



Modelo de evaluación de vulnerabilidad física para viviendas del sector Bellavista, comuna de Tomé.

C. Quiñones Bustos¹, C. Oyarzo Vera² y M.T. Bull Torres³

RESUMEN

En este estudio se generó una metodología para la medición de la vulnerabilidad en zonas costera, mediante cálculos de índices de vulnerabilidad física, aplicado en el sector Bellavista, en la comuna de Tomé, Región del Biobío, Chile. En la comuna de Tomé en especial el sector Bellavista se encuentra afectada por diversas amenazas como tsunamis, inundaciones, derrumbes y terremotos. Esta investigación propone realizar un análisis de vulnerabilidad a el sector Bellavista, mediante un índice que sea capaz de cuantificar la susceptibilidad al daño provocado por terremotos y tsunamis. Este método combina parámetros tanto costeros como sísmicos, los cuales se aplicaron en cada ecuación para obtener el índice de vulnerabilidad físico. Este estudio permitió caracterizar y zonificar el sector en función del riesgo de terremoto y tsunami. Este estudio constituye una poderosa herramienta, para que tomadores de decisión, tales como municipalidades y organismos de emergencia, visualicen de mejor forma los sectores con menor capacidad de respuesta y a los cuales se les hará más difícil lograr una recuperación. Este modelo es aplicable a diversos sectores costeros de Chile cuya vulnerabilidad ante terremotos y tsunamis aún no ha sido caracterizada y mucho menos cuantificada.

PALABRAS CLAVES: Vulnerabilidad costera; vulnerabilidad sísmica.

ABSTRACT

In this study, a methodology was created for assessing vulnerability in coastal zones by calculations of physical vulnerability indexes. This method was applied to houses in the neighborhood Bellavista, in Tomé, Biobío Region, Chile. The city of Tomé is affected by different kind of hazards such as tsunamis, floods, landslides and earthquakes. This research proposes a vulnerability analysis to the Bellavista neighborhood, through an index that is capable of quantify the susceptibility to damage caused by earthquakes and tsunamis. This method combines, both coastal and seismic parameters, which were applied in each equation to obtain the physical vulnerability index. This study allowed the characterization and zonation based on earthquake and tsunami risk. This study is a powerful tool for decision makers, such as municipalities and emergency agencies, to better visualize the sectors with lower response capacity and which will make it more difficult to achieve a recovery. This model is applicable to various coastal sectors of Chile whose vulnerability to earthquakes and tsunamis has not yet been characterized nor quantified.

KEYWORDS: Coastal vulnerability; seismic vulnerability.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, cquinones@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, coyartzov@ucsc.cl

³ Profesor Co-Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mbull@ucsc.cl

1. INTRODUCCION

Chile es un país con diversos riesgos entre ellos erupciones volcánicas, derrumbes, tsunamis y terremotos siendo estos dos últimos los que generan mayor preocupación, puesto que Chile se encuentra ubicado en la zona de convergencia de dos placas tectónicas, haciéndolo un país altamente sísmico y con altas probabilidades de sufrir tsunamis que afecten sus costas.

La motivación de este estudio es generar herramientas para informar de mejor manera a los habitantes, organismos de emergencia y autoridades de la zona respecto a la vulnerabilidad de las viviendas y el riesgo al que se enfrentan ante diferentes tipos de amenazas. En concreto, se propone un nuevo modelo de evaluación de vulnerabilidad física para las viviendas, el cual permitirá caracterizar y zonificar los sectores en función del riesgo. Para esta investigación se consideró como zona de estudio el sector Bellavista en la comuna de Tomé. Este sector corresponde a una de las zonas costeras que se ha visto afectada por diversos fenómenos geológicos en el último tiempo, tales como tsunamis, terremotos, inundaciones y remociones en masa.

La propuesta de un modelo de evaluación de vulnerabilidad física para las viviendas del sector Bellavista en la comuna de Tomé, no solo permite evaluar la vulnerabilidad existente de la zona costera, sino que además permite entregar a las autoridades y población del sector una información de mejor calidad, creando conciencia y eliminando los mitos creados respecto a los riesgos que afecta a una zona determinada. Esto contribuye a la mitigación de los efectos de desastres de origen natural y al desarrollo sostenible de la comuna considerando la vulnerabilidad de cada zona.

2. ZONA DE ESTUDIO

En la imagen se puede apreciar la zona de estudio (polígono rojo) que corresponde al sector conocido como Bellavista histórico, pues corresponde al sector original y más antiguo de Bellavista. Este sector contiene además de viviendas, una serie de estructuras de valor patrimonial tales como la escuela Bellavista, el Club Deportivo Cine-Bellavista y el sindicato de trabajadores de la fábrica de paños Bellavista Oveja de Tomé.



Figura 1: Zona de estudio, sector Bellavista, Tomé, VIII Región, Chile.

3. CARACTERIZACION DE AMENAZAS Y VULNERABILIDADES

3.1. Amenazas

El grupo de investigación Gravity (2001) define la amenaza como un fenómeno potencial que amenaza al ser humano y su entorno. Los autores precisan que, en el caso de una amenaza de origen natural, dicha amenaza corresponde a la interacción potencial entre el hombre y eventos naturales externos y representa la probabilidad de un evento.

Por otro lado, Cardona (1989), define amenaza como el factor de riesgo externo de un sujeto o un sistema, representado por un peligro latente asociado con un fenómeno físico de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre, que puede manifestarse en un sitio específico y en un tiempo determinado, produciendo efectos adversos en las personas, los bienes, y/o el medio ambiente. Matemáticamente, se expresa como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad, en un sitio específico y en un periodo de tiempo determinado.

Más recientemente, Cardona & Sarmiento (1990), precisó su definición como la probabilidad de ocurrencia de un evento o resultado no deseable, con una cierta intensidad en un cierto sitio y en un cierto periodo de tiempo. Está constituida por los factores de riesgo externos, que pueden ser modificables, pero más a menudo no lo son.

