



UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Escuela de Pregrado

Carrera de Geografía

Evaluación de la vulnerabilidad física de un litoral arenoso frente a fenómenos meteorológicos-oceanográficos: el caso de la bahía de Quintero, Región de Valparaíso.

Memoria para optar al título de Geógrafo

César Alejandro Araya Cornejo

Profesor guía: Pablo Sarricolea Espinoza

Santiago – Chile

2023

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Planteamiento del problema.....	10
1.2. Estado del Asunto.....	12
1.2.1. Geomorfología de litorales arenosos.....	14
1.2.2. Oleaje, aumento del nivel del mar y posición relativa de la línea litoral.....	18
2. OBJETIVOS.....	24
3. HIPÓTESIS.....	24
4. MATERIALES Y METODOS.....	25
4.1. Planteamiento metodológico.....	25
4.2. Área de estudio.....	38
4.2.1. Caracterización medio físico.....	38
4.2.1.1. Geomorfología y Geología.....	38
4.2.1.2. Contexto sismotectónico.....	41
4.2.1.3. Viento.....	43
4.2.1.4. Oleaje.....	44
4.2.1.5. Ambiente de marea.....	45
4.2.1.6. Tipo de zona de rompiente y refracción del oleaje.....	45
4.2.2. Caracterización medio ambiente antrópico.....	46
4.2.2.1. Historia de asentamientos en torno a la Bahía de Quintero.....	47
4.2.2.2. Asentamientos residenciales y uso de suelo no industrial.....	49
4.2.2.3. Zonas e infraestructura expuesta.....	50
4.2.2.4. Zonas urbanas.....	53
4.2.2.5. Área industrial.....	59
4.2.3. Caracterización de amenazas meteo-oceanográficas en la bahía de Quintero.....	68
4.2.3.1. Eventos meteo-oceanográficos extremos de agosto de 2015 y junio de 2017.....	68
5. RESULTADOS	88
5.1. Identificación estado erosión/acreción de la playa.....	88

5.1.1.	Desplazamiento línea de costa.....	88
5.1.2.	Tasa de Erosión Costera.....	91
5.2.	Identificación de parámetros clave que influyen en el estado de la playa arenosa.....	96
5.3.	Definición de un ranking de vulnerabilidad según cada parámetro clave.....	97
5.3.1.	Caracterización de sub-índices	98
5.3.1.1.	Diferencia entre altura de olas modales y de tormenta.....	98
5.3.1.2.	Ángulo de incidencia del oleaje a la costa.....	98
5.3.1.3.	Frecuencia de tormentas.....	98
5.3.1.4.	Altura significativa de la ola.....	99
5.3.1.5.	Rango Mareal.....	99
5.3.1.6.	Aumento del nivel del mar.....	100
5.3.1.7.	Orientación de la costa.....	100
5.3.1.8.	Pendiente.....	100
5.3.1.9.	Elevación.....	101
5.3.1.10.	Ancho de la playa.....	101
5.3.1.11.	Tipo de línea litoral.....	102
5.3.1.12.	Retroceso de la línea litoral.....	102
5.3.2.	Ranking de vulnerabilidad por sub-índice.....	103
5.4.	Jerarquización de parámetros de acuerdo a la metodología AHP.....	106
5.4.1.	Consideraciones teóricas para identificar la importancia relativa de los sub-índices.....	106
5.4.2.	Asignación de peso por sub-índice.....	108
5.5.	Cálculo de Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) por unidad de evaluación y espacialización de los resultados.....	109
6.	DISCUSIÓN.....	111
6.1.	Evaluación de los datos obtenidos.....	111
6.1.1.	Comparación de CVI con respuestas de los temporales del 8 de agosto de 2015 y 25 de junio de 2017.....	111
6.1.2.	Debilidades y fortalezas del cálculo de CVI.....	116
7.	CONCLUSIONES.....	119
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	122
9.	ANEXOS.....	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Partes de un litoral arenoso	16
Figura N° 2: Influencia de la marea astronómica, según su nivel en la posición de la rompiente en el litoral.....	19
Figura N° 3: Componentes de la elevación del nivel medio del mar.....	20
Figura N° 4: Amplificación marea meteorológica por aumento del nivel del mar.	211
Figura N° 5: Dinámica atmosférica del Pacífico ecuatorial, según la temperatura superficial oceánica. a) Año normal; b) año El Niño.....	211
Figura N° 6: Nivel del mar en el Pacífico ecuatorial occidental, central y oriental, de acuerdo a la dinámica de los vientos como consecuencia del calentamiento superficial del océano. a) Año normal, en que se genera un aumento del nivel del mar hacia las costas del Pacífico ecuatorial occidental; b) Año El Niño, donde se genera un debilitamiento de los vientos del pacífico ecuatorial central y oriental, aumentando el nivel del mar hacia las costas de América a la altura del Ecuador	222
Figura N° 7: Diagrama de flujo que resume los pasos metodológicos del presente trabajo	255
Figura N° 8: Ejemplo de uno de los dieciocho mosaicos con imágenes Google Earth del litoral arenoso de la bahía de Quintero, correspondiente a la fecha 17 de diciembre de 2004	266
Figura N° 9: Ejemplo de la división del litoral arenoso en unidades de evaluación por sector de la bahía. En este caso, corresponde a las tres unidades de evaluación de Ventana y a la primera del Sector Industrial	277
Figura N° 10: Esquema de procedimiento para determinar desplazamiento de la línea litoral (costa)	288
Figura N° 11: Ejemplo de indicadores visuales de línea litoral. La letra “L” corresponde al límite de superficies húmeda y seca, denominado “groundwater exit point”	29
Figura N° 12: Ejemplo de líneas litorales dibujadas mediante fotointerpretación de imágenes Google Earth	300
Figura N° 13: Esquema del método de cálculo del ancho de playa, mediante la ecuación de la media de una función, utilizado en el presente trabajo.....	322
Figura N° 14: Área de estudio.....	38
Figura N° 15: Costa de tipo abrasivo y erosivo tectónicas con bahías lobuladas protegidas	39
Figura N° 16: Carta geológica Quintero	41
Figura N° 17: Esquema zona de generación de sismos interplaca tipo thrust (c), donde la línea roja marca la zona sismogénica asociada.....	42
Figura N° 18: A la izquierda, sismicidad en Chile Central desde 1900 hasta 2017; a la derecha, esquema de grandes terremotos históricos de Chile Central hasta 2017	43
Figura N° 19: Promedio velocidad de vientos	44
Figura N° 20: a) Distribución y dirección de Hm0(m); b) distribución de Tm (s); c) batimetría de la bahía de Quintero.	45
Figura N° 21: a) Esquema de tipo de zona de rompiente en base a análisis multitemporal de imágenes Google Earth; b) diagrama de refracción del oleaje.	46

Figura N° 22: a) Cartografía caleta de pescadores Ventanas b) Caleta de pescadores Ventanas	51
Figura N° 23: a) Cartografía caleta de pescadores Loncura; b) Caleta de pescadores Loncura.....	52
Figura N° 24: a) Cartografía caleta de pescadores El Manzano; b) Caleta de pescadores El Manzano.....	533
Figura N° 25: a) Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Ventanas; b) Retén Ventanas de Carabineros de Chile, ubicado en la zona de mayor exposición.....	555
Figura N° 26: a) Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Loncura; b) Biciclero y máquinas de ejercicios en espacio público, ubicado en la zona de mayor exposición.....	577
Figura N° 27: a) Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Quintero; b) Entorno de la playa El Manzano, ubicado en la zona de mayor exposición..	59
Figura N° 28: Cartografía de empresas de la zona industrial, junto al litoral arenoso, frente a la zona industrial.....	611
Figura N° 29: Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Industrial Norte	622
Figura N° 30: AES CHILE, planta Ventana	633
Figura N° 31: Puerto Ventana S.A.	633
Figura N° 32: Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Industrial Centro	644
Figura N° 33: CODELCO, división Ventana	655
Figura N° 34: OXIQUM S.A.....	655
Figura N° 35: Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Industrial Sur	666
Figura N° 36: ENAP, terminal Quintero.....	677
Figura N° 37: GNL terminal de gas natural licuado, Quintero.....	677
Figura N° 38: COPEC S.A.	688
Figura N° 39: Fotografías registro consecuencias temporal 8 agosto 2015. a) Embarcaciones varadas junto a caleta El Manzano; b) Lanchas de pesca artesanal varadas y destruidas en playa El Manzano; c) Infraestructura y maquinaria dañadas en Loncura	69
Figura N° 40: Erosión de terraplén junto a la parte posterior de la playa, y daños a línea de transmisión eléctrica subterránea expuestas por oleaje (frente a OXIQUM, en unidad de evaluación Industrial 10); a) Representación estado de terraplén previo al temporal del 8 de agosto de 2015; b) Erosión de terraplén y daños en líneas de transmisión eléctrica subterránea. c) Exposición de cámara de paso de línea de transmisión eléctrica por erosión del terraplén.....	700
Figura N° 41: Fotografías registro consecuencias temporal 25 junio 2017. a) Embarcaciones varadas, paseo costanera destruido y desaparición de playa frente a pista de aterrizaje de base aérea Quintero; b) Lancha de pesca artesanal varada y paseo costanera destruido; c) Lancha de pesca artesanal varada cerca de bodegas base aérea Quintero	711
Figura N° 42: Fotografías de registro erosión por oleaje en terraplén frente a OXIQUM. a) Exposición de losetas que recubren líneas de transmisión subterráneas, temporal del 8 de	

agosto de 2015. b) Exposición de líneas de transmisión del temporal de 25 de junio de 2017; en este último hubo un mayor retroceso del terraplén, respecto a temporal de agosto de 2015	722
Figura N° 43: Series de tiempo de los valores mensuales en las regiones Niño 3.4 y Niño 1+2, entre 2008 y 2018.....	733
Figura N° 44: Cartas sinópticas 7 y 8 de agosto 2015.....	74
Figura N° 45: Gráfico relación presión atmosférica y nivel del mar	74
Figura N° 46: Cartas sinópticas 24 de junio del 2017. a) 00 UTC; b) 12 UTC	75
Figura N° 47: Cartas sinópticas 25 de junio del 2017. a) 00 UTC; b) 12 UTC	766
Figura N° 48: Cartas sinópticas 26 de junio del 2017. a) 00 UTC; b) 12 UTC	76
Figura N° 49: Rosa de los vientos de frecuencias según su dirección de origen estación Quintero, 2015. a) 07 de agosto. b) 08 de agosto. c) 09 de agosto.....	78
Figura N° 50: Rosa de los vientos de frecuencias según su dirección de origen estación Quintero, 2017. a) 24 de junio. b) 25 de junio. c) 26 de junio	79
Figura N° 51: Velocidad del viento temporales 2015 y 2017, Est. Quintero.....	800
Figura N° 52: Nodos de cálculo de altura del oleaje.....	80
Figura N° 53: Altura ola Nodo A, temporal 2015 y 2017	81
Figura N° 54: Altura ola Nodo B, temporal 2015 y 2017	81
Figura N° 55: Altura ola Nodo C, temporal 2015 y 2017.....	822
Figura N° 56: Altura ola Nodo D, temporal 2015 y 2017.....	82
Figura N° 57: Coeficiente de marea 08 de agosto del 2015	83
Figura N° 58: Coeficiente de marea 25 de junio del 2017	844
Figura N° 59: Marea Astronómica, temporales agosto 2015 y junio 2017	84
Figura N° 60: Marea meteorológica, temporales agosto 2015 y junio 2017.....	855
Figura N° 61: Nivel del mar observado, temporales agosto 2015 y junio 2017.....	866
Figura N° 62: Relación altura de ola (nodo B) - nivel observado del mar, 08 de agosto del 2015	86
Figura N° 63: Relación altura de ola (nodo B) - nivel observado del mar, 25 de agosto del 2017	86
Figura N° 64: Modelo propagación del oleaje y distribución de valores de Coef. de agitación, Bahía Quintero.....	87
Figura N° 65: Gráfico promedios DLC primavera-verano, por periodo	89
Figura N° 66: Comparación de superficie de playa El Manzano del año 2004 (polígono azul), versus superficie del 30 de agosto del 2015	90
Figura N° 67: Gráfico promedios DLC otoño-invierno, por periodo	91
Figura N° 68: Gráfico promedios TEC primavera-verano, por periodo	92
Figura N° 69: Promedios de TEC por zona, para las fechas del periodo otoño-invierno, con la clasificación del estado erosión/acreción establecido en la Tabla N°7	94
Figura N° 70: Gráfico promedios TEC otoño-invierno, por periodo	94
Figura N° 71: Gráfico con tendencias de pérdida de superficie (%), a cinco y diez años .	96
Figura N° 72: Cartografía que ilustra la vulnerabilidad a la erosión del litoral arenoso de la bahía de Quintero de los sub-índices correspondientes a la variable procesos dinámicos	105

Figura N° 73: Cartografía que ilustra la vulnerabilidad a la erosión del litoral arenoso de la bahía de Quintero de los sub-índices correspondientes a la variable características de la costa.....	105
Figura N° 74: Cartografía que ilustra la vulnerabilidad a la erosión del litoral arenoso de la bahía de Quintero del único sub-índice relacionado a la variable geo-indicador de erosión	106
Figura N° 75: Cartografía que ilustra el nivel de vulnerabilidad de cada unidad de evaluación, de acuerdo al valor de CVI calculado	109
Figura N° 76: Gráfico de comparación entre ranking de CVI y ranking de respuestas del litoral arenoso del sector de Ventanas, del 8 de agosto del 2015 y del 25 de junio del 2017.	112
Figura N° 77: Gráfico de comparación entre ranking de CVI y ranking de respuestas del litoral arenoso del sector Industrial, el 8 de agosto de 2015 y del 25 de junio de 2017 ..	113
Figura N° 78: Gráfico de comparación entre ranking de CVI y ranking de respuestas del litoral arenoso del sector de Loncura, el 8 de agosto de 2015 y del 25 de junio de 2017.	114
Figura N° 79: Gráfico de comparación entre ranking de CVI y ranking de respuestas del litoral arenoso del sector de Quintero, el 8 de agosto de 2015 y del 25 de junio de 2017.	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Escala de evaluación usado para la comparación entre variables.....	355
Tabla N° 2: Valores de RI de acuerdo al número total de variables comparadas.....	36
Tabla N° 3: Precipitaciones acumuladas temporal 2015	77
Tabla N° 4: Precipitaciones acumuladas temporal 2017	77
Tabla N° 5: Promedios de DLC por zona, para las fechas del periodo primavera-verano..	88
Tabla N° 6: Promedios de DLC por zona, para las fechas del periodo otoño-invierno	89
Tabla N° 7: Clasificación del estado erosión/acreción, de acuerdo al desplazamiento de la línea litoral (m/año)	91
Tabla N° 8: Promedios de TEC por zona, para las fechas del periodo primavera-verano, con la clasificación del estado erosión/acreción establecido en la Tabla N°7	91
Tabla N° 9: Proyección (%), de pérdida de superficie de playa arenosa a cinco y diez años, en base a ancho promedio de playa abril 2020 y TEC 2004-2020	95
Tabla N° 10: Variables y sub-índices escogidos para evaluar la vulnerabilidad física a la erosión en el litoral arenoso de la bahía de Quintero	97
Tabla N° 11: Ranking de vulnerabilidad según valores de cada sub-índice	104
Tabla N° 12: Pesos asignados a cada sub-índice, mediante metodología AHP	108
Tabla N° 13: Rango de valores de CVI para establecer estado de vulnerabilidad por unidad de evaluación	109

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N° 1: Zonas de uso de suelo y uso actual por localidad, de acuerdo a plan regulador vigente.	134
Anexo N° 2: Valores del área (m ²) continental del litoral arenoso de la bahía de Quintero, para cada fecha según unidad de evaluación.	136
Anexo N° 3: Longitud (m) de la línea litoral, frente al litoral arenoso, de la bahía de Quintero para cada fecha según unidad de evaluación.	137
Anexo N° 4: Valores calculados para el desplazamiento de la línea litoral, DLC (m), para cada fecha según unidad de evaluación en el periodo primavera-verano.	138
Anexo N° 5: Valores calculados para el desplazamiento de la línea litoral, DLC (m), para cada fecha según unidad de evaluación en el periodo otoño-invierno.	139
Anexo N° 6: Valores calculados para la tasa de erosión costera, TEC (m/año), para cada fecha según unidad de evaluación en el periodo primavera-verano.	140
Anexo N° 7: Valores calculados para la tasa de erosión costera, TEC (m/año), para cada fecha según unidad de evaluación en el periodo otoño-invierno.	141
Anexo N° 8: Valores de vulnerabilidad por cada sub-índice, asignados de acuerdo a ranking de vulnerabilidad establecido.	142
Anexo N° 9: Matriz de comparación por pares de sub-índices, matriz normalizada y cálculo de la Razón de Consistencia (CR).	143
Anexo N° 10: Tabla con pesos de sub-índices, valores de vulnerabilidad por subíndice y resultados de CVI por unidad de evaluación.	144
Anexo N° 11: Tabla de comparación de ranking CVI versus ranking de respuestas línea litoral temporales 08 de agosto del 2015 y 25 de junio del 2017 (el primer lugar de todos los rankings representa la mayor erosión registrada, y el último lugar la menor erosión). ...	145

RESUMEN

El cambio climático ha establecido un nuevo escenario de vulnerabilidad en la zona costera, asociado a las distintas amenazas que ahí confluyen. Esto hace necesario generar herramientas que permitan transformar los resultados del monitoreo de amenazas en información de utilidad para la gestión de riesgo de desastres siconnaturales. Los investigadores asociados a este tema, por lo general, valoran los métodos basados en modelos numéricos y computacionales debido a su precisión, fundamentalmente en su capacidad predictiva. Sin embargo, para obtener resultados satisfactorios con estas metodologías, son necesarios muchos recursos técnicos, entre otros, para la obtención de datos que permitan construir los respectivos modelos para evaluar los diversos componentes del riesgo, entre los que se encuentran la vulnerabilidad física. El Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI), es un método basado en índice, de carácter semi cuantitativo, que tiene como virtud la capacidad de adaptarse a diferentes escalas de trabajo y tipo y cantidad de base de datos de un área en específico. Permite establecer, mediante un valor numérico adimensional, el tipo de vulnerabilidad física de una zona costera en particular. El objetivo del presente trabajo es determinar la vulnerabilidad física a la erosión de la playa arenosa de la bahía de Quintero frente a fenómenos de tipo meteo-oceanográfico, mediante el cálculo de CVI, utilizando información de carácter gratuita disponible en diversas fuentes. Asimismo, para obtener el CVI, se utilizó la metodología del Proceso Analítico Jerárquico AHP (Analytic Hierarchy Process), de manera de poder identificar cual es la influencia de cada variable involucrada en la vulnerabilidad física del área de estudio. Como resultado final, se confeccionó una cartografía que espacializa los resultados obtenidos de CVI, y que establece cuales son las zonas con mayor vulnerabilidad física a la erosión del litoral arenoso, utilizando un ranking con los conceptos baja, moderada, alta y muy alta. Los resultados obtenidos indican que la mayor vulnerabilidad física se encuentra en el centro de la bahía, frente al complejo industrial de Quintero y Puchuncaví, alcanzando un estado de vulnerabilidad alta. Por otra parte, hacia los extremos de la bahía, la vulnerabilidad del litoral arenoso disminuye conforme aumenta la distancia desde el centro, con un estado de vulnerabilidad moderada en gran parte de la extensión de la bahía, excepto en el extremo sur oeste, en que fue identificado un área acotada en estado de vulnerabilidad baja.

Palabras clave: Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI); Proceso Analítico Jerárquico (AHP); vulnerabilidad física; erosión; fenómenos meteo-oceanográficos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La zona costera es un ambiente de alta complejidad dinámica, muy importante en términos ambientales, culturales y socioeconómicos (de Andrade, 2019). Se constituye como un ambiente vulnerable y requiere una atención especial para preservar los ecosistemas y las actividades humanas ahí presentes (Anfuso et al., 2021). La zona costera se localiza en la interfase tierra – mar, y su evolución y respuestas a los impactos dependen de múltiples factores que se relacionan a lo largo de la línea litoral y dependen de la compleja interacción de las presiones humanas y las inducidas por la naturaleza (Bonaldo et al., 2018, en Furlan et al., 2021). Algunos de estos factores y procesos son: la disponibilidad de sedimento, tormentas que causan cambios a largo plazo, la energía del clima del oleaje, las interacciones entre los cuerpos sedimentarios continentales y oceánicos, el aumento del nivel del mar, y la configuración geomorfológica y geológica de la zona costera, entre otros (Alexandrakis et al., 2014, y Pranzini, 2004, en de Andrade et al., 2019).

En las próximas décadas, las zonas costeras deberán enfrentar desafíos como el cambio climático, el aumento del nivel del mar y el crecimiento de la población (Jackson et al., 2013, en Burvingt et al., 2017).

El cambio climático proyectado genera variaciones en el nivel promedio del mar, en las condiciones del oleaje, en las mareas meteorológicas y en el flujo de los cursos de agua (Nicholls et al., 2007; Fitzgerald et al., 2008; Ranasinghe et al., 2009; Nicholls et al., 2010; Cazenave et al., 2013; Wong et al., 2014; en Ranasinghe, 2016), induciendo a la erosión, proceso considerado como uno de los impactos más importantes que enfrentan los sistemas costeros en todo el mundo (Toimil et al., 2017).

La erosión es la principal amenaza para las costas del mundo, particularmente de los litorales arenosos, una de las formas naturales más inestables y valiosas (Alexandrakis et al., 2014). Actualmente un 70% de los litorales arenosos del mundo se encuentran en franco retroceso (Hinkel et al., 2013, en Toimil et al., 2017).

Hzami et al. (2021) señalan que, para el caso de la cuenca del mediterráneo, área que fluctúa entre las regiones climáticas templada, árida y semiárida, varios factores antropogénicos pueden tener un impacto mayor en la dinámica costera que el aumento del nivel del mar a largo plazo. Otro factor que juega un rol significativo en los procesos de erosión en zona tectónicamente activas, es el ciclo sísmico (Isla et al., 2012, y Martínez et al., 2015, en Martínez et al., 2018).

El Ministerio del Medio Ambiente de Chile (2019) publicó el informe “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, que evaluó el riesgo de los sistemas humanos y naturales de la zona costera para 104 comunas de Chile. Este informe concluye que, de las 35 playas analizadas, un 9% se encuentra en un estado de erosión alta (por sobre los 1,5 m anuales) y un 71% en estado de erosión.

En Chile la erosión en playas no es un fenómeno aislado y concentrado en un área en particular del país, sino que se encuentra al menos en 5 regiones de la zona norte y centro sur del país, sentando un precedente importante que justifica la investigación de los fenómenos físicos involucrados y la evaluación de la vulnerabilidad de los territorios expuestos.

La bahía de Quintero es una de las bahías más importantes de Chile Central, debido a que alberga una cantidad importante de actividades como la portuaria, la producción energética y la industrial. Además, se emplazan las localidades de Ventanas, Loncura y Quintero, en las que se desarrollan actividades relacionadas directamente con la playa, como lo son el turismo y la pesca artesanal.

Araya (2018) identificó un desplazamiento neto de la línea litoral hacia el continente, en un sector de la bahía de Quintero, de hasta 34 metros entre el 2004 y el 2018. Asimismo, el Ministerio del Medio Ambiente (2019) calculó una tasa media de erosión de -0,40 m/año entre los años 1994 y 2018. Bajo este escenario, es prudente sugerir que la playa arenosa de la bahía de Quintero ha estado expuesta a la erosión costera y que, por lo tanto, se puede categorizar como un riesgo latente para ese territorio.

Para prevenir impactos económicos, sociales y culturales en esa zona, los tomadores de decisiones deben conocer la vulnerabilidad de la región a través de los procesos físicos de la zona costera (Rangel-Buitrago & Anfuso, 2009, en de Andrade, 2019), persiguiendo de esta manera la Prioridad 1 de acción del Marco Sendai 2015 – 2020 (ONU, 2015), que consiste en comprender el riesgo de desastre en todas las dimensiones de la vulnerabilidad, exposición y características de la amenaza para desarrollar medidas de prevención y mitigación de desastres.

La vulnerabilidad física de la costa puede ser definida como la susceptibilidad de una zona costera a ser afectada por procesos de erosión o inundación debido, entre otras, a tormentas y tsunamis (Anfuso et al., 2021). La vulnerabilidad física a la erosión costera comprende un conjunto de variables que caracterizan una fragilidad frente a un fenómeno o evento de alta energía o de potencial destructivo (Mazzer et al., 2008, en de Andrade, 2019).

De esta forma, para evaluar la vulnerabilidad a la erosión, hay que considerar los múltiples factores que componen la amenaza, además de las características de la playa para conocer cuan susceptible es.

Dentro de las múltiples opciones para la evaluación de vulnerabilidad, se encuentra el Índice de Vulnerabilidad Costera (Coastal Vulnerability Index, CVI), método que integra una serie de variables para evaluar la sensibilidad de la zona costera frente al cambio climático, al aumento del nivel del mar, a los cambios en los patrones del oleaje, entre otros (Martins et al., 2017). En esencia, es un método basado en un índice calculado a partir de un conjunto de elementos (variables), que son categorizados de acuerdo a un ranking que indica su nivel de vulnerabilidad, y cuyos valores obtenidos son asignados a cada uno de los segmentos en los que fue previamente dividida la costa (de Serio et al., 2018). Los datos

son georreferenciados y mediante un mapa se reflejan los valores de CVI para cada segmento de la costa con el objetivo de identificar las zonas de alta vulnerabilidad, facilitando de esta forma la generación de propuestas de estrategias de mitigación, u otras dentro de la gestión de la zona costera.

Dentro de las ventajas del cálculo de CVI se encuentra su adaptabilidad a la escala en que se quiera trabajar (Martins et al., 2017), a las condiciones particulares de cada zona costera y a la información disponible (de Serio et al., 2018), condición fundamental en el contexto de la Bahía de Quintero donde la información accesible es reducida y dispersa. Lo anterior, es una de las razones que justifican las investigaciones con esta clase de métodos en zonas costeras como la bahía de Quintero, con el fin de proporcionar antecedentes a quienes son responsables de la toma de decisiones en la gestión territorial, para traspasar los resultados a los instrumentos de ordenamiento territorial.

1.2. Estado del Asunto

La detección y mapeo de áreas costeras vulnerables ante las diversas amenazas a las que se encuentran expuestas son herramientas relevantes para la gestión y toma de decisiones, especialmente en un contexto mundial de desarrollo sostenible del territorio (ONU, 2015). Para esto, se han diseñado a lo largo de los años una serie diversos métodos para la evaluación de la vulnerabilidad costera, con el objetivo de reducir entre otros aspectos, el riesgo de desastres (De Serio et al., 2018).

Satta (2014, en Sekovski et al. 2020) identifica cuatro diferentes categorías de métodos para evaluar la vulnerabilidad costera: métodos basados en índices/indicadores; métodos basados en modelos dinámicos computacionales; herramientas de apoyo de decisiones basados en SIG; y herramientas de visualización.

El método basado en índices/indicadores es una herramienta que ayuda a representar la vulnerabilidad costera mediante un único índice numérico calculado a partir de un conjunto de elementos independientes, que es asignado a cada uno de los segmentos en que fue dividida previamente la costa por el investigador responsable y que permite generar un ranking en cuanto a la susceptibilidad de sufrir cambios (De Serio et al., 2018).

El principal objetivo de estos indicadores es apoyar las acciones dentro del contexto de la gestión costera gracias a la síntesis de variables, procesos e información involucrados (Ferreira, 2018).

El inicio de este tipo de metodologías se atribuye a Gornitz & Kanciruk (1989, en Koroglu et al., 2019), el que comenzó como uno de los más comunes y simples métodos para evaluar la vulnerabilidad de la costa, particularmente frente a la erosión y/o inundación como consecuencia del aumento del nivel del mar; en un principio, tenía el propósito de generar una base de datos con el objetivo de obtener una mirada general del estado actual de las costas del mundo frente al acelerado aumento del nivel del mar, para posteriormente evolucionar a lo que actualmente se conoce como Índice de Vulnerabilidad Costera (Coastal

Vulnerability Index, CVI), consistente en la evaluación de la vulnerabilidad en base a parámetros físicos tales como la geomorfología, pendiente regional de la zona costera, cambios relativos del nivel del mar, altura significativa promedio del oleaje, rango mareal promedio, y la tasa histórica promedio de cambios en el nivel del mar (Gornitz & Kanciruk, 1989, en Koroglu et al., 2019).

Gornitz (1991) y Gornitz et al. (1994) sumaron a las variables físicas marinas y continentales incluidas en CVI, seis variables climatológicas: probabilidad anual de tormenta tropical, probabilidad anual de huracanes, un índice de frecuencia e intensidad de huracanes, velocidad media de avance, promedio anual de ciclones extratropicales, y el promedio del aumento del nivel del mar por acción de los huracanes (Huracan Surge) (Koroglu et al., 2019).

Otras investigaciones consideradas clásicas para este tipo de metodología (Daniels, White, y Birdwell 1994; Thieler & Hammar Klose, 1999), adoptaron variables de riesgo tales como geomorfología, tasa de erosión y acreción de la línea litoral, tasa de aumento relativo del nivel del mar, entre otros, con el objetivo de componer un CVI para las costas de Estados Unidos (de Andrade et al., 2019).

A partir de esos trabajos, el CVI se ha expandido en cuanto a su uso y en la cantidad de indicadores para el modelado espacial del clima, dinámica antropogénica, además de incluir información relativa a variables socio-económicas y político administrativas para medir la vulnerabilidad comunitaria ante las amenazas naturales (Furlan et al., 2021). Tal es el caso de McLaughlin & Cooper (2010), quienes diseñaron un avanzado CVI fundamentado en la integración de tres variables: una que se relaciona con la susceptibilidad y resiliencia costera a la erosión, basado en un conjunto de sub-índices ambientales y geomorfológicas (elevación, orientación, material del sustrato, entre otros); otra variable denominada forzantes costeros (o procesos dinámicos), la cual involucra sub-índices que contribuyen directamente a la generación de oleaje con potencial erosivo (por ejemplo, frecuencia de tormentas costeras y altura significativa de la ola); y otra que engloba la evaluación de la infraestructura antropogénica potencialmente en riesgo (tamaño de la población, tipo de vialidad, entre otros) (Furlan et al., 2021). Del mismo modo, el método extendió su uso a otros tipos de investigaciones asociadas a la vulnerabilidad costera que involucran otras ecuaciones debido a la integración de nuevas variables, por ejemplo, para evaluar la vulnerabilidad social de comunidades por amenazas naturales (Cutter et al., 2003), o la pérdida de valor de superficies urbanas versus agrícolas (Snoussi et al., 2008; Sterr, 2008, en Koroglu et al., 2019).

Junto con los cambios de las variables y ecuaciones implicadas debido a la expansión del uso de la metodología original en que se adicionan otros elementos expuestos a las amenazas naturales de la costa (por ejemplo, MDim-CVI, Multi-dimensional Coastal Vulnerability Index (Furlan et al., 2021); ICVI, Integrated Coastal Vulnerability Index (Hzami et al., 2021.), se sumaron nuevas herramientas de evaluación como el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), de manera de poder asignar pesos a cada variable involucrada, ya que de acuerdo a Cutter (2003), no todas las variables son iguales, existiendo por lo tanto una necesidad de desarrollar un esquema de ponderación de pesos

adecuado al territorio evaluado. Esto permitió a las investigaciones que utilizan esta última herramienta señalada, no solo asignar pesos a las variables de acuerdo a la importancia que tienen respecto a la vulnerabilidad, sino que además adecuarla a la escala de trabajo que, al menos desde Mclaughlin & Cooper (2010), ya no solo es utilizada a nivel nacional, sino que también a nivel regional y local.

A pesar de los constantes ajustes que la metodología de CVI ha tenido en las diversas investigaciones a lo largo de los años, esta aún descansa en el enfoque original de evaluación de la vulnerabilidad costera que refleja un escenario en un instante en particular, pudiendo no ser sensible a los cambios a largo plazo (Furlan et al., 2021). A esto se suma la necesidad de una opinión experta al ponderar las variables para el cálculo del índice, lo que conlleva un sesgo en las categorizaciones (Koroglu et al., 2019). No obstante lo anterior, de acuerdo a Cogswell (2018, en Koroglu et al., 2019), cerca del 30% de los estudios de vulnerabilidad costera utilizan esta metodología.

De cualquier forma, la aplicación de CVI es considerada una evaluación robusta, que juega un importante rol al facilitar el proceso de toma de decisión en las estrategias de gestión de la costa, especialmente en el contexto de adaptación ante las crecientes amenazas por el cambio climático (Koroglu et al., 2019), al ser un índice estructurado que integra y combina múltiples variables que capturan varios niveles y dimensiones de vulnerabilidad en la costa (Furlan et al., 2021).

1.2.1. Geomorfología de litorales arenosos

De acuerdo a Bird (2008), la costa es la zona de confluencia e interacción entre la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera, y que además se encuentra sujeto a un conjunto de procesos, entre los que se hayan movimientos tectónicos, cambios en el nivel del mar, los efectos de las olas, mareas y corrientes marinas, la variación de presión y temperatura atmosférica, y la acción del viento.

Castro y Morales (2006) definen dos tipos de costas de acuerdo a forma y composición, las escarpadas y rocosas, que incluyen estructuras como acantilados, plataformas de abrasión, rías y fiordos; y las costas bajas y deposicionales, las que comprenden dunas, lagunas litorales, marismas marítimas, estuarios, deltas y playas.

Dentro de las costas bajas y deposicionales, se encuentran los litorales arenosos (sandy shores), correspondientes a las zonas de interfase tierra-mar en que el sedimento arenoso es transportado por el viento y el oleaje, dinámica que se genera entre los tres sistemas interconectados que los componen como unidad geomorfológica: la zona de surf, la playa y las antedunas (Harris & Defeo, 2022).

En el extremo continental del litoral arenoso se encuentra la anteduna, duna en forma de cresta desarrollada en la parte superior del backshore, paralelamente a la línea litoral y como consecuencia del depósito de arena eólica en la vegetación costera (Hesp, 1999). Las antedunas pueden variar desde terrazas relativamente planas a crestas marcadamente convexas (Hesp, 2002), con rangos de altitud de entre 1 m y 35 m, dimensiones que dependen en parte del tipo de zona de surf; pequeñas antedunas se desarrollan en litorales

arenosos con playas reflectivas, mientras que grandes antedunas se encuentran presentes en litorales arenosos con playas disipativas, lo anterior al considerar condiciones en que los otros factores involucrados son iguales (Short & Hesp, 1982, en Hesp, 1999).

La zona de surf es un área que se extiende desde el punto en que rompe la ola hasta el inicio de la zona de swash, que es el lugar donde la ola colapsa (Short, 1999a). Es altamente dinámica debido a la energía involucrada por el rompimiento y disipación de la energía de la ola, la cual transcurre en un ancho variable que puede llegar incluso hasta los 300 m en playas disipativas de alta energía (Short, 1999a). Es una zona donde no solo actúa la energía de las olas de gravedad, sino que además están presentes la acción de las mareas, las corrientes y las olas de infragravedad, todas las cuales mediante su disipación de energía establecen el mecanismo de transporte de sedimentos que modifica la morfología subacuática, y que a la vez afecta la dinámica de las olas y las corrientes (Coco et al., 2020).

Parte importante de los litorales arenosos son las playas, definidas como una acumulación de sedimentos depositados por las olas, entre el límite submarino desde donde las olas pueden transportar sedimento hacia el litoral, y el límite superior del swash, el cual corresponde al punto máximo de acción de la ola en la superficie subaérea (Short, 1999a).

La playa está compuesta por sedimentos cuyos tamaños van desde arenas muy finas hasta cantos rodados, siendo las arenas y gravas los depósitos más comunes (Bird, 2008). Su perfil ha sido dividido en distintas zonas, algunas de las cuales están graficadas en la Fig. 1 y definidas a continuación:

Foreshore: Parte de la playa sujeta a la acción del oleaje en periodos que no son de tormenta (Davidson-Arnott, 2010)

Backshore: Zona entre el límite del swash y el límite a barlovento de una duna o acantilado, y que ocasionalmente es de pleamar y el nivel de bajamar (Castro y Morales, 2006)

Línea litoral: Es el límite del agua, con el sedimento de la playa, que se mueve de acuerdo al nivel de marea, habiendo por lo tanto una línea litoral de pleamar (marea alta) y otra de baja mar (Bird, 2008).

Zona de swash: Es la zona relativamente estrecha entre el punto de colapso de la ola y la línea litoral, y en la cual el agua fluye en un vaivén como una delgada capa, hasta que infiltra por completo en el sedimento de la playa (Short, 1999a).

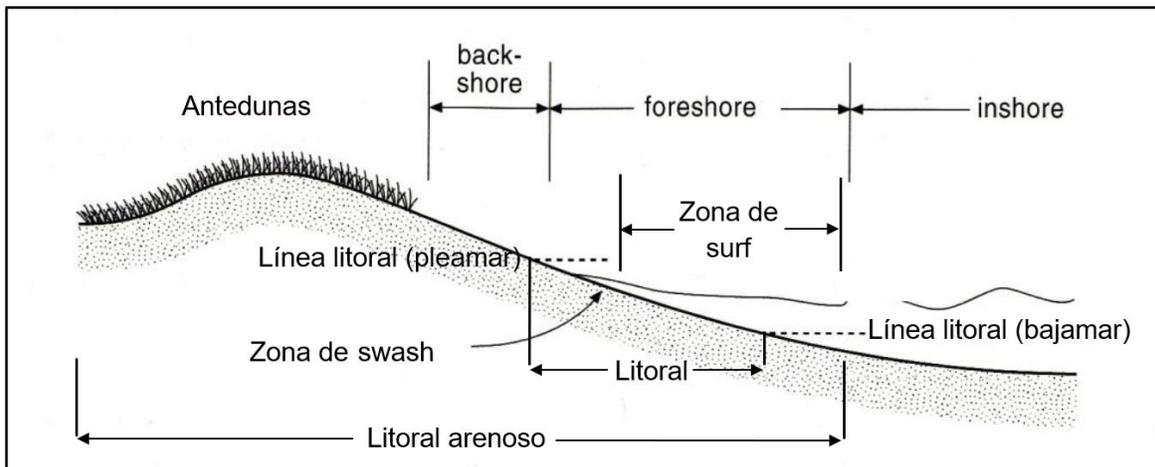


Figura N° 1: Partes de un litoral arenoso. **Fuente:** Modificado de Hesp (1999).

Todas las playas, como parte de un litoral arenoso, son parte de un altamente variable sistema, cuyos procesos pueden ser dominados tanto por olas como por mareas y, por otra parte, variar en su composición (Short, 1999b).

En cuanto a las playas arenosas, de ambientes micromareales y dominadas por el oleaje, Wright and Short (1984, en Short, 1999b) realizaron una clasificación de playas en base al Índice de Caída (Fall Velocity, Ω) adaptado de Gourlay, usado originalmente en playas naturales. Estos autores, definieron tres tipos de acuerdo a la morfodinámica de la playa como sistema, considerando tanto la morfología de su sección subaérea y de la zona de surf, así como las características de las fases de la ola en aguas someras y el litoral (Short, 1999b).

Los tipos de playa de acuerdo a la clasificación descritas por Short (1999b) son:

Playas Disipativas: desde el punto de vista de la energía de los tres tipos de playa, estas representan a las de más alta energía, y por lo general se caracterizan por ser erosionadas en la sección subaérea, como consecuencia del ataque periódico de olas considerablemente altas. Son playas cuya zona de surf es amplia (usualmente sobre 200 m) y con múltiples barras y surcos submarinos (en costas expuestas al swell, al menos dos) y rompientes de ola. Este tipo de playas son caracterizadas por una zona de swash amplia y de baja pendiente, que en algunos casos puede extenderse desde el pie de la duna hasta la zona de marea baja.

En estos sistemas, el frente de duna, el backshore, la línea litoral y las barras y los surcos son paralelos entre sí, con mínimas desviaciones de su disposición longitudinal al litoral.

Playas intermedias: Son playas que energéticamente hablando se encuentran entre las de alta energía y las de baja energía. La característica que más identifica a este tipo de playas es la presencia de barras y surcos perpendiculares, en mayor o menor grado, al litoral, teniendo con esto una zona de surf horizontalmente segregada.

