

ANÁLISIS DE TIEMPOS DE ARRIBO E INFRAESTRUCTURA CRÍTICA FRENTE A TSUNAMI EN LA COMUNA DE CORRAL

Carla Liguempi A¹, Rafael Aránguiz M², Mauricio Villagrán V³

RESUMEN

Las comunidades costeras en Chile se han visto impactadas por un gran número de terremotos, producto de que se enfrentan a una zona de subducción de gran longitud. En esta investigación, se desarrolló una simulación numérica con diferentes escenarios, con el objetivo de analizar los tiempos de arribo de tsunamis e infraestructura crítica en la Comuna de Corral. Además, se aplicó un instrumento de evaluación de vías de evacuación, el cual permitió identificar los principales peligros, condiciones de accesibilidad, capacidad de las vías y los tiempos de evacuación de los habitantes, para así contrarrestarlo con mapas comunitarios e identificar la percepción de las zonas con peligro a inundación.

PALABRAS CLAVES: Infraestructura crítica, tiempos de arribo, tsunamis, tiempos de evacuación, resiliencia.

ABSTRACT

Coastal communities in Chile have been impacted by a large number of earthquakes, due to the fact that they face a long subduction zone. In this research, a numerical simulation was developed with different scenarios, with the objective of analyzing tsunami arrival times and critical infrastructure in the Commune of Corral. In addition, an evacuation route evaluation instrument was applied, in order to identify the main dangers, accessibility conditions, road capacity and evacuation times of the inhabitants, in order to counteract it with community maps and identify the perception of the flood-prone areas.

KEYWORDS: Critical infrastructure, arrival times, tsunamis, evacuation times, resilience.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, cliquempi@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, ranguiz@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, mvillagran@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La reciente catástrofe que afectó las costas del sudeste asiático evidenció el elevado costo que significa no estar preparados ante la ocurrencia de un tsunami (Marris, 2005). Actualmente, existen muy pocos registros escritos que permitan caracterizar detalladamente el comportamiento de estos eventos en áreas costeras específicas. En contexto, surge la importancia de estudiar tsunamis pasados como indicadores de lo que puede ocurrir en el futuro, generando información base para el estudio del riesgo, el ordenamiento de territorios costeros, el diseño de medidas de mitigación y el manejo de la emergencia (Lagos & Gutiérrez, 2005).

Los modelos de inundación por tsunami son un aspecto integral para la planificación y estudios de riesgo en las zonas costeras, además la delimitación de áreas de inundación se debería traducir en información crítica al momento de definir potenciales usos de suelo, vías de evacuación y localización de zonas de seguridad (Lagos & Gutiérrez, 2005). Sin embargo, en Chile este tema es complejo, debido a que se localiza frente a las costas de América del Sur, y es uno de los principales sectores generadores de tsunami en el Océano Pacífico, ya que se enfrenta a una zona de subducción de unos 4.500 kilómetros de longitud (Lagos & Cisternas, 2008).

En consecuencia, las comunidades costeras de Chile se enfrentan a diferentes amenazas debido a los desastres. Por lo tanto, la preparación para desastres ha recibido una alta prioridad en los últimos años, debido a que su implementación exitosa puede potencialmente minimizar el daño a la propiedad, pérdida de vidas y reducir la interrupción de la economía local y nacional. Por otro lado, diversos autores proponen realizar ejercicios de mapeo comunitario con el fin de analizar el nivel de conciencia entre los residentes de las localidades costeras (Cubelos et al., 2019).

Esta herramienta permite obtener información de las áreas propensas a inundación para luego contrarrestarla con mapas de inundación. Es por ello, que se hace necesario analizar tales eventos, debido a que permiten identificar claramente los problemas que subyacen en áreas específicas de las comunidades (Cubelos et al., 2019).

El objetivo del presente artículo es analizar los tiempos de arribo e infraestructura crítica en la comuna de Corral mediante mapas con niveles de inundación, obtenidos a partir de simulación numérica. Además, se considera la aplicación de un instrumento de evaluación de vías de evacuación, el cual permite evaluar el tiempo que les toma a los peatones en llegar hasta la zona segura y analizar los riesgos a lo largo de la ruta, esto

con la finalidad de realizar una comparación con los tiempos de arribo de la primera onda y la percepción de las zonas propensas a inundaciones mediante mapas comunitarios.

2. METODOLOGÍA

2.1. Instrumento para evaluar vías de evacuación

La aplicación del instrumento para evaluar vías de evacuación se enfoca en un método basado en la identificación de KPI (Key Performance Indicator) y consiste en identificar factores de riesgo al evaluar una determinada vía de evacuación de tsunami en la comuna de Corral. Esta se divide en tres categorías:

- **KPI 1:** Riesgos asociados a la vía de evacuación.
- **KPI 2:** Condiciones de accesibilidad asociada a la vía de evacuación.
- **KPI 3:** Tiempo de evacuación a lo largo de la vía.

Los KPI se evalúan de manera independiente, de tal manera de entregar información asociada al impacto de cada tramo de la vía de evacuación. Por lo tanto, en la Tabla 2.1 se muestra la identificación de los KPI según los tramos a evaluar.

Tabla 2.1

Identificación de los KPI, según los tramos a evaluar.

Clasificación de KPI	
Tramo hasta el límite de inundación histórica	Tramo hasta llegar al punto de encuentro
KPI1.A	KPI1.B
KPI2.A	KPI2.B
KPI3.A	KPI3.B

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

Los KPI 1 y KPI 2 están elaborados por diferentes criterios, la evaluación se realiza a través de la asignación de un determinado puntaje a partir del rango de riesgo evaluado en la aplicación de este instrumento, siendo de 0 a 3 (0 para la no existencia de riesgo y 3 para el nivel de riesgo más alto).

2.1.1. Riesgos asociados a las vías de evacuación (KPI 1)

En la Tabla 2.2 se muestran los criterios correspondientes al KPI 1, estos son independientes del tsunami y se le asigna un determinado puntaje a partir de lo analizado en terreno.

Tabla 2.2

Riesgos asociados a las vías de evacuación de tsunami.

Criterio	No existe (0 pts)	Bajo (1 pts)	Medio (2 pts)	Alto (3 pts)
- Existencia de puentes.	No existe presencia de puente.	Existe un puente en la vía de evacuación.	Existen dos puentes en la vía de evacuación.	Existen tres o más puentes en la vía.
- Distancia a fuentes de agua.	Mayor a 300 metros de la vía de evacuación.	Entre 299 y 100 metros de la vía de evacuación.	Entre 99 y 44 metros de la vía de evacuación.	Menor a 40 metros de la vía de evacuación.
- Elementos que pudieran bloquear total o parcialmente la vía de evacuación.	No existen elementos que pudieran bloquear la vía.	Existen edificios abandonados.	Existen torres de transmisión de alta tensión.	Existen taludes que pueden provocar derrumbes.
- Vías de alta velocidad o avenidas principales a cruzar.	Sin carreteras y avenidas de alta velocidad.	Avenida principal sin barreras.	Carretera o avenida principal con barreras centrales.	Carretera con barreras centrales y laterales.
- Cruce con línea férrea.	No existe cruce de línea férrea.	Cruce de línea férrea con vehículos.	Cruce de línea férrea con paso de peatones.	Cruce de línea férrea con barreras.
- Distancia a materiales peligrosos.	Mayor a 800 metros.	Entre 800 y 300 metros.	Entre 300 y 50 metros.	Menor a 50 metros.

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

2.1.2. Condiciones de accesibilidad asociada a la vía de evacuación (KPI 2)

En la Tabla 2.3 se muestran los criterios asociados al KPI 2, estos se basan en las consideraciones mínimas establecidas por la guía de referencia para sistemas de evacuación comunales por tsunami (MINVU, 2017).

Tabla 2.3

Condiciones de accesibilidad asociada a la vía de evacuación de tsunami.

