



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL RIESGO Y LA POLÍTICA DE  
EVACUACIÓN DE IQUIQUE EN CASO DE  
TSUNAMI MEDIANTE SIMULACIÓN BASADA EN  
AGENTES**

**IGNACIO ANDRÉS SOLÍS MEZA**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:  
PEDRO GAZMURI SCHLEYER

Santiago de Chile, Septiembre 2016

© MMXVI, IGNACIO ANDRÉS SOLÍS MEZA



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL RIESGO Y LA POLÍTICA DE  
EVACUACIÓN DE IQUIQUE EN CASO DE  
TSUNAMI MEDIANTE SIMULACIÓN BASADA EN  
AGENTES**

**IGNACIO ANDRÉS SOLÍS MEZA**

Miembros del Comité:

PEDRO GAZMURI SCHLEYER

RODRIGO CIENFUEGOS CARRASCO

JOSÉ ROBLES VÁZQUEZ

PABLO PASTÉN GONZÁLEZ

Tesis para optar al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Septiembre 2016

© MMXVI, IGNACIO ANDRÉS SOLÍS MEZA

*A Dios, a mi familia, y a Vannia*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por el cariño y el apoyo que me han dado a lo largo de los años. A mi padre y a mi madre les agradezco especialmente mi formación y el ambiente familiar que lograron. A mis hermanos les agradezco su incansable energía, me ha servido de ejemplo para nunca detenerme.

En segundo lugar, agradezco especialmente a mi profesor Pedro Gazmuri. Gracias por guiarme en este proceso, por compartir su visión del mundo conmigo, por sus fascinantes clases y por motivarme a querer continuar con mis estudios. Gracias por siempre creer en mi.

Gracias a Vannia por su cariño y compañía. Tu dedicación me ha inspirado en todo momento. A mi madrina Verónica por su apoyo incondicional. A mis amigos, profesores y alumnos por ser parte de este maravilloso proceso. A Andrea Vásquez, Filipa Muñoz y CIGIDEN por ayudar al desarrollo de este proyecto.

Agradezco finalmente a Dios por darme todas las oportunidades que me ha dado y las que me dará.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|                                                            |      |
|------------------------------------------------------------|------|
| AGRADECIMIENTOS                                            | iv   |
| ÍNDICE DE FIGURAS                                          | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS                                           | x    |
| ABSTRACT                                                   | xii  |
| RESUMEN                                                    | xiii |
| 1. INTRODUCCIÓN                                            | 1    |
| 1.1. Objetivos . . . . .                                   | 1    |
| 1.2. Límites del Estudio . . . . .                         | 1    |
| 1.3. Estructura del Documento . . . . .                    | 2    |
| 2. IQUIQUE                                                 | 3    |
| 2.1. Caracterización de Zona de Estudio . . . . .          | 3    |
| 2.2. Contexto Sísmico . . . . .                            | 5    |
| 2.3. Plan de Evacuación de Iquique . . . . .               | 7    |
| 2.4. Visitas a terreno . . . . .                           | 9    |
| 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA                                  | 12   |
| 3.1. Modelación Basada en Agente . . . . .                 | 12   |
| 3.1.1. Conceptos de Modelación Basada en Agentes . . . . . | 12   |
| 3.1.2. Problema Estudiado . . . . .                        | 14   |
| 3.2. Evacuación de Personas mediante MBA . . . . .         | 15   |
| 3.3. Validación de MBA . . . . .                           | 23   |
| 4. MODELO DE SIMULACIÓN DESARROLLADO                       | 26   |
| 4.1. Componentes . . . . .                                 | 26   |
| 4.1.1. Entidades . . . . .                                 | 26   |

|        |                                                     |    |
|--------|-----------------------------------------------------|----|
| 4.1.2. | Recursos . . . . .                                  | 26 |
| 4.2.   | Medidas de Desempeño . . . . .                      | 27 |
| 4.3.   | Lógica de las Dinámicas sobre los Agentes . . . . . | 28 |
| 4.3.1. | Decisión de evacuar . . . . .                       | 28 |
| 4.3.2. | Elección de punto de encuentro . . . . .            | 30 |
| 4.3.3. | Elección de ruta . . . . .                          | 31 |
| 4.3.4. | Ajuste de velocidad . . . . .                       | 33 |
| 4.4.   | Aspectos Específicos . . . . .                      | 37 |
| 4.4.1. | Input del Modelo . . . . .                          | 37 |
| 4.4.2. | Output del Modelo . . . . .                         | 37 |
| 4.4.3. | Modelación de Iquique . . . . .                     | 38 |
| 4.4.4. | Distribución Geográfica de Personas . . . . .       | 42 |
| 4.5.   | Supuestos . . . . .                                 | 44 |
| 4.6.   | Características del Modelo Computacional . . . . .  | 45 |
| 4.6.1. | Características Generales . . . . .                 | 45 |
| 4.6.2. | Interfaz del Modelo Computacional . . . . .         | 47 |
| 4.6.3. | Acciones de Agentes . . . . .                       | 48 |
| 5.     | VALIDACIÓN . . . . .                                | 53 |
| 5.1.   | Fuentes de Datos . . . . .                          | 54 |
| 5.2.   | Face Validation . . . . .                           | 54 |
| 5.3.   | Análisis de Sensibilidad . . . . .                  | 56 |
| 5.3.1. | Análisis Global del Modelo . . . . .                | 56 |
| 5.3.2. | Análisis Modelo Zona 1 . . . . .                    | 58 |
| 5.3.3. | Análisis Modelo Zona 2 . . . . .                    | 60 |
| 5.3.4. | Análisis Modelo Zona 3 . . . . .                    | 62 |
| 5.4.   | Validacion Estadística . . . . .                    | 63 |
| 5.4.1. | Evaluación Global del Modelo . . . . .              | 64 |
| 5.4.2. | Evaluación del Modelo Zona 1 . . . . .              | 66 |
| 5.4.3. | Evaluación del Modelo Zona 2 . . . . .              | 68 |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.4.4. Evaluación del Modelo Zona 3 . . . . .                            | 69  |
| 5.5. Resumen Validación . . . . .                                        | 70  |
| 6. RESULTADOS . . . . .                                                  | 72  |
| 6.1. Intervalo de Confianza y Error Relativo en los Resultados . . . . . | 72  |
| 6.2. Escenario Diurno . . . . .                                          | 75  |
| 6.2.1. Resultados Zona 1 Día . . . . .                                   | 77  |
| 6.2.2. Resultados Zona 2 Día . . . . .                                   | 80  |
| 6.2.3. Resultados Zona 3 día . . . . .                                   | 82  |
| 6.3. Escenario Nocturno . . . . .                                        | 84  |
| 6.3.1. Resultados Zona 1 Noche . . . . .                                 | 86  |
| 6.3.2. Resultados Zona 2 Noche . . . . .                                 | 89  |
| 6.3.3. Resultados Zona 3 Noche . . . . .                                 | 91  |
| 6.4. Modelo de Inundación . . . . .                                      | 93  |
| 7. CONCLUSIONES . . . . .                                                | 97  |
| BIBLIOGRAFÍA . . . . .                                                   | 103 |
| ANEXO . . . . .                                                          | 107 |
| A. Registro de Tsunamis en Chile . . . . .                               | 108 |
| B. Carta de Inundación por Tsunami de Iquique . . . . .                  | 109 |
| C. Vías de Evacuación y Puntos de Encuentro de Iquique . . . . .         | 110 |
| D. Inclinación y Ancho de Vías de Evacuación . . . . .                   | 111 |
| E. Capacidad de Edificios de Evacuación . . . . .                        | 118 |
| F. Población Distribuida en Escenario Diurno . . . . .                   | 119 |
| G. Población Distribuida en Escenario Nocturno . . . . .                 | 120 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|     |                                                                                                       |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Plan de Evacuación de Iquique. . . . .                                                                | 8  |
| 2.2 | Puntos de Encuentro de Iquique. . . . .                                                               | 10 |
| 3.1 | Velocidad según Congestión en Vía de Evacuación . . . . .                                             | 18 |
| 4.1 | Función de Densidad y Función Acumulada Rayleigh . . . . .                                            | 30 |
| 4.2 | Pseudo Código para el Algoritmo A* . . . . .                                                          | 33 |
| 4.3 | Representación de un Tramo Curvo de una Calle . . . . .                                               | 39 |
| 4.4 | Grafo de Iquique . . . . .                                                                            | 40 |
| 4.5 | Mapa de Cotas de Altura de Iquique . . . . .                                                          | 42 |
| 4.6 | Zonificación sector Cavancha SECTRA. . . . .                                                          | 43 |
| 4.7 | Interfaz del Modelo Computacional de la Zona 1 en Distintitos Tiempos de Simulación Parte 1 . . . . . | 50 |
| 4.8 | Interfaz del Modelo Computacional de la Zona 1 en Distintitos Tiempos de Simulación Parte 2 . . . . . | 51 |
| 4.9 | Interfaz del Modelo Computacional de la Zona 1 en Distintitos Tiempos de Simulación Parte 3 . . . . . | 52 |
| 5.1 | Análisis de Sensibilidad respecto a $\mu$ . . . . .                                                   | 58 |
| 5.2 | Análisis de Sensibilidad respecto a $\mu$ para Zona 1 . . . . .                                       | 60 |
| 5.3 | Análisis de Sensibilidad respecto a $\mu$ para Zona 2 . . . . .                                       | 61 |
| 5.4 | Análisis de Sensibilidad respecto a $\mu$ para Zona 3 . . . . .                                       | 63 |
| 5.5 | Llegada de Población a Puntos de Encuentro de Iquique. . . . .                                        | 66 |

|     |                                                                            |     |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.6 | Llegada de Población a Punto de Encuentro Sotomayor/Circunvalacion. . . .  | 67  |
| 5.7 | Llegada de Población a Puntos de Encuentro de Zona 2. . . . .              | 68  |
| 5.8 | Llegada de Población a Puntos de Encuentro de Zona 3. . . . .              | 70  |
| 6.1 | Llegada de Población a Puntos de Encuentro Escenario Diurno. . . . .       | 77  |
| 6.2 | Llegada de Población a Puntos de Encuentro de Zona 1 Escenario Diurno. . . | 79  |
| 6.3 | Llegada de Población a Puntos de Encuentro de Zona 2 Escenario Diurno. . . | 81  |
| 6.4 | Llegada de Población a Puntos de Encuentro en Zona 3 Escenario Diurno. . . | 84  |
| 6.5 | Llegada de Población a Puntos de Encuentro Escenario Nocturno. . . . .     | 86  |
| 6.6 | Llegada de Población a Puntos de Encuentro en Zona 1 Escenario Nocturno. . | 88  |
| 6.7 | Llegada de Población a Puntos de Encuentro en Zona 2 Escenario Nocturno. . | 90  |
| 6.8 | Llegada de Población a Puntos de Encuentro en Zona 3 Escenario Nocturno. . | 93  |
| 6.9 | Altura de Inundación Simulada en Zona Puerto. . . . .                      | 94  |
| B.1 | Carta de Inundación por Tsunami de Iquique. . . . .                        | 109 |
| C.1 | Vías de evacuación y puntos de encuentro. . . . .                          | 110 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|     |                                                                                    |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Distribución Etaria de la Población de Iquique . . . . .                           | 4  |
| 2.2 | Listado de Terremotos que Originaron Tsunamis en Chile desde el siglo XX . . . . . | 5  |
| 3.1 | Conservación de Velocidad según Inclinación del Plano . . . . .                    | 20 |
| 3.2 | Casos de Evacuación mediante MBA . . . . .                                         | 22 |
| 4.1 | Número de Nodos y Vértices por Zona . . . . .                                      | 39 |
| 4.2 | Resumen de Anchos de Plataforma . . . . .                                          | 41 |
| 4.3 | Cantidad de Agentes y Tiempos de Simulación . . . . .                              | 46 |
| 5.1 | Porcentaje de Población Evacuada en el Tiempo . . . . .                            | 57 |
| 5.2 | Porcentaje de Población Evacuada en el Tiempo para Zona 1 . . . . .                | 59 |
| 5.3 | Porcentaje de Población Evacuada en el Tiempo para Zona 2 . . . . .                | 61 |
| 5.4 | Porcentaje de Población Evacuada en el Tiempo para Zona 3 . . . . .                | 62 |
| 5.5 | Tiempo Requerido para Evacuar Deciles de la Población de Iquique . . . . .         | 65 |
| 6.1 | Población de las Zonas Simuladas . . . . .                                         | 72 |
| 6.2 | Intervalo de Confianza y Error Relativo Escenario Diurno . . . . .                 | 74 |
| 6.3 | Intervalo de Confianza y Error Relativo Escenario Nocturno . . . . .               | 74 |
| 6.4 | Porcentaje de Población Evacuada en Escenario Diurno . . . . .                     | 76 |
| 6.5 | Porcentaje de Población Evacuada en Zona 1 Escenario Diurno . . . . .              | 78 |
| 6.6 | Porcentaje de Población Evacuada en Zona 2 Escenario Diurno . . . . .              | 80 |
| 6.7 | Porcentaje de Población Evacuada en Zona 3 Escenario Diurno . . . . .              | 82 |

|      |                                                                         |     |
|------|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.8  | Porcentaje de Población Evacuada en Escenario Nocturno . . . . .        | 85  |
| 6.9  | Porcentaje de Población Evacuada en Zona 1 Escenario Nocturno . . . . . | 87  |
| 6.10 | Porcentaje de Población Evacuada en Zona 2 Escenario Nocturno . . . . . | 89  |
| 6.11 | Porcentaje de Población Evacuada en Zona 3 Escenario Nocturno . . . . . | 92  |
| 6.12 | Número de Personas Alcanzadas por Tsunami . . . . .                     | 95  |
| A.1  | Listado de Terremotos que Originaron Tsunamis . . . . .                 | 108 |
| E.1  | Capacidad de Edificios de Evacuación . . . . .                          | 118 |
| F.1  | Población Distribuida en Escenario Diurno . . . . .                     | 119 |
| G.1  | Población Distribuida en Escenario Nocturno . . . . .                   | 120 |

## ABSTRACT

The low seismic activity in northern Chile has led to a significant accumulation of energy over the last two centuries. The stored energy could generate an earthquake of magnitude greater than 8.5  $M_w$ . An earthquake of such intensity means a risk for coastal cities since it can generate a tsunami.

Iquique is at high risk as it is close to the sea. Local authorities estimate that the available evacuation time in case of tsunami is less than 20 minutes. Therefore, it is necessary that evacuation policies help to mitigate the existing risk. For this reason, this thesis seeks to develop a model to evaluate the current evacuation policy of Iquique and evaluate possible improvements

A way of assessing the behavior of complex and heterogeneous systems is through agent-based simulation. This tool allows to model the behavior of people through rules that determine the choices they make. An agent-based model was deployed in order to assess the current evacuation policy of Iquique. In this model agents represent people evacuating. The evacuation speed depends on the age of the agent, the slope and the crowd density of the street. The model was validated in 3 stages: face validation, sensitivity analysis and statistical validation. In order to validate the results obtained, information collected during an evacuation drill on August 2013 was used.

The performance of an evacuation process under the current evacuation policy was evaluated and compared to the performance of evacuation under a policy that allows people to evacuate horizontally and vertically. The results show that the current evacuation policy is not effective for evacuating Iquique and that an evacuation policy that combines both horizontal and vertical evacuation could reduce the existing risk.

**Keywords:** agent-based model, tsunami, vertical evacuation, validation.

## RESUMEN

La baja actividad sísmica en la zona norte de Chile ha generado una importante acumulación de energía durante los últimos dos siglos. La energía acumulada podría generar un terremoto de magnitud mayor a  $8.5 M_w$ . Un terremoto de tal intensidad presenta un riesgo para la zona costera dado que puede generar un tsunami.

La ciudad de Iquique tiene un alto riesgo pues está expuesta al mar. Se estima que el tiempo disponible para evacuar la ciudad en caso de tsunami es menor a 20 minutos. Por lo tanto, es necesario contar con una política de evacuación que permita mitigar el riesgo existente. Por este motivo, esta tesis busca desarrollar un modelo que permita evaluar la política de evacuación actual de Iquique y posibles mejoras.

Un método para evaluar sistemas complejos y heterogéneos es a través de la simulación basada en agentes. Esta herramienta permite modelar el comportamiento de las personas mediante reglas que definen las decisiones que toman. Se implementó un modelo de simulación basada en agentes que permite evaluar la política de evacuación actual de Iquique. Cada agente modelado representa a una persona que evacua. Se ha considerado el impacto que tiene la edad del agente, la congestión y la inclinación de las calles en la velocidad de evacuación. El modelo de simulación fue validado en 3 etapas: face validation, análisis de sensibilidad y validación estadística. Se usó información recolectada en el simulacro de agosto de 2013 para validar los resultados obtenidos a partir del modelo.

Se evaluó el desempeño de un proceso de evacuación bajo la política de evacuación vigente y además, se evaluó el impacto que tendría usar infraestructura disponible para evacuar verticalmente a parte de la población. Los resultados indican que la política de evacuación que existe actualmente no permite evacuar zonas de Iquique a tiempo y que el riesgo puede reducirse al incorporar una política de evacuación vertical.

**Palabras Claves:** modelación basada en agentes, tsunami, evacuación vertical, validación.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Iquique es una ciudad ubicada en el norte de Chile, expuesta a un enorme riesgo en caso de tsunami. El caso de esta ciudad se distingue de otros debido a la alta densidad demográfica, el escaso tiempo disponible para evacuar y las características geográficas propias de la zona (alta inclinación de las calles y larga distancia entre el borde costero y la zona segura). En el presente estudio se realiza una evaluación del riesgo que existe actualmente en Iquique en caso de tsunami mediante simulación basada en agentes.

### **1.1. Objetivos**

En esta tesis se busca implementar un modelo de simulación que permita:

- Representar fielmente la realidad de un proceso de evacuación en Iquique.
- Cuantificar la respuesta de la población de Iquique durante un proceso de evacuación.
- Evaluar diferentes escenarios y políticas de evacuación.

Se plantea como hipótesis que los modelos basados en agentes permiten representar adecuadamente el proceso de evacuación de una ciudad y permite evaluar el desempeño de distintas políticas de evacuación. Además, se plantea que el uso de una política de evacuación vertical y horizontal permite reducir el tiempo necesario para evacuar Iquique en comparación con la política de evacuación únicamente horizontal. Esta tesis busca también plantear una metodología para validar el modelo de simulación propuesto.

### **1.2. Límites del Estudio**

Este estudio no incluye la modelación del tsunami que podría afectar a Iquique. Se modela únicamente la evacuación de peatones de principio a fin. Los supuestos que se

han realizado (ver sección 4.5) son apropiados en la medida que las autoridades hagan un esfuerzo significativo para que esto sea efectivamente así.

No se considera obstrucciones que podrían producirse por el desprendimiento de suelo, ruptura en las calles o daños en edificios. La simulación del comportamiento humano corresponde a condiciones óptimas. No se consideran casos de personas con movilidad reducida, en estado de shock u otros problemas que pudiesen mermar sus capacidades físicas y/o psicológicas en el proceso de evacuación.

El foco de este estudio está puesto en las zonas de barrio industrial y zona franca (zona 1), playa Bellavista (zona 2) y playa Cavancha (zona 3). Otras zonas de Iquique, como playa Brava y playa Huayquique, no son consideradas pues son zonas de evacuación rápida y agrupan a una proporción menor de la población.

### **1.3. Estructura del Documento**

La presente tesis comienza con una breve introducción sobre el caso de Iquique y el riesgo de tsunamis al que está expuesto. También se señala el plan de evacuación determinado por las autoridades locales y visitas a terreno llevadas a cabo.

En el capítulo 3 se realiza una revisión bibliográfica de la literatura disponible sobre modelación basada en agente y su aplicación a evacuación de ciudades. Además, se presenta un marco teórico para llevar a cabo la validación de este tipo de modelos.

En el capítulo 4 se presenta el modelo de simulación desarrollado y los supuestos bajo los que se ha trabajado. El modelo es detallado tanto a nivel conceptual como a nivel computacional.

Luego, en el capítulo 5 se describe la metodología usada para validar el modelo desarrollado y en el capítulo 6 se presentan los resultados para cada escenario de estudio. Finalmente, el capítulo 7 expone las conclusiones derivadas del trabajo y recomendaciones para el trabajo futuro.

## 2. IQUIQUE

La capacidad de respuesta de una población ante desastres naturales ha sido objeto de estudio en los últimos años debido a los recientes eventos que han ocurrido. En particular, destaca el caso de Chile con un terremoto de magnitud 8.8  $M_w$  y posterior tsunami en 2010. Dicho tipo de desastres naturales suceden recurrentemente en Chile, por lo que la preparación de la población para actuar ante tales eventos es esencial.

El desarrollo de planes de evacuación de ciudades es un proceso que debe estar centrado en las características específicas del lugar que abarca y de la gente involucrada. Este capítulo detalla el caso particular de Iquique, sus principales características y el contexto sísmico que motiva la presente tesis.

### 2.1. Caracterización de Zona de Estudio

La ciudad de Iquique ( $20^{\circ} 12' S$ ,  $70^{\circ} 08' W$ ) está ubicada en la costa del océano Pacífico Sur, en la región de Tarapacá. Tiene un ancho que varía entre 0,5 y 3 km, mientras que su eje principal es de 12 km de extensión en la dirección norte-sur (León & March, 2015). Su geografía está delimitada por la cordillera de la costa, una cadena montañosa que en la zona de Iquique alcanza una altura de 700 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). El centro de la ciudad de Iquique se encuentra a una altura menor a 20 m.s.n.m., por lo que se genera un gran contraste con la Cordillera de la Costa.

El Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2012) ha determinado que la población de Iquique es de 287.257 personas, de las cuales 192.663 habitan en la comuna de Iquique y 94.594 habitan en la comuna de Alto Hospicio. La distribución etaria de la población de Iquique es detallada en la tabla 2.1. Iquique se caracteriza también por ser una ciudad cosmopolita. Su población está compuesta principalmente por chilenos, peruanos, bolivianos y colombianos. Además, esta ciudad cuenta con una población flotante importante, producto de sus playas y de la actividad comercial en la zona franca. SERNATUR (2013)

estima que Iquique cuenta con una población flotante anual cercana a los tres millones de personas.

Tabla 2.1. Distribución Etaria de la Población de Iquique

| Rango etario (años) | Población | Porcentaje de la población |
|---------------------|-----------|----------------------------|
| [0,10)              | 49.141    | 17,1%                      |
| [10,20)             | 45.360    | 15,8%                      |
| [20,30)             | 48.016    | 16,7%                      |
| [30,40)             | 44.595    | 15,5%                      |
| [40,50)             | 40.056    | 13,9%                      |
| [50,60)             | 32.014    | 11,1%                      |
| [60,70)             | 17.075    | 5,9%                       |
| 70 o más            | 11.353    | 4,0%                       |
| Total               | 287.257   | 100%                       |

Fuente: (INE, 2012)

Iquique destaca por su actividad comercial. La Zona Franca de Iquique (ZOFRI) es una de las zonas comerciales libre de impuestos más grande de Sudamérica y el impacto que tiene en la economía local es importante. En 2014 el movimiento operacional de la ZOFRI superó los USD 8.000 millones CIF (ZOFRI, 2015). La zona franca tiene una extensión aproximada de 2,4  $km^2$  y cuenta con depósitos, sucursales bancarias, tiendas comerciales y restaurantes. El rubro automotriz es el rubro de mayores ventas en ZOFRI. En 2014 tuvo ventas por USD 747 millones CIF, lo que representa el 19,4% de las ventas totales de ZOFRI en ese año (ZOFRI, 2015). Es posible observar esto en la alta congestión vehicular que tiene Iquique. Además, la congestión se agrava por el gran número de camiones que debe circular por la ciudad desde y hacia ZOFRI y el puerto.

Varios de los sectores más populares de Iquique se encuentran a una altura inferior a los 15 m.s.n.m., lo que implica un riesgo de exposición frente a un tsunami. Ejemplos de esto son el barrio industrial, ZOFRI, Baquedano, las playas y el puerto de la ciudad. La geografía montañosa de la zona genera desniveles y pendientes significativas en las calles. Tal es el caso de la calle Doce de Febrero que tiene tramos con pendiente superior a 11%.

Dicha calle es una de las dos vías de evacuación dispuestas por la autoridad local para la zona franca y en caso de evacuación el flujo de personas a través de ella es alto.

## 2.2. Contexto Sísmico

Chile se caracteriza por ser un país de alta actividad sísmica. El origen de los terremotos en Chile se debe principalmente al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Recurrentemente este proceso libera grandes cantidades de energía, lo que genera terremotos de diversas magnitudes.

Un terremoto de alta magnitud puede dar origen a un tsunami. Desde el siglo XVI han ocurrido un total de 28 terremotos que hayan generado tsunamis en Chile, de los cuales 10 han tenido origen en el último siglo (SHOA, 2016). En la tabla 2.2 se presenta un listado de los terremotos que han originado tsunamis en Chile desde el siglo XX. Un listado completo de terremotos conocidos que originaron tsunamis en Chile se presenta en el anexo A.1. En la tabla se observa que hay terremotos con magnitud de 7.6  $M_S$  que han originado tsunamis en Chile.

Tabla 2.2. Listado de Terremotos que Originaron Tsunamis en Chile desde el siglo XX

| Año  | Epicentro            | Magnitud ( $M_S$ ) |
|------|----------------------|--------------------|
| 1906 | Valparaíso           | 8.3                |
| 1918 | Copiapó              | 7.6                |
| 1922 | Provincia de Atacama | 8.4                |
| 1928 | Talca y Constitución | 7.9                |
| 1943 | Illapel              | 8.1                |
| 1960 | Valdivia             | 9.5                |
| 1966 | Taltal               | 7.8                |
| 1985 | Valparaíso           | 8.0                |
| 1995 | Antofagasta          | 8.0                |
| 2010 | Concepción           | 8.8                |
| 2015 | Illapel              | 8.3                |

Fuente: (SHOA, 2016).

En el norte de Chile se tiene registro de tres terremotos que hayan causado tsunamis (1604, 1868 y 1877). Desde 1877 no ha habido terremotos de alta magnitud ( $\geq 8.3 M_S$ ) en el norte de Chile, lo que significa un periodo de 139 años de acumulación energética. Se estima que los terremotos que han ocurrido en la zona y el terremoto de abril de 2014 no han permitido liberar la energía acumulada desde 1877 (Schurr et al., 2014).

En el mismo estudio, Schurr et al. (2014) indican que el periodo de recurrencia de terremotos de alta magnitud en el norte de Chile es de  $111 \pm 33$  años. Por lo tanto, hay un riesgo importante de que ocurra un terremoto de alta magnitud en los próximos años. La magnitud esperada del terremoto indicado varía entre autores. Schurr et al. (2014) afirman que el terremoto debiese tener una magnitud superior a  $8.5 M_S$ , mientras que Hayes et al. (2014) consideran que la magnitud debiese ser cercana a  $9 M_S$ . En ambos escenarios la magnitud esperada es tal que el terremoto podría generar un tsunami posteriormente.

Las características de un terremoto (magnitud y epicentro, entre otros) inciden directamente en las características del tsunami que se podría generar. En ese sentido, resulta imposible determinar a priori las características que tendría un próximo tsunami pues, dependiendo del terremoto, la ola puede tener distinta dirección o tiempo de llegada a tierra. Por lo tanto, para analizar este problema se definen casos de estudio de acuerdo a distintos escenarios probables. Cienfuegos et al. (2014) han considerado el peor escenario asociado a un terremoto de magnitud  $9.0 M_W$ . En su estudio destacan que el primer tren puede alcanzar el puerto de Iquique en 15 minutos. An, Sepúlveda, and Liu (2014) utilizan otro modelo de inundación para simular las olas producidas por el terremoto de Iquique en 2014. El resultado de dicho estudio indica que el tiempo de llegada del tsunami a Iquique es inferior a 20 minutos.

Ambos escenarios detallados son capaces de generar un tsunami que en poco tiempo alcanzaría la costa de Iquique y pondría en peligro a su población. Por lo tanto, ante el posible riesgo de tsunami es importante estudiar la capacidad de respuesta de la población de Iquique.

### 2.3. Plan de Evacuación de Iquique

El desarrollo de planes de evacuación en Chile está a cargo de la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI). Este es el organismo a cargo planificar y ejecutar acciones de respuesta frente a desastres naturales. En particular, la Dirección regional de ONEMI Tarapacá es la entidad a cargo de la prevención y respuesta ante emergencias en Iquique.

La autoridad local ha designado vías de evacuación y puntos de encuentro hacia los que se debe evacuar en caso de alerta. ONEMI ha designado como zona segura todo lugar ubicado por sobre la cota de altura de 30 m.s.n.m.. Dicho número es determinado en base a cartas de inundación desarrolladas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). En el anexo B se presenta la carta de inundación por tsunami de Iquique. Las vías de evacuación se han definido de forma tal que las vías sean perpendiculares a la línea costera y se ha dado prioridad a aquellas calles cuyo sentido de tránsito es en dirección hacia la costa. De esta forma en caso de que la gente use vehículos para evacuar, no se generaría conflicto entre los peatones y los vehículos.

El plan de evacuación de Iquique contempla únicamente evacuación de peatones. La evacuación de peatones es considerada como la forma de evacuar más efectiva en casos donde se requiera evacuar rápido y la inclusión masiva de autos puede tener un impacto negativo en el desempeño del proceso de evacuación (Scheer et al., 2011). Iquique se caracteriza por tener una alta cantidad de vehículos y calles relativamente angostas. Por lo tanto, se espera que al incluir autos en el proceso de evacuación se produzca una mayor congestión en las vías y que la velocidad de evacuación disminuya.

ONEMI ha dividido Iquique en 5 zonas con el fin de facilitar la coordinación y gestión de evacuaciones. Cada zona posee sus vías de evacuación y puntos de encuentro hacia los que se debe evacuar en caso de alerta. En la figura 2.1 se presenta un plano con las zonas, vías de evacuación y puntos de encuentro de Iquique. En el anexo C se presenta un plano a mayor escala con las vías de evacuación y puntos de encuentro de Iquique.

La zona 1 abarca desde el extremo norte de Iquique hasta Av. Sotomayor e incluye el barro industrial y la zona franca. Esta zona es de especial interés pues durante el día tiene un flujo de personas muy alto, la altura promedio es inferior a 10 m.s.n.m. y posee pocas vías de evacuación. La zona 2 se extiende entre Av. Sotomayor y Av. Libertad. Esta zona incluye el centro de Iquique, Playa Bellavista y el puerto. La zona 3 se ubica entre las avenidas Libertad y Tadeo Haenke. Esta zona se caracteriza por ser residencial, con mayor presencia de edificios y por el sector Península, barrio de vida nocturna. Las zonas 4 y 5 se ubican al sur de Av. Tadeo Haenke y se caracterizan por ser residenciales, tener un menor flujo de personas en relación a las zonas anteriores y por tener una menor distancia entre la costa y la zona segura.

El día jueves 8 de agosto de 2013 a partir de las 11:23 hrs., se realizó un simulacro de evacuación dirigido por ONEMI en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama. Para registrar lo ocurrido durante la evacuación se dispuso de 1.057

evaluadores repartidos en cada región. Se estima que en la región de Tarapacá participaron aproximadamente 76.000 personas. El detalle del ejercicio, los resultados y las observaciones son detalladas en un informe técnico realizado por Walker Rousseau (2013).

El escenario de estudio considerado por la autoridad fue el de un terremoto de magnitud 9.2  $M_W$  con epicentro a 47 km. al oeste de Tocopilla. Ante tal escenario, la autoridad se fijó como meta evacuar a la población en menos de 20 minutos. El tiempo total de evacuación de Iquique fue de 27 minutos con 55 segundos. No obstante, se observó que la participación de la población fue parcial. Además, se registró la presencia de vehículos durante la evacuación, lo que obstaculizó el proceso. Un punto importante a considerar es que en Iquique se observó que un 92% de las personas conoce las vías de evacuación de tsunami.

Posteriormente, ONEMI ha dispuesto de más oportunidades para ejercitar el plan de evacuación de Iquique. Por ejemplo, se han realizado evacuaciones en abril de 2014 y en septiembre de 2015 debido a terremotos de magnitud mayor a 8.0  $M_W$ . Desafortunadamente, en ambos casos no se recolectó datos sobre el proceso de evacuación.

## **2.4. Visitas a terreno**

En diciembre de 2014 y de 2015 se llevó a cabo visitas a Iquique con el fin de revisar in situ las condiciones bajo las que se debe llevar a cabo una evacuación. Además, se coordinó reuniones con personal de ONEMI y de la Empresa Portuaria de Iquique (EPI), empresa encargada de gestionar el puerto de Iquique.

Se recorrió las vías de evacuación de Iquique y se visitó los puntos de encuentro. En la figura 2.2 se presenta una foto de un punto de encuentro. Se observa que un punto de encuentro corresponde únicamente a un espacio designado sin mayor infraestructura. El p.e. mostrado tiene un cartel que indica la llegada a zona segura. No obstante, varios puntos de encuentro no tienen indicaciones. Otro elemento a considerar es la gran cantidad de vehículos de Iquique. Los autos son estacionados principalmente en las veredas de las

calles, en ocasiones se ocupan ambas veredas para estacionar (ver figura 2.2). Las calles de Iquique son relativamente estrechas, por lo que el uso de las veredas como estacionamiento reduce significativamente el espacio disponible para evacuar.



