in-radius (d) other ancianos in-radius (d))
    set Nv count pea with [td <= [td] of self]
  ]
  [
    let pea (other peatones in-radius (d))
    set Nv count pea with [td <= [td] of self]
  ]
]
```

```

set k ( Nv / ( pi * d ^ 2 ) ) / 36 ; se divide en 36 para dejarlo en [agentes / m²]
if (k > 0) and (k < km) [
  set s precision (1 - EXP(-1.913 * (1 / k - 1 / km))) 3 ]
if k >= km [set s 0.01]
set velocidad velocidad * s
report velocidad
end

,*****

to-report reloj
  let minutos floor (ticks / (60))
  let segundos floor (((ticks / (60)) - (floor (ticks / (80)))) * (60))
  report (word minutos " min." segundos " seg.")
end

,*****

to-report random-td-rayleigh [ Distrib Media ]
  let sigma Media * (sqrt(2 / pi))
  report (sqrt ( -2 * sigma ^ 2 * ln(1 - Distrib) ) )
end

,*****

to-report Astar [ setup-origen setup-objetivo setup-color comportamiento ]
  set origen setup-origen
  set objetivo setup-objetivo
  set color-espacio setup-color
  set heuristico comportamiento
  ask patches with [abierto? != 0] [set f 0 set g 0 set h 0 set padre nobody set abierto? 0]
  ask objetivo [set pcolor color-espacio]

; Comienza en un punto de inicio A y añádelo a una lista abierta de parcelas a considerar
; La lista abierta es como una lista de compras. Ahora mismo hay sólo 1 ítem en la lista, pero tendremos más luego
; La lista contiene parcelas que podrían servir a lo largo del camino que el agente puede tomar, pero quizá no.
; Básicamente es una lista de parcelas que necesitan ser revisadas

  ask origen [set abierto? 1 set padre self]
  while [ [abierto?] of objetivo != 2 ] [if count patches with [abierto? = 1] = 0 [report []] ; Mientras el objetivo esté fuera de la lista cerrada,
si la cantidad de parcelas en la lista abierta es igual a cero, reporta una lista vacía
; Se elige la parcela con la menor puntuación de f de todas aquellas que están en la lista abierta
  let parcelas-abiertas patches with [abierto? = 1]
  ask parcelas-abiertas [valores-fgh] ; Le da valores a las variables f, g y h
  let actual one-of parcelas-abiertas with-min [f] ; Selecciona una de las parcelas abiertas que tengan el menor f = g + h
  ask actual [set abierto? 2] ; La parcela con menor f seleccionada, se pasa a la lista cerrada
; sprout [ set shape "bot" set color red stamp die ] ]
; display

; Despliega y revisa todas las parcelas adyacentes
; Ignora aquellas que estén en la lista cerrada o incaminable (terrenos con muros, agua u otros terrenos ilegales),
; añade parcelas a la lista abierta, si es que aún no estan en la lista abierta
; Haz que la parcela seleccionada sea el padre de la nueva parcela
; Si una parcela adyacente ya está en la lista abierta, se revisa para ver si el camino hacia esa parcela es una mejor opción
; si se usa la parcela actual para llegar ahí. Si no, no se hace nada.
; Por otro lado, si el costo de g del nuevo camino es menor, cambia el padre de la parcela adyacente a la parcela seleccionada.
; Finalmente, recalcula ambos valores de costo, f y g de ese cuadrado

  let caminable [neighbors with [pcolor = color-espacio]] of actual
  ask caminable [ if abierto? != 2 ; No Cerrado
    [ ifelse abierto? != 1 ; No Abierto
      [set abierto? 1 set padre actual]
      [let padre-anterior padre ifelse costo-de-ruta self > nuevo-costo-de-ruta actual self
        [set padre actual valores-fgh]
        [set padre padre-anterior valores-fgh]
      ]
    ]
  ]
  ]
  ask objetivo [set pcolor white]

```

