

Evacuación vertical como medida de mitigación del riesgo de tsunamis en Chile

Jorge León · Natalia Zamora · Sebastián Castro
Rosita Jünemann · Alejandra Gubler · Rodrigo Cienfuegos



SERIE POLICY PAPERS CIGIDEN

Evacuación vertical como medida de mitigación del riesgo de tsunamis en Chile

Evacuación vertical como medida de mitigación del riesgo de tsunamis en Chile

Jorge León
Natalia Zamora
Sebastián Castro
Rosita Jünemann
Alejandra Gubler
Rodrigo Cienfuegos

RESUMEN EJECUTIVO

CIGIDEN ha estudiado en detalle los posibles efectos de terremotos y tsunamis en el borde costero de Chile, haciendo cruces entre variables de intensidad de estas amenazas con las condiciones de evacuación. Los escenarios analizados dan cuenta de la necesidad de avanzar en normativas y estándares que permitan incorporar la evacuación vertical dentro de las opciones de mitigación que la autoridad pueda considerar. En este documento, resumimos algunos antecedentes que dan cuenta del estado del arte del potencial de evacuación por tsunami en ciudades costeras, realizando, a modo de ejemplo, un diagnóstico para Viña del Mar. Para ello contextualizamos la amenaza de tsunamis que presenta la costa central de Chile, analizando las estrategias actuales de evacuación en la zona, contrastándolas con la alternativa de evacuar verticalmente. Los resultados de este diagnóstico motivaron una revisión de la experiencia internacional respecto a la evacuación vertical, la que se complementa con experiencias recientes del impacto de tsunamis en edificios diseñados bajo la normativa chilena.

A partir de la investigación realizada se establecieron recomendaciones respecto a los criterios que debieran ser considerados antes de proceder a la implementación de planes de evacuación vertical a nivel nacional. Primero, se deben tener en cuenta las características morfológicas: (1) el emplazamiento de los sitios para la construcción de los edificios de evacuación vertical; (2) la cantidad mínima de superficie de evacuación que debe proveerse de al menos 0,93 m² por persona de acuerdo a las recomendaciones FEMA (2008); (3) debe contemplarse un número adecuado de accesos con características apropiadas (visibilidad desde el exterior, dimensiones); y (4) debe incluirse un sistema interior de circulación apto para funcionar. Segundo, las características de ocupación y gestión: (1) se debe garantizar el libre acceso

de la población durante una emergencia; (2) hay que disponer de personal entrenado para guiar a la población; (3) se debe establecer un programa de subsidios o reducción de impuestos en caso de edificaciones privadas utilizadas como refugios; (4) se requiere establecer un programa periódico de revisiones para estos edificios; y (5) deben establecerse estrategias de vinculación y participación ciudadana para fomentar el buen uso y cuidado de estas infraestructuras. Tercero, las consideraciones estructurales de los edificios deben ser verificadas para asegurar un correcto desempeño frente a los efectos del terremoto y tsunami. Por último, el cuarto aspecto a considerar, es la evaluación de las condiciones de respuesta geotécnica del suelo. Las recomendaciones presentadas anteriormente tienen como objetivo contribuir a las discusiones respecto a la definición de criterios, normativas o estándares que permitan la implementación de la evacuación vertical en Chile.

Bernardita Paul Ossandón
Encargada Nacional
de Reconstrucción
MINVU

PRÓLOGO

Los desastres no son naturales, sino más bien producto de sociedades vulnerables. En la medida que contamos con preparación ante un evento, se puede evitar el desastre. Un ejemplo que viene a contrarrestar las vulnerabilidades ante un evento, es el potenciar las capacidades de los afectados, desarrollando técnicamente y educando a las comunidades respecto a la evacuación vertical.

Desde el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, y especialmente desde la comisión que presido, de Reducción de Riesgo de Desastre y Reconstrucción, vemos en la evacuación vertical una vía concreta de hacer frente al riesgo de tsunami. Luego de haber vivido 20 emergencias, desastres o catástrofes en los últimos 10 años, es de extrema relevancia potenciar medidas de mitigación ante posibles tsunamis que, sin lugar a duda, enfrentaremos en el corto plazo.

Los expertos indican que, cuando se produce un sismo de gran magnitud que puede ocasionar un tsunami, lo recomendable es evacuar las áreas costeras y refugiarse en lugares que estén por sobre los 30 metros sobre el nivel del mar y lo más alejados de la costa. Estos edificios deben tener unas características de construcción, ser de hormigón armado, tener vías de acceso abiertas y expeditas (libres de elementos que puedan bloquear el paso), deben permitir el desplazamiento de personas con movilidad reducida y ser de fácil acceso desde la calle. Además, deben contar en su interior con zonas que permitan albergar a los evacuados durante las primeras horas de la emergencia.

Una vez definidas las características técnicas de las edificaciones necesarias para evacuar verticalmente, es hora de transformar en exigencias tales características y definir las responsabilidades de cada actor al momento de enfrentar un futuro tsunami.

SERIE POLICY PAPERS CIGIDEN

Evacuación vertical como medida de mitigación del riesgo de tsunamis en Chile

INTRODUCCIÓN

El presente estudio se ha realizado con base al nuevo Sistema de Indicadores y Estándares de Desarrollo Urbano (SIEDU) ^[1] desarrollado a través de un acuerdo entre el Consejo Nacional de Desarrollo Urbano, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, y el Instituto Nacional de Estadísticas (INE). A partir de esta información, se han identificado las comunas de Chile con mayor vulnerabilidad frente a amenazas costeras. En él se señala que 9 ciudades tienen más de 10% de su población expuesta a la amenaza de tsunamis: Talcahuano (42,7%), Iquique (29,4%), Arica (21,8%), Penco (16,3%), Hualpén (14,6%), Cartagena (14,6%), Lota (13,3%), Constitución (11,8%) y Viña del Mar (10,5%). Dentro de ellas, CIGIDEN ha estudiado con mayor detalle los posibles efectos de terremotos y tsunamis en Iquique y Viña del Mar, haciendo cruces entre variables de intensidad de estas amenazas con las condiciones de evacuación debido al gran número de personas potencialmente expuestas. Las situaciones analizadas dan cuenta de la necesidad de avanzar en normativas y estándares que permitan incorporar la evacuación vertical dentro de las opciones de mitigación del riesgo ante tsunamis que la autoridad pueda considerar.