Criterio	No existe (0 pts)	Bajo (1 pts)	Medio (2 pts)	Alto (3 pts)
- Farolas autónomas.	En más del 75% del recorrido.	Entre el 75% y el 25% del recorrido.	En menos del 25% del recorrido.	No existe en el recorrido.
- Señales de evacuación de tsunami.	Varias señales a lo largo de la vía con	Una señal con indicación de distancia y	Un signo general.	Sin señales de evacuación de tsunami.

	distancia y dirección.	dirección a evacuar.		
- Existencia de comercio ambulante.	No hay comercio ambulante en la vía de evacuación.	Hay comercio ambulante a lo largo de las calles que cruzan la vía de evacuación.	Hay comercio ambulante a lo largo de la vía de evacuación.	Hay comercio ambulante a lo largo de la vía de evacuación y en las calles transversales.
- Vehículos estacionados a lo largo de la vía de evacuación.	La vía de evacuación es solo para peatones.	Hay señales de prohibición de estacionar en la vía.	Prohibición de estacionar, durante los días laborales.	No cuenta con prohibición de estacionar.
- Desniveles a lo largo de la vía de evacuación.	Menos de 13 centímetros.	Entre 13 y 27 centímetros.	Entre 27 y 89 centímetros.	Mayor a 90 centímetros.

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

2.1.3. Tiempo de evacuación (KPI 3)

El KPI 3 corresponde al tiempo que demora una persona al evacuar por la vía, este se determina a través de la información propuesta por la guía de referencia para sistemas de evacuación (MINVU, 2017), la cual expresa una ecuación basada en el cálculo de la capacidad de evacuación de la vía en función del tiempo (Ecuación 1). Sin embargo, se considera la densidad del flujo de peatones, la cual corresponde a la cantidad de personas que se desplazan en un metro cuadrado conforme a lo que señala el Manual de Vialidad Urbana (MINVU, 2009), y para efecto de este análisis se utiliza un criterio conservador de 0,60 personas por metro cuadrado en función de la densidad media (MINVU, 2017).

$$T =: \frac{N}{V_f \cdot b \cdot D} + \frac{L}{V_f} \quad (1)$$

Donde:

- T : Tiempo necesario para la evacuación [s];
- N : Número de personas a evacuar [personas];
- L : Distancia a recorrer hasta el límite de inundación [m];
- V_f : Velocidad de flujo de peatones [m/s];
- b : Ancho de la vía de evacuación [m];
- D : Densidad de flujo [personas/m²];

La velocidad de flujo de peatones se calcula mediante la Ecuación 2, la cual fue propuesta por (Tobler, 1993), esta depende de la cobertura del suelo y los valores de

conservación de velocidad o SVC (Wood & Schmidtlein, 2012), que representan el costo energético relativo que implica moverse a través de diferentes tipos de terrenos (MINVU, 2017).

$$V_f = : SVC \cdot 1,81 \cdot e^{(-3,5 \cdot |m+0,05|)} \quad (2)$$

Donde:

- V_f : Velocidad de flujo de peatones [m/s];
- m : Pendiente del terreno [dh/dx];
- SVC : Valor de conservación de velocidad [adimensional];

Por otro lado, para determinar el número de personas a evacuar por la vía de evacuación, se utiliza la información entregada por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), el cual tiene a disposición de los usuarios información por manzana con respecto a la cantidad de habitantes de la comuna de Corral, por lo tanto, se estima una proporción de habitantes pertenecientes a la comuna que tomaran la vía de evacuación como ruta de escape.

2.1.3.1. Rangos de riesgo para el KPI3.A

El KPI3.A corresponde al tramo hasta el límite de inundación histórica y para la asignación de puntaje se evalúan los sectores inundables mediante simulaciones numéricas. En la Tabla 2.4 se muestra la puntuación establecida, teniendo como base en el primer rango los factores de sistema de alerta cuidada de la ONEMI, donde la persona decide evacuar a los 3 minutos.

El segundo rango, se basa en el enfoque de evacuación el cual corresponde a un escenario donde toda la población de estudio comienza a evacuar en cierta cantidad de minutos después de ocurrida la advertencia, es por esta razón que este criterio se evalúa con los 3 minutos que tarda la ONEMI en dar la alerta para evacuar y los 5 minutos que corresponde al tiempo límite (Mas et al., 2012).

El tercer rango corresponde al tiempo de arribo de la primera onda, por lo tanto, se realiza una simulación numérica de tsunami en la comuna de Corral, y se evaluó a partir de los 5 minutos propuestos por Mas et al., (2012) y los 20 minutos obtenidos mediante la simulación.

Tabla 2.4*Rangos de riesgo para el KPI3.A*

KPI	Indicador	No existe (0 ptos)	Bajo (1 ptos)	Medio (2 ptos)	Alto (3 ptos)
KPI3.A	Minutos	La evacuación hasta el límite de inundación histórica está entre los 0 y 3 minutos.	La evacuación hasta el límite de inundación histórica se encuentra entre los 3 y 5 minutos.	La evacuación hasta el límite de inundación histórico se encuentra entre el tiempo de arribo de la primera onda del caso más desfavorable de la simulación numérica, el cual corresponde a los 5 y 20 minutos.	La evacuación hasta el límite de inundación histórica es mayor al tiempo de arribo de la onda más desfavorable para la comuna de Corral.

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

2.1.3.2. Rangos de riesgos para el KPI3.B

El KPI3.B corresponde al tramo hasta el punto de encuentro o zona segura (Tabla 2.5), por lo tanto, para establecer la puntuación del primer rango se consideró lo establecido por el INDECI, (2015) el cual indica que el tiempo de evacuación para zonas identificadas con alto peligro a inundación no debe exceder los 10 minutos en promedio para evacuar. El segundo rango, se basa en lo establecido por el MINVU, (2017), el cual indica si la población de cada subárea a evacuar es capaz de llegar desde la zona de amenaza hasta el punto de encuentro en un periodo de tiempo igual o menor a 15 minutos.

Por otro lado, se establecen los rangos más desfavorables para los criterios restantes, donde se evaluó el tiempo de arribo a partir de la simulación numérica y se establece un tiempo de 20 minutos hasta el punto de encuentro y los 15 minutos indicados por el MINVU, (2017).

Tabla 2.5

Rangos de riesgo para el KPI3.B

KPI	Indicador	No existe (0 pts)	Bajo (1 pts)	Medio (2 pts)	Alto (3 pts)
KPI3.B	Minutos	La evacuación hasta el punto de encuentro, es menor a 10 minutos.	La evacuación hasta el punto de encuentro, está entre los 10 a 15 minutos.	La evacuación hasta el punto de encuentro se encuentra entre los 25 minutos del tiempo de arribo del tsunami y los 15 minutos establecidos por la Onemi.	La evacuación hasta el punto de encuentro es mayor a los 20 minutos de tiempo de arribo del tsunami en la comuna de Corral.

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

2.1.3.3. Capacidad de evacuación de las vías

Se determina la capacidad de evacuación de las tres vías seleccionadas, y se considera si la población de cada subárea es capaz de llegar desde la zona de amenaza hasta el punto de encuentro en un periodo igual o menor a 15 minutos. Por lo tanto, se calcula el tiempo necesario para que una persona sea capaz de alcanzar la cota de 30 m a través de la vía de evacuación (T_0). Además, se considera el tiempo límite (T_r) que puede esperar la última persona que comienza a ascender a través de la vía de evacuación sin ser alcanzado por el tsunami (MINVU, 2017).

2.1.3.3.1. Longitud de la vía de evacuación

Se determinó mediante Google Earth desde el punto más desfavorable hasta la zona segura, y a partir de la información extraída en terreno se realiza el análisis considerando varios tramos a lo largo de la vía de evacuación, ya que esta presenta diferentes cambios de pendientes (Anexo B).