Sus características la hacen favorable para presentar un amplio rango de condiciones ambientales, teniendo desde olas de altura media a alta, de arenas finas a medias, y grandes periodos de ola. Considerando que, por ejemplo, playas intermedias con olas de 0,5 m y otras con 2,5 m de altura presentarían características morfológicas diversas, es que se dividió este tipo de playas en cuatro estados que, de mayor a menor energía, son:

- a) Barra y surco longitudinal (LBT): Se caracteriza por poseer una barra recta longitudinal al litoral, con un surco que los separa. Por lo general, las estructuras paralelas al litoral son rectas, y en algunos casos la barra puede tener un canal transversal que la divide y por donde se forma una corriente de retorno, responsable del transporte de sedimentos hacia el mar; es posible también la presencia de cusps y una berma en torno a la zona de swash. Las olas tienden a romper por sobre la barra y, luego de atravesar el surco y volver a reformarse, vuelven a romper con menor energía cerca de la zona de swash.
- b) Playa y barra rítmica (RBB): Tiene como característica fundamental, una barra rítmica, en cuanto a que posee una forma compuesta de diversos semicírculos (estructuras semilunares) dispuestos longitudinal a la línea litoral, forma que se repite en la cara de la playa (megacusps). El centro del semicírculo en la barra, es el punto más profundo respecto a la superficie del mar, y es por donde circula una corriente de retorno. La barra es separada del litoral por un surco que también presenta una morfología rítmica a lo largo de la playa. Las olas tienden a romper en la parte menos profunda de la barra, la que corresponde generalmente a los puntos donde confluyen los brazos de los semicírculos; las olas al pasar por el centro del semicírculo tienen a romper cerca de la cara de la playa.
- c) Barra y playa rítmica (TBR): Se caracteriza por tener barras que son transversales o perpendiculares al litoral. Su morfología submarina es similar a playa y barra rítmica, con la diferencia de que la barra está adjunta a la playa, lo que genera como consecuencia un surco discontinuo y sistemas individuales de corrientes de retorno. Este tipo de playa también tiene formas semicirculares en la cara de la playa (megacusps), donde los brazos de los semicírculos se juntan con las barras, y los centros de los semicírculos tienden a estar frente a las corrientes de retorno.
- d) Terraza de baja mar (LTT): Es el estado de playa intermedia de más baja energía. Son caracterizadas por una cara de playa de moderada pendiente, la que se une a la barra o terraza en periodos de baja marea. La barra tiende a ser plana y adjunta a la cara de la playa, no teniendo una condición rítmica como en las playas y rip transversal, presentando en algunos casos corrientes de retorno.

Playas reflectivas: Son las playas de menor energía dentro de esta clasificación. Son playas compuestas generalmente por arenas finas o medias y con olas de menos de 1 m, razón por lo cual tienden a presentarse en los extremos protegidos de playas ubicadas en bahías y expuestas al swell. Son playas con un backshore y zonas de swash angostas, además de presentar comúnmente beach cusps a lo largo del litoral.

Estas playas no tienen barra o zona de surf, razón por lo que las olas avanzan hasta llegar al litoral para luego colapsar.

1.2.2. Oleaje, aumento del nivel del mar y posición relativa de la línea litoral

Varios son los fenómenos que determinan la geomorfología de un litoral arenoso, entre estos se encuentran olas de vientos, mareas meteorológicas, terremotos, tsunamis, cambios en el nivel del mar y el aporte de sedimentos (Martínez et al., 2018).

Las tormentas extremas son responsables de rápidos cambios en las líneas de costa a escala regional a lo largo del mundo, a diferencia del cambio climático y el aumento del nivel del mar, que son procesos graduales y mundiales (Burvingt et al., 2017). Eventos como las tormentas extremas se caracterizan por una conjunción de fenómenos físicos de origen meteo-oceanográfico, que producen efectos importantes por sobre la morfología de las costas, incluyendo litorales arenosos y otras formas adyacentes.

Tal es el caso del temporal del 8 de agosto de 2015, en que los efectos en la costa de Chile Central se produjeron como consecuencia del oleaje extremo asociado a marejadas, rachas de vientos importantes provenientes del noroeste, una baja presión histórica relacionada a un sistema frontal, y una marea astronómica que contribuyó en el aumento del nivel del mar (Winckler et al., 2017). Asimismo, el 25 de junio de 2017 ocurrió otro temporal con oleaje de gran altura y un aumento significativo del nivel del mar que generó sobrepasos e inundaciones, particularmente en la bahía de Quintero.

Uno de los fenómenos asociados a los temporales de agosto del 2015 y junio del 2017 son las marejadas, eventos de ola de gran altura formadas por vientos en el área oceánica y que se propagan fuera del área de generación llegando a sectores costeros, con un marcado poder erosivo (Paskoff, 2010).

Las olas generadas localmente por vientos, en condiciones de tormentas, son otro fenómeno que afectan a las costas en eventos extremos. Estas olas se generan por vientos que soplan en el litoral cercano, poseen un periodo menor a 10 segundos y son menos regulares que las olas de Swell de origen lejano (Bird, 2008).

Los procesos más importantes que controlan la morfología y la hidrodinámica de los ambientes de los litorales arenosos están asociados a la disipación de la energía del oleaje incidente (rompiente de la ola, olas de infragravedad, wave setup, swash, entre otros); sin embargo, no son los únicos, ya que las mareas también juegan un rol importante, aunque secundario respecto al oleaje (Masselink & Turner, 1999). Las mareas son movimientos ondulatorios de la superficie del mar y que tienen longitudes de onda y periodos grandes (Barrera, 2004). El principal rol geomorfológico de este fenómeno es el de elevar y bajar el

gradiente de presión en que al aumentar/disminuir en 1 Hpa (en condiciones estables), causa un aumento/disminución de 1 cm en el nivel del mar (Chaumillon et al., 2017).

Otro componente que propicia un aumento en el nivel del mar es el wave setup, que es una superelevación del nivel del agua en la zona de surf que permite a las olas alcanzar las partes más altas del perfil de un litoral arenoso; en términos coloquiales, es un aumento por acumulación de agua debido al oleaje incidente en la línea litoral (Aagaard and Masselink, 1999).

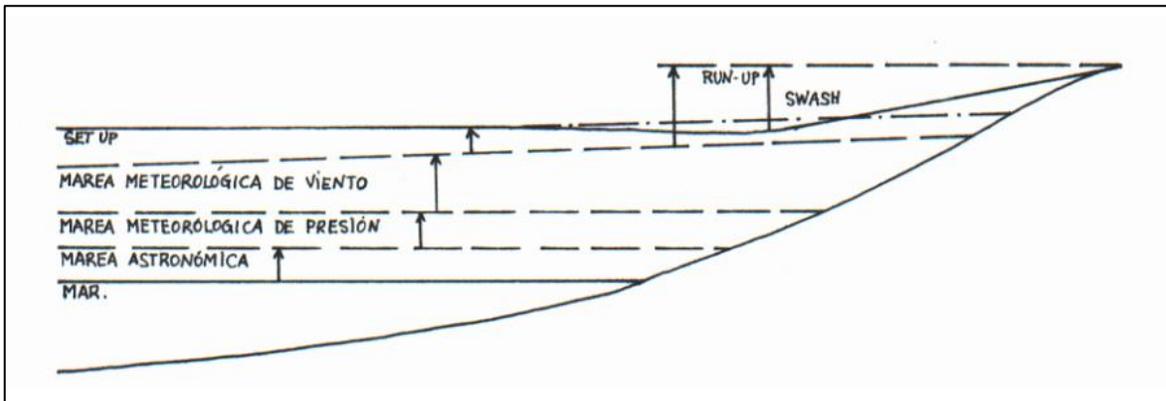


Figura N° 3: Componentes de la elevación del nivel medio del mar. **Fuente:** Barrera, 2004.

Otro factor importante es el aumento del nivel del mar a nivel mundial, el cual es posible de observar en el avance generalizado la línea litoral de los ambientes costeros, y el consecuente angostamiento de las playas subaéreas. Este proceso es atribuido al calentamiento global, y cuya tasa de aumento a nivel global es de cerca de 20 centímetros desde la revolución industrial (UCSUSA, 2013). Esta misma entidad señala que los efectos del aumento del nivel del mar en las costas son: amplificación de la marea astronómica (Fig. 4); un aumento en la erosión y en la degradación de la línea litoral; y una permanente inundación, especialmente en costas con baja pendiente.

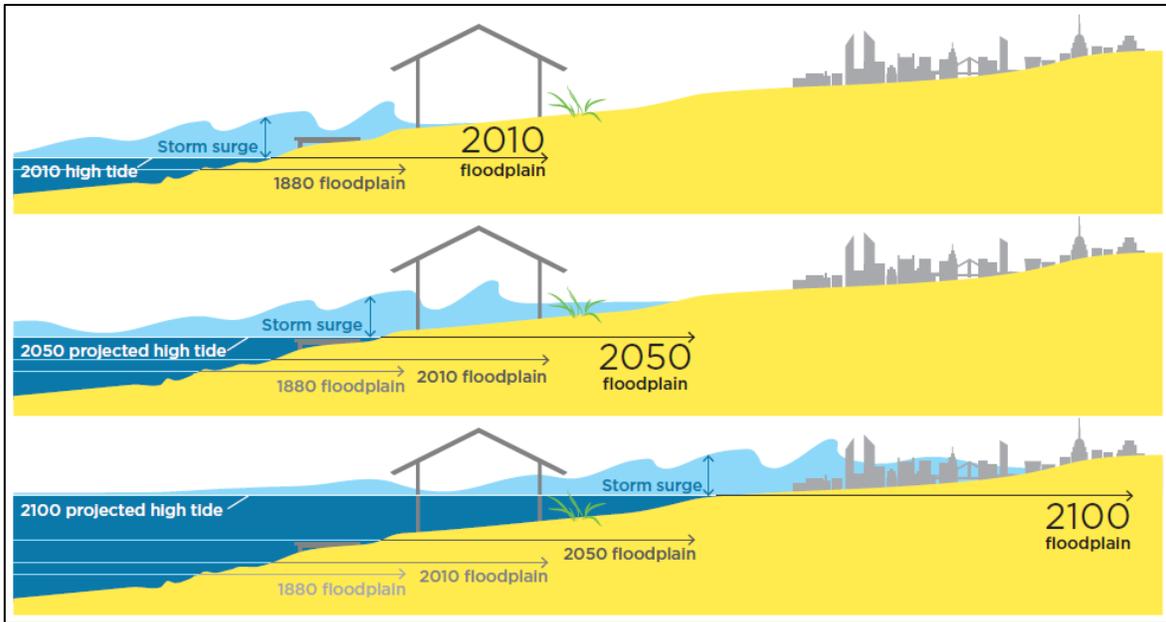


Figura N° 4: Amplificación marea meteorológica por aumento del nivel del mar. **Fuente:** UCSUSA, 2017.

Del mismo modo, el Niño-Oscilación del Sur (ENOS) también es una variable que puede influir. El ENOS es una variación irregular interanual de la atmósfera y la presión, que se desarrolla en el Pacífico ecuatorial central y que involucra intercambios de aire entre la celda subtropical de alta presión sobre el Pacífico sur oriental y una región de baja presión ubicada en Indonesia y en el Pacífico occidental (Barry & Chorley, 2009). En ciertos periodos de tiempo, los patrones de presión atmosférica cambian, aumentando la presión del aire en el occidente del Pacífico ecuatorial y disminuyendo en el oriente, situación en la que por unos pocos meses se debilitan los vientos alisios y en donde son reemplazados los vientos del este por vientos del oeste (Fig. 5) (Ahrens & Henson, 2016).

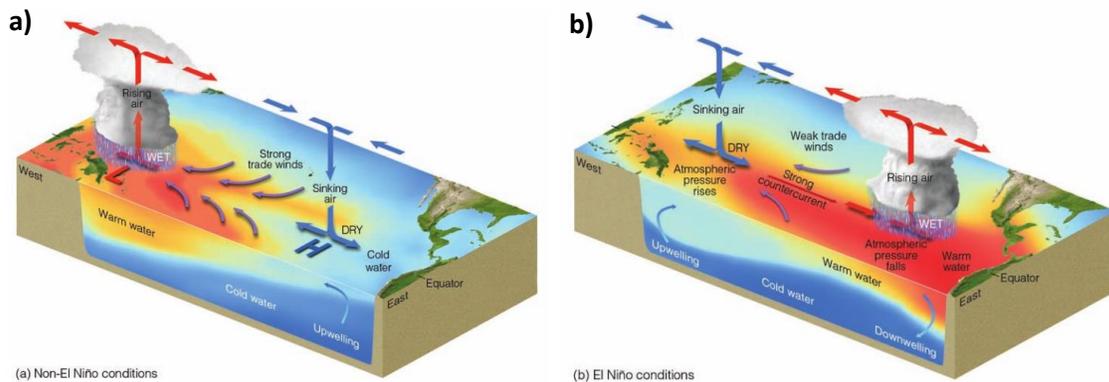


Figura N° 5: Dinámica atmosférica del Pacífico ecuatorial, según la temperatura superficial oceánica. a) Año normal; b) año El Niño. **Fuente:** Ahrens & Henson, 2016.

Esta anomalía se llama “El Niño” y es la fase cálida del ciclo ENOS, el cual consiste fundamentalmente en el calentamiento anormal de la temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial central y oriental (Maturana et al., 2004). Debido al calentamiento en esta zona, se modifica la celda de Walker trasladando el ascenso de aire cálido y húmedo (por convección), desde el oeste hacia el centro y este del Pacífico ecuatorial; además, se genera un cambio en la pendiente del nivel del mar que produce su aumento en el Pacífico oriental, en respuesta al debilitamiento de los vientos alisios (Fig. 6) (Maturana et al., 2004).

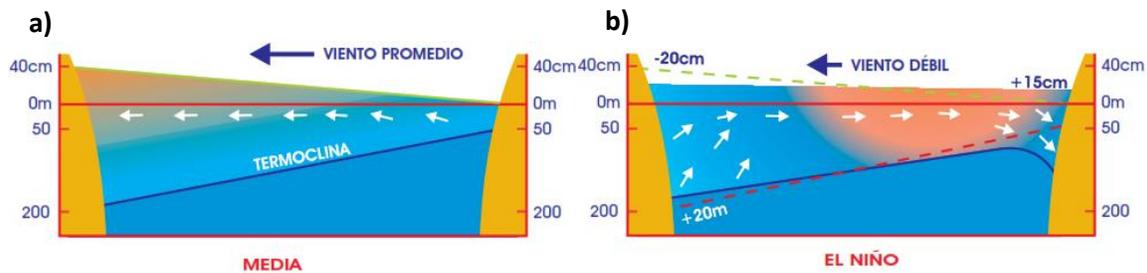


Figura N° 6: Nivel del mar en el Pacífico ecuatorial occidental, central y oriental, de acuerdo a la dinámica de los vientos como consecuencia del calentamiento superficial del océano. a) Año normal, en que se genera un aumento del nivel del mar hacia las costas del Pacífico ecuatorial occidental; b) Año El Niño, donde se genera un debilitamiento de los vientos del pacífico ecuatorial central y oriental, aumentando el nivel del mar hacia las costas de América a la altura del Ecuador. **Fuente:** Maturana et al., 2004.

Dentro de las diversas consecuencias de la fase cálida del ENOS, se encuentra además su influencia en eventos meteo-oceanográficos que involucran oleaje de gran altura en el litoral. Por ejemplo, se ha estimado mediante comparación la cantidad de eventos meteo-oceanográficos anuales con índices de oscilaciones climáticas; donde en aquellos años en que se registraron fases positivas de oscilaciones como el ENOS, se superó la cantidad promedio de eventos meteo-oceanográficos extremos anuales (Campos, 2016).

Por otra parte, la intensificación de la fase cálida del ENOS ha sido relacionada con un incremento en la intensidad y frecuencia de tormentas en el siglo XXI, aumentando así la erosión y las inundaciones en zonas costeras a lo largo del Pacífico (Masselink et al., 2016, en Martínez et al., 2018). También, tal como lo mencionan en Martínez et al. (2018), la fase cálida del ENOS podría estar asociada a anomalías en la dirección del oleaje, además de propiciar la ocurrencia de eventos extremos no solo en invierno, sino que durante todo el año.

Otra variable que influye en los procesos de erosión en la costa es la tectónica. Por una parte, la actividad sísmica del proceso de subducción entre las placas de Nazca y sudamericana condicionan el nivel medio del mar, por ejemplo, mediante hundimientos cosísmicos que inducen a su disminución, similar a lo ocurrido durante siglos como consecuencia del cambio climático (Martínez et al. 2018). Si bien no se ha encontrado evidencia de un aumento significativo en el nivel medio del mar en las últimas décadas en la costa de la Región de Valparaíso (Contreras-López et al., 2012, y Martínez et al., 2015, en Martínez et al., 2018), esta situación puede variar repentinamente por los movimientos

costeros verticales asociados al ciclo sísmico; asimismo, estos movimientos pueden generar errores en los registros del nivel del mar debido a cambios repentinos de altitud del mareógrafo fijo en tierra, particularmente en el periodo intersísmico (Martínez et al., 2018).

2. OBJETIVOS

Objetivo General

- Determinar la vulnerabilidad física a la erosión del litoral arenoso de la bahía de Quintero frente a fenómenos de tipo meteo-oceanográfico.

Objetivos Específicos

- Determinar la evolución del litoral arenoso de los últimos años, de acuerdo a su estado de erosión/acreción, en base a imágenes satelitales disponibles para el área de estudio.
- Calcular el Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) para el litoral arenoso de la bahía de Quintero en base a variables relacionadas con fenómenos y/o eventos de tipo meteo-oceanográfico.
- Espacializar los resultados del cálculo de CVI mediante una cartografía indicativa del estado de vulnerabilidad del litoral arenoso.

3. HIPÓTESIS

El desplazamiento de la línea litoral del litoral arenoso de la bahía de Quintero frente a eventos meteo-oceanográficos extremos, como el del 8 agosto de 2015, es diferenciado en cuanto a los procesos de erosión/acreción, de acuerdo a las características físicas de la playa y a los procesos dinámicos que actúan como forzantes costeros.

Si bien la configuración morfológica de la Bahía de Quintero permite que el oleaje modal y extremo arribe de forma atenuada, los nuevos escenarios previstos como consecuencia del cambio climático, donde los eventos meteo-oceanográficos extremos aumentan en frecuencia y energía, establecerán nuevas condiciones en los forzantes costeros, derivando en un incremento en la susceptibilidad a la erosión de la línea litoral.

Frente a eventos meteo-oceanográficos extremos futuros, el litoral arenoso de la bahía de Quintero presentará una mayor vulnerabilidad física en toda su extensión, particularmente en la zona central (frente al complejo industrial), debido a su exposición al oleaje de alta energía; condición que irá disminuyendo hacia los extremos norte y sur de la bahía no habiendo, sin embargo, una amplia diferencia con la zona de mayor vulnerabilidad debido a su configuración morfológica.

4. MATERIALES Y METODOS

4.1. Planteamiento metodológico

A continuación, se explican los pasos metodológicos utilizados en el presente trabajo, los cuales se encuentran resumidos en la Fig. 7.

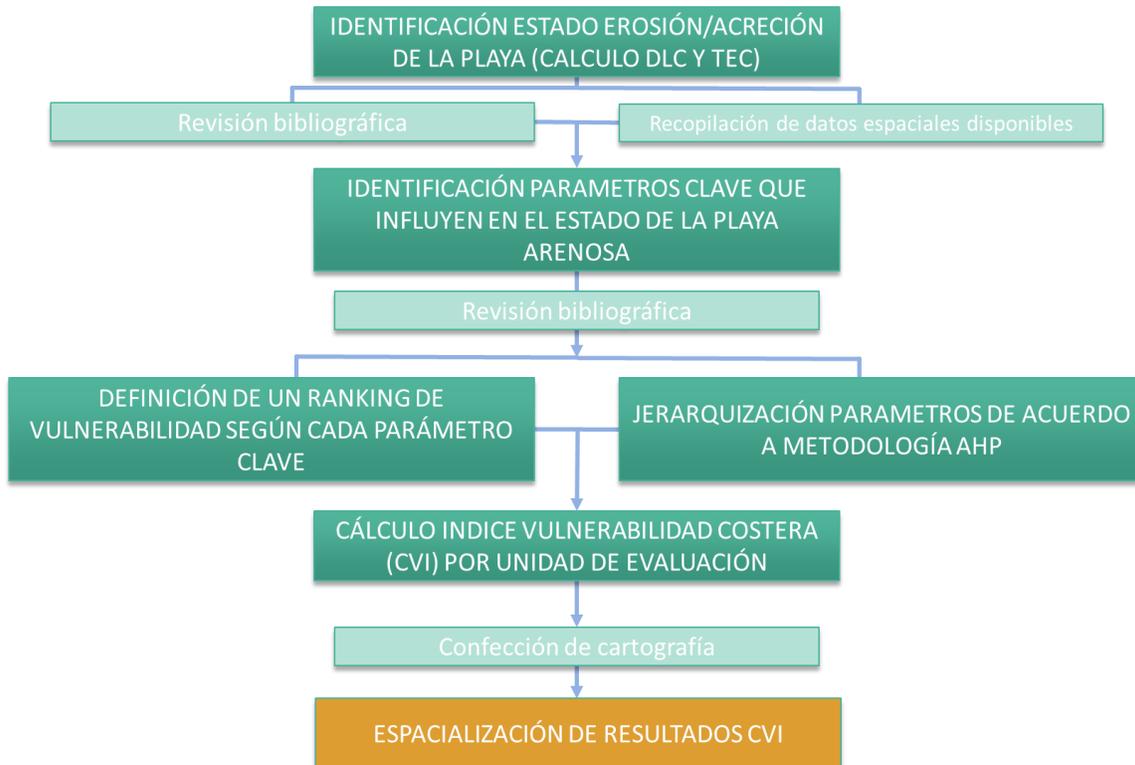


Figura N° 7: Diagrama de flujo que resume los pasos metodológicos del presente trabajo. **Fuente:** Elaboración propia.

I. Identificación del estado de la playa, erosión/acreción (calculo Desplazamiento Línea de Costa (DLC) y Tasa de Erosión Costera (TEC))

Para identificar el estado de evolución de la playa, mediante la fotointerpretación de imágenes satelitales del servidor Google Earth, se reconocerá el estado de la línea litoral para distintos años. Para la georreferenciación de las imágenes se utilizó la metodología de Araujo et al. (2013), para construir un mosaico compuesto por imágenes de 1 metro por pixel con el software ARCGIS 10.3. (Fig. 8). Cabe señalar que se confeccionarán mosaicos para distintos años de manera de realizar una evaluación multitemporal del estado de la línea litoral.

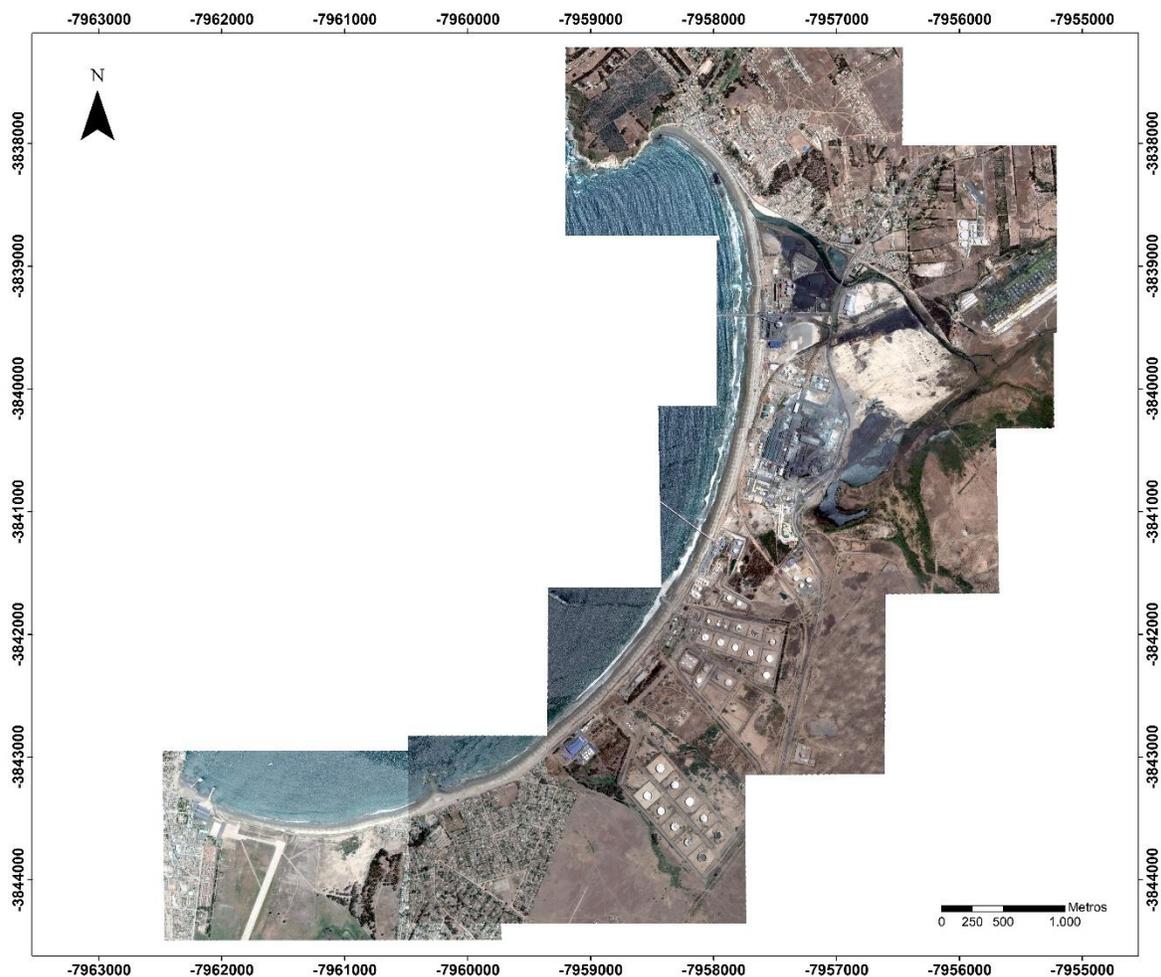


Figura N° 8: Ejemplo de uno de los dieciocho mosaicos con imágenes Google Earth del litoral arenoso de la bahía de Quintero, correspondiente a la fecha 17 de diciembre de 2004 (Datum: WGS 1984; huso: 19 S).
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, siguiendo la metodología propuesta por Araujo et al. (2013), se utilizan como base los pasos metodológicos de la aplicación del software DSAS 3.2, Digital Shoreline Analysis System, en donde se dibujará en ARCGIS 10.3 una línea de base (Fig. 9) que servirá como parámetro para comparar la posición de la línea litoral de acuerdo obtenida de las imágenes satelitales antes mencionadas.

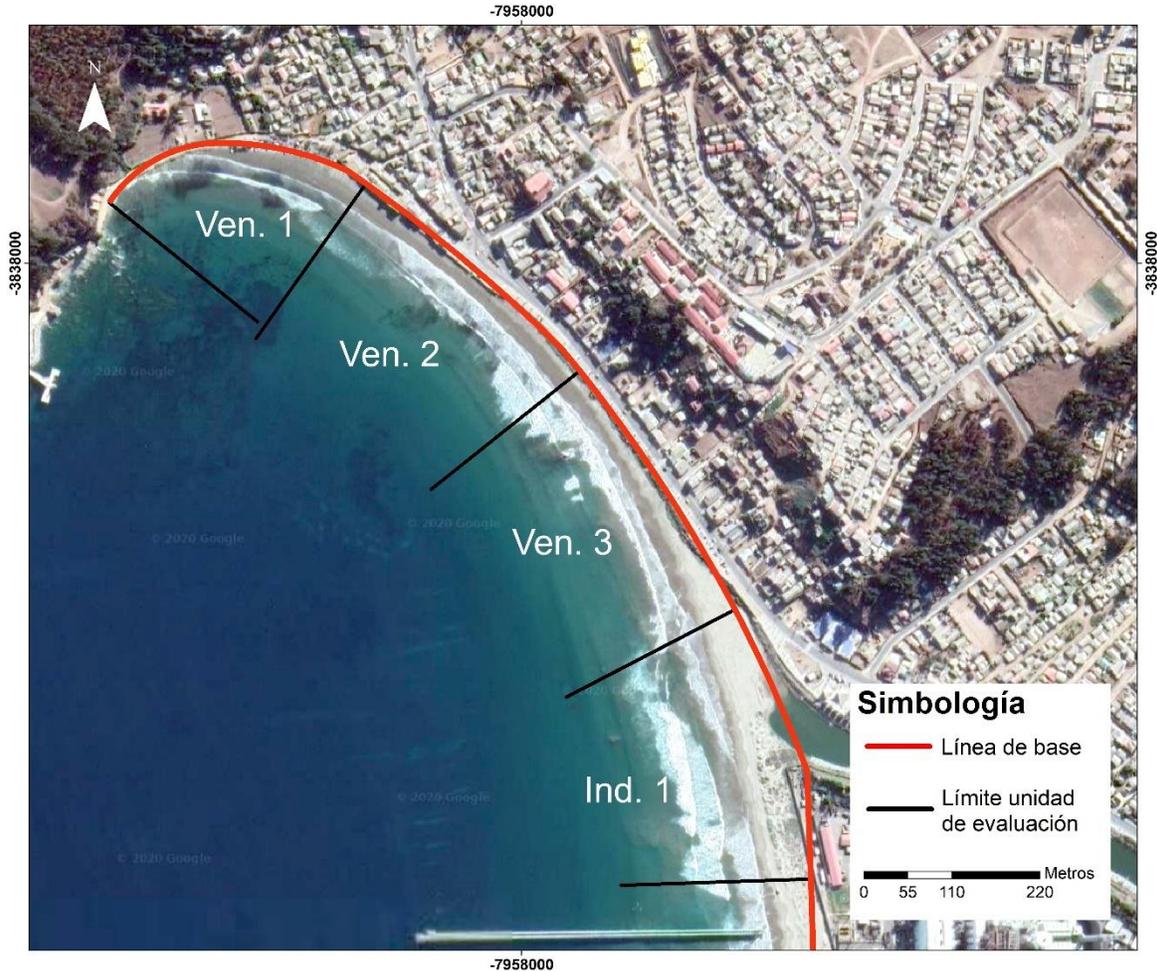


Figura N° 9: Ejemplo de la división del litoral arenoso en unidades de evaluación por sector de la bahía. En este caso, corresponde a las tres unidades de evaluación de Ventana y a la primera del Sector Industrial (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia.

Para poder realizar la evaluación del desplazamiento de la línea litoral (costa), de acuerdo a Torres et al. (2010), en ARCGIS 10.3 se dividió la playa arenosa de la bahía de Quinteros en unidades de evaluación de 300 m de extensión, medidos por sobre la línea de base antes mencionada (Fig. 10). Para establecer los límites laterales de las unidades de evaluación, se dibujarán líneas perpendiculares a la línea de base cada 300 m, con la herramienta Right Angle de la barra Editor de ARCGIS 10.3, considerando como antecedente el método utilizado en la aplicación del software DSAS 3.2, en Araujo et al. (2013).

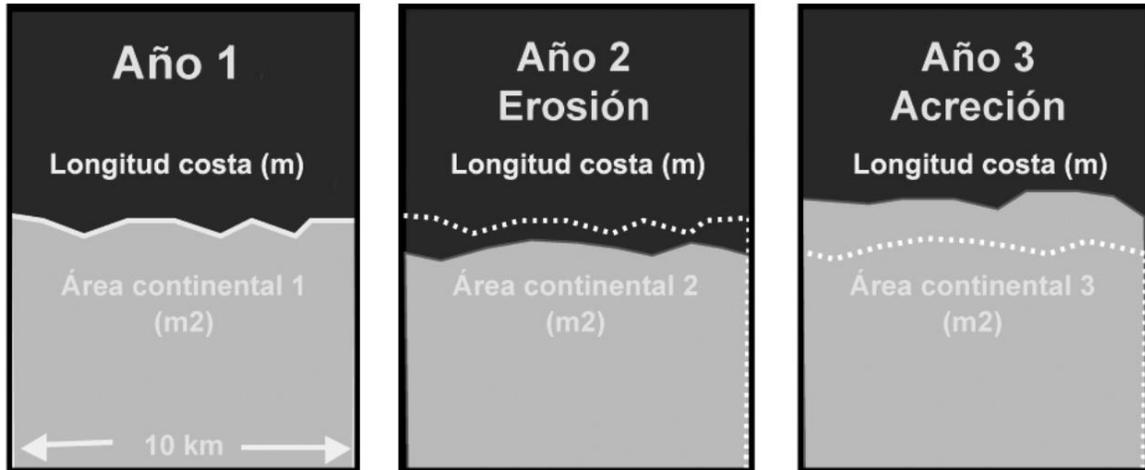


Figura N° 10: Esquema de procedimiento para determinar desplazamiento de la línea litoral (costa). **Fuente:** Torres et al., 2010.

Para obtener la posición de la línea litoral, se dibujará como línea en ARCGIS 10.3 uno de los indicadores visuales de la línea litoral mencionados por Boak & Turner (2005). En este caso, se utilizará el indicador denominado “groundwater exit point” (letra “L” en la Fig. 11), el cual representa el más continuo de los límites de mayor humedad de la superficie subaérea de la playa, que puede ser identificado a partir de las imágenes Google Earth utilizadas.



Figura N° 11: Ejemplo de indicadores visuales de línea litoral. La letra "L" corresponde al límite de superficies húmeda y seca, denominado "groundwater exit point". **Fuente:** Boak & Turner, 2005.

Teniendo la línea de base, los límites laterales de las unidades de evaluación y las líneas litorales de los diferentes años escogidos (Fig. 12), se confeccionará en ARCGIS 10.3 un polígono para cada unidad de evaluación, siguiendo la metodología de Torres et al. (2010). Esto dará como resultados polígonos de distintos tamaños debido al cambio de posición y forma de la línea litoral correspondiente a los distintos años evaluados, sobre los cuales se calculará el área con la herramienta Calculate Geometry de ARCGIS 10.3. Habiendo obtenido el área para cada unidad de evaluación, se calculará DLC y TEC con las siguientes ecuaciones de Torres et al. (2010):

$$\text{DLC (m)} = (\text{área continental2} - \text{área continental1}) / \text{longitud costa2}$$

$$\text{TEC (m/año)} = \text{DLC/año2} - \text{año1}$$

Donde área continental2 es la superficie total de un polígono, correspondiente a una unidad de evaluación con una línea litoral de un año posterior a área continental1; la longitud costa2

es el lado del polígono dibujado con la línea litoral del área continental2. De esta forma, se comparará el área de cada polígono con el polígono de la misma unidad de evaluación del año más antiguo que se pudo obtener con las imágenes satelitales.

Para la ecuación de TEC, año2 hace referencia al año del área continental2, y área continental1 a año2, obteniendo de esta forma la cantidad de años que transcurrieron entre las posiciones de ambas líneas litorales, para calcular la cantidad de metros de desplazamiento por año.

Los datos, las ecuaciones y los resultados serán tabulados en Excel, para luego confeccionar gráficos con las tendencias correspondientes.

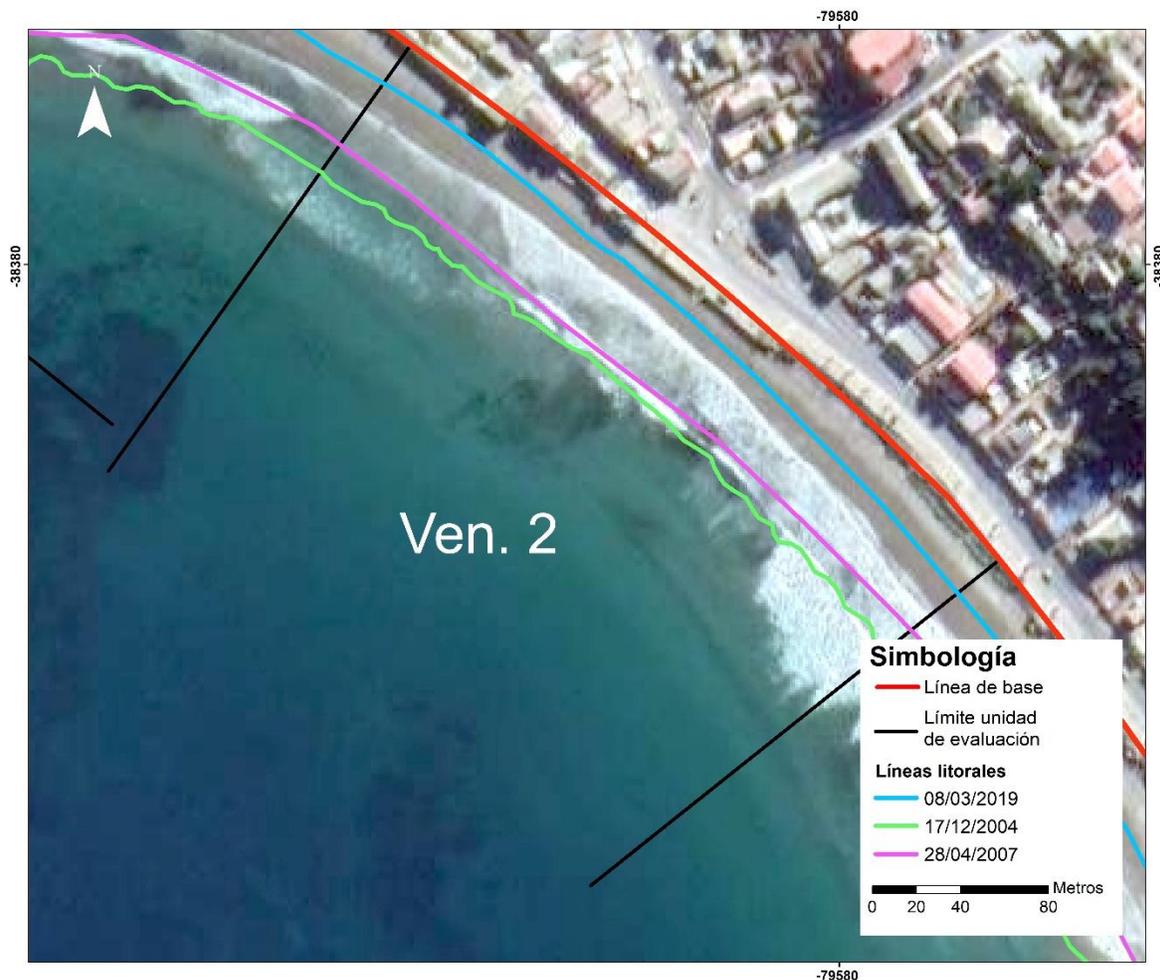


Figura N° 12: Ejemplo de líneas litorales dibujadas mediante fotointerpretación de imágenes Google Earth (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración Propia.

II. Identificación de parámetros clave que influyen en el estado de la playa arenosa

A partir de investigaciones a nivel nacional de temas relacionados a eventos meteorológicos extremos, y sus consecuencias en la dinámica del oleaje y el nivel del mar en la costa (por ejemplo, Winckler et al. (2017); Martínez et al. (2017)), al estado modal de las condiciones meteo-oceanográficas de la costa en Chile (Beyá et al., 2016), y a investigaciones relacionadas a las mismas temáticas anteriores a nivel internacional (Burvingt et al. (2017); de Serio et al. (2018); Furlan et al. (2021); Hzami et al.(2021); entre otros), se seleccionarán las variables meteo-oceanográficas asociadas con la erosión de la playa arenosa de la bahía de Quintero, y cuyos datos para el cálculo de CVI se encuentren disponibles a escala de las unidades de evaluación.

- a. *Pendiente*. Los valores de pendiente en porcentaje de cada unidad de evaluación se obtuvieron con el cálculo de la tangente de la superficie, mediante la división del cambio vertical en altitud (altura) entre la distancia horizontal (base), multiplicado por cien (GISWEB, consultado el 10 de abril de 2021)

$$\tan \theta = \frac{\text{altura}}{\text{base}} \times 100$$

Los valores de altura y base fueron obtenidos de Google Earth Pro, a través del dibujo de líneas transversales a la playa, entre su límite continental (pie de una duna o la base de un aterrazado artificial) y la línea litoral, con la herramienta “Agregar Ruta”, y de la creación de gráficos de perfiles de cada una generados con la opción “Mostrar Perfil de Elevación”. El valor de pendiente de cada unidad de evaluación se obtuvo mediante el cálculo del promedio de las pendientes de tres perfiles de elevación (equidistantes entre sí), de los extremos y en el centro de la unidad.

- b. *Elevación*. Al igual que para la pendiente, los valores de elevación de la playa arenosa se obtuvieron de Google Earth Pro, con la opción “Mostrar Perfil de Elevación” sobre tres líneas creadas, por cada unidad de evaluación, trasversales a la playa con la herramienta “Agregar Ruta”. El valor de la diferencia de altura es informado automáticamente al ser generado el perfil de elevación.
- c. *Ancho de playa*. El ancho de playa se calculó mediante la ecuación de la media de una función:

$$APmed = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx$$

Donde AP_{med} es el ancho medio de la playa arenosa; a y b son los límites sur y norte respectivamente, de las unidades de evaluación, siendo $(b - a)$ equivalente a la diferencia en metros de su posición latitudinal, cuyo valor se traduce, en este caso, en la longitud de la línea correspondiente al límite continental de la unidad de evaluación; y $\int_a^b f(x)dx$ es el área de la superficie de la playa arenosa, de $f(x)$ como la función que describe la forma de la playa arenosa.

En el software Arcgis 10.3 se dibujaron polígonos utilizando los límites longitudinales (norte – sur) de las unidades de evaluación (Fig. 13); la línea litoral de abril de 2020 (la más reciente considerada en este trabajo); y una línea dibujada en el límite continental de la playa arenosa (píe de la duna o el contacto de la playa con el aterrazado artificial). En Arcgis 10.3, con la herramienta Calculate Geometry, se calculó el área en metros cuadrados de cada polígono correspondiente a la superficie de la playa por unidad de evaluación; y en el mismo software, con la herramienta Measure, se determinó la longitud en metros del límite continental de la playa para cada polígono.