```
report muestra-la-ruta
end

,*****

to-report costo-de-ruta [candidato]
  let costo 0
  let parcela candidato
  ask parcela [set costo costo + g]
  while [parcela != origen] [ask [padre] of parcela [set costo costo + g] set parcela [padre] of parcela]
  report costo
end

to-report nuevo-costo-de-ruta [actual candidato]
  ask candidato [set padre actual valores-fgh]
  let costo costo-de-ruta candidato
  report costo
end

to valores-fgh
  set g precision distance-nowrap padre 2 ; G es la distancia entre la parcela y el padre, con 2 decimales
  set h precision #heuristico 2 ; Distancia de la parcela al objetivo
  set f costo-de-ruta self + h
end

to-report muestra-la-ruta
  let parcela objetivo
  let mi-camino []
  set mi-camino fput parcela mi-camino ; añade parcela al primer elemento de mi camino
  while [parcela != origen] [set mi-camino fput ([padre] of parcela) mi-camino]
  set parcela [padre] of parcela]
  report mi-camino
end

to-report #heuristico ; El Heuristico es una estimación del mínimo costo que toma ir de una parcela hasta el objetivo, se puede utilizar para
controlar el comportamiento de A*
; en este modelo se trabajará con

if heuristico = -1
; Heurístico 0, lo que transforma el algoritmo A* en un algoritmo Dijkstra
[report 0]

if heuristico = 0
; Distancia Euclidiana: Es la estimación de una línea recta entre el punto de inicio y el objetivo
; Esta estimación es una de las aproximaciones numéricas más cortas, así los caminos más cortos serán obtenidos, sin embargo el
; proceso toma más tiempo en correr.
; La ecuación euclidiana es ampliamente conocida como:  $\text{Raiz}((Y_b - Y)^2 + (X_b - X)^2)$  (Teorema de Pitágoras)
[report precision distance-nowrap objetivo 2 ]

if heuristico = 1
; Distancia Manhattan: Es el heurístico estándar para una grilla cuadrada, sin embargo, no necesariamente es el mejor.
; La estimación es basada en la diferencia positiva de las coordenadas en X más la diferencia de las coordenadas en Y, entre el
; origen y el objetivo. Se calcula con la ecuación  $\rightarrow |(Y_b - Y)| + |(X_b - X)|$ 
[
  let xdiff abs([pxcor] of objetivo - pxcor)
  let ydiff abs([pycor] of objetivo - pycor)
  let resultado ( xdiff + ydiff )
  report resultado
]

if heuristico = 2
; Distancia Diagonal: Cuando el movimiento diagonal está permitido, esta estimación calcula el número de posibles pasos a través de
; una diagonal y la distancia Manhattan, luego, combina los dos pesos con un costo D2.
; hdiagonal =  $\min(|Y_b - Y|, |X_b - X|)$ 
; hrecta =  $|Y_b - Y| + |X_b - X|$ 
; Luego:  $D2 * hdiagonal + D * (hrecta - 2 * hdiagonal)$ 
[
  let D1 1
  let D2 1.414214 ; o sqrt 2 para ser exactos
  let xdiff abs([pxcor] of objetivo - pxcor)
```

```

let ydiff abs([pycor] of objetivo - pycor)
let h_diagonal min (list xdiff ydiff)
let h_recta xdiff + ydiff
let resultado D2 * h_diagonal + D1 * ( h_recta - 2 * h_diagonal )
report resultado
]

if heuristico = 3
; Distancia Diegona con desempate

; Desempate (o Tie Breakers)
; Es un empuje en la escala de H. Escalar H hacia arriba es siempre conveniente para la expansión de los nodos cercanos al objetivo
; en lugar del punto de origen. En este caso para asegurar el escalamiento hacia arriba del valor H, se calcula el parámetro
; de escalamiento según escala-h

[
let D1 1
let D2 1.414214 ; o sqrt 2 para ser exactosprecision (sqrt 2) 6
let xdiff abs([pxcor] of objetivo - pxcor)
let ydiff abs([pycor] of objetivo - pycor)
let h_diagonal min (list xdiff ydiff)
let h_recta xdiff + ydiff
let resultado D2 * h_diagonal + D1 * ( h_recta - 2 * h_diagonal )
; Desempate (Tie Breaker)
; Según Erick Mass h-scale (1 + (16 / 8 / world-width * world-height))
let escala-h (1 + 0.001)
set resultado resultado * escala-h
report resultado
]

if heuristico = 4
; Distancia euclidiana con desempate
[
let resultado distance-nowrap objetivo
; Desempate (Tie Breaker)
; Según Eric Mass h-scale (1 + (16 / 8 / world-width + world-height))
let escala-h (1 + 0.001) ; Raiz (679^2 + (-687)^2) se aproxima a 1000 y p = 1/1000 = 0.001
set resultado resultado * escala-h
report resultado
]

end

,*****

```