En este documento, resumiremos algunos antecedentes que dan cuenta del estado del arte para la estimación del potencial de evacuación peatonal por tsunami en ciudades costeras, realizando, a modo de ejemplo, un diagnóstico para Viña del Mar. Para ello contextualizamos la amenaza de tsunamis que presenta la costa central de Chile, analizando las estrategias actuales de evacuación en la zona, y contrastándolas con la alternativa de evacuar verticalmente. Los resultados de este diagnóstico guiaron la posterior revisión de la experiencia internacional respecto a la evacuación vertical, complementada también con experiencias recientes del impacto de tsunamis en edificios diseñados bajo la normativa chilena. Finalmente, se plantean criterios y recomendaciones que debieran ser abordados con mayor profundidad antes de proceder a la implementación de planes de evacuación vertical a nivel nacional.

[1]

<http://siedu.ine.cl/>

[2]

El tamaño de un sismo se mide en unidades de magnitud a partir de los registros en sismogramas de un evento sísmico. La magnitud momento (M_w) indica el tamaño de un sismo, al igual que la magnitud local M_l (conocida como magnitud Richter). A diferencia de la escala de Richter, la M_w no se satura por lo que permite describir de manera correcta los sismos más grandes.

1. LA AMENAZA DE TSUNAMI EN LA COSTA CENTRAL DE CHILE

En Chile y el sur de Perú han ocurrido al menos 30 terremotos con magnitud de momento mayor a M_w ^[2] 8 que han generado tsunamis; entre ellos existe evidencia, a partir de registros desde 1571, de que al menos 25 han producido tsunamis con alturas de ola superiores a 1 m (NGDC, 2019).

Amenaza: recurrencia de sismos

Conocer la recurrencia de los sismos y tsunamis requiere de la integración de muchos conocimientos y registros. Por ejemplo, Poulos et al. (2018a) proponen a través de métodos estadísticos los parámetros de sismicidad a lo largo de Chile de los cuales se puede obtener la recurrencia de sismos. Se estima que en promedio cada 10 años ocurre en alguna parte de Chile un sismo de magnitud igual o superior a M_w 8. Sin embargo, cuando se analiza el catálogo de eventos sísmicos del país desde finales del siglo XIX, a una escala regional, teniendo en cuenta criterios de segmentación, la recurrencia estimada para estos eventos se acerca en promedio a los 80 años.

Desde el punto de vista de la recurrencia de terremotos estimada a partir de catálogos sísmicos, la probabilidad de ruptura de un gran evento como el de 1730, con un tamaño entre M_w 9 a 9,2, varía entre 580 y 1.000 años respectivamente (Zamora et al. 2018). Si bien sabemos que existe gran incertidumbre asociada a la estimación del tiempo entre megaterremotos, la recurrencia para eventos sobre M_w 9 podría ser más consistente con la repetición de grandes sismos cada 400-500 años sugerida por Dura et al. (2015).

Se estima que en promedio cada 10 años, ocurre un sismo de magnitud igual o superior a M_w 8 en alguna parte de Chile. Particularmente, la región de Valparaíso ha sido afectada por al menos seis sismos de magnitud cercana a M_w 8 en los últimos 500 años que han generado tsunamis de mediana intensidad.

Esto puede traducirse en una frecuencia promedio de al menos un evento de esta magnitud cada 80 años. Estos eventos, como los terremotos de 1822, 1906 y 1985, ocurrieron a lo largo de un segmento sismo tectónico conocido como el segmento central o el segmento de Valparaíso. Por otro lado, los datos paleosismológicos han abierto una ventana de información al pasado indicando que sismos de magnitudes superiores a M_w 8,5 han ocurrido en promedio cada 400-500 años generando tsunamis cuyos depósitos sedimentarios han sido estudiados en la zona de Quintero (Carvajal et al. 2017; Dura et al. 2015).

Uno de los tsunamis que representan un escenario extremo, y de los cuales se tienen mayores datos tanto geológicos (evidencia en el subsuelo), como en registros históricos, es el