Figura 2.2. Puntos de Encuentro de Iquique.

Al recorrer las vías de evacuación se registró el tiempo que toma recorrer la vía de principio a fin. Los casos de Av. Circunvalación y el puerto de Iquique son alarmantes pues el tiempo registrado es cercano a los 25 minutos. Las vías de la zona 2 y la zona 3 requieren en promedio 15 minutos para evacuar desde el punto lejano a la zona segura. Los tiempos de evacuación mencionados no consideran la congestión que se pueda producir en las vías de evacuación ni el tiempo que puedan tardar las personas en comenzar a evacuar. Por lo tanto, existe la necesidad de estudiar formas de reducir el tiempo requerido para evacuar a la población.

En la reunión de 2014 se revisó junto a Alejo Palma, director regional de ONEMI Tarapacá, el plan de evacuación de Iquique detallado en la sección 2.3, posibles modificaciones del plan a mediano plazo y se revisó el modelo conceptual del presente trabajo. En 2015 se sostuvo una reunión de validación de los resultados obtenidos en el presente

trabajo. Finalmente, se sostuvo una reunión con personal de EPI con el fin de tener mayor conocimiento sobre el proceso de evacuación del personal del puerto de Iquique. El puerto no cuenta con una política de evacuación distinta del resto de la ciudad. Esto implica un alto riesgo para los trabajadores pues la distancia entre el puerto y la zona segura supera los 2,5 km., distancia que debe ser recorrida a pie.

### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se estudia la metodología de simulación basada en agentes y cómo se ha aplicado a problemas de evacuación en casos de emergencia. También se revisa como se ha enfrentado la validación de este tipo de modelos dentro de la literatura.

#### 3.1. Modelación Basada en Agente

A grandes rasgos, un MBA<sup>1</sup> corresponde a una colección de entidades independientes que actúan e interactúan en pos de un objetivo. El desarrollo de este tipo de modelos comienza a principios de la década de 1970 y se expande en la década de 1990, gracias al avance en la capacidad de procesamiento de los computadores.

Esta sección comienza explicando los conceptos básicos de la simulación basada en agentes. Posteriormente se describe modelos generales de desastres en los que se haya aplicado esta técnica de modelación y finalmente se detalla el problema de estudio de la presente tesis.

##### 3.1.1. Conceptos de Modelación Basada en Agentes

La modelación basada en agentes es una técnica de simulación que representa un sistema como una colección de entidades autónomas denominadas *agentes*. Cada agente posee características que lo definen y lo diferencian de otros agentes. Además, los agentes poseen un set de reglas que define su actuar. El comportamiento de un agente es *orientado a objetivos*. En cada instante de la simulación los agentes toman decisiones en función de una meta. Dichas decisiones dependen de las características de los agentes, de interacciones con otros agentes y del *ambiente* en el que se encuentran. El ambiente puede tener distintas características en cada punto y por lo tanto, puede influenciar de distintas formas a los agentes.

---

<sup>1</sup>Modelo Basado en Agentes

El *tiempo* en la simulación de MBA transcurre en instantes discretos. Cada instante representa un intervalo temporal de igual duración. Un agente toma decisiones en cada unidad temporal y actúa en función de su meta. A medida que avanza el tiempo de la simulación la configuración del sistema y por ende el estado del modelo varían.

La idea tras la simulación basada en agentes es que los fenómenos pueden ser generados a partir de las acciones de sistemas multiagentes (Klügl & Bazzan, 2012). Este tipo de enfoque se denomina *bottom-up*. Al desarrollar modelos de agentes, la prioridad está en poder representar adecuadamente el comportamiento de un sistema a nivel microscópico, es decir, el actuar de cada agente. A partir de las interacciones de estos se derivan patrones emergentes, o dicho de otra forma, el comportamiento macroscópico del sistema.

Los MBA no cuentan la restricción de que su contenido pueda ser demostrado, lo que permite al desarrollador enfocarse en los aspectos que considera más importantes (Page, 2005). El desarrollo de estos modelos se lleva a cabo bajo *supuestos* que permiten representar un sistema simplificado. El desafío consiste, por lo tanto, en poder *validar* los supuestos bajo los cuales se trabaja y que el comportamiento del modelo construido tenga validez. Este punto será detallado en la sección 3.3.

Los resultados que entrega un modelo de simulación BA corresponden al comportamiento general del sistema simulado. Este comportamiento se puede resumir en patrones derivados de la interacción de múltiples agentes. Dichos patrones no se modelan ni se intervienen directamente a la hora de construir modelo, por lo que corregir posibles errores de modelación es complejo. Además, leves modificaciones en el comportamiento de agentes puede implicar cambios significativos en los resultados del modelo.

La gran ventaja de este método de simulación es que permite representar sistemas descentralizados, altamente heterogéneos y con entidades activas. Los MBA suelen considerar agentes que no solo difieren en sus características, sino también en sus objetivos y en sus reglas de toma de decisiones. Estos modelos de simulación han sido ampliamente

usados en las áreas de sociología, economía y salud, entre otras. En la siguiente sección se presentan aplicaciones de MBA a problemas relacionados a la evacuación de personas.

### **3.1.2. Problema Estudiado**

El caso de estudio de esta tesis corresponde a la evacuación de la ciudad de Iquique en caso de tsunami. La evacuación de una ciudad de tales características es un proceso complejo que depende del actuar de miles de personas. Cada uno toma decisiones con el fin de alcanzar la zona segura antes del tiempo estimado de arribo del tsunami. La estructura de toma de decisiones de las personas es detallada en la sección 4.3.

Si bien la dinámica de una evacuación se genera a partir del comportamiento de las personas, las autoridades locales establecen planes de evacuación con el fin de preparar y coordinar a los habitantes. Dichos planes deben basarse en tres aspectos: (i) la altura máxima en tierra alcanzada por el tsunami esperado (*run-up*), y (ii) el tiempo de arribo de la misma a la zona de interés. El primer dato permite calcular el área en riesgo; el segundo entrega un indicador de cuán rápida debe ser la evacuación. El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) elabora desde el año 1997 cartas de inundación por Tsunami para la costa de Chile. En el anexo B se incluye la carta de inundación de Iquique versión 2012. Las cartas de inundación son instrumentos para informar sobre la inundación máxima esperada en zonas urbanas. En el caso de Iquique, se espera un run-up máximo de 35 metros (SHOA, 2012). Finalmente, se estima que el tiempo de arribo de tsunami es de 20 minutos (Walker Rousseau, 2013).

Otros elementos importantes al planificar la evacuación de una ciudad corresponden a características de la población expuesta a riesgo y características propias de la zona (Scheer et al., 2011). En cuanto a la población de Iquique, esta se distingue debido al conocimiento existente sobre los procedimientos de evacuación establecidos por la autoridad. Las experiencias en simulacros (agosto 2013) y terremotos (abril 2014 y septiembre 2015) han permitido a la población familiarizarse con las vías de evacuación y puntos de

encuentro propuestos por la autoridad. Esto facilita el proceso de evacuación y permite mejorar los tiempos de respuesta.

La particular geografía de Iquique distingue este caso de estudio de otros. Iquique cuenta con desniveles importantes a lo largo de la ciudad, lo que genera pendientes de gran inclinación en ciertos puntos y afecta a la velocidad con que las personas pueden evacuar. Además, hay sectores como el barrio industrial y la zona franca que se encuentran prácticamente a nivel del mar y están arrinconados por cerros. Dichos sectores agrupan gran cantidad de gente durante el día y representan un desafío importante a la hora de evacuar la ciudad.

El alto número de vehículos en Iquique y la estrechez de ciertas calles es un tema a tener en consideración. Dichos factores podrían entorpecer el proceso de evacuación en caso de que la gente evacuara en vehículos. Por lo tanto, ONEMI recomienda en caso de alerta de tsunami estacionar los vehículos y realizar la evacuación a pie (Walker Rousseau, 2013). Luego, se ha modelado que toda la población de Iquique evacúa a pie.

El presente trabajo considera la existencia de aleatoriedad en la distribución geográfica de los habitantes de Iquique y en el instante en que cada persona comienza a evacuar. El resto del proceso de evacuación (elección de ruta y traslado a punto de encuentro) se considera determinístico.

### **3.2. Evacuación de Personas mediante MBA**

En esta sección se estudia cómo se enfrentan diversos autores al problema de simular una evacuación de personas mediante MBA. Un modelo de simulación basado en agente es definido por las características de sus agentes, sus reglas de toma de decisiones y las interacciones que puede tener con otros agentes y el ambiente.

Una evacuación puede iniciarse debido a múltiples factores como por ejemplo terremotos, incendios o ataques terroristas. La naturaleza del evento que desencadena la

evacuación y el lugar de ocurrencia determinan la lógica del proceso de evacuación. De esta forma, es posible distinguir el proceso de evacuación de un edificio incendiándose de la evacuación de una ciudad por alerta de huracán. En el caso del incendio, el evento ocurre de manera súbita y todas las personas deben escapar por las escaleras, probablemente generando cuellos de botella en espacios reducidos. En el caso del huracán, las personas probablemente han sido informadas de las características del evento y disponen de espacios más amplios para evacuar.

El estudio de estos procesos puede ayudar a identificar riesgos y oportunidades de mejora. Dawson, Peppe, and Wang (2011) desarrollaron un modelo de simulación basado en agentes para evaluar la efectividad en el manejo de eventos de inundación en la ciudad de Towyn, Gales. Dicho modelo contempla la simulación de la rutina de la población de Towyn (9.201 agentes simulados). Durante el transcurso del día ocurre la inundación y las autoridades dan aviso del evento tras una cantidad determinada de tiempo. Los habitantes comienzan a evacuar 5 minutos  $\pm$  1 minuto después. Los agentes evacúan en vehículo o a pie hacia edificios y eligen su ruta mediante el algoritmo  $A^*$ .  $A^*$  es un algoritmo que resuelve el problema de encontrar el camino de costo mínimo en grafos. En la sección 4.3.3 se analiza en detalle el algoritmo  $A^*$ . Los resultados del estudio desarrollado por Dawson et al. (2011) han permitido construir funciones de exposición al riesgo de inundación en la ciudad e identificar vías de evacuación propensas a altas congestiones.

Mas, Suppasri, Imamura, and Koshimura (2012) definen una estructura de toma de decisiones para los agentes en evacuaciones. Dicha estructura está formada por las siguientes capas de decisiones:

- (i) Decisión de evacuar
- (ii) Elección de punto de encuentro
- (iii) Elección de ruta
- (iv) Ajuste de velocidad

La primera decisión que toma un agente es el instante en que comenzará a evacuar. Ese instante es distinto para cada agente y se sugiere modelarlo usando una distribución de probabilidades. Posteriormente, el agente debe elegir el refugio hacia el cual evacuará. En caso de conocer los refugios existente se considera que el agente elegirá el más cercano. Luego, se debe identificar la ruta de evacuación y para esto se sugiere el uso del algoritmo  $A^*$ . Finalmente, el agente debe regular la velocidad a la que evacua dependiendo de factores internos (edad y discapacidad, entre otros) y externos (congestión en vía de evacuación y disponibilidad de vehículos, entre otros).

En dicho estudio, Mas et al. (2012) analizan el caso de estudio de Arahama. Tras el gran terremoto de 2011 en Japón ( $9.0 M_w$ ), la ciudad de Arahama fue azotada por un tsunami. El objetivo del modelo desarrollado consiste en replicar la evacuación de aquel entonces y analizar su desempeño. Un elemento interesante de analizar corresponde a la elección del instante de inicio de evacuación. En este caso, se optó por modelar el instante de inicio mediante la distribución Rayleigh y la media fue distribuida uniformemente entre 7 min y 67 min. Luego, en cada iteración del modelo la población contaba con una distribución de instante de inicio de evacuación distinta. Los límites de la media fueron obtenidos a partir de encuestas y de análisis de preferencias reveladas. El principal problema de este enfoque es que considera un espectro demasiado amplio de parámetros, lo que origina escenarios muy distintos y difíciles de analizar globalmente.

El estudio de la velocidad de evacuación es abordado en detalle por Goto et al. (2012). El objetivo del modelo desarrollado consiste en educar sobre desastres naturales y contribuir a la planificación de la ciudad de Banda Aceh en Indonesia. En este estudio se considerado que cada agente representa a una familia. De esta forma, de los 100.000 habitantes de la ciudad se ha simulado 20.000 agentes. De acuerdo a información de entrevistas casa a casa, las familias fueron clasificadas como familia rápida o lenta dependiendo de si la familia incluía niños o adultos mayores. Luego, se asignó un valor de  $5.4 \frac{km}{h}$  para el primer grupo rápido y de  $2.7 \frac{km}{h}$  para el lento. Además, se incluyó la posibilidad de que las familias evacuaran autos o motocicletas con una velocidad de  $30 \frac{km}{h}$ . En cuanto

a factores de reducción de velocidad, se ha considerado la congestión en las vías de evacuación como determinante. En la figura 3.1 se puede visualizar el comportamiento de la velocidad según congestión propuesto.

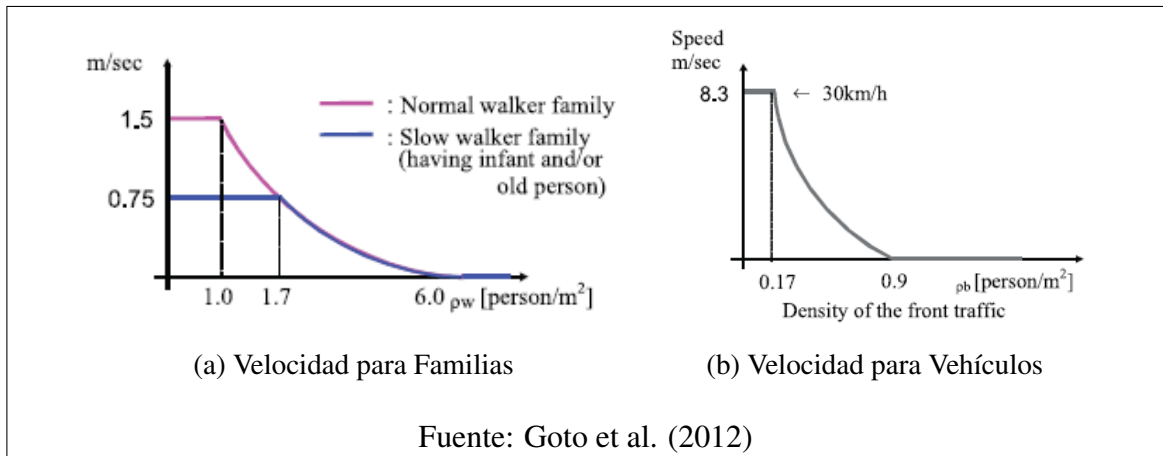


Figura 3.1. Velocidad según Congestión en Vía de Evacuación

Los modelos analizados hasta ahora simulan una cantidad de agentes considerablemente menor a la población de Iquique. Esto no es menor pues el costo computacional de simular el actuar de los agentes aumenta. La investigación realizada por Imamura et al. (2012) incluye la simulación de 104.352 agentes que evacúan de la ciudad de Padang, Indonesia. Debido al tamaño del escenario simulado, el modelo fue dividido en tres submodelos independientes. De esta forma, es posible reducir el tiempo necesario para simular. El modelo contempla evacuación de peatones, cuyo instante de inicio de evacuación distribuye Rayleigh con media de 20 minutos. El tiempo estimado de llegada del tsunami también es de 20 minutos. El hecho de que la media de instante de inicio de evacuación y el tiempo de llegada de tsunami coincidan refleja una educación y preparación inadecuada para la respuesta ante tal evento.

Un plan de evacuación debe adecuarse a la características geográficas del lugar. Mas, Adriano, and Koshimura (2013) estudian el caso de La Punta, una península en la provincia de Callao en Perú. La población de la península es cercana a las 4.000 personas. La principal dificultad de una evacuación en esta zona consiste en que la ciudad cuenta

únicamente con dos vías de evacuación de la península, por lo que al considerar una política de evacuación horizontal se generan cuellos de botella.

El estudio de Mas y cols. (2013) se enfoca en comparar políticas de evacuación que con el fin de mejorar los resultados obtenidos por con una política de evacuación horizontal. Las alternativas evaluadas consisten en evacuación vertical y una política mixta que combine evacuación vertical y horizontal. La evacuación vertical consiste en que las personas entren a edificios y suban a un piso de altura segura. Los edificios y la altura a la que se debe subir son establecidos por las autoridades. Para el caso de evacuación horizontal se obtiene un total de 271 víctimas, con evacuación vertical 16 y con evacuación mixta 153. Luego, se deduce que la política de evacuación vertical es más apropiada para la realidad geográfica de La Punta.

El caso de Iquique ha sido previamente estudiado por León and March (2015). Ellos llevan a cabo un diagnóstico del desarrollo urbano de Iquique y desarrollan un modelo basado en agentes para evaluar la evacuación de la ciudad bajo el escenario actual y compararlo con un escenario modificado. Las modificaciones que consideran consisten en cambios en las conexiones entre calles para hacer más directa la evacuación de peatones y la construcción de edificios de evacuación vertical en la zona franca y en el puerto. Luego, el enfoque del estudio es el análisis de la planificación urbana de Iquique con el fin de mejorar la capacidad de respuesta de la población frente a un tsunami.

El modelo desarrollado por León y March (2014) se caracteriza por:

- **Población modelada:** el estudio usa información entregada por la encuesta origen-destino de la Secretaría de Planificación de Transporte (2010) (SECTRA, 2010) para modelar un escenario diurno (108.881 agentes) y uno nocturno (83.331 agentes). La zona 1 (incluye ZOFRI) ha sido modelada con 16.840 personas. Esto dista significativamente del peor escenario estimado, donde únicamente en ZOFRI se consideran 30.000 personas (Van Blokland, De Groot, Rot, Wieringa, & Wijnands, 2013).

- **Modelación de velocidad de agentes:** se considera una velocidad máxima de  $1,4 \frac{m}{s}$  para todos los habitantes. Dicha velocidad varía según la congestión y la inclinación de las vías de evacuación. El impacto de la congestión en la velocidad es modelado de forma similar a lo propuesto por Goto y cols. (2012), detallado anteriormente. El impacto de la velocidad fue modelado considerando factores de reducción de velocidad constantes para distintos rangos de inclinación. Este enfoque no distingue inclinaciones al interior de los rangos considerados, lo que puede presentar un problema en la modelación puesto Iquique presenta vías de evacuación con pendientes muy distintas y largas. De esta forma, distintas inclinaciones deben generar una reducción de velocidad distinta. En la tabla 3.1 se expone los factores de reducción de velocidad considerados.

Tabla 3.1. Conservación de Velocidad según Inclinación del Plano

| Inclinación (grados) | Conservación de velocidad (%) |
|----------------------|-------------------------------|
| 0                    | 100                           |
| 0–5                  | 90                            |
| 5–15                 | 80                            |
| 15–30                | 40                            |
| 30–45                | 15                            |
| Más de 45            | 5                             |

Fuente: León y March (2012)

- **Instante de inicio de evacuación:** se considera dos escenarios. El primero consiste en la evacuación inmediata de los habitantes de Iquique tras la ocurrencia de un terremoto; el segundo consiste en que el instante de inicio de evacuación de cada habitante distribuye Rayleigh de media 20 minutos. Este último caso es pesimista pues el tiempo estimado de llegada de un tsunami en Iquique es de 20 minutos, luego la probabilidad de evacuar exitosamente es baja.
- **Modelación de Iquique:** se ha desarrollado 5 modelos independientes de manera similar a lo realizado por Imamura et al. (2012). Cada modelo representa

una de las zonas de Iquique de acuerdo a la división realizada por ONEMI para coordinar evacuaciones.

- **Métrica de desempeño:** se analiza el desempeño de un proceso de evacuación bajo la métrica del tiempo total requerido para evacuar Iquique. En el escenario de evacuación inmediata el tiempo total de evacuación fue de 42 minutos, mientras que en el escenario pesimista 88 minutos.

En la tabla 3.2 se detalla características de los casos de estudio analizados en esta sección.

Tabla 3.2. Casos de Evacuación mediante MBA

|                                       | Arahama<br>(Japón)                             | Banda Aceh<br>(Indonesia)                                                           | Iquique<br>(Chile)                                                              | La Punta<br>(Perú)                             | Padang (Indonesia)        | Towyn<br>(UK)                                     |
|---------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------|
| Tipo de emergencia                    | Tsunami                                        | Tsunami                                                                             | Tsunami                                                                         | Tsunami                                        | Tsunami                   | Inundación                                        |
| Número de réplicas                    | 100                                            | No específica                                                                       | 50                                                                              | 250                                            | No específica             | 6.394                                             |
| Agentes                               | Peatones y Vehículos                           | Familias y Vehículos                                                                | Peatones                                                                        | Peatones y Vehículos                           | Peatones                  | Peatones y Vehículos                              |
| Modelación de velocidad               | Distribuye normal truncada con máximo 1,33 m/s | $V_{max}$ : 1,5 m/s.<br>Varía según: características de familia y congestión en vía | $V_{max}$ : 1,4 m/s.<br>Varía según: congestión en vía e inclinación del plano. | $V_{max}$ : 1,33 m/s.<br>Varía según: Edad     | Constante 1,67 m/s        | Todos evacúan en vehículo.<br>$V_{max}$ : 50 km/h |
| Media Instante de Evacuación          | Rayleigh, $\mu$ aleatorio entre 7 y 67 minutos | 10 minutos después de terremoto                                                     | Optimista:<br>Rayleigh, $\mu = 0$ min<br>Pesimista:<br>Rayleigh, $\mu = 20$ min | Rayleigh, $\mu$ aleatorio entre 7 y 20 minutos | Rayleigh $\mu$ 20 minutos | U(4,6) minutos                                    |
| Tiempo esperado de llegada de tsunami | 1 hora                                         | No específica                                                                       | 20 minutos                                                                      | 20 minutos                                     | 20 minutos                | -                                                 |
| Agentes simulados                     | 2.271                                          | 100.000                                                                             | Día: 108.881<br>Noche: 83.331                                                   | 3.695                                          | 104.352                   | 9.201                                             |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3. Validación de MBA

Un modelo de simulación es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones basada en la simplificación de sistemas reales. El mayor desafío de un modelo es que represente fielmente al sistema original. En esta sección se abordará el problema de validación de modelos de simulación basados en agentes. Los estudios revisados en la sección 3.2 no profundizan en la metodología usada para validar los modelos de simulación basada en agentes desarrollados. Por lo tanto, se hará una revisión general de validación de MBA y en la sección 4 se abordará la metodología de validación que se aplicará en el presente trabajo.

El desarrollo de modelos basados en agentes se fundamenta en el entendimiento del sistema que se desea representar. A partir de ese conocimiento, se elaboran supuestos y se centra el desarrollo en los elementos que se consideran más importantes. La validación cumple el rol de evaluar y confirmar la representación que se tiene del sistema modelado. A pesar de la importancia que tiene esta etapa en la construcción de un modelo, no existe un proceso estándar de validación definido. Al respecto, Bharathy and Silverman (2012) señalan:

Los modelos no-estadísticos, especialmente los modelos basados en agentes y los modelos de sistemas dinámicos, han sido frecuentemente criticados por depender extensamente en procedimientos de validación informales, subjetivos y cualitativos, o por no tener ningún procedimiento de validación. (Por ejemplo, los dominios en los que estos modelos son frecuentemente aplicados están determinados por la escasez de fuentes consolidadas de datos). Muchos investigadores han hecho fuertes llamados para sistematizar y mejorar la validación.

En su estudio, Bharathy y Silverman (2012) proponen que el proceso de validación debiese realizarse en dos etapas: una etapa interna y una externa. La etapa de validación interna es definida como una revisión del proceso de construcción del modelo y

del conocimiento del sistema representado. Para lograr este objetivo, se sugiere realizar una evaluación estructural del modelo que chequee la congruencia entre el modelo y la realidad. Además, se considera la evaluación metodológica de los datos usados. Esto último es de gran interés pues, de acuerdo a lo mencionado anteriormente, los ámbitos de aplicación de estos modelos se caracterizan por la escasez de datos fiables.

El análisis externo contempla la validación cuantitativa a nivel micro y a nivel macro del modelo. La validación a nivel micro corresponde a revisar estadísticamente el comportamiento individual de los agentes. Esto requiere revisar las interacciones individuales de múltiples agentes para tener muestras representativas en distintos contextos del actual de ellos. Por ejemplo, en un modelo de tránsito se podría revisar la velocidad promedio con que agentes individuales se trasladan y compararlo con datos disponibles. La validación a nivel macro corresponde a un análisis de los patrones emergentes del sistema, es decir, del resultado de las interacciones entre agentes. Siguiendo con la línea del ejemplo anterior, se podría considerar comparar la velocidad de tránsito promedio de una calle con los datos disponibles.

Klügl (2008) propone que la validación de un modelo de simulación se realice bajo una metodología determinada por las siguientes etapas:

- (i) **Face Validation:** consiste en una revisión en conjunto con expertos del modelo desarrollado, a modo de auditoría. Formas sugeridas para realizar *face validation* son la evaluación de la animación de una simulación, la evaluación de output y el seguimiento de las acciones de un agente. Es importante destacar que el comportamiento de los agentes tiene elementos multidisciplinarios, por lo que se aconseja la participación de expertos en los ámbitos relevantes.
- (ii) **Análisis de sensibilidad:** el actuar de agentes, sus interacción y la influencia del ambiente da espacio para que los modelos de agentes incluyan múltiples parámetros. El análisis de sensibilidad permite explorar el efecto que tiene en el modelo la variación del valor de un parámetro. De esta forma, es posible contrastar si al variar un parámetro se observa el comportamiento esperado del

sistema. Realizar análisis de sensibilidad adquiere gran importancia en este tipo de modelos pues muchas veces no es posible conocer a priori el efecto que produce variar un parámetro individual del comportamiento de los agentes en los patrones emergentes del sistema.

- (iii) **Calibración:** debido a la falta de información sobre el sistema modelado es posible que no se disponga del valor de algún parámetro del modelo. Para resolver este problema se plantea la calibración del modelo, es decir, encontrar el valor del parámetro que genera un output determinado del que se tenga registro. Luego, la calibración de un modelo es básicamente un problema de optimización cuyo dominio corresponde a los valores posibles que puede tomar el parámetro de estudio. Este problema generalmente es difícil de resolver, debido a que la relación entre input y output muchas veces no es predecible y el espacio de valores los parámetros suele ser grande. El problema de calibración es analizado en detalle por Fehler, Klügl, and Puppe (2006).
- (iv) **Validación estadística:** una vez el modelo ha sido validado en su etapa de desarrollo, es posible usar el output obtenido de las simulaciones para analizar su comportamiento. Klügl (2008) destaca la importancia de usar distintos sets de datos para realizar la calibración y la validación estadística. De esta forma se puede confirmar que no hay un sesgo producto de los parámetros calibrados. Todo dato disponible debiese ser usado para validar en esta etapa. Para validar estadísticamente un modelo se debe usar métricas que representen apropiadamente al sistema. Tales métricas deben ser usadas para validar un modelo a nivel agregado y a nivel de componentes del modelo o submodelos. La validación de componentes del modelo suele ser más complicado que la validación a nivel agregado, pues requiere contar con un mayor nivel de apertura de datos. En caso de no disponer de la información necesaria se debe recurrir a herramientas que no influyan en el proceso de recolección de datos. Por ejemplo, el uso de herramientas como encuestas o entrevistas suele ser de alto costo y dependiendo de la redacción de las preguntas puede haber sesgo en los resultados.

## **4. MODELO DE SIMULACIÓN DESARROLLADO**

### **4.1. Componentes**

#### **4.1.1. Entidades**

La entidad principal modelada son los habitantes de Iquique. Estos se caracterizan por su edad. En función de dicho parámetro se determina la velocidad máxima de desplazamiento. Además, cada persona posee una estructura de toma de decisiones, la cual determina la forma en que evacuará hacia la zona segura. Mas et al. (2012) proponen que la estructura de toma de decisiones en una evacuación se puede conceptualizar en 4 etapas:

- (1) Decisión de evacuar
- (2) Elección de punto de encuentro
- (3) Elección de ruta de evacuación
- (4) Ajuste de velocidad

El detalle de la modelación de esta estructura de toma de decisiones se describe en la sección 4.3.

#### **4.1.2. Recursos**

- Calles: se caracterizan por su ancho, el cual determina la cantidad de personas que caben en ellas. El ancho de las calles ha sido modelado según lo señalado en el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2013). En la tabla 4.2 se detallan los anchos de calle requeridos por el Ministerio de Obras Públicas.
- Edificios de evacuación: corresponden a edificios ubicados en la zona costera y capaces de albergar personas en caso de tsunami. Según FEMA (2012), la mínima altura para poder albergar refugiados en puntos de evacuación vertical corresponde a 3 metros por sobre el máximo run-up estimado . Por lo tanto, el presente estudio contempla únicamente a edificios que tengan espacio disponible

a una altura superior a los 38 metros de altura por sobre el nivel del mar. Los edificios considerados y sus respectivas capacidades son detalladas en la tabla E.1.

- **Puntos de encuentro:** corresponden a lugares ubicados en la zona segura. La personas deben dirigirse hacia los puntos de encuentro en un proceso de evacuación. La cantidad y ubicación de ellos es determinada por ONEMI. En la sección C se detallan los puntos de encuentro actuales de Iquique.
- **Vías de evacuación:** corresponden a las rutas recomendadas por ONEMI para la evacuación de vehículos y peatones. Se caracterizan por su ancho, el cual determina la cantidad de personas que caben en ellas. Además, se caracterizan por la pendiente que tienen. En la sección C se detallan las vías de evacuación actuales de Iquique. El ancho y la inclinación de cada vía son detallados en la sección D.

#### 4.2. Medidas de Desempeño

Para evaluar el proceso de evacuación de Iquique se consideran las siguientes métricas de desempeño:

- **Número de personas en zona no segura 20 minutos después del inicio de la evacuación.** Se registrará el número de personas que no alcanzaron la cota de 35 metros de altura en los primeros 20 minutos de evacuación. Esta es la principal métrica considerada por ONEMI en la evaluación de una evacuación (Walker Rousseau, 2013).
- **Porcentaje de la población en zona segura.** Se registrará, cada 5 minutos, el porcentaje de la población que se encuentra en zona segura. Esta métrica permite medir la evolución de la evacuación.

### **4.3. Lógica de las Dinámicas sobre los Agentes**

En los modelos basados en agentes, los agentes actúan de acuerdo a una estructura de toma de decisiones. En este caso, dicha estructura corresponde a las decisiones que toman las personas mientras evacúan. El comportamiento humano ha sido separado en 4 capas, las cuales se detallan a continuación.

#### **4.3.1. Decisión de evacuar**

La primera decisión que toma un agente en un proceso de evacuación corresponde al momento en que comenzará a evacuar. Esta decisión es personal y depende tanto de la percepción de riesgo del individuo como de la importancia que le asigne a otras actividades (ubicar a familiares, reunir pertenencias, etc.).

Una tendencia para modelar la decisión de evacuar es considerar que la población entera inicia el proceso de evacuación en un momento determinado. Tal es un caso propuesto por Goto y cols. (2012), en el que la población en conjunto comienza a evacuar cuando las sirenas de emergencia son encendidas. El principal problema de este enfoque es que no representa correctamente el comportamiento observado durante evacuaciones.

Puesto que cada persona opta por evacuar en distintos momentos, es conveniente modelar el tiempo de inicio de evacuación de cada agente mediante una distribución de probabilidades. Una tendencia aceptada entre investigadores es la de caracterizar el porcentaje de la población evacuando mediante curvas sigmoides (Mas et al., 2012). Esto se debe a que las curvas sigmoides permiten representar el comportamiento general de un proceso de evacuación: en principio hay un bajo porcentaje de la población que evacua, a medida que pasa el tiempo aumenta participación en la evacuación y finalmente, a medida que la gente llega a los puntos de encuentro, disminuye la cantidad de personas evacuando. Tweedie, Rowland, Walsh, Rhoten, and Hagle (1986) proponen el uso de la distribución Rayleigh para modelar evacuaciones regionales en caso de huracán debido a la forma sigmoide de su función de distribución y su dominio. En este trabajo consideramos la distribución de

Rayleigh para modelar el tiempo que toma cada individuo para iniciar su evacuación pues permite representar el comportamiento esperado de la población durante un proceso de evacuación y porque dicha distribución es un factor común en modelos de evacuación en caso de tsunami, e.g. (Imamura et al., 2012), (Mas et al., 2013) y (León & March, 2015).

La función acumulada de Rayleigh está descrita por:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.1)$$

$$\mu = \sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (4.2)$$

donde  $F(t)$  corresponde a la función acumulada de Rayleigh para la tasa de evacuación de la población en el instante  $t$ .  $\sigma$  es un parámetro de escala que se relaciona con la media de la población  $\mu$  a través de la ecuación (4.2). La figura 4.1 muestra la forma de la función de densidad y la función acumulada de la distribución Rayleigh para el caso  $\mu = 3$ .