2.1.3.3.2. Pendiente promedio de la vía

Para determinar este cálculo se realizó la medición en Google Earth, conociendo la diferencia altitudinal entre dos puntos (distancia vertical y horizontal), donde la pendiente promedio del tramo de interés de la vía de evacuación (hasta alcanzar la altura de 30 m) se obtiene mediante la siguiente Ecuación 3:

$$I_{\text{promedio}} =: \frac{\sum L_i(\text{m}) \cdot i(\%) }{L_i(\text{m})} \quad (3)$$

Donde:

- L_i : Longitud del tramo de la vía que se está evaluando [m];
- i : Pendiente del tramo a evaluar [%];

2.1.3.3.3. Velocidad de flujo (V_f)

Para determinar la velocidad de flujo de peatones, se utilizó la Ecuación 2 indicada en el ítem 2.1.3, y luego se comparó con la información entregada por el MINVU, (2017). Además, se tiene en consideración la pendiente promedio a lo largo de la vía de evacuación.

2.1.3.3.4. Tiempo necesario para alcanzar la zona segura (T_o)

El tiempo para alcanzar la zona segura se determinó a partir de la Ecuación 4 y se muestra a continuación:

$$T_o = : \frac{L}{V_f} \quad (4)$$

Donde:

- T_o : Tiempo necesario para la evacuación [s];
- L : Longitud en metros del tramo (s) hasta alcanzar la cota de 30 m;
- V_f : Velocidad de peatones [m/s];

2.1.3.3.5. Tiempo residual (T_r)

El tiempo residual se calculó a partir de la Ecuación 5 y se muestra a continuación:

$$T_r = : T - T_o \quad (5)$$

Donde:

- T_r : Tiempo límite [s];
- T : Tiempo máximo para la evacuación [15 min = 900 segundos];
- T_o : Tiempo necesario para la evacuación [s];

2.1.3.3.6. Capacidad de evacuación de la vía (N)

El número de personas posibles a evacuar en el tiempo máximo disponible se determinó a partir de la Ecuación 6:

$$N =: T_r \cdot D \cdot d \cdot V_f \quad (6)$$

Donde:

- N : Capacidad de evacuación de la vía [personas];
- T_r : Tiempo límite [s];
- D : Densidad del flujo de personas [personas/m²];
- d : Ancho de la vía [m];
- V_f : Velocidad del flujo de peatones [m/s];

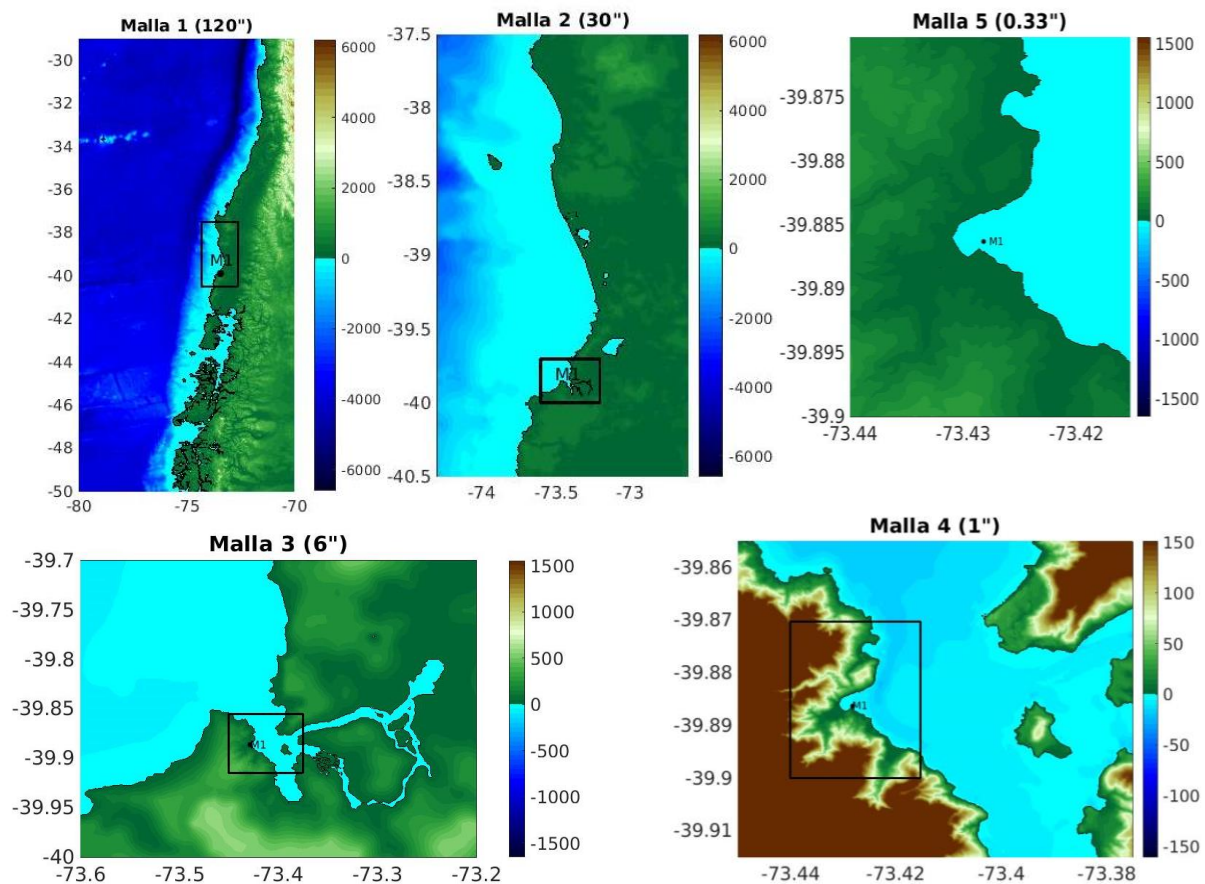
2.2. Simulación numérica

Se utilizó el modelo el Non-hydrostatic Evolution of Ocean Waves (Neowave), el cual fue diseñado por el Dr. Yoshiki Yamazaki para el análisis numérico de tsunamis (Yamazaki et al., 2009) en lenguaje de programación FORTRAN, este se basa en un esquema numérico de diferencias finitas que resuelve las ecuaciones lineales y no lineales del movimiento de aguas someras. En este modelo numérico se utilizaron 5 mallas anidadas de diferente resolución espacial, las cuales se construyeron a partir de batimetrías de detalles aportadas por la Dirección de Obras Portuarias en los sectores de Los Amargos, Corral, Fuerte Niebla, Los Molinos, Niebla y Subsectores.

La malla 1 es de 120" de resolución y se utilizó para la generación del tsunami y propagación hacia el Océano Pacífico. La malla 2, 3 y 4, de 30", 6" y 1" de resolución espacial. La malla 5 es de 0,33" de resolución y se le incorporo topografía de detalle satelital LiDAR, esta considera solo elevaciones del terreno y no las edificaciones (Figura 2.1). Por otro lado, se analizó el comportamiento de la marea durante un mes (julio de 2022), donde se observó claramente los periodos de sicigias y cuadraturas, esto con el fin de realizar una corrección en los datos a partir del NRS el cual fue de 0,95 metros.

Figura 2.1

Mallas anidadas de diferente resolución.