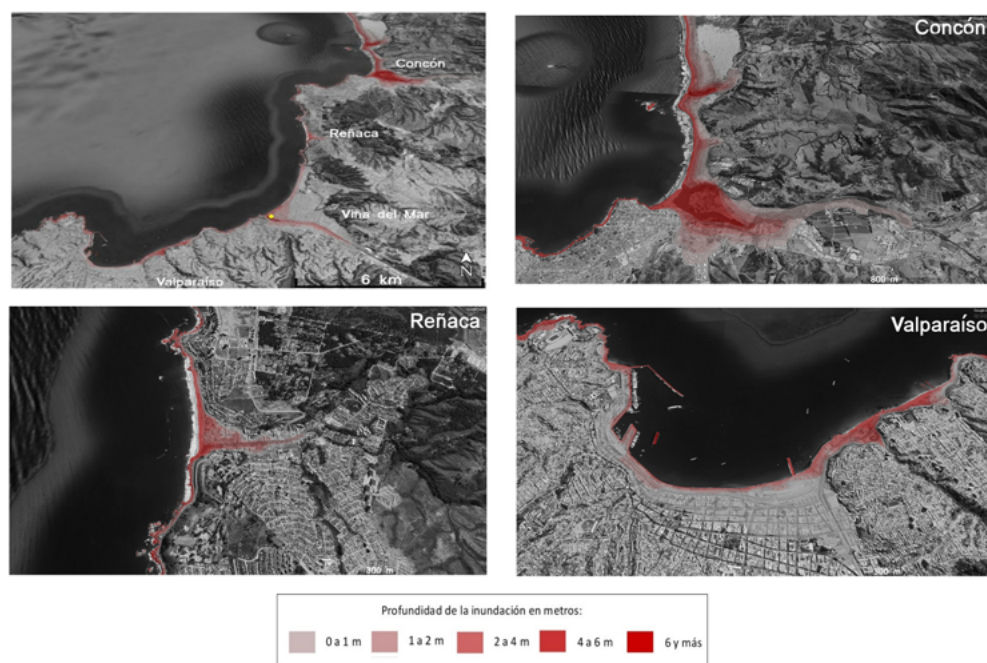


Figura 1. Mapa de la profundidad de inundación por tsunami elaborada con base a la caracterización sísmica del terremoto de 1730. Círculo amarillo indica ubicación del Casino de Viña del Mar.

Fuente: Modificado a partir de la carta CITSU (SHOA) Valparaíso y Concón.

gran sismo de Valparaíso de 1730, para el que se ha estimado recientemente una magnitud entre M_w 9,1 y 9,3 (Carvajal et al. 2017).

La Carta de Inundación por Tsunami (CITSU) elaborada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) considera un sismo similar al evento de 1730. Las profundidades de inundación esperadas superan los 6 m en la zona del Casino de Viña del Mar y Concón, penetrando hasta 5,5 km en el humedal del río Aconcagua, 4 km en el cauce del Marga-Marga en Viña del Mar, mientras que en Reñaca la inundación podría extenderse según este modelo hasta 1,5 km (ver Figura 1). En Valparaíso, las profundidades modeladas tienden a ser algo menores y la inundación podría extenderse hasta 1 km.

Es importante resaltar que la inundación de tsunamis está determinada en gran medida por las características de la ruptura sísmica y las condiciones topográficas, y que existe gran incertidumbre en relación a la forma en que esta ruptura se podría producir.

2. EXPOSICIÓN FRENTE A TSUNAMIS DE LA CIUDAD DE VIÑA DEL MAR Y PLAN DE EVACUACIÓN VIGENTE

El centro histórico de Viña del Mar y el sector de la Población Vergara (al norte del estero Marga-Marga) están ubicados en una zona que por su configuración geomorfológica (amplio frente costero y baja elevación) se encuentra expuesta a la amenaza de tsunamis. Desde sus inicios, el desarrollo urbano de la ciudad contempló un uso mixto industrial-residencial y comercial-residencial al norte y sur del estero Marga-Marga, respectivamente. En la actualidad, esta zona constituye la centralidad más importante del área metropolitana del Gran Valparaíso, con una importante aglomeración de equipamiento turístico, comercial y de todo tipo de servicios, en conjunto con zonas residenciales de primera y segunda vivienda. Cuenta con una población residente de aproximadamente 35.000 personas, cerca del 10% de la comuna de Viña del Mar (Censo 2017), y presenta una gran variación de población flotante.

Frente a esta desfavorable condición de exposición, la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI), el SHOA, y la Municipalidad de Viña del Mar han trabajado desde hace varios años en un plan de respuesta de la población basado en la auto-evacuación en caso de una alarma de tsunami de campo cercano, es decir en el caso en que la ruptura sísmica esté a menos de 300 km de la costa. El SHOA desarrolló la primera carta de inundación por tsunami para la ciudad en el año 1999, la que fue actualizada en el año 2012. Esto condujo a la elaboración del primer plan de evacuación de la ciudad y el desarrollo de tres simulacros de evacuación realizados en los años 2012, 2013 y 2016. En el área central de la ciudad, el protocolo establecido en el plan de evacuación contempla 15 puntos de encuentro (PE), ubicados sobre la cota +30 m.s.n.m., y 19 rutas recomendadas, algunas de las cuales tienen asociados recorridos de más de 2,5 km hasta el punto de encuentro más cercano.

Teniendo en consideración la posibilidad de enfrentar un sismo de las características del evento de 1730, es fundamental trabajar en medidas para mitigar los impactos que este podría causar, y resguardar la vida de las personas. A continuación, exponemos la evidencia que sustenta la necesidad de establecer la evacuación vertical como un mecanismo efectivo de reducción del riesgo de desastres ante un sismo y tsunami de gran magnitud.

Modelo de agentes

Los modelos de agentes son herramientas de cálculo computacional estocástico y recursivo que permiten examinar en detalle sistemas de la vida real, junto con las interacciones dinámicas entre sus elementos individuales, mediante (1) la desagregación de estos elementos en unidades representativas, los "agentes"; (2) la codificación del comportamiento de estos agentes en un conjunto de reglas; y (3) la observación de cómo estas reglas afectan la interacción entre ellos y con su entorno.

3. POTENCIAL DE EVACUACIÓN

El potencial de evacuación de una comunidad frente a una amenaza de tsunami de campo cercano ha sido tradicionalmente evaluado en base a simulacros donde se analizan factores como los tiempos de desplazamiento de la población y las dificultades que esta encuentra a lo largo de las rutas de escape. Sin embargo, como plantean Mas et al. (2013), los simulacros conllevan una serie de problemáticas tales como la falta de participación, la interrupción de las actividades cotidianas, la dificultad de repetición frecuente y el alto costo de implementación. Frente a estas dificultades, en años recientes se han desarrollado modelos computacionales de evacuación peatonal y vehicular que permiten simular distintos escenarios considerando tanto la topografía y el diseño urbano, como las características de la población.