En el caso de Iquique se ha considerado  $\mu = 3$  minutos debido a los siguientes factores:

- **Sistema de alerta ciudadana:** Iquique cuenta con un sistema de sirenas para avisar a la población en caso de que haya que evacuar. Una vez se ha confirmado la necesidad de evacuar, las sirenas son encendidas inmediatamente. ONEMI requiere de 3 minutos aproximadamente para confirmar la necesidad de evacuar.
- **Educación:** la población de Iquique es consciente del riesgo existente ante un eventual tsunami. Las evacuaciones por el simulacro de agosto de 2013, por el terremoto de Iquique del abril de 2014 y por el terremoto de Illapel de septiembre de 2015 han servido para practicar las dinámicas de evacuación. Las autoridades locales han organizado campañas de educación en materia de evacuación, lo que ha permitido mejorar la respuesta de las personas.

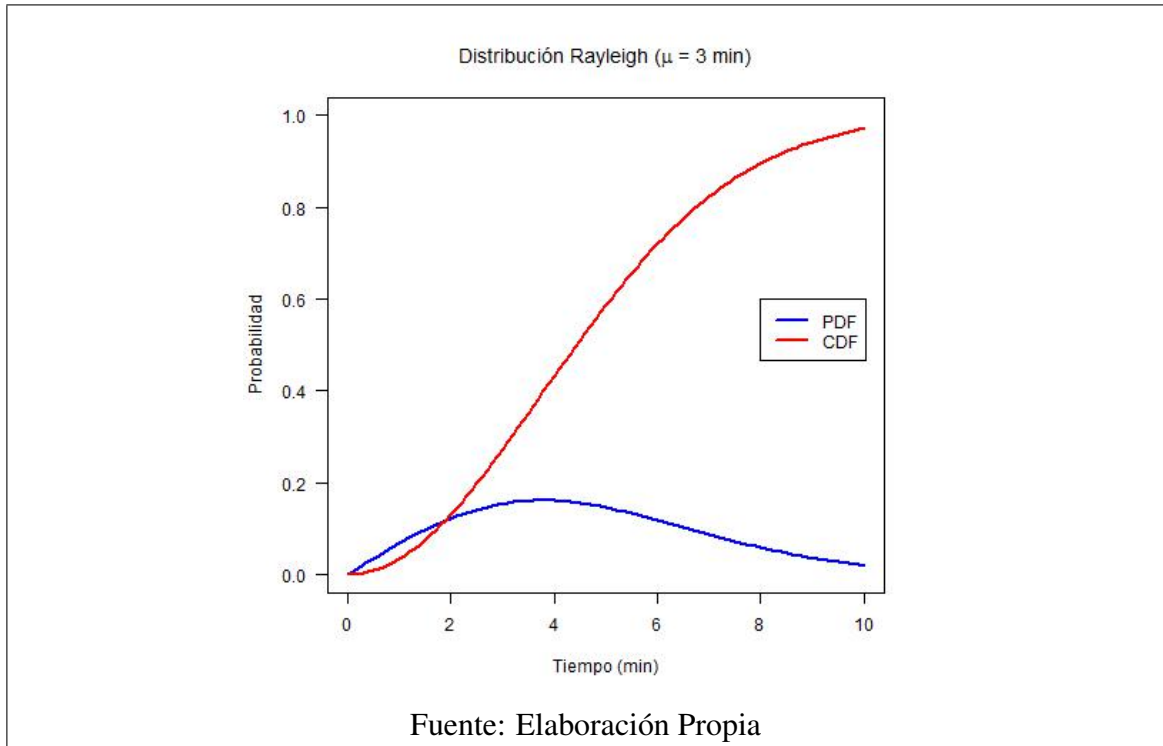


Figura 4.1. Función de Densidad y Función Acumulada Rayleigh

La media de la población para el tiempo de inicio de la evacuación considerada en (Mas et al., 2012) y (Mas et al., 2013) es más alta ( $\mu = 7$  minutos). Dicha diferencia se puede deber a diferencias culturales entre las poblaciones modeladas. Por lo tanto, se realizará un análisis de sensibilidad para estudiar el efecto de variaciones en este parámetro.

#### 4.3.2. Elección de punto de encuentro

Una vez la persona ha decidido evacuar, debe elegir el punto de encuentro (PE) al que se dirigirá. La elección de PE se sustenta en el conocimiento que se posee. Si la persona sabe la ubicación de los puntos de encuentro, se dirigirá al punto más cercano utilizando una ruta definida heurísticamente (ver sección 4.3.3). En caso de desconocer la ubicación de los PE, la persona debiese seguir al grupo de personas más cercano.

El presente estudio considera que todos los agentes conocen las vías de evacuación y puntos de encuentro establecidos por ONEMI. Este supuesto se basa en la experiencia

reciente en evacuaciones que han tenido los habitantes de Iquique y en los resultados del simulacro de agosto de 2013, en el que el 92% de los participantes demostró conocer las vías de evacuación y puntos de encuentro (Walker Rousseau, 2013).

#### 4.3.3. Elección de ruta

La elección de ruta es un aspecto clave para aprovechar el tiempo disponible para evacuar. ONEMI ha determinado las vías de evacuación que los habitantes de Iquique deben usar para evacuar hacia la zona segura. Los habitantes deben encontrar una ruta hacia la vía de evacuación más cercana y posteriormente evacuar siguiendo la vía.

El problema de elección de ruta ha sido modelado como uno de cálculo del camino más corto en una red. Este tipo de problemas ha sido ampliamente estudiado en grafos y existen múltiples algoritmos capaces de calcular soluciones óptimas. El presente trabajo considera el algoritmo  $A^*$  puesto que tiene mejor desempeño en términos de tiempo de ejecución que otros algoritmos, entre ellos Dijkstra, al resolver el problema del camino más corto en redes de calles reales (Zeng & Church, 2009). Las especificaciones respecto a la modelación de Iquique como grafo son detalladas en la sección 4.4.

$A^*$  es un algoritmo de carácter heurístico que opera bajo la lógica de *best-first search*. Este algoritmo opera en grafos conexos, es decir, grafos en los que para cada par de vértices existe un camino que los une. El input del algoritmo es el vértice de inicio y el vértice de destino. Mediante una función de evaluación  $A^*$  etiqueta los nodos de la red. Dicha función considera la distancia real desde el vértice de inicio y el vértice a etiquetar, y la distancia estimada entre el nodo a etiquetar y el nodo de destino. Es decir, si se pretende encontrar el camino más corto desde el nodo origen  $s$ , hasta el nodo destino  $t$ , un nodo intermedio de la red  $n$  tendría la siguiente función de evaluación  $f(n)$  como etiqueta:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (4.3)$$

donde  $g(n)$  indica la longitud del camino que une el nodo origen  $s$  con el nodo intermedio  $n$ , y  $h(n)$  expresa la distancia estimada desde el nodo  $n$  hasta el nodo destino  $t$ .

El algoritmo se caracteriza por el uso de la función heurística  $h(n)$ . Esta expresa la idea de cuán lejos se cree que se está de alcanzar el nodo destino. El rendimiento del algoritmo depende en gran medida de la elección de  $h(n)$ . En problemas de ruteo, una opción conveniente para  $h(n)$  corresponde a la distancia en línea recta entre el nodo a etiquetar y el nodo de destino (Hart, Nilsson, & Raphael, 1968). Dicha función es simple de implementar y es posible demostrar que, usando la distancia euclideana para  $h(n)$ ,  $A^*$  encuentra el camino de menor costo entre el nodo de partida y el nodo de destino (Dechter & Pearl, 1985).

$A^*$  comienza evaluando  $f$  para todos los nodos vecinos de  $s$ . Luego agrega los nodos evaluados a un conjunto  $Q$ , en el cual almacena los nodos con vecinos por explorar. En cada iteración el algoritmo extrae de  $Q$  al nodo con menor valor de  $f$ , evalúa  $f$  de sus vecinos y los agrega a  $Q$ . Cuando nodo es agregado a  $Q$  se registra el nodo padre desde el que se llegó al nodo registrado. De esta forma, es posible construir el camino desde  $s$  a  $d$ . El funcionamiento del algoritmo  $A^*$ , puede ser esquematizado mediante la siguiente sucesión de pasos:

#### Pseudo Código para el Algoritmo $A^*$

##### Input:

- Grafo  $G=(V,E)$
- Nodo de origen  $s$
- Nodo destino  $d$

##### Algoritmo:

- (i) Inicializar  $f(s) = 0$ , y  $f(i) = \infty$  para todos los nodos  $i \neq s$ . Inicializar el conjunto  $Q$  como vacío.
- (ii) Agregar el nodo  $s$  al conjunto  $Q$ .
- (iii) Seleccionar el nodo  $i$  del conjunto  $Q$  que presente menor valor de la función  $f(i)$  y eliminarlo del conjunto  $Q$ .
- (iv) Analizar los nodos vecinos  $j$  de  $i$ . Para cada arco  $(i, j)$  con costo  $c_{ij}$ :
  - (a) Si  $j = d$ ,
    - i. Clasificar a  $i$  como padre de  $j$ .
    - ii. Retornar  $G$
  - (b) Calcular:  $f(j)' = g(i) + c_{ij} + h(j)$
  - (c) Si  $f(j)' < f(j)$ ,
    - i. Actualizar la etiqueta de  $j$ :  $f(j) = g(i) + c_{ij} + h(j)$
    - ii. Clasificar al nodo  $i$  como padre del nodo  $j$
    - iii. Insertar el nodo  $j$  en  $Q$
  - (d) Si  $f(j)' \leq f(j)$ 
    - i. No actualizar el valor de  $f(j)$
- (v) Si  $Q$  está vacío el algoritmo retorna  $G$ . Si no está vacío, volver al paso 3.

Output:

- Grafo  $G = (V, E)$  con relación entre nodos actualizada.

Figura 4.2. Pseudo Código para el Algoritmo A\*

#### 4.3.4. Ajuste de velocidad

La velocidad que pueda tener un individuo en un proceso de evacuación depende básicamente de las características físicas de la persona, la inclinación y congestión del

punto en el que se encuentre. No se ha incluido la modelación de personas con discapacidad en el proceso de evacuación debido a la falta de información subyacente.

En relación a las características físicas de la persona se ha distinguido a los agentes por rango etario. Para las personas con edad entre 10 y 65 años se ha considerado una velocidad máxima de evacuación de 1.5 m/s. En el caso de niños menores a 10 años y de adultos mayores a 65 años se ha considerado una velocidad máxima de 0.75 m/s. Esta distinción se debe a que dichos grupos etarios suelen evacuar acompañados de familiares en grupos de menor velocidad.

El cálculo de la velocidad efectiva de un peatón se realiza multiplicando la velocidad que puede alcanzar un individuo, dependiendo de la congestión en la vía de evacuación, por un factor de disminución de velocidad producto de la inclinación ( $\mu$ ). Luego, el cálculo de la velocidad de un agente se realiza de acuerdo a lo señalado en la ecuación 4.4.

$$v_{efectiva} = v_{densidad} * \mu_{inclinacion} \quad (4.4)$$

El detalle del cálculo de los factores involucrados se especifica a continuación.

#### **4.3.4.1. Impacto de la Congestión de la Ruta**

A medida que aumenta la congestión del camino por el que se desplaza una persona disminuye la velocidad máxima a la que puede evacuar. Es importante destacar que los peatones son capaces de esquivar a otras personas dependiendo del nivel de congestión que tenga la vía de evacuación. Para peatones se considera que valores teóricos de densidad cercanos a 6.6 personas/m<sup>2</sup> corresponden a un caso estático donde las personas no se pueden mover debido a la falta de espacio. En la práctica, valores cercanos al 80% de este valor no admiten movimiento fluido (Meister, 2007).

Para modelar la variación de velocidad según la densidad de la vía se ha usado la aproximación presentada por Goto et al. (2012). Ellos sugieren el uso de la ecuación

(4.5) para modelar la evacuación de peatones rápidos y la ecuación (4.6) para modelar la evacuación de peatones lentos. En la figura 3.1 de la sección 3.2 se puede visualizar el comportamiento de la velocidad según la congestión del camino  $\delta$  para peatones rápidos y para peatones lentos.

$$v_{\text{Peatón Rápido}} = \begin{cases} 1.5 \frac{m}{s} & , \text{if } \delta \leq 1 \frac{\text{persona}}{m^2} \\ (0.18 * \delta^2 - 1.56 * \delta + 2.88) \frac{m}{s} & , \text{if } 1 \frac{\text{persona}}{m^2} < \delta < 6 \frac{\text{personas}}{m^2} \\ 0 \frac{m}{s} & , \text{if } \delta \geq 6 \frac{\text{personas}}{m^2} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$v_{\text{Peatón Lento}} = \begin{cases} 0.75 \frac{m}{s} & , \text{if } \delta \leq 1.7 \frac{\text{personas}}{m^2} \\ (0.18 * \delta^2 - 1.56 * \delta + 2.88) \frac{m}{s} & , \text{if } 1.7 \frac{\text{personas}}{m^2} < \delta < 6 \frac{\text{personas}}{m^2} \\ 0 \frac{m}{s} & , \text{if } \delta \geq 6 \frac{\text{personas}}{m^2} \end{cases} \quad (4.6)$$

#### 4.3.4.2. Impacto de la Inclinación de la Ruta

En el caso de los peatones es necesario considerar el efecto que la inclinación del suelo tiene en la velocidad de desplazamiento. Iquique cuenta con vías de evacuación con más de un kilómetro de extensión e incluso, en los casos de Av. Circunvalación y del puerto de Iquique, la distancia que se debe recorrer para llegar a zona segura supera los dos kilómetros. Teniendo en consideración la longitud de los desplazamientos es conveniente considerar un método que permita distinguir coherentemente el impacto que tienen diferentes inclinaciones en la velocidad de peatones.

Una aproximación para modelar el efecto de la inclinación es la utilizada por Post et al. (2009), quienes establecen intervalos de inclinación y factores de reducción de velocidad constantes para cada intervalo. Por ejemplo, en un camino con inclinación mayor a 0% y

menor a 5% la velocidad del peatón corresponde al 90% de la velocidad máxima que puede alcanzar. El principal problema de este enfoque es que no permite distinguir inclinaciones al interior de cada intervalo. En el caso de Iquique las vías de evacuación son largas. Por lo tanto, es conveniente modelar el impacto de la inclinación en la velocidad mediante una función continua que permita distinguir el impacto de diferentes inclinaciones en la velocidad.

En el presente estudio se ha modelado el impacto de la velocidad de acuerdo a lo propuesto por la regla de Tobler. La regla de Tobler (Tobler, 1993) establece que la velocidad puede ser modelada con una función exponencial que toma en cuenta la pendiente del plano. La ventaja de esta aproximación es que permite distinguir de forma continua el impacto de la inclinación en la velocidad. Según Tobler, la velocidad de caminata ( $w_s$ ) puede ser modelada por la siguiente formula:

$$w_s\left(\frac{dh}{dx}\right) = 6e^{-3.5|\frac{dh}{dx}+0.5|} \frac{m}{s} \quad (4.7)$$

donde  $\frac{dh}{dx}$  corresponde a la tangente del ángulo de inclinación del plano de estudio.

Luego, el factor de reducción de la velocidad según la inclinación del plano ( $\mu_{Inclinacion}$ ) para una inclinación  $\frac{dh}{dx}$  se calcula como la razón entre la velocidad según la regla de Tobler para inclinación  $\frac{dh}{dx}$  y la velocidad máxima que puede alcanzar una persona. Para el caso de estudio analizado la velocidad máxima se alcanza en un plano sin inclinación ( $\frac{dh}{dx} = 0$ ). Por lo tanto,  $\mu_{inclinacion}$  se calcula de acuerdo a lo señalado en la ecuación (4.8).

$$\mu_{inclinacion}\left(\frac{dh}{dx}\right) = \frac{w_s\left(\frac{dh}{dx}\right)}{w_s(0)} \quad (4.8)$$

#### 4.4. Aspectos Específicos

En esta sección se describe características propias del modelo de simulación desarrollado en Netlogo.

##### 4.4.1. Input del Modelo

###### (i) Input espacial mediante Sistema de Información Geográfico (*GIS*)

- Edificios de evacuación y capacidad de personas que pueden alojar
- Puntos de encuentro
- Red de calles y sus características: ancho, largo e inclinación
- Vías de evacuación
- Zonas a evacuar para cada escenario

###### (ii) Input relativo a la caracterización de la población

- Distribución geográfica según edad para escenario diurno (fuente: Encuesta Origen Destino, SECTRA)
- Distribución geográfica según edad para escenario nocturno (fuente: Censo, INE)
- Instante promedio de inicio de evacuación
- Velocidad máxima de evacuación para peatones

###### (iii) Input relativo a la política de evacuación

- Distancia máxima a edificio para considerar evacuación vertical
- Política de evacuación: ¿evacuación horizontal o evacuación mixta?

##### 4.4.2. Output del Modelo

Durante una corrida del programa, se registra datos relativos al proceso de evacuación de cada agente. Una vez el agente ha alcanzado el punto de encuentro al que se dirige se guarda su información en un archivo de extensión *.txt*. Al finalizar la corrida dicho archivo contiene la información de todos los agentes.

La información que se registra de cada agente corresponde a:

- (i) Características del agente
  - Edad
  - Instante de inicio de evacuación
- (ii) Características del proceso de evacuación del agente
  - Distancia recorrida en vía de evacuación
  - Instante de llegada a punto de encuentro
  - Tiempo usado para recorrer vía de evacuación
  - Zona en que inicia la evacuación

A partir de la información registrada es posible calcular las medidas de desempeño indicadas anteriormente: el porcentaje de la población en zona segura para distintos instantes y el número de personas en zona no segura 20 minutos después del inicio de la evacuación.

#### **4.4.3. Modelación de Iquique**

##### **4.4.3.1. Calles y Vías de Evacuación**

La ciudad de Iquique ha sido modelada como un grafo cuyos vértices corresponden a intersecciones de calles o cambios de dirección de una calle y las aristas corresponden a segmentos rectos de una calle. De esta forma, un tramo curvo de una calle es representado mediante múltiples vértices y aristas, lo que indica que ese tramo de la calle cambia muchas veces de dirección. La figura 4.3 presenta gráficamente esta situación. En la tabla 4.1 se detalla los números de vértices y aristas usados para modelar cada zona de Iquique.

Las aristas y los vértices del grafo almacenan información relevante para la interacción de los agentes con el ambiente. Cada arista guarda información sobre el ancho, la inclinación y el largo de la calle en el tramo que representa.

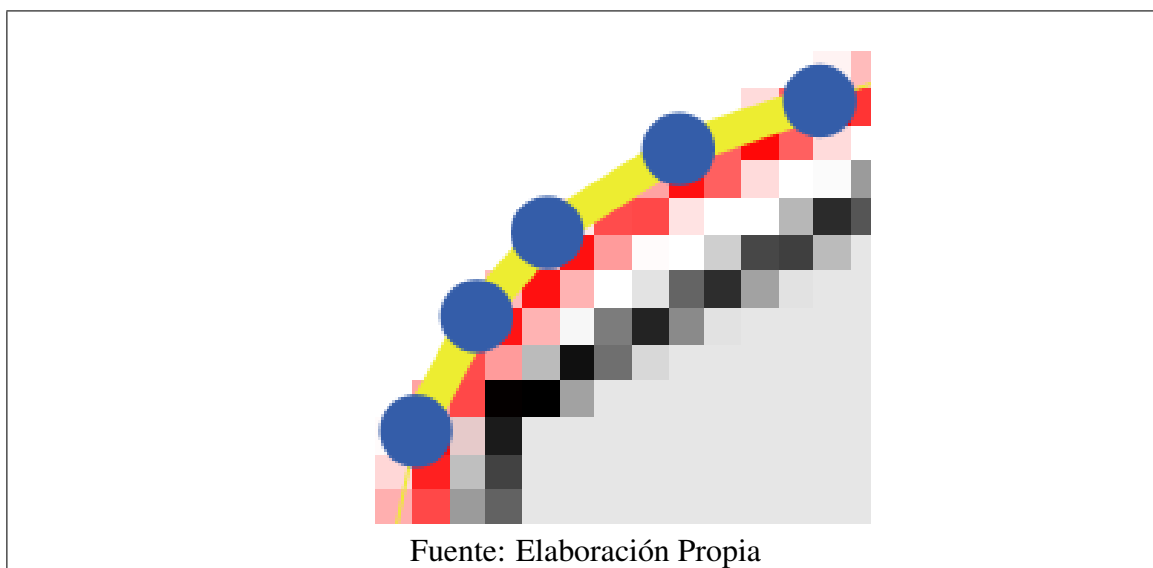


Figura 4.3. Representación de un Tramo Curvo de una Calle

Tabla 4.1. Número de Nodos y Vértices por Zona

|        | # Vértices | # Aristas |
|--------|------------|-----------|
| Zona 1 | 1.166      | 1.320     |
| Zona 2 | 1.431      | 1.888     |
| Zona 3 | 1.381      | 1.752     |

Fuente: Elaboración Propia

En el caso de los vértices, se ha modelado que contienen la información sobre la ruta que seguirán los agentes. Se ha optado por modelar el problema de esta forma debido a que la cantidad de personas a evacuar es significativamente mayor que el número de nodos en el grafo. Luego, el costo de calcular la ruta óptima para cada agente es considerablemente mayor que calcularla para los nodos. De esta forma los agentes consultan en los vértices cuál es la ruta que deben seguir. La información almacenada depende de si el vértice pertenece a una calle o a una vía de evacuación. En el primer caso el vértice contiene la ruta hacia la vía de evacuación más cercana, en el segundo caso contiene la ruta hacia el punto de encuentro más cercano.

El grafo usado para modelar Iquique fue provisto por el programa SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development) de JICA (Japan

International Cooperation Agency) en formato *shapefile* (extensión *.shp*). CIGIDEN ha establecido un acuerdo de colaboración con JICA en materia de investigación y es a través de CIGIDEN que se ha podido tener acceso a la información. Los archivos *shapefile* consisten en vectores de información geográfica y características de los objetos modelados. Para procesar este tipo de archivos se ha usado el programa *QGIS*, software que consiste en un sistema de información geográfico (*GIS* por sus siglas en inglés). En la figura 4.4 se puede visualizar un extracto del grafo considerado.



Figura 4.4. Grafo de Iquique

#### 4.4.3.2. Ancho e Inclinación de Calles

El ancho y la inclinación de una calle tienen un rol clave en el proceso de evacuación. El primero regula la cantidad de personas que pueden desplazarse simultáneamente en una calle, mientras que el segundo influye en la velocidad con que las personas evacúan. El ancho y la inclinación usados para modelar las vías de evacuación de Iquique se detalla en el anexo D.

Para modelar el ancho de las calles de Iquique se ha distinguido entre las vías de evacuación y las calles comunes. El ancho de las vías de evacuación fue medido en distintos

lugares de la vía por el autor de esta tesis durante visitas a terreno y se registró el ancho en cada tramo. En el caso de las calles comunes se ha establecido el ancho en función de lo señalado por el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2013). El detalle de los anchos considerados por el MOP es detallado en la tabla 4.2. Luego, dependiendo de las características de la calle (velocidad y número de pistas) se estableció el ancho de la calle. La diferencia de modelación entre vías de evacuación y calles comunes responde a la dificultad de recorrer todas las calles de Iquique y registrar sus anchos.

Tabla 4.2. Resumen de Anchos de Plataforma

| Velocidad Proyecto<br>(km/h) | Ancho Pistas (m) | Ancho Bermas (m) | Ancho Total de Plataforma<br>2 pistas (m) |
|------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------------------|
| 60                           | 3,0-3,5          | 0,5-1,0          | 8,0-10,0                                  |
| 50                           | 3,0-3,5          | 0,5-1,0          | 8,0-10,0                                  |
| 40                           | 3,0              | 0,0-0,5          | 7,0-8,0                                   |
| 30                           | 2,0-3,0          | 0,0-0,5          | 5,0-6,0                                   |

Fuente: Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2013)

La inclinación ha sido modelada mediante software *GIS*. CIGIDEN ha provisto un mapa de las cotas de altura cada 5 metros de Iquique. Luego, se ha calculado la inclinación de las vías de evacuación en función de la distancia entre cotas de 5 metros. La inclinación de un plano se puede medir como la tangente del ángulo entre el plano inclinado y un plano sin inclinación. El presente problema se asemeja al cálculo de la pendiente en un triángulo rectángulo. En este caso, la vía de evacuación corresponde a la hipotenusa del triángulo y la altura corresponde a la diferencia entre cotas de altura, es decir, 5 metros. Mediante teorema de Pitágoras se puede obtener la longitud del cateto restante y posteriormente calcular la inclinación del plano. La figura 4.5 muestra el mapa de cotas de altura de Iquique provisto por CIGIDEN.

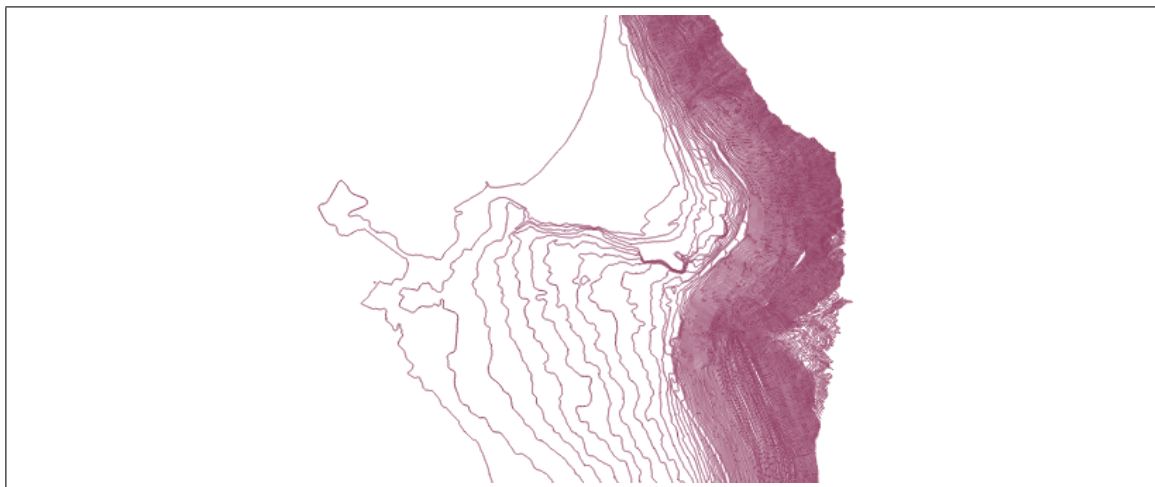


Figura 4.5. Mapa de Cotas de Altura de Iquique

#### 4.4.4. Distribución Geográfica de Personas

El presente estudio ha considerado relevante distinguir dos escenarios en cuanto a la distribución de la población: un escenario diurno y un escenario nocturno. En el caso diurno, los habitantes de Iquique se pueden encontrar en sus trabajos, en el comercio, en colegios o en la playa, entre otros lugares. En este escenario la ZOFRI adquiere gran importancia debido al flujo de gente que atrae. En el caso nocturno, se considera que la población se encuentra ubicada en sus domicilios. Además, se ha distinguido a la población en tres rangos etarios: de 0 a 10 años, de 11 a 65 años y de 66 o más años.

La ubicación de las personas en el caso diurno ha sido determinada mediante la Encuesta Origen Destino de la Secretaría de Planificación de Transporte del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (SECTRA, 2010). El objetivo de este estudio es desarrollar una Encuesta de Movilidad en Iquique, además de otras mediciones complementarias (mediciones de tiempos de viaje, actualización de red vial, entre otros.). Dicha encuesta se construye a partir de mediciones realizadas en días laborales en horario punta mañana (7:30-8:30), horario punta tarde (18:00-19:00) y fuera de horario punta (10:00-11:00). Tales mediciones fueron realizadas en 5 días hábiles en 41 puntos distintos de la

ciudad. Las componentes de esta encuesta son: encuesta en hogares, encuesta al interceptar gente en la vía pública y conteo de vehículos y pasajeros.

La Encuesta Origen Destino contiene información sobre la distribución de la población en zonas geográficas. En particular, el área de estudio ha sido dividida en 31 zonas. Cada zona tiene una extensión de varias manzanas, por lo que el nivel de precisión es bajo. A modo ilustrativo, en la figura 4.6 se puede visualizar la zonificación del sector playa Cavancha. Esta encuesta permite obtener información sobre la distribución geográfica de la población en la ciudad, la distribución de los viajes y los tiempos asociados. Además permite analizar los resultados según rango etario, sexo y nivel de ingreso, entre otras categorías. La información de esta encuesta se encuentra disponible en el Sistema de Información de Transporte Accesible por Internet (SINTIA) ([sintia.sectra.cl](http://sintia.sectra.cl)).

En el caso de la zona franca, la Encuesta Origen Destino no provee información sobre la cantidad de gente que se encuentra en ella a diario. Actualmente, se dispone de estimaciones poco rigurosas sobre el volumen de personas que circula en ZOFRI y sus alrededores. Para resolver esta problemática se ha optado por considerar el peor escenario posible. Este corresponde a las estimaciones disponibles sobre el flujo de clientes en ZOFRI durante horario punta: 30.000 personas (Van Blokland et al., 2013).



Fuente: SECTRA (2010). Disponible en:  
<http://sintia.sectra.gob.cl/>

En el caso de una emergencia nocturna, la distribución de personas se determina a partir de los datos del censo de 2012. Esta información ha sido provista por CIGIDEN mediante base de datos SQL y posteriormente ha sido procesada. La unidad mínima de información en un censo corresponde a una manzana censal. Se destaca que el nivel de precisión que se tiene en este escenario es mayor que en el escenario diurno. Por lo tanto, la variabilidad asociada a la distribución de personas en el escenario nocturno es menor.

Se ha considera una distribución de probabilidades uniforme para localizar a los agentes dentro de las zonas o manzanas censales. Esto responde a la falta de información que existe más allá de lo disponible en el censo o en la Encuesta Origen Destino. El detalle de la cantidad de gente simulada en cada escenario es detallado en los anexos F y G.

#### 4.5. Supuestos

- (i) La población se distribuye uniformemente en las manzanas censales y en las zonas de la Encuesta Origen Destino.
- (ii) La población evacúa a pie. No se considera evacuación en vehículos ni interacción peatón-vehículo.
- (iii) La población conoce las vías de evacuación y puntos de encuentro propuestos por ONEMI.
- (iv) Personas evacúan hacia zona segura siguiendo las vías de evacuación designadas por ONEMI.
- (v) La evacuación para personas entre 10 y 65 años se produce a una velocidad de  $1.5 \frac{m}{s}$  en un terreno plano, en caso de que no haya congestión. Para personas en otro rango etario la velocidad de evacuación considerada es de  $0.75 \frac{m}{s}$ . No se distingue a personas minusválidas.
- (vi) Las cotas de altura superiores a 35 metros son seguras. Esto responde al plan de evacuación desarrollado por ONEMI.
- (vii) La gente evacua después de un cierto tiempo de ocurrido el terremoto. Cada persona comienza a evacuar en un instante independiente de otras personas.

- (viii) Las personas no atropellan a otras personas al momento de evacuar.
- (ix) Las calles se encuentran disponibles para evacuar. No se considera la obstrucción de rutas producto de escombros.
- (x) Congestionamientos en vías de evacuación superiores a  $6 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2}$  no permiten desplazamiento fluido.
- (xi) Personas priorizan evacuar a la zona segura. No se modela casos de personas que priorizan localizar a familiares u otras personas.
- (xii) Personas menores de 10 años evacúan acompañadas de un adulto.
- (xiii) Personas evacúan de forma individual o de a dos en caso de que la persona sea menor a 10 años. No se modela evacuaciones grupales como puede ser el caso de colegios.
- (xiv) Inclinación de vías de evacuación entre cotas de altura de 5 metros es constante.
- (xv) Las personas siguen la red de calles desde sus casas hasta los puntos de encuentro siguiendo la ruta más corta entre su ubicación inicial y las vías de evacuación. Posteriormente, las personas se desplazan usando las vías de evacuación.

#### **Caso evacuación vertical:**

- (xvi) Los edificios de evacuación vertical considerados en el estudio son capaces de resistir un terremoto y un tsunami de las características señaladas.
- (xvii) Sea  $c_i$  la capacidad para alojar personas del edificio de evacuación vertical  $i$ . Entonces solo las  $c_i$  personas más cercanas al edificio  $i$  evacuarán verticalmente hacia el edificio  $i$  (no se sobrepasa la capacidad del edificio).

## **4.6. Características del Modelo Computacional**

### **4.6.1. Características Generales**

El modelo conceptual expuesto ha sido implementado en Netlogo, versión 5.0.5. Netlogo es un software de modelación basada en agente diseñado por Uri Wilensky, director del Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling de la universidad de

Northwestern. Este software es gratuito y funciona en entorno Java. El desarrollo de modelos es realizado en lenguaje logo (Wilensky, 1999).

El tiempo de procesamiento para una iteración del modelo depende de las acciones que realizan los agentes y de la cantidad de agentes que se simula. Mientras mayor sea la complejidad de las acciones ejecutadas por los agentes o mayor sea el número de agentes simulados, mayor será el tiempo que requerirá el modelo para simular. Se han desarrollado 3 modelos computacionales independientes, uno para cada zona simulada, con el objetivo de reducir el costo computacional que tiene simular grandes cantidades de agentes. Luego, no hay interacción entre zonas.