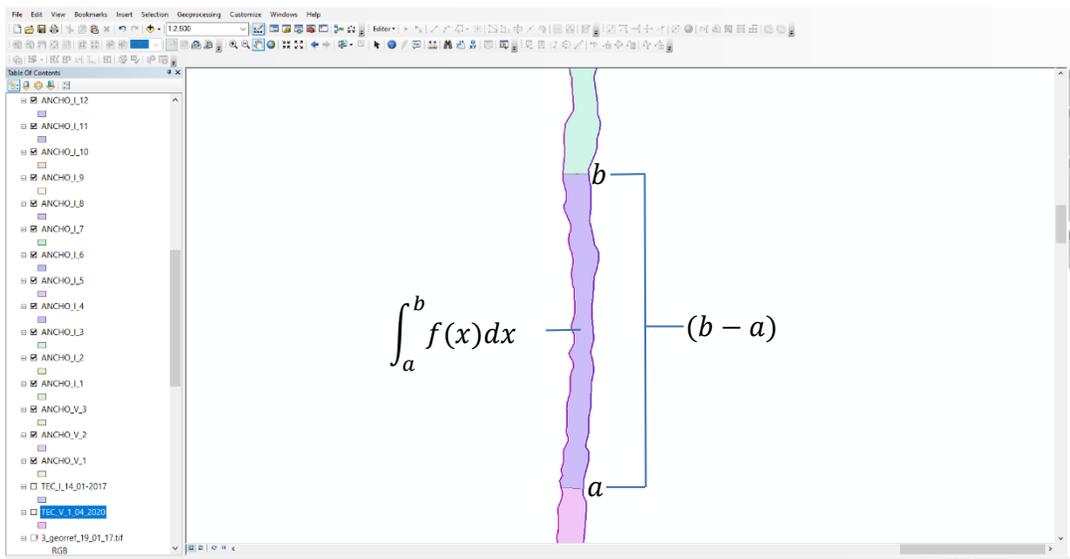


Figura N° 13: Esquema del método de cálculo del ancho de playa, mediante la ecuación de la media de una función, utilizado en el presente trabajo. **Fuente:** Elaboración propia.

- d. **Orientación.** Para determinar la orientación de la playa arenosa de la bahía de Quintero, se utilizó el modelo digital de elevaciones Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM (http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/, recurso en línea), al que se aplicó la herramienta, del software Arcgis 10.3, Aspect de ArcToolbox.

- e. *Tipo de línea litoral.* Esta es una variable en la que se establece su vulnerabilidad a una escala a nivel de la bahía, siendo la misma para todas las unidades de evaluación. En este caso, se determinó el grado de vulnerabilidad asignada a playas arenosas de acuerdo a bibliografía.
- f. *Frecuencia de tormentas.* Esta es otra variable en que se determina la vulnerabilidad de la playa a escala de la bahía de Quintero. En base a los datos establecidos por el Atlas del Oleaje (Beyá et al., 2016), se identificó la frecuencia de las tormentas con Altura Significativa Espectral del oleaje (H_{m0}) por sobre el promedio (0,88 m), y con la Dirección Media del Oleaje (D_m) proveniente del noroeste.
- g. *Diferencia entre altura de olas modales y olas de tormenta.* Se estableció la diferencia mediante la resta entre el campo de Altura Significativa Espectral (H_{m0}) publicado en el Atlas del Oleaje (Beyá et al., 2016), y la Altura Significativa de la Ola (H_s) durante el temporal del 8 de agosto de 2015, del modelo de propagación del oleaje desde aguas profundas a someras (Winckler et al., 2017), de 7,23 m de altura, un Periodo Pico del Oleaje (T_p) de 13,3 s, y cuya dirección es de 310° . Ambos modelos fueron georreferenciados en Arcgis 10.3, de manera de poder identificar la altura del oleaje junto a la línea litoral para cada unidad de evaluación.
- h. *Retroceso línea litoral.* Los resultados de esta variable se establecieron en el primer paso del presente planteamiento metodológico, con el cálculo de DLC y TEC de acuerdo a Torres et al. (2010).
- i. *Altura significativa del oleaje.* Los valores de esta variable se obtuvieron del modelo de Campo de Altura Significativa Espectral del oleaje (H_{m0}) del Atlas del Oleaje (Beyá et al., 2016). El modelo es georreferenciado en Arcgis 10.3, pudiendo de esta manera establecer los valores de altura del oleaje para cada unidad de evaluación.
- j. *Rango mareal.* Esta es otra de las variables consideradas cuyo valor es igual para toda la bahía. Araya-Vergara (1982), identifica que la región comprendida entre Arica a la ría de Maullín, la amplitud de marea es media baja (1-2 m), con un rango medio de marea de sicigias de 1,7 m para Quintero.
- k. *Ángulo de incidencia del oleaje.* Para su cálculo se utilizó el modelo de propagación del oleaje desde aguas profundas a someras del temporal de agosto de 2015 (Winckler et al., 2017), el cual fue georreferenciado con Arcgis 10.3. Se confeccionaron líneas rectas con el mismo ángulo de inclinación que las líneas, más próximas al litoral, que el modelo grafica con la dirección de arribo del oleaje; las líneas dibujadas fueron proyectadas hasta intersectar con la línea litoral de abril de 2020, calculando el ángulo entre estas con la herramienta "COGO" de ARCGIS 10.3, por cada unidad de evaluación.

- I. *Aumento del nivel del mar*. Esta es otra de las variables en que el valor de vulnerabilidad asociado es igual para todas las unidades de evaluación de la bahía de Quintero. En este caso, el valor considerado es la mediana del cálculo de proyección de elevación del nivel del mar, en base al promedio 1985-2005, a partir de 21 modelos de CMIP5 (AR5), publicado en el informe “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, del Ministerio del Medio Ambiente (2019).

III. Definición de un ranking de vulnerabilidad según cada parámetro clave

De Serio et al. (2018), señala que posterior al reconocimiento de los parámetros (variables y sub-índices) clave, se debe establecer un ranking de estos basado en un puntaje de carácter semi cuantitativo, para asignar uno de los cinco niveles de vulnerabilidad considerados (muy baja; baja; moderada; alta; muy alta).

Para lo anterior, se efectuó una revisión bibliográfica para definir, por sub-índice (parámetro), cinco rangos de valores a todos los cuales se les asignó uno de los niveles de vulnerabilidad, de acuerdo a la literatura.

De esta forma, de acuerdo al valor en cada unidad de evaluación, se determinará un puntaje para cada sub-índice con el fin de reconocer su nivel de vulnerabilidad.

IV. Jerarquización de parámetros de acuerdo a metodología AHP

No todas las variables contribuyen de igual forma en la vulnerabilidad frente a una amenaza en particular, siendo por consecuencia necesario establecer un esquema de pesos que permita ponderar la incidencia respectiva de cada variable considerada (Cutter et al., 2003). Es, por lo tanto, relevante priorizar la influencia de los parámetros meteo-oceanográficos (forzantes costeros), y morfológicos que actúan en la erosión de la playa arenosa de la bahía de Quintero.

Dentro de los métodos disponibles para lo anterior se encuentra el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), creado por Saaty en 1977, cuyo objetivo principal es la resolución de problemas asociados a elecciones en un contexto de evaluación multicriterio (Forman & Gass, 2001).

El AHP es un sistema de medición que utiliza la comparación por pares, para establecer escalas de prioridad en términos relativos (Saaty, 2008). Las comparaciones las realizan expertos usando escalas de juicios absolutos que determinan cuanto un parámetro se impone por sobre otro con respecto a un atributo en particular (Saaty, 2008). AHP es capaz de convertir los juicios individuales de quienes participan como expertos en escalas adimensionales de peso proporcionales, que permiten clasificar alternativas para ayudar a tomadores de decisiones a elegir o a pronosticar resultados (Forman & Gass, 2001).

La adaptabilidad de AHP a situaciones en donde no existen escalas de importancia para establecer jerarquías en un determinado contexto (Forman & Gass, 2001), lo hace un método adecuado para establecer, del total de variables, el grado de incidencia que tiene cada una por sobre la otra en la capacidad de erosionar el litoral arenoso de la bahía de Quintero. De acuerdo a Payo (2016, en De Serio et al., 2018), los parámetros asociados a la erosión costera pueden ser dependientes y ejercer retroalimentaciones recíprocas. Es por este motivo que De serio et al. (2018), utiliza AHP para el cálculo de CVI, ya que permite asignar valores numéricos a las interacciones entre variables, mediante matrices de comparación, y estimar cuantitativamente su influencia recíproca.

En este trabajo, se establece una valoración numérica mediante comparación por pares de sub-índices, para asignar pesos a cada una de estos y así determinar su relativa importancia en cuanto a la incidencia en la vulnerabilidad frente a la erosión de la playa arenosa. La Tabla 1 establece la escala de evaluación para asignar los valores de comparación entre variables.

Intensidad de la importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Los dos factores contribuyen de igual forma
3	Poco más importante	La experiencia y el juicio favorece ligeramente a uno por sobre el otro
5	Más importante	La experiencia y el juicio favorece fuertemente a uno por sobre el otro
7	Mucho más importante	La experiencia y el juicio favorece muy fuertemente a uno por sobre el otro. Su importancia se demuestra en la práctica
9	Absolutamente más importante	La evidencia que favorece a uno por sobre el otro está completamente validada
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Se necesita compromiso

Tabla N° 1: Escala de evaluación usado para la comparación entre variables. **Fuente:** Elaboración propia, en base a Saaty, 2001 (en Hzami et al., 2021).

Para reducir la arbitrariedad relativa de la asignación de los pesos por subíndice, Saaty (1977, en Hzami et al., 2021) evalúa la consistencia con la ecuación para la Razón de Consistencia (Consistency Ratio, CR), cuyo resultado no debe superar el valor 0,1 para considerar los pesos asignados como consistentes:

$$CR = CI/RI$$

CI es el índice de consistencia y RI es el índice aleatorio, cuyos valores fueron establecidos por Saaty et al., 1991 (en de Serio et al., 2018), de acuerdo al número total de variables consideradas (n).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R	0	0	0,5	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
I			8	0	2	4	2	1	5	9	1	3	6	7	9

Tabla N° 2: Valores de RI de acuerdo al número total de variables comparadas. **Fuente:** Chhetri & Kayastha, 2015.

El índice de consistencia (CI) es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$$

Donde λ_{max} es el valor propio de la matriz (en que fueron establecidos los pesos de cada variable mediante el cálculo de un vector promedio), y n es el orden de la matriz (valor total de las variables evaluadas).

V. Cálculo del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) por unidad de evaluación

Para el cálculo del CVI, se utiliza la siguiente fórmula propuesta por Hzami et al. (2021):

$$CVI = Wp_1Xp_1 + Wp_2Xp_2 + Wp_3Xp_3 + Wp_4Xp_4 + Wp_nXp_n$$

Siendo Wp_n el peso de cada variable, y Xp_n el puntaje del ranking de vulnerabilidad de las variables. Se aplicó esta fórmula a los datos de las variables de cada unidad de evaluación, obteniendo diferentes valores de CVI. Hzami et al. (2021), delimita rangos para los valores de CVI, estableciendo 4 clases de vulnerabilidad: baja (1,43 a 2,29), moderado (<2,29 a 3,15), alto (<3,15 a 4,01), y muy alto (<4,01 a 4,87). De acuerdo a estos rangos de valores, se determinó que nivel de vulnerabilidad física alcanzó cada unidad de evaluación según los resultados obtenidos.

VI. Espacialización de los resultados de CVI

Los valores de CVI de cada unidad de evaluación fueron representados mediante una cartografía confeccionada en ARCGIS 10.3, utilizando además una imagen satelital georreferenciada actualizada de Google Earth, con el fin de graficar las zonas junto a la playa arenosa expuestas a los diversos niveles de vulnerabilidad física de esta última.

4.2. Área de estudio

4.2.1. Caracterización medio físico

4.2.1.1. Geomorfología y Geología

La bahía de Quintero se encuentra en la región de Valparaíso, entre las comunas de Puchuncaví y Quintero. Las localidades adjuntas a esta unidad son tres: Ventanas por el norte y Loncura y Quintero por el sur (Fig. 14). Su litoral arenoso se extiende por 7,8 km desde Punta Ventanilla por el norte hasta la península de Los Molles por el sur. De esta extensión, junto al lado oriente del litoral arenoso, se emplazan una serie de empresas por 4,3 km de la costa.



Figura N° 14: Área de estudio (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la sectorización de la costa de Chile Continental hecha por Paskoff (2010), la bahía Quintero, por sus coordenadas, se identifica con el Norte Chico semiárido, que se

caracteriza fundamentalmente por una costa rocosa baja, detrás de la cual se extienden terrazas marinas de abrasión, escalonadas hasta los primeros contrafuertes de la cordillera de la Costa. El mismo autor señala que estas terrazas resultan de la interferencia entre las variaciones eustáticas del nivel del mar durante el Plio-cuaternario y la tendencia al solevantamiento de la costa.

Araya-Vergara (1979), realizó una clasificación de las costas de Chile de acuerdo a su geomorfología, con un criterio regional. De acuerdo a esto último, el autor clasifica a la costa asociada a la bahía como de tipo abrasivo y erosivo tectónicas con bahías lobuladas protegidas (Fig. 15). Estas presentan una alternancia entre rocas blandas y rocas duras; las rocas graníticas se alternan frecuentemente con rocas blandas del terciario y del cuaternario, dando bastante indentación a la costa.

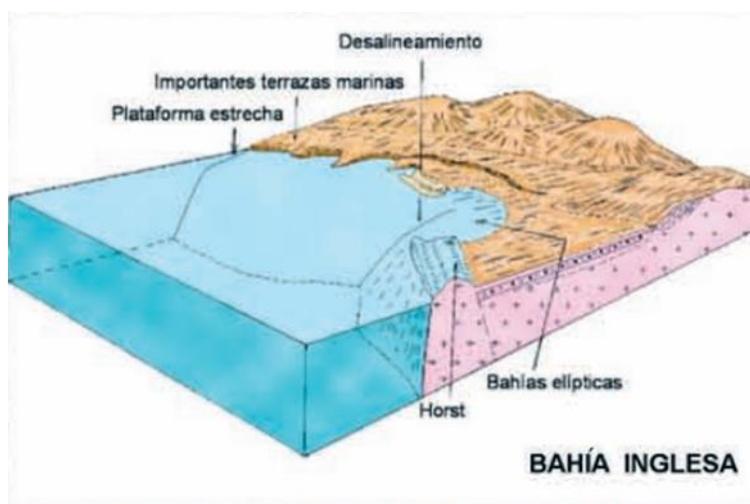


Figura N° 15: Costa de tipo abrasivo y erosivo tectónicas con bahías lobuladas protegidas. **Fuente:** Araya – Vergara, 1976.

Las unidades cuaternarias presentes en la carta geológica (Fig. 16) de la bahía de Quintero y su entorno, son explicadas por Rivano (1996) y descritas a continuación:

Sedimentos eólicos antiguos, paleodunas (PQd): sedimentos eólicos correspondientes a paleodunas, que son reconocibles a lo largo de toda la costa desde el río Quilimarí hasta el sector de Concón. Forman superficies suavemente onduladas que cubren parcialmente las terrazas costeras, depositándose sobre los depósitos de la formación Horcones, y sobre unidades más antiguas como rocas del Jurásico y Triásico entre punta Los Molles y punta Quelén. En general, se tratan de depósitos poco consolidados, de colores ocres, muy bien seleccionados y con evidencias de estratificación entrecruzada frecuente, con espesores que van desde unos pocos centímetros hasta alrededor de 10 m; poseen una superficie superior convexa u ondulada, y sólo cubierta por suelo actual, siendo quizás estas formas onduladas testimonio de una morfología de barjanes. Su distribución, casi siempre

relacionada a sectores a sotavento de playas o al norte de las puntas, indican que se habrían acumulado en regímenes de viento similares al actual.

Terrazas de depósitos marinos, en parte sin sedimentos (QTm): unidad que en sentido estricto corresponde a una unidad morfológica, consistente en pequeñas terrazas que aparecen en Cachagua y Quintero. Estas terrazas, de extensión comparativamente reducida, están ubicadas sobre sedimentos marino-litorales que son cubiertos lateralmente por paleodunas, y que probablemente pueden corresponder a la formación Horcones (Mioceni-Plioceno); además, estas formas afectan a las paleodunas (PQd), por lo cual se habrían generado posteriormente y probablemente favorecidas por su ubicación geográfica.

Sedimentos eólicos y litorales cuaternarios (Qel): Corresponden a acumulaciones costeras expuestas bajo la forma de playas actuales y dunas. Se ubican adyacentes a la franja costera y su desarrollo está directamente relacionado con los rasgos morfológicos actuales, es así como las playas se desarrollan siempre al norte de puntas con acantilados desarrollados que crean bahías protegidas de los vientos NNE y de las corrientes costeras de dirección norte, privilegiando así las acumulaciones de arena, y siempre a las salidas de las vías de agua que aportan el material para la construcción de las playas. Las acumulaciones eólicas aparecen siempre al norte de las playas, de acuerdo con los vientos predominantes (NNE) los que transportan desde las playas y desde depósitos más antiguos el material fino que es depositado en las zonas de baja presión al perder el viento su capacidad transporte. Tanto en las playas actuales como en las dunas es posible apreciar la clásica forma de media luna, parabólicas, de tipo barján, características de las dunas crecientes.

Sedimentos aluviales, coluviales y depósitos de relleno de valles (Qac): están relacionados a los cursos de agua actuales y tienen su expresión más importante en la hoya del río Aconcagua. En la mitad sur están formados por acumulaciones de gravas ripios, de regular a mal estratificados, y por arenas y limos con buena estratificación. Se trata en la mayoría de los casos de sedimentos efímeros, los que suelen evolucionar todos los años, de acuerdo a la abundancia e intensidad de las precipitaciones.

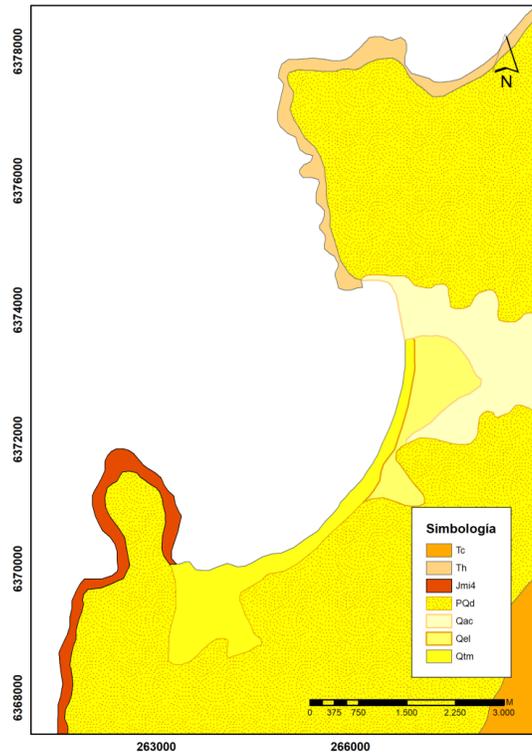


Figura N° 16: Carta geológica Quintero. **Fuente:** Araya, 2018, en base a Rivano (1993).

4.2.1.2. Contexto sismotectónico

La bahía de Quintero se ubica en la costa central de Chile (29° - 35°S), considerada una de las áreas con mayor actividad sísmica en el mundo (Nealy et al., 2017). Esta región se encuentra en el margen de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana, donde la primera subducta a la segunda en dirección ENE a una velocidad aproximada de 66 m/año (Angermann et al., 1999, en Sippl et al., 2021), proceso que explica cerca del 95% de la sismicidad de esta área (Ammirati et al, 2019).

La sismicidad relacionada a esta clase de subducción es la denominada “Sismicidad Interplaca de tipo *“thrust”*” (Fig. 17), la cual está asociada al acoplamiento entre las placas de Nazca y Sudamericana (Carrasco, 2018). Este tipo de sismos se caracterizan por comprender grandes longitudes de ruptura (o desacoplamiento) y tener epicentros marítimos (Ruiz & Saragoni, 2005).

La energía, dada por el comportamiento friccional de deslizamiento del acoplamiento entre placas, es acumulada como esfuerzo-deformación a través de décadas y siglos, siendo liberada posteriormente mediante la ruptura entre las placas, proceso que de ser repentino da lugar a los fenómenos llamados “terremotos” (Savage, 1983, en Carvajal & Melnick, 2020).

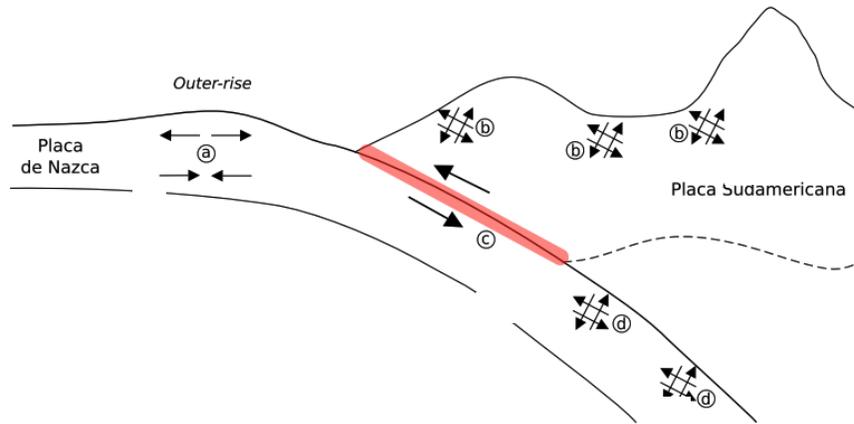


Figura N° 17: Esquema zona de generación de sismos interplaca tipo *thrust* (c), donde la línea roja marca la zona sísmogénica asociada. **Fuente:** Carrasco, 2018.

Este tipo de terremotos son los de mayor magnitud en esta zona, de acuerdo a los registros históricos existentes (Beck et al., 1998, y Lomnitz, 2004, en Carrasco, 2018); además de ser una fuente de terremotos con gran potencial tsunamigénico (Carvajal & Melnick, 2020).

Para la zona entre los paralelos 32° y 35°S se ha sugerido que existe un periodo de recurrencia de 83 ± 7 años, para grandes terremotos interplaplaca tipo *thrust* sobre M8,0 (Comte et al., 1986, en Ruiz & Saragoni, 2005), de acuerdo a la secuencia de los últimos seis terremotos registrados con estas características (Fig. 18): 1575 (M8,0-8,5); 1730 (M8,5-9,0); 1822 (M8,0-8,5); 1906 (M8,4-8,6); 1985 (M8,0) (Nealy et al., 2017).

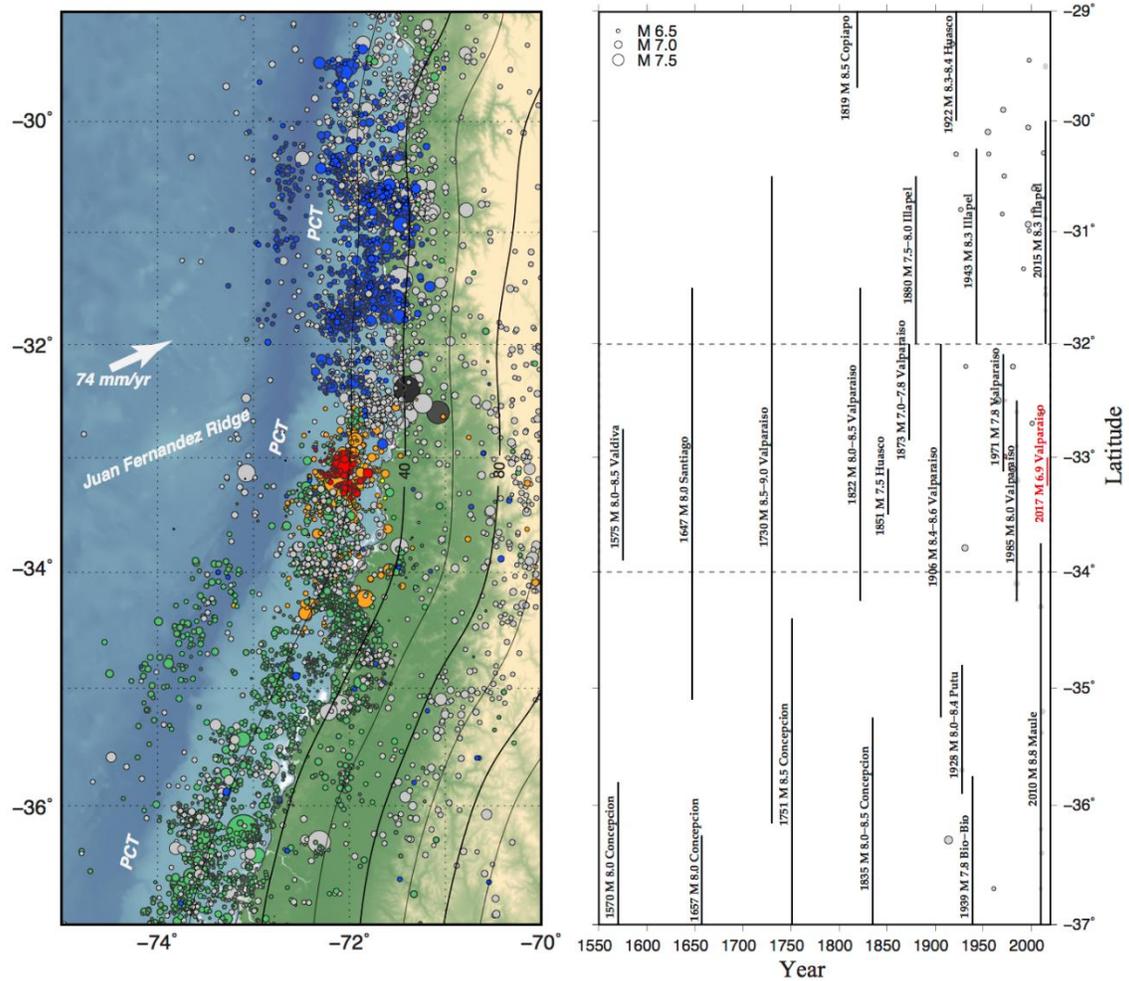


Figura N° 18: A la izquierda, sismicidad en Chile Central desde 1900 hasta 2017; a la derecha, esquema de grandes terremotos históricos de Chile Central hasta 2017. **Fuente:** Nealy et al., 2017.

4.2.1.3. Viento

Araya-Vergara (1982), indica que al norte de los 40° S aproximadamente (Quintero se localiza cerca de los 32°S), la dirección predominante de los vientos es SW. La velocidad promedio de los vientos en Quintero, se encuentra graficado en la Fig. 19.

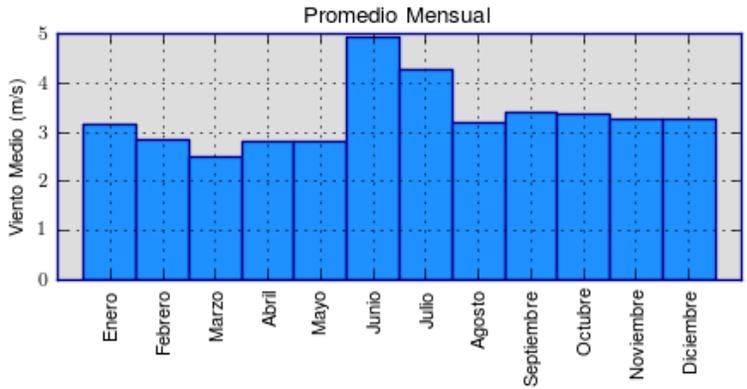
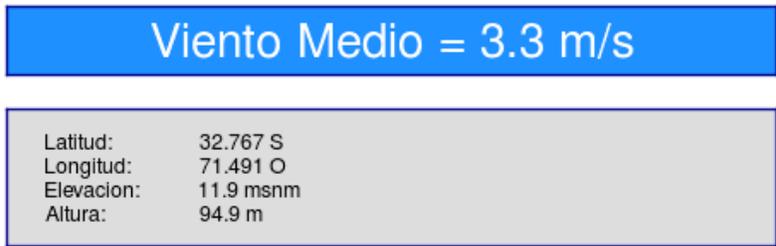


Figura N° 19: Promedio velocidad de vientos. **Fuente:** Explorador de Energía Eólica, consultado el 26 de septiembre de 2021.

4.2.1.4. Oleaje

De acuerdo a lo expuesto por Araya-Vergara (1982), en la parte norte y central de las costas de Chile predomina el Mar de Swell del SW. Este ambiente se desarrolla en la zona de amplitud media a baja de marea, y las olas atacan con mayor frecuencia una estrecha banda litoral.

Como consecuencia de este mar predominante, la deriva en su área de acción es hacia el norte, produciendo alineamiento de cordones litorales por deriva.

El parámetro medio de la altura significativa espectral (H_{m0}) es de 0,88 m, y el promedio estacional (junio-agosto) de H_{m0} es de 0,98 m; el promedio del periodo medio del oleaje (T_m) es de 9,1 s, mientras que el promedio estacional de este parámetro es 9,0 s. (Beyá, 2016)

En la Fig. 20 se refleja la distribución y dirección de $H_{m0}(m)$, la distribución de T_m (s), y la batimetría de la bahía, respectivamente.

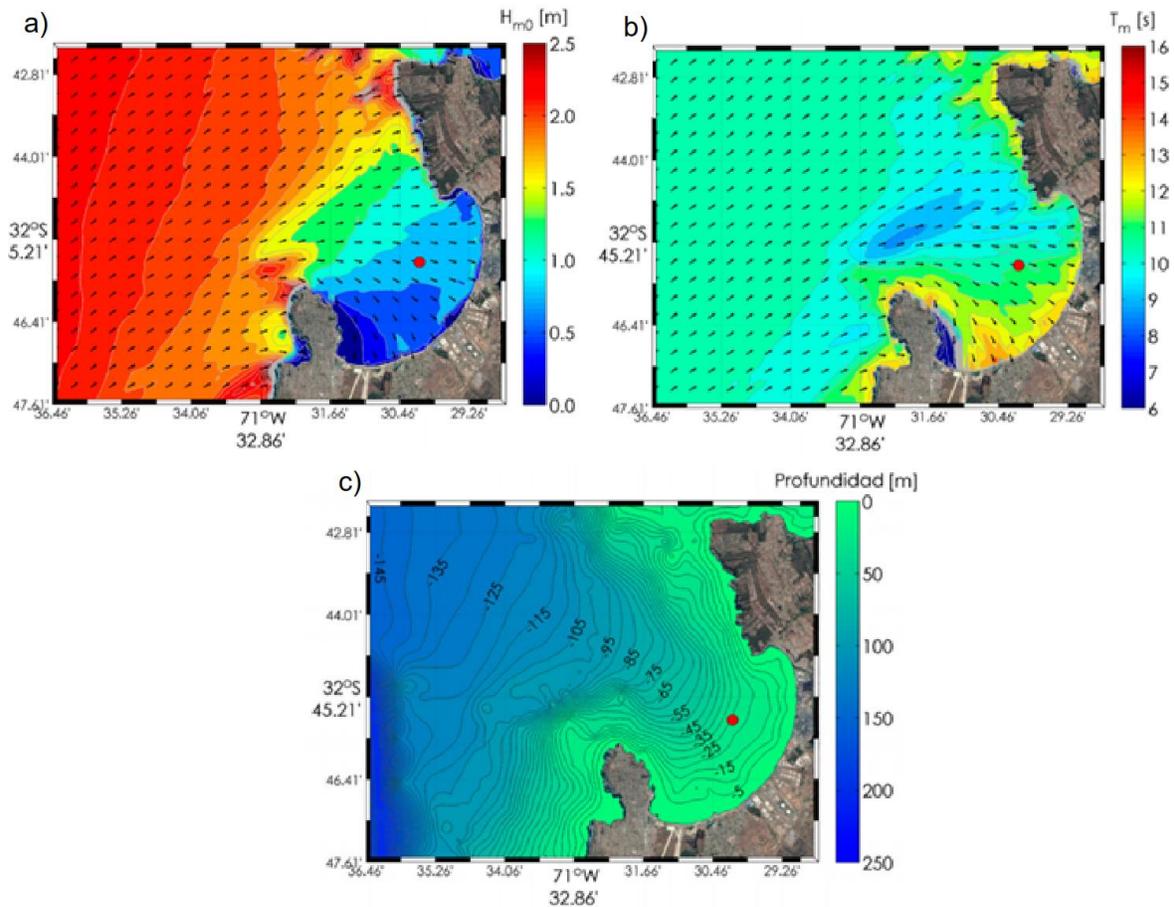


Figura N° 20: a) Distribución y dirección de $H_{m0}(m)$; b) distribución de T_m (s); c) batimetría de la bahía de Quintero. **Fuente:** Beyá et al., 2016.

4.2.1.5. Ambiente de marea

Araya-Vergara (1982), menciona que de Arica a la ría de Maullín, la amplitud de marea es media baja (1-2 m); en Quintero, el rango medio de marea de sicigias es de 1,7 m. El tipo de régimen mixto para esta extensión de la costa es mixto de dominancia semidiurna.

4.2.1.6. Tipo de zona de rompiente y refracción del oleaje

En la Fig. 21 (a), se puede observar que en el lado sur de la bahía, en todos los años evaluados predomina el tipo de oleaje de playa reflectiva, explicado fundamentalmente por la protección que otorga la península de Los Molles al litoral, frente al oleaje predominante del suroeste. En la parte central y norte de la bahía, el tipo de playa que predomina es terraza de bajar, la que corresponde a la de más baja energía del tipo de playa intermedia.

La Fig. 21 (b), muestra que la aproximación del oleaje predominante del suroeste se refracta principalmente por la presencia de la península de Los Molles al sur de la bahía de Quintero. Si bien el desvío del oleaje disminuye hacia la parte norte de la bahía, la configuración

morfológica de la bahía incide en que el oleaje que arriba al litoral arenoso ha sido refractado en su totalidad.

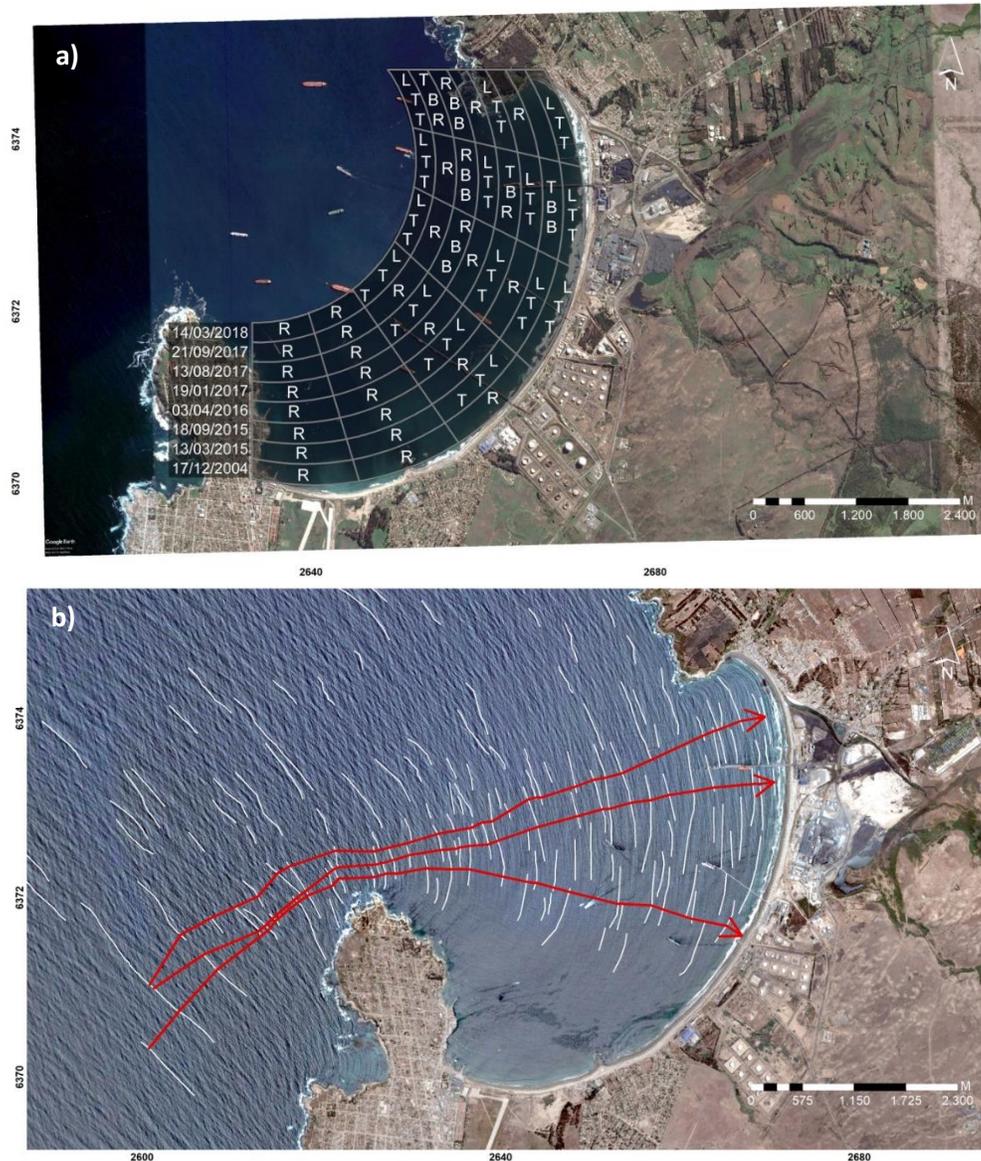


Figura N° 21: a) Esquema de tipo de zona de rompiente en base a análisis multitemporal de imágenes Google Earth; b) diagrama de refracción del oleaje. **Fuente:** Araya, 2018.

4.2.2. Caracterización medio ambiente antrópico

En este sub-capítulo, se caracterizará el entorno antrópico del litoral arenoso de la bahía de Quintero, con el fin de explicar de manera sucinta la importancia que representa este sistema para la población que reside en las localidades adjuntas, de acuerdo a consideraciones histórico-culturales y económicas. Del mismo modo, se describirán y

definirán aquellas zonas del área de estudio que se encuentran expuestas al oleaje de gran altura y al aumento del nivel del mar como consecuencia de eventos meteo-oceanográficos extremos descritos en este trabajo, y que se relacionan con los resultados del cálculo de CVI, permitiendo establecer su alcance en el contexto del análisis de riesgos de la bahía de Quintero.

4.2.2.1. *Historia de asentamientos en torno a la Bahía de Quintero*

Hay evidencia de que Quintero fue asentamiento del Complejo Cultural El Bato (CNCA, 2013), comunidad indígena que desde 860 a.C. se desarrollaron en Chile Central, desde la desembocadura del Río Petorca al Río Maipo por el litoral de la Región de Valparaíso y hasta el Río Cachapoal en la Región de O'Higgins (Araya, 2008). Vivían en chozas familiares dispersas en torno al litoral de Loncura con pocos fogones y algunas delimitadas por una o más hileras de piedra, modalidad de asentamiento que dejó numerosos conchales, zonas de acumulación de conchas de los moluscos con los que se alimentaban, en distintos lugares de las costas que habitaban entre las cuales se encuentra los hallados en el bosque nativo de Las Petras (CNCA, 2013), a un costado de la Base Aérea de Quintero de la Fach.

Hacia el siglo XVI, Quintero es descubierta por Alonso de Quintero, navegante español que llegó a este litoral en el barco "Santiaguillo" en 1536 y que bautizó la bahía con su apellido, como parte de la empresa expedicionaria de Diego de Almagro (Historia de mi pueblo, consultado el 23 de agosto de 2021). En el mismo siglo y en el siguiente, la bahía fue refugio de corsarios y piratas, tales como Francis Drake, el que llegó a Quintero para descansar y abastecerse de víveres luego de saquear Valparaíso en 1578, o como Thomas Cavendish en 1587, quien debió luchar contra un improvisado ejercito compuesto de sacerdotes católicos de diferentes congregaciones enviados desde Santiago por el corregidor Alonso de Campofrío de Carvajal y por colonos Batos, los que defendieron la bahía y expulsaron a los navegantes ingleses luego de una batalla que duró unos 4 días, y que es conocida como la primera batalla de Chile colonial contra un enemigo extranjero (CNCA, 2013).

Fue durante la época de la Colonia Española en Chile que la bahía de Quintero comenzó a funcionar como puerto, siendo los Jesuitas de los primeros que se tiene conocimiento que la utilizaron, sacando en barco la producción de sus haciendas cercanas que se encontraban desde Viña del Mar hasta Ocoa (Historia de mi pueblo, consultado el 23 de agosto de 2021).

Lord Cochrane fue el primero en querer convertir la Bahía de Quintero en el gran puerto de Chile, quien además compró en 1820 una hacienda llamada Quintero, idea que nunca se llegó a concretar (Gazmuri, 1999). Pero no fue sino hasta 1865 cuando el presidente José J. Pérez dicta un DFL donde se crea el Puerto Menor de Quintero (Historia de mi pueblo, consultado el 23 de agosto de 2021)

Posteriormente en 1872, Benjamín Vicuña Mackenna planteo la idea de crear un Balneario en la costa central de Chile tal como existía en algunas localidades europeas como San Sebastián, así también como la de un puerto y, por necesidad de tener acceso a estas, un

ferrocarril, proyecto al que adhirió su amigo Don Luis Cousiño y que comenzó con la compra de la “Hacienda Quintero” la que comprendía desde Ventanas por el norte, hasta el extremo norte de la Playa de Ritoque por el sur; sin embargo, debido a la muerte de don Luis Cousiño en mayo de 1873, el proyecto se detuvo por 20 años (Gazmuri, 1999).

