

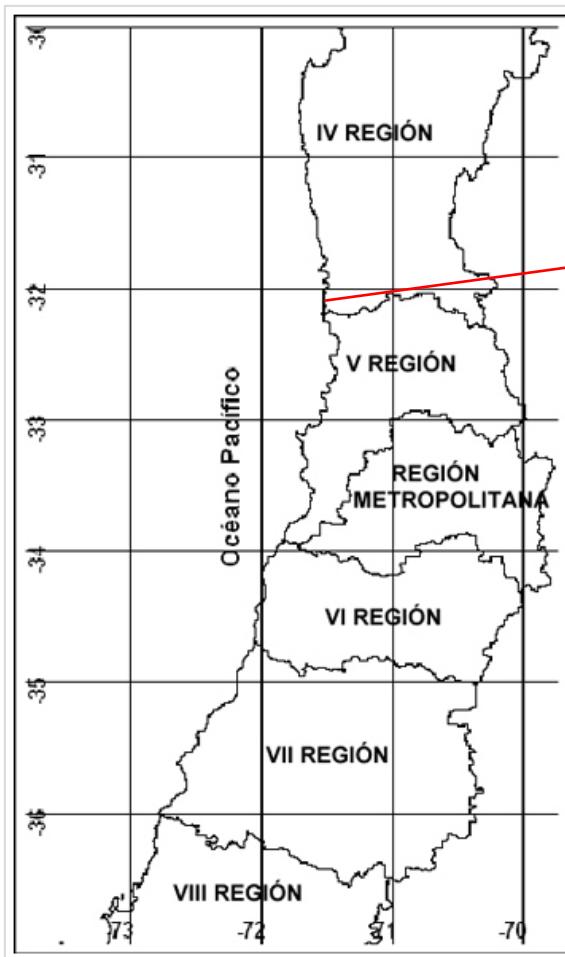
# **ANÁLISIS DE RIESGO ANTE EVENTOS DE MAREJADAS Y TSUNAMI EN EL POBLADO DE PICHIDANGUI**

Defensa de proyecto para optar al título de  
Ingeniero Civil Oceánico

Autor: Ivan Riquelme González  
Profesor guía: Mauricio Reyes Gallardo  
Fecha: 18 Junio 2024

# INTRODUCCIÓN

El balneario de **Pichidangui** se ubica a 200 km al norte de Santiago. Su desarrollo del borde costero y las actividades náuticas han aumentado de manera considerable, en donde el **72% de la oferta de servicios turísticos de la comuna se encuentran en el balneario**, generando impactos sobre el paisaje e incorporando nuevas zonas vulnerables a amenazas como marejadas y tsunamis.



## OBJETIVOS

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar el riesgo ante la ocurrencia tsunami o eventos de oleaje extremo en Pichidangui.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Caracterizar la amenaza de tsunami.
- Caracterizar la amenaza de marejada.
- Determinar la estructura de vulnerabilidades de Pichidangui respecto a la amenaza de tsunami.
- Determinar la estructura de vulnerabilidades de Pichidangui respecto a la amenaza de marejada.
- Definir escenarios de análisis.
- Determinar el nivel de riesgo actual asociado a tsunami usando herramientas cuantitativas y cualitativas.
- Determinar el nivel de riesgo actual asociado a marejadas usando herramientas cuantitativas y cualitativas.
- Proponer estrategias para reducción del riesgo.

## ALCANCES Y LIMITACIONES

- En el estudio de riesgos asociados a marejadas y tsunami, se aplicaron métodos cualitativos y cuantitativos con el fin de evaluar las vulnerabilidades a partir de aspectos visuales en terreno.
- Para ambos casos se estima el riesgo asociado sólo a un evento de cada amenaza y las variables analizadas omiten el comportamiento humano por no pertenecer a la naturaleza de los eventos.
- Una limitación importante en el estudio de impacto sobre la infraestructura costera y los daños a embarcaciones por marejada es la poca información disponible, lo que limita el estudio solo a lo observado en algunas marejadas pasadas y lo relatado por la gente del sector, sobre la base de sus recuerdos.

## MARCO TEÓRICO

**RIESGO** Se entiende como el potencial de pérdidas, daños o perjuicios que sufre un sujeto o sistema, que se encuentra asociado o expuesto a fenómenos físicos intensos en donde sus vulnerabilidades se condicionan cuando la amenaza o peligro se presenta (Cardona, 2005).

Reyes (2013) propone la siguiente definición y niveles de criterio para el riesgo.

- Riesgo = probabilidad de ocurrencia x impacto

Criterios de Riego	
Bajo-Aceptable	$1 \leq R \leq 3$
Bajo-tolerable	$3 \leq R \leq 5$
Medio-tolerable	$5 \leq R \leq 10$
Alto-intolerable inestable	$10 \leq R \leq 15$
Alto-intolerable crítico	$15 \leq R \leq 25$

### RIESGO

#### **AMENAZA**

*“Se refiere a un peligro latente o un factor de riesgo externo de algún sistema o de un sujeto expuesto, que excede un nivel de ocurrencia normal, en un lugar y durante un tiempo”* (Cardona, 2005)

#### Tsunami

eventos naturales extremos con baja probabilidad de ocurrencia, que ocurren en el mar generados principalmente por un movimiento sísmico, produciendo un tren de olas de periodo muy largo que al llegar a la costa provoca inundación y destrucción.

#### Marejadas

Oleaje que se considera “anormal” generados por grandes olas, ya que los parámetros promedios del oleaje son superados. Generan daños en la costa y condicionan las actividades costeras

### PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

Se entiende como la posibilidad que se presente una amenaza en un determinado tiempo.

# RIESGO

IMPACTO → EXPOSICIÓN Área expuesta al peligro

→ VULNERABILIDAD Predisposición de algún agente físico, social, económico, político o ambiental que pueda ser afectado por algún fenómeno natural (Cardona, 2003)

<b>Escala cualitativa de impacto (confiabilidad)</b>	
No confiable	5
Baja confiabilidad	4
Confiable	3
Alta confiabilidad	2
Muy alta confiabilidad	1

<b>Escala cualitativa de impacto (vulnerabilidad general)</b>	
Muy baja vulnerabilidad	1
Baja vulnerabilidad	2
vulnerable	3
Alta vulnerabilidad	4
Muy alta vulnerabilidad	5

Escalas cualitativas de impacto. (Reyes, 2013).

# MARCO TEÓRICO

<b>Tipo de daño</b>	<b>Daño menor (1)</b>	<b>Daño mayor (2)</b>	<b>Daño grave (3)</b>
<b>Suspensión de actividades costeras</b>	Realización con <b>dificultades</b>	Actividades realizables sólo por personas de muchas experiencias	Prohibición completa (imposibilidad de realización)
<b>Cierre de puertos</b>	Cierre para embarcaciones menores	Cierre para embarcaciones menores y cese de actividades en embarcaciones mayores	Cierre para todo tipo de embarcaciones y embarcaciones mayores a la gira
<b>Daño a embarcaciones</b>	Daños leves fácilmente reparable o corte de amarras	Daños mayores reparables o varamiento de embarcaciones	Destrucción o naufragio de embarcaciones
<b>Sobrepaso</b>	Sólo un punto con sobrepaso ocasional	Sobrepaso intermitente en diversos puntos	Sobrepaso permanente en múltiples puntos
<b>Daño a infraestructura costera</b>	Daños leves Reparación opcional	Daños mayores Reparación obligada	Destrucción Requiere reconstrucción
<b>Inundación en calles</b>	Formación esporádica de pozas sólo en camino costero	Inundación de camino costero y propiedades contiguas	Formación de flujos que desplazan objetos hasta calles aledañas y propiedades
<b>Daño a locales comerciales y viviendas</b>	Daños leves sin compromiso estructural	Daños mayores con compromiso estructural	Destrucción Requiere reconstrucción
<b>Alteración de tránsito</b>	Reducción velocidades de tránsito	Interrupción de tránsito	Corte de tránsito

# MARCO TEÓRICO

## OLEAJE

Ondas que viajan por la superficie del mar provocadas principalmente por la acción del viento. El oleaje característico de las regiones costeras oceánicas tiene como periodo entre 3 y 25 segundos

La caracterización del oleaje se basa en distintas escalas de tiempo

- **corto plazo:** hace mención a los estados de mar el cual describen el oleaje plazos de horas. Estos trenes de olas se describen por medio de análisis estadístico o análisis espectral.
- **Mediano plazo:** análisis estadístico de los estados de mar representados por tablas de incidencia y rosas de oleaje. Se utiliza para determinar el nivel de operatividad de una estructura.
- **Clima extremo:** Es fundamental para el diseño de estructuras marítimas, ya que se realiza un análisis extremo del oleaje con el que espera obtener valores de altura de oleaje para 25, 50 o 100 años dependiendo de la estructura, a esto se le denomina periodo de retorno y queda definido en función del riego y la vida útil de la obra

Para la propagación del oleaje de aguas profundas a un punto más cercano a la costa, se utilizó el método de transferencia de energía basado en la propagación del espectro unitario descrito por Domínguez (2011).