León et al. (2019) desarrollaron un modelo de evacuación peatonal de agentes para el área de la Población Vergara en Viña del Mar, el que ha sido cruzado con los tiempos de arribo de un tsunami similar al producido por el terremoto del 8 de julio 1730. El modelo simula en detalle el proceso de inundación por tsunami, el que es contrastado con distintas realizaciones de evacuación considerando las características de los individuos, las rutas de evacuación y el tiempo de inicio de la evacuación. Este modelo se basa en el protocolo de evacuación de ONEMI (utilizando como destino sus puntos de encuentro, PE) y considera dos tipos de distribución de población (los "agentes"): diurna (53.743 personas) y nocturna (28.296 residentes); estos escenarios fueron definidos en base a la encuesta origen-destino en el Gran Valparaíso de SECTRA^[3] (2016).

[3]

Secretaría de Planificación de Transporte.

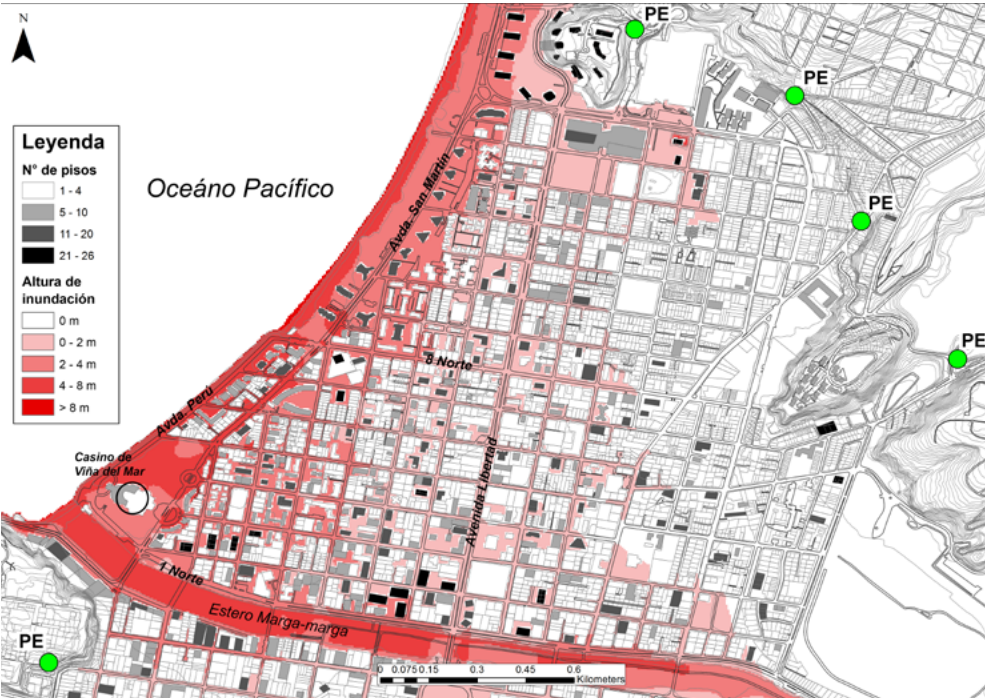


Figura 2. Distribución de profundidades de inundación en la Población Vergara de Viña del Mar, considerando un escenario de tsunami similar al de 1730.

*Fuente: Distribución de profundidades obtenida de Carvajal et al., 2017.
Clasificación de edificaciones según número de pisos y ubicación de Puntos de Encuentro (PE)
definidos por el plan de evacuación de ONEMI.*

La superposición dinámica entre los resultados del modelo de inundación y de evacuación permite clasificar en cada instante de tiempo a cada individuo o agente en una de tres categorías posibles: a salvo (es decir, ya en el refugio), en movimiento (no en el refugio, pero tampoco alcanzado por el agua) y fallecido (es decir, alcanzado por el agua). El intervalo de análisis del modelo comprende 45 minutos, que es el tiempo requerido para alcanzar la máxima penetración tierra adentro del tsunami en el área de estudio. En la Figura 2 se presenta la distribución de profundidades de inundación por tsunami en la población Vergara de Viña del Mar, para un escenario similar al de 1730.

Los resultados de León et al. (2019) muestran que un número significativo de personas ubicadas en las áreas costeras de la Población Vergara de Viña del Mar sería alcanzada por el tsunami antes de llegar al PE más cercano. Más aún, durante los 20 primeros minutos de ocurrido el terremoto,

alrededor de un 38% de la población no podría alcanzar la zona de seguridad. Los tiempos de recorrido peatonal entre las zonas más expuestas a tsunami (cercanías del Casino de Viña del Mar) y los PE más cercanos pueden ser superiores a los 30 minutos. Cabe señalar que esta área concentra la mayoría del equipamiento turístico del sector, con una alta población flotante, especialmente durante la temporada de verano. Esta situación complejizaría aún más la respuesta de la evacuación en un escenario del tipo de 1730. Adicionalmente, el análisis de “micro-escala” urbana de evacuación desarrollado por León et al. (2019) mostró que el espacio peatonal disponible a lo largo de las rutas de escape de estas zonas puede estar obstruido en hasta un 12% por elementos tales como autos mal estacionados, veredas deterioradas, y mobiliario de restaurantes y tiendas, entre otros, aumentando los tiempos de evacuación.

4. EVACUACIÓN VERTICAL

Los estudios disponibles han demostrado la alta exposición de los habitantes de la zona costera central de Viña del Mar frente a un tsunami de campo cercano similar al de 1730, y las dificultades existentes para acceder a zonas seguras en el escaso tiempo disponible para la evacuación. Este diagnóstico amerita la revisión de la evidencia y de experiencias internacionales que demuestran la efectividad de la evacuación vertical en la reducción de estos tiempos y, por lo tanto, en la reducción del número de personas potencialmente alcanzadas por el tsunami.

4.1 LA EXPERIENCIA INTERNACIONAL

La problemática de la evacuación vertical ya ha sido abordada en forma práctica en tres países también expuestos a la amenaza de tsunamis: Japón, Estados Unidos e Indonesia. En estos países, son tres las principales tipologías de evacuación vertical que se han desarrollado: (1) edificaciones construidas ad-hoc (torres, edificios o plataformas elevadas sobre el nivel esperado de inundación); (2) utilización de edificaciones previamente existentes, modificadas o adaptadas para mejorar su uso para la evacuación vertical; y (3) cerros o colinas artificiales.