Don Alberto Cousiño en 1904 retoma los planes de convertir la bahía de Quintero en el balneario de la bahía de Valparaíso, así como de instalar un puerto y un ferrocarril hacia este lugar, tomando como primera medida la erradicación de los pescadores del lugar donde se emplazaría el proyecto de urbanización de Quintero y la construcción del puerto correspondiente, mediante el loteo y entrega de terrenos a las familias, para que pudieran vivir y desarrollar la actividad pesquera, en el sector de la bahía frente a lo que actualmente corresponde a Loncura, idea que terminó de concretarse en 1914, posterior a la aprobación de los planos del tramado urbano de Quintero en la península de los Molles y del puerto en 1912 y de la creación y aprobación de la Sociedad de Ferrocarril, puerto y Balneario de Quintero en 1914 por el presidente Ramón Barros Luco (CNCA, 2013).

En la década de 1920 se terminaron de construir el grueso de las obras que contemplaba el proyecto, entre las que se encuentra el muelle y el malecón en 1923 y 1924 respectivamente, así como la estación ferroviaria Quintero en 1924; una planta de energía eléctrica y una empresa de extracción, almacenamiento y distribución de agua potable; una serie de edificios de arquitectura notable, de los cuales algunos aún existen, como el Hotel Yatching Club, el Hotel Quintero, el Hotel Mónaco, una capilla católica de piedras y vitrales y una gruta de Lourdes adjunta, y otros edificios de menor envergadura como bodegas de puerto y aduanas; sumado a esto, la construcción de la base aérea en 1922 y su extensión en 1925, emplazada sobre una vega que fue secada, la que funciona en el mismo lugar hasta el día de hoy (Gazmuri, 1999).

Familias de clase alta construyeron casas en el sector de Quintero y Loncura, las que utilizaban principalmente en el periodo estival, lo que junto con la llegada del tren en 1925, generó el aumento de turistas durante los veranos todos los años, consolidándose además como un atractivo turístico con la creación del campamento Vida Sana en 1947 (CNCA, 2013).

Como unidad administrativa, Quintero y Puchuncaví fueron reconocidas como comuna integrando a ambas localidades en 1894, separándose posteriormente en 1925 con la creación de la comuna de Puchuncaví, denominación que 4 años más tarde fue revocada por el presidente Carlos Ibáñez del Campo, con un decreto que anexó a este territorio nuevamente a Quintero (MMA, 2017). Puchuncaví, vuelve a ser denominada como comuna en 1944 con un decreto promulgado por el presidente Juan Antonio Ríos luego de movilizaciones de sus habitantes que presionaron por tener una mayor autonomía (Calisto, 2014).

Durante la primera mitad del siglo XX, la bahía de Quintero era una zona dedicada fundamentalmente a la agricultura y a la pesca artesanal (MMA, 2017). La agricultura en Puchuncaví, por ejemplo, se desarrollaba en torno a los cultivos de lentejas, garbanzos, arvejas, trigo, cebada y maíz, llegando esta actividad a representar el 75% del empleo de

la comuna, teniendo por otra parte la jaiba, congrio, macha, loco y la lapa los productos extraídos por la pesca (Calisto, 2014).

Fue en la década de 1960 en la que Loncura pasa de ser un balneario de clase acomodada a uno de carácter masivo, gracias a la aparición del automóvil y buses, saturando de esta forma la playa y los terrenos aledaños, razón por lo cual en 1967 se empezaron a lotear villas de veraneo y posteriormente colonias de vacaciones para trabajadores, obreros y sus familias; proceso de urbanización que contempló calles de tierra, alumbrado público, veredas y norias por villa (CNCA, 2013). Colonias similares se instalaron en la misma década en otros sectores cercanos a la bahía, como La Chocota y Horcón, consolidándose la playa de Ventanas también como un importante balneario (Rojas, 2015).

4.2.2.2. *Asentamientos residenciales y uso de suelo no industrial*

Actualmente, junto a la bahía de Quintero se emplazan tres áreas urbanas. Por el norte se encuentra Ventanas, localidad perteneciente a la comuna de Puchuncaví, que se extiende por 0,93 km frente al litoral arenoso de la bahía de Quintero; en el sur poniente se ubica Loncura, pueblo administrado por la comuna de Quintero y emplazado frente a 1,4 km del litoral arenoso estudiado; finalmente, la ciudad de Quintero es la tercera área urbana de la bahía, situada al sur de esta, con 1,37 km de extensión frente al litoral arenoso. El complejo industrial de la bahía se encuentra entre Ventanas (por el norte), y Loncura por el sur, extendiéndose por 4,1 km a lo del litoral arenoso de la bahía.

Ventanas es el poblado costero más habitado de Puchuncaví, con 3.494 habitantes (sobre 18.546 del total), representando un 18,8% del total de la comuna (INE, 2017). Al ser un destino turístico durante los meses de enero y febrero, su población aumenta más de diez veces, con un arribo de 60.000 visitantes aproximadamente (Calisto, 2014).

Es el poblado de mayor dinámica expansiva dentro de la comuna de Puchuncaví, impulsada fundamentalmente por el auge de las actividades industriales y en menor medida por las turísticas, consolidándose como núcleo urbano residencial permanente que alberga principalmente a trabajadores de las distintas industrias emplazadas en la bahía de Quintero (Ilustre Municipalidad de Puchuncaví, 2009). Si bien en Ventanas se siguen desarrollando la pesca y el turismo de playa, es importante señalar que, comparado con las industrias, son actividades económicas menores, que unos diez años atrás tuvieron potencial, pero que en la actualidad ya no representan un foco de desarrollo para Puchuncaví (Ilustre Municipalidad de Puchuncaví, 2017).

Quintero y Loncura, que forman parte del distrito Quintero, concentran el 58,6% de la población de la Comuna de Quintero, con 16.690 y 2.024 habitantes respectivamente (I. Municipalidad de Quintero, 2020).

Loncura es una localidad de origen informal con déficit de acceso a servicios básicos (Delgado et al., 2022), que funciona como destino turístico en época estival, periodo en que su población llega a cerca de 40.000 personas durante los meses de enero y febrero (MMA, 2017).

Al oeste de Loncura, se encuentra la Base Aérea de Quintero (Grupo de Artillería Antiaéreo N°2), establecida por la armada en 1921, y que actualmente se encuentra a cargo de la FACH. Dentro del recinto militar, al este de la sección norte de la pista principal, se encuentra el Santuario de la Naturaleza Las Petras, bosque relicto de diez mil años de antigüedad constituido aproximadamente por 4 ha de ambiente boscoso, 18 ha de pajonales y 3 ha de sectores de laguna (Erazo, 1993). Su superficie total es de 42 ha, y fue declarado santuario de la naturaleza en 1993 debido a sus características ecosistémicas, como vegetación propia del Bosque Valdiviano, avistamiento de sesenta tipos de especies identificadas entre aves y mamíferos, y un conchal que da cuenta de la presencia en el pasado de las culturas Bato y Aconcagua (CMN, consultado el 11 de octubre de 2023). Entre las especies que han sido identificadas en este santuario se encuentran el canelo (*Drimys winteri*), la petra (*Mirceogenia exsucca*), pangue (*Gunnera chilensis*), y algunos helechos de la familia *Blechnum*; así como también aves tales como zarapito, pititoy, taguas, pimpollos, entre otras (Erazo, 1993), además del coipo chileno (CMN, consultado el 11 de octubre de 2023).

Finalmente, en el extremo suroeste de la bahía se encuentra la ciudad de Quintero, centro urbano de mayor importancia dentro de la comuna del mismo nombre, la que se caracteriza por ser una zona de uso residencial y turístico, con comercio a pequeña escala (Delgado et al., 2022), además de concentrar las principales funciones de equipamientos y servicios de la comuna (Ilustre Municipalidad de Quintero, 2014).

4.2.2.3. Zonas e infraestructura expuesta

Caletas

Dentro de las diversas actividades económicas que se desarrollan a largo de la bahía destacan la industrial y el turismo, siendo la primera de estas la más importante en el presente. Sin embargo, hay una que, si bien a partir de la década de 1960 ha ido en declive, aun se realiza en la actualidad a muy pequeña escala: la pesca artesanal. Fue una de las actividades económicas más importantes durante la primera mitad del siglo XX, pero ha ido perdiendo relevancia económica en el territorio desde la instalación y crecimiento del parque industrial en la bahía (Quinteros, 2018).

En la bahía de Quinteros se emplazan cuatro caletas donde se desarrolla la pesca artesanal, tres de las cuales se ubican en su litoral arenoso. En el extremo norte de la bahía se encuentra caleta Ventanas (Fig. 22 a), la que en términos de infraestructura es la más precaria (Fig. 22 b). En la actualidad cuenta con setenta y un socios inscritos en la Organización de Pescadores Artesanales (OPA) (SERNAPESCA, consultado el 10 de agosto de 2023). Dentro de los recursos marinos extraídos por los pescadores de esta caleta, se encuentran los incluidos en el Área de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB), que ha sido puesto bajo su administración y que se ubica al noroeste de Ventanas, en Punta Lunes. Entre las especies que están permitidas extraer de esta área de manejo se encuentran el Loco, Lapa Negra, Lapa Rosada, Lapa Reina, Erizo Rojo, Huiro Palo (Verdejo, 2014), la Ostra Japonesa en el 2021 (SUBPESCA, 2021. Consultado en: 10

de agosto 2023). Lo anterior, además de las especies de zonas de libre acceso como Congrio y Merluza (Verdejo, 2014).



Figura N° 22: a) Cartografía caleta de pescadores Ventanas (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth. b) Caleta de pescadores Ventanas. **Fuente:** Colección personal.

En el sector sur del litoral arenoso de la bahía, se encuentra caleta Loncura (Fig. 23), la que cuenta con treinta y cinco socios organizados en el Sindicato de Trabajadores Independientes y Pescadores Artesanales Caleta Loncura de Quintero (SERNAPESCA, consultado el 10 de agosto de 2023). Entre las actividades desarrolladas en la caleta Loncura, se encuentran la extracción de mariscos, la caza submarina, la pesca de jibia, la pesca de palometa y de especies demersales; además, en el periodo estival, se desarrollan actividades relacionadas al turismo como el arriendo de kayaks, baños y estacionamientos, y la concesión de un restaurant (GNL, 2015 a. Consultado el: 10 de septiembre de 2023).



Figura N° 23: a) Cartografía caleta de pescadores Loncura (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth. b) Caleta de pescadores Loncura. **Fuente:** Colección personal.

En el extremo suroeste del litoral arenoso de la bahía de Quintero se encuentra la caleta El Manzano (Fig. 24), la más concurrida de la comuna (Gajardo, 2019), tiene sesenta y seis trabajadores que se encuentran organizados en el Sindicato de Trabajadores Independientes Pescadores Artesanales y Actividades Conexas Caleta El Manzano (SERNAPESCA, consultado el 10 de agosto de 2023). A diferencia de las otras dos caletas, El Manzano cuenta con muelle, estructura que por una parte facilita el zarpe y desembarque de los pescadores artesanales y, por otra, representa un atractivo desde el punto de vista turístico (GNL, 2015 a. Consultado el: 10 de septiembre de 2023). Entre los recursos desembarcados en esta bahía se encuentra la jibia, la merluza y otros peces, además de mariscos, siendo el primero el de mayor importancia para la caleta (SUBPESCA, 2021). Sumado a la extracción de recursos marinos, en El Manzano se desarrollan otras actividades, como la venta de jibias, peces y mariscos extraídos en la misma caleta o en la

de Loncura; servicios turísticos como el arriendo de kayaks, paseos en bote, y la venta de alimentos en el restaurant a concesión ubicado dentro de sus instalaciones. Asimismo, sus instalaciones funcionan como planta de procesamiento de productos marinos, entre otros, asociados a la industria pesquera (GNL, 2015 b. Consultado el: 10 de septiembre de 2023).



Figura N° 24: a) Cartografía caleta de pescadores El Manzano (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth. b) Caleta de pescadores El Manzano. **Fuente:** Colección personal.

4.2.2.4. Zonas urbanas

Junto al litoral arenoso de la bahía de Quintero, se encuentran tres zonas urbanas con áreas expuestas a oleaje de gran altura generado por eventos meteo-oceanográficos. Como área expuesta, en este caso, se ha considerado a la franja que se encuentra inmediatamente después (hacia el continente), del litoral arenoso y que sería eventualmente afectada por

oleaje de gran altura, sobrepasos e inundación, como consecuencia de eventos meteo-oceanográficos extremos, una vez haya sido sobrepasado el litoral arenoso el cual actúa como primera barrera física. En general, esta franja considera la calle costanera, aceras, iluminarias, plazas, negocios tipo quioscos y el frente de las manzanas que miran hacia el litoral.

En el caso de Ventanas, en el extremo noroeste del litoral arenoso (Ven 1, Fig. 25 (a)), la zona expuesta está conformada por la calle Costanera, cuyo material es de ripio prácticamente en toda la primera unidad de evaluación; las propiedades inmediatamente al norte de la calle, se componen de viviendas, locales comerciales y residencias de hospedaje. Hacia el sureste, una serie de locales comerciales abandonados, casas, una residencia de hospedaje y un negocio se ubican frente a la playa, prácticamente a la misma altitud.

Continuando hacia el suroeste, aparece un terraplén que establece una diferencia de altura entre la playa y la acera, de manera que es necesario utilizar las escaleras disponibles para acceder desde la vía pública hacia la playa. Por toda la franja restante de la zona expuesta el patrón es similar: acera, estacionamientos, calzada calle Pedro Aldunate solar, acera y, en el extremo continental de la franja, el límite suroeste de las manzanas que estructuran el entramado urbano en esta zona. El frente suroeste de las manzanas está compuesto fundamentalmente por comercio asociado al turismo, además de locales destinados a hospedaje y algunas viviendas.

En resumen, las propiedades por clase de uso que se encuentran en esta zona expuesta a oleaje de gran altura, son (en diciembre del 2019): 44 comercios; 8 viviendas; 6 locales destinados a hospedaje; 2 locales de esparcimiento; 1 retén de Carabineros; 1 centro social; 1 centro de culto.



Figura N° 25: a) Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Ventana (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth. b) Retén Ventanas de Carabineros de Chile, ubicado en la zona de mayor exposición. **Fuente:** Colección personal.

Loncura se encuentra en la zona centro sur de la bahía de Quintero, entre el aeropuerto de Quintero y la planta de COPEC. En el extremo noreste, entre COPEC y calle Pomabamba, la zona de mayor exposición (Fig. 26 (a)), es en general homogénea; se compone de una calle costanera con el pavimento del camino vehicular en mal estado; sumado a un conjunto de propiedades en su mayoría de carácter residencial, unos pocos hospedajes turísticos, un restaurant, dos supermercados y una iglesia cristiana. Este primer tramo no cuenta con acera de concreto, solo con una superficie cubierta de arena a ambos costados del camino vehicular.

Continuando hacia el suroeste, en la sección que se encuentra entre las calles Pomabamba y Benedicto Kocián, cambia la estructura y estado de la calle costanera. Hacia el litoral, un muro de concreto con más de un metro de altura establece el límite entre la playa y la vereda de la costanera; la acera junto a este muro es de concreto y en ella se emplazan

algunos establecimientos comerciales tipo quiosco. El camino vehicular se encuentra pavimentado y en mejor estado que el tramo previamente descrito. Las propiedades que se ubican frente al litoral en este tramo, comprenden en su mayoría viviendas; pero además, hay comercios, locales de hospedaje y un centro de culto.

Al suroeste de la sección anterior, en el tramo que se ubica entre calle B. Kocián y la vía PIV 5-6, la superficie del uso de suelo de tipo equipamiento y espacio público aumenta notoriamente; hay plazas, juegos infantiles, maquinas públicas de ejercicios y bicicletero. Además, comienza la ciclovía y el paseo costanera que une a Loncura con Quintero. Todo lo anteriormente mencionado fue afectado por el temporal del 25 de junio del 2017 (Fig. 41 (a) y (b)), de acuerdo a lo relatado por el administrador municipal de Quintero (Astudillo, 2017. Consultado el 15 de marzo de 2023). Asimismo, el camino vehicular en este tramo es el que se encuentra en mejor estado; las aceras a ambos lados de este último se encuentran pavimentadas, y al muro de concreto que separa el límite continental de la playa con la calle adjunta se suma una baranda metálica de más de un metro. Al igual que en los otros dos tramos, las propiedades ubicadas frente al litoral son en mayoría viviendas, y en menor cantidad comercios y hospedajes turísticos.

El total de las propiedades por clase de uso frente al litoral, ubicados en la zona expuesta de Loncura, es el siguiente (en diciembre del 2019): 43 viviendas; 11 locales destinados a hospedaje; 10 comercios; 1 centro de culto.

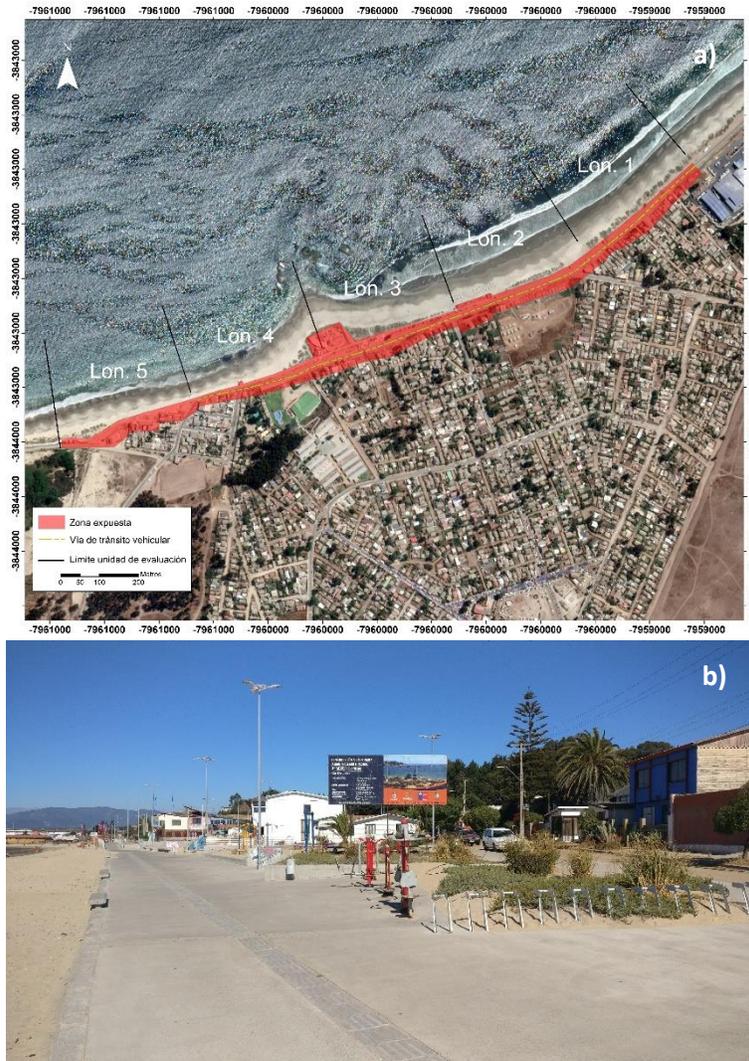


Figura N° 26: a) Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Loncura (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth. b) Bicicletero y máquinas de ejercicios en espacio público, ubicado en la zona de mayor exposición. **Fuente:** Colección personal.

En cuanto a la zona de mayor exposición de Quintero, poco más de un kilómetro de extensión corresponde al paseo costanera, la que se encuentra equipada con una ciclovia, un skatepark y estaciones de ejercicios. Junto a esta hay un camino vehicular no pavimentado, todo frente a la base aérea de Quintero (Fig. 27 a). En este primer tramo, al igual que como lo expuesto en la Fig. 26 (b), el paseo costanera se encuentra prácticamente a la misma altitud del límite continental de la playa, sin barreras físicas que impidan un eventual ingreso del mar forzado por eventos meteo-oceanográficos extremos. De hecho, en esta sección, al igual que en el extremo suroeste de Loncura, también hubo daños a la infraestructura pública durante el evento extremo del 25 de junio de 2017 (Fig. 41 c).

El siguiente tramo corresponde al área frente al litoral en que se ubican galpones y hangares de la FACH de la base aérea Quintero. De igual manera que en el tramo anterior, el camino

vehicular PIV 5-6 es de tierra, el paseo peatonal costanera es de cemento, y frente al muelle de la FACH, hay maquinas públicas de ejercicio. Existe una diferencia de altitud entre la línea litoral, o la playa, y la superficie donde se encuentra el paseo costanera, dividido por un muro rompeolas de bloques de roca que se extiende en frente del hangar de la FACH.

El último tramo de la zona de mayor exposición de Quintero, corresponde fundamentalmente a las instalaciones de la caleta El Manzano (muelle, restaurante, zona de venta de productos del mar, bodegas, entre otros), quiscos de temporada y a una casa que corresponde al departamento de medio ambiente del municipio de Quintero. En esta zona también hay evidencia de daños a embarcaciones e infraestructura en agosto de 2015 (Fig. 39 b), debido al oleaje de gran altura que afectó al litoral en aquel evento.

El resumen de las propiedades por clase de uso, presentes en la zona expuesta de Quintero, son las siguientes: 1 recinto aeroportuario; 4 comercios; 1 oficina pública.

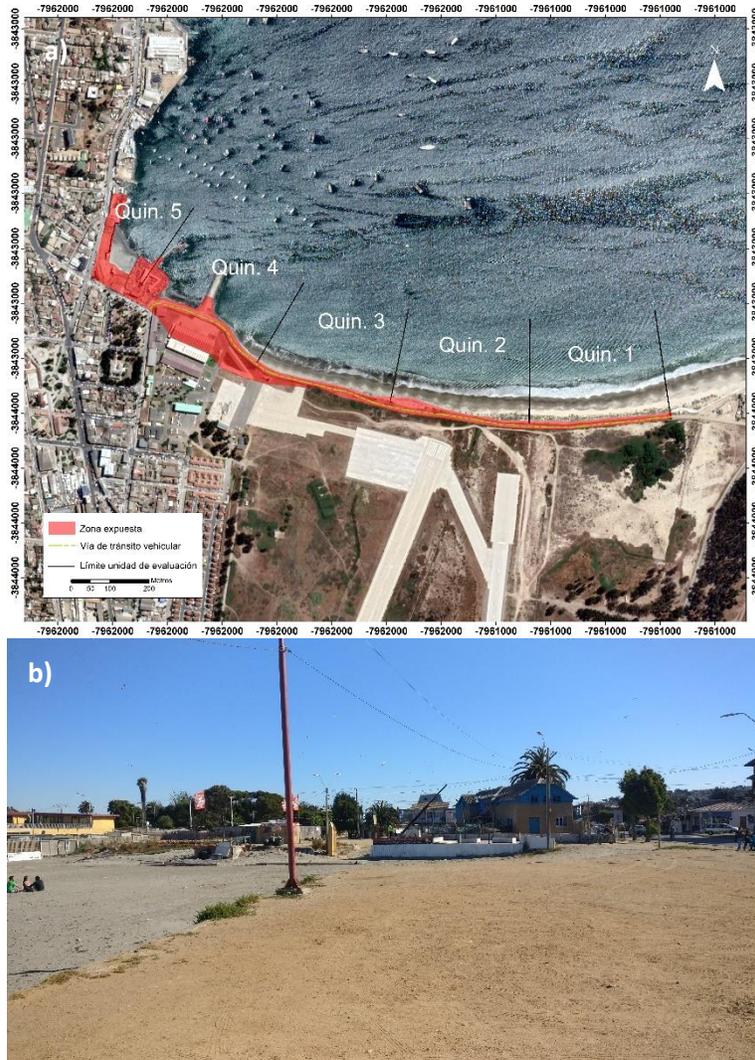


Figura N° 27: a) Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Quintero (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth. b) Entorno de la playa El Manzano, ubicado en la zona de mayor exposición. **Fuente:** Colección personal.

4.2.2.5. Área industrial

El complejo industrial en la bahía de Quintero (Fig. 28), se origina con la instalación en 1958 de la termoeléctrica, en principio, propiedad de CHILECTRA, y en 1964 la Fundación Ventanas de la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) (MMA, 2017). En 1966 se inaugura la refinería electrolítica en los terrenos de ENAMI, y un muelle de CHILECTRA para la descarga de carbón, actual Puerto Ventanas, el que se suma al muelle de ENAMI construido en 1952 (Rojas, 2015). Mediante la promulgación del Plan Regulador Intercomunal de 1965, y de sus sucesivas modificaciones, se emplazaron otros establecimientos industriales que son parte del actual complejo industrial frente al litoral arenosos de la bahía de Quintero: Terminal Marítimo OXIQUM (1981); Planta de recuperación de ácido sulfúrico, CODELCO Ventanas, y ampliación de capacidad del Puerto Ventanas (1991); Terminal Marítimo GASMAR, (1992); construcción bodega para graneles limpios Puerto Ventanas (1995);

construcción Terminal de Asfaltos y Combustibles CORDEX, actual COPEC (2000); construcción bodega de almacenamiento de cobre en Puerto Ventanas (2001); instalación Central Termoeléctrica Nueva Ventanas, AES CHILE (2006); instalación Termoeléctrica Campiche, Empresa Eléctrica Campiche (2008); inauguración Terminal Marítimo de Gasificación de Gas Licuado GNL Quintero, ENAP (2009) (MMA, 2017).

El crecimiento del parque industrial ha sido sostenido por más de cincuenta años, lo que ha significado un aumento de fuentes de trabajo y desarrollo económico para la bahía de Quintero, traducido en la creación de sectores habitacionales, balnearios y negocios locales de diverso tipo; no obstante, el crecimiento industrial ha tenido como consecuencia diversos impactos ambientales (Fundación Terram, 2014).

El complejo industrial es responsabilizado de las emisiones de dióxido de azufre, arsénico gases volátiles y metales pesados, contaminando las comunas de Puchuncaví y Quintero afectando así el desarrollo de la agricultura, la pesca y la población en general, siendo el caso más conocido el de la comunidad del colegio La Greda; sumado a lo anterior, la actividad industrial ha afectado también la fauna debido a los frecuentes varamientos de hidrocarburos y carbón (Peragallo, 2020).

Se han realizado diversas medidas de mitigación, como la declaración de Puchuncaví y Quintero como zona saturada de contaminación mediante el D.S. N°346 del Ministerio de Agricultura, en el año 1993; asimismo, se han adoptado otras medidas como por ejemplo el Plan de Descontaminación del Complejo Industrial Las Ventanas, aprobado por el D.S. N°252 del Ministerio de Minería en el año 1992, entre otros adoptados durante la década de los años noventa (Fundación Terram, 2014).

No obstante, se siguieron instalando diversas empresas con posterioridad a la ejecución de estas medidas, lo que llevó a ONGs y a los habitantes y autoridades de las comunas involucradas a manifestarse debido a los diversos efectos negativos, fundamentalmente asociados a la salud, y para dejar de ser la zona de sacrificio en la que se convirtieron (Fundación Terram, 2014).

Esto ha llevado a las autoridades del Gobierno de Chile a realizar gestiones para el cierre de todas aquellas industrias que usan combustibles fósiles en los procesos productivos, siendo la fundición Ventanas de CODELCO la primera en detener sus faenas, en mayo del 2023 (El Mostrador, consultado el: 10 de octubre de 2023).

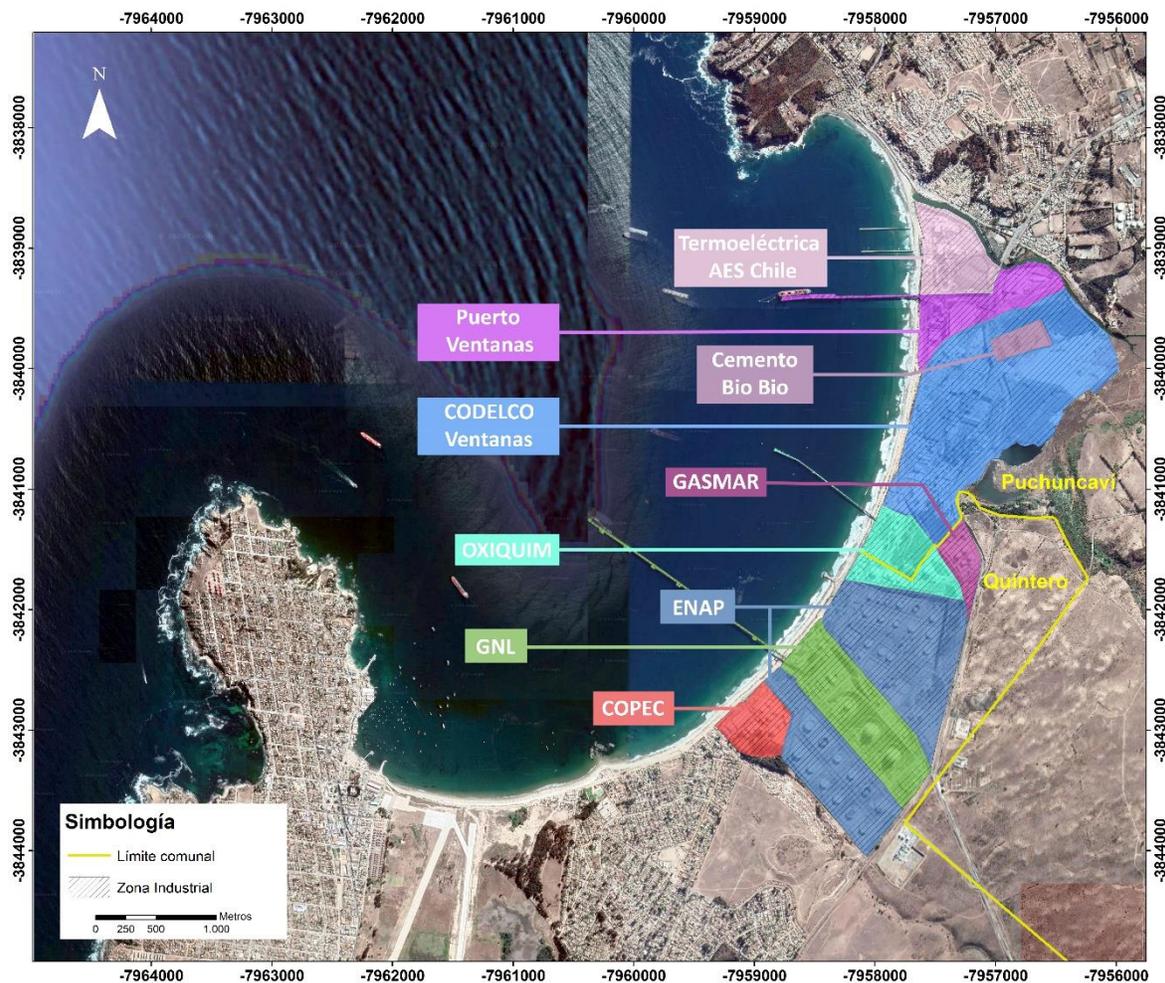


Figura N° 28: Cartografía de empresas de la zona industrial, junto al litoral arenoso, frente a la zona industrial (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth.

A continuación, se presentan todas las empresas que se encuentran frente al litoral arenoso de la bahía de Quintero, y que podrían verse afectadas por el oleaje y el nivel del mar anormales durante eventos meteo-oceanográficos extremos.

a) Sector Industrial Norte

La zona industrial norte se extiende por 1,41 km del litoral arenoso, y comprende las cuatro primeras unidades de evaluación de este sector (Fig. 29). En esta zona se encuentran AES Chile y Puerto Ventanas S.A.

El área identificada como zona expuesta en la Fig. 29, corresponde al área de mayor exposición frente a eventos meteo-oceanográficos extremos. En este caso, comprende el camino costero que se encuentra junto al límite continental del litoral arenoso; además, se considera a la primera infraestructura que mira al océano, lo que aplica para toda la zona Industrial (sectores I. norte, I. centro e I. sur).

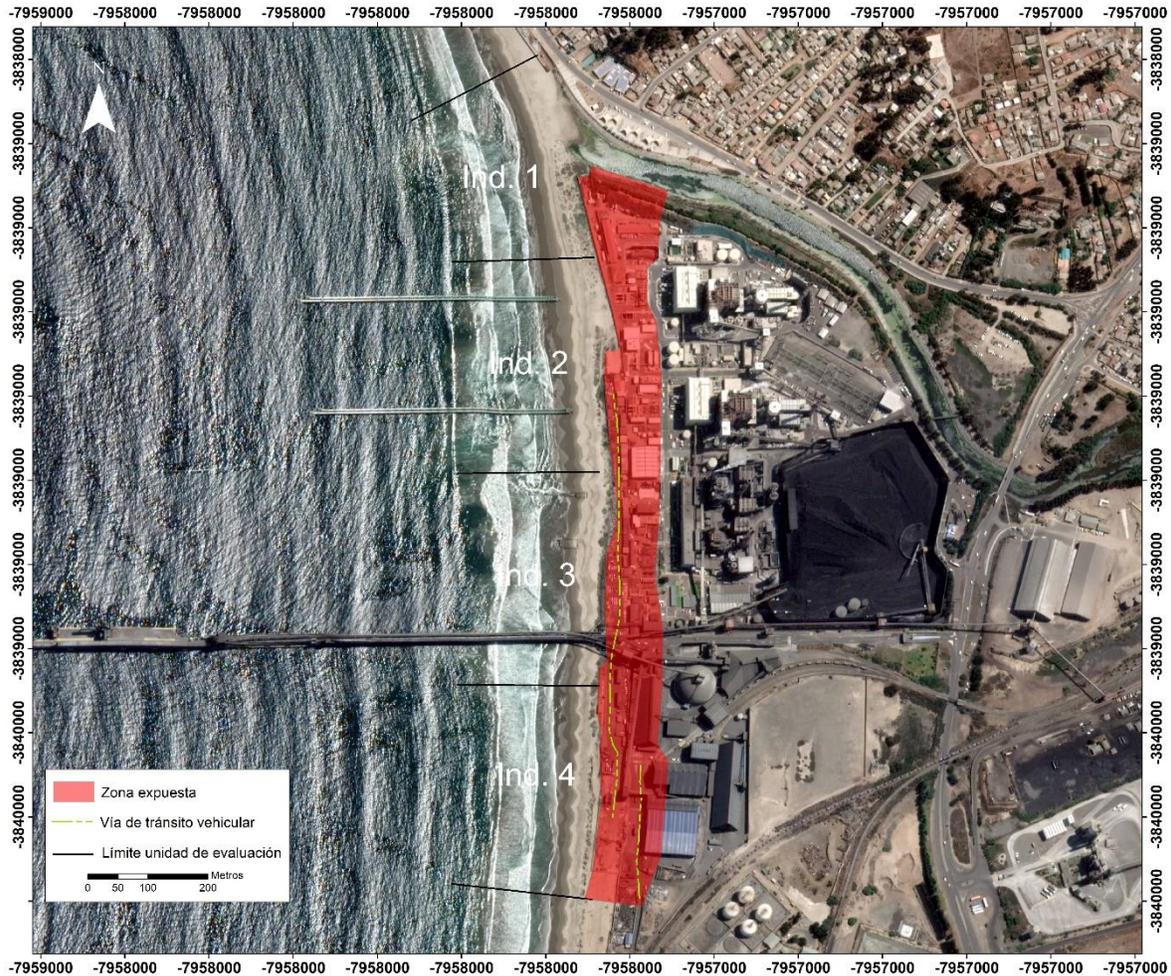


Figura N° 29: Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Industrial Norte (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth.

AES CHILE: La central termoeléctrica de Ventanas (Fig. 30), cuenta con dos unidades generadoras de energía a carbón (calderas acuotubulares), con una potencia eléctrica total de 338 MW; y una tercera unidad que corresponde a una generadora termoeléctrica tipo monoblock diseñada para consumir combustibles sólidos, carbón y/o coque de petróleo, por medio de una caldera de tecnología lecho fluidizado circulante (Rodríguez, 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023). Cada unidad está conectada a un precipitador electrostático de tres campos que retiene las partículas suspendidas en el flujo de gases de escape de los ductos de salida, reduciendo las emisiones de material particulado a la atmósfera (Rodríguez, 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023).

La recepción del carbón se hace a través de Puerto Ventanas S.A., quien arrienda sus instalaciones a AES para la recepción de carbón a través de barcos de graneles y su transporte hasta la cancha de almacenamiento es mediante cinta transportadora cubierta (Rodríguez, 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023).



Figura N° 30: AES CHILE, planta Ventana. **Fuente:** Colección personal.

Puerto Ventana S.A.: corresponde a un terminal multipropósito (Fig. 31), de carga y descarga para graneles líquidos y sólidos, carga general, petróleo, concentrado de cobre y oro, y para el desembarco de cemento y asfalto (I. Municipalidad de Quintero, 2016). Presta servicios de muellaje integral y sistemas mecanizados para el almacenamiento y transferencia de carga (Puerto Ventanas S.A., Consultado el 5 de octubre de 2023). Cuenta con dos grúas para descarga de graneles sólidos, unidos a un sistema transportador, conectado a un cargador viajero para la transferencia de concentrado de cobre (Rodríguez, 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023).



Figura N° 31: Puerto Ventana S.A. **Fuente:** Colección personal.

b) Sector Industrial Centro

Esta zona se extiende por 1,48 km del litoral arenoso, abarcando cinco unidades de evaluación, frente a CODELCO división Ventanas y OXIQUM (Fig. 32). Este es el único sector de la zona industrial en que la vía férrea se encuentra frente al litoral.

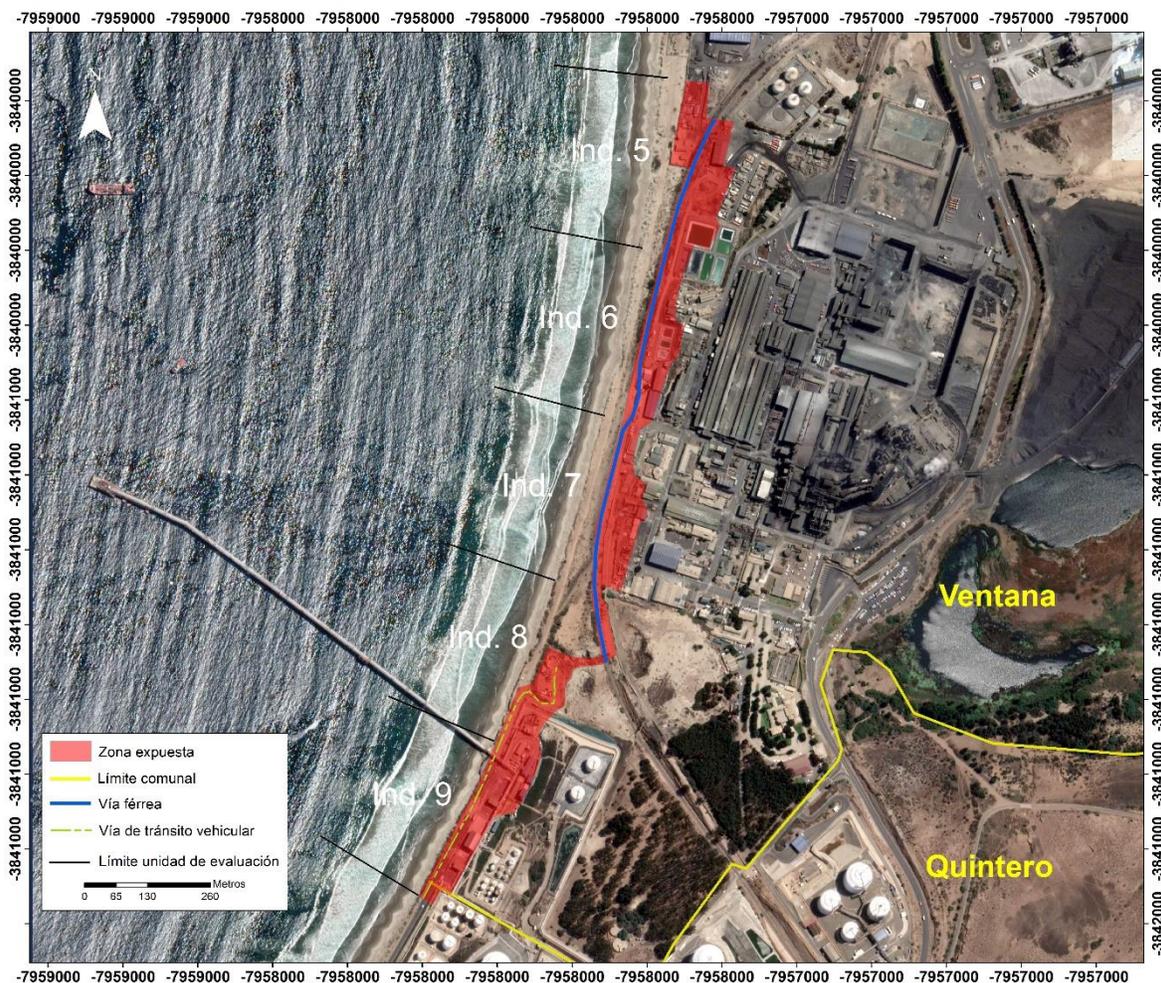


Figura N° 32: Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Industrial Centro (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth.

CODELCO división Ventana: Es una fundición y refinera de cobre (Fig. 33) que produce cátodos de cobre, lingotes de oro y granalla de plata, además de ácido sulfúrico (Rodríguez, 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023). Un 50% de sus insumos provienen de los concentrados que extraen la pequeña y mediana minería emplazada entre las regiones de Coquimbo y la de O'Higgins, y la otra mitad proviene de la gran minería de la zona central (Guía Minera, consultado el 10 de octubre de 2023). Tiene una capacidad de fundición de 420.000 ton, para refinera de 400.000 ton, y de producción de ácido sulfúrico de 360.000 ton (Guía Minera, consultado el 10 de octubre de 2023). En mayo de 2023 se cerraron las plantas de fundición y producción de ácido sulfúrico, quedando en funcionamiento únicamente la fábrica de cátodos (Mayorga, 2023. Consultado el 10 de octubre de 2023).