## MAREAS

Corresponden a movimientos provocados principalmente por la interacción entre las fuerzas de atracción del sol y la luna, lo que genera un movimiento de ascenso y descenso rítmico de la superficie del océano conocidos como pleamar y bajamar.

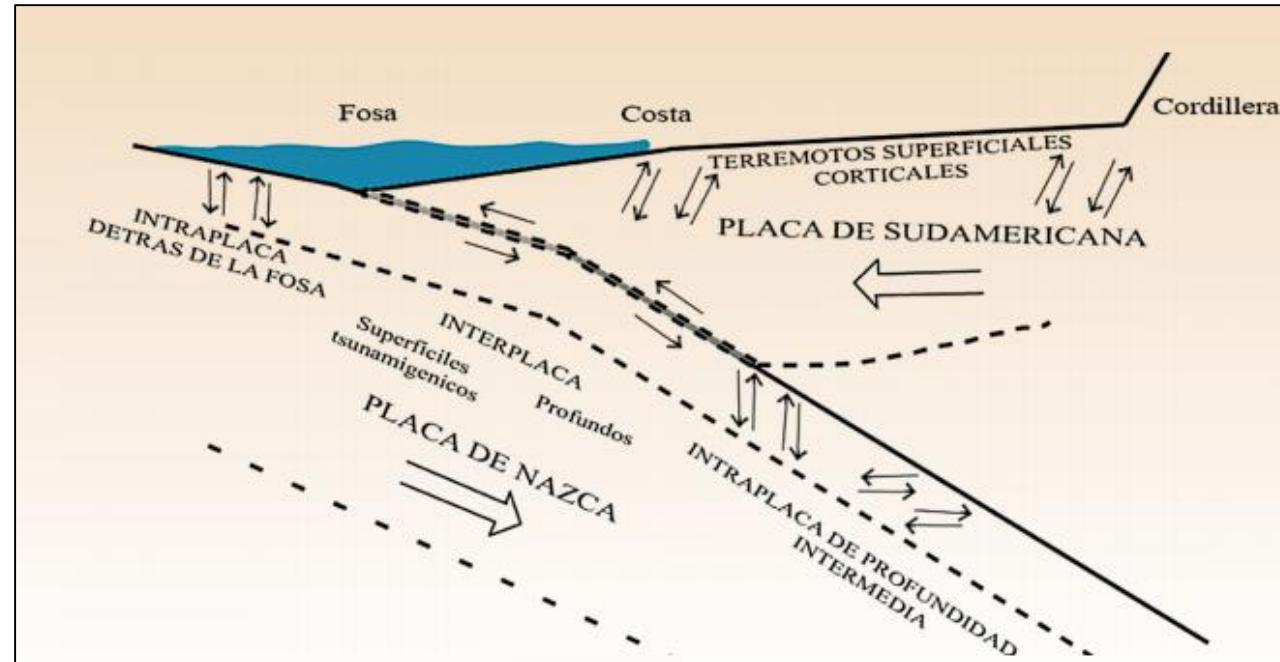
$$Nivel\ del\ Mar = Marea\ Astronómica + Marea\ meteorológica$$

La marea meteorológica es el aumento del nivel del mar inducido por el viento y el cambio de la presión atmosférica, por lo general calza con oleajes de altura importante causando inundaciones y daños importantes.

## TSUNAMIS

## MARCO TEÓRICO

Los tsunamis son eventos naturales extremos, que ocurren en el mar generados principalmente por un movimiento sísmico. Para el caso particular de Chile la gran mayoría de terremotos y posteriores tsunamis ocurren en las zonas de subducción., en donde la placa de Nazca se introduce bajo la placa sudamericana a una tasa de 6,6 centímetros por año.



Esquema subducción entre placa de Nazca y Sudamericana

Los países del Pacífico y con el auspicio de la ONU, establecieron el grupo intergubernamental para sistemas de alertas de tsunamis en el Pacífico, dando origen al Pacific Tsunami Warning Center (PTWC), el representante oficial del Estado de Chile ante el PTWC, es el Sistema Nacional de Alertas de Maremotos (SNAM) y es operado por el SHOA desde 1966.

# METODOLOGÍA

## AMENAZA DE TSUNAMI

### CARACTERIZACIÓN DEL TSUNAMI



Posta rural.

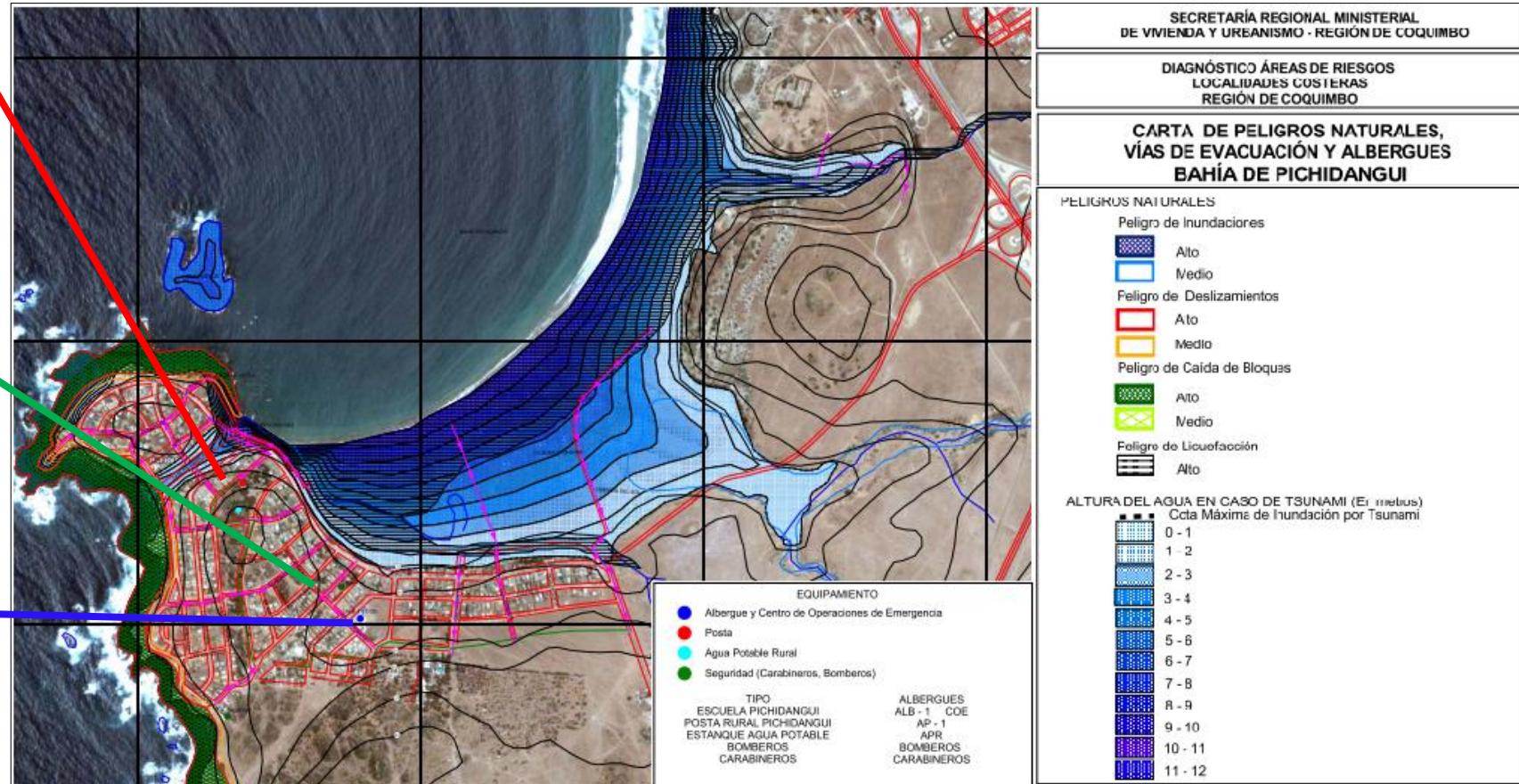


Retén carabineros.