En la tabla 4.3 se detalla el tiempo requerido para simular una iteración de cada modelo. Además, se indica la cantidad de agentes simulados en cada zona y en cada escenario. Los tiempos expuestos fueron obtenidos en un computador con procesador Intel i5 de 1.80 GHz. El tiempo de setup corresponde al tiempo que toma a Netlogo construir el grafo de Iquique.

Tabla 4.3. Cantidad de Agentes y Tiempos de Simulación

| Modelo | Tiempo de setup | Población simulada día | Tiempo réplica día | Población simulada noche | Tiempo réplica noche |
|--------|-----------------|------------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|
| Zona 1 | 4 s             | 44.564                 | 21 min 44 s        | 12.364                   | 1 min 10 s           |
| Zona 2 | 10 s            | 53.703                 | 4 min 50 s         | 48.550                   | 4 min 17 s           |
| Zona 3 | 9 s             | 31.097                 | 6 min 41 s         | 50.404                   | 7 min 6 s            |

Fuente: Elaboración Propia

El tiempo de setup corresponde al tiempo necesario para cargar en Netlogo el grafo de la ciudad de Iquique y calcular la ruta óptima para cada nodo del grafo (ver sección 4.4.3.1). Luego, este tiempo varía en cada zona debido a las diferencias que hay en la cantidad de aristas y vertices de cada grafo. Setup es una operación que debe realizarse una única vez antes de simular, independiente del número de réplicas que se corra.

El tiempo de duración de una réplica depende de la cantidad de agentes simulados debido a la mayor cantidad de operaciones que se debe realizar. Esto se puede distinguir, por ejemplo, al comparar los tiempos de una réplica diurna y una nocturna en la zona 2. Otro factor que afecta a la duración de una réplica es la complejidad de las operaciones realizadas. En el caso de la zona 1, se observa que el tiempo que requiere una réplica para el escenario diurno es considerablemente mayor que para los otros escenarios. También se observa que el tiempo del escenario diurno de la zona 3 es mayor que el de la zona 2, a pesar de que la cantidad de agentes simulados es menor en la zona 3.

Ambas diferencias se deben a la dinámica de evacuación que existe en cada zona. En la zona 1 hay principalmente 4 vías de evacuación para los agentes simulados, mientras que en la zona 2 hay 15 vías (ver figura 2.1). Al agruparse toda la población en una menor cantidad de vías, aumenta la complejidad de las operaciones pues hay una mayor cantidad de interacciones entre los agentes, lo que se traduce en un mayor tiempo de computación. De manera similar, en la zona 3 se dispone de 9 vías de evacuación, lo que implica un aumento en los tiempos de procesamiento en relación a la zona 2.

#### **4.6.2. Interfaz del Modelo Computacional**

En la figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se presenta la interfaz del modelo computacional para la zona 1 en distintos instantes de una simulación. Al principio de la simulación los agentes se encuentran dispersos en las distintas zonas y a medida que transcurre la simulación comienzan a evacuar. Una vez han iniciada la evacuación se desplazan hasta la vía de evacuación más cercana y posteriormente hasta el punto de encuentro más cercano. Las acciones de los agentes son detalladas en la sección 4.6.3.

La interfaz contempla los siguientes componentes:

- Círculo negro: corresponde a una persona al interior de una manzana.
- Círculo azul: corresponde a una persona ubicada en el grafo de Iquique.
- Línea negra: corresponde a una calle.

- Línea roja: corresponde a una vía de evacuación propuesta por ONEMI.
- Casa café: corresponde a un punto de encuentro.
- Casa azul: corresponde a un edificio de evacuación vertical.

Cuando una persona ubicada al interior de una manzana llega a una calle, el punto negro que la representa cambia a azul. Cuando una persona llega al punto de encuentro, su información es registrada y el agente es eliminado de la interfaz.

#### 4.6.3. Acciones de Agentes

En esta sección se detalla paso a paso las acciones que van tomando las personas a medida que transcurre la simulación. Tras el setup inicial Netlogo crea y ubica geográficamente a los agentes de acuerdo a una distribución uniforme en función del input entregado. En esta etapa se asigna, además, las características de cada agente (grupo etario e instante en que comienza a evacuar). Posteriormente, se inicia la simulación.

La simulación basada en agente avanza en intervalos regulares de tiempo que Netlogo denomina *ticks*. Durante cada tick, los agentes actúan de acuerdo a la estructura de toma de decisiones que se haya definido. El presente modelo ha sido desarrollado considerando un tick como un segundo.

El proceso de evacuación de un agente considerando únicamente evacuación horizontal consiste en los siguientes pasos:

- Inicio de evacuación:** el agente espera al instante en que comenzará a evacuar. Una vez que el tiempo de la simulación iguala al instante de inicio de evacuación del agente, este comienza a evacuar.
- Unión al grafo:** dependiendo de la posición que haya sido asignada al agente, este puede ubicarse al interior de una manzana o en el grafo. En el primer caso el agente avanzará en cada tick hasta llegar a la calle más cercana.

- iii. **Desplazamiento hacia vía de evacuación y punto de encuentro:** durante cada tick el agente actualiza su velocidad dependiendo de la congestión y la inclinación del camino. Posteriormente, se desplaza dependiendo de la disponibilidad de espacio. Al llegar a un nuevo nodo el agente consulta la ruta que debe seguir y actualiza el valor de la inclinación del plano y del ancho del camino. Los nodos pertenecientes a calles dirigen hacia la vía de evacuación más cercana y los nodos de las vías de evacuación dirigen hacia el punto de encuentro más cercano.
- iv. **Llegada a punto de encuentro:** al llegar al punto de encuentro se registra la información del agente y el agente es eliminado de la simulación con el fin de liberar recursos computacionales.

Para el caso de evacuación mixta (evacuación horizontal y vertical) se distingue a las personas que evacuarán verticalmente de las que evacuarán horizontalmente. En la etapa de setup del modelo, Netlogo distribuye a las personas geográficamente y posteriormente se asigna a las personas más cercanas a cada edificio para que evacuen hacia dicho edificio. Al iniciar la simulación, los agentes que evacuarán verticalmente siguen un proceso similar a los que evacuarán horizontalmente, pero en vez de dirigirse al punto de encuentro más cercano se dirigen al edificio de evacuación más cercano.

Una vez los agentes llegan al edificio de evacuación, estos deben alcanzar la zona segura (cota de 38 metros de altura por sobre el nivel del mar (FEMA, 2012)). El traslado hacia la zona segura se ha modelado como el ascenso a lo largo de una escalera de ancho 2 metros e inclinación  $45^\circ$ . En dicho traslado aplican las funciones detalladas anteriormente para regular la velocidad según la congestión de personas y la inclinación del plano. Cuando el agente alcanza la zona segura se registran los datos correspondientes a su proceso de evacuación.

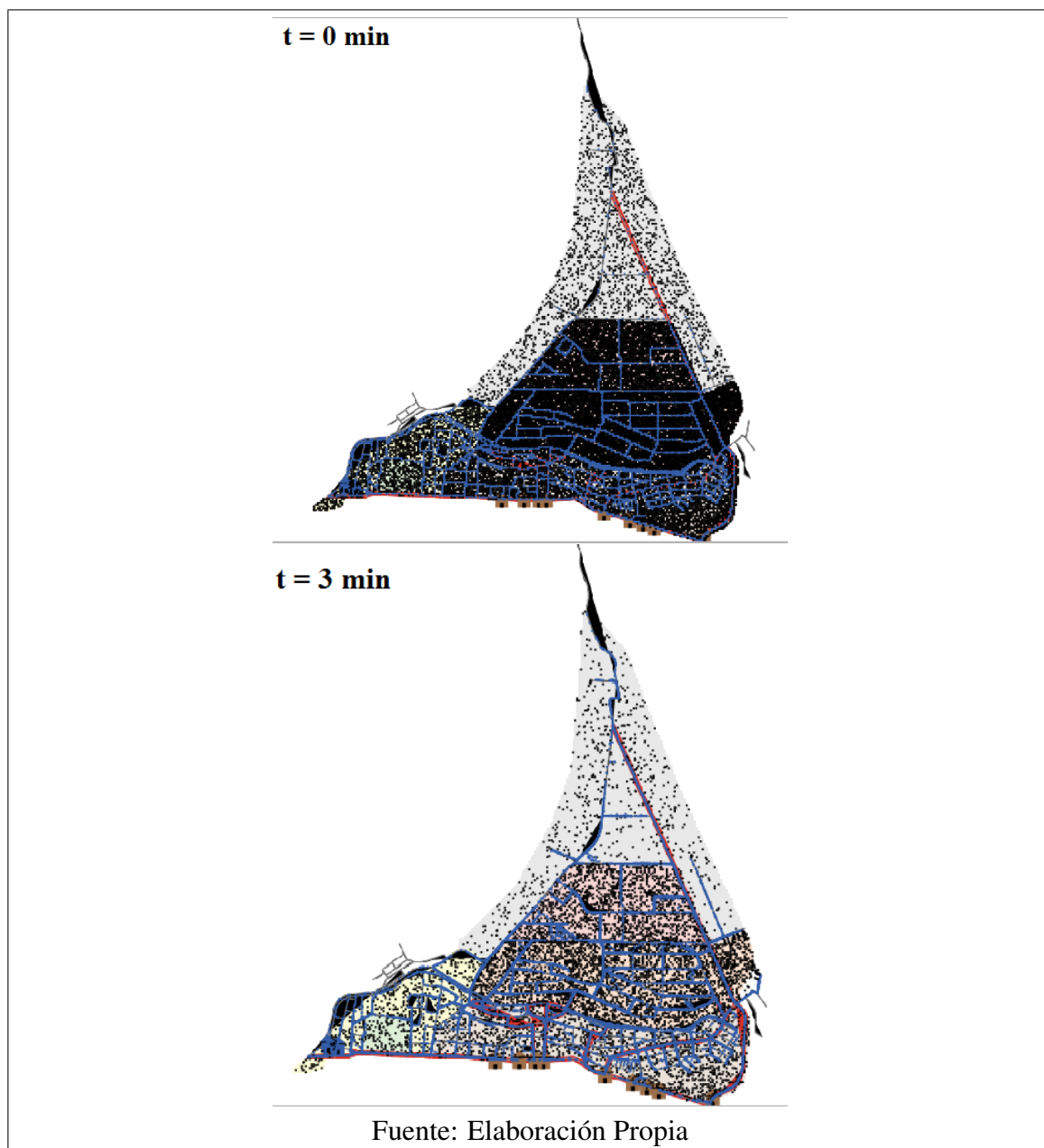


Figura 4.7. Interfaz del Modelo Computacional de la Zona 1 en Distintos Tiempos de Simulación Parte 1

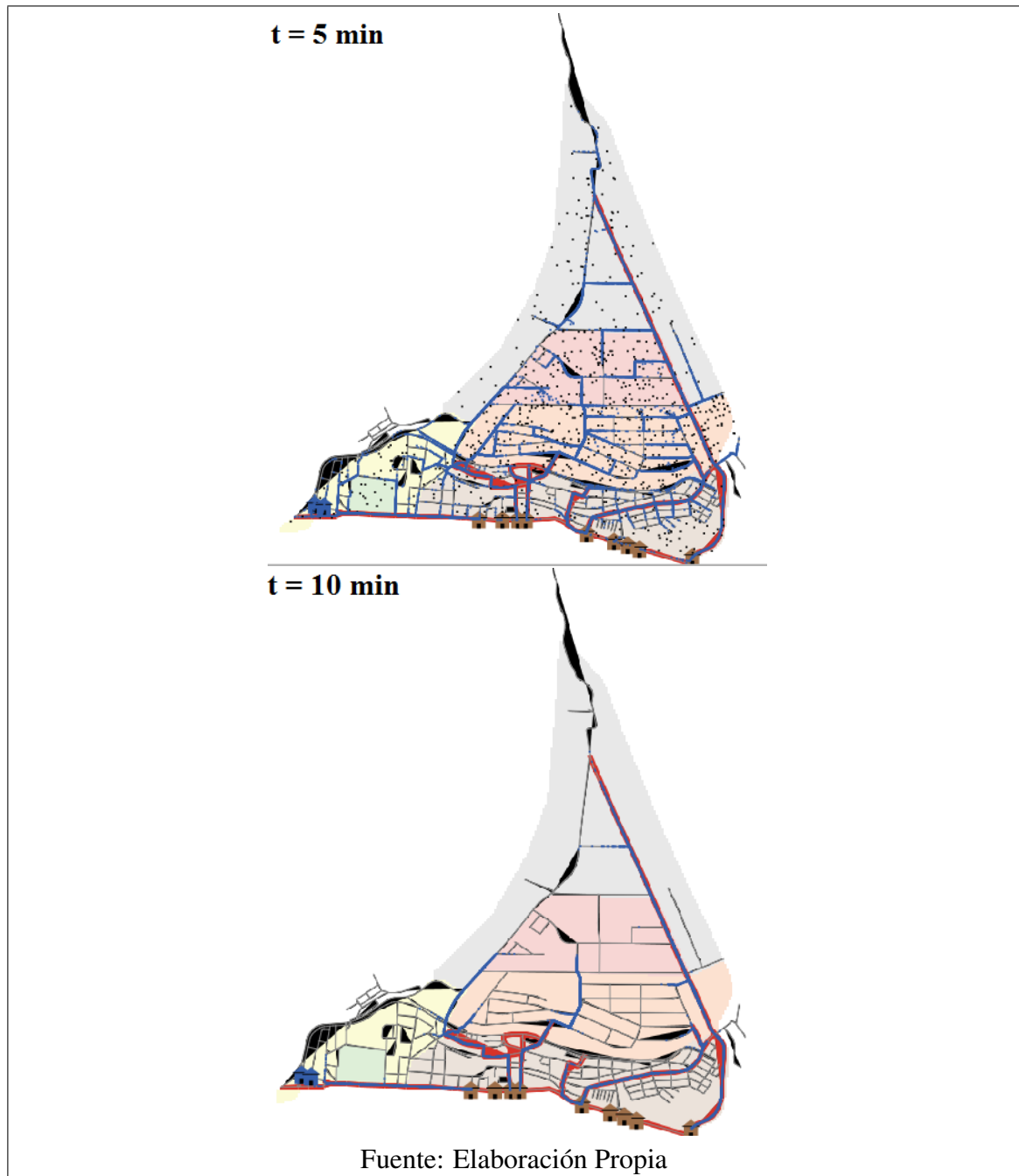


Figura 4.8. Interfaz del Modelo Computacional de la Zona 1 en Distintos Tiempos de Simulación Parte 2

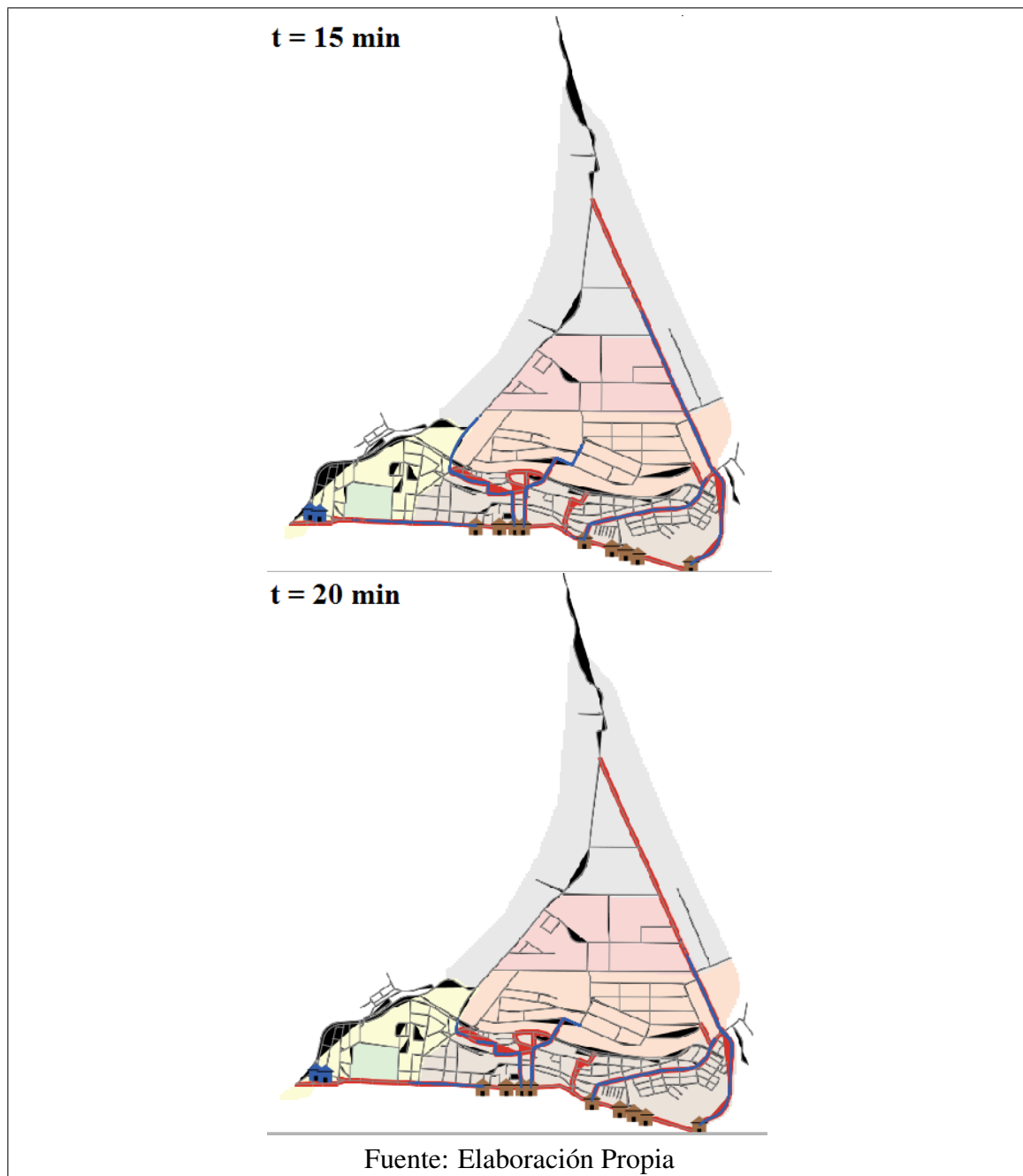


Figura 4.9. Interfaz del Modelo Computacional de la Zona 1 en Distintos Tiempos de Simulación Parte 3

## 5. VALIDACIÓN

La pregunta que se busca responder al validar un modelo es si el modelo desarrollado representa realmente el sistema modelado. Esta pregunta debe ser respondida considerando el contexto del modelo desarrollado. Por ejemplo, en caso de disponer de información sobre las principales características de un sistema es posible centrar el proceso de validación en el análisis estadístico de los resultados que entregue el modelo.

El caso de estudio se caracteriza por desarrollarse en un contexto de escasez de información. No hay registro detallado de las características de una evacuación de Iquique ocurrida anteriormente y no se ha desarrollado un sistema capaz de registrar las características de un proceso futuro. Dada la espontaneidad de los eventos que originan evacuaciones, resulta imposible realizar un registro riguroso de una evacuación si es que no existe la preparación adecuada. Además, es importante destacar que las características de un simulacro difieren de las una evacuación por peligro inminente. Los simulacros no suelen contar con la participación de todos los actores de interés y la ausencia de peligro genera un comportamiento distinto al esperado en una evacuación por tsunami.

Por lo tanto, la validación del presente modelo no puede basarse únicamente en una análisis estadístico de los resultados. Es conveniente que la metodología de validación combine el análisis de los resultados con una revisión minuciosa del modelo desarrollado. Para validar el modelo desarrollado se considerará el marco definido por Klügl (2008), detallado en la sección 3.3. Se ha decidido omitir la etapa de calibración en la validación del modelo por las siguientes razones:

- (i) La cantidad de datos disponibles sobre procesos de evacuación en Iquique no es suficiente como para construir dos sets distintos y usar uno para calibrar y otro para validar. Klügl (2008) sugiere usar sets distintos para no inducir sesgo en el modelo.
- (ii) La mayoría de los parámetros del modelo basa su valor en lo que se detalla en la literatura disponible. El único parámetro que requiere mayor análisis es el

instante de inicio de evacuación para la población de Iquique. Dicho parámetro será estudiado mediante en el análisis de sensibilidad.

### **5.1. Fuentes de Datos**

Los datos usado para validar el modelo desarrollado corresponden a:

- Informe de ONEMI sobre el simulacro realizado en agosto de 2013 (Walker, 2013). Dicho informe describe detalles generales y observaciones del simulacro.
- Datos registrados por CIGIDEN durante el simulacro de 2013. Observadores capacitados por CIGIDEN y personal de este mismo realizaron un conteo del proceso de llegada de personas a los puntos de encuentro y registraron el proceso.
- Videos de la evacuación de Iquique posterior al terremoto de abril de 2014. Dichos videos corresponden a programas de noticias de canales de televisión chilenos de transmisión abierta. Este material fue provisto por CIGIDEN.

### **5.2. Face Validation**

El modelo ha sido revisado en detalle con expertos relacionados en el tema de evacuación. Dicha validación ha sido realizada primero a nivel de modelo conceptual y luego a nivel de resultados obtenidos.

La validación del modelo conceptual se ha centrado en la revisión la lógica de acción de los agentes y de los supuestos del modelo. En ella han participado:

- Erick Mas, profesor de la universidad de Tohoku y autor de múltiples investigaciones sobre evacuaciones de ciudades modeladas con simulación basada en agente.
- Alejo Palma, director regional de ONEMI Tarapacá.
- Rodrigo Cienfuegos, director de CIGIDEN.

Se ha revisado el proceso de toma de decisiones de los agentes y las interacciones entre agentes y el ambiente. A partir de esta revisión se ha destacado la importancia de adaptar el modelo propuesto por Mas et al. (2012) a la realidad local de la población de Iquique. Para lograr este objetivo se ha revisado las observaciones del simulacro realizado en Iquique y los videos sobre la evacuación en abril de 2014. A partir de dicho análisis, ha surgido la discusión sobre la validez de excluir la evacuación en vehículos del modelo. Observaciones registradas durante el simulacro y videos de los canales de noticias revelan la participación de vehículos durante evacuaciones en Iquique.

Desafortunadamente, es imposible cuantificar el nivel de participación de vehículos en evacuaciones en Iquique debido a falta de registros. Además, el plan de evacuación diseñado por ONEMI contempla únicamente la evacuación de peatones y los esfuerzos educativos realizados por las autoridades locales apuntan en esa línea. Por lo tanto, se ha optado por excluir la evacuación en vehículo del modelo. No es posible determinar el efecto exacto que tendría la evacuación en vehículos en Iquique. No obstante, se estima que permitir la evacuación en vehículos puede tener consecuencias negativas en el desempeño de la población al evacuar pues la cantidad de autos en Iquique es grande y las calles principales tienen tramos estrechos. Dado que en la práctica hay casos de evacuación en vehículos en Iquique, los resultados de esta tesis presentarían una cota inferior al desempeño esperado durante una evacuación.

Los resultados del modelo han sido discutidos con Alejo Palma, Rodrigo Cienfuegos e investigadores de CIGIDEN. Además, se presentó el análisis de sensibilidad respecto al instante de inicio de evacuación para cada persona. Los resultados fueron validados cualitativamente. Se ha acordado la importancia de refinar el parámetro de inicio de evacuación y de estudiar alternativas que permitan mejorar la capacidad de respuesta de la población ante riesgo de tsunami.

### 5.3. Análisis de Sensibilidad

Se ha evaluado el comportamiento del modelo en función de variaciones al valor del instante de inicio de evacuación de la población de Iquique. La justificación para realizar el análisis en este parámetro es que el instante promedio de inicio de evacuación es un parámetro característico del presente caso de estudio y por lo tanto, es conveniente revisar posibles variaciones. Otros parámetros del modelo han sido determinados de acuerdo a lo señalado en la literatura relacionada, por lo que hay mayor conocimiento sobre el valor que tienen.

En el modelo desarrollado el parámetro  $\mu$  de la función Rayleigh representa el instante promedio de inicio de evacuación para la población de Iquique. El escenario base de simulación del modelo corresponde a  $\mu = 3$  minutos. Para el presente análisis se ha considerado un escenario pesimista y uno optimista. El primero considera una respuesta tardía de la población al evacuar. El valor de  $\mu$  usado en este caso ha sido de 7 minutos. Dicho valor es similar al usado por Mas et al. (2012). El segundo escenario corresponde a una respuesta temprana de la población. Para este escenario se ha considerado  $\mu = 1$  minuto.

El objetivo del análisis de sensibilidad, más allá de los resultados numéricos proporcionados por el modelo, es evaluar la coherencia entre las variaciones del parámetro y los patrones emergentes. A priori se espera que variar el valor de  $\mu$  mantenga el comportamiento general del proceso de llegada, pero genere variaciones en el tiempo requerido por la población para evacuar a la zona segura. Primero se analiza el impacto de variaciones del parámetro en el modelo general y posteriormente se analiza el impacto en cada zona simulada.

#### 5.3.1. Análisis Global del Modelo

En la presente sección se analiza los resultados globales de los tres modelos desarrollados (zonas 1, 2 y 3) para el escenario diurno. La población simulada corresponde a

99.841 personas. En la tabla 5.3 se detalla el porcentaje de la población de Iquique que logra evacuar de las zonas 1,2 y 3 en distintos tiempos desde el inicio de la evacuación.

Tabla 5.1. Porcentaje de Población Evacuada en el Tiempo

|             | Población Evacuada |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\mu$ (min) | 5 min              | 10 min | 15 min | 20 min | 25 min | 30 min | 35 min | 40 min | 45 min | 50 min |
| 1           | 19,7%              | 36,2%  | 50,5%  | 60,3%  | 69,2%  | 76,8%  | 82,6%  | 92,2%  | 98,3%  | 99,4%  |
| 3           | 14,2%              | 32,6%  | 47,3%  | 58,4%  | 67,5%  | 75,8%  | 81,3%  | 90,7%  | 97,7%  | 99,2%  |
| 7           | 5,3%               | 23,6%  | 40,5%  | 54,2%  | 63,5%  | 72,4%  | 79,4%  | 87,9%  | 96,4%  | 99,1%  |

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla se observa que el escenario optimista y el escenario base presentan resultados relativamente similares a lo largo del tiempo. La mayor diferencia se registra en los 5 minutos iniciales (5,5%) y a medida que continúa la evacuación la diferencia disminuye. El escenario pesimista presenta mayores diferencias en los resultados, principalmente en los 20 minutos iniciales de evacuación. A partir de esta primera observación es importante destacar que es difícil aumentar el porcentaje de población que logra evacuar únicamente reduciendo el parámetro  $\mu$ . Por otro lado, el desempeño del proceso de evacuación puede empeorar significativamente en la medida que  $\mu$  aumenta.

Con el fin de observar con mayor detalle el proceso de llegada a la zona segura, se ha optado por graficar este proceso. En la figura 5.1 se presenta el porcentaje de personas que han logrado evacuar en función del tiempo.

Del gráfico se observa que al variar el valor de  $\mu$ , la curva del proceso de evacuación mantiene su forma a lo largo del tiempo y sufre un desplazamiento horizontal. En caso de aumentar  $\mu$  la curva se desplaza a la derecha, lo que significa que el tiempo requerido para evacuar un determinado porcentaje de la población aumenta. De manera similar, al disminuir  $\mu$  el tiempo requerido para evacuar un determinado porcentaje de la población disminuye. Esto corresponde a lo esperado a priori.

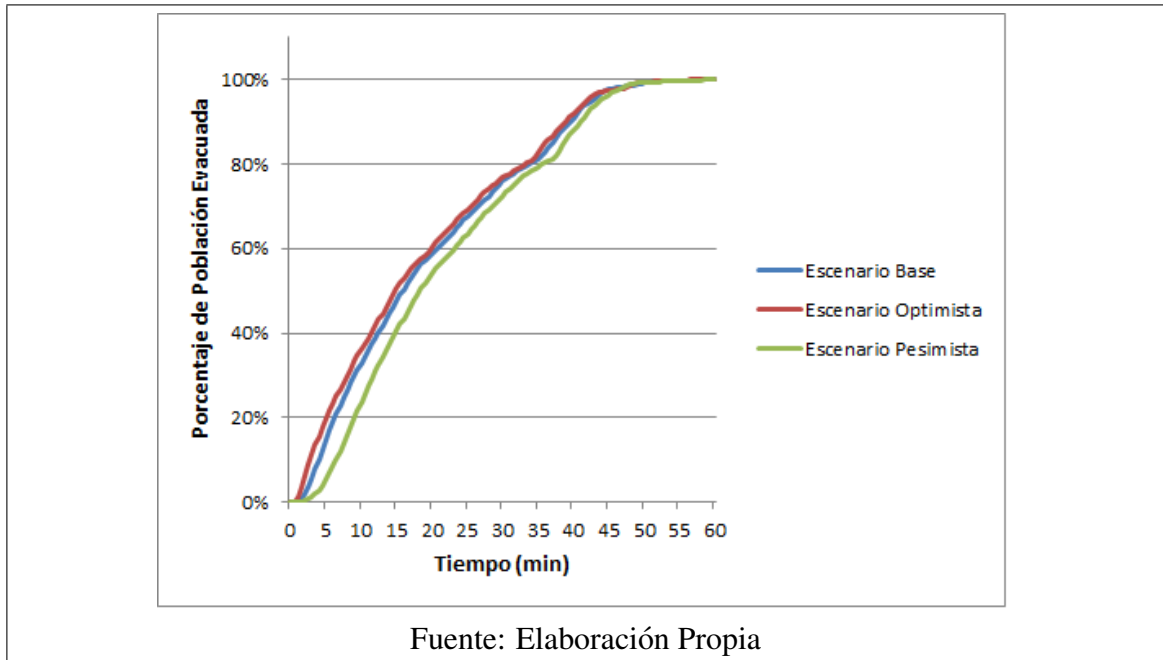


Figura 5.1. Análisis de Sensibilidad respecto a  $\mu$

El hecho de que el comportamiento del proceso de evacuación se mantenga es coherente con lo esperado pues variaciones en el tiempo de inicio no debiesen tener efecto a nivel macroscópico, mientras se mantenga la función de distribución del tiempo y las características de las interacciones de los agentes. Es conveniente estudiar en detalle el comportamiento de cada zona estudiada para poder determinar el comportamiento detallado es consistente.

### 5.3.2. Análisis Modelo Zona 1

En la tabla 5.2 se detalla el porcentaje de la población de Iquique que logra evacuar de la zona 1 en función del tiempo desde el inicio de la evacuación. La población simulada corresponde a 44.557 personas.

De la tabla se observa que el proceso de evacuación para la zona 1 es más lento que para Iquique en general. Aproximadamente 33% de la población logra evacuar de la zona

Tabla 5.2. Porcentaje de Población Evacuada en el Tiempo para Zona 1

| $\mu$ (min) | Población Evacuada |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | 5 min              | 10 min | 15 min | 20 min | 25 min | 30 min | 35 min | 40 min | 45 min |
| 1           | 11,1%              | 19,6%  | 28,1%  | 35,2%  | 45,6%  | 56,1%  | 66,2%  | 85,7%  | 98,0%  |
| 3           | 8,3%               | 18,3%  | 26,7%  | 33,8%  | 43,9%  | 55,3%  | 63,7%  | 82,8%  | 96,9%  |
| 7           | 3,3%               | 14,5%  | 24,4%  | 32,5%  | 40,3%  | 51,2%  | 61,1%  | 77,4%  | 94,5%  |

Fuente: Elaboración Propia

1 en los primeros 20, mientras que en Iquique globalmente logra evacuar aproximadamente 58% de la población. Esta diferencia se debe a que la población de la zona 1 está concentrada principalmente en la ZOFRI y la distancia entre la ZOFRI y la zona segura es mayor a 1,5 km. en algunos sectores. Evacuando a  $5,4 \frac{km}{h}$  (velocidad máxima del modelo) dicha distancia es cubierta 17 minutos aproximadamente.

La gran distancia entre la zona franca y la zona segura tiene también como consecuencia que la diferencia inicial entre los escenarios de estudio no sea tan notoria como en el caso global de Iquique. Se observa que la diferencia entre los resultados de los 3 escenarios disminuye a lo largo del tiempo hasta el minuto 20 y posteriormente la diferencia aumenta. Esto se debe a que las personas que son capaces de evacuar son las que se encuentran en las cercanías de la zona segura (aprox. 12.000 personas). En los minutos iniciales se genera una diferencia debido a que estas personas evacúan rápidamente. Después del minuto 20 comienza la llegada de las personas provenientes del barrio industrial y de ZOFRI (aprox. 30.000), lo que aumenta las diferencias entre resultados.

De manera similar a lo detallado en la sección anterior, los resultados de los tres escenarios son relativamente similares. Esto indica que hacer esfuerzos por disminuir  $\mu$  no genera una variación importante en el desempeño del proceso de evacuación. En este caso particular, al aumentar el valor de  $\mu$ , dentro del intervalo de estudio, no empeoran significativamente los resultados.

En la figura 5.2 se grafica el porcentaje de personas que ha logrado evacuar de la zona 1 a lo largo del tiempo. Un elemento característico del proceso de llegada de esta zona

es el cambio de pendiente que ocurre en torno al minuto 35. Dicho cambio se debe a la llegada masiva de las personas que se encuentran en las zonas más lejanas.