Figura N° 33: CODELCO, división Ventana. **Fuente:** Colección personal.

OXIQUM S.A.: Esta empresa cuenta con dos establecimientos en la zona de Ventanas, un terminal marítimo que descarga graneles líquidos (metanol, estireno, acetato de etilo, etcétera), a través de ductos de descarga instalados en su muelle y un establecimiento de molienda de sustancias granulares, ubicado en el sector norte de la Bahía de Quintero, inmediatamente al sur del Puerto de Ventanas (Fig. 34) (Rodríguez, 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023).



Figura N° 34: OXIQUM S.A. **Fuente:** Colección personal.

c) Sector Industrial Sur

Corresponde al extremo sur de la zona industrial, y se extiende frente a una porción del litoral de una longitud de 1,57 km, con cinco unidades de evaluación. Las plantas ubicadas en este sector corresponden a las empresas ENAP, GNL y COPEC. Es el único sector en que el camino costero se encuentra completamente asfaltado.

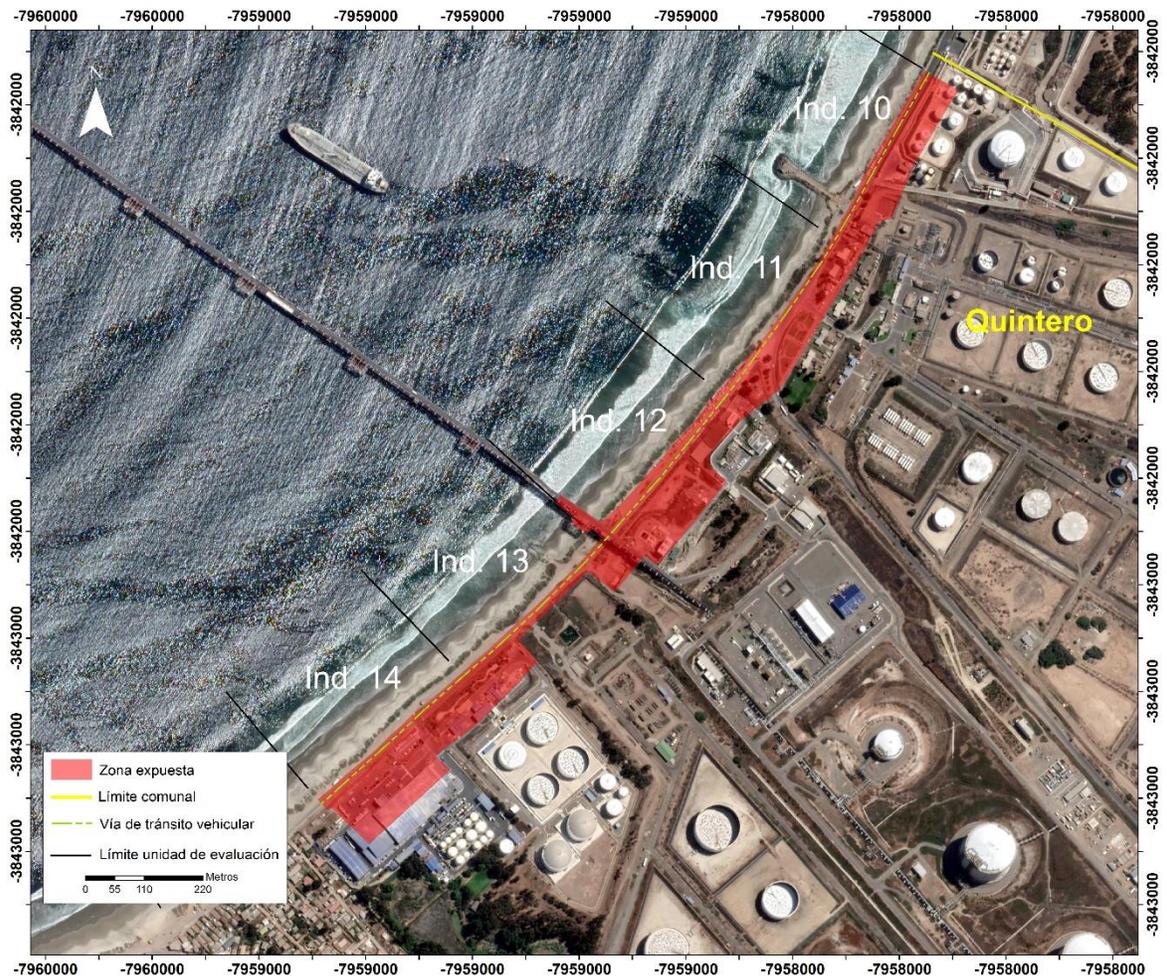


Figura N° 35: Cartografía zona de mayor exposición frente a oleaje extremo, sector Industrial Sur (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth.

ENAP, terminal Quintero: En el terminal Quintero de la Empresa Nacional de Petróleo, ENAP (Fig. 36), se almacenan los petróleos crudos que son importados y transportados mediante embarcaciones marinas, en la Bahía de Quintero son descargados y transportados mediante oleoductos submarinos a los estanques que se encuentra instalados en el terminal, para posteriormente ser enviados a la Refinería de Concón (Rodríguez, 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023).



Figura N° 36: ENAP, terminal Quintero. **Fuente:** Colección personal.

GNL terminal de gas natural licuado, Quintero: Es el terminal de recepción, almacenamiento y regasificación de Gas Natural Licuado, GNL (Fig. 37), que opera en la Bahía de Quintero y abastece de gas natural, a la zona central de Chile (Rodríguez, 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023). El terminal ocupa una superficie de 40 hectáreas en la Bahía de Quintero en el cual se construyeron los principales componentes de la planta: un muelle, tres estanques de almacenamiento que permiten la descarga de GNL y su almacenamiento en tierra, y una planta de regasificación (Rodríguez, 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023).



Figura N° 37: GNL terminal de gas natural licuado, Quintero. **Fuente:** Colección personal.

COMPAÑÍA DE PETRÓLEOS DE CHILE S.A. (COPEC): Hasta antes del 2008, esta planta se ubicaba en Viña del Mar, particularmente en el sector de Las Salinas; después de ese año, se instala cerca de Loncura (Fig. 38) (Rodríguez, 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023). El giro de esta empresa privada es la distribución de combustibles y lubricantes para todo Chile. Su planta ubicada en la bahía de Quintero funciona como terminal marítimo y como un lugar de almacenamiento de sus productos, siendo parte del complejo industrial

que la empresa tiene en el sector Concón-Quintero (Rodríguez, 2019. Consultado el 5 de octubre de 2023).



Figura N° 38: COPEC S.A. **Fuente:** Colección personal.

4.2.3. Caracterización de amenazas meteo-oceanográficas en la bahía de Quintero

4.2.3.1. *Eventos meteo-oceanográficos extremos de agosto de 2015 y junio de 2017*

Agosto de 2015 se caracterizó por una serie de temporales que modificaron la morfología costera, particularmente los litorales arenosos, y afectaron severamente la infraestructura de la costa central de Chile. Entre el 2 y el 8 de agosto se suscitaron tres temporales diferentes, en los que se sumaron diversas variables meteo-oceanográficas (oleaje extremo, rachas de viento provenientes del noroeste, una mínima histórica de la presión atmosférica, y una marea alta astronómica), que generaron daños en diversos puntos del litoral de las regiones de Coquimbo y Valparaíso (Winckler et al., 2017).

Tal es el caso del temporal de agosto de 2015, en que los efectos en la costa de Chile Central se produjeron como consecuencia del oleaje extremo asociado a marejadas, rachas de vientos importantes provenientes del noroeste, una baja presión histórica relacionada a un sistema frontal, y una marea astronómica que contribuyó en el aumento del nivel del mar (Winckler et al., 2017)

Por otra parte, en junio de 2017 hubo otra serie de temporales con importantes daños en el litoral en casi toda la costa del país, de los cuales Rifo (En Cooperativa, 2017. Consultado el 26 de septiembre de 2021), señala que el registrado entre el 24 y el 26 de junio tuvo la mayor intensidad. Según la percepción de comerciantes de la Región de Valparaíso entrevistados en junio del 2017 por Astudillo (2017), y de acuerdo a trabajadores de una empresa ubicada en el sector industrial junto a la costa de la Bahía de Quintero, todos consultados poco después del temporal, las marejadas del 24 de junio de 2017 fueron de menor intensidad que las de agosto de 2015.

Los eventos extremos asociados a oleaje de gran altura, entre los meses de agosto y julio de los años 2015 y 2017 respectivamente, causaron daños por US\$11,5 millones sólo en la Región de Valparaíso, cifra que en casi su totalidad está asociada a los eventos del 8 de agosto de 2015 y del 25 de junio de 2017 (Barría, 2017. Consultado el 8 de junio de 2023). Quintero y Puchuncaví son dos de las comunas costeras que en ambas fechas tuvieron perjuicios materiales y cambios en la morfología de la costa debido al oleaje de alta energía.

Para el 8 de agosto de 2015, Quintero se vio afectado en parte de la infraestructura ubicada junto al litoral de la bahía que lleva el mismo nombre, fundamentalmente en el sector que se encuentra entre el sur del Puerto de Ventanas y Loncura (Winckler et al.,2017). Hubo erosión del terraplén junto al límite continental de la playa (Winckler et al.,2017), junto con la exposición de una línea de transmisión subterránea proveniente de AES Chile, frente a Oxiquim (Fig. 40), y daños a la calle “Camino Costero” paralela al litoral; además, catorce lanchas de pescadores artesanales vararon y dos fueron destruidas (Fig. 39 (a) y (b)) (Valverde, 2015. Consultado el 11 de octubre de 2021).

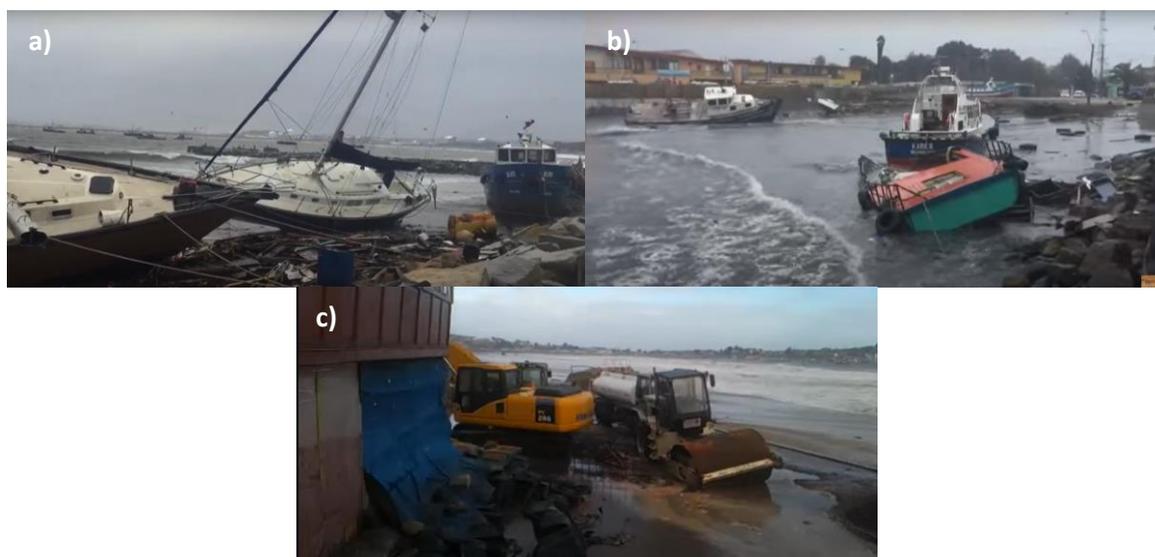


Figura N° 39: Fotografías registro consecuencias temporal 8 agosto 2015. a) Embarcaciones varadas junto a caleta El Manzano. **Fuente:** Cosas Cotidianas de la Vida, 2015. b) Lanchas de pesca artesanal varadas y destruidas en playa El Manzano. **Fuente:** Dunas de ritoque, 2015. c) Infraestructura y maquinaria dañadas en Loncura. **Fuente:** Francisco Arriagada, 2015.

El 8 de agosto de 2015 en Puchuncaví, los daños se concentraron en la playa grande de Maitencillo, con erosión e inundación de algunos restaurantes, mientras que frente a la línea litoral de la bahía de Quintero no se registraron daños ni cambios significativos en el litoral arenoso en esta comuna (Winckler et al.,2017).



Figura N° 40: Erosión de terraplén junto a la parte posterior de la playa, y daños a línea de transmisión eléctrica subterránea expuestas por oleaje (frente a OXIQUM, en unidad de evaluación Industrial 10). a) Representación estado de terraplén previo al temporal del 8 de agosto de 2015. b) Erosión de terraplén y daños en líneas de transmisión eléctrica subterránea. c) Exposición de cámara de paso de línea de transmisión eléctrica por erosión de terraplén. **Fuente:** Elaboración propia.

Entre los efectos del temporal del 25 de junio de 2017 en la comuna de Quintero, se observó el encallamiento de dos embarcaciones de pesca artesanal en Loncura (Fig. 41 b), la

desaparición de 2km de playa entre Quintero y Loncura (Fig. 41 a), dos casas afectadas producto del oleaje, la destrucción de quioscos ubicados en la playa frente a Loncura (Equipo Crónica, El Mercurio de Valparaíso. Consultado el 11 de octubre de 2021) y daños en la infraestructura de la costanera que une Loncura con Quintero, construida hacia fines del 2015, y cuyas pérdidas fueron avaluadas en ciento cincuenta millones de pesos (Astudillo, 2017. Consultado el 15 de marzo de 2023).

Por otra parte, en Puchuncaví, los daños se concentraron en Horcón, con la destrucción de un centro comunitario y daños en el camino junto a la costanera en el sector de los artesanos de la caleta, y en Maitencillo con la destrucción de paseos peatonales en la Av. del Mar (Equipo Crónica, El Mercurio de Valparaíso. Consultado el 11 de octubre de 2021).



Figura N° 41: Fotografías registro consecuencias temporal 25 junio 2017. a) Embarcaciones varadas, paseo costanera destruido y desaparición de playa frente a pista de aterrizaje de base aérea Quintero. **Fuente:** Riquelme, 2017. Consultado el 26 de septiembre de 2021. b) Lancha de pesca artesanal varada y paseo costanera destruido. **Fuente:** 24 Horas, 2017 Consultado el 26 de septiembre de 2021. c) Lancha de pesca artesanal varada cerca de bodegas base aérea Quintero. **Fuente:** 24 Horas, 2017 Consultado el 26 de septiembre de 2021.

En cuanto al área industrial, al igual que para el temporal del 2015, hubo daños en el terraplén que se encuentra junto al límite continental de la playa arenosa, y en parte de la infraestructura ubicada en esta. Por ejemplo, la Fig. 42 muestra la diferencia en el retroceso del terraplén para el evento de agosto del 2015 y respecto al temporal de junio de 2017. En este caso particular, es posible observar que la distancia entre la línea de transmisión y el escarpe del terraplén fue mayor después del 25 de junio del 2017. De hecho, según la opinión de trabajadores de una de las empresas ubicadas junto al litoral arenoso de la bahía de Quintero, los efectos en la infraestructura de la playa o cercano a esta en el temporal del 2017 fueron mayores a los del 2015, a pesar de que el oleaje percibido en este último evento fue más fuerte.

Por el contrario, comerciantes afectados fueron consultados y coincidieron en que en la intensidad del temporal del 25 de junio de 2017 no superó a la del 8 de agosto de 2015, en donde se dañó incluso infraestructura privada que no estaba en el borde costero y algunas instalaciones de la Armada (Astudillo, 2017. Consultado el: 15 de marzo de 2023).

Esta discrepancia en la percepción entre trabajadores de la bahía de Quintero y de comerciantes, en cuanto a la diferencia en los perjuicios como consecuencia de los temporales de 2015 y 2017, puede deberse a diferencias morfológicas locales dentro de la misma bahía que establece una sensibilidad diferenciada en, por ejemplo, la influencia del nivel del mar propiciado por la marea de sicigia en el 2017, el cual pudo haber representado una mayor influencia que el oleaje en la erosión del terraplén frente a la zona Industrial. Esto último, pudo haber sido amplificado por la inestabilidad del relleno que se hizo en el terraplén en agosto del 2015. Independiente de esto, hay que mencionar que los temporales de agosto del 2015 y junio 2017 fueron los eventos meteo-oceanográficos que más consecuencias tuvieron en el litoral arenoso de la bahía de Quintero, entre los años 2013 y 2020, según trabajadores de la industria del sector que fueron consultados.



Figura N° 42: Fotografías de registro erosión por oleaje en terraplén frente a OXIQUM. a) Exposición de losetas que recubren líneas de transmisión subterráneas, temporal del 8 de agosto de 2015. b) Exposición de líneas de transmisión del temporal de 25 de junio de 2017; en este último hubo un mayor retroceso del terraplén, respecto a temporal de agosto de 2015. **Fuente:** Colección personal.

Variables físicas

Los antecedentes que se exponen a continuación consideran datos de tres días consecutivos para analizar las variables meteo-oceanográficas de cada temporal, donde el día dos es aquel que fue más crítico en términos energéticos, y los días uno y tres aquellos en que se genera y decae el evento, respectivamente.

Para el caso del temporal de 2015, los días evaluados son el 7, 8 y 9 de agosto. Por otra parte, los días analizados del temporal de 2017 son el 24, 25 y 26 de junio.

El Niño

En el otoño del hemisferio sur del año 2015, comenzó un nuevo ciclo del calentamiento superficial del océano Pacífico ecuatorial, situación que dio pie a una de las fases cálidas del ENOS que se encuentra entre las tres más grandes según el registro histórico de este fenómeno, razón por lo que fue bautizado como “El Niño Godzilla” (Bell et al., 2017, en Garreaud, 2018). Este ciclo ENOS duró hasta otoño de 2016 y tuvo un índice ENOS de más de 2°C en las regiones 1+2 y 3.4 del Pacífico, con un promedio cercano a 2°C en esta última región (Fig. 43) (Garreaud, 2018). Esta condición, contrario a lo que se puede pensar para este ciclo de gran magnitud, no generó precipitaciones significativas para Chile central (Siler et al., 2017, y Garreaud et al., 2017, en Garreaud, 2018), a diferencia del ciclo ENOS 1997-1998, que tuvo similares características, pero con altas precipitaciones en la costa Pacífico de Sudamérica al sur de Ecuador (L'Heureux et al., 2015, en Martínez & Takahashi, 2017).

En el año 2017, a diferencia del Niño Godzilla, el calentamiento de la superficie del mar se concentró únicamente frente a la costa de Sudamérica (región El Niño 1+2), y no hacia el Pacífico ecuatorial oriental o central, razón por lo cual fue denominado como “El Niño Costero” (Takahashi, 2017). Este fenómeno se caracterizó por una condición ligeramente fría o neutra en la región Niño 3.4 y por temperaturas superficiales del mar por sobre 1°C en la región 1+2 hasta abril del 2017 (Fig. 43), estando dentro de los diez más altos del registro histórico (Garreaud, 2018). Este ciclo del Niño afectó fundamentalmente a las zonas de selva amazónica de Perú y Ecuador con altas precipitaciones e inundaciones durante los primeros cinco meses del 2017 (Fuentes, 2017. Consultado el 15 de agosto de 2023). En Chile, los efectos del Niño Costero se relacionan principalmente con un aumento de las temperaturas máximas y mínimas por sobre el promedio, en la costa norte del país desde enero hasta mayo del 2017 (Fuentes, 2017. Consultado el 15 de agosto de 2023).

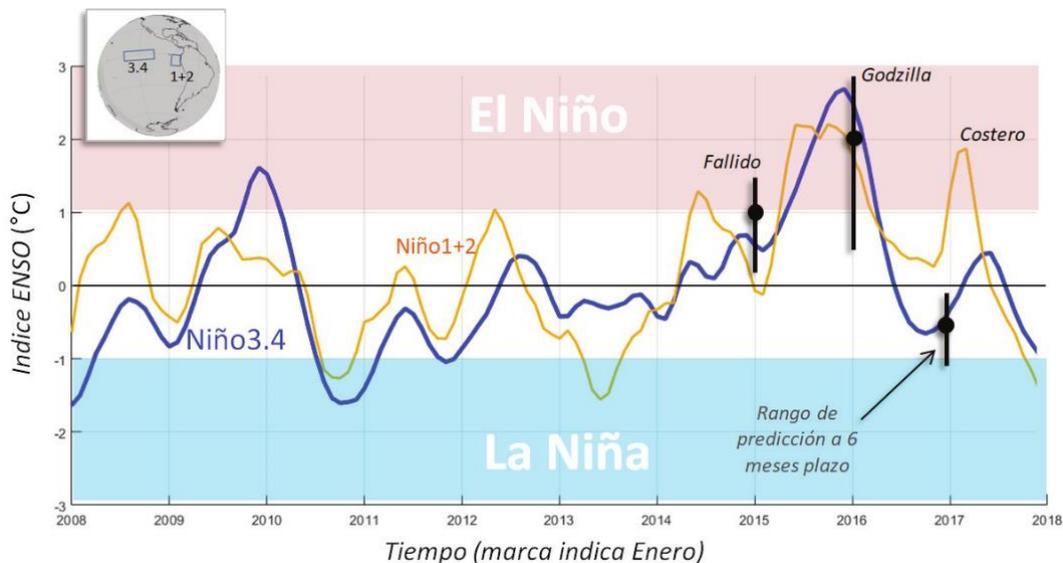


Figura N° 43: Series de tiempo de los valores mensuales en las regiones Niño 3.4 y Niño 1+2, entre 2008 y 2018. **Fuente:** Garreaud, 2018.

Presión

Winckler et al. (2017) menciona que la presión registrada el 7 y el 8 de agosto de 2015 a las 18 UTC y a las 00 UTC respectivamente, de 981 Hpa (Fig. 44), fue la más baja de acuerdo a la estadística histórica de muchas de las estaciones consultadas. Los mismos autores señalan que este fenómeno permitió la ocurrencia del fenómeno “Barómetro Invertido” el cual permite explicar el aumento del mar de 0,1 a 0,2 m (Fig. 45).

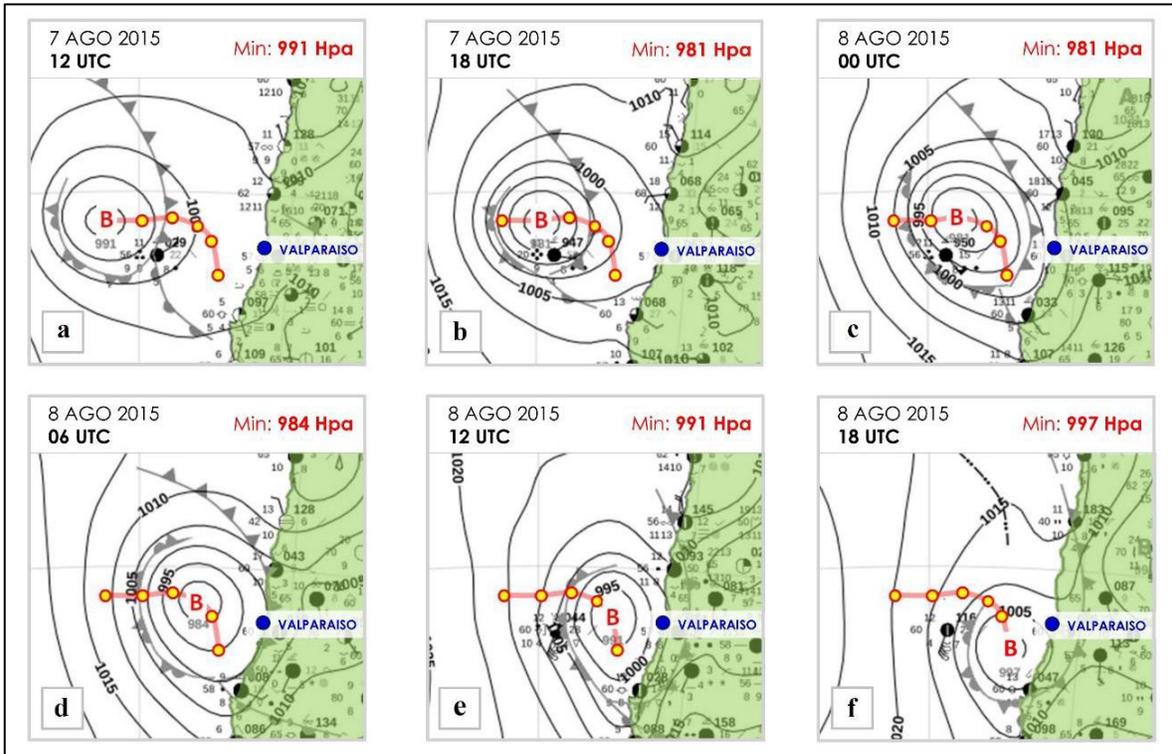


Figura N° 44: Cartas sinópticas 7 y 8 de agosto 2015. Fuente: Winckler et al., 2017.

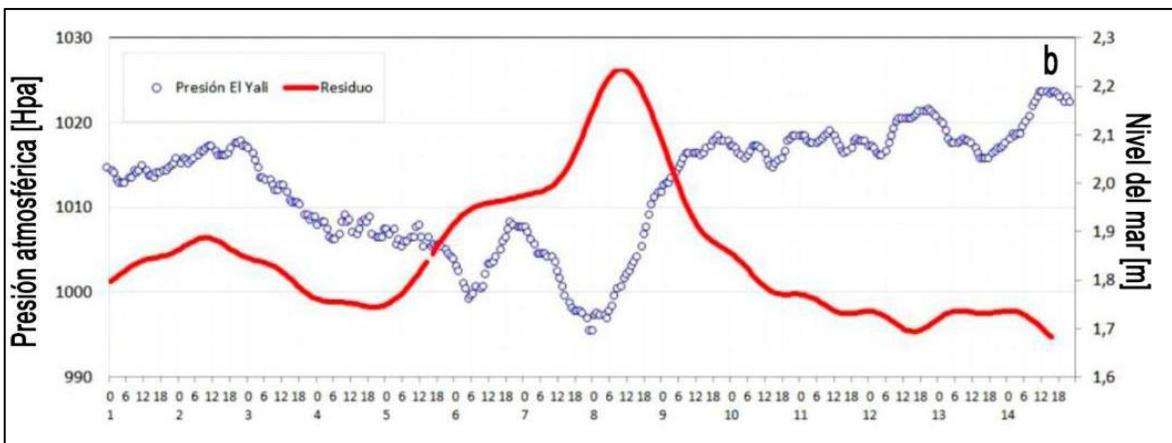


Figura N° 45: Gráfico relación presión atmosférica y nivel del mar. Fuente: Winckler et al., 2017.

La presión más baja del ciclón extratropical que generó el frente de mal tiempo en la Bahía de Quintero el año 2017, de acuerdo a las cartas sinópticas de la Armada de Brasil, fue de 982 Hpa y se registró el 24 de junio a las 12 UTC (Fig. 46; Fig. 47; Fig. 48). Si bien es similar a los 981 Hpa del año 2015, la distancia al litoral de ambos núcleos al momento de registrar sus valores mínimos es distinta; para el 2015 el núcleo de baja presión se encontraba a 500 Km de distancia, y en el 2017 el núcleo se encontraba a unos 1000 km de distancia, por lo que los efectos sobre el nivel del mar con consecuencias en el litoral arenoso de Quintero fueron posiblemente mayores en el 2015 que en el 2017.

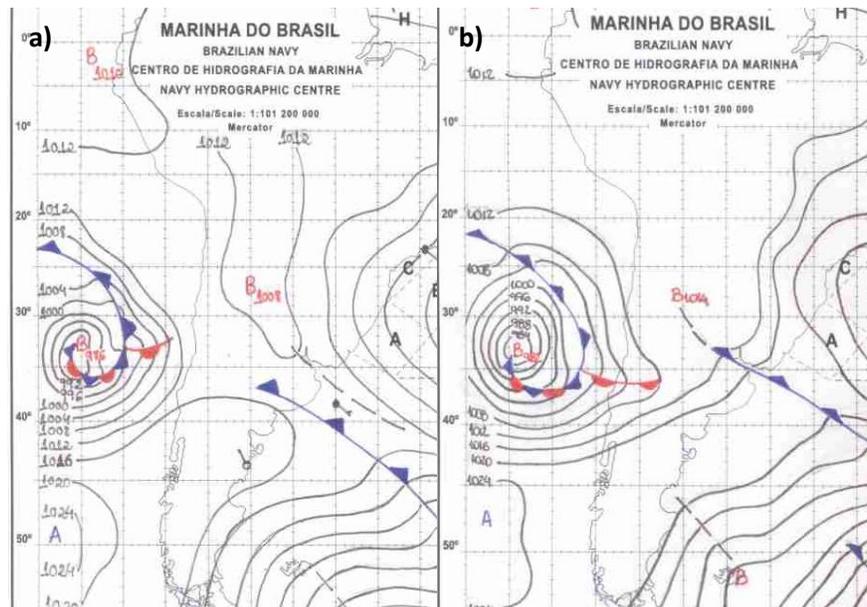


Figura N° 46: Cartas sinópticas 24 de junio del 2017. a) 00 UTC; b) 12 UTC. **Fuente:** Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil. Consultado el 26 de septiembre de 2021.

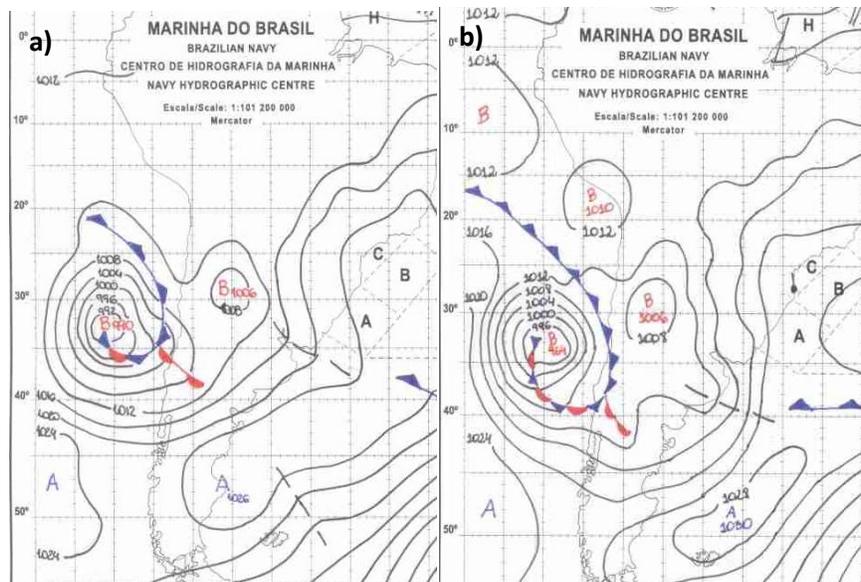


Figura N° 47: Cartas sinópticas 25 de junio del 2017. a) 00 UTC; b) 12 UTC. **Fuente:** Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil. Consultado el 26 de septiembre de 2021.

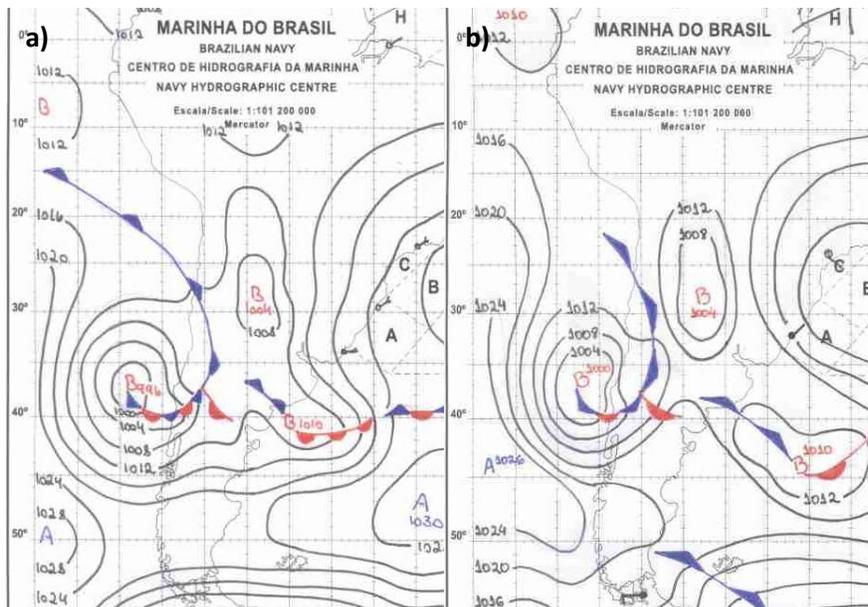


Figura N° 48: Cartas sinópticas 26 de junio del 2017. a) 00 UTC; b) 12 UTC. **Fuente:** Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil. Consultado el 26 de septiembre de 2021.

En la actualidad, no hay estudios de correlación de la baja presión del ciclón extratropical del 2017 con el aumento del nivel del mar (marea meteorológica), tal como si lo hicieron Winckler et al. (2017), para el temporal de agosto de 2015, por lo que no es posible atribuir un aumento del nivel promedio del mar a esta variable física para el evento más reciente. Esto no implica que el núcleo de baja presión no haya incidido en el evento de junio de

2017. Sin embargo, hasta la fecha no es posible conocer cuál es su influencia real, si es que efectivamente la hubo.

Precipitaciones

Al comparar la Tabla 3 y la Tabla 4 es posible notar que el temporal de 2017 registro una mayor cantidad de precipitaciones que en el 2015, particularmente al considerar el segundo y el tercer día de cada evento. De igual forma, al comparar los milímetros acumulados durante los tres días de cada año, el 2017 registró 83,6 mm, mientras que en el 2015 las precipitaciones alcanzaron los 33,3 mm.

No obstante, el temporal del 2015 aquí analizado cuenta con lluvias antecedentes del 5 y 6 de agosto, con 32 mm y 72 mm caídos respectivamente. Esto es importante de mencionar ya que cualquier posible efecto de las precipitaciones por sobre la morfología del litoral durante el temporal del 8 de agosto de 2015, deben considerar las precipitaciones de los días anteriores con el objetivo de contextualizar el evento.

Precipitaciones (mm) acumuladas por día del temporal de 2015	
07 de agosto	22,2 mm
08 de agosto	6,8 mm
09 de agosto	4,4 mm

Tabla N° 3: Precipitaciones acumuladas temporal 2015. **Fuente:** Elaboración propia, en base a información de CR2. Consultado el 26 de septiembre de 2021.

Precipitaciones (mm) acumuladas por día del temporal de 2017	
24 de junio	1,6 mm
25 de junio	45,7 mm
26 de junio	36,3 mm

Tabla N° 4: Precipitaciones acumuladas temporal 2017. **Fuente:** Elaboración propia, en base a información de CR2. Consultado el 26 de septiembre de 2021.

Dirección de viento

Las Fig. 49 y Fig. 50 muestran la rosa de los vientos de frecuencias según su dirección de origen, para los días evaluados del temporal de 2015 y de 2017. Por lo general, las frecuencias de los vientos acá graficados provienen del este y noreste, pudiendo indicar o que los vientos que recorrieron la bahía durante los eventos acá evaluados tuvieron muy poca o nula influencia por sobre la dirección del oleaje incidente en el litoral, o que los sensores utilizados para generar estos datos no fueron capaces de generar registros reales por su ubicación o por otra razón.

Winckler et al. (2017) mencionan que la ocurrencia conjunta de múltiples efectos meteo-oceanográficos, entre los que se encuentran vientos provenientes del noroeste, causaron la destrucción de edificaciones e infraestructura costera de muchas localidades de Chile

central. Si los vientos del noroeste fueron una variable significativa durante el evento extremo de agosto de 2015, probablemente los sensores debiesen haber registrado una mayor frecuencia de vientos provenientes de esa dirección; por otra parte, cabe la posibilidad de que los intensos vientos del noroeste mencionados por Winckler et al. (2017) que influyeron en la destrucción de infraestructura costera no tuvieron la frecuencia de vientos de otras direcciones, pero sí tuvieron la capacidad de generar modificaciones importantes en la costa.

Sin embargo, es importante tener información de otras fuentes respecto a la dirección de los vientos durante los temporales de 2015 y 2017 para poder evaluar de mejor forma ambos eventos y saber cuál es su influencia real sobre los cambios del litoral arenoso de la bahía de Quintero.

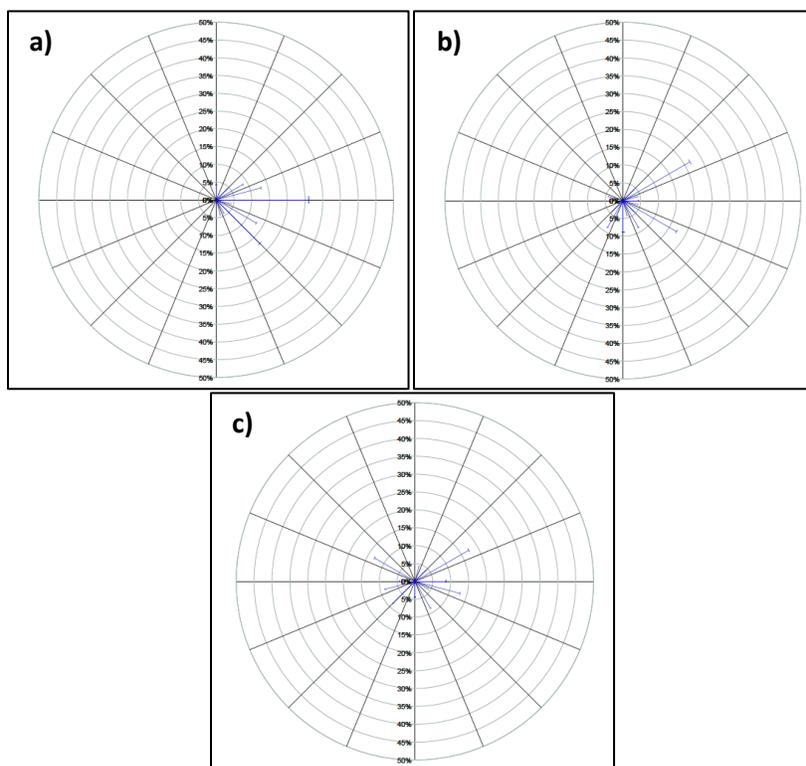


Figura N° 49: Rosa de los vientos de frecuencias según su dirección de origen estación Quintero, 2015. A) 07 de agosto. B) 08 de agosto. C) 09 de agosto. **Fuente:** SINCA, MMA. Consultado el 26 de septiembre de 2021.

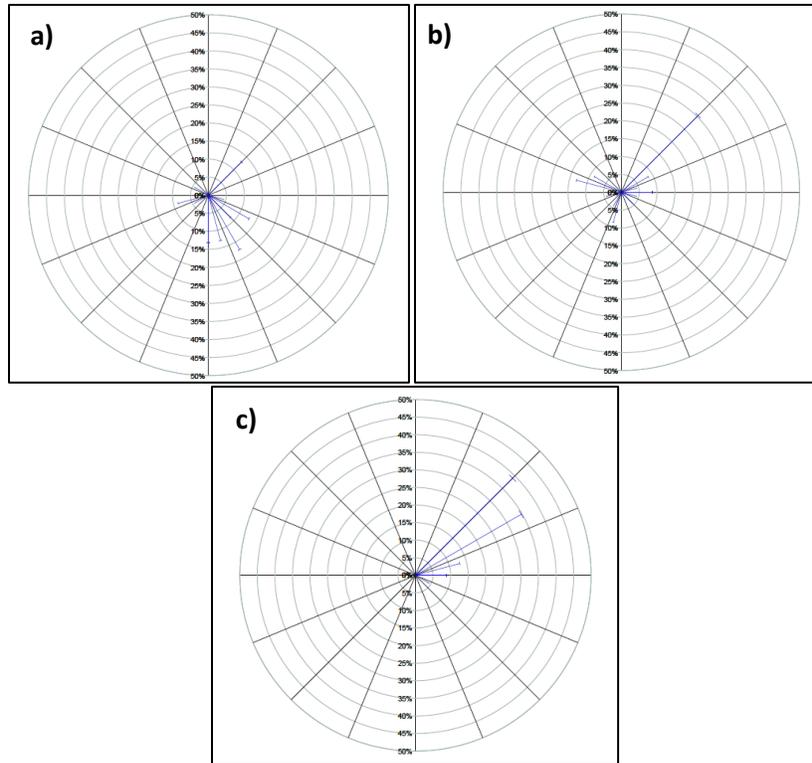


Figura N° 50: Rosa de los vientos de frecuencias según su dirección de origen estación Quintero, 2017. A) 24 de junio. B) 25 de junio. C) 26 de junio. **Fuente:** SINCA, MMA. Consultado el 26 de septiembre de 2021.

Velocidad del viento

Al considerar la velocidad del viento del segundo día de los temporales (Fig. 51), los que tuvieron las mayores velocidades de los tres días evaluados, es posible observar que en el 2015 hay dos registros que superan los 9 m/s y otros dos que superan los 8 m/s, a diferencia del 2017, donde sólo hay un peak por sobre los 9 m/s y donde el segundo valor más alto estuvo en torno a los 8,9 m/s, no teniendo más velocidades por sobre los 8 m/s. Para el mismo día, al contrastar los periodos en que se registraron valores mayores a 7 m/s de manera continua (sin considerar el peak del año 2015 para este particular ya que es un valor aislado teniendo en cuenta las bajas velocidades de la hora previa y la hora posterior a esta máxima), es posible observar que en el año 2017 hay sólo tres valores dentro de esa categoría (entre las 13:00 y las 15:00 Hrs), mientras que para el 2015 hay 6 horas consecutivas (de 5:00 a 10:00 Hrs) sobre el valor umbral antes mencionado.