En el caso de Japón, se han construido un número significativo de torres y plataformas de evacuación vertical, utilizando tanto hormigón armado como acero, con capacidad para cientos de personas, las cuales pueden ser accedidas durante emergencias mediante apertura remota.

También se han modificado edificios existentes con la inserción de escaleras externas accesibles directamente desde la calle, conducentes a la azotea o terrazas en pisos superiores. Además, se han construido cerros artificiales en zonas de muy baja elevación como la costa de Sendai, destinados a ofrecer un escape de último minuto a la población. Estas tipologías se resumen en la Figura 3.

En el caso de Estados Unidos, la discusión acerca de la necesidad de construir refugios para la evacuación vertical se ha venido desarrollando principalmente en la costa noroeste del país (estados de Washington y Oregon), expuesta a tsunamis potencialmente originados en la zona de subducción de Cascadia. El primero de estos refugios se terminó de construir en el año 2017 en la escuela primaria de Ocosta, a unos 150 km al suroeste de Seattle. Con este objetivo se habilitó el techo del gimnasio de la escuela como una plataforma de evacuación vertical, con capacidad máxima de 2.000 personas y una elevación de alrededor de 16 m.s.n.m (ver Figura 4).

Finalmente, en Indonesia (país afectado por tsunamis destructivos en 2004, 2010 y 2018) también se han construido numerosas edificaciones ad-hoc para evacuación vertical, en especial durante el proceso de reconstrucción iniciado luego de la catástrofe de 2004. Estos edificios son de hormigón armado, de altura entre 14 y 16 metros, con facilidades de acceso (escaleras anchas y rampas para discapacitados) y además están diseñados para albergar otros usos durante tiempos de no-emergencia: religioso, deportivo, comunitario etc. Algunos ejemplos se pueden ver en la Figura 5.



Figura 3. Torres para evacuación vertical (izquierda y centro) y cerro artificial para evacuación (derecha), Japón.

*Fuentes: izquierda y centro, FEMA (2008).
Derecha, archivo personal de Jorge León (2016).*

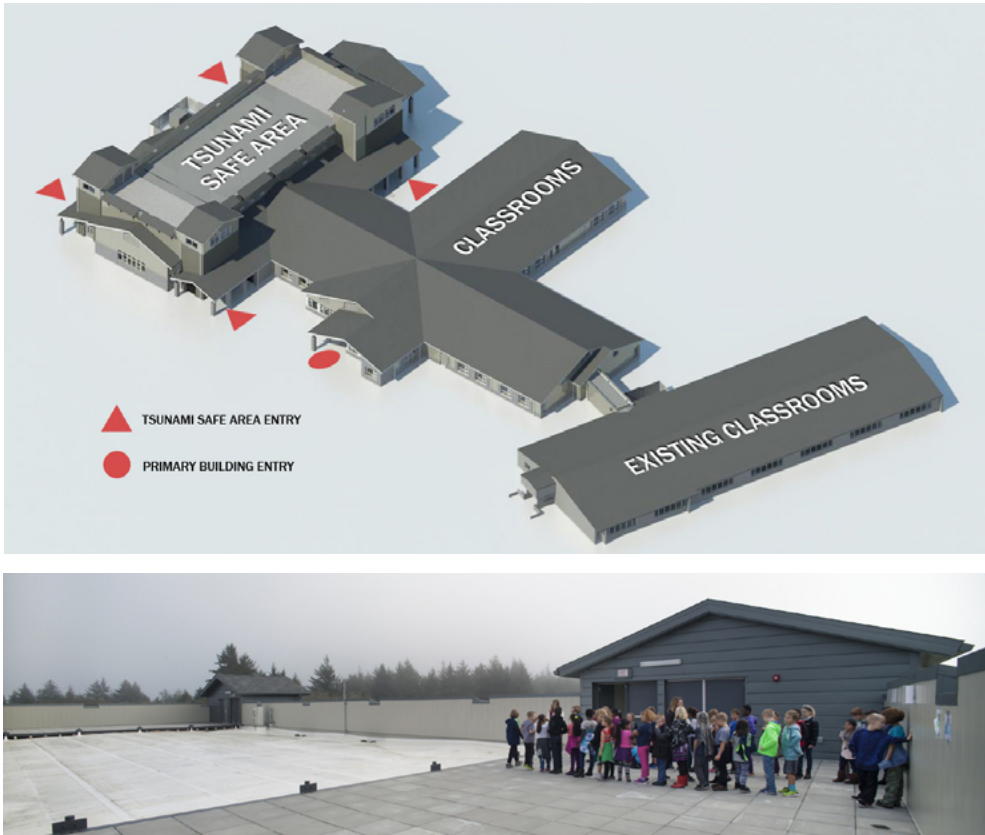


Figura 4. Zona de evacuación vertical en escuela primaria de Ocosta, Washington, Estados Unidos.

Fuente: <https://www.tcfarchitecture.com/project/ocosta-elementary-school/>



Figura 5. Edificaciones para evacuación vertical en Banda Aceh, Indonesia.

Fuentes: imagen izquierda, https://intl-tsunami.org/history/general-assembly/20181119/mt_muzailin.pdf
 Imagen derecha, http://discovertsunamis.org/tsunami_science_u7.html

4.2 CONTEXTUALIZACIÓN A LA SITUACIÓN ANALIZADA EN VIÑA DEL MAR

Frente al diagnóstico realizado en la población Vergara de Viña del Mar, León et al. (2019) utilizan el modelo de simulación descrito anteriormente para evaluar el efecto potencial de incluir en el área de estudio 14 edificios para evacuación vertical. Estos edificios fueron identificados en terreno a partir de los siguientes requerimientos: (1) estructura de hormigón armado; (2) altura superior a los 8 pisos^[4]; (3) un uso público (no residencial) para garantizar el acceso de las personas; y (4) una superficie adecuada en relación al número esperado de evacuados (teniendo en cuenta el estándar de 0,93 m² por persona sugerido por FEMA (2008)). Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones muestran una reducción significativa de los tiempos requeridos de evacuación, permitiendo bajar la posible tasa de fallecidos a 0% y logrando que toda la población llegue a zona segura en los primeros 20 minutos después de ocurrido el terremoto.