Para este estudio se entenderá por amenaza la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseable, con una cierta intensidad en el sector Bellavista en la comuna de Tomé y en un cierto periodo de tiempo.

En este estudio nos enfocaremos más en dos amenazas: Terremoto y Tsunami.

a) Terremoto:

Según la ONEMI un sismo es un movimiento de la superficie terrestre que se origina por la liberación súbita de una gran cantidad de energía debido principalmente al roce de placas tectónicas, fallas geológicas o volcanismo.

La mayoría de los sismos destructores en Chile están relacionados al movimiento convergente de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana; estas placas que se comprimen entre sí, acumulan una gran cantidad de energía a lo largo de su zona de contacto, produciendo deformación en sus bordes. Cuando la energía almacenada es lo suficientemente grande, estas placas se mueven liberando parte de la energía y deformación acumulada durante decenas o cientos de años.

Los efectos que pueden ocasionar estos sismos dependen de la distancia al epicentro y del movimiento del suelo (desplazamiento, velocidad y aceleración) y se miden según la escala de Intensidad Mercalli, del I al XII. La energía liberada en la zona de ruptura de un sismo se mide en grados según la escala de Magnitud Richter, que no posee límite superior.

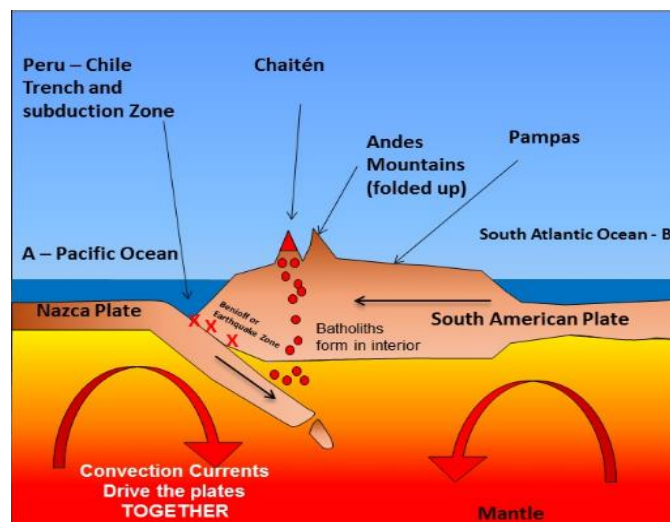


Figura 2: Zona de subducción. Fuente: Rob Gamesby (<http://coolgeography.co.uk/>)

b) Tsunami:

Según la ONEMI un tsunami corresponde a una serie de olas largas generadas en el océano que se propagan a gran velocidad en todas las direcciones desde su punto de origen. Esto se origina generalmente por una perturbación sísmica submarina (terremoto, erupción volcánica, caída de meteoritos, etc.) que impulsa y desplaza verticalmente la columna de agua. Estas olas al aproximarse a la costa, sufren alteraciones y deformaciones en su velocidad y altura, alcanzando grandes proporciones, por lo que descargan su energía con un gran poder destructor.

Todas las zonas costeras del mundo pueden experimentar tsunamis, pero la amenaza se concentra mayoritariamente frente a las costas de Chile, donde se han generado más del 50% de los eventos registrados.

También es factible que sismos en latitudes o longitudes opuestas puedan generar tsunamis que afecten las cosas chilenas. Por ejemplo, si se produce un sismo con características de terremoto en Japón, es probable que un tsunami llegue a Chile.

3.2. Vulnerabilidad

El término de vulnerabilidad posee una gran cantidad de definiciones que actualmente están en uso por investigadores que trabajan en diferentes disciplinas científicas y políticas.

Una de las definiciones la propone Vargas (2002) quien indica que: “La vulnerabilidad es la disposición interna a ser afectado por una amenaza. Si no hay vulnerabilidad, no hay destrucción o pérdida. Se define como la propensión interna de un ecosistema o de algunos de sus componentes a sufrir daño ante la presencia de determinada fuerza o energía potencialmente destructiva”.

Existen tres tipos de categorías de vulnerabilidad: la exposición destructiva ante una determinada amenaza, la incapacidad de reaccionar adecuadamente cuando la amenaza se presenta y la incompetencia para lograr la recuperación de las condiciones normales de la vida.

La escuela de la ecología humana y particularmente de Burton, la UNDRO y la UNESCO promovieron una reunión de expertos con el fin de proponer una unificación de definiciones. El informe de dicha reunión, definió vulnerabilidad como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 (sin daño) a 1 (pérdida total). En esta investigación, vulnerabilidad se entenderá como el grado de susceptibilidad al daño físico que tendrán las viviendas ubicadas en el sector Bellavista en la comuna de Tomé.

4. METODOLOGIA

Existen diferentes autores que han propuesto índices que permiten cuantificar la vulnerabilidad de un sector determinado. Entre ellos se destacan las propuestas de Gornitz (1990) y la del GNTD (1993).

La propuesta de Gornitz (1990, 1994), propone el cálculo de un índice de vulnerabilidad costero que relaciona 6 variables físicas, estos parámetros son: geomorfología, pendiente costera, tasa de aumento del nivel del mar, tasa de erosión/acreción costera, altura significativa de la ola y rango de la marea. La fórmula original propuesta por Gornitz (1990) se presenta en la Ec. (1) y la fórmula modificada por Gornitz (1994) se presenta en la Ec. (2).

$$IVC1 = \sqrt{\frac{a \times b \times c \times d \times e \times f}{6}} \quad (1)$$

$$IVC2 = \frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2 + f^2}{6} \quad (2)$$

Sin embargo, uno de los problemas que presenta la primera propuesta de Gornitz radica en que la sola presencia de un parámetro con vulnerabilidad nula, reduce a 0 la vulnerabilidad total del sector, situación que generalmente no corresponde a la realidad.