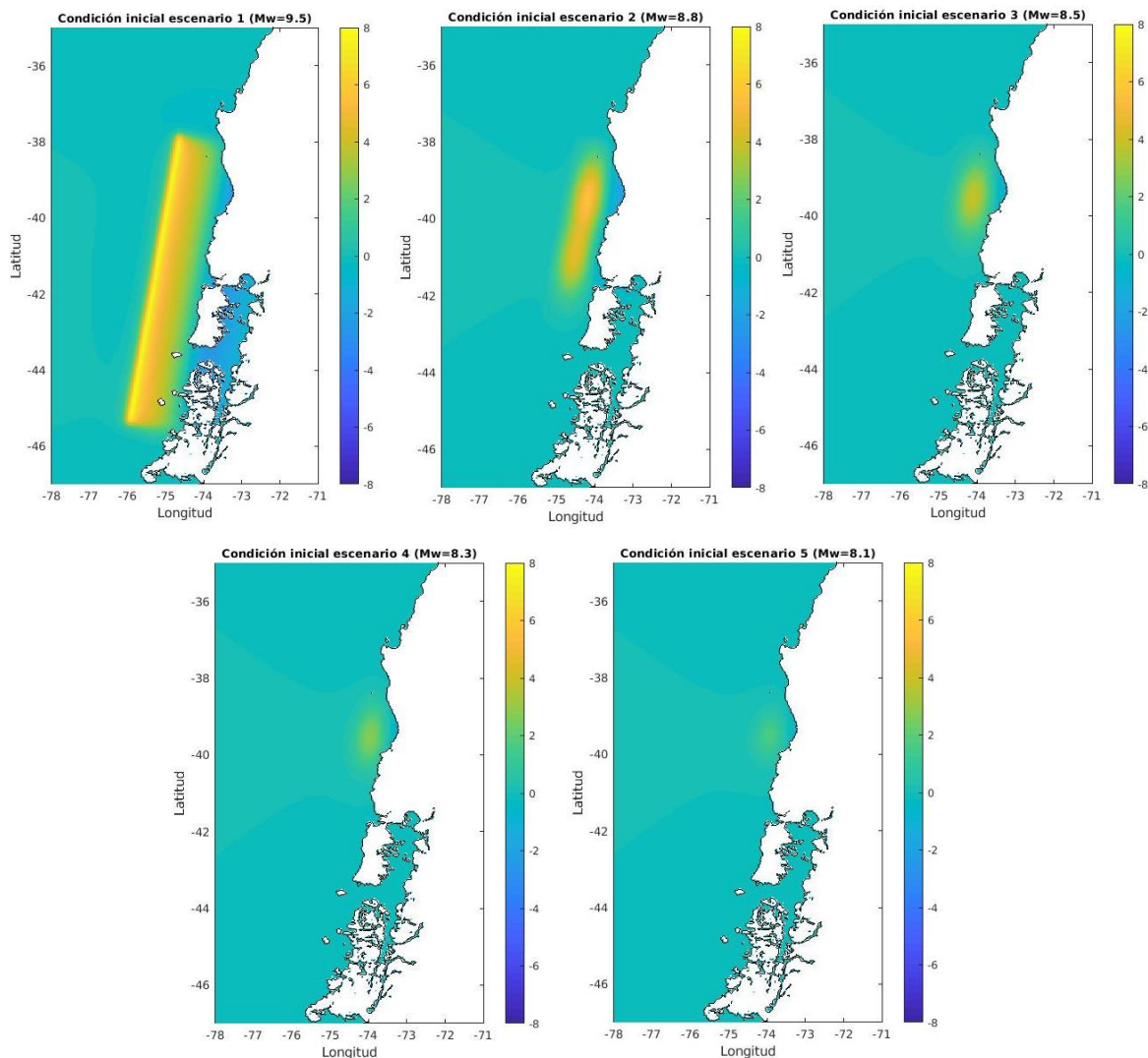
Fuente: Elaboración propia a partir de simulación numérica.

2.2.1. Condiciones iniciales: modelos de ruptura

A continuación, se presentan los diferentes escenarios analizados para la comuna de Corral (Figura 2.2). Es conveniente analizar su efecto, tomando en cuenta las diferentes magnitudes que pudiera alcanzar el evento, ya que dependiendo de su intensidad y origen un terremoto puede causar desplazamientos de la corteza terrestre, y así un tsunami. Por otro lado, se estima que los niveles máximos de inundación dependen exclusivamente de la magnitud del evento, debido a que estos generan peligro en las zonas bajas, afectando a los habitantes e infraestructura crítica perteneciente a la comuna.

Figura 2.2

Condición inicial escenarios.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos simulación numérica.

2.2.2. Alturas de inundación y tiempos de arribo

Las variables de interés para identificar las zonas de peligro son las alturas de inundación y tiempos de arribo de las ondas para la comuna de Corral. Se utilizó el mareógrafo virtual M1 (Figura 2.1) que se encuentra en la malla 5 para realizar la extracción de datos. Posteriormente, se procesaron los datos a través del software Matlab, Global Mapper y ArcMap 10.8 con el fin de obtener mapas que indiquen los niveles de inundación y series de tiempo para cada evento analizado.

2.3. Mapa comunitario

Se realizó la elaboración de un mapa comunitario en ArcMap 10.8 a partir de los antecedentes entregados, y este involucra a 41 participantes de diferentes niveles socioeconómicos pertenecientes a la comuna de Corral, los cuales identificaron las zonas de inundación por tsunamis. Además, se analizó y comparó el nivel de coherencia de los habitantes con respecto a lo entregado por la simulación numérica y se procede a identificar la infraestructura crítica perteneciente al sector.

2.4. Infraestructura crítica

Se analizó la infraestructura crítica bajo el área de inundación, debido a que esta es necesaria para el funcionamiento normal de los servicios básicos y los sistemas de producción de cualquier sociedad, de tal manera que cualquier interrupción no deseada desencadenada por algún evento externo, tendría graves consecuencias en los flujos de suministros vitales o en el funcionamiento de los servicios esenciales (Caro, 2011). Por lo tanto, es importante realizar un levantamiento de la infraestructura crítica que se encuentra en el área de estudio, debido a que los daños potenciales en las edificaciones dependen exclusivamente de la magnitud del evento y estos generan un impacto en la capacidad de recuperación de las localidades costeras.

2.5. Análisis de simulaciones en la comuna de Corral

En la comuna de Corral se realizó un análisis comparativo de los escenarios simulados, ya que dependiendo de la magnitud del evento se generan daños potenciales en la infraestructura crítica, lo cual implica analizar y comparar los niveles de inundación de cada evento. Sin embargo, se estima necesario considerar el tiempo que les toma a los peatones evacuar por la vía de evacuación más cerca, debido a que estos son necesarios para realizar el análisis con los tiempos de arribo, y estimar si los habitantes logran evacuar antes de ser alcanzados por la primera onda.

Por otro lado, se analizaron los mapas comunitarios, esto con la finalidad de evaluar si la población es capaz de reconocer las zonas con peligro a inundación por tsunamis. Debido a que, al tener al menos conciencia del riesgo a nivel comunitario, ayudaría a disminuir la pérdida de vidas de los habitantes, ya que así es posible lograr una mejor preparación para resistir y adaptarse a los desastres.

3. RESULTADOS

3.1. Características de la Comuna de Corral

La comuna de Corral se encuentra ubicada en el sur de Chile, Región de los Ríos. Esta limita por el norte con la comuna de Valdivia, al sur con la comuna de La Unión y al este con la comuna de Paillaco. El área comunal consta de una superficie de 767 kilómetros cuadrados, y esta se encuentra emplazada en un sector principalmente costero de la Provincia de Valdivia. El instrumento de evaluación de vías de evacuación se aplicó en la comuna de Corral, específicamente en la Calle Callejón Iglesia conectada con Cerro Milagro (Vía I), Calle Esperanza conectada con la Calle Tacna (Vía II) y Calle Arica conectada con Calle Manuel Rodríguez y Los Olmos (Vía III), estas se encuentran ubicadas en el sector costero y central de la comuna.

La Figura 3.1 muestra las zonas de inundación histórica a partir de los mapas de inundación elaborados por el SHOA, los que se encuentran referidos al evento del año 1960. Además, se indica la distribución de la población por sectores, con el fin de asignar un número de personas para cada vía de evacuación, considerando que los habitantes de la comuna de Corral toman la vía de evacuación más cercana como rutas de escape hacia el punto de encuentro.

Figura 3.1

Mapas con zonas de inundación histórica elaborado por el SHOA y vías de evacuación a evaluar.



Fuente: Extraído desde el SHOA y Google Earth.