Es importante señalar que los resultados publicados por León et al. (2019) no incluyen el tiempo requerido para subir por las escaleras de los edificios hasta la cota de seguridad y se asume que en cada edificio hay suficiente espacio para albergar a los evacuados que tienen designado ese punto de encuentro. Estas limitaciones han sido corregidas incorporando mayor detalle en los modelos de agentes de manera de capturar de forma natural el problema de congestión que se puede generar en escaleras y al llegar al último piso del edificio (Poulos et al. 2018b). Esta versión del modelo de agentes ya ha sido utilizada para evaluar evacuaciones masivas de ciudades costeras considerando escombros y otros obstáculos que se pudieran generar sobre las vías de evacuación (Castro et al. 2019), y está disponible para analizar a una micro-escala, los procesos de evacuación. A modo de ejemplo, en la Figura 6 se muestran las curvas de evacuación calculadas por este modelo para dos tipologías de plantas distintas de edificios^[5]. A partir de las estimaciones de León et al. (2019), estas curvas se han construido asumiendo un ingreso uniforme de los agentes al edificio hasta el minuto 12. Para cada edificio se consideró el estándar FEMA (2008) que sugiere un factor de 0,93 m² por persona. De esta forma, se tiene para estos ejemplos que, en promedio, el 50% de las personas asignadas a un edificio les tomaría un poco menos de 8 minutos en llegar al octavo piso. Es importante entonces, el realizar este tipo de análisis a la micro-escala, considerando las configuraciones reales de los potenciales edificios designados para una evacuación vertical.

[4]

De forma tal de alcanzar la altura estándar internacional de evacuación en caso de tsunami, correspondiente a 30 metros.

[5]

Las plantas utilizadas en este análisis han sido diseñadas para capturar la estructura típica de edificios residenciales de Chile, es decir con largos pasillos y escaleras amplias de evacuación, sin necesariamente tener las mismas dimensiones de los edificios presentados como probables estructuras capaces de albergar una evacuación vertical.

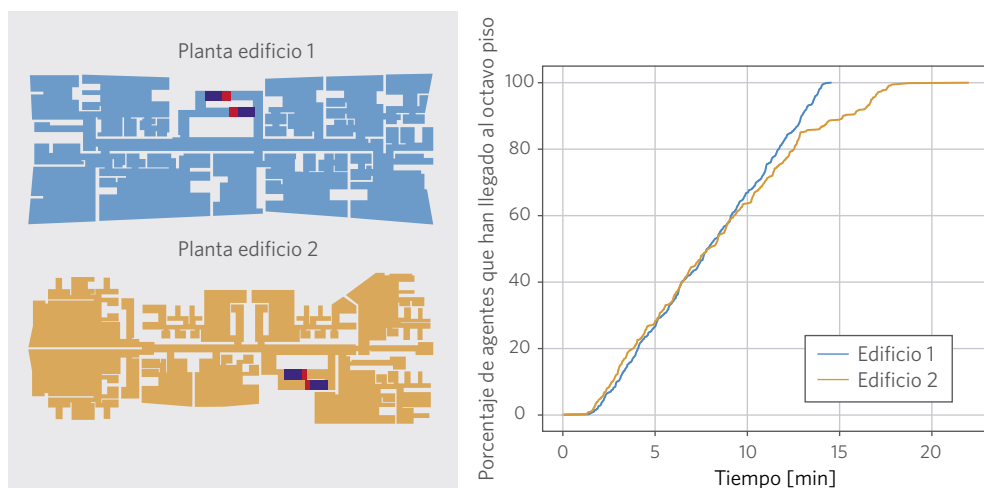


Figura 6: Ejemplo de evaluación de los tiempos que le toman a los agentes subir al octavo piso de un edificio considerando dos tipologías distintas en planta. A la izquierda, las plantas de los edificios considerados en las simulaciones de evacuación vertical (en azul y rojo se muestra la ubicación de las escaleras). A la derecha, tiempos de llegada al octavo piso para cada tipología.

Fuente: Sebastián Castro, CIGIDEN.

5. REQUERIMIENTOS Y RECOMENDACIONES PARA ABORDAR LA EVACUACIÓN VERTICAL EN CHILE

Todas las estrategias de evacuación vertical presentadas anteriormente deben tener en cuenta un conjunto de dimensiones relevantes, las cuales deben abordarse para analizar posibles soluciones de este tipo en Chile.

En primer lugar, aquellas referidas a sus características morfológicas: (1) el emplazamiento de los sitios para la construcción de los edificios de evacuación vertical, determinado por factores como la propiedad del suelo, debe estar vinculado con las principales rutas de evacuación existentes; (2) la cantidad mínima de superficie de evacuación que debe proveerse debe ser al menos de $0,93 \text{ m}^2$ por persona, de acuerdo a las recomendaciones FEMA (2008), como se señalaba anteriormente; (3) debe contemplarse un número adecuado de accesos con características apropiadas (visibilidad desde el exterior, dimensiones), directamente conectados con las rutas interiores de circulación del edificio; y (4) debe incluirse un sistema interior de circulación apto para funcionar tanto bajo condiciones de normalidad como de emergencia, con anchos suficientes de pasillos y escaleras, de accesibilidad universal, ausencia de obstáculos en los mismos, señalética e iluminación autónoma.