Además, se observa del gráfico que el comportamiento de las curvas de llegada de personas a zona segura mantiene el comportamiento general independiente del valor de  $\mu$ . De manera similar a lo detallado en la sección anterior, esta tendencia es coherente con lo esperado a priori.

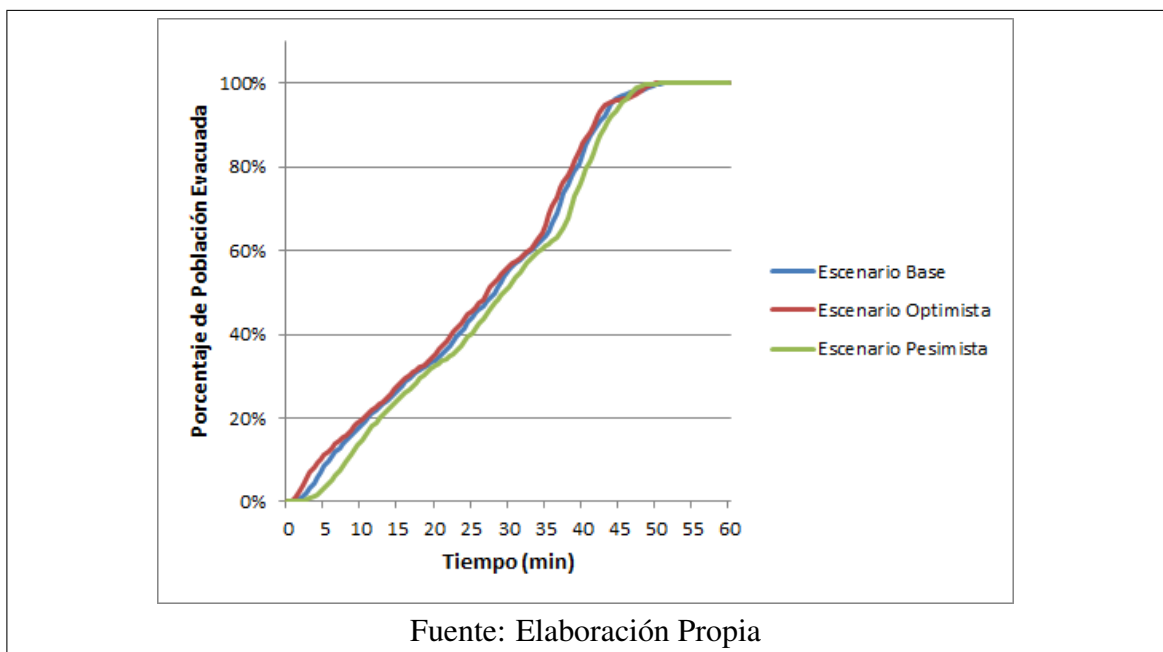


Figura 5.2. Análisis de Sensibilidad respecto a  $\mu$  para Zona 1

### 5.3.3. Análisis Modelo Zona 2

En la tabla 5.3 se detalla el porcentaje de la población de Iquique que logra evacuar de la zona 2 en distintos tiempos desde el inicio de la evacuación. Además, en la figura 5.3 se grafica el porcentaje de personas que ha logrado evacuar de la zona 2 a lo largo del tiempo. La población simulada corresponde a 36.595 personas.

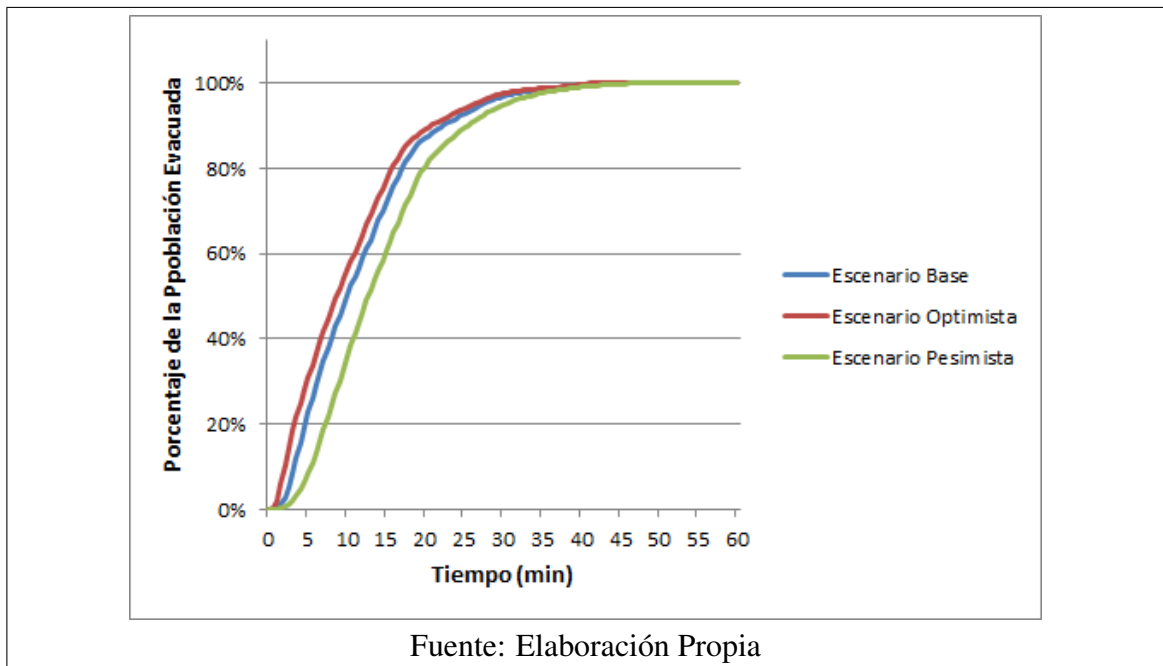
De la tabla se desprende que el valor de  $\mu$  tiene un impacto importante en los resultados obtenidos. Las principales diferencias se observan en los primeros 15 minutos de

Tabla 5.3. Porcentaje de Población Evacuada en el Tiempo para Zona 2

| $\mu$ (min) | Población Evacuada |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | 5 min              | 10 min | 15 min | 20 min | 25 min | 30 min | 35 min | 40 min |
| 1           | 30,9%              | 56,2%  | 77,1%  | 89,0%  | 94,0%  | 97,6%  | 98,8%  | 99,7%  |
| 3           | 22,8%              | 50,2%  | 72,1%  | 87,1%  | 92,7%  | 96,9%  | 98,6%  | 99,4%  |
| 7           | 8,6%               | 35,9%  | 60,6%  | 80,5%  | 89,6%  | 94,8%  | 97,7%  | 99,1%  |

Fuente: Elaboración Propia

evacuación, lo que indica que la zona 2 se caracteriza por tener un porcentaje importante de la población que es capaz de evacuar en los primeros minutos. La mayor diferencia se observa en los 5 minutos. En este tiempo la diferencia entre el escenario optimista y pesimista alcanza un valor de 12,3%.

Figura 5.3. Análisis de Sensibilidad respecto a  $\mu$  para Zona 2

Del gráfico se observa que al variar el valor de  $\mu$ , la curva del proceso de evacuación mantiene su forma a lo largo del tiempo. La curva de esta zona se caracteriza por tener una pendiente de mayor inclinación. Esto se debe a que la distancia que existe hasta la zona segura es menor para un alto porcentaje de la población. Luego, el tiempo necesario

para evacuar es en general menor. En el caso base aproximadamente 50% de la población logra evacuar dentro de los 10 primeros minutos. Además, se observa de la figura que el comportamiento de las curvas de llegada de personas a zona segura mantiene el comportamiento general independiente del valor de  $\mu$ . De manera similar a lo detallado en la sección anterior, esta tendencia es coherente con lo esperado a priori.

#### 5.3.4. Análisis Modelo Zona 3

En la tabla 5.4 se detalla el porcentaje de la población de Iquique que logra evacuar de la zona 3 en distintos tiempos. La población simulada corresponde a 18.689 personas.

Tabla 5.4. Porcentaje de Población Evacuada en el Tiempo para Zona 3

| $\mu$ (min) | Población Evacuada |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | 5 min              | 10 min | 15 min | 20 min | 25 min | 30 min | 40 min | 50 min |
| 1           | 18,2%              | 36,8%  | 51,7%  | 64,0%  | 76,8%  | 85,5%  | 92,9%  | 97,0%  |
| 3           | 11,5%              | 32,2%  | 47,9%  | 61,0%  | 74,3%  | 83,5%  | 92,2%  | 96,7%  |
| 7           | 4,0%               | 21,5%  | 39,6%  | 54,5%  | 67,7%  | 79,1%  | 91,3%  | 96,5%  |

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla se desprende que el valor de  $\mu$  tiene un impacto en los resultados menor al que tiene en la zona 2 y mayor al que tiene en la zona 1. Las principales diferencias se observan en los primeros 30 minutos de evacuación y la mayor diferencia se observa a los 10 minutos. En este tiempo la diferencia entre el escenario optimista y pesimista alcanza un valor de 15,3%. Aproximadamente 80% de la población es capaz de evacuar dentro de los primeros 30 minutos. Esto menor al tiempo requerido en la zona 1 (40 min.) y mayor al tiempo requerido en la zona 2 (20 min.). Esto es consistente con el hecho de que la distancia existente entre los principales puntos de concentración demográfica y la zona segura son mayores en la zona 3 que en la zona 2 y menores que en la zona 1.

En la figura 5.4 se grafica el porcentaje de personas que ha logrado evacuar de la zona 3 a lo largo del tiempo. Del gráfico se observa un comportamiento similar a lo detallado anteriormente: variaciones de  $\mu$  generan un desplazamiento en la curva de evacuación pero

mantiene la curvatura de esta. Además, la curva del escenario base es muy cercana a la del caso optimista. Esto sugiere que hacer esfuerzos para reducir  $\mu$  en esta zona no es tan conveniente pues la diferencia de población que logra evacuar al reducir  $\mu$  es menor. Esto puede deberse a que la distancia hacia los puntos de encuentro es mayor en esta zona. Por lo tanto, es conveniente estudiar otras opciones para poder disminuir el tiempo necesario para que la población llegue a la zona segura.

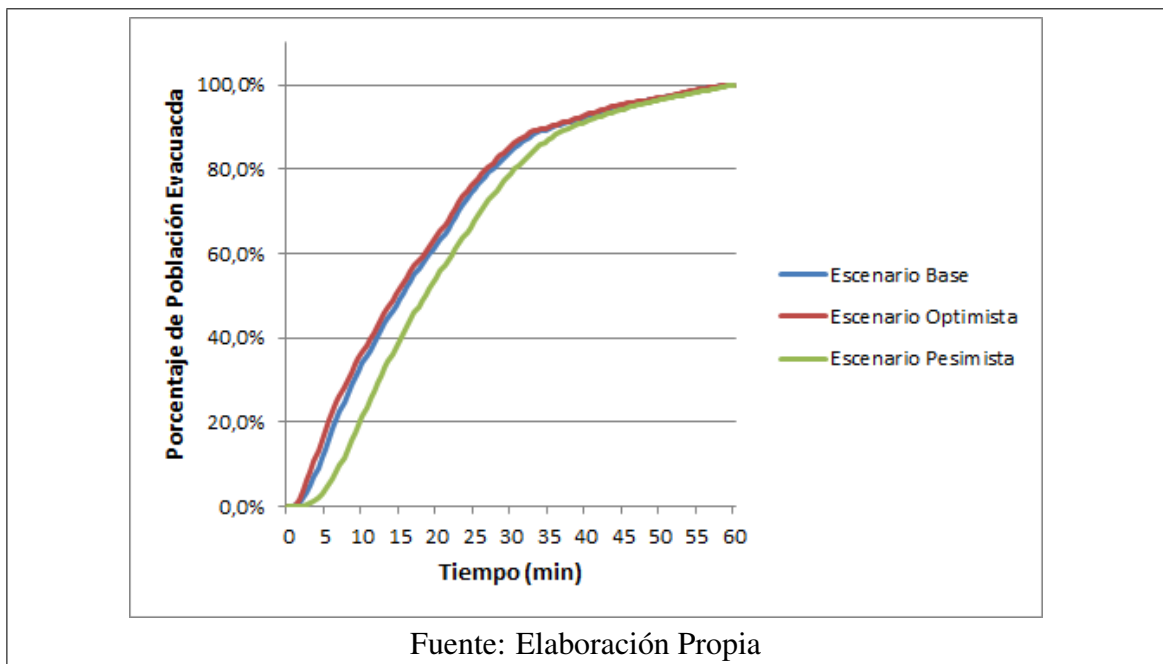


Figura 5.4. Análisis de Sensibilidad respecto a  $\mu$  para Zona 3

Además, se observa en la figura que el comportamiento de las curvas de llegada de personas a zona segura mantiene el comportamiento general independiente del valor de  $\mu$ . De manera similar a lo detallado en la sección anterior, esta tendencia es coherente con lo esperado a priori.

#### 5.4. Validación Estadística

Para validar el comportamiento del modelo se analizará el proceso de llegada de los evacuantes a los puntos de encuentro de cada zona. Es importante destacar en este punto

que no se ha llevado a cabo un registro de datos metódico de evacuaciones por riesgo inminente en Iquique y en Chile. La única información disponible consiste en registros de evacuaciones durante simulacros. Luego, los resultados del modelo serán contrastados con lo registrado por CIGIDEN en el simulacro de agosto de 2013.

Antes de comparar los resultados del modelo y los del simulacro, es importante analizar las diferencias que debiese haber entre ambos. Una primera diferencia significativa es la cantidad de gente que participa en ambos eventos. Durante la evacuación por riesgo de tsunami se espera que la participación de la población sea prácticamente completa, mientras que en un simulacro la participación es menor debido a la inexistencia de riesgo y posiblemente a la voluntad de no interrumpir las acciones que están siendo llevadas a cabo. La diferencia en el número de personas que participan genera un menor nivel de congestión en las vías de evacuación. Esto permite que la población pueda evacuar más rápido en un simulacro y que haya menor saturación en los cuellos de botella.

Otro factor que varía es la urgencia con que las personas evacúan. El riesgo de tsunami puede generar pánico y otras emociones que induzcan a las personas a evacuar con mayor rapidez en un caso real. El efecto de este factor es el de una respuesta inicial más rápida por parte de la población. Al aumentar el número de personas en las vías de evacuación, la congestión también aumenta. Este efecto se acentúa sobre todo en espacios reducidos con alta convergencia de personas, generando cuellos de botella, y deriva en una menor velocidad de evacuación.

#### **5.4.1. Evaluación Global del Modelo**

El simulacro fue realizado el día jueves 8 de agosto de 2013 a partir de las 11:23 hrs. Se dispuso de personas que registraron el proceso de evacuación en distintos puntos de encuentro en la zona segura. Los puntos de encuentro de interés para el presente estudio tienen una distribución de un p.e. en la zona 1, siete p.e. en la zona 2 y tres en la zona 3. Cada contador registró la cantidad de personas que llegaban al punto de encuentro

designado cada 30 segundos. A partir de dichos datos se construyó gráficos con los tiempo de llegada de la población.

En la tabla 5.5 se presenta el tiempo requerido para evacuar los deciles de la población de Iquique predichos por el modelo y lo registrado en el simulacro. Se observa que a partir del cuarto decil los resultados del modelo difieren significativamente de los resultados del simulacro. Esto ocurre en torno al minuto 10 desde el inicio de la evacuación. Con el fin de analizar con mayor detalle el proceso de evacuación de la población, se ha graficado el proceso de llegada de la población a la zona segura.

Tabla 5.5. Tiempo Requerido para Evacuar Deciles de la Población de Iquique

|           | Tiempo Requerido para Evacuar x Porcentaje de Población (min) |     |     |     |      |      |     |     |     |      |
|-----------|---------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|------|
|           | 10%                                                           | 20% | 30% | 40% | 50%  | 60%  | 70% | 80% | 90% | 100% |
| Modelo    | 4,5                                                           | 7   | 9,5 | 13  | 16,5 | 21,5 | 27  | 34  | 40  | 58   |
| Simulacro | 4,5                                                           | 6   | 7   | 8,5 | 11   | 12,5 | 14  | 16  | 22  | 38,5 |

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 5.5 se presenta el proceso de llegada de la población a los puntos de encuentro para el simulacro y para el modelo desarrollado en función del tiempo. Para efectos del presente análisis se simuló 50 réplicas de 63.112 personas evacuando, mientras que la cantidad de personas registradas en los puntos de encuentro corresponde a 12.658. Se observa diferencias en los tiempos entregados por el modelo y lo registrado en el simulacro. Las diferencias se registran entre los 6 y 45 minutos desde el inicio de la evacuación y se acentúan en torno al minuto 20.

Inicialmente, ambas curvas presentan resultados similares y a medida que transcurre el tiempo las curvas se distancian. A partir del minuto 6 el modelo requiere de mayor tiempo para evacuar el mismo porcentaje de la población. Una posible razón para este comportamiento consiste en que con el pasar del tiempo las vías de evacuación se congestionan y la velocidad de evacuación disminuye. Esto tiene un mayor impacto en el modelo que en el simulacro debido a que la cantidad de población evacuada es mayor.

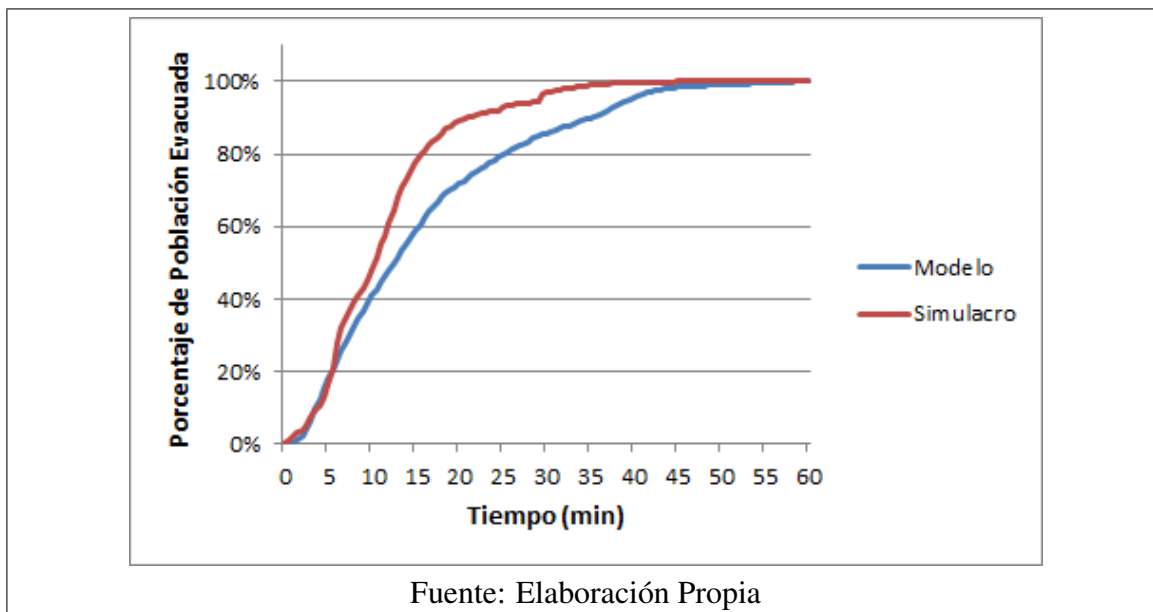


Figura 5.5. Llegada de Población a Puntos de Encuentro de Iquique.

A pesar de las diferencias existentes, el comportamiento de las curvas de llegada es similar en forma. Para revisar más en detalle la similitud de comportamiento entre el modelo y un proceso de evacuación se analizará la llegada a los puntos de encuentro en cada una de las zonas desarrolladas.

#### 5.4.2. Evaluación del Modelo Zona 1

Durante el simulacro de 2013 se registró un único punto de encuentro en la zona 1. Dicho p.e. corresponde al ubicado en Av. Sotomayor con Av. Circunvalación y es una de las dos vías de evacuación que dispone el barrio industrial y ZOFRI para evacuar. La distancia entre el p.e. y la Zofri es de aproximadamente 1,8 km. Esta situación contrasta con la de otros puntos de encuentro de la zona 1, cuya distancia hacia las zonas a evacuar es menor. Por lo tanto, se ha optado por comparar la llegada de personas al p.e. de acuerdo a lo registrado en el simulacro y a lo predicho por el modelo. El proceso de llegada al punto de encuentro señalado es presentado en la figura 5.6.

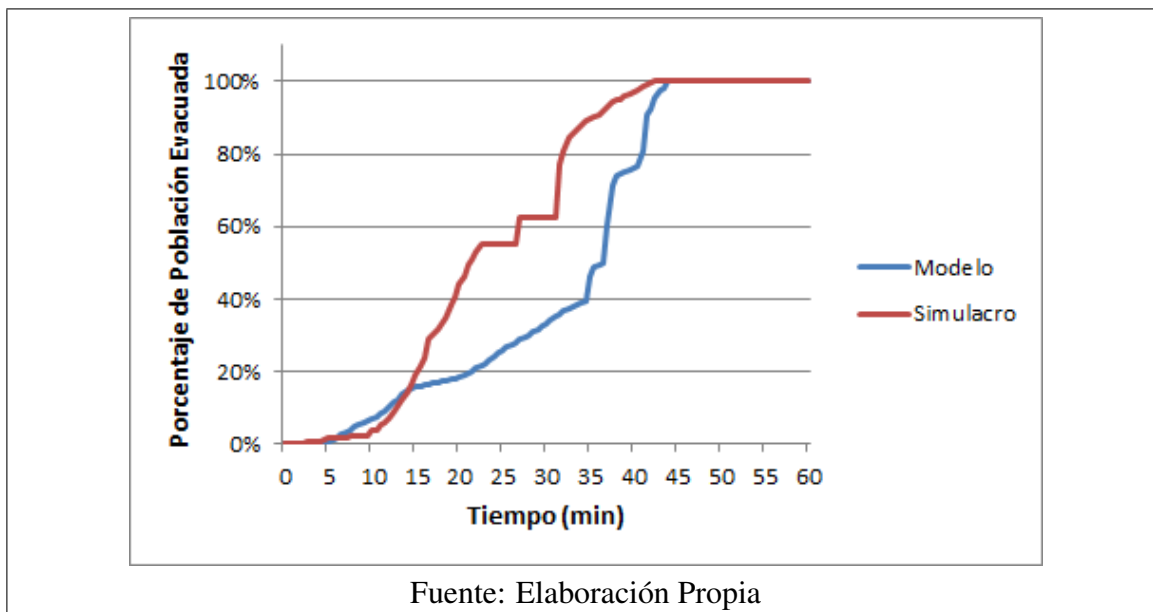


Figura 5.6. Llegada de Población a Punto de Encuentro So-  
tomayor/Circunvalacion.

En este caso, los resultados que entrega el modelo difieren notablemente de lo registrado en el simulacro. Se observa que el tiempo requerido para evacuar es considerablemente mayor según lo predicho por el modelo. Los resultados se distancian a partir del minuto 15 y alcanzan diferencias de hasta 49% en el minuto 34. Una posible explicación para estas diferencias consiste en el caso que se está estudiando. El modelo contempla una evacuación de la ZOFRI en el peor escenario estimado (30.000 personas), mientras que el simulacro puede haber ocurrido en un día con afluencia de gente menor. En dicho caso, los datos no son útiles para realizar comparaciones.

Otro factor que explica las diferencias es la población simulada. Para el p.e. de estudio se simuló 7827 personas y en el simulacro se registró 1379 personas. Este factor es aún más importante en este caso pues el p.e. cuenta con una única vía de evacuación (Av. Circunvalación). A través de ella llegan las personas y al aumentar la congestión se genera una disminución de velocidad más acentuada que en otros casos que disponen de más vías de evacuación.

En cuanto a comportamiento, la curva de llegada se caracteriza por una inicio lento y posteriormente ocurre una llegada masiva de gente en poco tiempo. Esto se debe a la larga distancia que separa a la ZOFRI del punto de encuentro. La velocidad máxima de evacuación en el modelo es de  $5,4 \frac{km}{h}$  y a esa velocidad se recorre 1,8 km en 20 minutos. Además, Av. Circunvalación es un vía con alta pendiente (6,7% en su parte más inclinada), lo que sumado al factor congestión disminuye la velocidad de las personas. La tendencia de la llegada masiva de personas es capturada en el modelo desarrollado.

#### 5.4.3. Evaluación del Modelo Zona 2

En la figura 5.7 se presenta el proceso de llegada de la población a los puntos de encuentro para el simulacro de 2013 y para el modelo desarrollado. Se modeló la evacuación de 36.596 personas y en el simulacro se contabilizó la llegada de 7.439 personas. La cantidad de puntos de encuentro registrados en el simulacro corresponde siete de un total catorce.

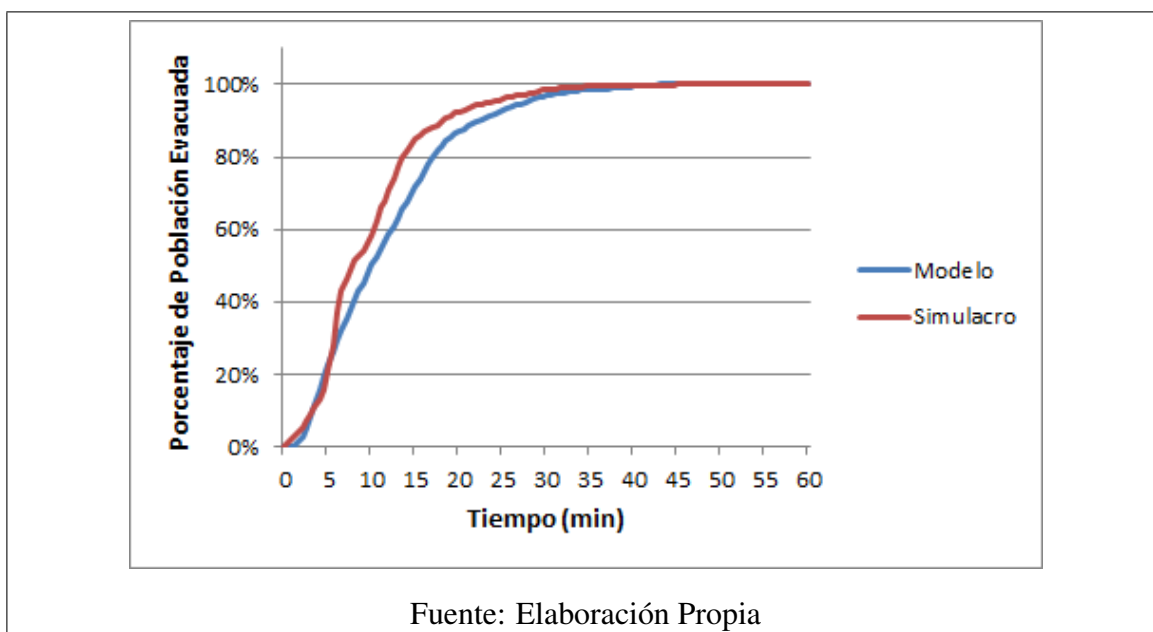


Figura 5.7. Llegada de Población a Puntos de Encuentro de Zona 2.

La curva de llegada de personas predicha por el modelo se asemeja a lo registrado en el simulacro. En general, el valor de la población evacuada predicho por el modelo para un tiempo dedado es igual o ligeramente inferior al valor del simulacro. De manera similar a las zonas anteriores, esta diferencia puede deberse a que en el modelo se consideró una mayor cantidad de personas, lo que aumenta la congestión en las vías de evacuación y disminuye la velocidad de las personas.

Una pregunta interesante de explorar es por qué en la zona 2, a diferencia de las otras zonas, la congestión tiene un menor impacto en el desempeño de la evacuación. Una posible razón es que esta zona se diferencia por tener una mayor cantidad de vías de evacuación. Luego, hay más espacio disponible para distribuir a la población y la congestión que se produce en las vías es menor en relación a lo que ocurre en otras zonas.

#### **5.4.4. Evaluación del Modelo Zona 3**

En la figura 5.8 se presenta el proceso de llegada de la población a los puntos de encuentro para el simulacro de 2013 y para el modelo de la zona 3 desarrollado. Se modeló la evacuación de 18.689 personas y en el simulacro se contabilizó la llegada de 3.840 personas. La cantidad de puntos de encuentro registrados en el simulacro corresponde tres de un total ocho.

Se observa que las curvas presentan diferencias en el intervalo temporal [10,40] minutos desde el inicio de la evacuación. Además, se desprende del gráfico que la predicción del modelo es cercana a lo registrado en el simulacro al analizar para los 5 primeros deciles de la población en llegar a puntos de encuentro. De esta forma, el comportamiento inicial de lo registrado en el simulacro es capturado por el modelo.

La diferencia entre ambas curvas se acentúa en torno al minuto 20. La razón detrás de esta diferencia puede ser la cantidad de personas que participó del simulacro. El modelo considera una mayor cantidad de personas y la zona 3 posee una cantidad de vías de evacuación relativamente baja. Luego, la congestión aumenta de forma más acentuada

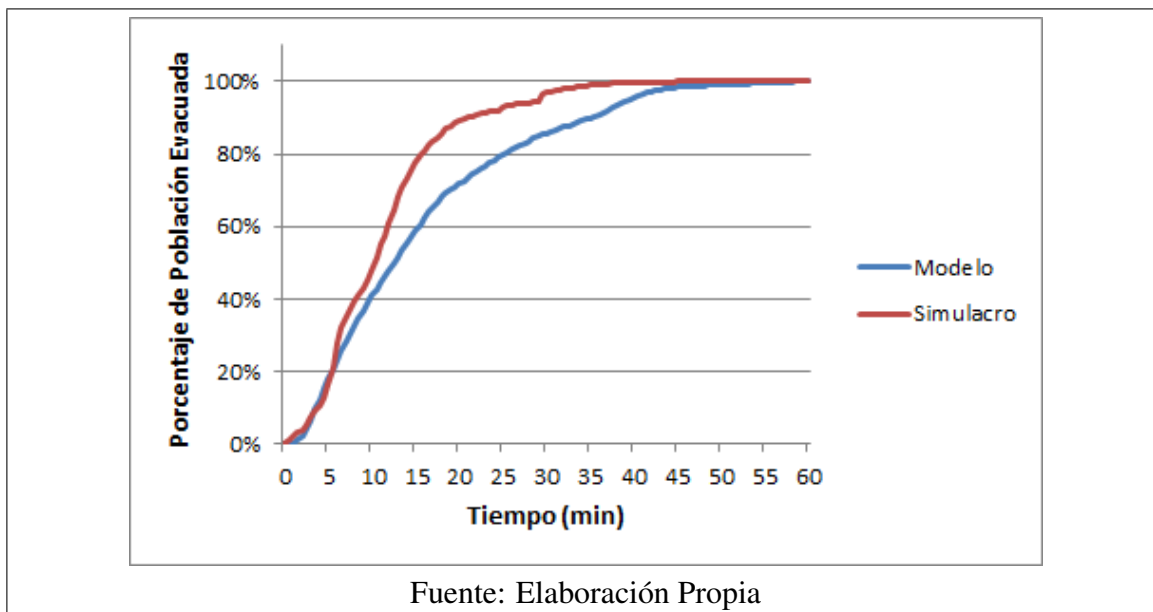


Figura 5.8. Llegada de Población a Puntos de Encuentro de Zona 3.

que en otras zonas y esto se traduce en una menor velocidad de evacuación. Más allá de las diferencias entre los valores del modelo y los del simulacro, se observa que el comportamiento de ambas curvas es parecido en cuanto a la curvatura.

## 5.5. Resumen Validación

En la presente sección se ha aplicado la metodología propuesta por Klügl (2008) para validar modelos de simulación basados en agente. Debido a la falta de datos se ha aplicado 3 de las 4 etapas propuestas: i) face validation, ii) análisis de sensibilidad y iii) validación estadística.

Se ha presentado el modelo a expertos en materia de evacuación mediante modelos basados en agentes y en evacuaciones de Iquique. Se ha destacado la necesidad de representar la realidad local del proceso de evacuación, lo que ha sido revisado a través de observaciones del simulacro de 2013 y videos de la evacuación de abril de 2014. El hecho de que el modelo no incorpore elementos como la evacuación en vehículo o la inclusión

de discapacitados agilizan el proceso de evacuación en el modelo. Por lo tanto, el modelo presentaría una cota inferior de los resultados de un proceso de evacuación de tsunami.

El análisis de sensibilidad revela que el modelo presenta un comportamiento coherente con lo esperado al realizar variaciones del instante promedio de inicio de evacuación. La validación estadística demuestra una semejanza relativa entre lo predicho por el modelo y lo registrado en el simulacro para el caso de las zonas 2 y 3. El caso de la zona 1 difiere debido a que los datos disponibles no presentan un escenario similar al que es modelado. Por lo tanto, no es posible validar estadísticamente la zona 1 debido a la falta de información.

La principal dificultad experimentada en el proceso de validación de este modelo consiste en la falta de información sobre procesos de evacuación en Iquique. Los únicos datos cuantitativos disponibles corresponden a mediciones realizadas durante el simulacro de 2013. Dichos datos presentan diferencias significativas respecto a una evacuación por tsunami debido a la menor cantidad de personas que participan en un simulacro. Al haber una menor cantidad de personas se produce una menor congestión en vías de evacuación y, por ende, mayor velocidad de evacuación. Luego, los resultados del simulacro han sido usados como una cota inferior para comparar las predicciones del modelo.