3.2. Análisis de niveles de inundación e infraestructura crítica

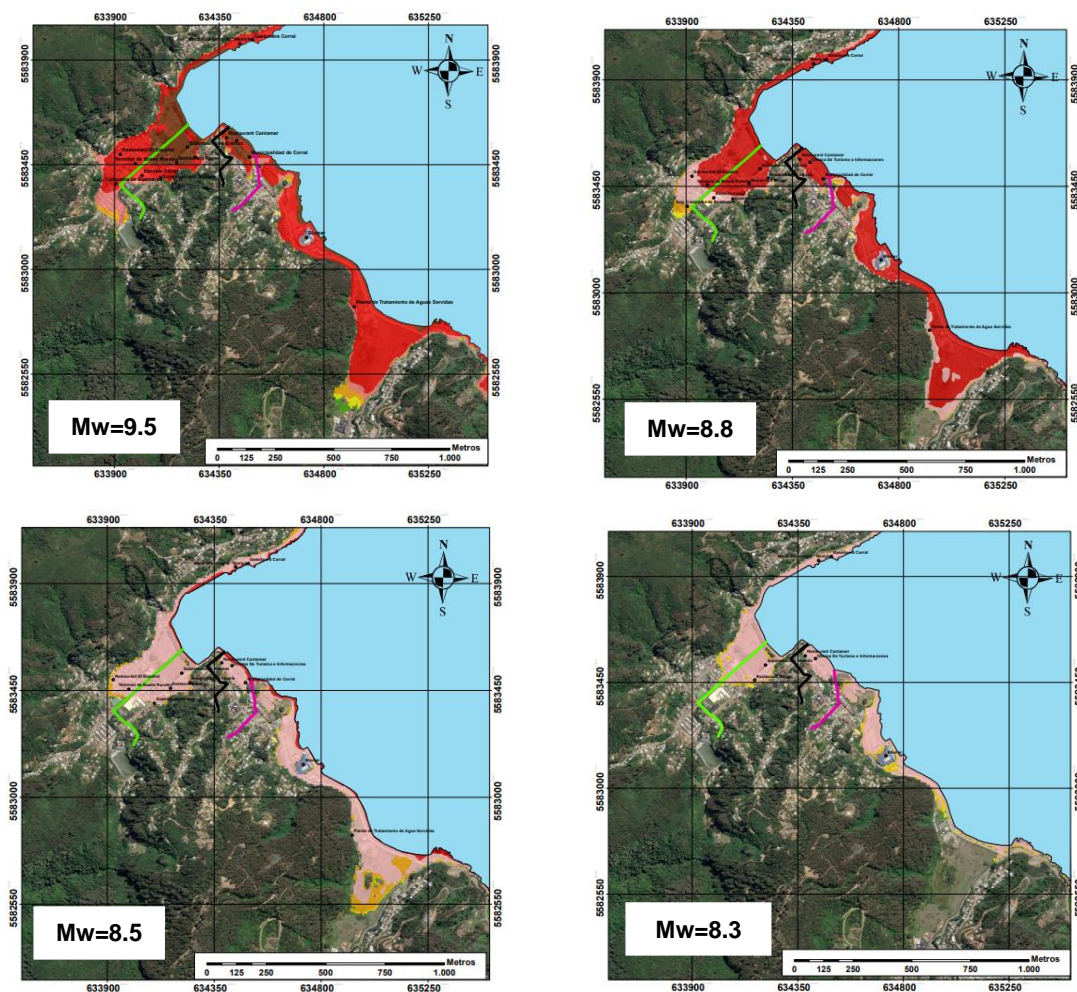
En la Figura 3.2 se muestra un mapa con los niveles de inundación, zonas de peligro e infraestructura crítica perteneciente a la comuna de Corral. En general, se observa que las máximas inundaciones superan los 10 metros y estas generan daños

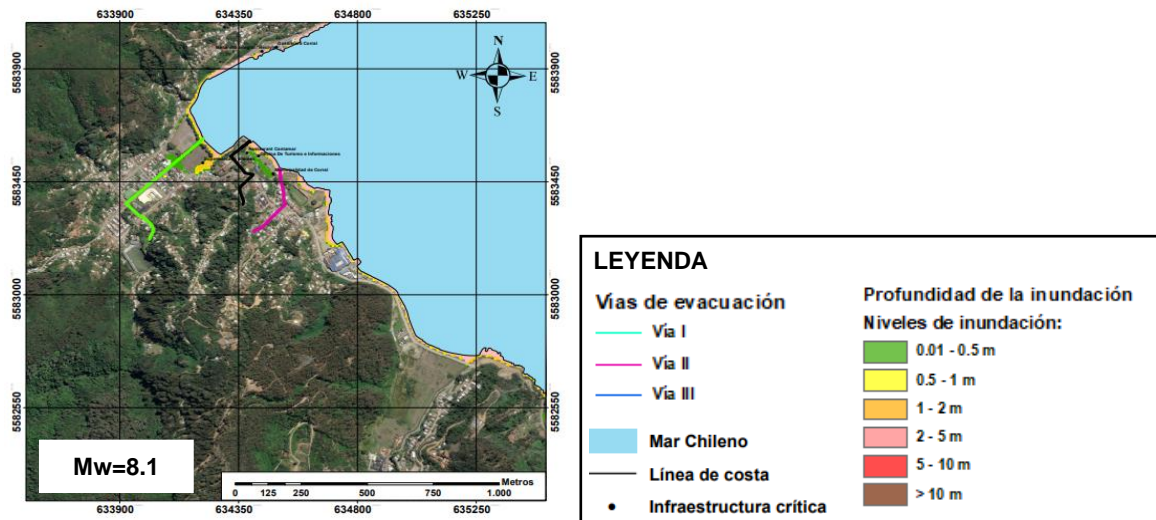
potenciales sobre las edificaciones, ya que según lo que indica la guía para la estimación de peligro de tsunami propuesta por (Aránguiz et al., 2018) las viviendas de 4 pisos son inundadas con ondas mayores a los 10 metros.

Por otro lado, se considera la infraestructura crítica bajo el área de inundación y se estima que un evento con $M_w=9.5$ inundaría las edificaciones fundamentales (transporte, salud, alimentación, industrias químicas, administración, etc.), lo que dificultaría a la población ya que no contarían con el apoyo de instituciones esenciales para adaptarse después de un tsunami.

Figura 3.2

Mapas de inundación tsunami.





Fuente: Elaboración propia en ArcMap 10.8.

Finalmente, se consideró la infraestructura analizada en terreno, la cual indica que la mayor parte de está, corresponde a estructuras que no superan los dos pisos, por lo tanto, se espera que un evento con una profundidad de inundación alrededor de los 5 metros podría tener un gran impacto en la comuna de Corral, ya que destruiría la infraestructura que se encuentra en peligro dentro del área potencial de inundación.

3.3. Análisis de vías de evacuación y tiempos de arribo

En la Figura 3.3 se muestra un mapa con los tiempos de arribo, donde se consideró el escenario más desfavorable, el que esta referido al evento de 1960 con $Mw=9.5$. Este indica claramente que la onda llega a la costa en un tiempo menor a 20 minutos, lo cual es favorable ya que a partir de lo que indica la Tabla 3.1 los tiempos de evacuación de las tres vías son menores al tiempo de arribo de la primera onda, tal como lo indica la Figura 3.4.