En segundo lugar, deben tenerse en consideración las características de ocupación y gestión que estas infraestructuras deben cumplir: (1) se debe garantizar el libre acceso de la población durante una emergencia, tanto en horario diurno como nocturno; (2) hay que disponer de personal entrenado para guiar a la población en caso de una emergencia; (3) se debe establecer un programa de subsidios o reducción de impuestos en caso de edificaciones privadas utilizadas como refugios; (4) se requiere establecer un programa periódico de revisiones para estos edificios; y (5) deben establecerse estrategias de vinculación y participación ciudadana para fomentar el buen uso y cuidado de estas infraestructuras.

Igualmente, las consideraciones estructurales de los edificios deben ser verificadas para asegurar un correcto desempeño frente a los efectos del terremoto y tsunami. En el caso chileno, la normativa vigente respecto del diseño estructural de edificaciones en área de riesgo de inundación por tsunami o seiche (Nch3369:2015), permite el diseño de estructuras de evacuación vertical, haciendo referencia a la norma americana FEMA P646 (FEMA, 2008) para diseñar este tipo de estructuras.

Para poder considerar un edificio existente como posible refugio de evacuación vertical, es necesario desarrollar una evaluación de los aspectos funcionales y estructurales de la edificación considerando múltiples amenazas, es decir, la acción de sismo y tsunami. Respecto de la acción sísmica, las estructuras para refugio de evacuación vertical deben ser diseñadas como estructuras de tipo esencial, esto es con categoría de ocupación IV, al igual que hospitales, cuarteles, colegios, edificaciones gubernamentales, etc. Esto se traduce en una sollicitación sísmica 20% mayor que la considerada para edificios de categoría de ocupación normal.

Respecto de la acción del tsunami, la norma FEMA P646 (FEMA 2008) especifica las distintas cargas a considerar sobre la estructura^[6]. Estas sollicitaciones se deben considerar actuando en conjunto con el 100% de la carga viva en el área de evacuación.

En el caso chileno, dadas las condiciones de nuestro país, es altamente probable que sea la condición sísmica la que controle el diseño estructural del edificio de evacuación vertical y no la condición de tsunami. Además, estudios han mostrado que la capacidad de los edificios de muros de hormigón armado mantiene su resistencia frente a la acción del tsunami incluso cuando hay algún nivel de daño previo por sismo. Sin embargo, para considerar adecuadamente el diseño para evacuación vertical en el caso de nuestro país, se sugiere analizar el efecto que tendría la acción sísmica, por ejemplo, de una réplica significativa, en conjunto con la condición en que el edificio se encuentra en uso para evacuación vertical.

[6]

Fuerzas hidrostáticas, de flotación, hidrodinámicas, impulsivas, impacto de escombros, fuerzas de levantamiento, fuerza gravitacional adicional producto del agua retenida en pisos superiores.

La evidencia histórica en Chile

Aunque en el caso chileno se ha observado daño significativo a edificaciones durante tsunamis o inundaciones costeras, también se han observado muchos ejemplos de edificios de mediana y gran altura que han sido diseñados con estándares de ingeniería que han resistido satisfactoriamente la inundación por tsunami; esto es la principal motivación que sustenta la evacuación vertical. Por ejemplo, luego del sismo y tsunami de Illapel en 2015 se realizó un estudio de reconocimiento de daños, y se observó que al menos 4 edificios de hormigón armado de más de 8 pisos en la zona de inundación de Coquimbo habían sido directamente afectados por el tsunami. Estos edificios no evidenciaron daño estructural por la acción del tsunami, y solo se observó daño en elementos no-estructurales en los primeros pisos de los edificios, tal como se observa en la Figura 7. Esto muestra que la experiencia chilena también es favorable en cuanto al buen desempeño de los edificios frente a la acción de tsunami, y que algunas estructuras ya existentes podrían servir como eventuales refugios de evacuación vertical.



Figura 7: a) Vista de la bahía de Coquimbo luego del terremoto y tsunami de Illapel, 2015; b) edificio expuesto a la acción del tsunami en la bahía de Coquimbo; c) daños en elementos no-estructurales observados producto de la acción del tsunami.

Fuente: Archivo personal Rosita Jünemann (2015).

La condición de una alta sobrecarga concentrada en alguna zona del edificio en conjunto con la acción sísmica podría eventualmente afectar las características dinámicas de la estructura y su respuesta frente a una réplica significativa del sismo. Esta condición no está contemplada en la actual normativa FEMA P646 (FEMA 2008).

Otros de los aspectos que es necesario evaluar, y que puede ser crítico en el caso de edificios construidos sobre zonas de relleno arenoso (de origen lacustre o aluvial), son las condiciones de respuesta geotécnica del suelo. La acción del terremoto puede generar, bajo ciertas condiciones, la licuefacción de los suelos sobre los cuales están fundados los edificios, lo que podría incidir en una disminución de su resistencia. Si el tsunami llegara en tiempos cortos luego del terremoto, la respuesta estructural del edificio podría verse influida por la condición de licuefacción previa del suelo. Existe evidencia reciente en eventos de terremoto y tsunami en Japón e Indonesia que sugieren el incorporar también este tipo de análisis al momento de evaluar el potencial uso de infraestructura para fines de evacuación vertical.

6. CONCLUSIONES

Estudios recientes que han combinado registros y evidencia histórica con levantamientos de paleo-tsunamis, han establecido que en promedio una zona sismogénica frente a las costas de Chile puede verse afectada por terremotos de subducción de magnitud de momento cercano a M_w 8 cada 10 años. Del mismo modo, se ha podido establecer que la recurrencia de mega terremotos, con magnitudes cercanas a 9 M_w , variaría entre 400 y 500 años, pero con un elevado nivel de incertidumbre sobre esta estimación. Por otro lado, el conocimiento científico más reciente ha precisado las características del terremoto y tsunami ocurrido el 8 de julio de 1730 frente a las costas de la Región de Valparaíso, asignándole una magnitud entre M_w 9,1 y 9,3. Este evento constituye entonces el último mega terremoto de subducción registrado en la zona central de Chile. De acuerdo a lo anterior, esta laguna sísmica, de casi 300 años, podría tener energía acumulada suficiente para poder generar un terremoto tsunamigénico cuyo foco podría situarse frente a las costas de Valparaíso.