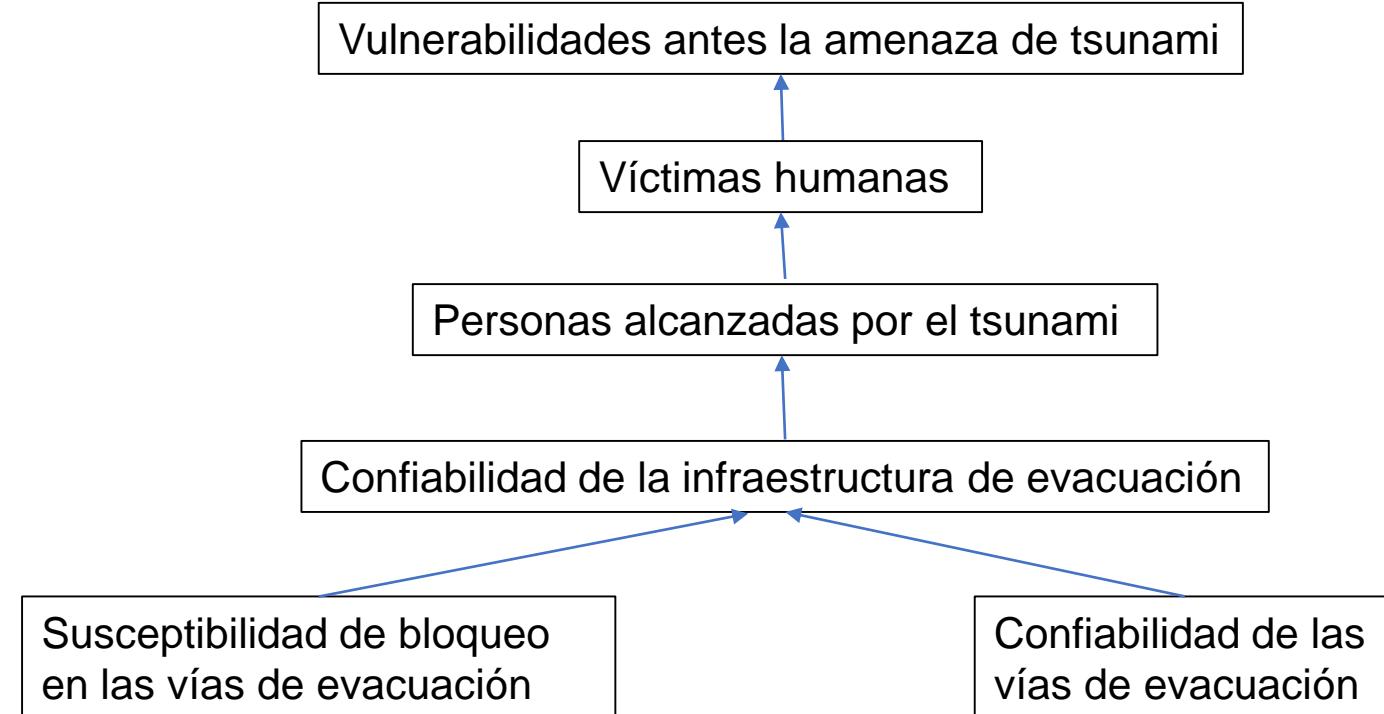
Albergue, Escuela Ercole Bencini.

La carta de Inundación por Tsunami para la localidad de Pichidangui, se elaboró utilizando el modelo de simulación numérica COMCOT. la cota de inundación se determina con un sismo extremo probable de magnitud 8.8 y con la información topográfica y batimétrica de la zona.



## AMENAZA DE TSUNAMI

- ESTUDIO DE IMPACTO POR  
AMENAZA DE TSUNAMI



- ESTUDIO DE IMPACTO POR AMENAZA DE TSUNAMI

Definición y medición de la susceptibilidad de bloqueo en las vías de evacuación

Escala de impacto por susceptibilidad	
No susceptible	1
Baja susceptibilidad	2
Susceptibilidad media	3
Alta susceptibilidad	4
Muy alta susceptibilidad	5

## METODOLOGÍA

Susceptibilidad de bloqueo
Bloqueo por escombros
Bloqueo por atoamiento vehicular
Bloqueo por incendios y/o explosiones
Desborde de afluentes de agua
Bloqueo por atoamiento de personas
Bloqueo por atoamiento de personas en horario peak o en situaciones con afluencia masiva de personas
Bloqueo por atoamiento de personas en temporada de verano
Bloqueo por colapso de tendido eléctrico

	Tipos de fuego
No susceptible	Presenta materiales para fuego clase A
Baja susceptibilidad	Presenta materiales para fuego clase A o B
Susceptibilidad media	Presenta materiales para fuego clase C
Alta susceptibilidad	Presenta materiales para fuego clase D
Muy alta susceptibilidad	Combinación entre 2 o más tipos de fuegos tipo B, C o D.

Ejemplo. Matriz de susceptibilidad de bloqueo de la vía de evacuación por incendios y/o explosiones

- ESTUDIO DE IMPACTO POR AMENAZA DE TSUNAMI

Definición y medición de la confiabilidad de las vías de evacuación

## METODOLOGÍA

Confianza en las vías de evacuación
Presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento de las personas
Tiempo de las personas hasta llegar a zona segura
Ancho útil para desplazamiento
Pendiente
Señalética
Evacuación para personas con discapacidad
Evacuación en horario nocturno

### **Escala de impacto por confiabilidad**

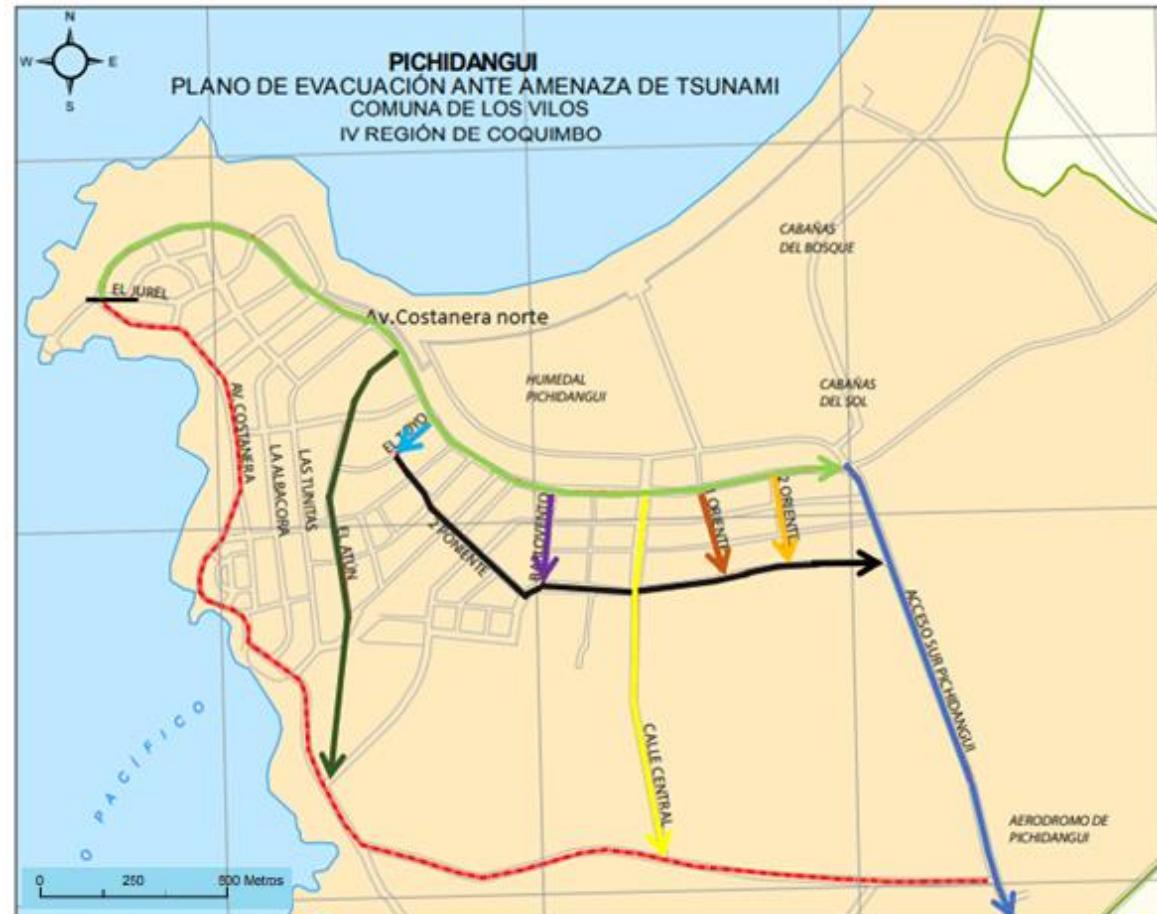
Muy alta confiabilidad	1
Alta confiabilidad	2
Confiabilidad media	3
Baja confiabilidad	4
No confiable	5