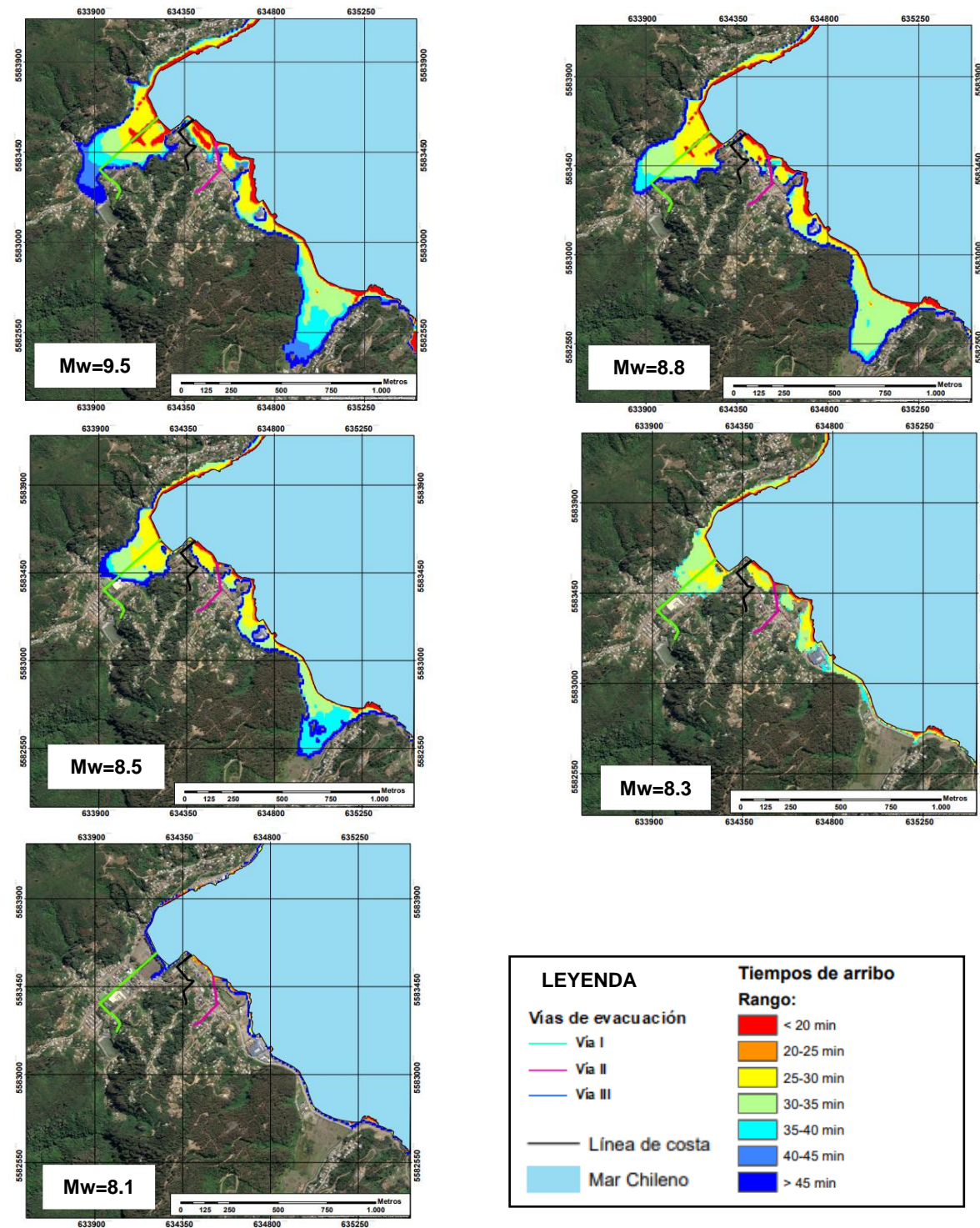
Sin embargo, en el anexo A se muestran los resultados obtenidos de la aplicación del instrumento para evaluar vías de evacuación, donde se estima que los peligros y condiciones de accesibilidad a lo largo de la ruta se reflejan principalmente en la presencia de vehículos estacionados al costado de la vía, falta de señaléticas que indiquen dirección a evacuar y déficit en el mantenimiento estructural de las vías de evacuación. Además, según lo que se indica en el anexo B, las vías cuentan con la capacidad necesaria para evacuar a la población.

Por otro lado, en el caso hipotético de tsunami, existe la probabilidad de que una persona se enfrente a tomar decisiones relacionadas con seguir la mejor ruta de evacuación que le permita llegar a la zona de seguridad. Por lo tanto, si una ruta establecida no es perceptivamente confiable para la persona, existe la posibilidad de que

llegue a tomar decisiones que pueden no ser las adecuadas para su exitosa evacuación, aumentando su vulnerabilidad humana ante la amenaza de inundación por tsunami (Lobos, 2016).

Figura 3.3

Mapas de con tiempos de arribo y vías de evacuación de los escenarios analizados.



Fuente: Elaboración propia en ArcMap 10.8.

Tabla 3.1

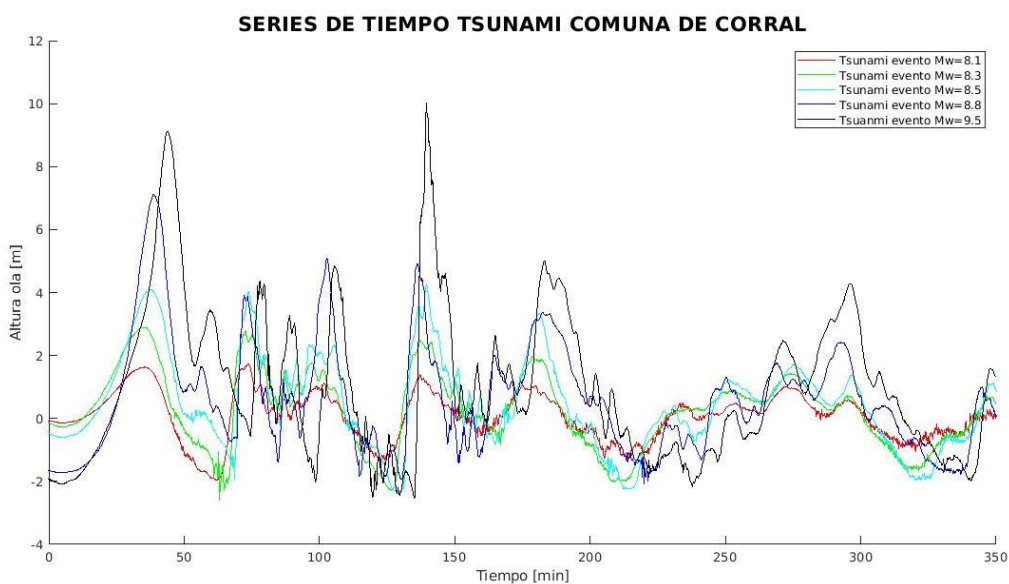
Resultados de tiempo de evacuación tsunami (KPI3.A).

Criterios	Vía I	Vía II	Vía III
- Distancia hasta el límite de inundación (m).	186	184	465
- Distancia hasta la zona segura (m).	175	127	118
- Ancho hasta el límite de inundación (m).	3,00	3,00	6,00
- Ancho hasta la zona segura (m).	3,00	1,00	6,00
- Pendiente promedio hasta el límite de inundación (%).	6,47	7,89	4,98
- Pendiente promedio hasta la zona segura (%).	10,6	8,59	13,6
- Velocidad del peatón hasta el límite de inundación (m/s).	1,08	0,94	1,22
- Velocidad del peatón hasta la zona segura (m/s).	0,72	0,88	0,59
- Densidad de la población (personas/m ²).	0,60	0,60	0,60
- Cobertura del suelo.	Asfalto	Asfalto	Asfalto
- Número de personas a evacuar hasta el límite de inundación.	180	60	380
- Número de personas a evacuar hasta la zona segura.	100	85	250
Capacidad de evacuación (personas)	1027	581	2129
Tiempo hasta el límite de la de zona de inundación (min)	4,42	3,85	7,80
Tiempo hasta la zona segura (min)	5,37	4,97	5,30
Tiempo Final (s)	587	529	786
Tiempo Final (min)	9,79	8,82	13,1

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

Figura 3.4

Series de tiempo de los escenarios analizados en la comuna de Corral a partir del mareógrafo virtual (M1).



Fuente: Elaboración propia a partir de simulación numérica.