Los análisis realizados con base al escenario sísmico de 1730 indican que la planicie ubicada en la desembocadura del Marga-Marga en Viña del Mar, donde se ubica la Población Vergara, estaría altamente expuesta a la inundación de un tsunami producido por un terremoto de esas características. Lo anterior ha motivado la presentación de este trabajo

que resume diversos estudios realizados por CIGIDEN en relación al potencial de evacuación de esta zona altamente poblada y el cruce con las variables de intensidad de un posible tsunami. Los resultados dan cuenta de la necesidad de incorporar la evacuación vertical dentro de las alternativas de mitigación existentes actualmente en el país. Existen experiencias internacionales que pueden ser recogidas y contextualizadas a la situación nacional para poder avanzar en la definición de criterios, normativas o estándares que permitan la implementación de la evacuación vertical en Chile. Diversos criterios y consideraciones para poder avanzar en la definición de una política como esta, han sido presentadas resumidamente en este documento con el objeto de contribuir a las discusiones que ya están teniendo lugar en el país en relación a este tema.

REFERENCIAS

- Cáceres Quiero, G., Booth, R., & Sabatini, F. (2002). La suburbanización de Valparaíso y el origen de Viña del Mar: entre la villa balnearia y el suburbio de ferrocarril (1870-1910). *Las puertas al mar: consumo, ocio y política en Mar del Plata. Biblos, Buenos Aires*. Pp, 38-50.
- Carvajal, M., Cisternas, M., & Catalán, P. A. (2017). Source of the 1730 Chilean earthquake from historical records: Implications for the future tsunami hazard on the coast of Metropolitan Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(5), 3648-3660.
- Castro, S., Poulos, A., Herrera, J. C., & de la Llera, J. C. (2019). Modeling the Impact of Earthquake-Induced Debris on Tsunami Evacuation Times of Coastal Cities. *Earthquake Spectra*, 35(1), 137-158.
- Censo 2017. Estimación y proyecciones de la población de Chile 1992-2015. Instituto Nacional de Estadísticas, 2017. <https://www.censo2017.cl/>
- Cortés, M. (2010). El balneario y la conquista formalizada del borde costero: continuidades y fragmentos en Viña del Mar, 1928-1963.
- Dura, T., Cisternas, M., Horton, B. P., Ely, L. L., Nelson, A. R., Wesson, R. L., & Pilarczyk, J. E. (2015). Coastal evidence for Holocene subduction-zone earthquakes and tsunamis in central Chile. *Quaternary Science Reviews*, 113, 93-111.
- FEMA, F. (2008). Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis. *Federal Emergency Management Agency, Washington, DC*.
- León, J., Mokrani, C., Catalán, P., Cienfuegos, R., & Femenías, C. (2018). The role of built environment's physical urban form in supporting rapid tsunami evacuations: using computer-based models and real-world data as examination tools. *Frontiers in Built Environment*, 4, 89.
- 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.
- NGDC 2019. NGDC/WDS Tsunami Event Database. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2019. <https://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=70&d=7>
- Pecchenino, R. (1974). *Apuntes Viñamarinos: cien años de urbanidad*. Ediciones Universitarias, Valparaíso.
- Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., & de la Llera, J. C. (2018). An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statistical Validation of Its Poisson Nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1), 66-74.
- Poulos, A., Tocornal, F., de la Llera, J. C., & Mitrani-Reiser, J. (2018). Validation of an agent-based building evacuation model with a school drill. *Transportation research part C: emerging technologies*, 97, 82-95.
- SECTRA, 2016. Encuesta de Origen-Destino de Viajes Gran Valparaíso. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Telecomunicaciones, 2016. http://www.sectra.gob.cl/encuestas_movilidad/encuestas_movilidad.htm
- Zamora, N., Poulos, A., Pinilla D., Catalán, P. (2018). Probabilistic tsunami hazard assessment along Chile: the quest for a reliable model. *American Geophysical Union*. NH41C-1000, Washington D.C.

NOTAS



CIGIDEN

Centro de Investigación
para la Gestión Integrada
del Riesgo de Desastres



SOBRE CIGIDEN

CIGIDEN es un centro de excelencia FONDAP-CONICYT creado en 2011 e integrado por cuatro universidades de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Técnica Federico Santa María, Universidad Andrés Bello y Universidad Católica de Norte, más la colaboración de investigadores de otras instituciones académicas y gubernamentales tanto nacionales como internacionales.

Investigadores de diferentes disciplinas —ciencias de la tierra, ingenierías, ciencias sociales, geografía, economía, diseño, arquitectura, urbanismo y comunicaciones—, trabajan en CIGIDEN para generar conocimiento que permita evitar que los eventos extremos de la naturaleza se transformen en desastres.

Esta mirada interdisciplinaria ha promovido una profunda transformación académica, avanzando desde el estudio de las amenazas naturales y la respuesta de emergencia, hacia una perspectiva integral centrada en la reducción del riesgo de desastres y la construcción de resiliencia.



El Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres, CIGIDEN, es una institución de excelencia FONDAP-CONICYT creada en 2011 e integrada por cuatro universidades chilenas. La Serie Policy Papers CIGIDEN tiene como objetivo traducir la investigación que se realiza en el centro, en documentos cortos y direccionados estratégicamente a la política pública, para así posicionar la temática de gestión del riesgo en el mundo de los tomadores de decisiones.



CIGIDEN

Centro de Investigación
para la Gestión Integrada
del Riesgo de Desastres

www.cigiden.cl