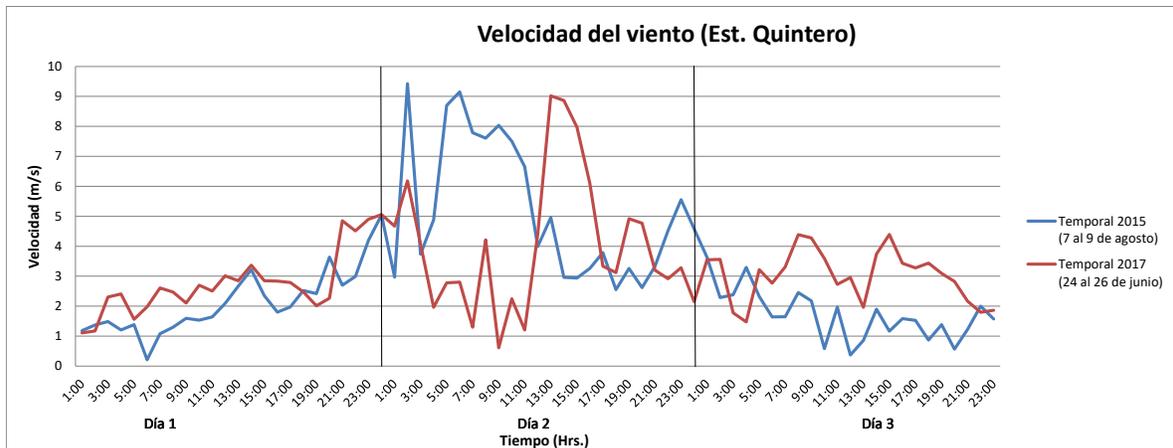


Figura N° 51: Velocidad del viento temporales 2015 y 2017, Est. Quintero. **Fuente:** SINCA, MMA. Consultado el 26 de septiembre de 2021.

Altura del oleaje

La altura del oleaje evaluada en este apartado fue calculada en la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la U. de Valparaíso, en 4 nodos diferentes dentro de la Bahía de Quintero (Fig. 52), sobre la base de la altura del Swell registrado a unos 100 kilómetros del litoral, para periodos de entre 12 y 13 segundos, y multiplicados por el coeficiente de agitación de las olas significativas provenientes del noroeste.

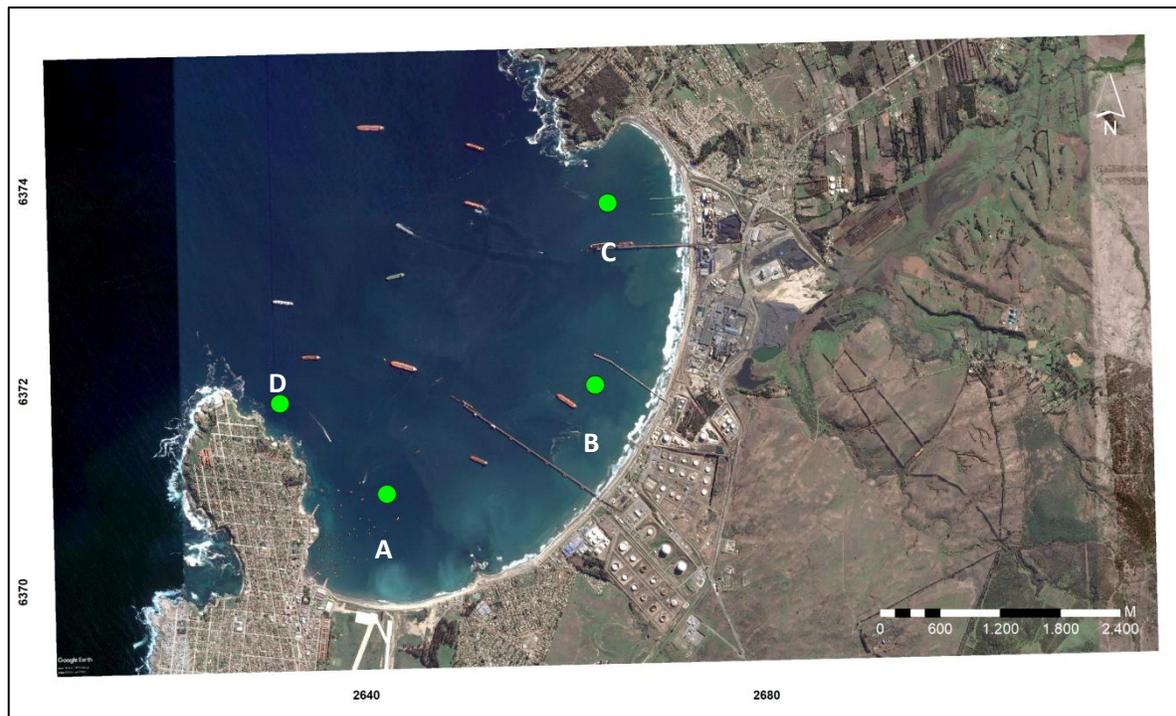


Figura N° 52: Nodos de cálculo de altura del oleaje. **Fuente:** Araya, 2018.

En el 2015, en los 4 nodos, los peaks de altura de las olas (Fig. 53; Fig. 54; Fig. 55; Fig. 56), se registraron entre las 13:00 y las 14:00 Hrs, con los mayores valores en el nodo D (4,94 m) y en el nodo B (3,99 m), ambos a las 14:00 Hrs UTC. Para el 2017, los valores más altos se registraron nuevamente en los nodos D (2,88 m) y en el nodo B (3,17 m) a las 19:00 Hrs y 18 Hrs UTC respectivamente.

Es importante destacar que la diferencia de la máxima entre los años 2015 y 2017 en el nodo D es de más de 2 m, lo que marca al menos en esta variable un contraste importante a considerar. En todos los nodos, excepto el C por su ubicación protegida del oleaje proveniente del noroeste, al efectuar una comparación entre las máximas alturas de ola de los eventos del 2015 y 2017, es posible identificar que las diferencias entre ambos años para cada nodo, son de al menos 1,1 m (nodo B), con un peak de diferencia en el nodo D con 1,8 m.

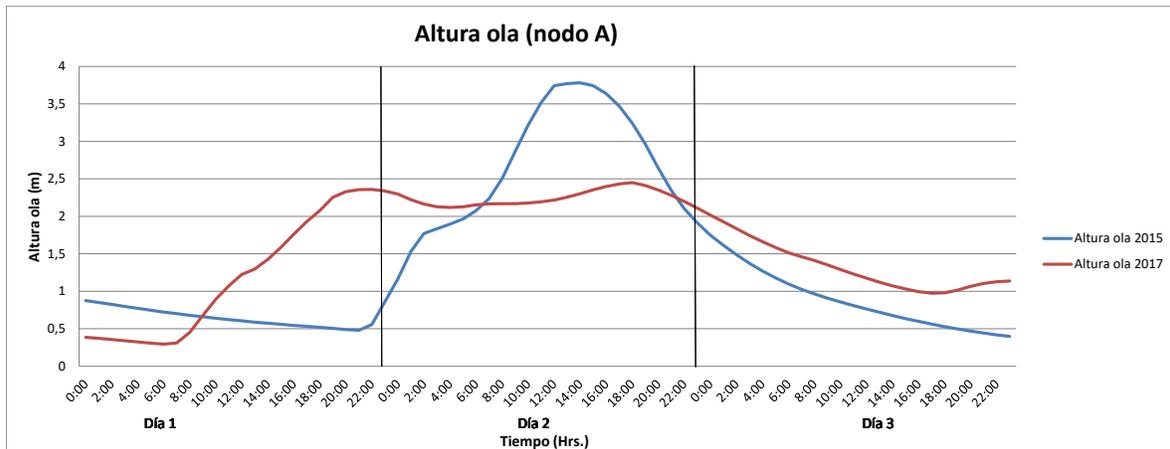


Figura N° 53: Altura ola Nodo A, temporal 2015 y 2017. Fuente: Elaboración Propia, en base a datos proporcionados por César Esparza, Escuela de Ingeniería Oceánica, UV (Comunicación personal).

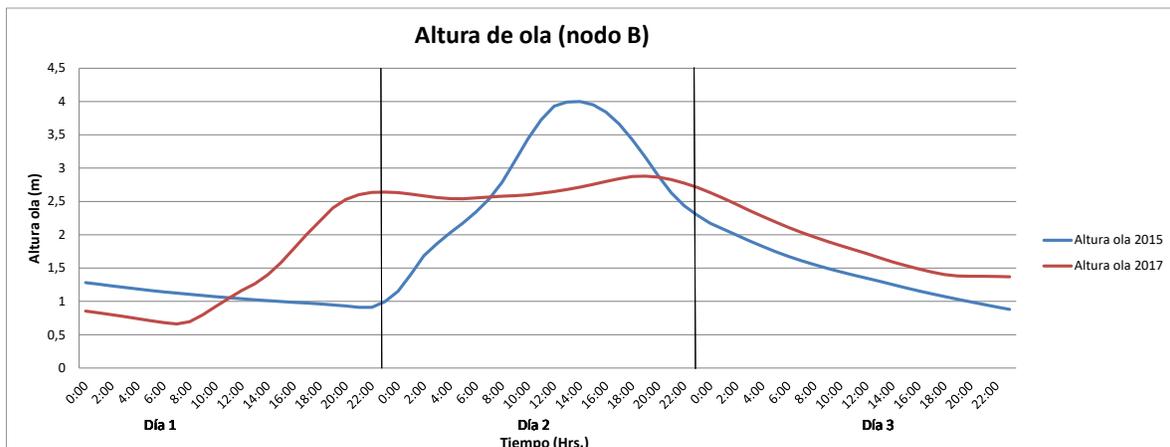


Figura N° 54: Altura ola Nodo B, temporal 2015 y 2017. Fuente: Elaboración Propia, en base a datos proporcionados por César Esparza, Escuela de Ingeniería Oceánica, UV (Comunicación personal).

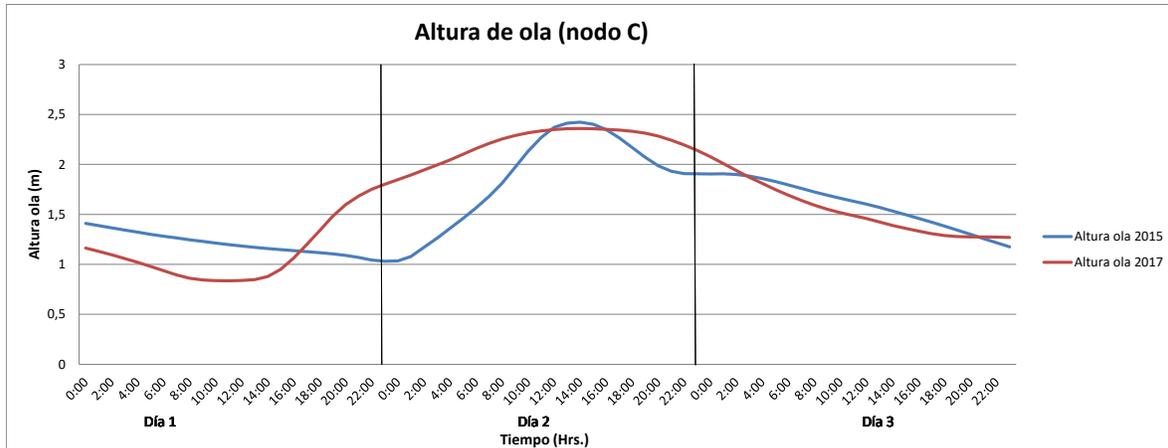


Figura N° 55: Altura ola Nodo C, temporal 2015 y 2017. **Fuente:** Elaboración Propia, en base a datos proporcionados por César Esparza, Escuela de Ingeniería Oceánica, UV (Comunicación personal).

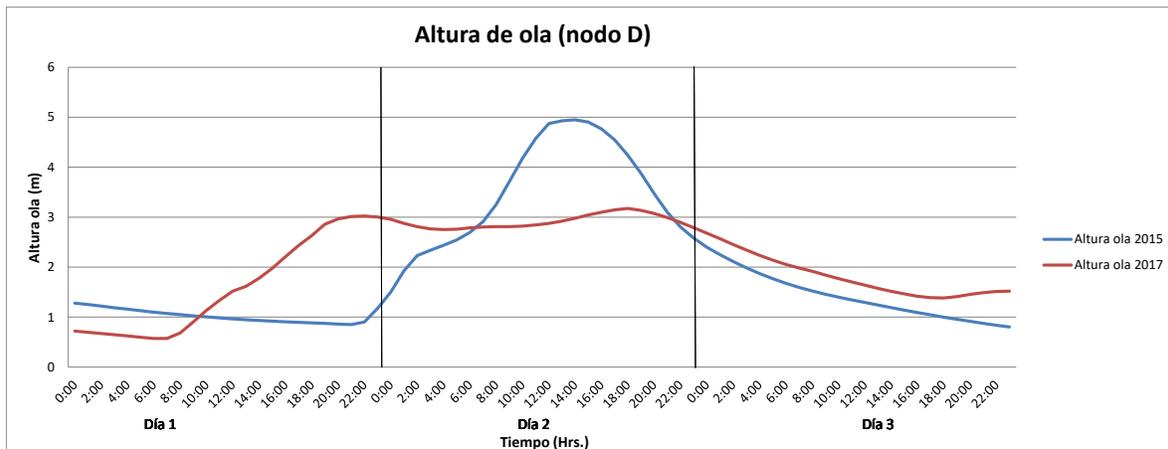


Figura N° 56: Altura ola Nodo D, temporal 2015 y 2017. **Fuente:** Elaboración Propia, en base a datos proporcionados por César Esparza, Escuela de Ingeniería Oceánica, UV (Comunicación personal).

Altura marea astronómica

El año 2017, según el jefe del Centro Meteorológico Marítimo de la Armada, teniente Felipe Rifo (Cooperativa, 2017. Consultado el 28 de septiembre de 2021), el 23 de junio a las 11 hrs. Se produjo la alineación de la Tierra con el Sol y la Luna, generándose así una marea de sicigia, teniendo de esta forma la pleamar más alta del mes en la región de Valparaíso.

Según el sitio tablademareas.com, el coeficiente de mareas (definido en el mismo portal como la amplitud de la marea de acuerdo a la diferencia entre las consecutivas pleamares y bajamares de un lugar), para los días aquí analizados del temporal del 2017, tuvo valores de entre 82 y 101, donde para el día 25 de junio se registró un valor máximo de 98, considerado como muy alto (Fig. 58). Para el 8 de agosto del 2015 (Fig. 57), el mismo coeficiente tuvo un valor máximo de 52, teniendo con esto una diferencia de 46 en la amplitud de marea, comparado con el evento del 2017.

Al evaluar la altura de la marea astronómica (Fig. 59), es posible observar la diferencia entre la pleamar más alta de los dos años analizados, teniendo que para el temporal de 2017 los valores fueron superiores a los del 2015 en los tres días considerados; en la misma línea, la pleamar más baja del 2017 tiene un valor similar a la pleamar más alta del evento de 2015 (Fig. 59).

En términos numéricos, el 8 de agosto del 2015 tuvo sus dos pleamares con alturas de 1,43 m a las 8:00 Hrs y 1,13 m a las 21:00 Hrs; el 25 de junio del 2017 registro sus valores máximos de 1,36 m a las 2:00 Hrs y 1,84 m a las 15:00 Hrs.

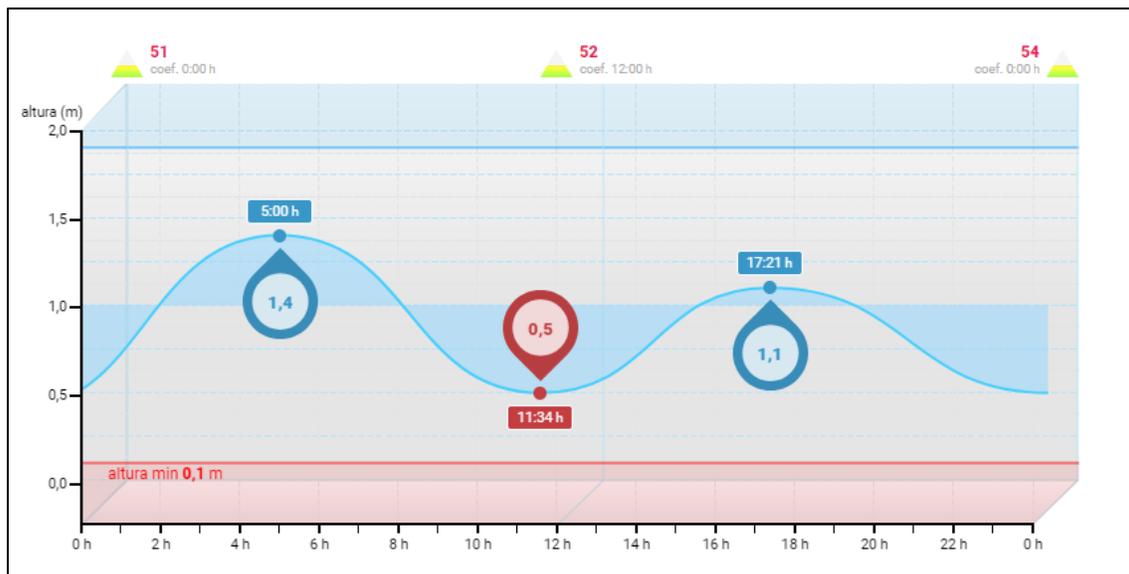


Figura N° 57: Coeficiente de marea 08 de agosto del 2015. **Fuente:** Tabla de Mareas. Consultado el 26 de septiembre de 2021.

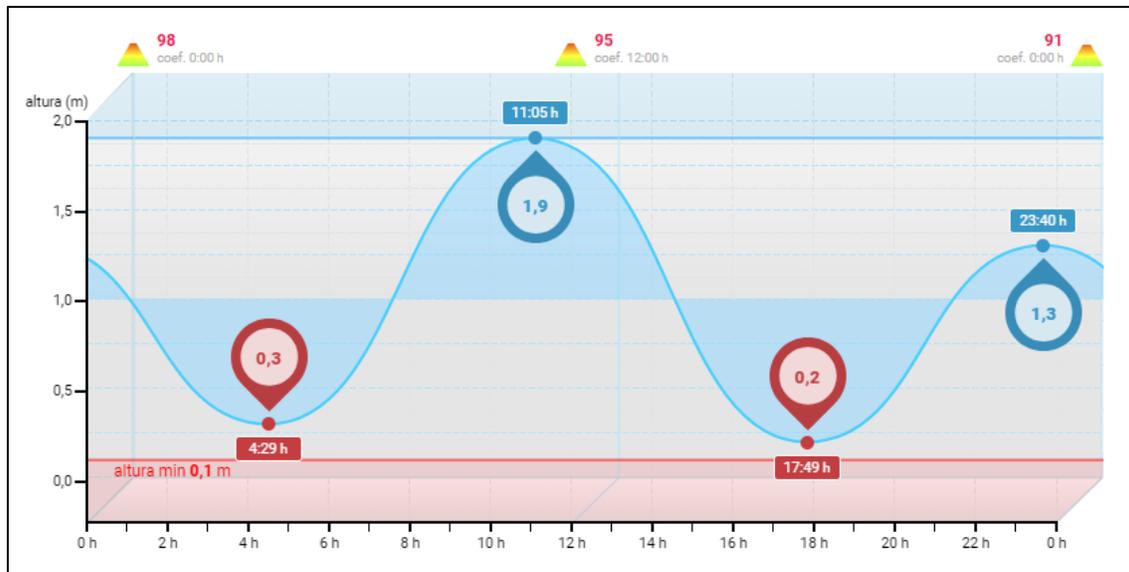


Figura N° 58: Coeficiente de marea 25 de junio del 2017. Fuente Tabla de Mareas. Consultado el 26 de septiembre de 2021.

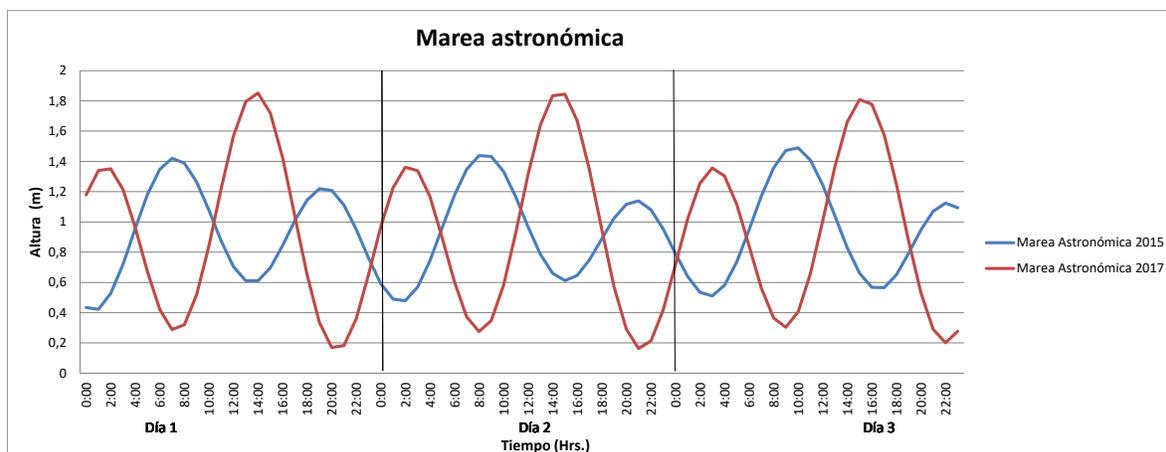


Figura N° 59: Marea Astronómica, temporales agosto 2015 y junio 2017. Fuente: Elaboración Propia, en base a datos proporcionados por César Esparza, Escuela de Ingeniería Oceánica, UV (Comunicación personal).

Altura marea meteorológica

La Fig. 60, muestra altas oscilaciones de carácter irregular con diversos peaks durante los tres días de evaluación de cada evento extremo. Para el 8 de agosto de 2015, el mayor valor de altura de marea fue de 0,25 m a las 10:00 hrs, mientras que para el 25 de junio de 2017 el valor máximo de altura fue de 0,21 a las 16:00 hrs.

En términos generales, el 8 de agosto de 2015 se caracterizó por tener alturas de marea entre 0,15 m y 0,25 m entre las 00:00 y las 14:00 (Fig. 60); situación distinta a la del 25 de junio de 2017, cuya amplitud de marea meteorológica estuvo entre los 0,09 m y los 0,21 m,

con una mayor variabilidad de alturas respecto al segundo día del 2017 para el mismo rango horario (Fig. 60).

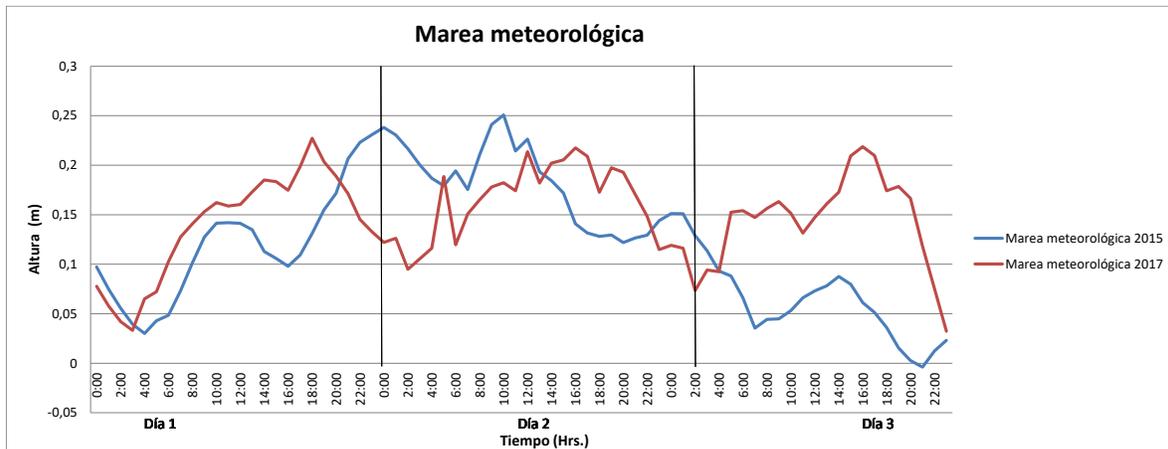


Figura N° 60: Marea meteorológica, temporales agosto 2015 y junio 2017. **Fuente:** Elaboración propia, en base a datos proporcionados por la Escuela de Ingeniería Oceánica, UV.

Altura nivel del mar observado

La Fig. 61 da cuenta de la diferencia de los peaks de altura del nivel del mar observado registrados durante los tres días de cada temporal, donde el 2017 supera en este sentido al 2015 en todo el periodo evaluado.

Los dos peaks del 8 de agosto de 2015 son de 1,67 m a las 9:00 Hrs y de 1,26 m a las 21:00 hrs, valores que no coinciden con el horario en que se registraron las mayores alturas de ola en los 4 nodos analizados (ente las 13:00 y 14:00 Hrs) (Fig. 61). Los valores máximos de altura del 25 de junio de 2017 se registraron a las 2:00 Hrs, con 1,45 m, y a las 15:00 Hrs con 2,05 m (Fig. 61).

Las Fig. 62 y Fig. 63 grafican las alturas del nivel observado del mar y de la ola en el nodo B, para el 8 de agosto de 2015 y para el 25 de junio de 2017 respectivamente.

En el gráfico correspondiente al año 2015 (Fig. 62), se observa que hay una relación inversa entre la altura de la ola y el nivel del mar a partir de las 11:00 Hrs, ya que en la medida que la altura de la ola se va acercando al peak (registrado a las 14:00 Hrs), el del nivel del mar va disminuyendo su valor hasta llegar al mínimo a las 15:00 Hrs. Por otra parte, en el año 2017 (Fig. 63), el valor de la altura de la ola se mantiene relativamente constante, entre los 2,5 m y los 2,9 m, por lo que el aumento del nivel del mar entre las 8:00 hrs. y las 14:00 hrs. coincidió siempre con valores de altura del oleaje dentro de este rango.



Figura N° 61: Nivel del mar observado, temporales agosto 2015 y junio 2017. **Fuente:** Elaboración propia, en base a datos proporcionados por César Esparza, Escuela de Ingeniería Oceánica, UV (Comunicación personal).

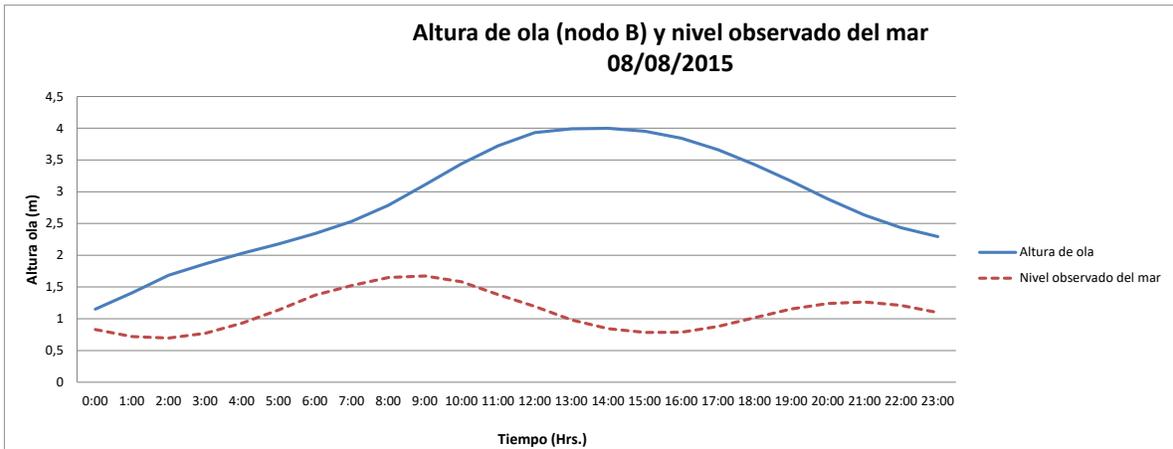


Figura N° 62: Relación altura de ola (nodo B) - nivel observado del mar, 08 de agosto del 2015. **Fuente:** Elaboración propia, en base a datos proporcionados por César Esparza, Escuela de Ingeniería Oceánica, UV (Comunicación personal).

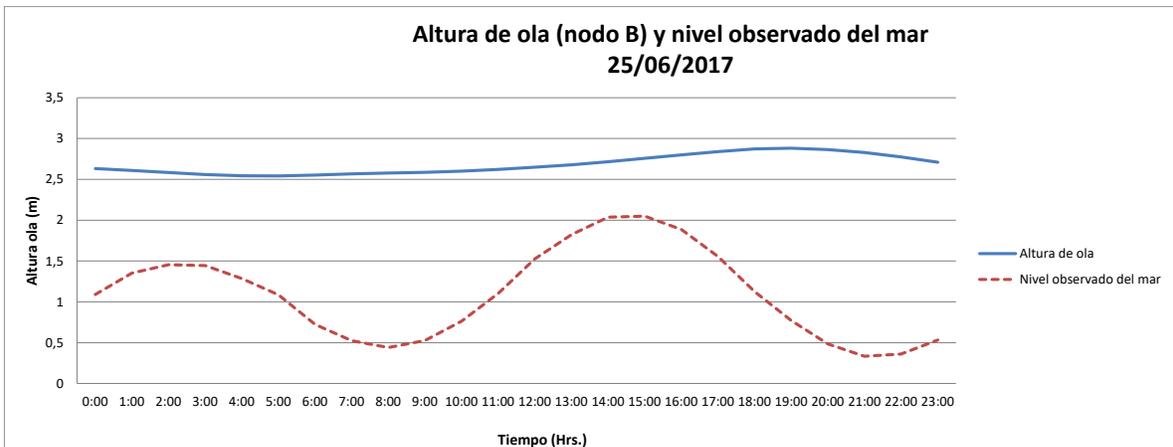


Figura N° 63: Relación altura de ola (nodo B) - nivel observado del mar, 25 de agosto del 2017. **Fuente:** Elaboración propia, en base a datos proporcionados por César Esparza, Escuela de Ingeniería Oceánica, UV (Comunicación personal).

Propagación del oleaje

La Fig. 64 es un modelo de propagación de olas generadas en aguas profundas provenientes del noroeste y con un periodo de 12 s (proporcionado por César Esparza, de la Escuela de Ingeniería Oceánica, UV, en comunicación personal). Este modelo se asocia directamente a la altura y dirección del oleaje, evaluada anteriormente en los cuatro nodos dentro de la bahía de Quintero para los temporales de 2015 y 2017. Los colores (Fig. 64), indican el coeficiente de agitación (K_a), valor con el cual se calcula la altura del oleaje en aguas someras; a mayor K_a , mayor altura del oleaje.

Al observar el litoral de la bahía de Quintero, es posible notar que los colores asociados a los valores más altos del coeficiente de agitación se encuentran en la zona central de la bahía, frente a la cual se ubica el nodo B mencionado en el apartado de altura del oleaje (Fig. 64).

Esto, debido a que el oleaje de altura significativa proveniente del noroeste llega directamente al centro de la bahía, a diferencia de los extremos junto a las zonas de Ventana y Quintero, las que se encuentran protegidas por los promontorios rocosos de Punta Ventanilla por el norte y la península de Los Molles por el sur.

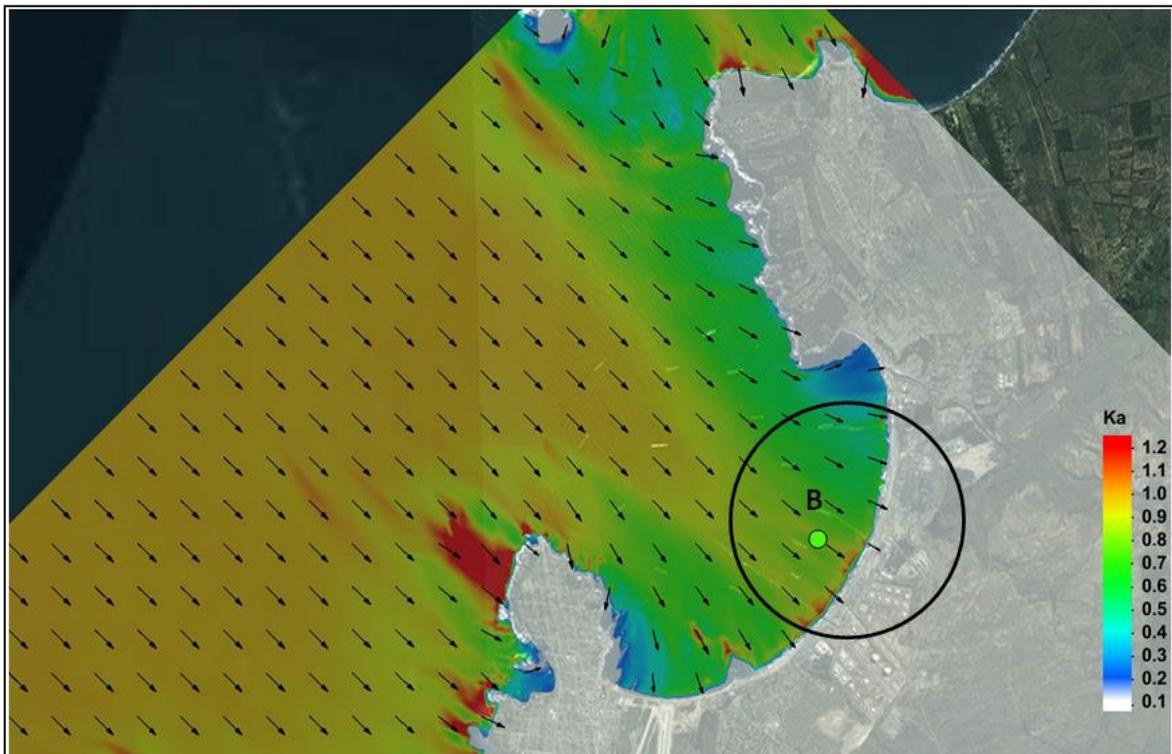


Figura N° 64: Modelo propagación del oleaje y distribución de valores de Coef. de agitación, Bahía Quintero.
Fuente: César Esparza, Escuela de Ingeniería Oceánica, UV (Comunicación personal).

5. RESULTADOS

5.1. Identificación estado erosión/acreción de la playa

Los resultados tanto para DLC como para TEC son expuestos en este sub-capítulo mediante promedios calculados entre las unidades de evaluación agrupadas por zona: Ventana, Industrial Norte, Industrial Centro, Industrial Sur, Loncura, Quintero. Además, los promedios son agrupados en tablas de acuerdo a la estación del año del mes en que fue registrada la imagen Google Earth con la que se obtuvo la posición de la línea litoral correspondiente. Los resultados por cada unidad de evaluación, se encuentran en Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6 y Anexo 7.

5.1.1. Desplazamiento línea de costa

El valor de DLC da cuenta del desplazamiento total, en metros, de la línea litoral comparado con la posición de esta en el año 2004.

Para primavera-verano (Tabla 5), el promedio más alto de retroceso calculado fue para Quintero, con -16,23 m para los siete periodos analizados, con un retroceso promedio máximo de -27,15 m en marzo de 2019. El segundo mayor promedio lo registró Ventana, con -15,29 m, y un máximo retroceso de -34,64 m para marzo de 2019 (Tabla 5).

	DLC PRIMAVERA-VERANO (m)							PROMEDIO POR ZONA
	2004- mar 2010	2004-feb 2011	2004-dic 2012	2004-mar 2015	2004-ene 2017	2004-mar 2018	2004-mar 2019	
Ventana	-3,69	-13,92	-11,02	-7,35	-7,42	-29,00	-34,64	-15,29
Industrial Norte	12,24	-6,42	0,06	15,21	5,01	-12,43	-18,43	-0,68
Industrial Centro	0,85	-11,33	-12,94	-4,36	-7,78	-24,27	-28,41	-12,60
Industrial Sur	0,88	-13,17	-14,13	-6,98	-1,43	-16,44	-22,84	-10,59
Loncura	8,57	-14,84	-15,75	-6,77	4,32	-15,78	-12,34	-7,51
Quintero	-6,19	-15,45	-15,01	-9,93	-15,17	-24,67	-27,15	-16,23
PROMEDIO POR PERIODO	2,11	-12,52	-11,47	-3,36	-3,75	-20,43	-23,97	

Tabla N° 5: Promedios de DLC por zona, para las fechas del periodo primavera-verano. **Fuente:** Elaboración Propia.

A nivel de Bahía, respecto a los promedios por periodo, solo para marzo de 2010 hubo acreción, la que alcanzó 2,11 m. El máximo promedio de erosión por periodo fue el de marzo de 2019, con un retroceso de la línea litoral de -23,97 m. La tendencia de la línea litoral de acuerdo a todos los promedios de los periodos de primavera y verano (Fig. 65), indica retroceso progresivo. Este resultado es importante a considerar ya que es en primavera y verano cuando se reduce la cantidad de eventos meteorológicos que generan oleaje y nivel del mar con alturas mayores al promedio, siendo los meses del año donde las playas teóricamente recuperan parte importante del sedimento perdido en invierno.

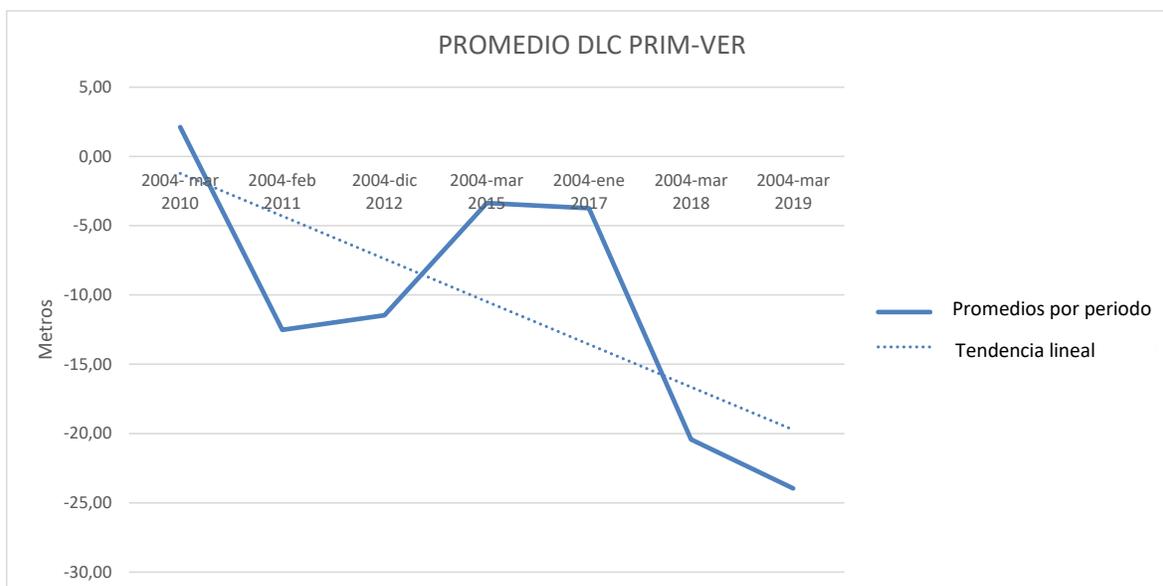


Figura N° 65: Gráfico promedios DLC primavera-verano, por periodo. **Fuente:** Elaboración Propia.

Respecto a DLC otoño-invierno (Tabla 6), el valor promedio más alto por zona fue calculado para Industrial Centro, con -29,1 m, siendo casi el doble del promedio por zona más alto de DLC primavera-verano. El segundo promedio más alto corresponde a la zona Industrial Sur, con -26,17 m (Tabla 6). No obstante, de los últimos tres periodos, Ventana alcanzó dos de los promedios más altos en septiembre de 2017 y abril de 2020, y el segundo promedio más alto en agosto de 2018. Siendo esto último una posible razón para la exigua diferencia (1,13 m) de promedios por zona entre Ventana e Industrial sur (Tabla 6).

	DLC OTOÑO-INVIERNO (m)										PROMEDIO POR ZONA
	2004-abr 2007	2004-jul 2013	2004-jul 2014	2004-ago 2015	2004-sep 2015	2004-abr 2016	2004-ago 2017	2004-sep 2017	2004-ago 2018	2004-abr 2020	
Ventana	-8,90	-22,35	-26,09	-42,30	-3,95	-11,10	-28,67	-38,84	-36,85	-31,32	-25,04
Industrial Norte	-7,80	-16,19	-10,87	-27,13	-5,19	4,90	-21,21	-29,64	-33,29	-18,30	-16,47
Industrial Centro	-7,79	-28,82	-23,47	-40,42	-31,79	-25,43	-33,37	-37,35	-37,03	-25,50	-29,10
Industrial Sur	6,41	-26,63	-24,35	-46,14	-30,21	-23,59	-29,88	-33,91	-29,40	-24,04	-26,17
Loncura	-0,95	-23,53	-29,93	-40,02	-22,41	-7,56	-26,61	-32,32	-31,22	-20,52	-23,51
Quintero	0,90	-18,65	-27,82	-38,53	-22,49	-21,59	-27,59	-32,26	-28,52	-20,42	-23,70
PROMEDIO POR PERIODO	-3,02	-22,70	-23,76	-39,09	-19,34	-14,06	-27,89	-34,05	-32,72	-23,35	

Tabla N° 6: Promedios de DLC por zona, para las fechas del periodo otoño-invierno. **Fuente:** Elaboración Propia.