### **Pendiente de la vía de evacuación**

Muy alta confiabilidad	3%-1,7° de inclinación o menos
Alta confiabilidad	3%=1,7° hasta 10%=5,7° de inclinación
Confiabilidad media	10%=5,7° hasta 20%=11,3° de inclinación
Baja confiabilidad	20%=11,3° hasta 30%=16,7° de inclinación
No confiable	30 % -16,7° de inclinación o más

Ejemplo. Matriz de confiabilidad de la vía de evacuación por su pendiente

- CARACTERIZACIÓN DE LAS VÍAS EVACUACIÓN HORIZONTAL



- PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL TSUNAMI

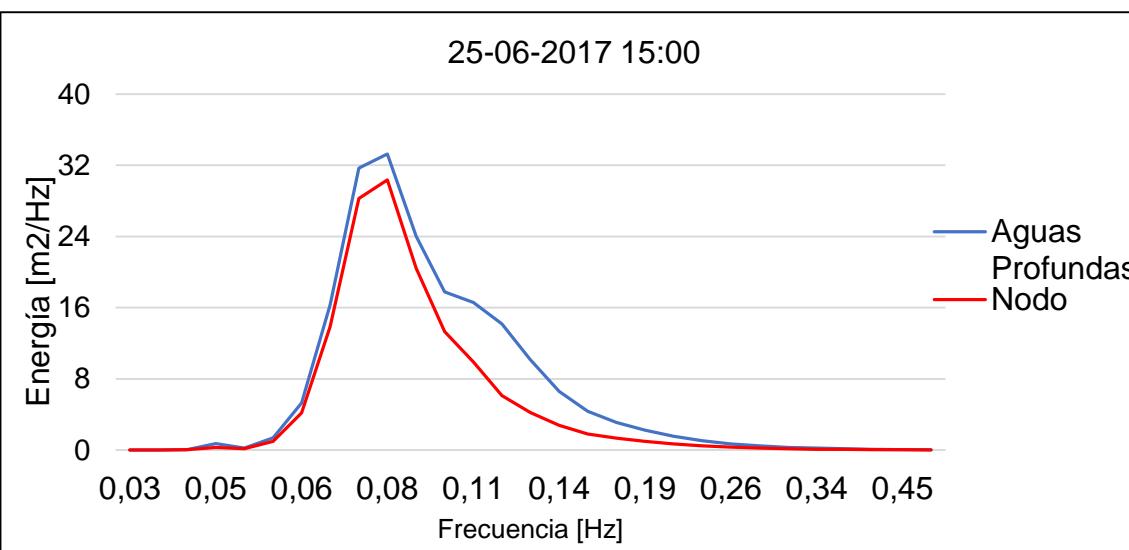
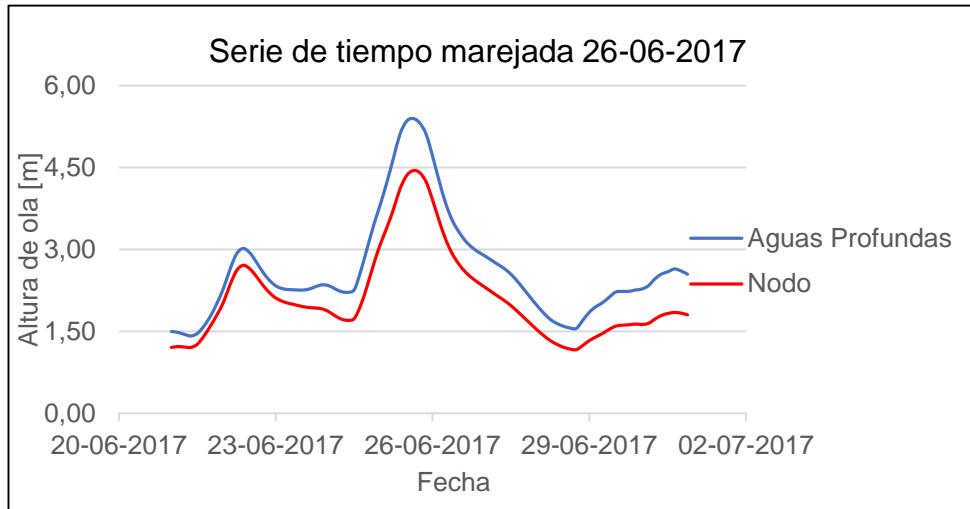
Vías de evacuación
Acceso sur Pichidangui
2 Oriente
1 Oriente
Calle Central
Barlovento
2 Poniente
El Toyo
El Atún
Av. Costanera Norte
Av. Costanera sur

PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	FACTOR DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA (P)
Ocurre un evento dentro de los próximos 10 años	5
Ocurre un evento dentro de los próximos 10 a 100 años	4
Ocurre un evento dentro de los próximos 100 a 500 años	3
Ocurre un evento dentro de los próximos 500 a 1000 años	2
Ocurre un evento dentro de los próximos 1000 años o más	1

## AMENAZA DE MAREJADA

- CARACTERIZACIÓN DE AMENAZA POR MAREJADAS

Se propone como amenaza de marejada el evento ocurrido el día 26 de Junio del 2017, por la gran cantidad de información e imágenes que respaldan los daños y perjuicios causados. es necesario conocer el oleaje que afecta a esa localidad, el cual se propaga oleaje de aguas profundas representado por el Nodo-032 del atlas de oleaje y un nodo cercano a la costa propuesto en el centro de la bahía de Pichidangui.



Espectro de frecuencia estado de mar 25-06-2017 15:00 hrs

## METODOLOGÍA

	$H_{mo}$ [m]	$T_p$ [s]	$D_p$ [°]
<b>Aguas Profundas</b>	5,40	12,7	280,0
<b>Nodo</b>	4,45	12,6	284,9

Parámetros de resumen del estado de mar 25-06-2017 15:00 hrs.



# METODOLOGÍA

## AMENAZA DE MAREJADA

### • ESTUDIO DE IMPACTO POR MAREJADAS

Basada en los criterios expuestos por Campos, Beyá, & Molina (Propuesta de intensidad de daño de marejadas del 2016 ) y Escala de daño del sistema de Alerta de Marejadas de la U. de Valparaíso 2018.