Por otro lado, la propuesta del GNTD (1993), considera parámetros tales como la calidad de los materiales y la estructuración de las viviendas, a cada parámetro se le consideró un peso. Las fórmulas utilizadas en este estudio se muestran a continuación:

$$IVS = \sum(\text{peso del factor} \times \text{ponderación}) \quad (3)$$

Es importante notar que ninguna de estas dos propuestas aborda simultáneamente el efecto de terremotos y tsunamis, fenómenos que habitualmente ocurren en conjunto en Chile.

4.1. Método propuesto

La metodología propuesta se inspira en la segunda propuesta de Gornitz (1994) y la GNTD (1993). Este nuevo índice considera siete parámetros que son multiplicados por ponderadores. Este índice se utilizó después evaluar la vulnerabilidad de las viviendas en el sector Bellavista, Comuna de Tomé.

Los parámetros considerados en la construcción del índice son: (a) pendiente costera, (b) distancia al cuerpo de agua, (c) características demográficas de la población, (d) materialidad de la vivienda, (e) número de pisos de la vivienda, (f) estado de conservación de la vivienda, y (g) uso de suelo establecido en plan regulador. Cada uno de ellos fueron evaluados en una escala de 0 a 1.

Los ponderadores utilizados para cada uno de los parámetros fueron estimados a través del análisis de 27 artículos sobre vulnerabilidad, ver Tabla 1. La búsqueda consideró artículos publicados entre el año 2000 y 2018, disponibles en las bases de datos Springer, Science Direct y Web of Knowledge, utilizando como palabras claves: vulnerabilidad física, vulnerabilidad costera y vulnerabilidad sísmica.

Una vez seleccionados los artículos, se identificó si los parámetros seleccionados coincidían con los descritos por los autores, contabilizándose el número de apariciones en los análisis de los estudios revisados. El ponderador se calculó entonces como el porcentaje de mención de un parámetro determinado respecto al total de las publicaciones analizadas.

Tabla 1: Análisis de artículos para ponderadores

Parámetro	Autor	Parámetro	Autor
Pendiente Costera	A. Sarris (2009)	Población	M. Nuno (2011)
	F. Duriyapong (2011)		F. Duriyapong (2011)
	J. Yin (2012)		C. Szlafsztein (2007)
	F. Aprilia (2015)		S. McLaughlin (2002)
	S. Torresan (2012)		M. Barros (2018)
	E. Doukakis (2005)		K. Kantamanenia (2018)
	E. Thieler (2000)		K. Pierce (2014)
	S. Bishnupriy (2018)		R. Tano (2018)
	M. Barros (2018)		M. Mamdouh (2015)
	K. Kantamanenia (2018)		S. Mclaughlin (2010)
	D. Pantusa (2018)		Materialidad
	T. Srinivasa (2010)	A. Sarris (2009)	
	M. Mamdouh (2015)	E. Maldonado (2007)	
	Gill (2014)	E. Maldonado (2007)	
	Distancia al cuerpo de agua	R. Tano (2016)	Estado de conservación
M. Mahapatra (2013)		E. Maldonado (2009)	
C. Szlafsztein (2007)		M. Hadzima-Nyarko (2016)	
S. Torresan (2012)		Uso de suelo	M. Nuno (2011)
M. Barros (2018)	F. Duriyapong (2011)		
K. Kantamanenia (2018)	G. Le Cozannet (2013)		
M. Mahapatra (2013)	Y. Jie (2012)		
Número de pisos	M. Nuno (2011)		S. McLaughlin (2002)
	A. Sarris (2009)		K. Pierce (2014)
	T. Ferreira (2016)		R. Tano (2018)
	M. Hadzima-Nyarko (2016)		S. Mclaughlin (2010)

Finalmente se llegó a 2 expresiones que permiten evaluar la vulnerabilidad física de las viviendas del sector, cuyos factores de ponderación se indican en la Tabla 2:

$$IVV_{Q1} = \frac{0.32a^2 + 0.10b^2 + 0.20c^2 + 0.06d^2 + 0.08e^2 + 0.08f^2 + 0.16g^2}{7} \quad (4)$$

$$IVV_{Q2} = 0.32a + 0.10b + 0.20c + 0.06d + 0.08e + 0.08f + 0.16g \quad (5)$$

Tabla 2: Factores de Ponderación de parámetros de Vulnerabilidad

#	Parámetro	Factor de Ponderación
a	Pendiente costera	0.32
b	Distancia al cuerpo de agua	0.10
c	Demografía Población	0.20
d	Materialidad de la vivienda	0.06
e	Número de pisos	0.08
f	Estado de conservación	0.08
g	Uso de suelo	0.16

Como se puede observar, IVVQ1 corresponde a un promedio de la suma de los cuadrados, esto implica que, si uno de los parámetros tiene un valor alto, al ingresarlo a la fórmula su valor aumentará. Asignándole una mayor importancia en el análisis de la vulnerabilidad. Mientras que para un parámetro con un valor bajo, cuando se ingrese a la fórmula su valor disminuirá aún más. Quitándole relevancia al momento de calcular el índice de vulnerabilidad.

Por otro lado, IVVQ2 corresponde a la sumatoria de cada parámetro analizado multiplicado por su peso de importancia, esta fórmula es bastante realista, puesto que no incrementa ni disminuye los parámetros, sino que los considera tal como son, pero con los ponderadores propuestos podemos darle la importancia a cada uno de ellos y lograr un índice de vulnerabilidad para cada tipo de vivienda.

Todo el proceso de construcción del Índice de Vulnerabilidad se resume esquemáticamente en la Figura 3.