## 6. RESULTADOS

En este capítulo se presenta y se analizan los resultados obtenidos en los distintos escenarios considerados (diurno y nocturno). En primer lugar, se realiza una evaluación del número de réplicas usadas para la obtención de resultados y del error relativo de estos. En segundo lugar, se realiza una comparación entre la política de evacuación actual y la propuesta de incluir evacuación vertical en los puntos más lejanos a la zona segura. Finalmente, se ha incluido un análisis del impacto que tendría un caso particular de tsunami en el proceso de evacuación de las zonas 1 y 2. Esto se ha realizado en base al modelo de inundación desarrollado por Cienfuegos et al. (2014).

Se ha simulado las zonas 1, 2 y 3 de Iquique pues estas agrupan la mayor cantidad de población fuera de la zona de seguridad. Los resultados presentados corresponden únicamente al análisis de la evacuación de la población fuera de la zona segura definida por ONEMI. La zona segura según ONEMI corresponde a todo punto ubicado a una altura sobre el nivel del mar mayor a 35 metros. En la tabla 6.1 se presenta el detalle de la población simulada en cada zona y en cada escenario.

Tabla 6.1. Población de las Zonas Simuladas

| Escenario               | Zona 1 |        | Zona 2 |        | Zona 3 |        |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | Día    | Noche  | Día    | Noche  | Día    | Noche  |
| Población Zona Segura   | 0      | 0      | 17.828 | 14.438 | 12.408 | 16.732 |
| Población Zona Insegura | 44.557 | 12.364 | 36.595 | 34.112 | 18.689 | 33.672 |
| Total                   | 44.557 | 12.364 | 54.423 | 48.550 | 31.097 | 50.404 |

Fuente: Elaboración Propia

### 6.1. Intervalo de Confianza y Error Relativo en los Resultados

En la presente sección se analiza el error relativo existente en los resultados obtenidos y se construye un intervalo de confianza para ellos. El presente análisis ha sido realizado

en función de la principal métrica de desempeño considerada por ONEMI: el porcentaje de la población que logra evacuar a la zona segura en 20 minutos o menos (Walker Rousseau, 2013). Se ha estudiado el error relativo en dicha métrica para Iquique globalmente y para cada zona modelada independientemente.

El tipo de simulación realizada en este estudio es simulación terminal. Este tipo de simulación, también denominada de corto plazo, corresponde a la simulación de un sistema hasta la ocurrencia de un evento determinado. Para el presente caso de estudio dicho evento corresponde al fin del proceso de evacuación. Luego, los resultados obtenidos son reflejo de las dinámicas transientes de un sistema. No se tiene conocimiento a priori del valor esperado ni de la varianza de la medida de desempeño estudiada.

Se ha construido un intervalo de confianza al 99% para la métrica de estudio. Para llevar esto a cabo se han simulado 50 réplicas de cada escenario de estudio y se ha utilizado la distribución *Student*. El intervalo de confianza a nivel  $\alpha$  se calcula mediante la siguiente formula:

$$\text{Intervalo de Confianza: } \bar{X}(n) \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{S^2(n)/n} \quad (6.1)$$

donde  $n$  corresponde al número de réplicas,  $\bar{X}(n)$  a la media del porcentaje de la población que logra evacuar a la zona segura en 20 minutos o menos en las  $n$  réplicas,  $S^2(n)$  a la varianza de esta medida de desempeño en las  $n$  réplicas y  $t_{n-1, 1-\alpha/2}$  una variable con distribución Student con  $n - 1$  grados de libertad. En las tablas 6.2 y 6.3 se presenta los valores de  $\bar{X}$ , la desviación estándar ( $S_x$ ) y el intervalo de confianza obtenidos para la métrica de estudio en el escenario diurno y nocturno respectivamente.

Un factor importante de estudiar es el error relativo obtenido al construir el intervalo de confianza. El error relativo corresponde a la diferencia que existe respecto al valor esperado de la métrica de estudio para el sistema. No obstante, este valor no es conocido. Existen 2 métodos reconocidos para calcular el error relativo en este caso. El primero

Tabla 6.2. Intervalo de Confianza y Error Relativo Escenario Diurno

| Modelo | Política de evacuación | $\bar{X}$ (%) | $S_x$ | Intervalo de confianza | $\beta$ | $\gamma$ |
|--------|------------------------|---------------|-------|------------------------|---------|----------|
| Global | Horizontal             | 58,41         | 0,23  | $58,41 \pm 0,09$       | 0,15%   | 0,15%    |
|        | Mixta                  | 66,30         | 0,23  | $66,30 \pm 0,09$       | 0,13%   | 0,13%    |
| Zona 1 | Horizontal             | 33,79         | 0,50  | $33,79 \pm 0,19$       | 0,56%   | 0,56%    |
|        | Mixta                  | 35,45         | 0,52  | $35,45 \pm 0,20$       | 0,56%   | 0,56%    |
| Zona 2 | Horizontal             | 87,06         | 0,23  | $87,06 \pm 0,09$       | 0,10%   | 0,10%    |
|        | Mixta                  | 93,10         | 0,04  | $93,10 \pm 0,02$       | 0,02%   | 0,02%    |
| Zona 3 | Horizontal             | 61,02         | 0,29  | $61,02 \pm 0,11$       | 0,18%   | 0,18%    |
|        | Mixta                  | 87,23         | 0,04  | $87,23 \pm 0,02$       | 0,02%   | 0,02%    |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.3. Intervalo de Confianza y Error Relativo Escenario Nocturno

| Modelo | Política de evacuación | $\bar{X}$ (%) | $S_x$ | Intervalo de confianza | $\beta$ | $\gamma$ |
|--------|------------------------|---------------|-------|------------------------|---------|----------|
| Global | Horizontal             | 82,41         | 0,55  | $82,41 \pm 0,21$       | 0,25%   | 0,25%    |
|        | Mixta                  | 90,32         | 0,28  | $90,32 \pm 0,11$       | 0,12%   | 0,12%    |
| Zona 1 | Horizontal             | 87,45         | 2,66  | $87,45 \pm 0,78$       | 0,90%   | 0,91%    |
|        | Mixta                  | 91,50         | 1,01  | $91,50 \pm 0,35$       | 0,38%   | 0,38%    |
| Zona 2 | Horizontal             | 98,76         | 0,06  | $98,76 \pm 0,02$       | 0,02%   | 0,02%    |
|        | Mixta                  | 99,50         | 0,04  | $99,50 \pm 0,01$       | 0,01%   | 0,01%    |
| Zona 3 | Horizontal             | 63,50         | 0,71  | $63,50 \pm 0,27$       | 0,43%   | 0,43%    |
|        | Mixta                  | 80,52         | 0,58  | $80,52 \pm 0,22$       | 0,27%   | 0,27%    |

Fuente: Elaboración Propia

consiste en calcular la razón entre la mitad del ancho del intervalo de confianza y la media obtenida:

$$\beta = \frac{t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{S^2(n)/n}}{|\bar{X}(n)|} \quad (6.2)$$

donde  $\beta$  representa el error relativo obtenido a partir de las  $n$  réplicas. El segundo método consiste en calcular inicialmente  $\beta$  y posteriormente obtener el error relativo como:

$$\gamma = \frac{\beta}{1 - \beta} \quad (6.3)$$

donde  $\gamma$  representa el error relativo obtenido a partir de las  $n$  réplicas.

En las tablas 6.2 y 6.3 se presenta el resultado de ambos métodos para cada escenario simulado. El error relativo global del modelo es de 0,15% en el escenario diurno y de 0,25% en el escenario nocturno. Dichos valores son bajos, lo que indica que el número de réplicas usadas es correcto. Una posible razón de por qué el escenario diurno tiene un menor error relativo se puede obtener al analizar la distribución de la población. En el escenario diurno aproximadamente un tercio de los habitantes simulados se encuentran agrupados en ZOFRI, un área relativamente reducida. Luego, los resultados de cada réplica tienden a ser más parecidos. En el escenario nocturno la población se encuentra distribuida en un área más grande, lo que genera una mayor variabilidad en los resultados.

De los 3 modelos desarrollados, el modelo de la zona 1 es el que presenta mayor error relativo. Esto tiene directa relación con el tamaño de los sectores en que se distribuye la población. De acuerdo a división de datos de la encuesta Origen Destino, en el escenario diurno la población de la zona 1 se distribuye principalmente en 3 áreas de gran extensión, mientras que en las zonas 2 y 3 la población se distribuye en 25 áreas de espacio menor. Esto influye en la variabilidad de los resultados obtenidos puesto que al haber áreas más grandes donde se distribuye la gente hay también mayor diferencia entre cada réplica dependiendo de cómo sea distribuida la población.

## 6.2. Escenario Diurno

En esta sección se presentan los resultados globales de los modelos desarrollados para el escenario diurno. Posteriormente, se detallan los resultados obtenidos en cada zona simulada. El escenario diurno se caracteriza por tener una mayor actividad en la ZOFRI, puerto y sectores cercanos a las playas. En este escenario se ha simulado un total de 99.841 personas distribuidas de la siguiente forma: 44.557 en la zona 1, 36.595 en la

zona 2 y 18.689 en la zona 3. Por lo tanto, los resultados globales son influenciados mayoritariamente por los resultados obtenidos en la zona 1 y la zona 2.

En la tabla 6.4 se presenta el porcentaje de población que logra evacuar en distintos tiempos desde el inicio de la simulación. Es importante notar que actualmente el porcentaje de la población que logra evacuar en los 20 minutos iniciales (tiempo límite considerado por ONEMI) es inferior al 60% de la población, es decir, más de 39.000 personas no alcanzan a llegar a la zona segura dentro del tiempo esperado. Este resultado es influenciado en gran medida por el desempeño de la evacuación en la zona 1. Esta zona posee 30.000 personas distribuidas en ZOFRI y barrio industrial, sectores cuya distancia hacia la zona de encuentro supera 1,5 km.

Tabla 6.4. Porcentaje de Población Evacuada en Escenario Diurno

| Política de Evacuación | Porcentaje de Población Evacuada X minutos desde Inicio de Evacuación |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                        | 5                                                                     | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 40     | 50     |
| Horizontal             | 14,23%                                                                | 32,61% | 47,33% | 58,41% | 67,49% | 75,84% | 90,66% | 99,23% |
| Mixta                  | 20,93%                                                                | 43,09% | 57,72% | 66,30% | 73,17% | 79,38% | 92,20% | 99,77% |

Fuente: Elaboración Propia

Otro factor importante de destacar es el impacto que tiene la implementación de una política de evacuación vertical. Se observa que el porcentaje adicional de la población que logra evacuar en los 10 minutos iniciales gracias a una política de evacuación mixta es cercano al 10%, es decir, aproximadamente 10.000 logran evacuar antes considerando esta política. A medida que transcurre la simulación, el desempeño de ambas políticas de evacuación se hace más similar. Esto se debe a que un porcentaje importante de la población proviene de la ZOFRI y barrio industrial. Dichos sectores no cuentan con edificios en los que se pueda realizar evacuación vertical, por lo que el proceso de evacuación es similar en ambos casos.

En la figura 6.1 se presentan las curvas de llegada de la población a los puntos de encuentro a lo largo del tiempo para ambas políticas de evacuación. Del gráfico se desprende que la política de evacuación mixta permite mejorar el desempeño del proceso de evacuación significativamente en los minutos iniciales. A partir del minuto 35 se observa un aumento en la pendiente de ambas curvas, lo que significa un aumento en la tasa de llegada de personas. Esto se debe a la llegada masiva de personas desde ZOFRI, evento que tiene ocurrencia similar en ambas políticas.

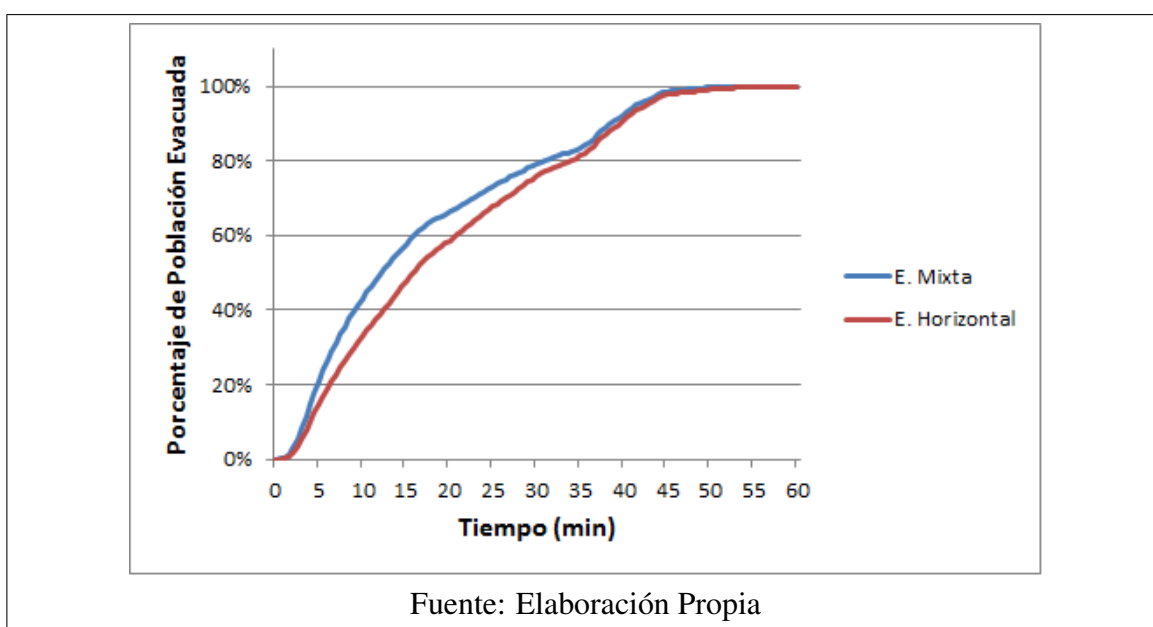


Figura 6.1. Llegada de Población a Puntos de Encuentro Escenario Diurno.

### 6.2.1. Resultados Zona 1 Día

El escenario diurno de la zona 1 se caracteriza por la actividad de la ZOFRI y del barrio industrial. Se ha simulado el escenario esperado de máxima concentración de personas, correspondiente a 30.000 personas en ZOFRI y barrio industrial. En total se ha simulado 44.557 personas en la zona 1. Por lo tanto, el proceso de evacuación de las personas en ZOFRI tiene un alto impacto en el desempeño global de la zona. Además, la zona 1 tiene únicamente 2 edificios disponibles para realizar evacuación vertical. La capacidad

estimada de dichos edificios es de 600 personas en total, por lo que la aplicación de una política de evacuación mixta no debería tener un impacto importante.

En la tabla 6.5 se presenta el porcentaje de población que logra evacuar en distintos tiempos desde el inicio de la simulación. Se observa que el desempeño del proceso de evacuación de esta zona es considerablemente peor que el desempeño global de Iquique. Tan solo el 55% de la población en la zona 1 es capaz de evacuar en menos de 30 minutos, es decir, aproximadamente 20.000 personas no logran evacuar en dicho tiempo. Esto se debe a la distancia que existe entre ZOFRI y la zona segura. Las personas que son capaces de evacuar en poco tiempo corresponden a personas ubicadas en las cercanías de Av. Sotomayor, vía de evacuación que conecta el sector costero con la zona segura. Estas personas se encuentran relativamente cerca de la zona segura y no experimentan gran congestión en las calles. Por el contrario, las personas ubicadas en ZOFRI deben recorrer largos trayectos y experimentan una gran congestión debido que ZOFRI cuenta únicamente con 2 vías de evacuación.

Tabla 6.5. Porcentaje de Población Evacuada en Zona 1 Escenario Diurno

| Política de Evacuación | Porcentaje de Población Evacuada en X minutos desde Inicio de Evacuación |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                        | 5                                                                        | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 40     | 50     |
| Horizontal             | 8,34%                                                                    | 18,32% | 26,74% | 33,79% | 43,91% | 55,29% | 82,83% | 99,66% |
| Mixta                  | 9,09%                                                                    | 19,75% | 28,25% | 35,45% | 45,27% | 55,77% | 82,88% | 99,69% |

Fuente: Elaboración Propia

Se observa también que la aplicación de una política de evacuación mixta en la zona 1 no tiene un mayor impacto en el desempeño de la evacuación. En los minutos iniciales existe una diferencia entre ambas políticas cercana al 1%, lo que corresponde aproximadamente a 450 personas adicionales que lograrían evacuar de implementarse la evacuación mixta. A medida que transcurre el tiempo, el desempeño de ambas políticas es cada vez más parecido. El escaso impacto de una política de evacuación mixta es coherente con lo

esperado pues en la zona 1 hay únicamente 2 edificios disponibles para evacuación vertical y están ubicados lejos de ZOFRI, por lo que no ayudan a evacuar la zona de mayor congestión.

En la figura 6.2 se presentan las curvas de llegada de la población a los puntos de encuentro a lo largo del tiempo para ambas políticas de evacuación. Del gráfico se desprende que la política de evacuación mixta no presenta una mejora significativa en el desempeño del proceso de evacuación para la zona 1. En los minutos iniciales se observa que la política de evacuación mixta tiene un desempeño ligeramente mejor y desde el minuto 30 ambos desempeños son iguales. A partir del minuto 35 se observa un aumento en la pendiente de ambas curvas, lo que significa un aumento en la tasa de llegada de personas. Esto se debe a la llegada masiva de personas desde ZOFRI, evento que tiene ocurrencia similar en ambas políticas.

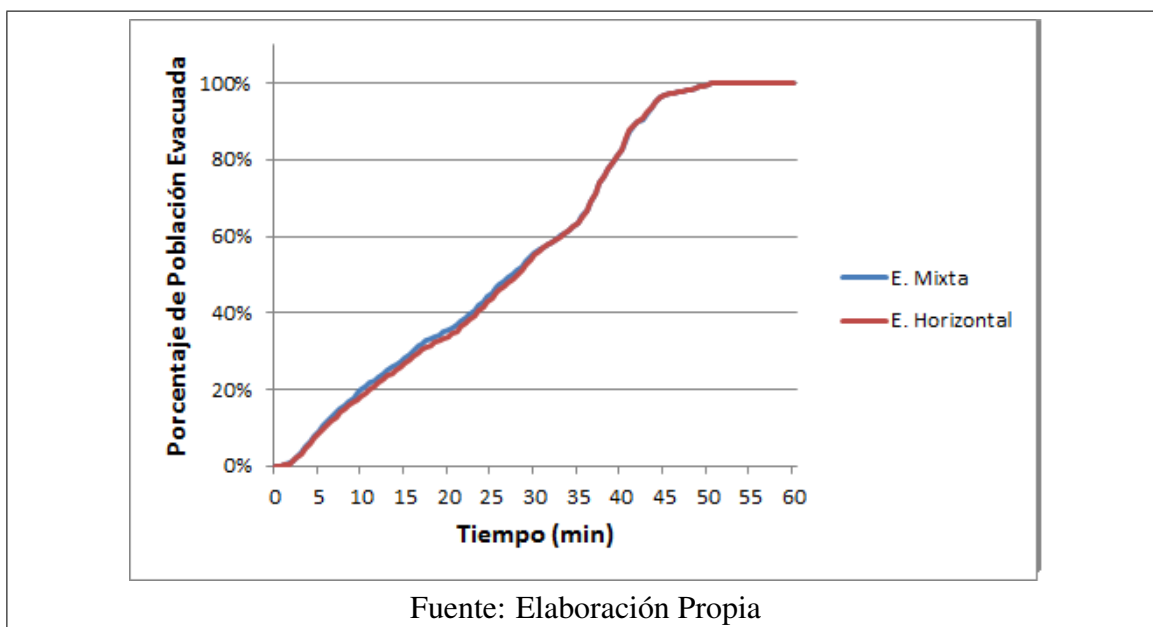


Figura 6.2. Llegada de Población a Puntos de Encuentro de Zona 1 Escenario Diurno.

### 6.2.2. Resultados Zona 2 Día

El escenario diurno de la zona 2 se caracteriza por la actividad en las cercanías de la playa Bellavista y en Baquedano. Además, los funcionarios del puerto de Iquique se encuentran a más de 2 km. de la zona segura, por lo que es prácticamente imposible que logren evacuar a tiempo. En total se ha simulado 36.595 personas en la zona 2. A diferencia de la zona 1, esta zona se caracteriza por tener varios edificios disponibles para evacuar verticalmente a las personas. Los 13 edificios considerados se distribuyen principalmente a lo largo de la línea costera. Esto permite a los habitantes más alejados de la zona segura evacuar en poco tiempo.

En la tabla 6.6 se presenta el porcentaje de población que logra evacuar en distintos tiempos desde el inicio de la simulación. Esta zona presenta un desempeño significativamente mejor al de la zona 1. Considerando la política de evacuación actual, el 87% de la población logra evacuar en los 20 minutos iniciales. Luego, aproximadamente 4.700 personas no logran evacuar en ese tiempo. El mejor desempeño de esta zona corresponde a que la población se encuentra distribuida a menor distancia de la zona segura. Además, hay mayor cantidad de vías de evacuación. Esto permite que se genere menor congestión en las vías y la población pueda evacuar más rápido.

Tabla 6.6. Porcentaje de Población Evacuada en Zona 2 Escenario Diurno

| Política de Evacuación | Porcentaje de Población Evacuada en X minutos desde Inicio de Evacuación |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                        | 5                                                                        | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     |
| Horizontal             | 22,81%                                                                   | 50,19% | 72,11% | 87,06% | 92,73% | 96,92% | 98,57% | 99,43% |
| Mixta                  | 31,34%                                                                   | 63,09% | 83,64% | 93,15% | 96,67% | 98,65% | 99,49% | 99,91% |

Fuente: Elaboración Propia

La implementación de una política de evacuación mixta tiene un impacto positivo en el desempeño de la evacuación, principalmente en los 20 minutos iniciales. La mayor diferencia se observa en el minuto 10, momento en el que la diferencia entre ambas políticas

es de 12,9%. Esto implica un total de 4.721 personas que logran evacuar antes mediante la política de evacuación mixta. Al analizar el desempeño tras los 20 minutos iniciales de evacuación, el número de personas que no logra evacuar se reduce de 4.700 con la política horizontal a 2.500 con la política mixta. Por lo tanto, el uso de infraestructura disponible para evacuar verticalmente significaría un beneficio importante para la población ubicada a lo largo de la zona 2.

En la figura 6.3 se presentan las curvas de llegada de la población a los puntos de encuentro a través del tiempo para ambas políticas de evacuación. Del gráfico se desprende que la política de evacuación mixta mejora el desempeño del proceso de evacuación de la población. Se observa que la pendiente de la curva se mantiene relativamente constante a lo largo del tiempo. Esto difiere de lo observado en la zona 1, donde se podía observar un aumento en la pendiente producto de la llegada masiva de personas de ZOFRI. En este caso, la población no presenta una distribución tan concentrada en una zona particular. Por lo tanto, el proceso de llegada de las personas a los puntos de encuentro es más uniforme en la zona 2 que en la zona 1.

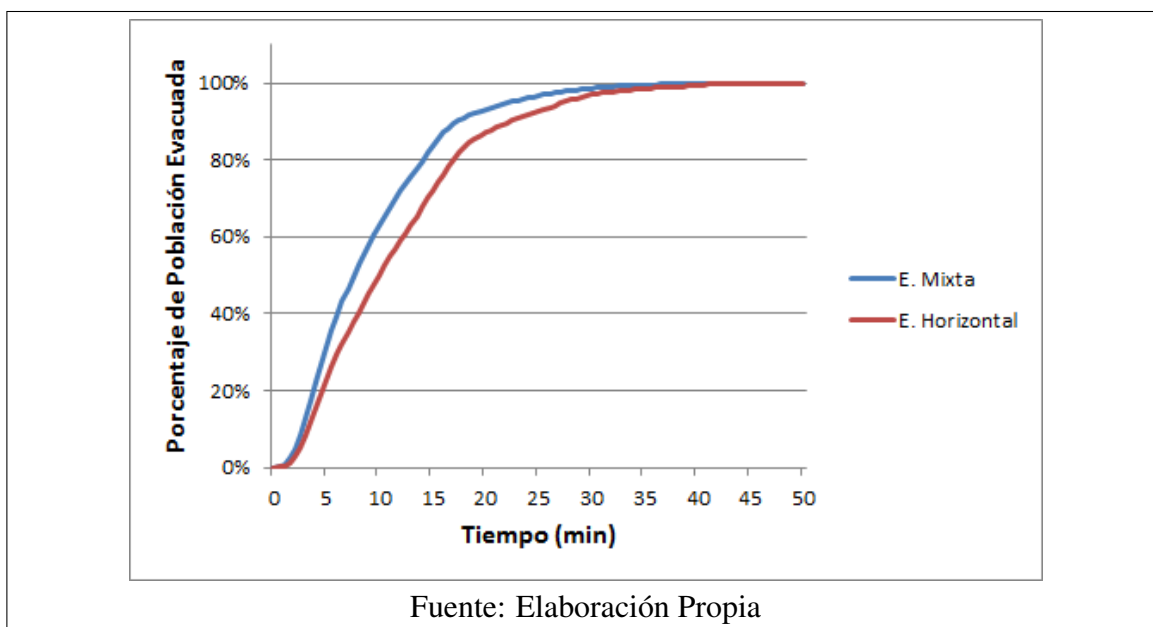


Figura 6.3. Llegada de Población a Puntos de Encuentro de Zona 2 Escenario Diurno.

### 6.2.3. Resultados Zona 3 día

El escenario diurno de la zona 3 se caracteriza por la actividad en las cercanías de la playa Cavancha y el comercio del Mall Plaza Iquique. A diferencia de las zonas descritas anteriormente, la zona 3 tiene mayor presencia de residencias y edificios. Se ha simulado un total de 18.689 personas en la zona 3. La distancia entre el borde costero y la zona segura es mayor a 2 km. en los puntos más alejados y en algunos sectores de la playa no hay vías de evacuación cercanas debido a la existencia de grandes bloques de edificios sin calles intermedias (cuadra de 900 m. de largo). En dichos sectores las personas deben rodear la cuadra para llegar a la vía de evacuación. La zona 3 dispone de 15 edificios ubicados en la línea costera que permitirían evacuar los lugares más alejados de la zona segura en una cantidad de tiempo menor.

En la tabla 6.7 se presenta el porcentaje de población que logra evacuar en distintos tiempos desde el inicio de la simulación. Considerando la política de evacuación actual, el 61% de la población logra evacuar en los 20 minutos iniciales. Esto significa que aproximadamente 7.300 personas no logran evacuar en ese tiempo. Esta zona presenta un desempeño en la evacuación mejor que el de la zona 1 y peor que el de la zona 2. Esto coincide con el hecho de que la distancia existente entre los centros de mayor concentración de la población y la zona segura es mayor en la zona 3 que en la zona 2 y menor que en la zona 1.

Tabla 6.7. Porcentaje de Población Evacuada en Zona 3 Escenario Diurno

| Política de Evacuación | Porcentaje de Población Evacuada en X minutos desde Inicio de Evacuación |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                        | 5                                                                        | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     |
| Horizontal             | 11,46%                                                                   | 32,23% | 47,91% | 61,02% | 74,27% | 83,54% | 89,37% | 92,15% |
| Mixta                  | 28,77%                                                                   | 59,57% | 77,21% | 87,23% | 93,64% | 97,92% | 99,62% | 99,91% |

Fuente: Elaboración Propia

La implementación de una política de evacuación mixta tiene un impacto importante en el desempeño de la evacuación. En los 20 minutos iniciales de evacuación se observa una diferencia de 26,21% entre ambas políticas, lo que significa que aproximadamente 4.900 personas logran evacuar antes mediante la política de evacuación mixta. Incluir evacuación vertical es particularmente conveniente en esta zona debido a que la población está concentrada a una mayor distancia de la zona segura y hay una gran cantidad de edificios disponibles, lo que permite evacuar rápidamente a un gran porcentaje de la población. Por lo tanto, el uso de infraestructura disponible para evacuar verticalmente significaría un beneficio importante para la población ubicada a lo largo de la zona 3.

En la figura 6.4 se presentan las curvas de llegada de la población a los puntos de encuentro a través del tiempo para ambas políticas de evacuación. Del gráfico se desprende que la política de evacuación mixta presenta un desempeño notablemente mejor que la política de evacuación actual. Es importante destacar que con la política de evacuación mixta el proceso de evacuación finaliza alrededor del minuto 35, mientras que la política de evacuación horizontal requiere de aproximadamente 55 minutos. Además, se observa que la pendiente de la curva de llegada asociada a la política de evacuación horizontal es menor que en el gráfico de la zona 2 (ver figura 6.3). Esto es coherente con el hecho de que en general la distancia que recorre la población en la zona 3 es mayor que en la zona 2, por lo que la tasa de llegada de personas es también menor en la zona 3.

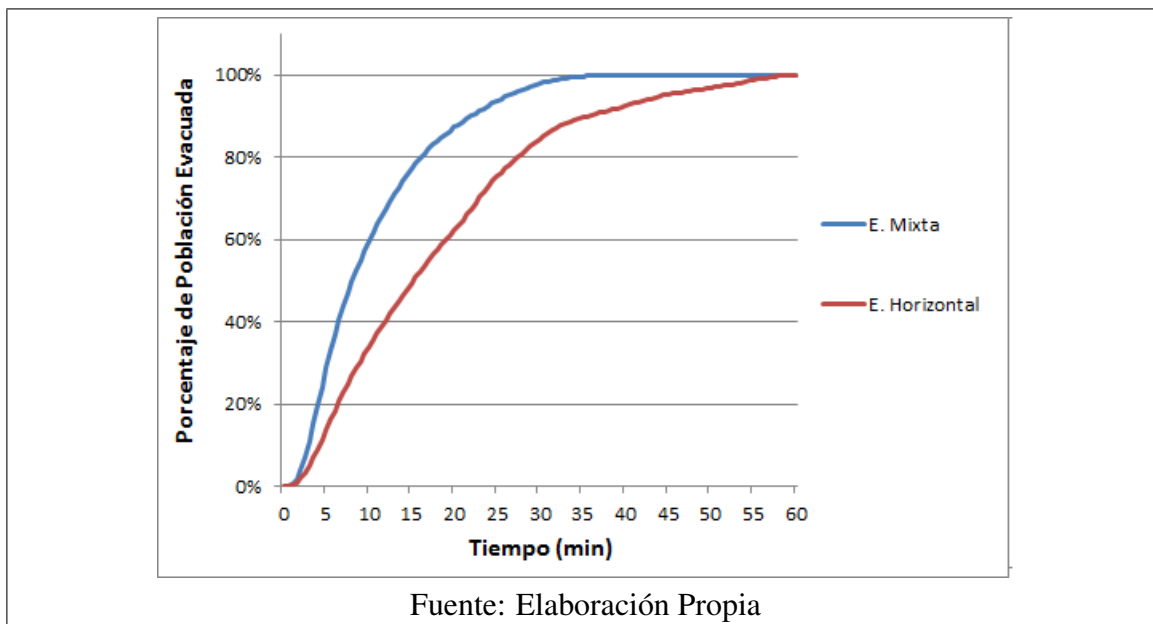


Figura 6.4. Llegada de Población a Puntos de Encuentro en Zona 3 Escenario Diurno.

### 6.3. Escenario Nocturno

En esta sección se presentan los resultados globales de los modelos desarrollados para el escenario nocturno. Posteriormente, se detallan los resultados obtenidos en cada zona simulada. El escenario nocturno se caracteriza por no tener actividad en la zona franca ni en el barrio industrial y por presentar una mayor concentración demográfica en la zona 3. Por lo tanto, el foco de estudio se traslada a otras zonas de riesgo. En este escenario se ha simulado un total de 80.148 personas distribuidas de la siguiente forma: 12.364 en la zona 1, 34.112 en la zona 2 y 33.672 en la zona 3. Por lo tanto, los resultados globales son influenciados mayoritariamente por los resultados obtenidos en la zona 2 y la zona 3.

En la tabla 6.8 se presenta el porcentaje de población que logra evacuar en distintos tiempos desde el inicio de la simulación. Es importante notar que el proceso de evacuación en el escenario nocturno presenta un desempeño considerablemente mejor que en el escenario diurno. Esto se debe principalmente a la ausencia de actividad en la zona franca,

sector que en el escenario diurno agrupaba a 30.000 y que presentaba un desempeño deficiente en el proceso de evacuación.

El porcentaje de la población que logra evacuar en los 20 minutos iniciales con la política de evacuación horizontal es de 82,41%. Esto quiere decir que alrededor de 14.200 personas no logran llegar a la zona segura en dicho tiempo. Este resultado es influenciado en gran medida por la población ubicada en el borde costero de las zonas 2 y 3. Al no permitirse la evacuación vertical, estas personas deben recorrer largas distancias para alcanzar la zona segura.