	Impacto leve (1)	Impacto considerable (2)	Impacto mediano (3)	Impacto grave (4)	Impacto crítico (5)
<b>Suspensión de actividades costeras</b>	Realización normal	Realización con dificultades	Actividades realizables sólo por personas con mucha experiencia	Prohibición completa de actividades	Imposibilidad de acceso al borde costero
<b>Cierre de puertos</b>	Libre tránsito	Cierre a embarcaciones menores	Cierre a embarcaciones menores y cese actividad naves mayores	Cierre todo tipo de embarcaciones	Resguardo de naves menores y protección en aguas profundas naves mayores
<b>Daño a embarcaciones</b>	No requiere de planes de resguardo o contingencia	Daño leve o Corte de amarras	Daños mayores reparables en el corto plazo	Daños mayores, pérdida de material y varamiento de la embarcación	Naufragio y/o destrucción de las embarcaciones
<b>Sobrepaso</b>	Contenible en toda la estructura	Sólo en un punto de manera ocasional	Permanente en un sólo punto, generando problemas leves	Intermitente en diversos puntos, generando problemas leves	Permanente en diversos puntos, generando problemas graves o serios
<b>Daño a infraestructura costera</b>	No requiere reparaciones	Leves con reparaciones opcionales	Mayor con reparaciones obligatorias	Destrucción parcial, requiere construcción	Destrucción total, pérdida completa
<b>Inundación de calles</b>	Libre de agua	Formación de pozas esporádicas	Inundación del camino costero y propiedades contiguas	Pequeñas formaciones de Flujo incapaces de mover objetos	Formaciones de flujo que desplazan objetos entre las calles
<b>Daños a locales comerciales y viviendas</b>	No requiere reparaciones	Leves sin daño estructural	Mayor con daños estructurales, requiere reparaciones	Destrucción parcial, requiere construcción	Destrucción total, pérdida completa
<b>Alteración del tránsito</b>	Normal	Reducción de velocidad	Interrupción del tránsito, lugares aislados	interrupción y corte de tránsito, en pequeñas secciones del borde costero	Corte de tránsito en todo el borde costero

## METODOLOGÍA

### AMENAZA DE MAREJADA

- PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE EVENTOS DE MAREJADA

Se utiliza el método de clima extremo para obtener un período de retorno para cierta altura de oleaje, al cual se le asocia un cierto factor de probabilidad de ocurrencia.

Tr [años]	Hs [m]	Factor de probabilidad de ocurrencia (P)
2	4	1
5	4,4	2
10	4,7	3
25	5,0	4
50	5,2	5

La marejada tuvo una altura máxima  $H_{mo} = 4,5$  metros en el nodo de análisis propuesto en la bahía de Pichidangui, en el factor de probabilidad de ocurrencia para este evento de marejada es 3

## METODOLOGÍA

### AMENAZA DE MAREJADA

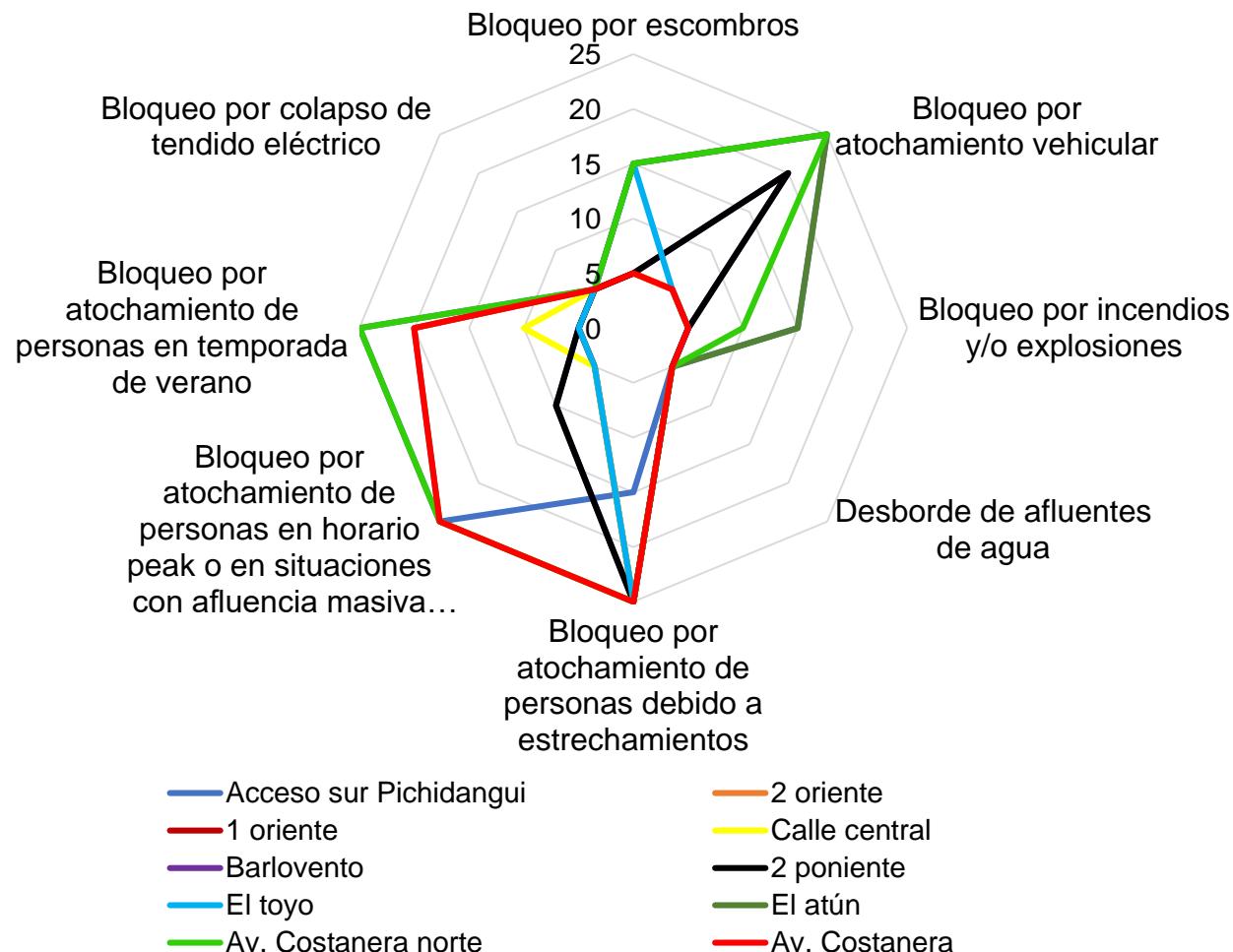
- CARACTERIZACIÓN ZONA COSTERA EXPUESTA



## SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO EN LAS VÍAS DE EVACUACIÓN

SUSCEPTIBILIDAD DE BLOQUEO EN LAS VÍAS DE EVACUACIÓN	ACCESO SUR PICHIDANGUI	DOS ORIENTE	UNO ORIENTE	CALLE CENTRAL	BARLOVENTO	DOS PONIENTE	EL TOYO	EL ATÚN	AVENIDA COSTANERA NORTE	AVENIDA COSTANERA SUR
Bloqueo por escombros	15	5	5	5	5	5	15	15	15	5
Bloqueo por atoamiento vehicular	25	10	5	5	20	20	5	25	25	5
Bloqueo por incendios y/o explosiones	15	5	5	5	5	5	5	15	10	5
Desborde de afluentes de agua	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Bloqueo por atoamiento de personas debido a estrechamientos	15	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Bloqueo por atoamiento de personas en horario peak o en situaciones con afluencia masiva de personas	25	5	5	5	10	10	5	25	25	25
Bloqueo por atoamiento de personas en temporada de verano	25	5	5	10	5	5	5	20	25	20
Bloqueo por colapso de tendido eléctrico	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

### Riesgo de las vías de evacuación por susceptibilidad de bloqueo en Pichidangui



Avenida Costanera Norte.