A nivel de bahía, el promedio más alto se registró en agosto de 2015, con -39,09 m, seguido de septiembre de 2017, con -34,05 m (Tabla 6). El promedio más alto se relaciona con el evento extremo del día 8 de agosto de 2015, donde doce de las veintisiete unidades de evaluación tuvieron retrocesos por sobre los -40 m (Anexo 5), solo cinco tuvieron retrocesos menores a -30 m, y en donde el desplazamiento más alto fue de -76 m en la última unidad de evaluación del extremo sur (Quintero 5), lugar donde la playa arenosa desapareció completamente (Fig. 66).



Figura N° 66: Comparación de superficie de playa El Manzano del año 2004 (polígono azul), versus superficie del 30 de agosto del 2015 (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth.

La tendencia de los promedios de DLC otoño-invierno, al igual que para primavera-verano, sugiere retroceso progresivo (Fig. 67); esto se evidencia, por ejemplo, al comparar los mismos meses para distintos años. En abril de 2007 el retroceso en promedio fue de -3,02 m; en abril de 2016 fue de -14,06; y en abril de 2020, el desplazamiento fue de -23,35. Lo mismo ocurre al comparar cualquiera de las fechas restantes entre los mismos meses donde, a excepción de agosto de 2015, la más reciente tiene un retroceso mayor al anterior.

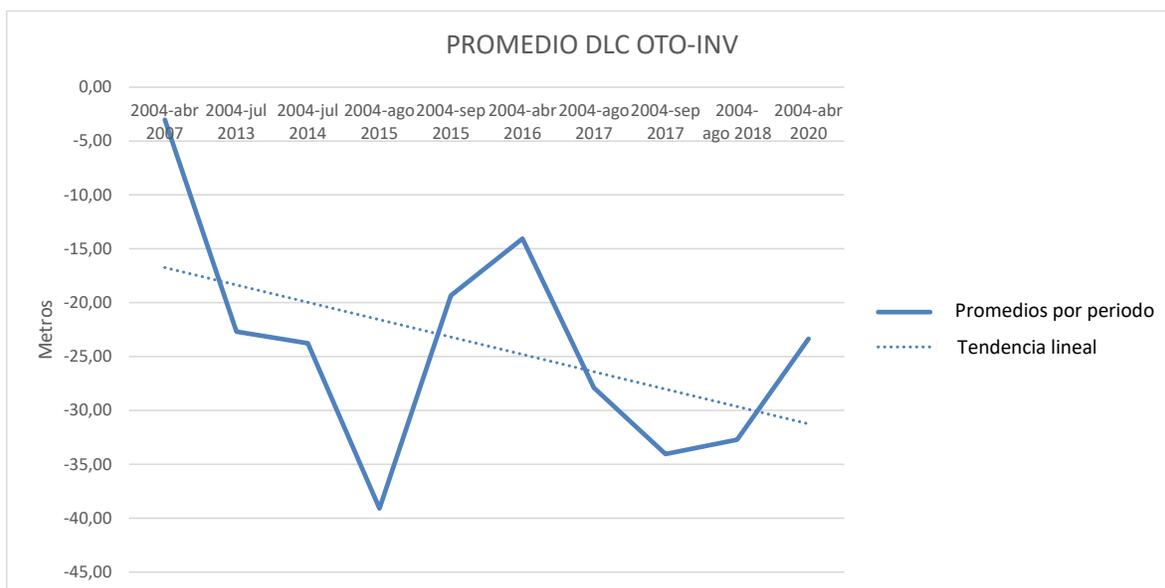


Figura N° 67: Gráfico promedios DLC otoño-invierno, por periodo. **Fuente:** Elaboración Propia.

5.1.2. Tasa de Erosión Costera

Con el fin de evaluar el estado de la playa, se clasificaron los resultados de los promedios de la tasa de erosión costera por zona, de acuerdo a las categorías propuestas por Rangel-Buitrago et al., 2015 (en Martínez et al., 2018). Los 4 conceptos establecidos por los autores para determinar el estado de la playa, son alta erosión, erosión, estabilidad y acreción, cuya clasificación se realiza de acuerdo al valor de desplazamiento de la línea litoral en metros/año (Tabla 7).

ESTADO EROSIÓN/ACRECIÓN (m/año)			
Alta erosión	Erosión	Estabilidad	Acreción
$\geq (-) 1,5$	$(-)1,5$ a $(-) 0,2$	$(-) 0,2$ a $0,2$	$\geq 0,2$

Tabla N° 7: Clasificación del estado erosión/acreción, de acuerdo al desplazamiento de la línea litoral (m/año).
Fuente: Elaboración Propia, en base a Rangel-Buitrago et al., 2015, en Martínez et al., 2017.

Para los meses de primavera-verano (Tabla 8), el promedio más alto para TEC lo alcanzó Quintero, el cual de acuerdo al a categoría utilizada, esta zona se ha encontrado en estado de alta erosión (-1,54 m/año), desde marzo de 2010; la misma categoría la tuvo en cuatro de los siete periodos analizados (febrero de 2011, diciembre 2012, marzo 2018 y marzo de 2019,). El segundo promedio con mayor retroceso lo obtuvo Ventana, con -1,37 m/año (erosión), con tres periodos en alta erosión, siendo el último el de mayor retroceso alcanzado de todos los periodos y zonas analizados para TEC primavera-verano, con -2,31 m/año.

Llama la atención el promedio de Industrial Norte, la cual es la única zona en obtener la categoría de estabilidad, alcanzando la misma en tres periodos consecutivos (diciembre 2012, marzo 2015 y enero de 2017), y un periodo en acreción, en marzo de 2010. Independiente de lo anterior, de acuerdo al último promedio de marzo de 2019, Industrial Norte se encuentra en estado de erosión, con -1,23 m/año.

	TEC PRIMAVERA-VERANO (m/año)							PROMEDIO POR ZONA
	2004- mar 2010	2004-feb 2011	2004-dic 2012	2004-mar 2015	2004-ene 2017	2004-mar 2018	2004-mar 2019	
Ventana	-0,61	-1,99	-1,38	-0,67	-0,57	-2,07	-2,31	-1,37
Industrial Norte	2,04	-0,92	0,01	1,38	0,39	-0,89	-1,23	0,11
Industrial Centro	0,14	-1,62	-1,62	-0,40	-0,60	-1,73	-1,89	-1,10
Industrial Sur	0,15	-1,88	-1,77	-0,63	-0,11	-1,17	-1,52	-0,99
Loncura	1,43	-2,12	-1,97	-0,62	0,33	-1,13	-0,82	-0,70
Quintero	-1,03	-2,21	-1,88	-0,90	-1,17	-1,76	-1,81	-1,54
PROMEDIO POR PERIODO	0,35	-1,79	-1,43	-0,31	-0,29	-1,46	-1,60	

Tabla N° 8: Promedios de TEC por zona, para las fechas del periodo primavera-verano, con la clasificación del estado erosión/acreción establecido en la Tabla N°7. **Fuente:** Elaboración Propia.

El periodo de TEC primavera-verano de mayor retroceso es febrero 2011, con $-1,79$ m/año, es decir, en estado de alta erosión, categoría bajo la cual estuvieron todas las zonas en ese periodo, a excepción de Industrial norte. El segundo promedio por periodo fue identificado para marzo de 2019, en donde la bahía de Quintero también se encontraba en estado de alta erosión, con $-1,60$ m/año.

Al igual que en los promedios por zona, uno de los periodos la playa de la bahía de Quintero no estuvo en estado de erosión o alta erosión. Para marzo de 2010, la playa alcanzó un promedio de $0,35$ m/año (acreción), y en donde sólo los extremos norte y sur de la bahía (Ventana y Quintero), estuvieron en estado de erosión con $-0,61$ y $-1,3$ m/año respectivamente. En enero de 2017, si bien la playa se encontraba en estado de erosión, esta condición se cumple por una diferencia de $0,09$ m/año con el umbral de la condición de estabilidad; de hecho, Industrial norte e industrial sur se encuentran en estado de estabilidad, y Loncura en acreción. No obstante, al observar todos los promedios de TEC primavera-verano, se hace evidente que los estados de acreción y estabilidad son situaciones excepcionales, ya que en general los resultados muestran que la bahía se encuentra en un estado, al menos, de erosión constante.

De acuerdo a lo que se muestra en la Fig. 68, los promedios por periodo de TEC primavera-verano indican una tendencia al retroceso de la línea litoral. Este resultado considera en cierta medida la capacidad de recuperación de sedimento de la playa arenosa de la bahía de Quintero, la que, de acuerdo a lo que sugieren estos resultados, se está perdiendo.

Cabe destacar que al comparar solo los periodos correspondientes a marzo de los años 2010, 2015, 2018 y 2019, es posible notar que las fechas más recientes presentan una tasa de retroceso mayor a la anterior, evidencia que sugiere un retroceso progresivo en el periodo considerado, por un posible balance negativo.

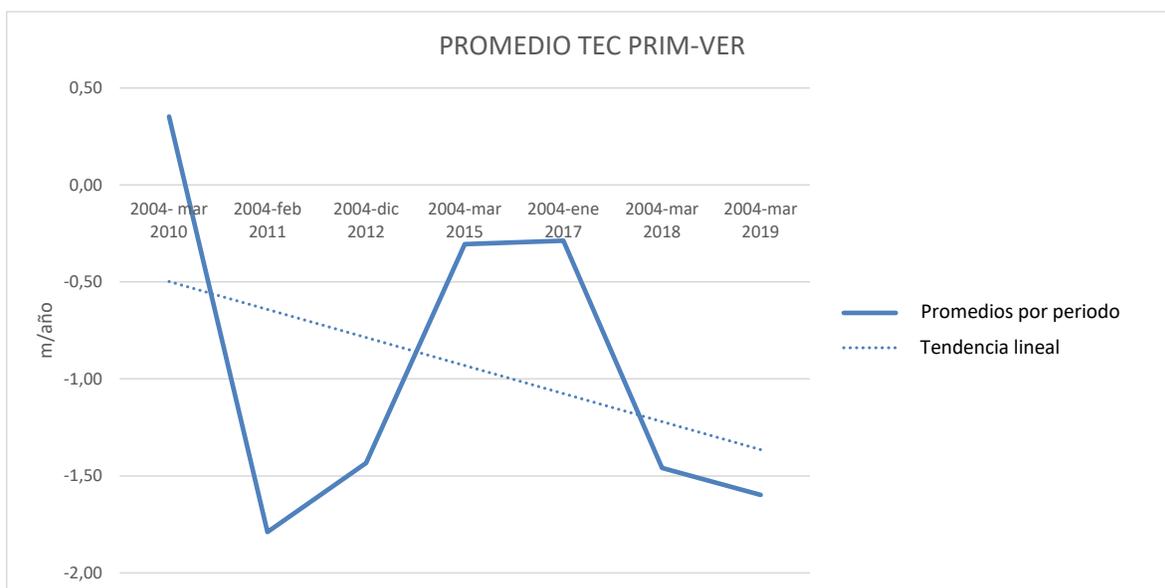


Figura N° 68: Gráfico promedios TEC primavera-verano, por periodo. **Fuente:** Elaboración Propia.

En cuanto a los resultados para TEC otoño-invierno, todas las zonas alcanzaron promedios que indican un estado de alta erosión. Industrial Centro fue la zona con mayor promedio de tasa de retroceso, -2,65 m/año, presentando un estado de alta erosión en los diez promedios. La segunda zona con mayor promedio fue Ventana con -2,30 m/año, con ocho de diez periodos bajo estado de alta erosión.

Industrial norte obtuvo el promedio por zona más bajo para en TEC otoño-invierno (-1,54 m/año), al igual que para primavera-verano, con poco más de 1 m/año de diferencia con la zona inmediatamente al sur, Industrial Centro, la cual presenta el promedio más alto de toda la bahía.

	TEC OTOÑO-INVIERNO (m/año)										PROMEDIO POR ZONA
	2004-abr 2007	2004-jul 2013	2004-jul 2014	2004-ago 2015	2004-sep 2015	2004-abr 2016	2004-ago 2017	2004-sep 2017	2004-ago 2018	2004-abr 2020	
Ventana	-2,97	-2,48	-2,61	-3,85	-0,36	-0,93	-2,21	-2,99	-2,63	-1,96	-2,30
Industrial Norte	-2,60	-1,80	-1,09	-2,47	-0,47	0,41	-1,63	-2,28	-2,38	-1,14	-1,54
Industrial Centro	-2,60	-3,20	-2,35	-3,67	-2,89	-2,12	-2,57	-2,87	-2,64	-1,59	-2,65
Industrial Sur	2,14	-2,96	-2,44	-4,19	-2,75	-1,97	-2,30	-2,61	-2,10	-1,50	-2,07
Loncura	-0,32	-2,61	-2,99	-3,64	-2,04	-0,63	-2,05	-2,49	-2,23	-1,28	-2,03
Quintero	0,30	-2,07	-2,78	-3,50	-2,04	-1,80	-2,12	-2,48	-2,04	-1,28	-1,98
PROMEDIO POR PERIODO	-1,01	-2,52	-2,38	-3,55	-1,76	-1,17	-2,15	-2,62	-2,34	-1,46	

Figura N° 69: Promedios de TEC por zona, para las fechas del periodo otoño-invierno, con la clasificación del estado erosión/acreción establecido en la Tabla N°7. **Fuente:** Elaboración Propia.

Respecto a los promedios por periodo, la tasa de mayor de retroceso es para agosto de 2015, con -3,55 m/año, mes en que se desarrolló el evento extremo de mayor energía del periodo analizado. Los tres periodos más bajos (2007, 2016 y 2020), corresponden a abril, mes que no se encuentra dentro del periodo de mayor frecuencia de tormentas de la temporada otoño-invierno (Beyá et al., 2016).

En el Fig. 70, a diferencia de los anteriores, la tendencia muestra estabilidad con una leve inclinación hacia la acreción, lo que se explica particularmente por la alta tasa de retroceso de agosto de 2015. Los promedios de abril de 2007, 2016 y 2020, son hasta cierto punto una muestra de la real tendencia de TEC Otoño-invierno, ya que para el mismo mes, los promedios han ido en aumento hacia el último periodo. De todas formas, los datos no son concluyentes, por lo que la tendencia acá expuesta es sólo una referencia.

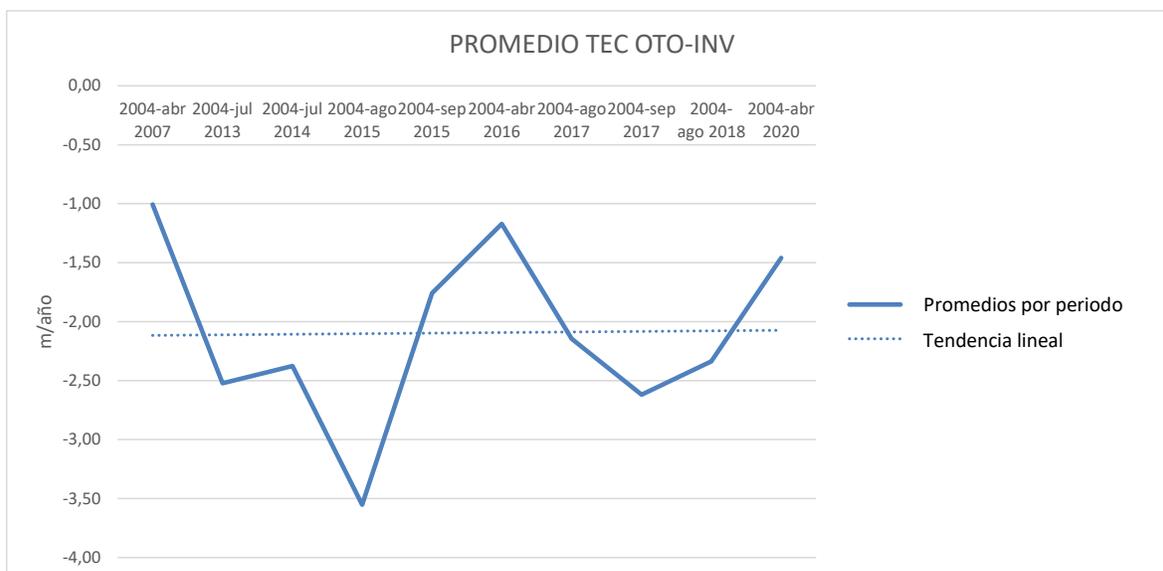


Figura N° 70: Gráfico promedios TEC otoño-invierno, por periodo. **Fuente:** Elaboración Propia.

La Tabla 9 muestra una proyección de la pérdida de superficie de playa en porcentaje a cinco y diez años plazo, considerando TEC 2004-2020 (considerando las tasas de los periodos primavera-verano y otoño invierno), y el ancho promedio de la playa arenosa según la imagen Google Earth de abril de 2020 aquí analizada.

Los resultados muestran que la zona más afectada sería Ventana, con una pérdida en diez años del 100% de superficie en dos de sus unidades de evaluación (1 y 2); mismo resultado que ha sido proyectado para la unidad Industrial 10. Estas tres áreas de evaluación perderían más de un 50% de playa en cinco años, coincidiendo además en ser las unidades con menor ancho promedio hasta abril de 2020 (menores a 20 m), y las de mayor TEC 2004-2020 (mayores a 2 m/año). Esto tendría como consecuencia secciones de la playa con menos de 10 m de ancho en cinco años, lo que puede desencadenar problemas significativos para, por ejemplo, el desarrollo de actividades humanas como las de la caleta de Ventana, ubicada en la unidad Ventana 1 en el extremo norte de la bahía.

Otras unidades con pérdidas significativas de superficie de playa son Industrial 4, 5, 7, 8 y 9; todas ubicadas en la zona centro norte de la bahía. Cada una, de acuerdo a la presente proyección, disminuirían su superficie en más de un tercio dentro de los cinco primeros años considerados (entre 35,72% y 42,54%), teniendo de esta forma una disminución de más de dos tercios del ancho de playa en diez años plazo a contar del 2020.

Teniendo en cuenta lo anterior, de cumplirse la proyección a diez años, en 0,90 km de la bahía se perdería un 100% de superficie de playa; en otros 1,50 km se reduciría su ancho en más de dos tercios (sobre 71,45%); sumado a las cinco unidades que tendrían pérdidas entre 51,13% y 60,00%, 3,9 km de la playa arenosa de la bahía de Quintero (un 50,00% de su extensión total), disminuiría en más de la mitad su ancho promedio.

Por otra parte, la unidad Industrial 3 es la de menor pérdida de superficie proyectada, con 11,90% y 23,80% a cinco y diez años respectivamente; situación que contrasta con la unidad inmediatamente al sur, Industrial 4, la que con un 85,00% de pérdida proyectada a diez años se encuentra en el cuarto lugar de las unidades más afectadas. La segunda unidad de evaluación con menor pérdida es Quintero 5 en el extremo sur de la bahía, con una reducción de su ancho de 13,25% en cinco años y 26,50% en diez años. En otras dos unidades de evaluación se estima una pérdida de ancho de playa menor a un tercio en la proyección a diez años, Industrial 2 y Loncura 2, con 32,13% y 30,22% respectivamente.

		Ancho promedio de playa abril 2020 (m)	TEC 2004-2020 (m/año)	Perdida de superficie en 5 años (%)	Perdida de superficie en 10 años (%)	PROMEDIO 5 AÑOS (%)	PROMEDIO 10 AÑOS (%)	
VENTANA	1	19,16	-2,12	55,41	100,00	46,88	86,67	
	2	18,07	-2,00	55,23	100,00			
	3	29,23	-1,75	30,00	60,00			
INDUSTRIAL	Norte	1	35,39	-1,19	16,86	33,71	21,84	43,68
		2	29,04	-0,93	16,07	32,13		
		3	28,74	-0,68	11,90	23,80		
		4	20,72	-1,76	42,54	85,08		
	Centro	5	23,09	-1,67	36,23	72,47	34,44	68,87
		6	27,07	-1,38	25,56	51,13		
		7	21,62	-1,55	35,72	71,45		
		8	22,88	-1,67	36,50	72,99		
		9	22,24	-1,70	38,17	76,34		
	Sur	10	19,33	-2,10	54,34	100,00	28,84	55,95
		11	29,86	-1,51	25,25	50,50		
		12	30,58	-1,44	23,56	47,12		
		13	28,12	-1,35	24,07	48,14		
		14	32,63	-1,11	16,99	33,98		
LONCURA	1	26,21	-1,24	23,68	47,36	19,08	38,15	
	2	35,97	-1,09	15,11	30,22			
	3	38,37	-1,50	19,53	39,07			
	4	34,38	-1,39	20,26	40,51			
	5	35,48	-1,19	16,80	33,60			
QUINTERO	1	30,07	-1,47	24,39	48,78	23,23	46,47	
	2	28,93	-1,49	25,80	51,61			
	3	25,05	-1,48	29,49	58,98			
	4	-	-	-	-			
	5	44,56	-1,18	13,25	26,50			

Tabla N° 9: Proyección (%), de pérdida de superficie de playa arenosa a cinco y diez años, en base a ancho promedio de playa abril 2020 y TEC 2004-2020 (Quintero 4 no tiene superficie de playa para evaluar). **Fuente:** Elaboración Propia.

En general, en cuanto a la proyección de pérdida del ancho promedio de la playa arenosa del área de estudio a diez años, hay cuatro unidades de evaluación con una disminución menor a un tercio del total (hasta 33,32%); catorce unidades con pérdidas de menos de dos tercios (entre 33,33% y 66,65%); y ocho con reducción de su ancho mayores a dos tercios (mayores a 66,66%). La Fig. 71 muestra la tendencia lineal de la proyección a 10 años, dato que sugiere que en promedio la pérdida de playa arenosa se reduce hacia la parte sur de

la bahía, identificando un quiebre entre las unidades Industrial 10 y 11, donde a partir de esta última no hay porcentajes de pérdida superiores a 60,00%, situación que sí ocurre al norte de Industrial 10.

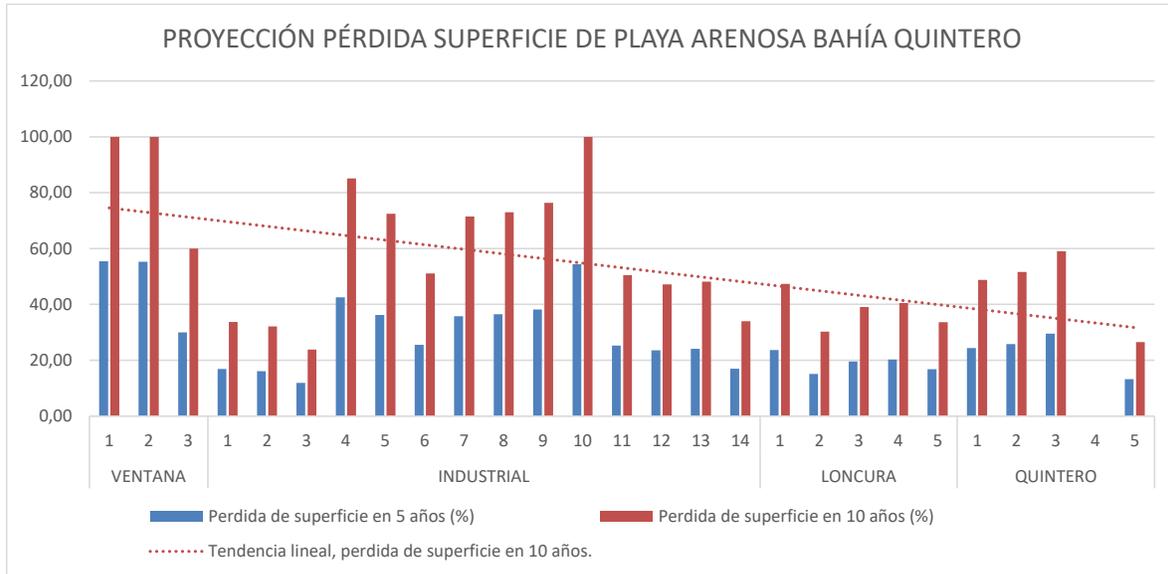


Figura N° 71: Gráfico con tendencias de pérdida de superficie (%), a cinco y diez años. **Fuente:** Elaboración propia.

5.2. Identificación de parámetros clave que influyen en el estado de la playa arenosa

Para la elección de variables y sub-índices, se utilizaron dos criterios:

- 1.- Aquellas que efectivamente hayan sido utilizadas por al menos un autor en el cálculo de CVI, u otro índice de similares características, para evaluar la vulnerabilidad de la costa.
- 2.- Que existan datos disponibles para el área de estudio, a la escala en que será evaluado CVI en el presente trabajo.

De acuerdo a estos criterios, se escogieron tres variables y doce sub-índices, los cuales se encuentran mencionados en la Tabla 10, junto a la bibliografía de referencia y a la fuente del dato que se utilizó en este trabajo.

VARIABLES CLAVE PARA LA EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD FÍSICA ANTE LA EROSIÓN DE LA PLAYA ARENOSA DE LA BAHÍA QUINTERO			
VARIABLE	SUB-ÍNDICE	BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA	FUENTE DEL DATO
Procesos dinámicos	Diferencia entre altura de olas modales y de tormenta	McLaughlin & Cooper (2010)	Resta entre Hm0, en Beyá et al. (2016), y Hs 8 agosto 2015, en Winckler et al. (2017)
	Ángulo de incidencia del oleaje extremo	Sousa (2013), en de Andrade (2019)	Modelo de propagación Winckler et al. (2017)
	Frecuencia de tormentas	McLaughlin & Cooper (2010)	Frecuencia Hm0 (0,88 m) y Dm (NO), de Atlas de Oleaje, Beyá et al. (2016)
	Altura significativa de ola	Thieler & Hammar-Klose (2000) y Gornitz et al. (1991, 1994), en Djouder & Boutiba (2017); McLaughlin & Cooper, (2010); Özyurt & Ergin (2010); De serio et al. (2017); Martins et al. (2017); Serafim et al. (2019); Hazami et al. (2021).	Hm0 de Atlas de Oleaje, Beyá et al. (2016)
	Rango mareal	Thieler & Hammar-Klose (2000), en Djouder & Boutiba (2017); McLaughlin & Cooper (2010); Özyurt & Ergin (2010); De serio et al. (2017); Hazami et al. (2021).	Bibliografía Araya-Vergara (1982)
	Aumento del nivel del mar	Özyurt & Ergin (2010); De serio et al. (2017); Martins et al. (2017); Hazami et al. (2021).	Promedio elevación 1985-2005 CMIP5 (AR5), en MMA (2019)
Características de la costa	Orientación	McLaughlin & Cooper (2010); Martins et al. (2017).	Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM (http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/)
	Pendiente litoral arenoso	Özyurt & Ergin (2010); De serio et al. (2017); Serafim et al. (2019); Furlan et al. (2021); Hazami et al. (2021).	Topografía Google Earth Pro
	Elevación	McLaughlin & Cooper (2010); De serio et al. (2017); Serafim et al. (2019); Sekovski et al. (2020); Furlan et al. (2021); Hazami et al. (2021).	Topografía Google Earth Pro
	Ancho de la playa	Parthasarathy & Natesan (2014); Serafim et al. (2019).	Cálculo de área superficie de playa, en ARCGIS 10.3
	Tipo de línea litoral	McLaughlin & Cooper (2010); Özyurt & Ergin(2010); De Serio et al. (2017); Hazami et al. (2021).	Imágenes Google Earth Pro
Geo-indicador de erosión	Retroceso línea litoral	De Serio et al. (2017); Martins et al. (2017); Hazami et al. (2021).	Cálculo DLC y TEC (Rodríguez et al., 2010), en base a imágenes Google earth

Tabla N° 10: Variables y sub-índices escogidos para evaluar la vulnerabilidad física a la erosión en el litoral arenoso de la bahía de Quintero. **Fuente:** Elaboración propia.

5.3. Definición de un ranking de vulnerabilidad según cada parámetro clave

De acuerdo a Cutter et al. (2003), no todas las variables influyen con la misma importancia en la vulnerabilidad costera. Por lo tanto, con el objetivo de determinar un ranking que determine la influencia de cada sub-índice en la vulnerabilidad a la erosión del litoral arenoso de la bahía de Quintero, se realizó una revisión bibliográfica para tal fin. La revisión tuvo como objetivo caracterizar a cada sub-índice y la forma en que incide en la mecánica de la erosión en virtud de sus atributos.

5.3.1. Caracterización de sub-índices

5.3.1.1. *Diferencia entre altura de olas modales y de tormenta*

En la naturaleza, las playas arenosas existen en un continuum de estados, en donde el estado dominante (modal) depende del clima del oleaje y las características del sedimento (Gómez-Pujol et al., 2020).

Los cambios en los estados de la playa dependen de un conjunto de combinaciones particulares de la altura y periodo del oleaje, y de la dirección, duración y frecuencia de una tormenta; en general, una secuencia erosional de estados de la playa comienza con un estado de baja energía, y una vez que la altura del oleaje incrementa, pasa por un estado intermedio hasta llegar a un estado altamente disipativo (alta energía) (Gómez-Pujol et al., 2020).

Una gran diferencia entre olas modales y de tormenta indican un gran potencial de vulnerabilidad; si las variaciones de energía son grandes, la morfología de la playa tendrá que adaptarse a las nuevas condiciones dinámicas (cambio de estado de la playa), como ocurre con los cambios estacionales en el perfil topográfico (Mclaughlin & Cooper, 2010).

5.3.1.2. *Ángulo de incidencia del oleaje a la costa*

Entre las variables que determinan el tipo de respuesta morfológica de una playa a tormentas extremas se encuentran: la exposición a las olas de tormentas, el grado de protección de la playa y el ángulo de incidencia en que las olas llegan al litoral (Burvingt et al., 2017).

El ángulo de incidencia del oleaje es un indicador importante ya que define la respuesta de la playa a la acción del oleaje y por lo tanto su nivel de exposición (de Andrade et al., 2019). De esta forma, una playa es más vulnerable cuando el oleaje incide en un ángulo de 45° respecto a la línea litoral debido a que alcanza la máxima capacidad de transporte de sedimentos, contrario a las circunstancias en las que el oleaje llega a la costa en un ángulo de 90°, donde la capacidad de transporte es mínima (Komar, 1998, Longuet-Higgins, 1970, en de Andrade et al., 2019).

5.3.1.3. *Frecuencia de tormentas*

La frecuencia e intensidad de desastres naturales en la costa, junto con el aumento de la población, incrementa la vulnerabilidad, el riesgo y la pérdida (IPCC, 2014). Algunos de los efectos del cambio climático asociados a la erosión de ambientes costeros son la disminución del aporte de sedimentos, cambios en el nivel del mar y en el clima del oleaje, y la frecuencia de eventos extremos como tormentas y ciclones (Wong et al., 2014; Mase et al., 2015, en de Serio et al., 2017).

En los años recientes, la erosión costera se ha exacerbado por la ocurrencia de eventos extremos, cuya frecuencia e intensidad ha sido asociada con la variabilidad climática y el cambio ambiental global (Zhang et al., 2015, en Martínez et al., 2018).

La respuesta de la playa ante tormentas extremas es dependiente principalmente de su número e intensidad (Burvingt et al., 2017). Estudios recientes muestran que la erosión de una playa puede ser más intensiva debido a un clúster de tormentas que a una tormenta individual (Lee et al., 1998; Karunarathna et al., 2014; Senechal et al., 2015; Splinter et al., 2014, en Burvingt et al., 2017).

Una intensificación de las fases cálidas de ENSO podría incrementar la frecuencia e intensidad de las tormentas durante el siglo XXI, aumentando así la erosión y la inundación de zonas costeras muy pobladas a lo largo del océano pacífico. (Masselink et al., 2016, en Martínez et al., 2017).

5.3.1.4. *Altura significativa de la ola*

La altura de la ola es un parámetro importante en muchos aspectos de la evolución de la costa, especialmente considerando que la energía de la ola está directamente relacionada con su altura, por lo que un incremento de la altura de la ola implica un aumento de su energía y, por lo tanto, una mayor intensidad de los procesos costeros (Djouder & Boutiba, 2017). La capacidad de las olas para movilizar y transportar sedimentos costeros está directamente relacionado a su altura (USGS, 2001 en Djouder & Boutiba, 2017).

Las costas a las que arriban olas de grandes alturas son consideradas más vulnerables que aquellas expuestas a oleaje de baja altura, ya que en general la energía con que impactan en la costa es alta, habiendo una mayor cantidad de sedimento movilizado permanentemente (de Serio et al., 2017). La incidencia de oleaje de alta energía en la costa además genera un aumento del wave setup, provocando inundación a lo largo de la costa y una consecuente pérdida (parcial o total), de superficie subaérea de la playa (Gaki-Papanastassiou et al. 2010 en Djouder & Boutiba, 2017), incrementando la cantidad de sedimento bajo la columna de agua y, por lo tanto, su movilización hacia fuera del litoral arenoso o a otras secciones de este mediante, por ejemplo, el fenómeno de rotación de la playa (Do et al., 2020).

5.3.1.5. *Rango Mareal*

El rango mareal se refiere a la diferencia de altura entre la más alta marea astronómica y la más baja (Doukakis 2005; Diezetal.2007; Kumar et al. 2010, en Djouder & Boutiba, 2017).

El rango mareal es la variable que modera la influencia del viento, las olas y el nivel del mar exacerbado de una tormenta en áreas costeras (Mclaughlin et al., 2010). Las fluctuaciones mareales pueden causar inundaciones episódicas o permanentes, modificando algunos procesos físicos de la costa, tales como el incremento del área de acción del oleaje hacia el interior del continente (Djouder & Boutiba, 2017).

Los ambientes micromareales, con rangos menores a 1 m, son considerados de alta vulnerabilidad respecto a áreas macromareales, debido principalmente a la potencial influencia que tiene sobre una tormenta y esta, a la vez, sobre la evolución costera (Parthasarathy & Natesan, 2015).

La baja vulnerabilidad costera asociada a un alto rango mareal generalmente se encuentra relacionado con un área intermareal amplia, capaz de disipar la energía del oleaje (Mclaughlin et al., 2010). Además, existe una baja probabilidad de que en un ambiente macromareal, una condición de marea alta coincida con oleaje de alta energía, a diferencia de un ambiente micromareal donde esa probabilidad aumenta (Parthasarathy & Natesan, 2015).

5.3.1.6. *Aumento del nivel del mar*

Una de las principales consecuencias del cambio climático es la variación en el nivel del mar, el cual se estima que aumente entre 53 y 97 cm para el 2100 (IPCC, 2014, en de Serio et al., 2017). Su explicación se debe a dos factores principalmente, la expansión termal del océano y el derretimiento de glaciares y de hielos polares (Parthasarathy & Natesan, 2015).

Dentro de las consecuencias observadas debido al aumento del nivel del mar se encuentran: aceleración en la intrusión de salinidad a las aguas subterráneas continentales, aumento de las inundaciones, mareas meteorológicas y erosión del litoral (Hzami et al., 2021). Es por esta razón que la tasa en el aumento del nivel del mar debe ser considerada en cualquier estudio de vulnerabilidad de zonas costeras (Djouder & Boutiba, 2017).

Con respecto a la vulnerabilidad, mientras mayor sea la tasa de aumento del nivel del mar, más susceptible será la costa a cambios en su morfología (Djouder & Boutiba, 2017), y a la inundación permanente de las áreas afectadas (Parthasarathy & Natesan, 2015).

5.3.1.7. *Orientación de la costa*

La alta diversidad en la morfología de una playa se debe a variables dinámicas (oleajes, mareas) y estáticas (orientación línea litoral, geología, entre otros) (Scott et al., 2011, en Burvingt et al., 2017).

La orientación se asocia a la identificación de la exposición al oleaje de alta energía de una costa (Mclaughlin & Cooper, 2010). La trayectoria particular de una tormenta podría influir en la respuesta de la playa y/o duna en mayor o menor medida, de acuerdo al ángulo en como el oleaje incide en la línea litoral, condicionando de esta forma el transporte de sedimento a lo largo de la costa (Burvingt et al., 2017).

Para el caso, por ejemplo, del oleaje originado por ciclones extratropicales en que la marea meteorológica es reducida (menor a 0,7 m), es probable que el control principal de la respuesta morfológica sea el grado de exposición a la energía de las olas de tormenta (Harley et al., 2017).

5.3.1.8. *Pendiente*

La inundación y la erosión causada por el aumento del nivel del mar, y la respuesta morfodinámica del litoral, varía de acuerdo a las distintas características morfológicas del litoral, incluso en situaciones de igual amplitud mareal (Parise et al., 2009).

La pendiente es una variable cuantitativa de la costa que permite identificar el grado de vulnerabilidad de la costa a inundación marina, y que también es usada para determinar y situar la potencial tasa de retroceso de la línea litoral (Djouder & Boutiba, 2017).

Las áreas costeras con bajas pendientes (pendientes suaves) son consideradas como altamente vulnerables, ya que permiten una abundante penetración de agua de mar, mientras que aquellas con pendientes pronunciadas son asumidas como áreas de baja vulnerabilidad, siendo así más resistentes a la inundación debido al aumento del nivel del mar, como consecuencia, por ejemplo, de las mareas meteorológicas (De Serio et al., 2018).

La Erosión e inundaciones causadas por aguas oceánicas en costas de baja pendiente son principalmente causadas por altos niveles en el nivel del mar que superan a las mareas regulares, permitiendo con esto un mayor desplazamiento horizontal, llevando consecuentemente a una inundación más extensiva, ocurriendo lo contrario en playas con pendientes más pronunciadas (Parise et al., 2009).

5.3.1.9. *Elevación*

La elevación es una variable crucial para determinar la vulnerabilidad a la erosión inducida por el oleaje (Mclaughlin & Cooper, 2010), permitiendo además identificar las zonas de la costa más vulnerables a las inundaciones marinas, particularmente durante los eventos de tormenta (Djouder & Boutiba, 2017).

La elevación de la costa es definida como el promedio de la altura de un área sobre el nivel promedio del mar, por lo que superficies costeras con promedios altos son consideradas menos susceptibles a la inundación, mientras que elevaciones bajas son más vulnerables (de Serio et al., 2018), debido a que generalmente zonas de bajas elevaciones permiten a las olas alcanzar fácilmente la anteplaya (Mclaughlin & Cooper, 2010)

Hay estudios que estiman una mayor importancia a la pendiente de la costa que a la elevación, debido a que la primera involucra a la segunda; sin embargo, para dos extensiones costeras que tienen una misma pendiente, no tendrán la misma respuesta al aumento del nivel del mar si una tiene un promedio de elevación alta y la otra baja (Djouder & Boutiba, 2017).

5.3.1.10. *Ancho de la playa*

Es definido como la dimensión horizontal de la playa en estado normal, medida desde la línea litoral hasta la línea que marca donde llega el mayor nivel de agua hacia el interior de la superficie terrestre (Parthasarathy & Natesan, 2015).

El ancho de la playa podría variar a lo largo del tiempo, pudiendo ser usado para monitorear cambios debido a ajustes de la costa (Serafim et al., 2019).

Una playa ancha actúa como un área de influencia (buffer), disipando la energía del oleaje y sirviendo como una fuente de sedimentos para ser distribuidos a través de la zona costera

durante las tormentas, por lo que mientras más ancha sea la playa, mayor será la capacidad de disipar la energía del oleaje y reducir los impactos de eventos meteorológicos extremos (Davison-Arnott, 2010, en Bagdanavičiūtė et al., 2015). Por el contrario, aquellas costas que tienen un menor ancho de playa tienen una mayor probabilidad de ser más vulnerables (Serafim et al., 2019).

5.3.1.11. Tipo de línea litoral

La geomorfología costera se asocia a las formas y su evolución generadas por diferentes procesos marinos (de Serio et al., 2017). Los diferentes tipos de formas encontradas en una costa determinan e influyen considerablemente su reacción a nuevas condiciones marinas ambientales (Djouder & Boutiba, 2017).

El tipo de costa (geomorfología y materiales) expresa la relativa erodabilidad de un paisaje (Pendleton et al., 2005, en Parthasarathy & Natesan, 2015). La vulnerabilidad a la erosión de los litorales arenosos, como las playas, está relacionada con su configuración, y su dinámica, siendo influenciados por factores locales y regionales, además de su localización geográfica (Thieler and Hammar Klose, 1999, en Parthasarathy & Natesan, 2015).

Existen morfologías que tienen un cierto grado de resistencia a la erosión, como en el caso de los acantilados rocosos, formas muy resistentes y que tienen un menor grado de vulnerabilidad al aumento del nivel del mar, que aquellas estructuras compuestas por arenas u otro material no consolidado (de Serio et al., 2017). Tal es el caso de las playas compuestas de substratos erodables como la arena, caracterizadas por tener una alta vulnerabilidad debido a una mayor dinámica y fragilidad geomórfica (Parthasarathy & Natesan, 2015).

5.3.1.12. Retroceso de la línea litoral

Los cambios de la línea litoral son el resultado de los procesos costeros que dependen principalmente de las características del oleaje, la circulación del near shore, el transporte litoral y la forma de las playas (de Serio et al., 2018).

Entre los procesos naturales que han modelado la costa, la erosión de la línea litoral es el que más afecta a estas zonas, con un 70% de retroceso en playas arenosas y de gravas a nivel mundial, contra un 10% de acreción según algunas investigaciones (Djouder & Boutiba, 2017).