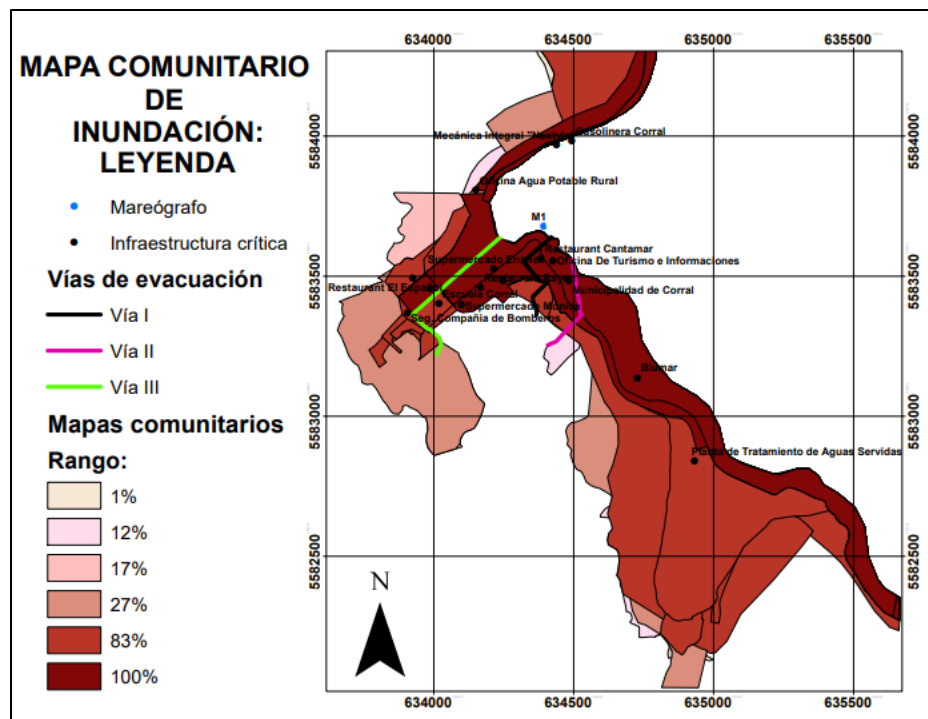
3.4. Análisis de mapa comunitario y zonas de peligro

En la Figura 3.5 se muestran los resultados de la superposición de dibujos de mapas comunitarios obtenidos a través del software del sistema de información geográfica (GIS) ArcMap 10.8. Por lo tanto, se observa que, de los 41 participantes, entre 100-83% reconoce claramente que existen zonas bajas, las cuales están en riesgo de inundación por tsunami, esto es favorable ya que, al momento de una amenaza por tsunami la población podría evacuar hacia la ruta de evacuación más cercana.

Además, se considera que los participantes perciben de buena forma las zonas con peligro a inundación, ya que concuerdan con los resultados arrojados por la simulación numérica (Figura 3.2) y los mapas de inundación propuestos por el SHOA. Por otro lado, cabe señalar que existe un cierto porcentaje de encuestados que percibía algunas áreas fuera del área inundada por el tsunami simulado, que aún estaban en riesgo de inundación.

Figura 3.5

Mapa comunitario de inundación comuna de Corral.



Fuente: Elaboración propia en ArcMap 10.8.

4. DISCUSIÓN

Las simulaciones numéricas muestran que, dependiendo de la magnitud del evento, este podría causar daños significativos en las zonas bajas de la comuna de Corral. Por lo tanto, se estima que los niveles de inundación podrían verse alterados, y causar daños potenciales en las edificaciones. Además, la infraestructura crítica es esencial para el funcionamiento normal de la comuna, y está se encuentra bajo el área de inundación, es por ello, que no se contaría con el apoyo de está luego de ocurrido el evento.

Sin embargo, el ejercicio de mapeo de la comunidad indica que los residentes locales tienen un buen reconocimiento de las zonas con peligro a inundación, y es probable que entiendan bien los riesgos de los tsunamis y sepan cómo evacuar. Por otro lado, fue interesante notar como muchos de los participantes presentaban una imagen distorsionada sobre las zonas con peligro a inundación, debido a que percibían que las zonas con una cota mayor a 30 metros aún se encontraban con riesgo a ser inundadas por un tsunami.

Además, estos no identificaron la ubicación de las vías de evacuación, pero puede ser probable que tengan un conocimiento preciso de cuánto tiempo se tardan en llegar a ciertos destinos de su propia comuna. Siendo esto un objetivo de interés, ya que se podría contrarrestar con los tiempos de arribo obtenidos por la simulación numérica y mejorar o proponer alguna estrategia de resiliencia en la comuna de Corral.

Por otro lado, se establecieron algunos parámetros para determinar el tiempo que les toma a los peatones evacuar por la vía de evacuación más cercana. Se estima que la densidad del flujo de peatones representa un valor conservador de $0,60$ personas/m², este valor podría ser aumentado a 1 considerando las características de los habitantes de cada sector. Por lo tanto, a partir del aumento de este valor es esperable que los tiempos de evacuación disminuyan, esto producto de que en la ecuación la densidad del flujo de peatones se encuentra en el denominador y la capacidad de evacuación aumente.

Actualmente, las vías de evacuación se encuentran con un déficit en el mantenimiento estructural, lo que podría influir en las víctimas potenciales y representa un tema de interés para futuras investigaciones. Debido a que es importante considerar un método, que permita evaluar las necesidades de mantenimiento estructural de las rutas de evacuación, aún cuando la calidad estructural no sea importante para el usuario.

Finalmente, una de las principales limitaciones en el estudio es la escasa información con respecto a las encuestas, ya que estas no contaban con participantes

jóvenes, por lo que no se incluyeron las percepciones de la generación más joven. Lo anterior, resultaría de gran interés, ya que se podría elaborar una cartografía que indique un valor de conciencia de los habitantes y la percepción que estos tienen frente a un tsunami.

5. CONCLUSIÓN

En el estudio se analizó la infraestructura crítica y tiempos de arribo mediante simulaciones numéricas, gracias a esta herramienta fue posible analizar el comportamiento en función de los diferentes escenarios y condiciones en la comuna de Corral. Se estima que la población cercana a la línea de costa o en zonas con peligro a inundación, logren evacuar en un tiempo menor a 20 minutos, ya que dependiendo exclusivamente de la magnitud del evento se generan daños significativos en la localidad.

Sin embargo, se espera que la población no cuente con ayuda de bomberos, carabineros, municipalidad y centros de refugio (escuelas, liceos, etc.) luego de ocurrido el evento, debido a que estos se encuentran en las zonas de inundación. Entonces, los habitantes que se encuentran en una cota mayor a 30 metros podrán hacer uso de sus viviendas, siempre y cuando estas cumplan con las condiciones estructurales necesarias. Cabe mencionar, que se espera disminuir la pérdida de vidas en un desastre, por lo tanto, el mapeo comunitario fue una herramienta esencial para identificar la percepción de los habitantes en relación con las áreas propensas a inundación.

Por otro lado, se concluye que las tres vías de evacuación cuentan con el tiempo suficiente para evacuar, ya que la primera onda ocurre después de los 30 minutos de ocurrido el evento. Por lo tanto, se cumple con lo establecido por el MINVU, (2017), el cual indica si la población de cada subárea a evacuación será capaz de llegar desde la zona de amenaza hasta el punto de encuentro en un periodo de tiempo igual o menor a 15 minutos.

Finalmente, se propone realizar diversas actividades que involucren evaluar el nivel de conciencia de los habitantes de las comunidades costeras. Esta incluye realizar ejercicios de mapeo comunitario entre diferentes grupos etarios, y analizar la percepción de cada participante, para así reducir el daño y proponer estructuras que sirvan para protección de tsunamis en la costa, con el fin de disminuir el daño en las edificaciones.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó mediante el apoyo y financiamiento en el marco del proyecto FONDECYT iniciación N°1210540.