2 Oriente

## RESULTADOS ANÁLISIS DE RIESGO POR TSUNAMI

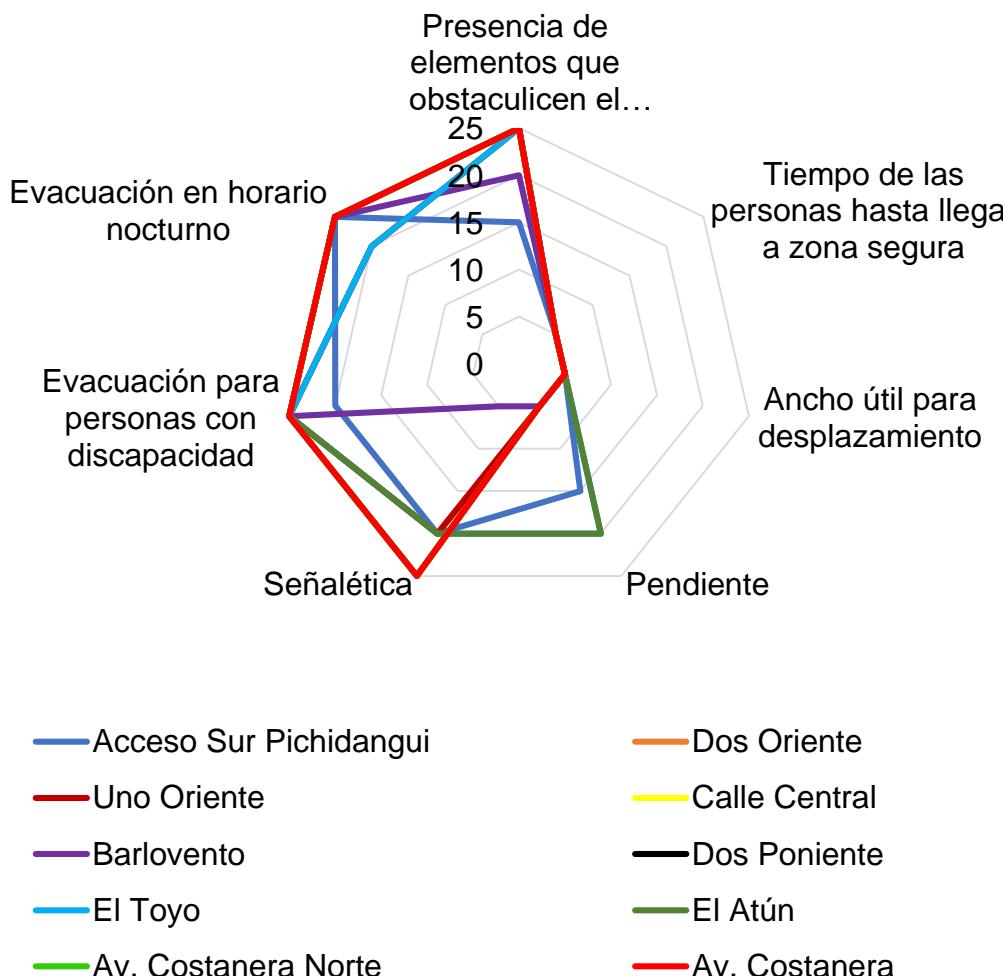
### CONFIABILIDAD DE LAS VÍAS DE EVACUACIÓN

CONFIABILIDAD DE LAS VÍAS DE EVACUACIÓN	ACCESO SUR PICHIDANGUI	DOS ORIENTE	UNO ORIENTE	CALLE CENTRAL	BARLOVENTO	DOS PONIENTE	EL TOYO	EL ATÚN	AVENIDA COSTANERA NORTE	AVENIDA COSTANERA SUR
Presencia de elementos que obstaculicen el desplazamiento de las personas	15	25	25	25	20	25	25	25	25	25
Tiempo de las personas hasta llegar a zona segura	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Ancho útil para desplazamiento	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Pendiente	15	5	5	5	5	5	5	20	5	5
Señalética	20	20	20	25	5	25	20	20	25	25
Evacuación para personas con discapacidad	20	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Evacuación en horario nocturno	25	20	20	25	25	25	20	25	25	25