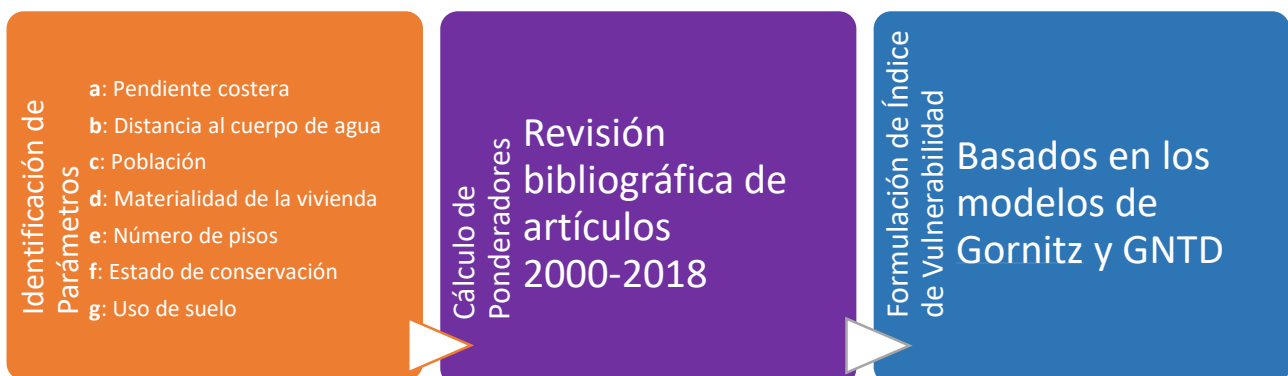


Figura 3: Proceso de construcción del Índice de Vulnerabilidad de Viviendas

En base a una visita exploratoria al sector e identificando grupos de viviendas cuyas tipologías constructivas sean similares, se hizo una zonificación preliminar del sector, el cual se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Zonificación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Considerando la zonificación preliminar anterior, los parámetros utilizados para calcular el índice se definen de la siguiente manera:

a) Pendiente costera:

Se consideró la pendiente promedio de cada sector, sobre la línea de la distancia más corta a la línea de costa. Mientras menor es la pendiente, mayor es el riesgo ante una posible inundación provocada por un eventual tsunami. La pendiente se calculó dividiendo la diferencia de elevación entre la costa y el centroide del sector por la distancia entre estos dos puntos (Figura 5).

b) Distancia al cuerpo de agua:

Este parámetro físico corresponde a la distancia más corta que existe entre la línea de costa y el centroide de cada sector. Mientras más cercano a la costa este el sector, este será más susceptible a daños (Figura 5).



Figura 5: Distancia al cuerpo de agua y pendiente costera. Fuente: Google Earth

c) Composición demográfica de la población:

La población existente en la zona de estudio es un parámetro que a pesar de que estamos generando un análisis de vulnerabilidad físico, siempre se debe considerar que la finalidad última de cada estudio de vulnerabilidad es para resguardar y proteger la vida de la ciudadanía, es debido a esto que, aunque sabemos que la población no es un parámetro físico intrínsecamente, no deja de ser uno de los más importantes al momento de evaluar la vulnerabilidad de un sector.

Así mientras mayor sea el número de habitantes vulnerables más susceptible será la zona de estudio. Para este estudio se consideró como población vulnerable niños menores de 14 años y los adultos mayores de 65 años, puesto que ellos serán los que necesiten ayuda para moverse o tomar decisiones frente a una eventual catástrofe. Para obtener la cantidad de habitantes por edades se utilizó la información disponible por manzana del CENSO 2017, determinando de esta forma un porcentaje de habitantes vulnerables frente al resto de la población.

d) Uso de suelo:

El parámetro uso de suelo está asociado al tipo de infraestructura y edificaciones que alberga. De esta forma en el sector de estudio se reconocen 2 tipos de uso de suelo (Figura 6): una es la zona residencial (ZR) y otra es una zona de conservación histórica (ZCH), habiendo en esta última un mayor interés por su conservación y, por ende, se le puede calificar como más vulnerable.

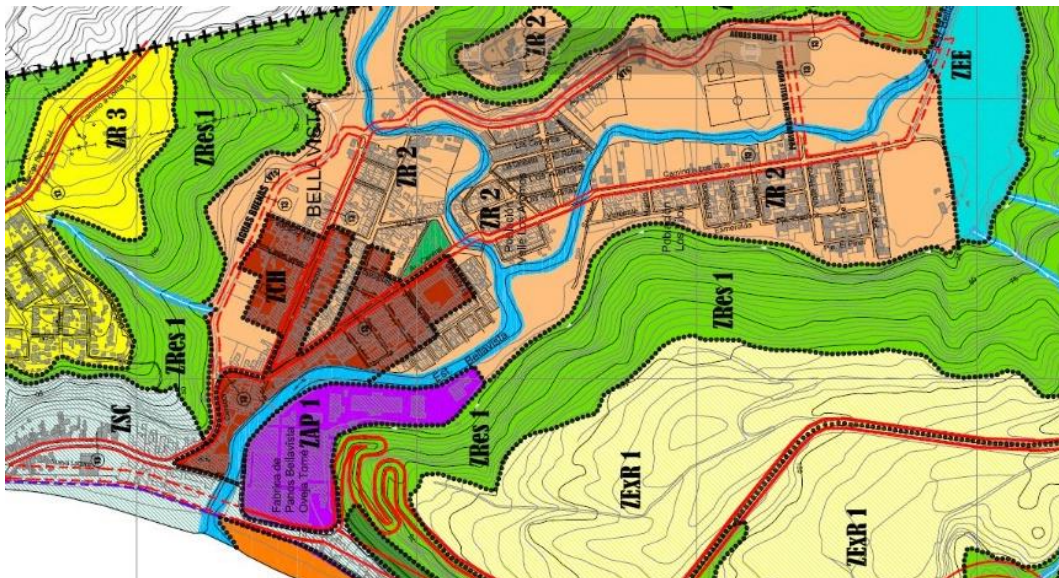


Figura 6: Usos de suelo del sector Bellavista según el plan regulador de la comuna de Tomé.
Fuente: Municipalidad de Tomé.

e) Número de pisos:

Se consideró este parámetro dependiendo de la amenaza a la que se enfrente la vivienda. Por ejemplo, frente a un sismo la estructura sufrirá daño independiente del número de pisos, puesto que la diferencia en daños que tendrá una vivienda de un piso frente a una de dos pisos es muy baja. Sin embargo, en el caso de tsunami, la vulnerabilidad de una casa de un piso podría considerarse mayor que la de múltiples pisos, pues el daño en los pisos superiores podría eventualmente ser menor. En este caso, se asumió la condición más desfavorable que corresponde a la inundación por tsunami.

f) Estado de conservación:

Este parámetro indica el estado de conservación en la que se encuentran las viviendas dentro de la zona de estudio, este parámetro hará que la vulnerabilidad se cuantifique considerando el estado actual de la vivienda. Para esto se realizó una clasificación visual considerando tres categorías (bueno, regular y malo).

g) Materialidad de las viviendas:

Este parámetro indica que tan vulnerable es una vivienda según los materiales con que fueron construidas. Se realizó una primera visita a terreno con la finalidad de identificar las tipologías estructurales más prevalentes en el sector. En la Tabla 3 se muestra una clasificación de las viviendas según las tipologías identificadas. A cada una de estas tipologías se le asignó un nivel de vulnerabilidad, dependiendo principalmente del material de construcción.

Tabla 3: Tipologías Estructurales Prevalentes en el Sector

Descripción	Vista Frontal
<p>Hormigón Armado: Vivienda compuesta por muros, pilares y vigas de hormigón armado.</p>	
<p>Albañilería confinada: Vivienda compuesta en su totalidad por albañilería confinada.</p>	
<p>Madera: Vivienda compuesta en su totalidad por tabiquería de madera.</p>	
<p>Hormigón Armado + Madera: Vivienda compuesta en el primer nivel por hormigón armado y en el segundo nivel por tabiquería de madera.</p>	
<p>Albañilería confinada + Madera: Vivienda compuesta en el primer nivel por albañilería confinada y en el segundo nivel por tabiquería de madera.</p>	
<p>Material Liviano: Vivienda precaria, compuesta por materiales constructivos deficientes.</p>	



4.2. Trabajo en terreno

Se realizó un trabajo de campo con la finalidad de obtener cuatro parámetros (tipo de vivienda, número de pisos, materialidad de la vivienda y estado de conservación) para el cálculo del índice de vulnerabilidad.



Número de Foto

Ficha clasificación de viviendas

Antecedentes generales

Calle/ Pasaje	
Número de casa	

Tipo de vivienda (Marque con una x en el casillero correspondiente)

Casa individual	
Casa pareada	
Casas adosadas o en trencito (especifique cantidad de casas)	

Número de pisos (Marque con una x en el casillero correspondiente)

Un nivel	
Dos niveles	
Más de dos niveles (cuantos)	

Material de la vivienda (Marque con una x en el casillero correspondiente)

Hormigón armado	
Albañilería confinada	
Madera	
Hormigón armado + Madera	
Albañilería confinada + Madera	
Material liviano	

Estado de conservación de la vivienda (Marque con una x en el casillero correspondiente)

Bueno	
Regular	
Malo	

Comentario

*Bueno: Todos los elementos estructurales se encuentran en perfecto estado.

*Regular: Los elementos estructurales presentan grietas superficiales o deformaciones leves.

*Malo: Los elementos estructurales presentan fisuras, desprendimiento del recubrimiento en armaduras o deformaciones considerables.

Figura 7: Ficha clasificación de viviendas. Fuente: Elaboración propia

**5. CALCULO DEL INDICE DE VULNERABILIDAD DE VIVIENDAS**

En la Tabla 4, se muestran las categorizaciones de vulnerabilidad según cada parámetro.

Tabla 4: Cuadro de clasificación de vulnerabilidad.

Parámetros		Muy baja (0)	Baja (0.25)	Media (0.5)	Alta (0.75)	Muy alta (1)
a	Pendiente costera (%)	>15	15-10	10-5	5-2	<2
b	Distancia al cuerpo de agua (m)	>557	557-417	416-196	195-66	<66
c	Población Vulnerable (%)	0-12.5%	12.5%-25%	25%-37.5%	37.5%-50%	>50%
d	Vivienda	Hormigón Armado	Albañilería confinada	Hormigón armado + Madera/ Albañilería + Madera	Madera	Material liviano
e	Número de pisos	Tres niveles	-	Dos niveles	-	Un nivel
f	Estado de conservación	Bueno	-	Regular	-	Malo
g	Uso de suelo	Zona de equipamiento de esparcimiento (ZEE)	Zona de restricción por deslizamiento en masa (ZRES1)	Zona de actividad productiva (ZAP1)	Zona residencial (ZR2)	Zona de conservación histórica (ZCH)

Fuente: Elaboración propia basado en Araya (2017)

Clasificados los parámetros se calculó el índice de vulnerabilidad para cada zona. Posteriormente se procede a clasificar la vulnerabilidad en una escala de “Muy baja”, “Baja”, “Media”, “Alta” y “Muy alta”, según se indica en la Tabla 5.

Tabla 5: Clasificación según rangos.

Clasificación de rangos según rangos			
IVC2	IVV _{Q1}	IVV _{Q2}	
0.00 - 0.10	0.00 - 0.01	0.00 - 0.20	Muy baja
0.11 - 0.35	0.02 - 0.15	0.21 - 0.40	Baja
0.36 - 0.42	0.16 - 0.18	0.41 - 0.54	Media
0.43 - 0.75	0.19 - 0.23	0.55 - 0.73	Alta
0.75 - 1.00	0.24 - 1.00	0.74 - 1.00	Muy alta

En este estudio, el cálculo del IVC2 se realizó aplicando la Ec. (2), pero con los parámetros descritos en la Tabla 1 sin considerar los ponderadores, esto con la finalidad de comparar los resultados obtenidos por IVC2 con los propuestos por nosotros: IVV_{Q1} e IVV_{Q2}, tal como se muestra en la Tabla 6.