Tabla 6.8. Porcentaje de Población Evacuada en Escenario Nocturno

| Política de Evacuación | Porcentaje de Población Evacuada X Minutos desde Inicio de Evacuación |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                        | 5                                                                     | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 40     | 50     |
| Horizontal             | 22,03%                                                                | 49,87% | 69,29% | 82,41% | 89,57% | 94,11% | 98,20% | 99,41% |
| Mixta                  | 30,43%                                                                | 62,40% | 79,91% | 90,32% | 95,90% | 98,45% | 99,78% | 99,99% |

Fuente: Elaboración Propia

Al considerar una política de evacuación mixta, el porcentaje adicional de la población que logra evacuar en los 20 minutos iniciales es de 10,62%, es decir, 8.591 personas logran evacuar antes considerando esta política. A medida que transcurre la simulación, el desempeño de la políticas de evacuación mixta mantiene un mejor desempeño que la política de evacuación horizontal. Esto se diferencia de lo que ocurre en el escenario diurno. En dicho escenario ambas políticas presentaban un desempeño similar en el último quintil de la población en evacuar. En el escenario nocturno se observa un comportamiento distinto debido a que el segmento de la población que logra evacuar mediante evacuación vertical consiste en el grupo de personas que más tiempo requieren para llegar a la zona segura. Luego, el proceso de evacuación considerando la política de evacuación mixta termina antes y los desempeños se diferencian hasta que el proceso de evacuación horizontal termina.

En la figura 6.5 se presentan las curvas de llegada de la población a los puntos de encuentro a lo largo del tiempo para ambas políticas de evacuación. Del gráfico se desprende que la política de evacuación mixta permite mejorar el desempeño del proceso de evacuación significativamente. Además, se observa que con la política de evacuación mixta se puede reducir el tiempo total de evacuación de 55 minutos a 35 minutos. Esto es coherente con el análisis detallado anteriormente. Luego, la aplicación de una política de evacuación mixta es conveniente para el escenario de evacuación nocturna.

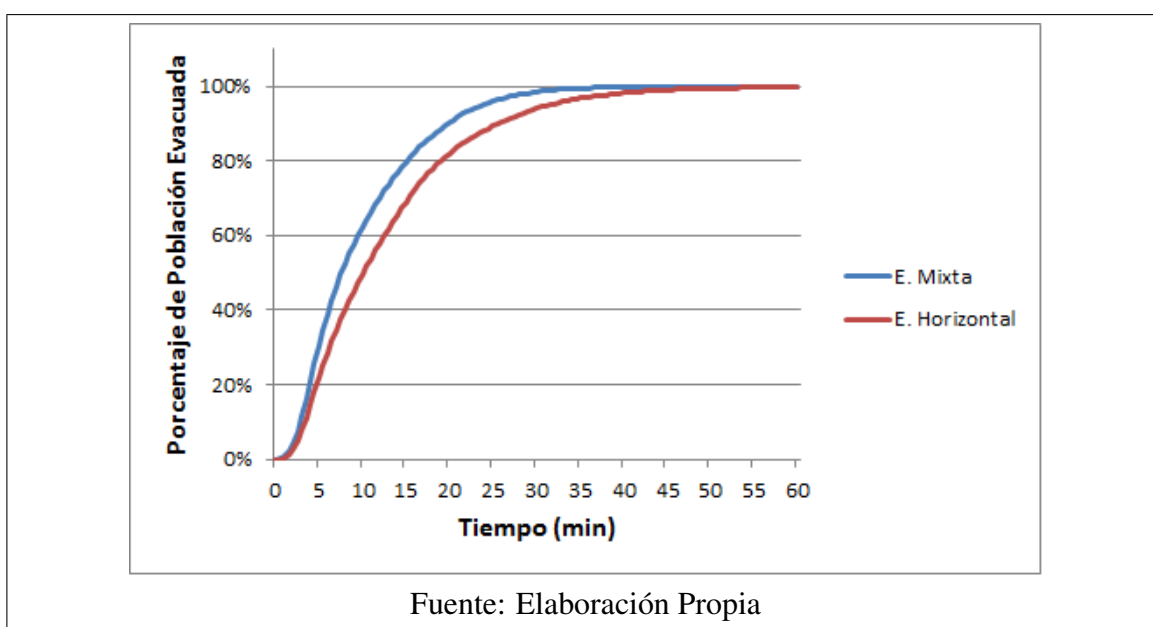


Figura 6.5. Llegada de Población a Puntos de Encuentro Escenario Nocturno.

### 6.3.1. Resultados Zona 1 Noche

El escenario nocturno de la zona 1 se caracteriza por la ausencia de actividad de la zona franca. La población de la zona 1 se encuentra ubicada únicamente en las cercanías de la Av. Sotomayor, por lo que el tiempo de evacuación es menor que en el escenario diurno. En total se ha simulado 12.364 personas. Esta zona tiene un bajo impacto en el desempeño global del proceso de evacuación de Iquique debido al número reducido de personas que contiene. Otro elemento característico de la zona es la disponibilidad de 2

edificios para evacuación vertical. Dichos edificios se ubican en la línea costera, por lo que permiten evacuar a la población más alejada de la zona segura. No obstante, la capacidad de los edificios de la zona es de aproximadamente 600 personas, por lo que impacto en el desempeño del proceso de evacuación no debiese ser mucho.

En la tabla 6.9 se presenta el porcentaje de población que logra evacuar en distintos tiempos desde el inicio de la simulación. Es importante notar que el proceso de evacuación de la zona 1 en el escenario nocturno presenta un desempeño considerablemente mejor que en el escenario diurno. Esto se debe principalmente a la ausencia de actividad en la ZOFRI. En el escenario nocturno la población se agrupa en las cercanías la zona segura, por lo que el proceso de evacuación es más rápido.

El porcentaje de la población que logra evacuar en los 20 minutos iniciales con la política de evacuación horizontal es de 87,65%. Esto quiere decir que alrededor de 1.500 personas no logran llegar a la zona segura en dicho tiempo. Las personas que no logran escapar en el tiempo señalado corresponde principalmente a personas ubicadas en el borde costero. La capacidad estimada para evacuar verticalmente personas en la zona 1 es de 600 personas, por lo que existe margen de mejora para el proceso de evacuación.

Tabla 6.9. Porcentaje de Población Evacuada en Zona 1 Escenario Nocturno

| Política de Evacuación | Porcentaje de Población Evacuada en X minutos desde Inicio de Evacuación |        |        |        |        |        |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                        | 5                                                                        | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     |
| Horizontal             | 23,57%                                                                   | 52,67% | 71,91% | 87,65% | 95,96% | 99,92% |
| Mixta                  | 25,40%                                                                   | 56,17% | 75,65% | 91,50% | 98,79% | 99,98% |

Fuente: Elaboración Propia

Al considerar una política de evacuación mixta, el porcentaje adicional de la población que logra evacuar en los 20 minutos iniciales es de 3,85%, es decir, 436 personas logran evacuar antes considerando esta política. La diferencia entre ambas políticas de evacuación no mejora significativamente a lo largo del tiempo. Por lo tanto, la implementación

de una política de evacuación mixta no presenta una mejora importante respecto a la política de evacuación horizontal. Esto se debe a que la capacidad de evacuación vertical es relativamente baja y el tiempo requerido para evacuar verticalmente es similar al requerido para evacuar horizontalmente.

En la figura 6.7 se presentan las curvas de llegada de la población a los puntos de encuentro a lo largo del tiempo para ambas políticas de evacuación. Del gráfico se desprende que la política de evacuación mixta permite mejorar el desempeño del proceso de evacuación, pero no presenta una mejora importante. Además, se observa que las pendientes de las curvas son más inclinadas que en el escenario diurno, lo que corresponde con el hecho de que el proceso de evacuación es más rápido debido a la ausencia de actividad en la zona franca.

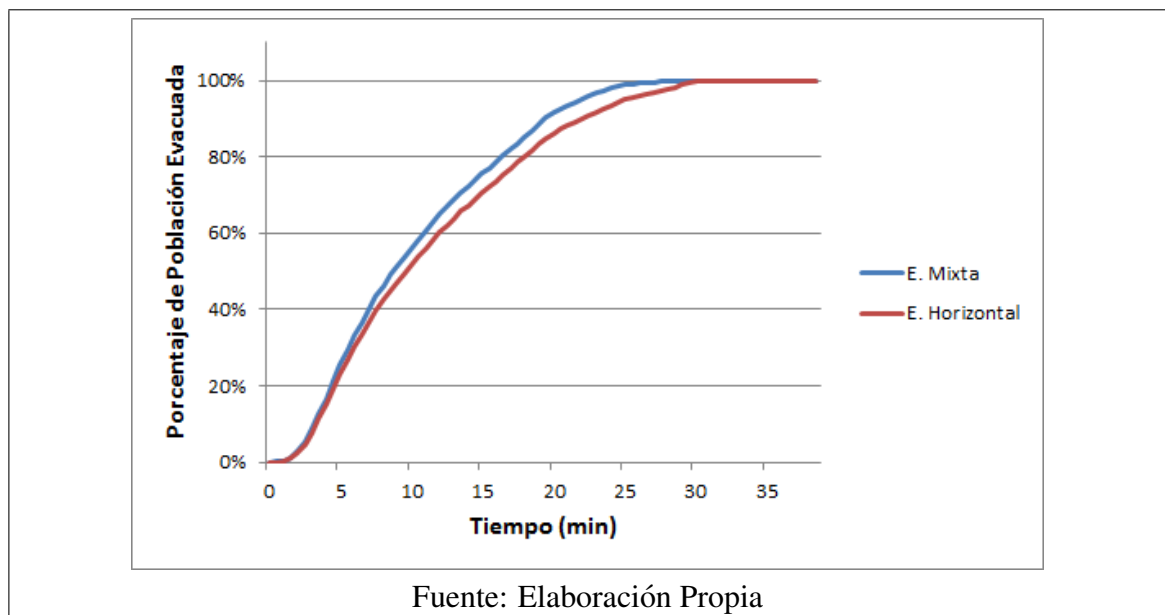


Figura 6.6. Llegada de Población a Puntos de Encuentro en Zona 1 Escenario Nocturno.

### 6.3.2. Resultados Zona 2 Noche

El escenario nocturno de la zona 2 se caracteriza por tener menor actividad en el borde costero en comparación con el escenario diurno. En el puerto no se trabaja durante la noche y la cantidad de personas que reside cerca del mar es relativamente baja. La costa es la zona más alejada de la zona segura. Por lo tanto, dado que hay menor actividad en los sectores más alejados, el desempeño de un proceso de evacuación en el escenario nocturno debiese ser mejor que en el escenario diurno. En total se ha simulado 34.112 personas. Esta zona tiene un alto impacto en el desempeño global del proceso de evacuación de Iquique debido al alto número de personas que contiene. Otro elemento característico de la zona es la disponibilidad de 13 edificios para evacuación vertical. Dichos edificios se ubican en el borde costero, por lo que permiten evacuar a la población más alejada de la zona segura.

En la tabla 6.10 se presenta el porcentaje de población que logra evacuar en distintos tiempos desde el inicio de la simulación. Se observa que el desempeño del proceso de evacuación en este escenario es mejor que en el escenario diurno. Además, el tiempo requerido para evacuar la zona disminuye de 40 minutos a 25 minutos. Ambos hechos son coherentes con el hecho de que hay menor actividad en los sectores más lejanos de la zona segura. El porcentaje de la población que logra evacuar en los 20 minutos iniciales con la política de evacuación horizontal es de 98,76%. Esto quiere decir que alrededor de 400 personas no logran evacuar dentro de ese periodo de tiempo.

Tabla 6.10. Porcentaje de Población Evacuada en Zona 2 Escenario Nocturno

| Política de Evacuación | Porcentaje de Población Evacuada en X minutos desde Inicio de Evacuación |        |        |        |         |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|---------|
|                        | 5                                                                        | 10     | 15     | 20     | 25      |
| Horizontal             | 33,41%                                                                   | 67,00% | 88,13% | 98,76% | 100,00% |
| Mixta                  | 43,13%                                                                   | 79,32% | 94,11% | 99,50% | 100,00% |

Fuente: Elaboración Propia

La implementación de una política de evacuación mixta tiene un impacto positivo en los minutos iniciales del proceso de evacuación. El porcentaje adicional de la población que logra evacuar verticalmente en los 10 minutos iniciales es de 12,32%, es decir, 4.200 personas logran evacuar antes considerando esta política. Por lo tanto, la implementación de una política de evacuación mixta presenta una mejora importante respecto a la política de evacuación horizontal en caso de que el tiempo de arribo de tsunami sea menor a 20 minutos.

En la figura 6.7 se presentan las curvas de llegada de la población a los puntos de encuentro a lo largo del tiempo para ambas políticas de evacuación. Se observa que la política de evacuación mixta permite mejorar el desempeño del proceso de evacuación en los minutos iniciales. Además, se observa que las pendientes de ambas curvas son más inclinada que en el escenario diurno, lo que corresponde con el hecho de que la población se encuentra ubicada más cerca de la zona segura y, por lo tanto, el proceso de evacuación es más rápido.

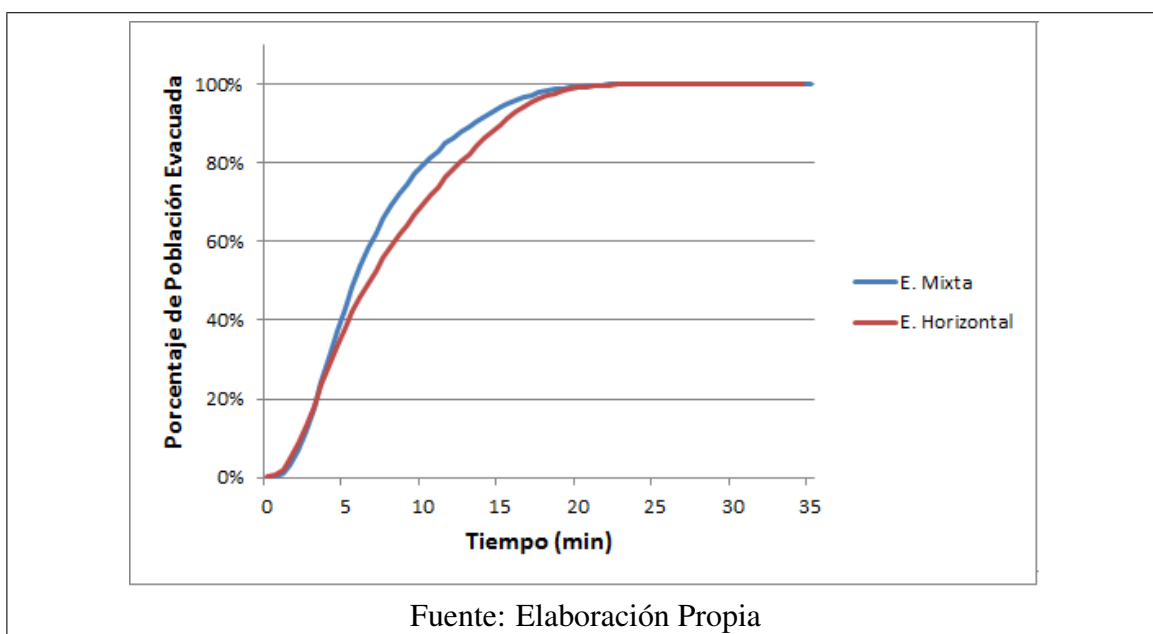


Figura 6.7. Llegada de Población a Puntos de Encuentro en Zona 2 Escenario Nocturno.

### 6.3.3. Resultados Zona 3 Noche

El escenario nocturno de la zona 3 se caracteriza por tener actividad en el sector Península, barrio de carácter residencial y de vida nocturna. La distancia entre Península y la zona segura supera los 2 km. en algunos puntos, por lo que la evacuación de dicho sector requiere mucho más de 20 minutos. Además, el borde costero de la zona 3 cuenta con una gran cantidad de edificios ubicados lejos de la zona segura. Por lo tanto, el desempeño del proceso de evacuación en esta zona debiese ser peor que en las zonas 1 y 2. En total se ha simulado 33.672 personas. Luego, esta zona tiene un alto impacto en el desempeño global del proceso de evacuación de Iquique debido al alto número de personas que contiene.

En la tabla 6.11 se presenta el porcentaje de población que logra evacuar en distintos tiempos desde el inicio de la simulación. Es importante notar que el proceso de evacuación de la zona 3 en el escenario nocturno presenta un desempeño considerablemente peor que en otras zonas. Esto se debe principalmente a la mayor concentración de personas en los sectores más alejados de la zona segura. El escenario nocturno tiene un desempeño parecido al del escenario nocturno. Esto es coherente con el hecho de que durante el día también hay una alta concentración de personas en el borde costero debido a la playa Cavancha.

El porcentaje de la población que logra evacuar en los 20 minutos iniciales con la política de evacuación horizontal es de 63,5%. Esto quiere decir que alrededor de 12.300 personas no logran llegar a la zona segura en dicho tiempo. Las personas que no logran evacuar a tiempo corresponden principalmente a personas ubicadas en el borde costero. Esta zona cuenta con 15 edificios disponibles para evacuar verticalmente, por lo que existe un amplio margen de mejora para el proceso.

La implementación de una política de evacuación mixta tiene un gran impacto en el desempeño del proceso de evacuación. El porcentaje adicional de la población que logra evacuar verticalmente en los 20 minutos iniciales es de 16,02%, es decir, 5.400 personas logran evacuar antes considerando esta política. Luego, al ocupar la infraestructura

Tabla 6.11. Porcentaje de Población Evacuada en Zona 3 Escenario Nocturno

| Política de Evacuación | Porcentaje de Población Evacuada en X minutos desde Inicio de Evacuación |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                        | 5                                                                        | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     |
| Horizontal             | 9,76%                                                                    | 31,09% | 48,80% | 63,50% | 76,21% | 85,83% | 92,38% | 95,65% |
| Mixta                  | 19,58%                                                                   | 47,70% | 67,15% | 80,52% | 90,61% | 96,28% | 98,72% | 99,47% |

Fuente: Elaboración Propia

disponible para evacuar verticalmente a parte de la población se puede mejorar significativamente el desempeño de un proceso de evacuación.

En la figura 6.8 se presentan las curvas de llegada de la población a los puntos de encuentro a lo largo del tiempo para ambas políticas de evacuación. Se observa que la política de evacuación mixta mejora sustancialmente el desempeño en un proceso de evacuación. Además, es importante notar que la implementación de una política de evacuación mixta permite reducir el tiempo total de evacuación de 60 a 40 minutos aproximadamente. Esto es coherente con el hecho de que la población que evacua verticalmente es la que se encuentra más alejada de la zona segura y por lo tanto, es la última en evacuar en un escenario de evacuación horizontal.

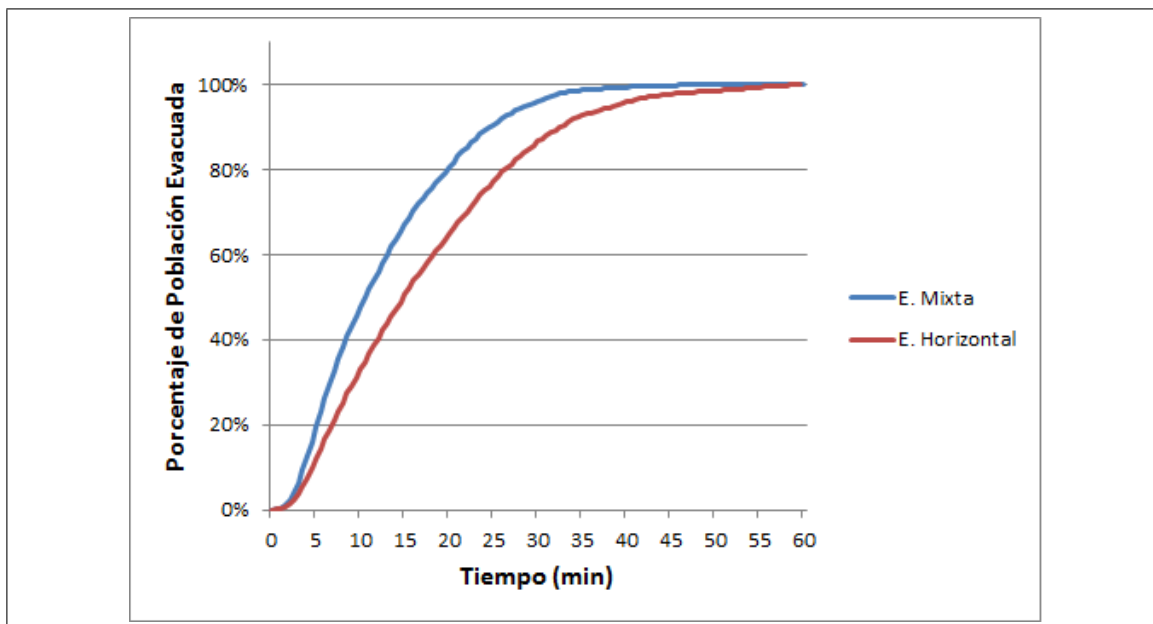


Figura 6.8. Llegada de Población a Puntos de Encuentro en Zona 3 Escenario Nocturno.

#### 6.4. Modelo de Inundación

El modelo de simulación desarrollado evalúa únicamente el proceso de evacuación de Iquique y no considera la interacción de la evacuación y la llegada del tsunami. En la presente sección se ha incluido un análisis de los resultados de un proceso de evacuación, incluyendo la inundación producto del tsunami generado. Esto se ha realizado con el fin de tener una noción de la cantidad de personas que podrían ser alcanzadas por un tsunami. El estudio del tsunami generado y de su dinámica de desplazamiento están fuera del alcance de la presente tesis.

Se ha considerado la investigación realizada por Cienfuegos et al. (2014) como referente para determinar un escenario de propagación de tsunami. Dicho estudio contempla la ocurrencia de un terremoto de magnitud 9.0  $M_W$  y se usa el modelo de propagación de tsunami STOC para reproducir el desplazamiento del tsunami. El modelo genera series de tiempo que indican la altura de inundación en un punto y en un tiempo determinado. La serie de tiempo es generada en formato *raster* con grillas de 5 x 5 metros. CIGIDEN ha

provisto la serie de tiempo para la zona 1 y la zona 2 con información cada 5 segundos. En la figura 6.9 se presenta la altura de inundación en el puerto de Iquique a lo largo del tiempo. Se observa que el primer tren de olas llega en aproximadamente 15 minutos al puerto y alcanza una altura de 5 metros.

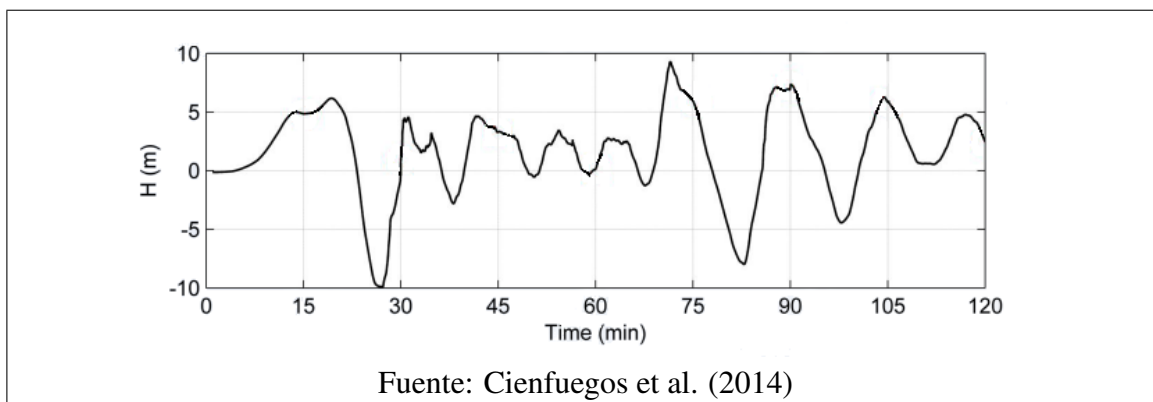


Figura 6.9. Altura de Inundación Simulada en Zona Puerto.

En la figura ?? se presenta imágenes del estado de inundación de las zonas 1 y 2 en distintos tiempos. En tales imágenes el negro representa nula o escasa inundación, mientras que el blanco y tonalidades de gris representan zonas con mayor altura de inundación. Se observa que dentro de los primeros 20 minutos ocurre la llegada del primer tren de olas.

Según Dawson et al. (2011) alturas de inundación superiores a 25 cm. son capaces arrastrar personas y producir accidentes. Se ha considerado esta altura como umbral para tener una estimación conservadora de las personas que no logran evacuar a tiempo. Luego, se ha usado la serie de tiempo en conjunto con el modelo de agentes desarrollado para simular un posible escenario de evacuación y obtener la cantidad de personas que son alcanzadas por el tsunami.

En la tabla 6.12 se presentan los resultados del modelo de simulación y el modelo de inundación. Se observa que el número de afectados es considerablemente menor a lo que se esperaría de acuerdo a los resultados expuestos anteriormente. Esto se debe a que el primer tren de olas simulado tiene un tiempo de llegada a costa cercano a los

15 minutos y no alcanza una altura mayor a 15 m.s.n.m. El segundo tren de olas llega después de 30 minutos desde el inicio de la evacuación, por lo que la población dispone de tiempo suficiente para evacuar. Luego, el escenario simulado difiere del escenario estudiado anteriormente.

Tabla 6.12. Número de Personas Alcanzadas por Tsunami

| Escenario | Modelo | Política de Evacuación | Número de Afectados | Porcentaje de la Población Simulada Afectada |
|-----------|--------|------------------------|---------------------|----------------------------------------------|
| Diurno    | Zona1  | Horizontal             | 6.503               | 14,6%                                        |
|           |        | Mixta                  | 6.147               | 13,8%                                        |
|           | Zona 2 | Horizontal             | 2.289               | 6,3%                                         |
|           |        | Mixta                  | 837                 | 2,3%                                         |
| Nocturno  | Zona1  | Horizontal             | 1.468               | 11,9%                                        |
|           |        | Mixta                  | 1.062               | 8,6%                                         |
|           | Zona 2 | Horizontal             | 2.003               | 5,9%                                         |
|           |        | Mixta                  | 898                 | 2,6%                                         |

Fuente: Elaboración Propia

En el escenario diurno se registra un total de 8.792 personas afectadas por el tsunami, mientras que en el escenario nocturno el número de afectados se reduce a 3.472. La diferencia entre ambos escenarios es coherente con la mayor actividad comercial en el borde costero que se observa durante el día. La zona más afectada corresponde a la zona 1. Esto se debe principalmente a la gran concentración de gente en el barrio industrial y en los alrededores de ZOFRI.

La implementación de una política de evacuación mixta permite evacuar una mayor cantidad de gente antes de la llegada del tsunami. En el escenario diurno 1.808 personas adicionales no son alcanzadas por la ola, mientras que el escenario nocturno este número descende a 1.511. El impacto de una política de evacuación mixta debiese ser mayor aún en la zona 3 debido a que hay un número importante de personas ubicadas cerca de la costa y hay una mayor cantidad de edificios disponibles para poder evacuar verticalmente. Por lo tanto, modificar la política de evacuación actual a una política en que se incorpore

el uso de infraestructura disponible para evacuar verticalmente podría ayudar a disminuir la cantidad de afectados por un tsunami en Iquique.

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el proceso de evacuación de la ciudad de Iquique en caso de tsunami. La evacuación de ciudad es compleja e involucra la interacción entre personas y la interacción con el medio en el que habitan. Los procesos de evacuación de ciudades han sido estudiados ampliamente en la literatura. El principal método para abordar este tipo de problemas es la modelación basada en agentes.

El principal desafío de simular la evacuación de una ciudad es poder representar correctamente el comportamiento de la población de estudio. La modelación basada en agente permite definir estructuras de comportamiento orientada a objetivos e incorporar el efecto de las interacciones entre agentes y el medio ambiente en el que se desarrollan. Esto es de gran importancia debido a que cada lugar simulado presenta características únicas que definen el proceso de evacuación de la población. La principal dificultad del caso de Iquique consiste en el bajo tiempo esperado de llegada de tsunami. La autoridad considera como parámetro para evaluar los simulacros 20 minutos desde el inicio de un terremoto.

La estructura de toma de decisiones de las personas ha sido definida en base al trabajo desarrollado por Mas et al. (2012). Dicha estructura esta compuesta por 4 etapas: la decisión de evacuar, la elección del punto de encuentro, la elección de la ruta de evacuación y el ajuste de la velocidad. Para el caso de Iquique se ha considerado de gran importancia modelar el impacto de la inclinación de cada vía de evacuación. Además, se ha incluido la congestión en vías de evacuación y la edad de las personas como factores que afectan la velocidad de desplazamiento.

La evacuación de una ciudad debe ser modelada considerando la aleatoriedad propia de ciertos parámetros. La ocurrencia de una emergencia que gatille el inicio de una evacuación puede ocurrir de múltiples formas y en cualquier momento. Por lo tanto, es necesario considerar distintos escenarios posibles para poder generar resultados que no tengan sesgos. El modelo desarrollado considera una aleatoriedad intrínseca en la ubicación de

la población y en el tiempo de respuesta de cada una de ellas. Además, se ha distinguido el escenario diurno del nocturno debido a la significativa diferencia que existe en la distribución geográfica de la población a lo largo de Iquique.

Una restricción importante a la hora de validar un modelo de simulación es la disponibilidad de información o la capacidad de generarla. En el caso abordado hay poca información registrada y no es posible realizar evacuaciones para generar datos para validar debido al alto costo que tiene paralizar una ciudad y a la imposibilidad de recrear las condiciones psicológicas humanas en las que se produce una evacuación por tsunami. Se ha considerado información registrada en simulacros organizados por las autoridades locales para validar el modelo desarrollado. No obstante, es conveniente estudiar formas de mejorar la información disponible para validar modelos de este tipo.

La ciudad de Iquique ha sido dividida en 3 sub-zonas que han sido modeladas de forma independiente. Esto responde al alto costo computacional que tiene simular al gran número de habitantes de Iquique. En total se ha modelado 99.841 personas en el escenario diurno y 80.148 en el escenario nocturno. El primero considera una mayor actividad en las zonas comerciales e industriales, mientras que en el segundo la población está distribuida en zonas residenciales.

Se simuló el proceso de evacuación de Iquique bajo la política de evacuación actual. Se obtuvo como resultado que en el escenario diurno 58,41% de la población logra evacuar a la zona segura dentro de los 20 minutos iniciales, mientras que en el escenario el nocturno el porcentaje asciende a 82,41%. Existen puntos críticos en la ciudad por los que circula mucha gente y que se encuentran a gran distancia de la zona segura. Esto dificulta la evacuación dentro del tiempo esperado de arribo de tsunami. Tal es el caso de zonas como ZOFRI, el puerto y península.

Dado el escaso tiempo antes de la llegada de un tsunami, es importante que la población comience a evacuar lo antes posible. Se ha modelado el tiempo de inicio de evacuación

mediante una distribución Rayleigh de media 3 minutos, lo que responde al tiempo requerido por la autoridad para emitir la alerta. Además, se ha realizado un análisis de sensibilidad para este parámetro con el fin de evaluar el impacto sobre el desempeño en el proceso de evacuación. El tiempo de inicio de evacuación fue reducido a 1 minuto y la diferencia en el desempeño del proceso fue menor a 2% en los 20 minutos iniciales. Por lo tanto, para mejorar significativamente el desempeño de la población durante un proceso de evacuación en Iquique es necesario buscar soluciones adicionales a invertir en disminuir el tiempo de respuesta.

Una opción para mejorar el desempeño de la población es usar infraestructura disponible para evacuar verticalmente a las personas que se encuentren lejos de la zona segura. Esto ayudaría a evacuar principalmente a personas ubicadas en el borde costero y en el puerto de Iquique. La implementación de una política que incorpore evacuación horizontal y vertical fue evaluada mediante el modelo desarrollado. Mediante la política de evacuación mixta el número de personas adicional de personas que logra evacuar dentro de los 20 minutos iniciales en el escenario diurno es de 7.800, mientras que en el escenario nocturno es de 6.400. El mayor impacto es observado en la zona 3 de Iquique debido a la gran concentración de personas en la costa y al alto número de edificios disponibles para evacuar verticalmente.

El mayor riesgo se observa en la zona 1 en el escenario diurno. Esta zona es el principal núcleo de la actividad comercial de Iquique y se estima que en el peor escenario posible el sector ZOFRI puede reunir a 30.000. El porcentaje de la población que logra escapar dentro de los 20 primeros minutos es de 33,79%, lo que se debe a la larga distancia que existe entre ZOFRI y la zona segura. En la zona 1 hay escasa disponibilidad de edificios para evacuar verticalmente. Además, reducir el tiempo de inicio de evacuación permite mejorar el desempeño de la evacuación marginalmente (1% adicional de la población). Por lo tanto, es necesario diseñar una solución que permita mitigar el riesgo existente en la zona.

La construcción de infraestructura para evacuar verticalmente puede ser una opción no adecuada para la zona 1. Esto se debe a que el número de personas que habría que evacuar verticalmente es muy grande, lo que generaría congestión y cuellos de botella. Además, el costo de construir infraestructura con espacio para tal cantidad de personas a una altura segura es muy alto.

Una opción para mitigar el riesgo en la zona 1 es construir un malecón que permita contener o retrasar el ingreso del tsunami a tierra. Jager, Smoor, Tiehatten, and Wester (2015) determinan que la altura mínima requerida de un malecón para contener el tsunami en el peor caso esperado es de 1,7 metros. Los puntos más altos del borde costero de la zona 1 se encuentran a una altura promedio de 4,5 m.s.n.m. y al instalar el malecón ahí se podría contener totalmente el tsunami en el peor caso esperado. En total 29.500 personas adicionales podrían evacuar hacia la zona segura.