# RESULTADOS ANÁLISIS DE RIESGO POR TSUNAMI

## CONFIABILIDAD DE LAS VÍAS DE EVACUACIÓN

### Riesgo asociado a la confiabilidad de las vías de evacuación en Pichidangui



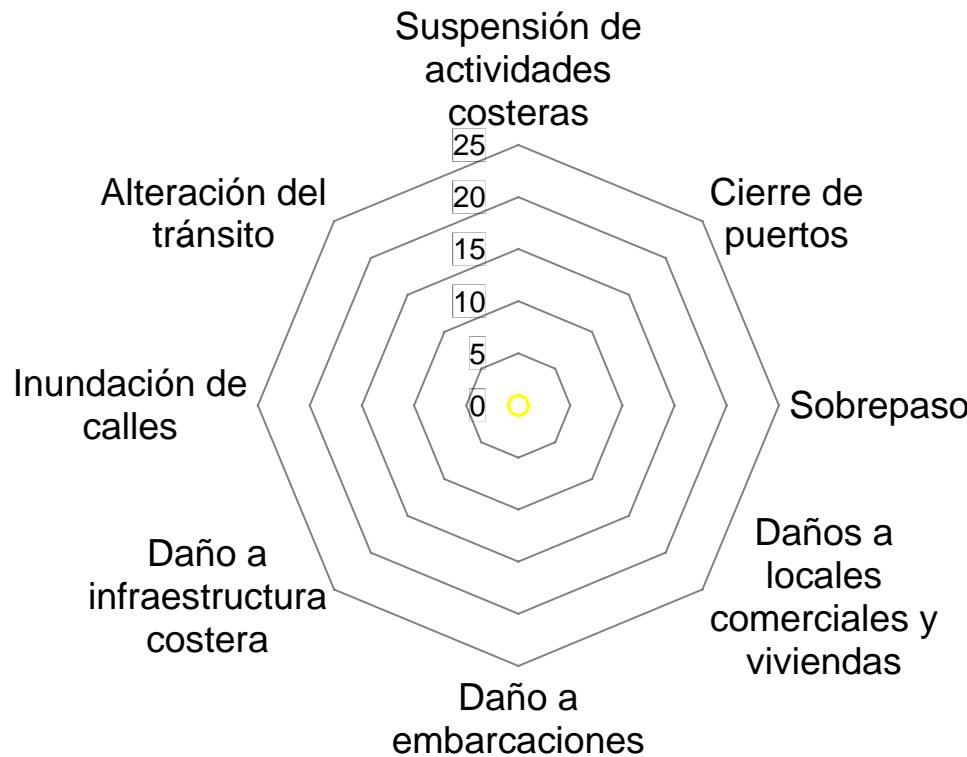
Barlovento



El Atún

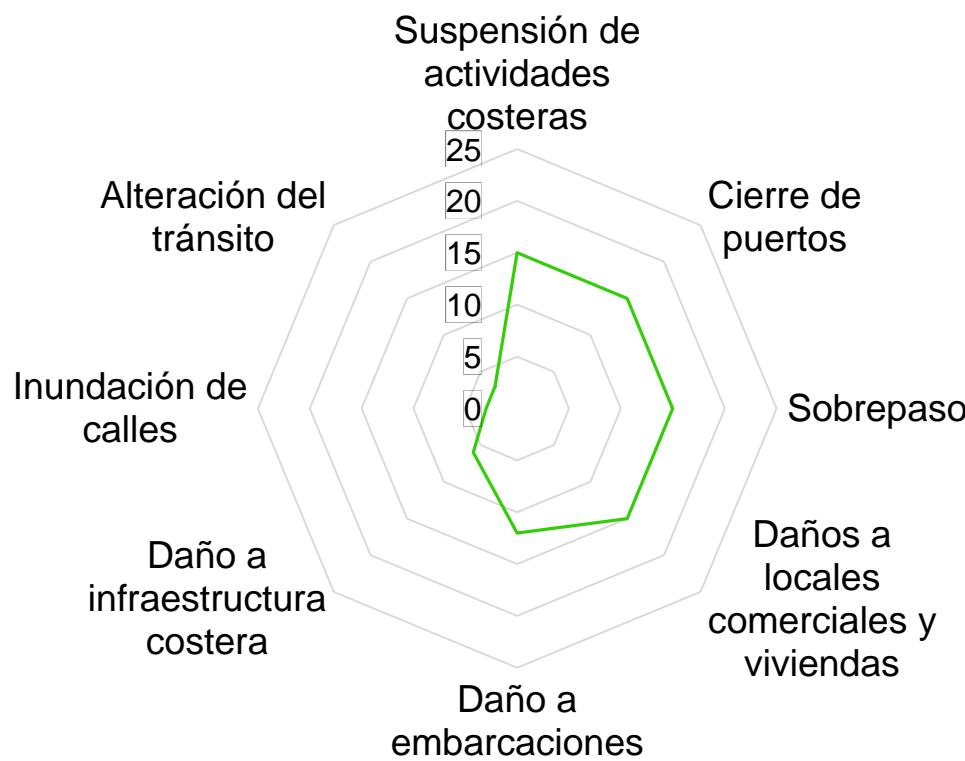
## SECTOR 1

### Sector 1 marejadas 26-06-2017



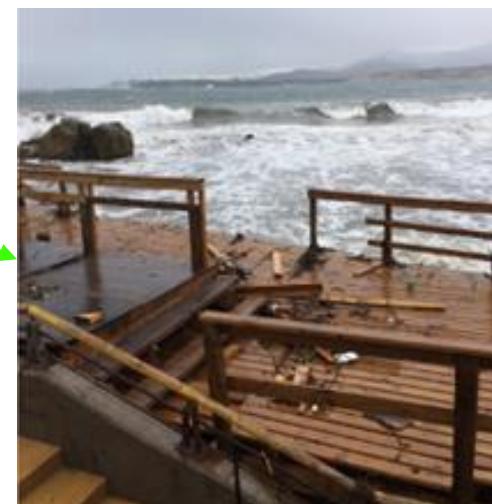
## SECTOR 2

### Sector 2 marejadas 26-06-2017



# RESULTADOS ANÁLISIS DE RIESGO POR MAREJADA 26-06-2017

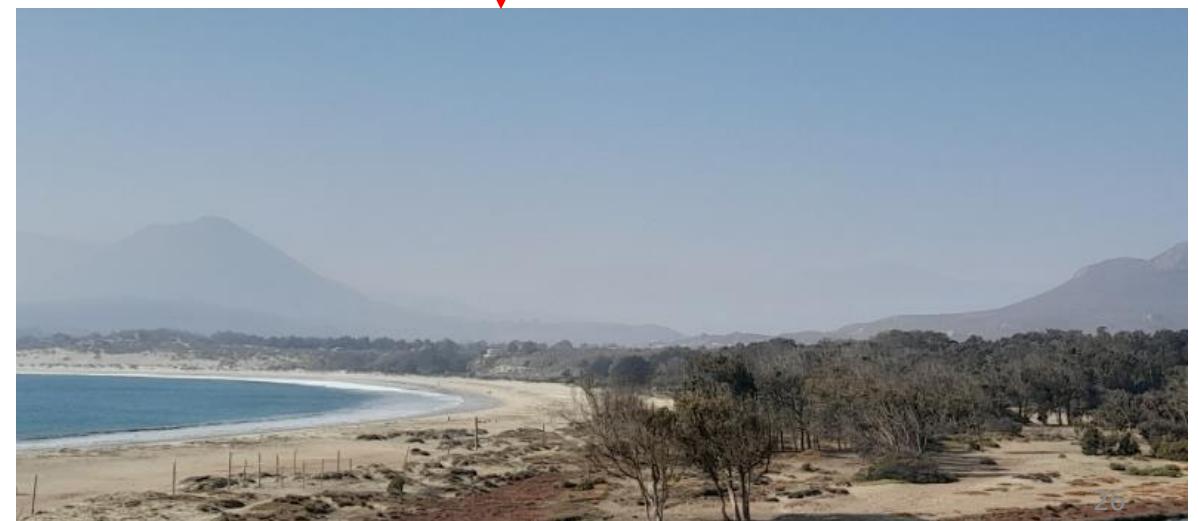
## SECTOR 2



# RESULTADOS ANÁLISIS DE RIESGO POR MAREJADA 26-06-2017

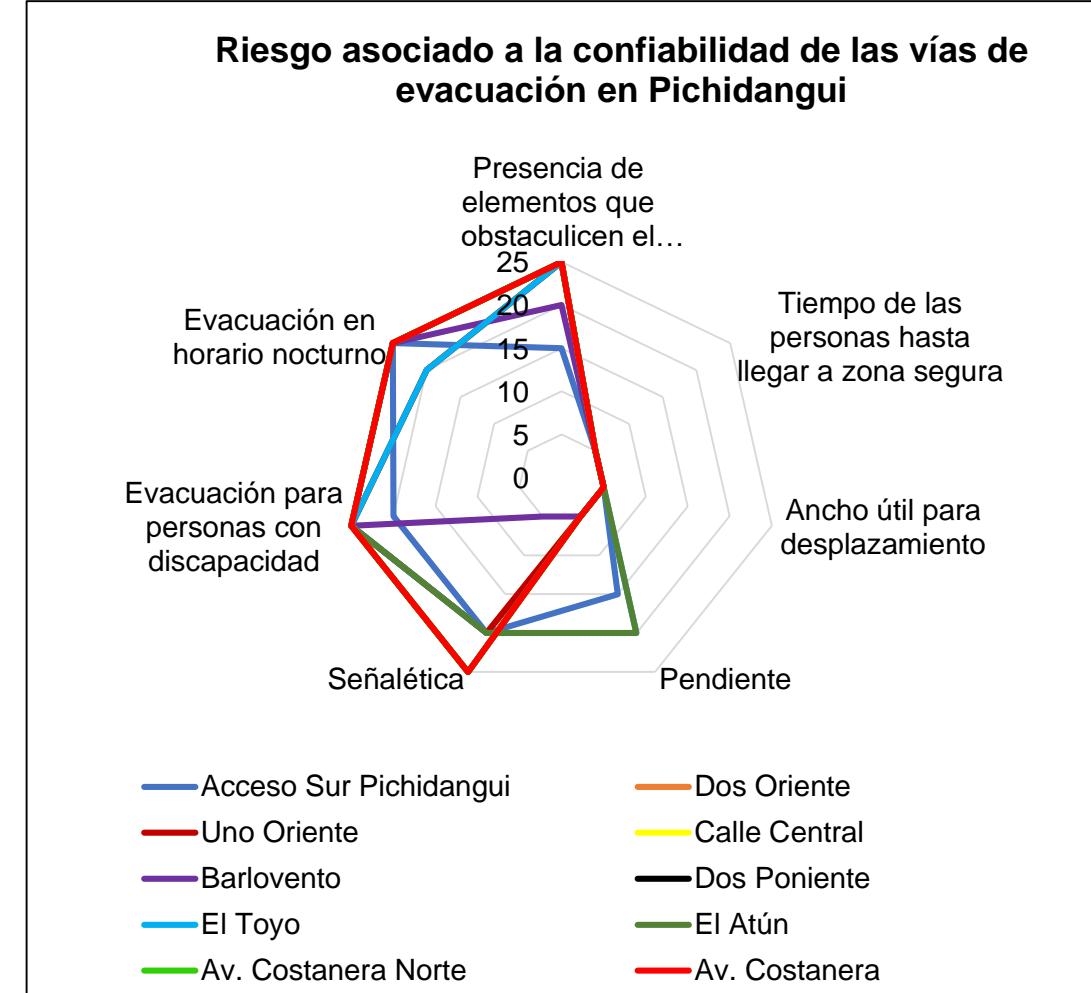
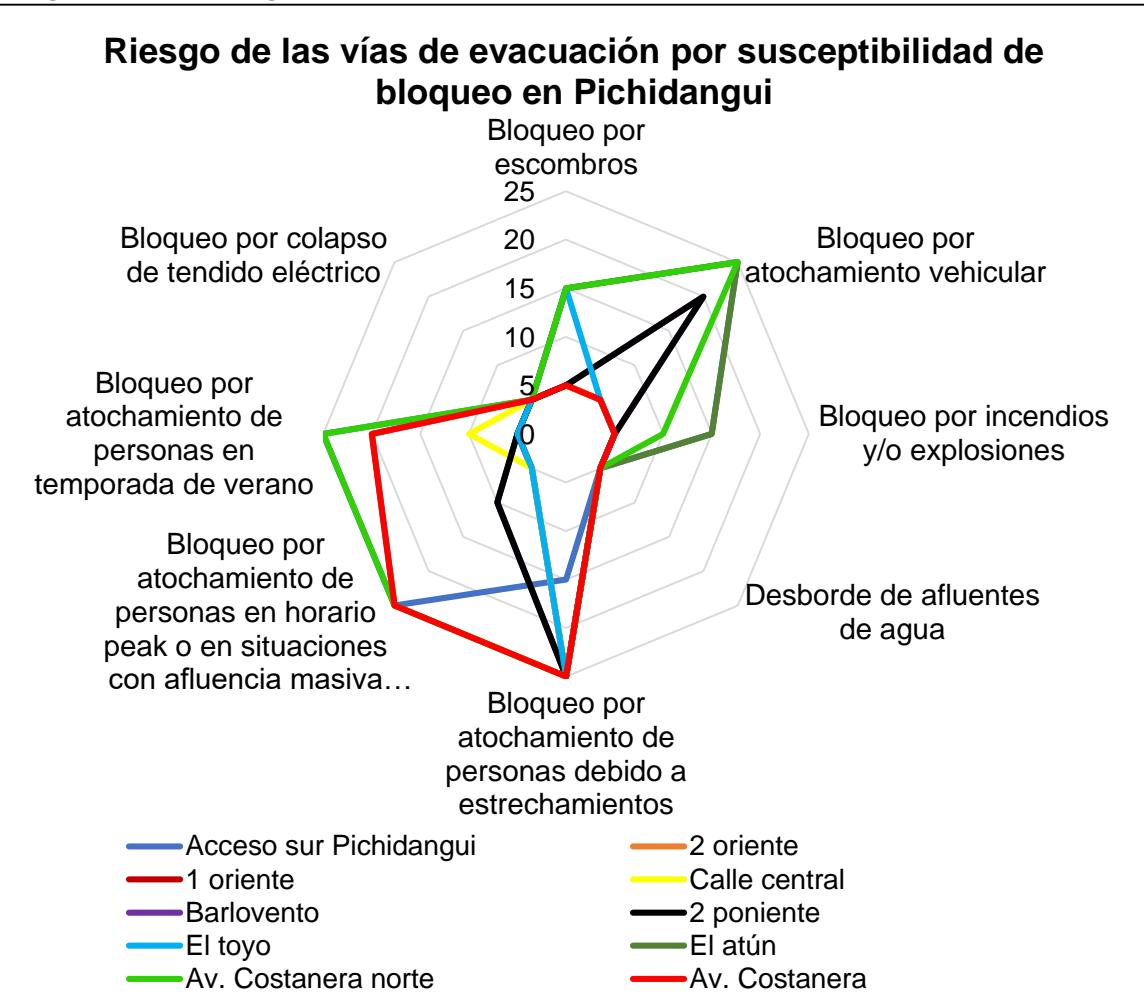
## SECTOR 3