7. REFERENCIAS

- Aránguiz, R., Catalán, P., Cienfuegos, R., González, G., Gubler, A., Urra, L., González, J., & Zelaya, C. (2018). Guía para la estimación de peligro de tsunami. *CIGIDEN*.
<https://www.cigiden.cl/guia-para-la-estimacion-de-peligro-de-tsunami/>
- Caro, M. (2011). *La protección de las infraestructuras críticas*.
- Cubelos, G. C., Kularathna, S., Valenzuela, V. P., Iliopoulos, N., Quiroz, M., Yavar, R., Henriquez, P., Bacigalupe, G., Onuki, M., Mikami, T., Cienfuegos, R., Aranguiz, R., & Esteban, M. (2019). Understanding Community-Level Flooding Awareness in Remote Coastal Towns in Northern Chile through Community Mapping. *Geosciences*, 9, 279. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070279>
- INDECI. (2015). *Guía técnica de procedimientos para la identificación de rutas de evacuación y zonas seguras en lugares públicos, ante lluvias intensas y sus peligros asociados como inundación y movimientos en masa*.
<https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/201706290124351.pdf>
- Lagos, M., & Cisternas, M. (2008). El nuevo riesgo de tsunami: Considerando el peor escenario. *Scripta Nova, Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, Vol. XII(270). <http://geocritica.com/>
- Lagos, M., & Gutiérrez, D. (2005). Simulación del tsunami de 1960 en un estuario del centro-sur de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 33, Art. 33.
<http://ojs.uc.cl/index.php/RGNG/article/view/43665>
- Lobos, A. (2016). *Propuesta metodológica para la evaluación de las vías de evacuación ante tsunami aplicada en Iquique*.
<http://repositoriobibliotecas.uv.cl/handle/uvsc/2922>
- Marris, E. (2005). Inadequate warning system left Asia at the mercy of tsunami. *Nature*, 433, 3–5. <https://doi.org/10.1038/433003a>
- Mas, E., Suppasri, A., Koshimura, S., & Imamura, F. (2012). Agent based simulation of the 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami evacuation procedure. Introduction to an integrated model of tsunami inundation and evacuation. *Journal of Natural Disaster Science*, 34, 41–57. <https://doi.org/10.2328/jnds.34.41>
- MINVU. (2009). *Manual de vialidad urbana recomendaciones para el diseño de elementos de infraestructura vial urbana*. <http://www.sectra.gob.cl/metodologias/redevu.htm>
- MINVU, O. (2017). Guía de Referencia para Sistemas de evacuación comunales por Tsunami. *MINVU*. <http://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/3392>

- Tobler, W. (1993). Three presentations on geographical analysis and modeling. *NCGIA*.
https://escholarship.org/content/qt05r820mz/qt05r820mz_noSplash_8f1f13a718ba4a0db0079773ffa4a7af.pdf
- Wood, N. J., & Schmidlein, M. C. (2012). *Anisotropic path modeling to assess pedestrian-evacuation potential from Cascadia-related tsunamis in the US Pacific Northwest*. *62*(2), 275–300. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9994-2>
- Yamazaki, Y., Kowalik, Z., & Cheung, K. F. (2009). Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and run-up. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, *61*(5), 473–497. <https://doi.org/10.1002/flid.1952>

ANEXO A

Tabla A.1

Resultados obtenidos hasta el límite de inundación histórica y punto de encuentro (Vía I).

KPI	Indicador	Puntaje obtenido				Puntaje máximo
Límite de inundación histórico						
KPI1.A: Peligros a lo largo de la ruta.	Puntos	3				18
KPI2.A: Condiciones de accesibilidad.	Puntos	6				15
Punto de encuentro						
KPI1.B: Peligros a lo largo de la ruta.	Puntos	4				18
KPI2.B: Condiciones de accesibilidad.	Puntos	8				15
KPI	Indicador	No existe	Bajo	Medio	Alto	
		(0 pts)	(1 pts)	(2 pts)	(3 pts)	
KPI3.A: Tiempo de evacuación hasta el límite de inundación.	Minutos		4,2 min			
KPI3.B: Tiempo de evacuación hasta punto de encuentro.	Minutos	4,6 min				

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

Tabla A.2

Resultados obtenidos hasta el límite de inundación histórica y punto de encuentro (Vía II).

KPI	Indicador	Puntaje obtenido				Puntaje máximo
Límite de inundación histórico						
KPI1.A: Peligros a lo largo de la ruta.	Puntos	5				18
KPI2.A: Condiciones de accesibilidad.	Puntos	7				15
Punto de encuentro						
KPI1.B: Peligros a lo largo de la ruta.	Puntos	4				18
KPI2.B: Condiciones de accesibilidad.	Puntos	7				15
KPI	Indicador	No existe	Bajo	Medio	Alto	
		(0 pts)	(1 pts)	(2 pts)	(3 pts)	
KPI3.A: Tiempo de evacuación hasta el límite de inundación.	Minutos		3,1 min			
KPI3.B: Tiempo de evacuación hasta punto de encuentro.	Minutos	5 min				

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

Tabla A.3

Resultados obtenidos hasta el límite de inundación histórica y punto de encuentro (Vía III).

KPI	Indicador	Puntaje obtenido		Puntaje máximo	
Límite de inundación histórico					
KPI1.A: Peligros a lo largo de la ruta.	Puntos	1		18	
KPI2.A: Condiciones de accesibilidad.	Puntos	4		15	
Punto de encuentro					
KPI1.B: Peligros a lo largo de la ruta.	Puntos	1		18	
KPI2.B: Condiciones de accesibilidad.	Puntos	9		15	
KPI	Indicador	No existe (0 ptos)	Bajo (1 ptos)	Medio (2 ptos)	Alto (3 ptos)
KPI3.A: Tiempo de evacuación hasta el límite de inundación.	Minutos		4,2 min		
KPI3.B: Tiempo de evacuación hasta punto de encuentro.	Minutos	4,0 min			

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

Tabla A.4

Porcentajes de riesgo para cada KPI (Vía I).

Vía I	KPI1.A	KPI2.A	KPI3.A	Puntos obtenidos	Porcentaje de riesgo
- Hasta llegar al límite de inundación.	17%	40%	33%	10/36	28%
	KPI1.B	KPI2.B	KPI3.B		
- Hasta llegar al punto de encuentro.	22%	53%	0%	12 /36	33%

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

Tabla A.5

Porcentajes de riesgo para cada KPI (Vía II).

Vía II	KPI1.A	KPI2.A	KPI3.A	Puntos obtenidos	Porcentaje de riesgo
- Hasta llegar al límite de inundación.	28%	47%	33%	13/36	36%
	KPI1.B	KPI2.B	KPI3.B		
- Hasta llegar al punto de encuentro.	22%	47%	0%	11/36	31%

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

Tabla A.6

Porcentajes de riesgo para cada KPI (Vía III).

Vía II	KPI1.A	KPI2.A	KPI3.A	Puntos obtenidos	Porcentaje de riesgo
- Hasta llegar al límite de inundación.	6%	27%	33%	6/36	17%
	KPI1.B	KPI2.B	KPI3.B		
- Hasta llegar al punto de encuentro.	6%	60%	0%	10/36	28%

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde checklist.

ANEXO B

Tabla B.1

Resultados obtenidos de la capacidad de evacuación de la Vía I hasta la cota de 30 metros.

Tramo	Pendiente (%)	Longitud (m)
1	9,68	62
2	7,69	78
3	-3,33	30
4	13,21	53
5	11,76	17
\bar{x}	8,33	240
V_f (m/s)		0,90
T_o (min)		4,45
T_r (min)		10,56
N (personas)		1027

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde ONEMI.

Tabla B.2

Resultados obtenidos de la capacidad de evacuación de la Vía II hasta la cota de 30 metros.

Tramo	Pendiente (%)	Longitud (m)
1	8,00	100
2	7,50	38
3	8,06	62
\bar{x}	7,92	200
V_f (m/s)		0,94
T_o (min)		3,55
T_r (min)		11,45
N (personas)		581

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde ONEMI.

Tabla B.3

Resultados obtenidos de la capacidad de evacuación de la Vía III hasta la cota de 30 metros.

Tramo	Pendiente (%)	Longitud (m)
1	3,20	125
2	8,00	74
3	19,6	51
\bar{x}	7,97	250
V_f (m/s)		0,94
T_o (min)		4,45
T_r (min)		10,5
N (personas)		2129

Fuente: Elaboración propia con información extraída desde ONEMI.