En cuanto al trabajo futuro, el caso de estudio de la presente tesis considera únicamente la evacuación de peatones de manera individual. Sin embargo, hay casos no considerados como la evacuación en vehículos. Además, existen instituciones cuya evacuación requiere de un plan particular de evacuación. Tal es el caso de colegios y hospitales, entre otras instituciones. Por lo tanto, queda pendiente desarrollar una caracterización más profunda de la población simulada y de posibles casos alternativos que podrían surgir durante una evacuación.

Otro aspecto pendiente consiste en refinar los datos usados para validar estadísticamente el modelo desarrollado. Se ha usado información recolectada en simulacros para esta labor. No obstante, los simulacros tienen características distintas a las de un proceso de evacuación por amenaza inminente. Actualmente, no existe un sistema encargado de registrar datos durante una evacuación. Luego, aún falta definir los datos que sería conveniente tener para validar y evaluar formas de registrarlos durante una emergencia.

La propuesta de incorporar la evacuación vertical a la política de evacuación actual fue considerada pues permite utilizar infraestructura disponible para mejorar el desempeño de

un proceso de evacuación. La presente tesis no considera el estudio de la factibilidad de usar dicha infraestructura para evacuar a la población. Por lo tanto, es necesario continuar con el estudio técnico correspondiente.

Finalmente, se ha trabajado bajo el supuesto de que solo las personas más cercanas a cada edificio de evacuación vertical optan por evacuar verticalmente. Además, la capacidad de estos edificios nunca es superada. Este supuesto permite que la capacidad para evacuar verticalmente sea aprovechada al máximo. En la práctica las personas podrían preferir evacuar horizontalmente o se podría producir accidentes si la cantidad de personas que optan por evacuar verticalmente es mayor que la capacidad. Luego, es necesario estudiar en detalle los posibles escenarios que se podrían producir. La autoridad debiese hacer los esfuerzos necesarios para educar a la población sobre esta nueva política de evacuación y generar un plan de evacuación que permita mejorar el proceso de evacuación de Iquique.



## BIBLIOGRAFÍA

An, C., Sepúlveda, I., & Liu, P. L.-F. (2014). Tsunami source and its validation of the 2014 iquique, chile, earthquake. *Geophysical Research Letters*, 41(11), 3988–3994.

Bharathy, G. K., & Silverman, B. (2012). Holistically evaluation agent-based social systems models: a case study. *Simulation*, 0037549712446854.

Cienfuegos, R., Suarez, L., Aránguiz, R., Gonzalez, G., González-Carrasco, J., Catalan, P., . . . Tomita, T. (2014). Reassessment of tsunami hazard in the city of iquique, chile, after the pisagua earthquake of april 2014. In *Agu fall meeting abstracts* (Vol. 1, p. 3727).

Dawson, R. J., Peppe, R., & Wang, M. (2011). An agent-based model for risk-based flood incident management. *Natural Hazards*, 59(1), 167-189.

Dechter, R., & Pearl, J. (1985). Generalized best-first search strategies and the optimality of a\*. *Journal of the ACM (JACM)*, 32(3), 505–536.

Fehler, M., Klügl, F., & Puppe, F. (2006). Learning for analysis and calibration in agent-based simulation. *ALAMAS 2006 Proceedings*.

FEMA. (2012, 4). Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis (2nd ed.) [Computer software manual].

Goto, Y., Affan, M., Agussabti, Nurdin, Y., Yuliana, D. K., & Ardiansyah. (2012). Tsunami evacuation simulation for disaster education and city planning. *Journal ref: Journal of Disaster Research*, 7(1), 92–101.

Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on*,

4(2), 100–107.

Hayes, G. P., Herman, M. W., Barnhart, W. D., Furlong, K. P., Riquelme, S., Benz, H. M., ... Samsonov, S. (2014). Continuing megathrust earthquake potential in chile after the 2014 iquique earthquake. *Nature*, 512(7514), 295–298.

Imamura, F., Muhari, A., Mas, E., Pradono, M. H., Post, J., & Sugimoto, M. (2012). Tsunami disaster mitigation by integrating comprehensive countermeasures in padang city, indonesia. *J Disaster Res*, 7(1), 48–64.

INE. (2012). *Comunas: Actualización población 2002-2012 y proyección 2013-2020*. [http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/familias/demograficas\\_vitales.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php). (Fecha de consulta: 18-01-2016)

Jager, T., Smoor, A., Tiehatten, B., & Wester, F. (2015). *Assessment and mitigation proposal in case of major tsunami impact* (Tech. Rep.). TU Delft, Department Hydraulic Engineering.

Klügl, F. (2008). A validation methodology for agent-based simulations. In *Proceedings of the 2008 acm symposium on applied computing* (pp. 39–43).

Klügl, F., & Bazzan, A. L. (2012). Agent-based modeling and simulation. *AI Magazine*, 33(3), 29.

León, J., & March, A. (2015). An urban form response to disaster vulnerability: Improving tsunami evacuation in iquique, chile. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 0265813515597229.

Mas, E., Adriano, B., & Koshimura, S. (2013). An integrated simulation of tsunami hazard and human evacuation in la punta, peru. *Journal of Disaster Research*, 8(2), 285–295.

Mas, E., Suppasri, A., Imamura, F., & Koshimura, S. (2012). Agent-based simulation of

the 2011 great east japan earthquake/tsunami evacuation: An integrated model of tsunami inundation and evacuation. *Journal of Natural Disaster Science*, 34(1), 41–57.

Meister, J. (2007). *Simulation of crowd dynamics with special focus on building evacuations* (Unpublished doctoral dissertation). Master's thesis, Fachhochschule Wedel.

MOP. (2013). Manual de carreteras volumen n° 3: Instrucciones y criterios de diseño [Computer software manual].

Page, S. E. (2005). Agent based models. *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Palgrave MacMillan, New York.

Post, J., Wegscheider, S., Mueck, M., Zosseder, K., Kiefl, R., Steinmetz, T., & Strunz, G. (2009). Assessment of human immediate response capability related to tsunami threats in indonesia at a sub-national scale. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(4), 1075–1086.

Scheer, S., Gardi, A., Guillande, R., Eftichidis, G., Varela, V., De Vanssay, B., ... others (2011). Handbook of tsunami evacuation planning: Schema (scenarios for hazard-induced emergencies management), project n° 030963, specific targeted research project, space priority.

Schurr, B., Asch, G., Hainzl, S., Bedford, J., Hoechner, A., Palo, M., ... others (2014). Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 iquique earthquake. *Nature*.

SECTRA. (2010). *Encuestas de movilidad en centros urbanos*. sintia.sectra.gob.cl. (Fecha de consulta: 18-01-2016)

SERNATUR. (2013). *Seminario turismo municipal: Población flotante año 2013*.

SHOA. (2012). *Memoria explicativa carta de inundación por tsunamis de iquique*.

[http://www.shoa.cl/servicios/citsu/pdf/citsu\\_iquique.pdf](http://www.shoa.cl/servicios/citsu/pdf/citsu_iquique.pdf). (Fecha de consulta: 18/01/2016)

SHOA. (2016). *Tsunamis registrados en la costa de Chile*. [http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/data/tsunamis\\_historico.pdf](http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/data/tsunamis_historico.pdf). (Fecha de consulta: 18-01-2016)

Tobler, W. (1993). Non-isotropic geographic modeling. *Three presentations on geographic analysis and modeling*. Santa Barbara: National Center for Geographic Information and Analysis, University of California.

Tweedie, S. W., Rowland, J. R., Walsh, S. J., Rhoten, R. P., & Hagle, P. I. (1986). A methodology for estimating emergency evacuation times. *The Social Science Journal*, 23(2), 189–204.

Van Blokland, J., De Groot, P., Rot, M., Wieringa, S., & Wijnands, R. (2013). *A multidisciplinary approach to tsunami risk management: A proposal for a framework based on a case study of Iquique* (Tech. Rep.). TU Delft, Departments Hydraulic Engineering-Geoscience & Engineering.

Walker Rousseau, J. M. (2013). Informe técnico de evaluación simulacro macrozona norte de terremoto y tsunami (arica y parinacota, tarapacá, antofagasta y atacama)-8 de agosto de 2013.

Wilensky, U. (1999). {NetLogo}.

ZOFRI. (2015). *Boletín estadístico enero-diciembre 2014*. [http://www.zofri.cl/images/stories/2014/2015/febrero/boletin\\_enero\\_diciembre2014.pdf](http://www.zofri.cl/images/stories/2014/2015/febrero/boletin_enero_diciembre2014.pdf). (Fecha de consulta: 19-01-2016)

**ANEXO**

## A. REGISTRO DE TSUNAMIS EN CHILE

La tabla A.1 muestra un listado de los años en que ha habido tsunamis en Chile y el epicentro y la magnitud del terremoto que los originó.

Tabla A.1. Listado de Terremotos que Originaron Tsunamis

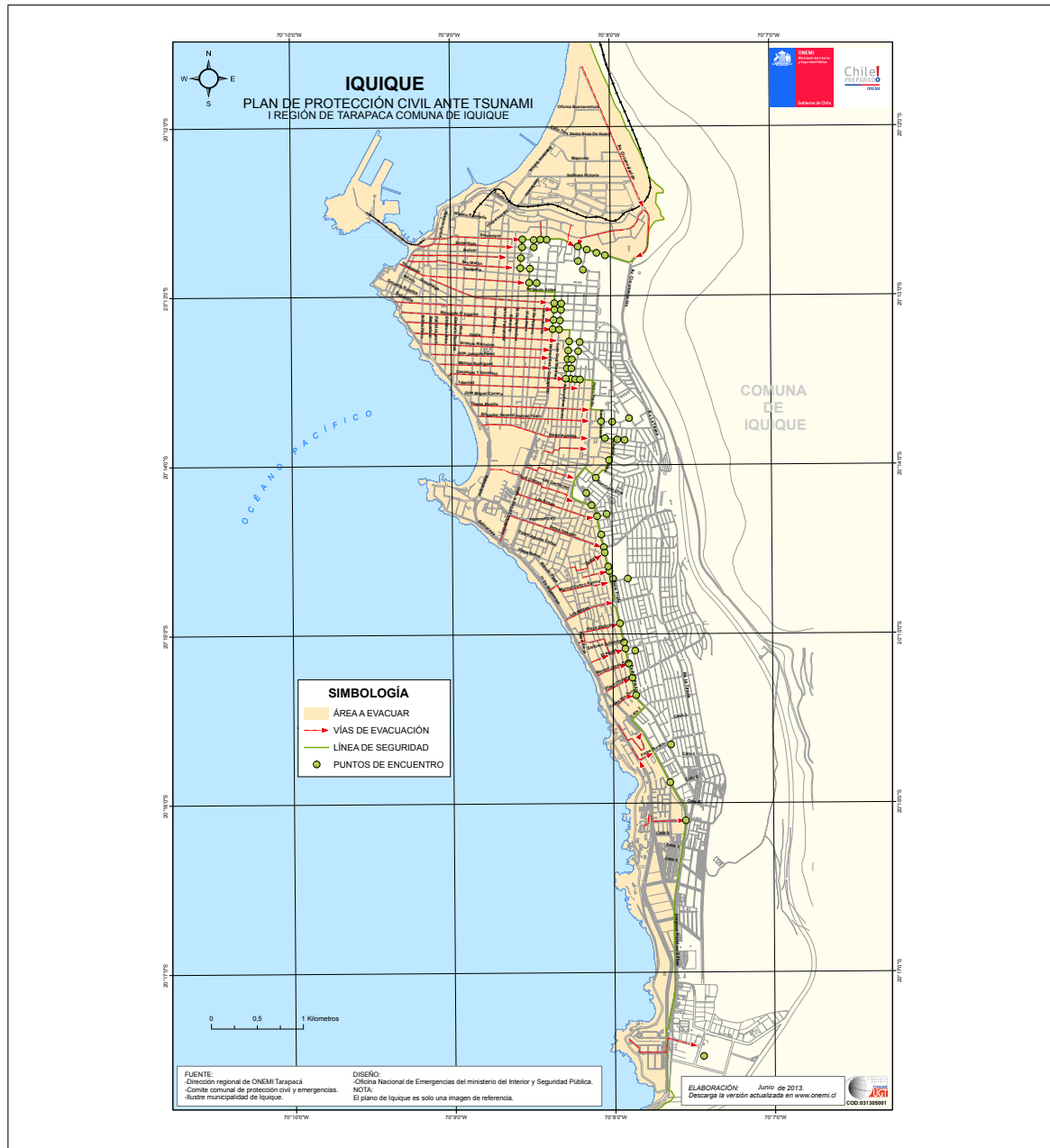
| Año  | Epicentro            | Magnitud ( $M_S$ ) |
|------|----------------------|--------------------|
| 1562 | Zona Central         | -                  |
| 1570 | Concepción           | 8-8,5              |
| 1575 | Valdivia             | 8.50               |
| 1604 | Arica                | 8.7                |
| 1647 | Santiago             | 8.5                |
| 1657 | Concepción           | 8.0                |
| 1730 | Valparaíso           | 8.7                |
| 1751 | Concepción           | 8.5                |
| 1819 | Copiapó              | 8.5                |
| 1822 | Valparaiso           | 8.3                |
| 1835 | Quiriquina           | 8-8.2              |
| 1837 | Ancud                | >8.0               |
| 1849 | Coquimbo             | 7.5                |
| 1851 | Huasco               | 7-7.5              |
| 1859 | Copiapó              | 7.5-7.7            |
| 1868 | Norte de Chile       | 8.8                |
| 1877 | Norte de Chile       | 8.8                |
| 1906 | Valparaiso           | 8.3                |
| 1918 | Copiapó              | 7.6                |
| 1922 | Provincia de Atacama | 8.4                |
| 1928 | Talca y Constitucion | 7.9                |
| 1943 | Illapel              | 8.1                |
| 1960 | Valdivia             | 9.5                |
| 1966 | Taltal               | 7.8                |
| 1985 | Valparaiso           | 8.0                |
| 1995 | Antofogasta          | 8.0                |
| 2010 | Concepción           | 8.8                |
| 2015 | Illapel              | 8.3                |

Fuente: SHOA (SHOA, 2016). Disponible en:

<http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/data/tsunamis-historico.pdf>



## C. VÍAS DE EVACUACIÓN Y PUNTOS DE ENCUENTRO DE IQUIQUE



Fuente: ONEMI. Disponible en:

<http://www.onemi.cl/sites/default/files/iquique.pdf>

## D. INCLINACIÓN Y ANCHO DE VÍAS DE EVACUACIÓN

En esta sección se presenta la inclinación de las distintas vías de evacuación de Iquique para rangos de altura sobre el nivel del mar. Estos rangos fueron obtenidos a partir de mapas de cotas de altura *GIS* provistos por CIGIDEN.

| Almirante Latorre          |                              |               |             |           |
|----------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [10-15)                    | Patricio Lynch               | 350           | 1,4%        | 10        |
| [15-20)                    | Barros Arana                 | 170           | 2,9%        | 12        |
| [20-25)                    | Juan Martínez                | 140           | 3,6%        | 15        |
| [25-30)                    | Arturo Fernández             | 238           | 2,1%        | 15        |
| [30-35)                    | Veintiuno de Mayo            | 183           | 2,7%        | 15        |

| Bernardo O'Higgins         |                              |               |             |           |
|----------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                     | Arturo Prat Chacón           | 500           | 1,0%        | 12        |
| [10-15)                    | Obispo Labbé                 | 294           | 1,7%        | 15        |
| [15-20)                    | Barros Arana                 | 217           | 2,3%        | 12        |
| [20-25)                    | Juan Martínez                | 220           | 2,3%        | 15        |
| [25-30)                    | Dieciocho de Septiembre      | 238           | 2,1%        | 12        |
| [30-35)                    | Veintiuno de Mayo            | 161           | 3,1%        | 12        |

| Brigader General Hernán Fuentes |                              |               |             |           |
|---------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura s.n.m. (m)      | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                          | Arturo Pratt Chacón          | 320           | 1,6%        | 15        |
| [10-15)                         | Labatut                      | 332           | 1,5%        | 12        |
| [15-20)                         | Cabo Pablo Silva Pizarro     | 150           | 3,3%        | 12        |
| [20-25)                         | Luis Cruz Martínez           | 163           | 3,1%        | 12        |
| [25-30)                         | Lincoyan                     | 212           | 2,4%        | 12        |
| [30-35)                         | Pedro Prado                  | 158           | 3,2%        | 12        |

| Céspedes y González           |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Arturo Prat Chacón           | 155           | 3,2%        | 15        |
| [10-15)                       | Vivar                        | 428           | 1,2%        | 15        |
| [15-20)                       | Juan Martínez                | 236           | 2,1%        | 15        |
| [20-25)                       | 18 de Septiembre             | 224           | 2,2%        | 15        |
| [25-30)                       | Oscar Bonilla                | 110           | 4,5%        | 12        |
| [30-35)                       | Luis Cruz Martínez           | 285           | 1,8%        | 12        |

| Circunvalación                |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Arturo Prat Chacón           | 1.260         | 0,4%        | 20        |
| [10-15)                       | Alejandro                    | 334           | 1,5%        | 20        |
| [15-20)                       | Luis Jaspard                 | 129           | 3,9%        | 20        |
| [20-35)                       | -                            | 224           | 6,7%        | 20        |

| Diego Portales                |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Arturo Pratt Chacón          | 285           | 1,8%        | 25        |
| [10-15)                       | 18 de Septiembre             | 382           | 1,3%        | 25        |
| [15-20)                       | Luis Cruz Martínez           | 194           | 2,6%        | 15        |
| [20-25)                       | Lincuyan                     | 157           | 3,2%        | 12        |
| [25-30)                       | Galvarino                    | 160           | 3,1%        | 15        |
| [30-35)                       | Pasaje Uno                   | 80            | 6,3%        | 12        |

| Doce de Febrero               |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [10-15)                       | Iquitados                    | 60            | 8,3%        | 5         |
| [15-20)                       | Ferrocarril                  | 90            | 5,6%        | 15        |
| [20-25)                       | El Riel                      | 43            | 11,6%       | 15        |
| [25-30)                       | Moisés González              | 57            | 8,8%        | 15        |
| [30-35)                       | Cantera                      | 200           | 2,5%        | 15        |

| Ernesto Riquelme              |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Arturo Pratt Chacón          | 282           | 1,8%        | 12        |
| [10-15)                       | Obispo Labbé                 | 298           | 1,7%        | 12        |
| [15-20)                       | Barros Arana                 | 393           | 1,3%        | 12        |
| [20-25)                       | Errázuriz                    | 393           | 1,3%        | 15        |
| [25-30)                       | Doce de Febrero              | 297           | 1,7%        | 12        |
| [30-35)                       | Luis Cruz Martínez           | 156           | 3,2%        | 10        |

| Esmeralda                     |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Patricio Lynch               | 99            | 5,1%        | 12        |
| [10-15)                       | Obispo Labbé                 | 188           | 2,7%        | 20        |
| [15-20)                       | Vivar                        | 138           | 3,6%        | 12        |
| [20-25)                       | Barros Arana                 | 184           | 2,7%        | 12        |
| [25-30)                       | Juan Martinez                | 184           | 2,7%        | 15        |
| [30-35)                       | Errázuriz                    | 111           | 4,5%        | 12        |

| José Joaquín Pérez            |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Baquedano                    | 270           | 1,9%        | 20        |
| [10-15)                       | Obispo Labbé                 | 386           | 1,3%        | 12        |
| [15-20)                       | Amunategui                   | 305           | 1,6%        | 15        |
| [20-25)                       | Errazuriz                    | 393           | 1,3%        | 15        |
| [25-30)                       | Chacabuco                    | 232           | 2,2%        | 15        |
| [30-35)                       | Luis Cruz Martínez           | 170           | 2,9%        | 10        |

| Las Achiras                   |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [10-15)                       | Los Lirios                   | 287           | 1,7%        | 15        |
| [15-20)                       | Las Amapolas                 | 75            | 6,7%        | 15        |
| [20-25)                       | Las Bugambilias              | 91            | 5,5%        | 12        |
| [25-30)                       | Genaro Gallo                 | 92            | 5,4%        | 12        |
| [30-35)                       | Los Nevados                  | 123           | 4,1%        | 12        |

| Las Rosas                     |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [10-15)                       | Héroes de la Concepción      | 227           | 2,2%        | 15        |
| [15-20)                       | Luis Emilio Recabarren       | 119           | 4,2%        | 20        |
| [20-25)                       | Las Amapolas                 | 150           | 3,3%        | 20        |
| [25-30)                       | Genaro Gallo                 | 114           | 4,4%        | 20        |
| [30-35)                       | Las Nevadas                  | 259           | 1,9%        | 20        |

| Los Lilenes                   |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [10-15)                       | Héroes de la Concepción      | 227           | 2,2%        | 12        |
| [15-20)                       | Luis Emilio Recabarren       | 108           | 4,6%        | 20        |
| [20-25)                       | Las Amapolas                 | 63            | 7,9%        | 12        |
| [25-30)                       | Las Bugambilias              | 102           | 4,9%        | 12        |
| [30-35)                       | Genaro Gallo                 | 115           | 4,3%        | 12        |

| Libertad                      |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Vivar                        | 200           | 2,5%        | 15        |
| [10-15)                       | Barros Arana                 | 344           | 1,5%        | 15        |
| [15-20)                       | Arturo Fernández             | 216           | 2,3%        | 12        |
| [20-25)                       | Veintiuno de Mayo            | 166           | 3,0%        | 12        |
| [25-30)                       | Oscar Bonilla                | 113           | 4,4%        | 15        |
| [30-35)                       | Héroes de la Concepción      | 282           | 1,8%        | 12        |

| Luis Jaspard                  |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [15-20)                       | Luis Jaspard                 | 600           | 0,8%        | 15        |
| [20-25)                       | La Cantera                   | 90            | 5,6%        | 12        |
| [25-30)                       | Ejército                     | 60            | 8,3%        | 12        |
| [30-35)                       | Kennedy                      | 60            | 8,3%        | 20        |

| Manuel Bulnes                 |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Arturo Prat Chacón           | 450           | 1,1%        | 15        |
| [10-15)                       | Obispo Labbé                 | 194           | 2,6%        | 15        |
| [15-20)                       | Barros Arana                 | 217           | 2,3%        | 12        |
| [20-25)                       | Arturo Fernández             | 170           | 2,9%        | 12        |
| [25-30)                       | Veintiuno de Mayo            | 175           | 2,9%        | 15        |
| [30-35)                       | Oscar Bonilla                | 240           | 2,1%        | 15        |

| Manuel Rodríguez              |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Arturo Pratt Chacón          | 183           | 2,7%        | 15        |
| [10-15)                       | Eleuterio Ramirez            | 406           | 1,2%        | 12        |
| [15-20)                       | Juan Martinez                | 253           | 2,0%        | 12        |
| [20-25)                       | Dieciocho de Septiembre      | 227           | 2,2%        | 12        |
| [25-30)                       | Chacabuco                    | 234           | 2,1%        | 15        |
| [30-35)                       | Luis Cruz Martinez           | 215           | 2,3%        | 15        |

| Orella                        |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Arturo Prat Chacón           | 305           | 1,6%        | 15        |
| [10-15)                       | Obispo Labbé                 | 358           | 1,4%        | 15        |
| [15-20)                       | Barros Arana                 | 338           | 1,5%        | 15        |
| [20-25)                       | Arturo Fernández             | 227           | 2,2%        | 15        |
| [25-30)                       | Veintiuno de Mayo            | 176           | 2,8%        | 15        |
| [30-35)                       | Oscar Bonilla                | 238           | 2,1%        | 15        |

| Pastor Lorenzo Pérez          |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [10-15)                       | Los Jazminez                 | 193           | 2,6%        | 12        |
| [15-20)                       | Las Violetas                 | 160           | 3,1%        | 15        |
| [20-25)                       | Genaro Gallo                 | 143           | 3,5%        | 15        |
| [25-30)                       | Pasaje Dos                   | 127           | 3,9%        | 10        |
| [30-35)                       | Doce Oriente                 | 192           | 2,6%        | 12        |

| San Martín                    |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Arturo Prat Chacón           | 402           | 1,2%        | 15        |
| [10-15)                       | Obispo Labbé                 | 183           | 2,7%        | 20        |
| [15-20)                       | Vivar                        | 191           | 2,6%        | 10        |
| [20-25)                       | Amunategui                   | 191           | 2,6%        | 12        |
| [25-30)                       | Juan Martínez                | 110           | 4,5%        | 12        |
| [30-35)                       | Errázuriz                    | 145           | 3,4%        | 12        |

| Serrano                       |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Arturo Prat Chacón           | 333           | 1,5%        | 12        |
| [10-15)                       | Patricio Lynch               | 303           | 1,7%        | 12        |
| [15-20)                       | Vivar                        | 237           | 2,1%        | 15        |
| [20-25)                       | Amunategui                   | 142           | 3,5%        | 12        |
| [25-30)                       | Juan Martínez                | 229           | 2,2%        | 12        |
| [30-35)                       | Errázuriz                    | 229           | 2,2%        | 12        |

| Sotomayor                     |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Patricio Lynch               | 216           | 2,3%        | 12        |
| [10-15)                       | Eleuterio Ramírez            | 180           | 2,8%        | 15        |
| [15-20)                       | Vivar                        | 170           | 2,9%        | 15        |
| [20-25)                       | Amunategui                   | 136           | 3,7%        | 12        |
| [25-30)                       | Juan Martínez                | 120           | 4,2%        | 12        |
| [30-35)                       | Los Capitanes                | 108           | 4,6%        | 12        |

| Tadeo Haenke                  |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Los Rieles                   | 442           | 1,1%        | 25        |
| [10-15)                       | Teniente Raúl Mariotti       | 402           | 1,2%        | 20        |
| [15-20)                       | Las Bugambilias              | 255           | 2,0%        | 20        |
| [20-25)                       | Capitán Pedro González       | 187           | 2,7%        | 20        |
| [25-30)                       | Pedro Gamboni                | 159           | 3,1%        | 20        |
| [30-35)                       | Armada de Chile              | 152           | 3,3%        | 20        |

| Thompson                      |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Arturo Prat Chacón           | 139           | 3,6%        | 10        |
| [10-15)                       | Pedro Lagos                  | 510           | 1,0%        | 25        |
| [15-20)                       | Vivar                        | 230           | 2,2%        | 12        |
| [20-25)                       | Amunategui                   | 235           | 2,1%        | 12        |
| [25-30)                       | Arturo Fernández             | 122           | 4,1%        | 15        |
| [30-35)                       | Dieciocho de Septiembre      | 130           | 3,8%        | 15        |

| Tomás Bonilla                 |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Arturo Prat Chacón           | 195           | 2,6%        | 15        |
| [10-15)                       | Juan Martínez                | 375           | 1,3%        | 12        |
| [15-20)                       | 21 de Mayo                   | 226           | 2,2%        | 12        |
| [20-25)                       | Héroes de la Concepción      | 113           | 4,4%        | 12        |
| [25-30)                       | Los Héroes                   | 188           | 2,7%        | 12        |
| [30-35)                       | Genaro Gallo                 | 164           | 3,0%        | 12        |

| Vicente Zegers                |                              |               |             |           |
|-------------------------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------|
| Rango de Altura<br>s.n.m. (m) | Intersección a Menor Altitud | Distancia (m) | Inclinación | Ancho (m) |
| [5-10)                        | Pedro Lagos                  | 492           | 1,0%        | 12        |
| [10-15)                       | Obispo Labbé                 | 303           | 1,7%        | 12        |
| [15-20)                       | Barros Arana                 | 226           | 2,2%        | 12        |
| [20-25)                       | Juan Martinez                | 173           | 2,9%        | 12        |
| [25-30)                       | Errázuriz                    | 172           | 2,9%        | 12        |
| [30-35)                       | Veintiuno de Mayo            | 183           | 2,7%        | 15        |

## E. CAPACIDAD DE EDIFICIOS DE EVACUACIÓN

Tabla E.1. Capacidad de Edificios de Evacuación

| Id Edificio | Dirección                       | Capacidad (personas) |
|-------------|---------------------------------|----------------------|
| Z1E1        | Patricio Lynch 91               | 450                  |
| Z1E2        | Patricio Lynch 60               | 200                  |
| Z2E1        | Esmeralda 528                   | 600                  |
| Z2E2        | Arturo Prat Chacón 353          | 700                  |
| Z2E3        | Bolívar 202                     | 400                  |
| Z2E4        | San Martín 255                  | 400                  |
| Z2E5        | Serrano 145                     | 300                  |
| Z2E6        | Costanera 960 Torre A           | 350                  |
| Z2E7        | Costanera 960 Torre B           | 350                  |
| Z2E8        | Esmeralda 340                   | 200                  |
| Z2E9        | Arturo Prat 1199                | 200                  |
| Z2E10       | Bernardo O'Higgins 195          | 700                  |
| Z2E11       | Arturo Prat Chacón 1497         | 300                  |
| Z2E12       | Arturo Prat Chacón 430          | 650                  |
| Z2E13       | Manuel Rodríguez 540            | 350                  |
| Z3E1        | Arturo Prat Chacón 889          | 450                  |
| Z3E2        | Amunategui 2130                 | 400                  |
| Z3E3        | Amunategui 2090                 | 650                  |
| Z3E4        | Arturo Prat 1060                | 450                  |
| Z3E5        | Diego Portales 920              | 450                  |
| Z3E6        | Arturo Prat Chacón 2272 Torre B | 1.000                |
| Z3E7        | Arturo Prat Chacón 2272 Torre A | 1.000                |
| Z3E8        | Héroes de la Concepción 2462    | 550                  |
| Z3E9        | Héroes de la Concepción 2464    | 550                  |
| Z3E10       | Arturo Prat Chacón 2740         | 450                  |
| Z3E11       | Arturo Prat Chacón 2748         | 400                  |
| Z3E12       | Héroes de la Concepción 2784    | 700                  |
| Z3E13       | Filomena Valenzuela 395         | 700                  |
| Z3E14       | Filomena Valenzuela 770         | 600                  |
| Z3E15       | Pasaje Manuel Matta 2757        | 1.000                |

## F. POBLACIÓN DISTRIBUIDA EN ESCENARIO DIURNO

Tabla F.1. Población Distribuida en Escenario Diurno

| Zona Encuesta Origen Destino | Población Diurna |
|------------------------------|------------------|
| Zona 1                       | 5.000            |
| Zona 2                       | 10.000           |
| Zona 3                       | 15.000           |
| Zona 4                       | 10.490           |
| Zona 5                       | 3.369            |
| Zona 6                       | 705              |
| Zona 7                       | 200              |
| Zona 8                       | 1.760            |
| Zona 9                       | 3.612            |
| Zona 10                      | 2.851            |
| Zona 11                      | 3.187            |
| Zona 12                      | 5.353            |
| Zona 13                      | 4.641            |
| Zona 14                      | 1.833            |
| Zona 15                      | 378              |
| Zona 16                      | 3.821            |
| Zona 17                      | 4.421            |
| Zona 18                      | 5.437            |
| Zona 19                      | 5.321            |
| Zona 20                      | 6.780            |
| Zona 21                      | 777              |
| Zona 23                      | 2.775            |
| Zona 24                      | 3.098            |
| Zona 25                      | 5.147            |
| Zona 26                      | 6.437            |
| Zona 28                      | 6.781            |
| Zona 29                      | 6.781            |
| Zona 30                      | 147              |
| Zona 31                      | 1.315            |

## G. POBLACIÓN DISTRIBUIDA EN ESCENARIO NOCTURNO

Tabla G.1. Población Distribuida en Escenario Nocturno

| Distrito | Zona | Población Nocturna |
|----------|------|--------------------|
| 1        | 1    | 2.065              |
| 1        | 2    | 1.033              |
| 2        | 1    | 1.109              |
| 2        | 3    | 2.714              |
| 2        | 4    | 2.205              |
| 2        | 5    | 4.624              |
| 3        | 1    | 2.136              |
| 3        | 2    | 3.187              |
| 3        | 3    | 5.087              |
| 3        | 4    | 3.518              |
| 4        | 1    | 1.776              |
| 4        | 2    | 2.653              |
| 4        | 3    | 3.877              |
| 4        | 4    | 4.865              |
| 4        | 5    | 3.890              |
| 4        | 6    | 2.674              |
| 5        | 1    | 720                |
| 5        | 2    | 830                |
| 6        | 1    | 5.873              |
| 6        | 2    | 4.553              |
| 6        | 3    | 5.185              |
| 7        | 1    | 2.088              |
| 7        | 2    | 2.743              |
| 7        | 3    | 3.477              |
| 7        | 4    | 2.022              |
| 8        | 1    | 4.077              |
| 8        | 2    | 2.680              |
| 8        | 3    | 2.069              |
| 8        | 4    | 1.647              |
| 10       | 1    | 2.638              |
| 10       | 2    | 4.222              |
| 10       | 3    | 4.397              |
| 10       | 4    | 3.559              |
| 10       | 5    | 4.894              |
| 10       | 6    | 3.344              |
| 11       | 1    | 3.369              |