### Sector 3 marejadas 26-06-2017



# CONCLUSIONES

Para la amenaza por tsunami se describen los niveles de impacto, a través de matrices las cuales abarcan una gran cantidad de variables con una leve descripción de los daños y perjuicios de manera general, las que entregaron los siguientes resultados

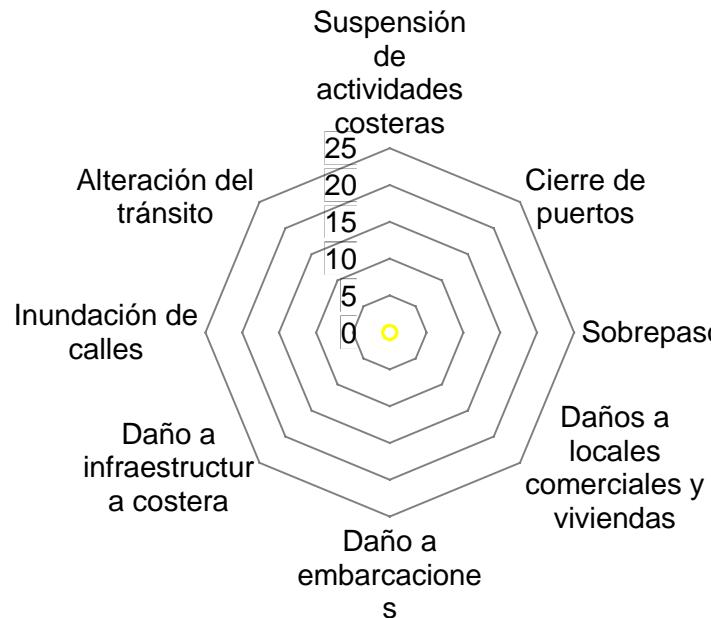


Donde es aconsejable mejorar la calidad de las vías delimitando calzadas y veredas, mejorar cruces, reestructuración de los lugares donde estacionar estimando la población flotante, mejorar iluminación pública y la señalética, con la finalidad de reducir el riesgo

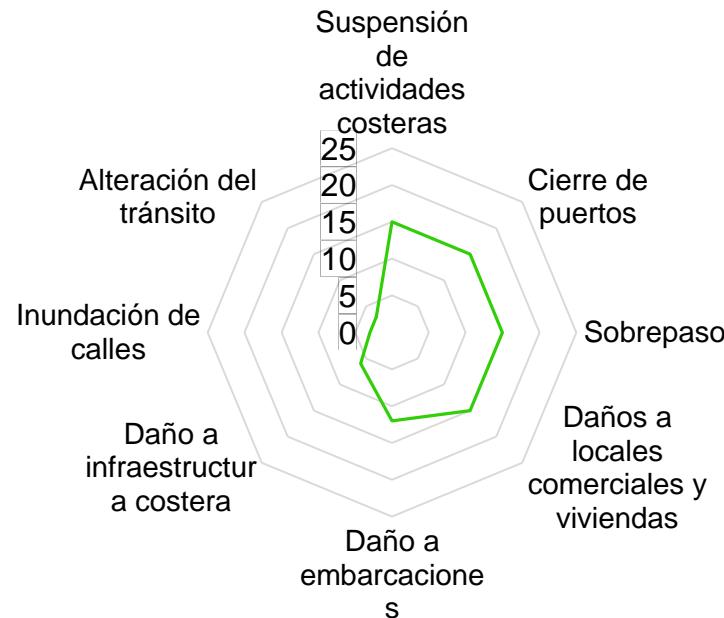
# CONCLUSIONES

El estudio de impacto por marejadas se basa en episodios y registros pasados. En Pichidangui específicamente en el sector 2 la gran mayoría de variables analizadas muestran alta vulnerabilidad, esto se debe a que la mayor parte del poblado, comercio, actividades recreativas y el acceso principal a la playa se encuentran en esta zona, siendo afectados por el sobrepaso de flujo por oleaje lo que a su vez provoca daño a viviendas y locales comerciales. A diferencia de los otros sectores analizados en donde sus vulnerabilidades no están expuestas a la amenaza.

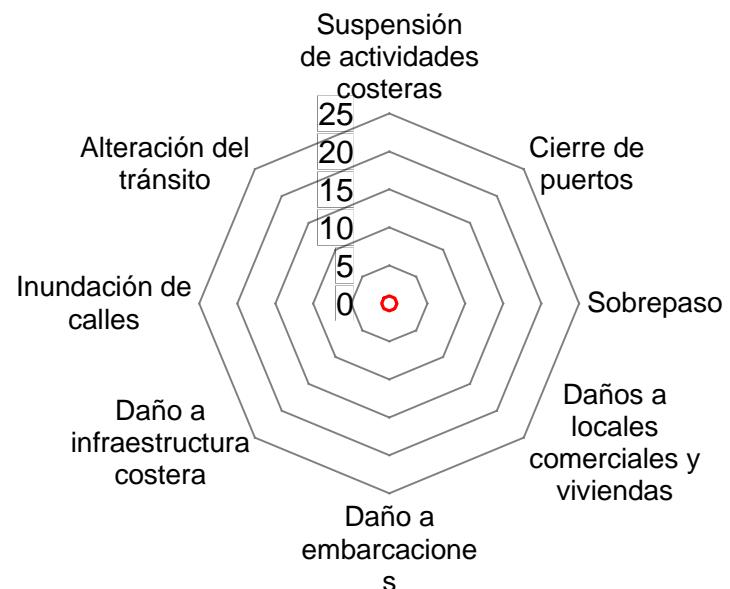
**Sector 1 marejadas 26-06-2017**



**Sector 2 marejadas 26-06-2017**



**Sector 3 marejadas 26-06-2017**



Algunas medidas para disminuir el riesgo son mejorar las protecciones costeras evitando el sobrepuerto excesivo, retirar el comercio aledaño al borde costero para evitar daños o perjuicios a locales comerciales y finalmente, evaluar planes de contingencia para que los pescadores resguarden todos sus aparejos que disponen en la caleta