A continuación, se presentan los resultados de los índices de vulnerabilidad propuestos para cada metodología.

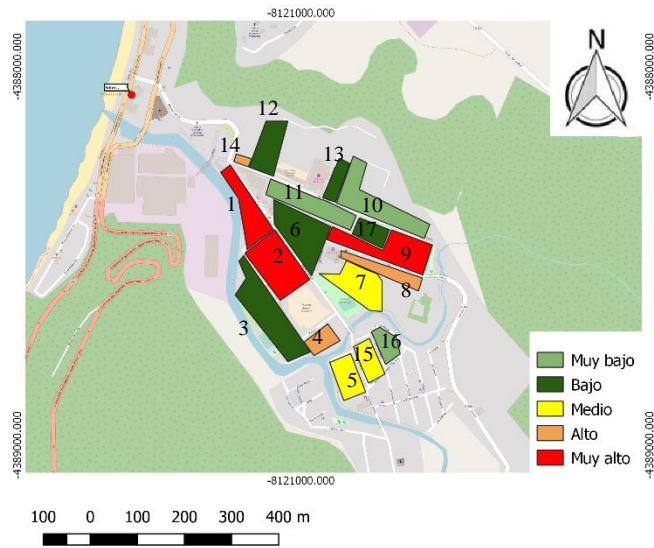
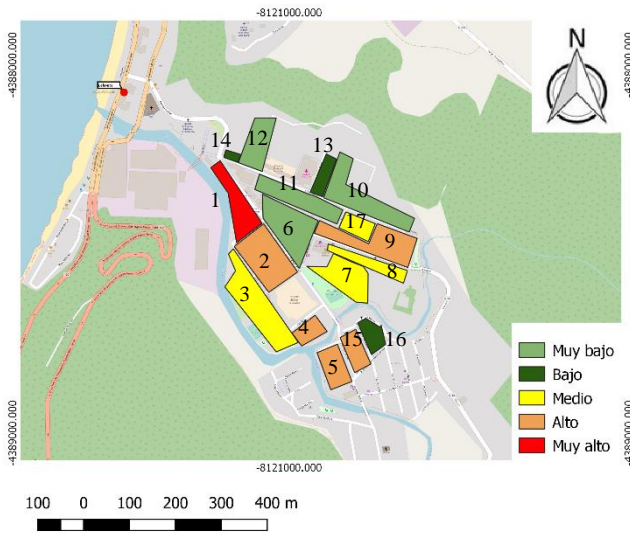
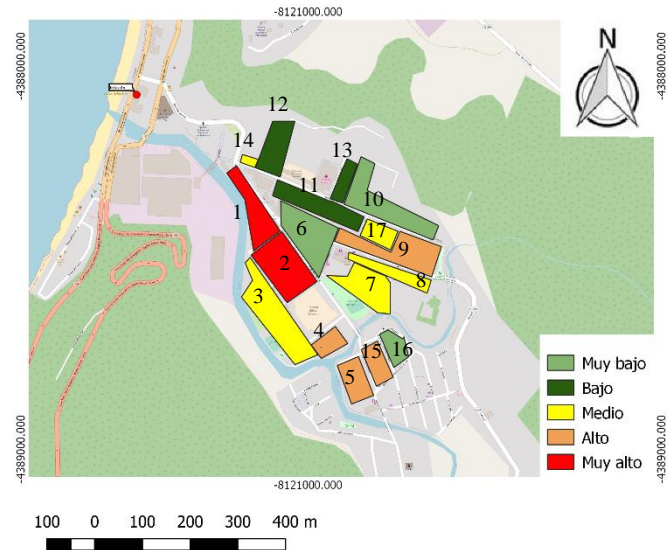
Tabla 6: Índices de vulnerabilidad

Zona	Distancia al cuerpo de agua	Pendiente Costera	Materialidad de la vivienda	Estado de conservación	Número de pisos	Uso de Suelo	Habitantes	IVC2	IVV _{Q1}	IVV _{Q2}
1	0.25	1.00	0.25	0.00	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00
2	0.25	1.00	0.25	0.00	1.00	1.00	0.25	0.88	0.22	0.76
3	0.25	1.00	0.50	0.00	0.5	0.75	0.25	0.27	0.16	0.44
4	0.00	1.00	0.25	0.00	0.5	1.00	0.50	0.50	0.23	0.68
5	0.00	1.00	0.25	0.00	0.5	0.75	0.75	0.42	0.23	0.73
6	0.25	0.75	0.25	0.00	1.00	0.75	0.25	0.35	0.00	0.18
7	0.00	1.00	0.75	0.00	0.5	0.75	0.25	0.42	0.16	0.39
8	0.00	1.00	0.50	0.00	1.00	0.75	0.25	0.69	0.17	0.51
9	0.00	1.00	0.25	0.00	1.00	1.00	0.25	0.85	0.22	0.63
10	0.00	0.75	0.50	0.00	0.50	0.75	0.50	0.08	0.01	0.17
11	0.25	0.75	0.25	0.00	0.50	0.75	0.50	0.00	0.01	0.22
12	0.25	0.75	0.50	0.00	0.50	0.75	0.50	0.12	0.01	0.29
13	0.00	0.75	0.50	0.00	0.50	1.00	0.50	0.35	0.06	0.37
14	0.50	0.75	0.25	0.00	1.00	0.75	0.50	0.58	0.04	0.54
15	0.00	1.00	0.25	0.00	0.50	0.75	0.75	0.42	0.23	0.73
16	0.00	1.00	0.25	0.00	0.50	0.75	0.00	0.08	0.14	0.00
17	0.00	1.00	0.25	0.00	0.50	0.75	0.50	0.23	0.18	0.48

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos es posible analizar la distribución de vulnerabilidad dependiendo del parámetro de estudio como por ejemplo los parámetros pendiente costera y distancia al cuerpo de agua. Se concluye que la vulnerabilidad predominante es “Muy alta”, puesto que la zona de estudio posee una pendiente muy baja, lo que implica que será mucho más susceptible a alguna inundación costera. En cambio para distancia al cuerpo de agua, se deduce que la vulnerabilidad es “Muy baja”, pues el sector más cercano a la costa de la zona de estudio se ubica a 400m del mar.

Además, con la Tabla 6, es posible realizar mapas de vulnerabilidad para cada metodología. Para la realización de dichos mapas se utilizó el programa QGIS, considerando una escala de colores la cual indica las zonas más vulnerables frente a una amenaza, como se muestran a continuación:


Figura 8: Mapa de vulnerabilidad con IVC2.

Figura 9: Mapa de vulnerabilidad con IVV_{Q1}.

Figura 10: Mapa de vulnerabilidad con IVV_{Q2}.

En las Figs. 9 y 10 se observa que los dos nuevos índices vulnerabilidad de vivienda propuestos llegan a resultados muy similares. En ambos, se aprecia que las zonas 5 y 15 presentan una vulnerabilidad alta (zona anaranjada) pese a estar lejos de la costa. Esto se explica debido a que el uso de suelo en dichas zonas es considerado de conservación histórica y además la población también presenta un índice de vulnerabilidad alto.



Adicionalmente se generó una tabla resumen con los índices de vulnerabilidad obtenidos para cada zona de estudio, la cual se presenta a continuación:

Tabla 7: Resumen Índices de vulnerabilidad

Zona	Índices de vulnerabilidad según métodos		
	IVC2	IVV _{Q1}	IVV _{Q2}
1	1.00	1.00	1.00
2	0.88	0.22	0.76
3	0.27	0.16	0.44
4	0.50	0.23	0.68
5	0.42	0.23	0.73
6	0.35	0.00	0.18
7	0.42	0.16	0.39
8	0.69	0.17	0.51
9	0.85	0.22	0.63
10	0.08	0.01	0.17
11	0.00	0.01	0.22
12	0.12	0.01	0.29
13	0.35	0.06	0.37
14	0.58	0.04	0.54
15	0.42	0.23	0.73
16	0.08	0.14	0.00
17	0.23	0.18	0.48

Muy baja	■
Baja	■
Media	■
Alta	■
Muy alta	■

Según la Tabla 7, las zonas 1 y 2 son las más vulnerables, esto debido a su cercanía con la costa y además corresponden a zonas de conservación histórica. Las zonas 4, 5, 9 y 15 tienen una vulnerabilidad predominante alta. La zona 3, 7, 8 y 17 son medianamente vulnerable, mientras que las zonas 12 y 13 presentan una vulnerabilidad baja en 2 de los 3 índices estudiados, esto se debe a que la materialidad de las viviendas de dichos sectores es de mejor calidad y se encuentran más alejadas de la costa. Las zonas 6, 10, 11 y 16 son zonas de muy baja vulnerabilidad.

La zona 14 no queda con un índice predominante en todas las formulaciones, el IVC2 es alto debido a que los parámetros están elevados al cuadrado y 5 de los 7 parámetros para el cálculo son mayores a 0.5, mientras que en el cálculo de IVVQ1 se aplican los ponderadores en donde el parámetro número de pisos es muy disminuido debido al ponderador impuesto. Es debido a esto que el índice a una vulnerabilidad baja. Pasa algo similar en el cálculo de IVVQ2. Aunque es claro que tendrá una vulnerabilidad media por su cercanía a la costa.

7. CONCLUSIONES

En el estudio realizado se propuso con eficacia un modelo de evaluación de vulnerabilidad en el cual se combinan parámetros costeros y sísmicos, implementando además diferentes pesos de importancia para cada parámetro. Logrando resultados más representativos de la vulnerabilidad del sector Bellavista.

El análisis realizado revela de forma visual las zonas más vulnerables frente a alguna amenaza. Dando la información necesaria para que las autoridades tomen las mejores decisiones o realicen medidas de mitigación, atenuando los daños potenciales frente a algún evento catastrófico.

Finalmente, con la metodología propuesta en esta investigación se puede utilizar como una herramienta de planificación en la zona de estudio, ayudando a mejorar la toma de decisiones por parte de las autoridades mediante un conocimiento adecuado de los parámetros que afectan de forma directa la vulnerabilidad del sector Bellavista en la comuna de Tomé.

8. REFERENCIAS

- Aprilia F, Hartoko A and Muskananfolo M** (2015). *Mapping of coastal vulnerability using the coastal vulnerability index and geographic information system*. International Journal of Technology, Vol. 5, pp. 819-827.
- Araya E** (2017). *Análisis de vulnerabilidad costera en la localidad de Dichato Región del Bio bio, Chile a través de índice de vulnerabilidad*.
- Barros M, Sieglea E, Corsib A, Bonettic J** (2018). *Coastal vulnerability to wave impacts using a multi-criteria index: Santa Catarina (Brazil)*. Journal of Environmental Management, Vol. 230, pp. 21-32.
- Bishnupriya S and Prasad K** (2018). *Multi-hazard risk assessment of coastal vulnerability from tropical cyclones e A GIS based approach for the Odisha coast*. Journal of Environmental Management, Vol. 206, pp. 1166-1178.
- Burton I, W. Kates R** (1964). *The perception of natural hazards in resource management*. Natural Resources Journal, Vol. III, No. 3.
- Consejo Nazionale di la Ricerca (C.N.R.), Gruppo Nazionale per la Difesa Dai Terremoto (G.N.D.T.)** (1993). *Rilevamento dell'Esposizione e Vulnerabilità Sismica degli Edifici*, Appendice N° 1 alla Pubblicazione Rischio Sismico di Edifici Pubblici, Roma, Italia.
- Doukakis E** (2005). *Coastal Vulnerability and risk parameters*. European Water, Vol. 11/12, pp. 3-7.
- Duriyapong F and Nakhapakorn K** (2011). *Coastal vulnerability assessment: a case study of Samut Sakhon coastal zone*. Songklanakarin Journal of science and technology Vol. 33, pp. 469-476.
- Ferreira T, Maio R, Romeu** (2016). *Seismic vulnerability assessment of the old city centre of Horta, Azores: calibration and application of seismic vulnerability index method*. Bulletin of Earthquake Engineering.
- Gill J, Ainee A, Anwar S, Omar K** (2014). *Towards the implementation of continuous coastal vulnerability index in Malaysia: a review*. Jurnal Teknologi, pp. 1-10.
- Gornitz V** (1990). *Vulnerability of the East Coast, USA to future sea level rise*. Journal of Coastal Research, 9, pp. 201-237.
- Gornitz V M, Daniels R C, White T W, and Birdwell K R** (1994). *The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast*. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 12.
- GRAVITY**, (2001), Fensibility Study Report on Global risk and vulnerability index – Trends per year, UNEP, DEWA, GRID, 76 p.
- Hadzima-Nyarko, Pavića G and Lešićb M** (2016). *Seismic vulnerability of old confined masonry buildings in Osijek, Croatia*. Earthquakes and Structures, Vol. 11, No. 4.
- INE** (2017). *Censo 2017. Instituto Nacional de Estadísticas*.
- Kantamanenia K, Phillip M, Thomas T, Jenkins R** (2018). *Assessing coastal vulnerability: Development of a combined physical and economic index*. Journal of Environmental Management, Vol. 158, pp. 164-175.
- Jie Y, Zhane Y, Jun W and Shiyuan X** (2012). *National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise for the Chinese coast*. Journal Coast Conservation, Vol. 16, pp. 123-133.
- Le Cozannet G, Garcin M, Bulteau T, Mirgon C, Yates M** (2013). *An AHP-derived method for mapping the physical vulnerability of coastal areas at regional scales*. Natural Hazards Earth System Science, Vol. 13, pp. 1209-1227.
- Mahapatra M, Ratheesh R. and Rajawat A.S** (2013). *Sea level rise and coastal vulnerability assessment: a review*. International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences, Vol.3, pp. 67-80.
- Maldonado E, Chio Cho G, Gómez I** (2007). *Índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería basado en la opinión de expertos Seismic Vulnerability Rate in Masonry Buildings based on Experts' Opinion*. Ing. Univ. Bogota, Vol. 11, pp. 149-168.

Maldonado E, Chio Cho G (2009). *Assessment of functions seismic vulnerability of earth building*. Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte, Vol.25, pp. 180-199.

Mamdouh M (2015). *Improving Coastal Vulnerability Index of the Nile Delta Coastal Zone, Egypt*. Journal Earth Science & Climatic Change, Vol. 6, Issue 8.

Maskrey A. (compilador), (1993), Los desastres no son naturales, LA RED, 166p.

McLaughlin S, Andrew J and Cooper G (2010). *A multi-scale vulnerability index: A tool for coastal managers?*. Environmental Hazards Human and Policy Dimensions, Vol. 9, pp. 233-248.

McLaughlin S, McKenna J, Cooper J (2002). *Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities*. Journal of Coastal Research. Vol. 36, pp. 487-497.

Nuno M, Delta S y Cabral P (2012). *Social vulnerability assessment to seismic risk using multicriteria analysis: the case study of Vila Franca do Campo*. Natural Hazards, Vol. 62, pp.385-404.

ONU (2016). *Informe del grupo de trabajo intergubernamental de expertos de composición abierta sobre los indicadores y la terminología relacionados con la reducción del riesgo de desastres*.

Pantusa D, D'Alessandro F, Riefole L, Principato F and Tomasicchio G (2018). *Application of a Coastal Vulnerability Index. A Case Study along the Apulian Coastline, Italy*. Journal Water.

Pierce K (2014). *Coastal vulnerability index (CVI) assessment Suffolk County, New York*.

Sarris A, Loupasakis C, Soupios P, Trigkas V y Vallianatos F (2010). *Earthquake vulnerability and seismic risk assessment of urban areas in high seismic regions: application to Chania City, Crete Island, Greece*. Natural Hazards, Vol. 54, pp.395-412.

Silva N (2011). *Vulnerabilidad sísmica estructural en viviendas sociales, y evaluación preliminar de riesgo sísmico en la región metropolitana, Universidad de Chile*. Tesis para optar al grado de magister en ciencias, Universidad de Chile.

Srinivasa Kumar T, Mahendra, Shailesh Nayak, Radhakrishnan K, and Sahu K (2010). *Coastal Vulnerability Assessment for Orissa State, East Coast of India*. Journal of Coastal Research, Vol. 26, No. 3, pp. 523-534.

Szlafsztein C and Sterr H (2007). *A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil*. Journal Coast Conservation, Vol. 11, pp. 53-66.

Tano R, Aman A, Kouadio K, Toualy E, Ali K, and Assamoi P (2016). *Assessment of the Ivorian Coastal Vulnerability*. Journal of Coastal Research, Vol. 32, No. 6, pp. 1495-1503.

Tano R, Aman A, Toualy E, Kouadio Y, François-Xavier and Addo A (2018). *Development of an Integrated Coastal Vulnerability Index for the Ivorian Coast in West Africa*. Journal of Environmental Protection, Vol. 9, pp. 1171-1184.

Thieler E and Hammar-Klose E (2000). *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Gulf of Mexico Coast*. U.S. Geological Survey Woods Hole, Massachusetts.

Torresan S, Critto A, Rizzi J, and Marcomini A (2012). *Assessment of coastal vulnerability to climate change hazards at the regional scale: the case study of the North Adriatic Sea*. Natural Hazards Earth System Science, Vol. 12, pp. 2347-2368.

Sitio web: link.springer.com

Sitio web: www.sciencedirect.com

Sitio web: apps.webofknowledge.com.dti.sibucsc.cl