Las líneas de costa en acreción son consideradas menos vulnerables debido a que tienen la ventaja de la acumulación de sedimentos (de Serio et al., 2018). Por otra parte, las costas en estado de retroceso son más vulnerables debido a que no tienen sedimento necesario para recuperar pérdidas por erosión o inundación (Djouder & Boutiba, 2017).

5.3.2. Ranking de vulnerabilidad por sub-índice

La Tabla 11 presenta la escala de valores de vulnerabilidad por cada sub-índice, junto con la bibliografía de referencia con la cual se construyó el ranking de vulnerabilidad, y cuyos resultados por unidad de evaluación son expuestos en las Fig. 72, Fig. 73 y Fig. 74.

Respecto a los resultados de los niveles de vulnerabilidad de cada sub-índice, hay que mencionar que cuatro de los doce sub-índices son analizados a escala de bahía (frecuencia de tormentas, rango mareal, aumento del nivel del mar, y tipo de línea litoral), por lo que su valor de vulnerabilidad será igual para todas las unidades de evaluación.

En cuanto a los ocho sub-índices que fueron analizados con valores a escala de unidad de evaluación, llama la atención que solo dos tienen una alta variabilidad en cuanto a la diversidad de valores de vulnerabilidad y a la distribución de estos resultados a lo largo de la bahía. En el caso del sub-índice diferencia entre olas modales y de tormenta (Fig. 72 A), el nivel muy alto de vulnerabilidad se registra en la parte central de la bahía, disminuyendo la vulnerabilidad a bajo y muy bajo hacia los extremos norte y sur, respectivamente. Para el sub-índice orientación (Fig. 73 F), los niveles alto y muy alto de vulnerabilidad se encuentran en la zona centro y centro sur de la bahía, disminuyendo hasta el nivel muy bajo en los extremos norte y sur.

Entre los restantes seis sub-índices de los ocho evaluados a escala de unidad de evaluación, llaman la atención aquellos que mantienen un mismo nivel de vulnerabilidad para casi toda la bahía; tal es el caso de ángulo de incidencia del oleaje (Fig. 72 B), pendiente (Fig. 73 G), elevación (Fig. 73 H) y retroceso de la línea litoral (Fig. 74). El sub-índice ángulo de incidencia del oleaje (Fig. 72 B), presenta un nivel muy bajo de vulnerabilidad en veinticinco de las veintisiete unidades de evaluación, y con dos con un nivel moderado; en elevación (Fig. 73 H), solo tres unidades presentan alta vulnerabilidad, mientras que en las restantes veinticuatro el nivel es muy alto; en cuanto a retroceso de la línea litoral (Fig. 74), veintidós unidades registran un nivel alto de vulnerabilidad, mientras que dos muy alto y las otras tres un nivel moderado. Respecto al sub-índice pendiente (Fig. 73 G), veintiséis de veintisiete unidades de evaluación alcanzaron una vulnerabilidad moderada, registrando solo en la unidad Ventana 1 el nivel de vulnerabilidad baja; llama la atención que aun cuando los valores de pendiente sean variados a lo largo de la bahía, con una diferencia de poco más del doble entre la menor pendiente y la mayor, el nivel de vulnerabilidad el mismo para prácticamente toda la bahía (Fig. 73 G).

SUB ÍNDICE	UNIDAD	BIBLIOGRAFÍA REFERENCIA	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
			1	2	3	4	5
Pendiente	%	López et al. (2016), en Koroglu et al. (2019)	>12	>8 - 12	>4 - 8	>2 - 4	<2
Elevación	m.s.n.m.	Sekovski et al. 2019	>5,6	4,2 - 5,6	2,8 - 4,2	1,4 - 2,8	<1,4
Ancho de playa	m	Drejza et al. (2019)	>30,0	20,0 - 29,99	10,0 - 19,99	>10,0	sin playa
Orientación	°	Beyá et al. (2016) Atlas del oleaje/ Winckler et al. (2017)	<270	270 - 278	291 - 279	292 - 304	305 - 320
Tipo de línea litoral		Lopez et al. (2016), en Koroglu et al. (2019)	Acantilados rocosos o de material resistente a la erosión	Costa con terraplen	Acantilados sujetos a erosión, litorales vegetados	Dunas, estuarios y lagunas	Playas arenosas
Frecuencia de tormentas	%	McLaughlin & Cooper, (2010)	0 - <2,8	2,8 - <5,6	5,6 - <8,4	8,4 - <11,2	>11,2
Diferencia entre altura de olas modales y de tormenta	m	McLaughlin & Cooper, (2010)/Beyá et al. (2016) Atlas del oleaje	<0,88	0,88 - 1,5<	1,5 - 2,54<	2,54 - 3,0	>3,0
Retroceso línea litoral	m/año	Thieler and Hammar-Klose (2000), en Koroglu et al. (2019)	>2,0	1,0 - 2,0	<(-)1,0 - <(+)1,0	(-)1,0 - (-)2,0	>(-)2,0
Altura significativa de ola	m	Thieler and Hammar-Klose (2000) y Gornitz et al. (1991, 1994), en Djouder & Boutiba (2017)	<0,55	0,55-0,8<	0,8-1,05<	1,05-1,25	>1,25
Rango mareal	m	McLaughlin & Cooper, (2010)	>5,0	3,5 - 5,0	2,0 - <3,5	1,0 - <2	<1
Ángulo de incidencia del oleaje	°	Sousa (2013), en de Andrade (2019)	75-90 y 91-105		60-74 y 106 a 120		45-59 y 121 a 135
Aumento del nivel del mar	m/año	Gornitz (1991), en Koroglu et al. (2019)	< (-) 1,0	(-)1,0 - 0,9	>0,9 - 2,0	>2,0 - 4,0	> 4,0

Tabla N° 11: Ranking de vulnerabilidad según valores de cada sub-índice. **Fuente:** Elaboración propia, en base a Saaty, 2001 (en Hzami et al., 2021).

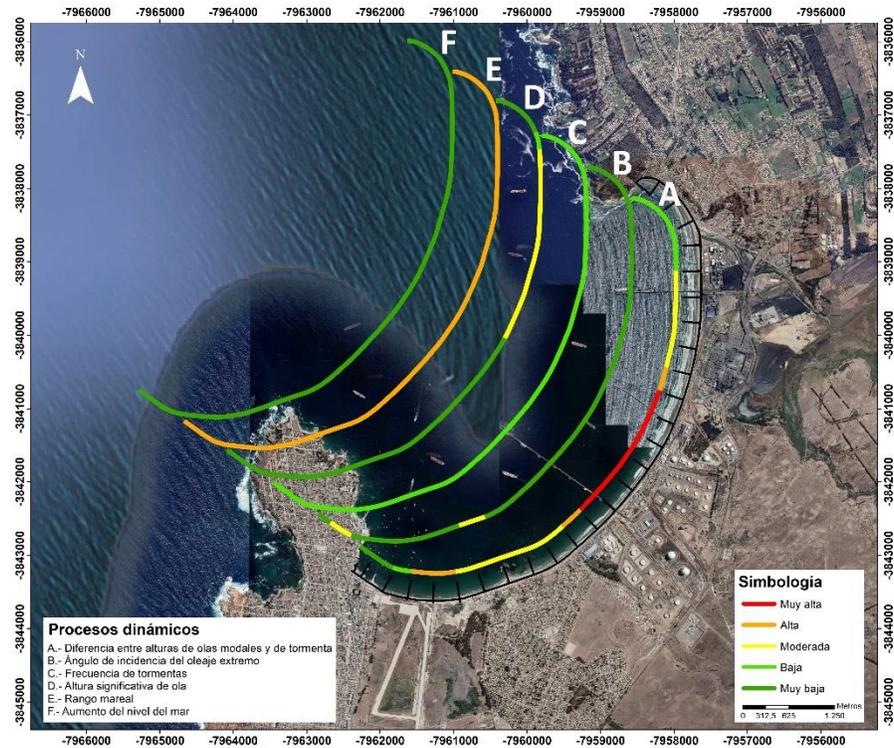


Figura N° 72: Cartografía que ilustra la vulnerabilidad a la erosión del litoral arenoso de la bahía de Quintero de los sub-índices correspondientes a la variable procesos dinámicos (Datum: WGS 1984; huso: 19 S).
Fuente: Elaboración propia, en base a imagen Google Earth.

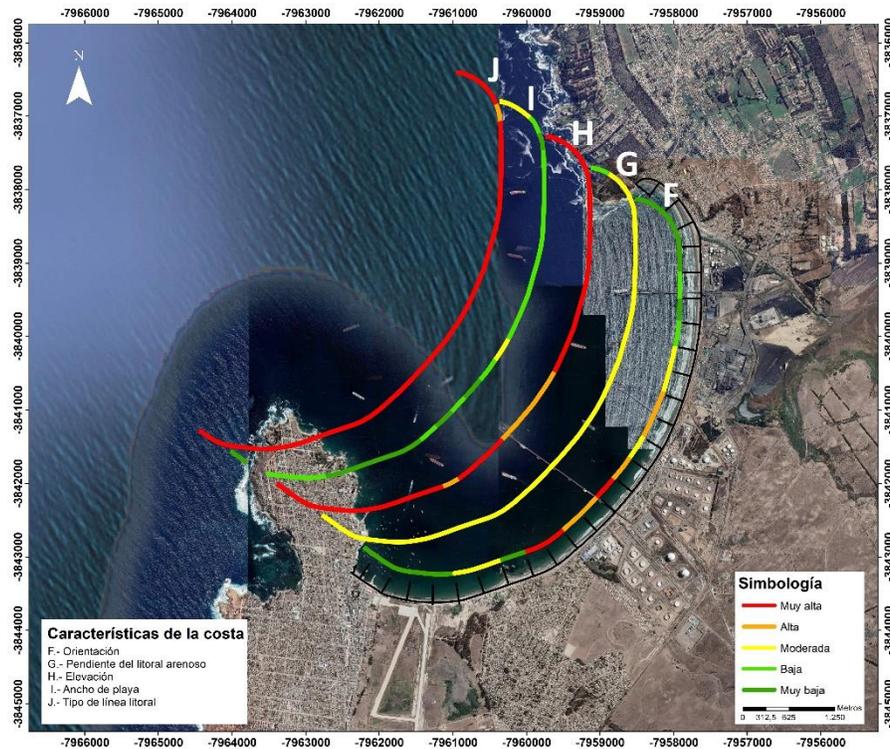


Figura N° 73: Cartografía que ilustra la vulnerabilidad a la erosión del litoral arenoso de la bahía de Quintero de los sub-índices correspondientes a la variable características de la costa (Datum: WGS 1984; huso: 19 S).
Fuente: Elaboración propia, en base a imagen Google Earth.

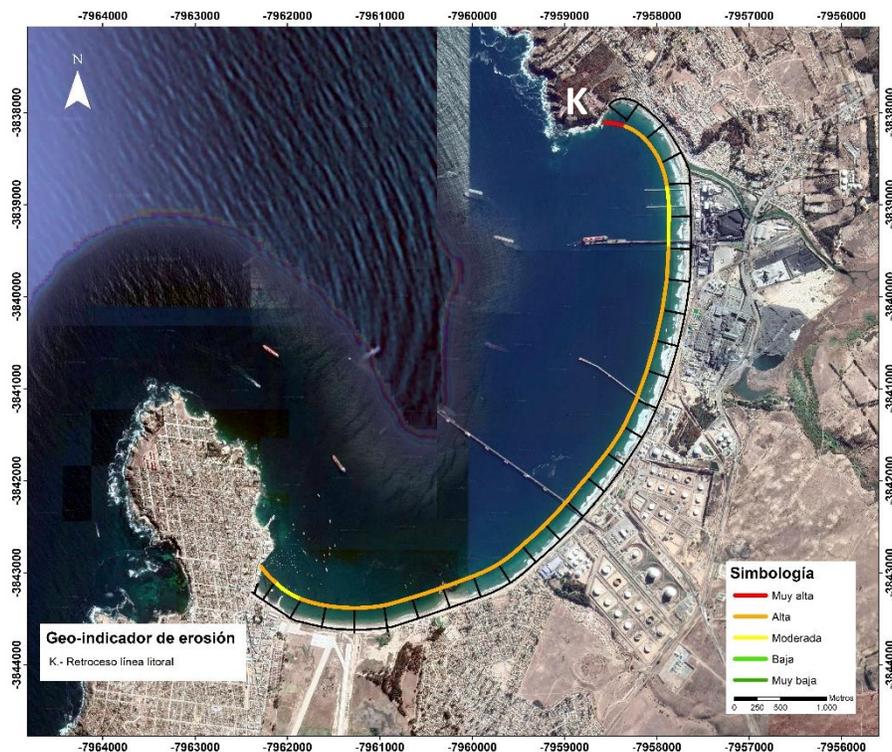


Figura N° 74: Cartografía que ilustra la vulnerabilidad a la erosión del litoral arenoso de la bahía de Quintero del único sub-índice relacionado a la variable geo-indicador de erosión (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth.

5.4. Jerarquización de parámetros de acuerdo a la metodología AHP

5.4.1. Consideraciones teóricas para identificar la importancia relativa de los sub-índices.

La erosión de una playa ante eventos meteo-oceanográficos extremos, como ciclones extratropicales de alta energía, depende en esencia de dos factores: la erosión potencial, y la vulnerabilidad del área eventualmente afectada (Lemake & Miller, 2020). La primera se relaciona con una combinación de los parámetros dinámicos que gatillan el proceso de erosión (oleaje, nivel del mar, entre otros), y la segunda con el estado de la morfología de la costa. La erosión potencial se asocia con las variables activas (amenaza), que potencialmente podrían tener consecuencias adversas en un sistema, mientras que la vulnerabilidad del sistema involucrado hace referencia a los parámetros pasivos que establecen la propensión de la playa a ser modificada por la amenaza (De Serio et al., 2017).

Por lo tanto, si bien son las variables dinámicas las que desencadenan la amenaza, son las variables pasivas las que principalmente inciden en la vulnerabilidad (De Serio et al., 2017), siendo las características físicas de la playa las que van a determinar el alcance del potencial erosivo de un evento extremo (Lemake & Miller, 2020). Las variables físicas más importantes son la pendiente y la elevación (De Serio et al., 2017)

La erosión de la playa como respuesta al impacto de fenómenos meteo-oceanográficos dependen no solo de su configuración morfológica, sino también de la capacidad de movilizar sedimento por parte de las variables dinámicas desde la superficie subaérea de la playa. El oleaje es el principal agente movilizador de sedimento y su capacidad depende de la energía disponible, la cual está directamente relacionada con su altura (Lemake & Miller, 2020). En el caso de eventos meteorológicos como ciclones extratropicales, la severidad de la erosión también depende en forma importante del alineamiento de la línea litoral relativo a la dirección anómala del oleaje (Harley et al., 2017), ya que esto también va a influir en la capacidad de transporte de sedimentos (Komar, 1998, Longuet-Higgins, 1970, en de Andrade et al., 2019).

La frecuencia de los eventos extremos es otro aspecto importante en la vulnerabilidad física de una playa, ya que una exposición prolongada a condiciones anómalas del oleaje por una sucesión de estos en lapsos de tiempo relativamente acotados, con periodos mínimos o nulos de recuperación de sedimentos, acentúan los procesos de erosión con cambios morfológicos extremos (Lemake & Miller, 2020).

El oleaje modal y el rango mareal son dos variables dinámicas que, si bien no influyen directamente en la erosión de una playa ante eventos extremos, sí pueden contribuir en la respuesta de la playa modulando la acción de la marea astronómica, del wave setup y el oleaje extremo. En el caso del oleaje modal, su altura va a determinar la cantidad de sedimento en movimiento en condiciones normales; este sedimento va a ser el que se podría sumar al movilizado por el oleaje extremo (de Serio et al., 2017). Es decir, frente a olas modales de mayor altura, existirá un mayor volumen de sedimento disponible para ser movilizado junto con el material removido por una eventual tormenta. Asimismo, el estado de la marea astronómica podría peraltar aún más el nivel del mar extremo, de acuerdo al estado diario y mensual de la marea, definiendo en parte cual será la porción de la playa bajo la acción de las olas (Lemake & Miller, 2020).

El aumento del nivel del mar es una variable global cuyos efectos locales van a depender de las características ambientales locales, como la morfología, litología, la hidrodinámica y el grado y tipo de presión antropogénica (de Serio et al., 2017). Si bien se ha encontrado una tendencia erosiva en playas de la zona central de Chile, como en la bahía de Quintero (Ministerio del Medio Ambiente, 2019), no hay estudios concluyentes que establezcan cual es la influencia específica del retroceso litoral en las playas de Chile. Por lo tanto, el aumento del nivel del mar es un antecedente que debe ser considerado, pero como una variable secundaria comparada, por ejemplo, con la morfología o el oleaje extremo.

Del mismo modo, el retroceso de la línea litoral es el resultado, entre otros, de procesos costeros que dependen de las características del oleaje, la circulación en near shore, la forma de la playa y el transporte de sedimentos litorales (de Serio et al., 2017). Por lo tanto, el retroceso de la línea litoral como variable se debe considerar como un antecedente, consecuencia de múltiples factores que debe ser tenido en cuenta como un fenómeno que pudiese exacerbar las consecuencias de las variables dinámicas y pasivas que propician la erosión de forma directa (oleaje, aumento del nivel del mar, pendiente, entre otros).

5.4.2. Asignación de peso por sub-índice

Tomando como referencia la literatura revisada, mediante la metodología AHP, se asignaron diferentes pesos a cada sub-índice de acuerdo al grado de importancia respecto a su influencia por sobre la erosión de la playa arenosa frente a eventos extremos de tipo meteo-oceanográficos (Tabla 12).

VARIABLE	SUB INDICE	PESO
Procesos dinámicos	Diferencia entre altura de olas modales y de tormenta	0,10
	Ángulo de incidencia del oleaje extremo	0,09
	Frecuencia de tormentas	0,07
	Altura significativa de ola	0,04
	Rango mareal	0,04
	Aumento del nivel del mar	0,02
Características de la costa	Ancho de la playa	0,13
	Elevación	0,15
	Pendiente litoral arenoso	0,15
	Orientación	0,08
	Tipo de línea litoral	0,11
Geo-indicador de erosión	Retroceso línea litoral	0,02

Tabla N° 12: Pesos asignados a cada sub-índice, mediante metodología AHP. **Fuente:** Elaboración propia.

Los cuatros sub-índices con mayor peso, en orden descendente de acuerdo al grado de importancia, son: pendiente del litoral arenoso y elevación (mismo peso), ancho de playa y tipo de línea litoral. Estos se encuentran clasificados como parte de la variable de tipo pasiva “Características de la costa”, y en conjunto representan poco más de la mitad del peso total de todos los sub-índices aquí considerados (0,54) (Tabla 12. En el quinto y sexto lugar, con pesos de relativa importancia, se encuentran los sub-índices diferencia entre altura de olas modales y de tormenta, y ángulo de incidencia del oleaje, asociados a la variable “Procesos dinámicos”.

Dentro de los sub-índices con menor peso se encuentran la altura significativa de la ola y el rango mareal (0,04), y aumento del nivel y retroceso de la línea litoral (0,02), con una diferencia de peso de 3,75 y 7,5 veces con los sub-índices de mayor importancia (pendiente y elevación, ambos con 0,15) (Tabla 12). Ninguno de los sub-índices con menor peso se encuentran dentro de la variable características de la costa; por otra parte, los cuatro sub-índices con mayor peso si pertenecen a la variable de tipo pasiva, lo que refleja la mayor importancia de las características de la costa por sobre los procesos dinámicos en la respuesta de la playa arenosa de la bahía de Quintero, de acuerdo a las consideraciones teóricas y a los antecedentes presentados en este trabajo.

5.5. Cálculo de Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) por unidad de evaluación y espacialización de los resultados.

La Tabla 13 muestra el rango de valores de CVI que establecen los umbrales para determinar el nivel de vulnerabilidad alcanzado una vez aplicada la fórmula para cálculo de CVI de acuerdo a Hzami et al. (2021). En el Anexo 10 se encuentran los valores de peso y vulnerabilidad de todos los sub-índices, y el resultado de CVI para cada unidad de evaluación de la playa arenosa de la bahía de Quintero.

De acuerdo a los valores calculados de CVI, la playa arenosa de la bahía de Quintero presenta dos niveles de vulnerabilidad: moderado y alto (Fig. 75).

RANGO DE VALORES CVI			
BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
1,43 - 2,29	>2,29 - 3,35	>3,35 - 4,01	>4,01 - 4,87

Tabla N° 13: Rango de valores de CVI para establecer estado de vulnerabilidad por unidad de evaluación. **Fuente:** Elaboración propia, en base a Hzami et al., 2021.

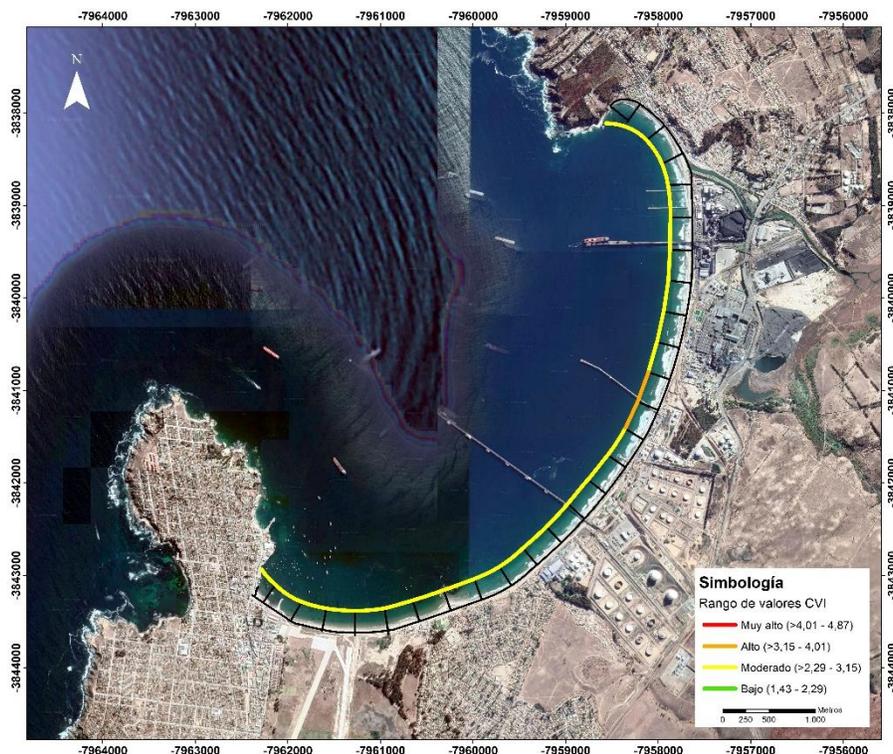


Figura N° 75: Cartografía que ilustra el nivel de vulnerabilidad de cada unidad de evaluación, de acuerdo al valor de CVI calculado (Datum: WGS 1984; huso: 19 S). **Fuente:** Elaboración propia, en base a imagen Google Earth.

El nivel con mayor prevalencia corresponde a moderado, con 7,22 km de extensión, es decir, un 92,31% del total de la longitud del litoral arenoso (Fig. 75). Los valores de CVI oscilaron entre 2,55 y 3,33 (Anexo 10), con un promedio de 2,97. Los mayores valores de CVI para el nivel moderado de vulnerabilidad se concentran de manera continua en el centro de la bahía, entre las unidades Industrial 6 y Loncura 1, con valores calculados por sobre el promedio de la bahía (Fig. 75 y Anexo 10). La vulnerabilidad moderada se extiende prácticamente de forma continua por casi toda la bahía, desde Ventana 1 hasta Quintero 3, con la excepción de las unidades Industrial 8 y 9 (Fig. 75 y Anexo 10)

El nivel alto se extiende por 0,58 km, un 7,44% de la playa arenosa, ubicándose en el centro de la bahía en lo que corresponde a las zonas Industrial 8 y 9 (Fig. 75). Ambas unidades alcanzaron el mismo valor de CVI, 3,42 (Anexo 10), y se encuentran frente a la empresa OXIQUM (Fig. 75).

6. DISCUSIÓN

6.1. Evaluación de los datos obtenidos

6.1.1. Comparación de CVI con respuestas de los temporales del 8 de agosto de 2015 y 25 de junio de 2017.

El resultado de CVI obtenido en el presente trabajo sugiere el nivel de vulnerabilidad frente a eventos meteo-oceanográficos extremos, respecto a la susceptibilidad a la erosión, que presentaría hasta abril de 2020 el litoral arenoso de la bahía de Quintero (de acuerdo a los datos utilizados más recientes). Al realizar una comparación simple de los resultados de CVI, con la respuesta de la línea litoral para los eventos extremos de agosto de 2015 y junio de 2017, es posible observar parcialmente el nivel de sensibilidad del método en cuanto a su capacidad de establecer cuales zonas tendrán un mayor retroceso y cuales uno menor, de acuerdo a la posición en un ranking, donde el primer lugar representa la unidad de mayor erosión, y el último lugar la de menor erosión. Se debe considerar, no obstante, el hecho de que para el cálculo de CVI se utilizaron datos de retroceso de la línea litoral de ambos eventos. Sin embargo, hay que tener en claro de que el peso del retroceso de la línea litoral para determinar la vulnerabilidad es el más bajo junto con el aumento del nivel del mar (Tabla 12).

En el caso de Ventanas (Fig. 76), es la unidad de evaluación 2 (V2), la que presenta una menor diferencia de ranking entre CVI y el lugar en el ranking de los eventos de 2015 y 2017, siendo el ranking del valor del índice un promedio (trece), entre las posiciones de las respuestas para ambos años (doce y catorce, respectivamente). En la unidad V1 también existe una posición similar, particularmente con el ranking de la respuesta del 2017 (Fig. 76); contrario al caso de V3, donde las respuestas del 2015 y 2017 obtuvieron el cuarto lugar en el ranking, y en donde el CVI obtuvo el lugar diecinueve (Fig. 76).

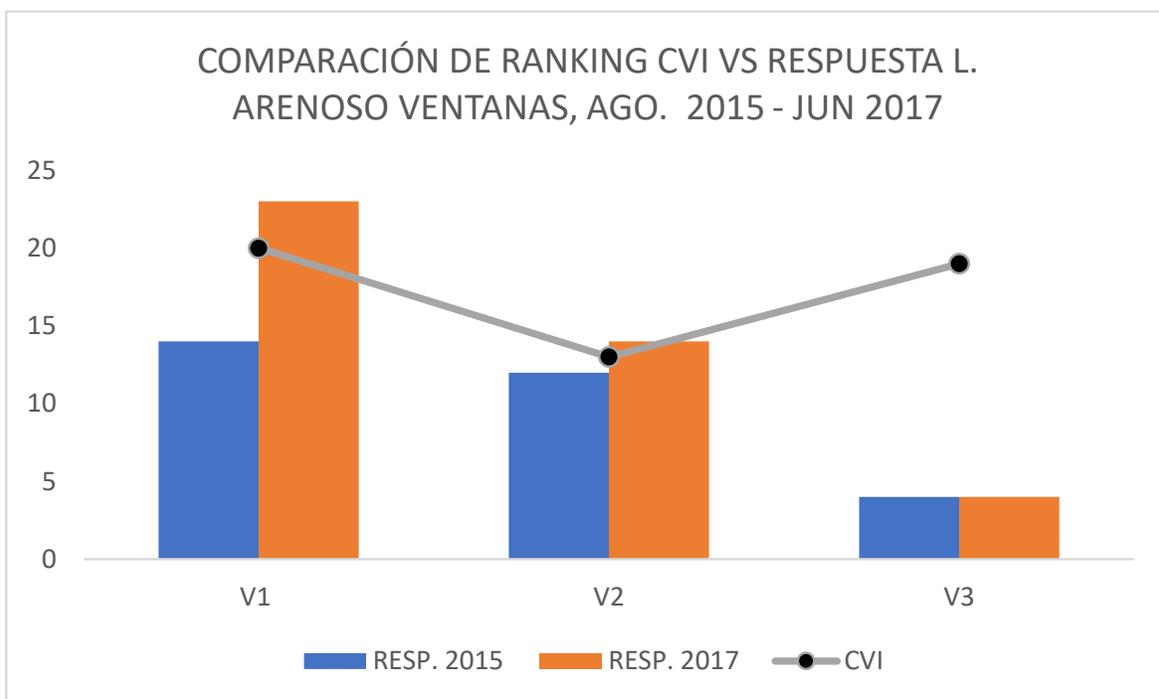


Figura N° 76: Gráfico de comparación entre ranking de CVI y ranking de respuestas del litoral arenoso del sector de Ventanas, del 8 de agosto del 2015 y del 25 de junio del 2017. **Fuente:** Elaboración propia.

Con respecto a la zona Industrial, el ranking de CVI y de la respuesta del 2017 (Fig. 77), posee similitudes en las posiciones alcanzadas en siete unidades de evaluación. Al observar la curva de CVI, la tendencia muestra un comportamiento similar con la respuesta del 2017, entre las unidades I4 e I11 (con excepción de I8 e I9) (Fig. 77); tendencia que no necesariamente coincide en las posiciones, sino más bien en la tendencia de ascenso y descenso en las posiciones del ranking. Destaca la diferencia que marca I8 e I9 con respecto a las unidades adjuntas, en particular por el hecho de que se encuentra en la sección de la bahía más expuesta al oleaje de alta energía (Fig. 77). Otro punto a resaltar es la considerable diferencia de ranking que hay en I2, I3, I14, y por sobre todo en I13, con ocho posiciones de diferencia (Anexo 11); lo que se suma a la diferencia en la tendencia entre I1 e I3, y entre I11 e I13, unidades en las cuales luego de haber una similitud en el ranking y en la tendencia, se genera un cambio brusco de unidad a unidad (Fig. 77).

Entre CVI y la respuesta del 2015, no hay una tendencia clara ni regular, salvo entre I9 e I12 (Fig. 77). Desde I1 hasta I4, las tendencias son notoriamente opuestas, mientras que el CVI desciende en su ranking, la respuesta del 2015 aumenta y se mantiene en su tendencia (Fig. 77). Algo similar ocurre entre I12 e I14, donde se genera una tendencia contraria entre los rankings (Fig. 77).

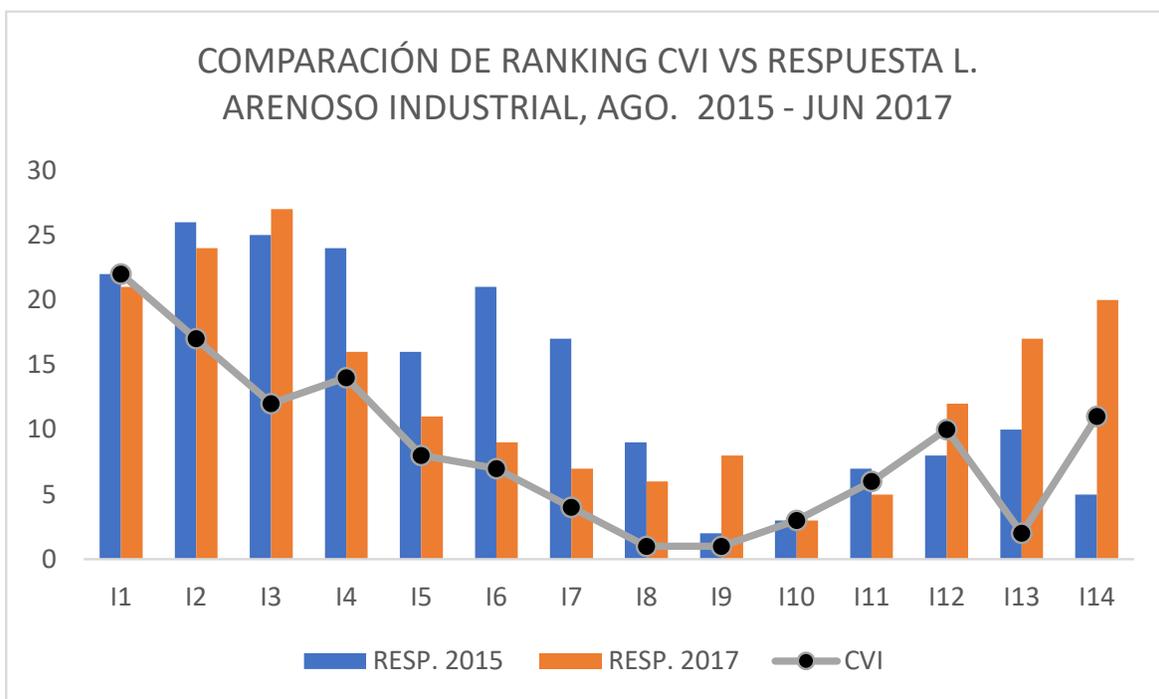


Figura N° 77: Gráfico de comparación entre ranking de CVI y ranking de respuestas del litoral arenoso del sector Industrial, el 8 de agosto de 2015 y del 25 de junio de 2017. **Fuente:** Elaboración propia.

Al comparar los rankings en el sector de Loncura (Fig. 78), se puede observar que la tendencia entre CVI y la respuesta del 2017 es similar, más allá de las diferencias en las posiciones respectivas; en la medida en que CVI sube o baja en el ranking, la respuesta del 2017 se comporta del mismo modo. No obstante, hay que considerar las diferencias de ranking propiamente tal, donde, por ejemplo, en L1 y L5 existe una diferencia de trece posiciones entre el ranking de CVI y la respuesta de la playa en el 2017 (Fig. 78).

En relación con la comparación del ranking entre CVI y la respuesta del 2015 (Fig. 78), es posible mencionar que, al contrastarla con la diferencia entre el ranking de la respuesta del 2017 y el ranking del CVI, los valores tienen una mayor diferencia en sus posiciones. En cuanto a la tendencia, hay una cierta similitud entre L1 y L3, la cual desaparece hacia L4 por un aumento en la respuesta del 2015 de trece posiciones; distinto a la disminución entre L3 y L4, la cual es de solo una posición (Fig. 78).

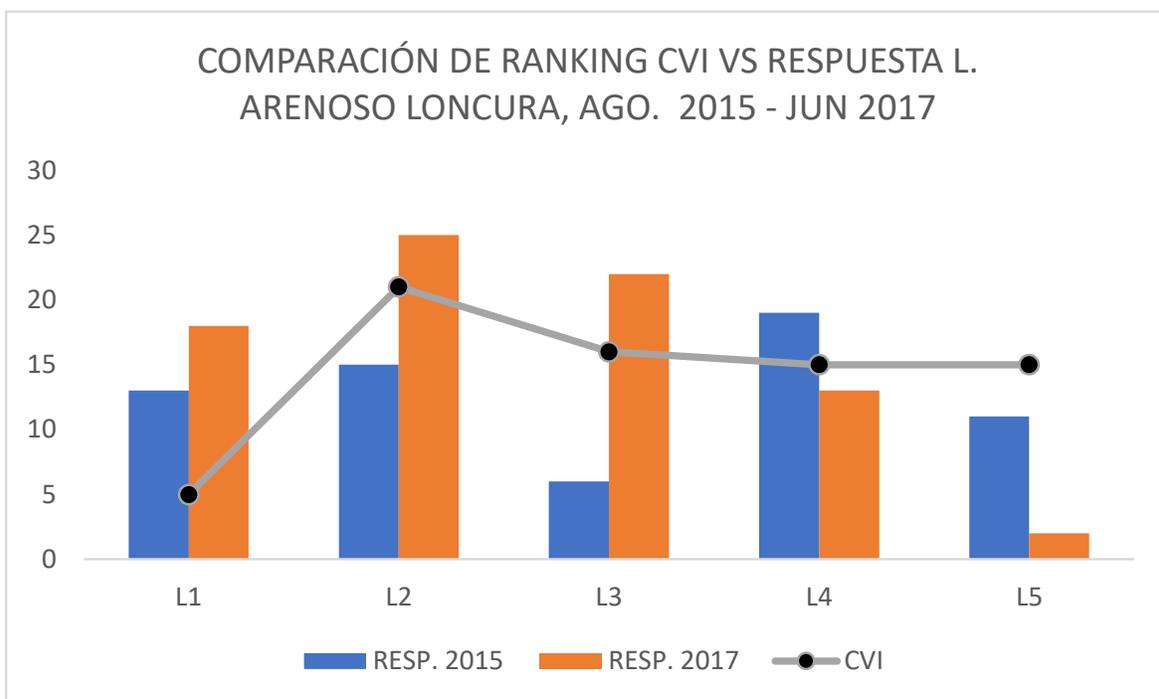


Figura N° 78: Gráfico de comparación entre ranking de CVI y ranking de respuestas del litoral arenoso del sector de Loncura, el 8 de agosto de 2015 y del 25 de junio de 2017. **Fuente:** Elaboración propia.

La Fig. 79 muestra el ranking de CVI y de las respuestas del 2015 y 2017, de la última zona ubicada al sur de la bahía, correspondiente a Quintero.

Las similitudes en la tendencia entre CVI y la respuesta del 2017 se observan desde Q2 a Q5, con posiciones muy parecidas entre Q2 y Q4. Las diferencias se encuentran en las posiciones del ranking, tanto en Q1 como en Q5 (Fig. 79).

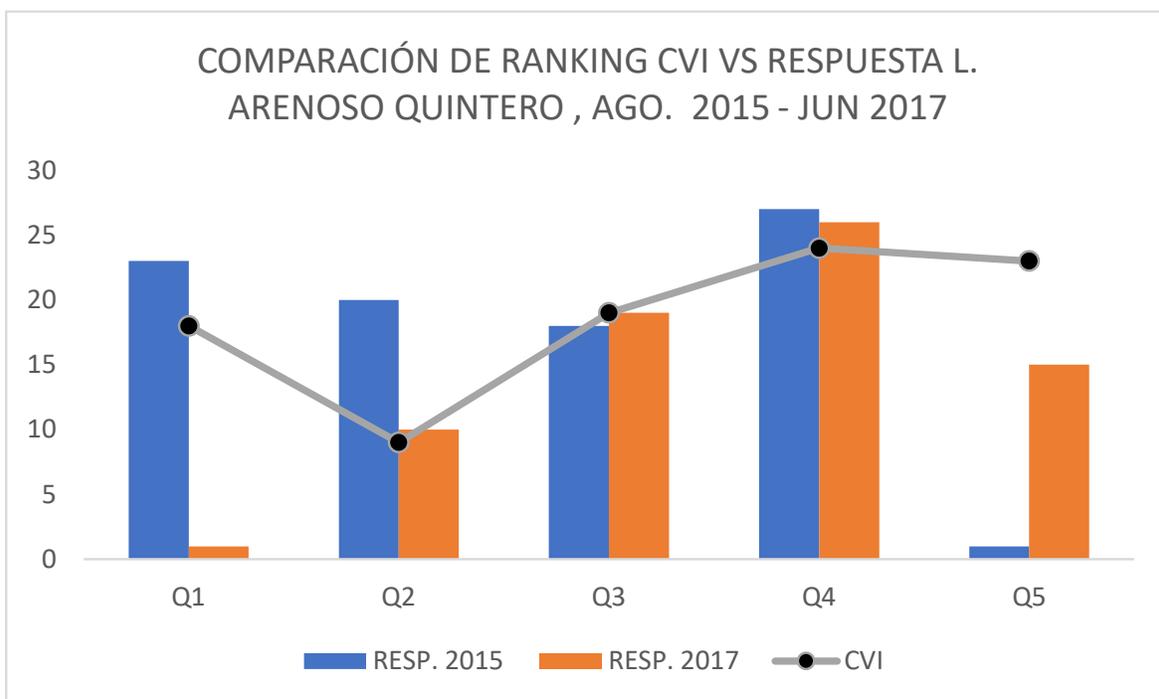


Figura N° 79: Gráfico de comparación entre ranking de CVI y ranking de respuestas del litoral arenoso del sector de Quintero, el 8 de agosto de 2015 y del 25 de junio de 2017. **Fuente:** Elaboración propia.

En relación con las semejanzas entre ranking CVI y la respuesta de la línea litoral al evento de 2017, se observa una similitud en la posición de los respectivos rankings en V2 (Fig. 76); I1, I4, I5, I6, I10, I11, I12 (Fig. 77); L4 (Fig. 78); Q2, Q3, Q4 (Fig. 79). En estos casos su diferencia no supera las tres posiciones. En cuanto a la correlación, con el mismo criterio anterior, en el ranking CVI y la respuesta de la línea litoral en el evento de 2015, se puede observar una diferencia de menos de tres posiciones en V2 (Fig. 76); I1, I9, I10, I11, I12 (Fig. 77); Q3, Q4 (Fig. 79). En esta última comparación, cuatro unidades menos que en la anterior.

Solo en la unidad de evaluación I3 (Fig. 77) los valores del ranking de las respuestas a los eventos del 2015 y 2017, y de CVI, coincidieron en sus respectivas posiciones. Además, hubo coincidencias en el ranking en I1, entre CVI y respuesta del 2015, y en Q3, entre CVI y respuesta del 2017 (Fig. 79).

En definitiva, se observa una mayor cantidad de diferencias que similitudes en las diversas posiciones de los rankings, al comparar CVI con la respuesta del 2015 y del 2017. Las diferencias son fundamentalmente de las posiciones entre CVI y las respuestas de ambos eventos, habiendo una mayor semejanza en las tendencias, particularmente en el sector Industrial y, en menor medida, en Loncura y Quintero. En términos generales, las mayores similitudes, tanto en el ranking como en la tendencia, se da entre CVI y la respuesta de la línea litoral del 2017. La razón de esto último no tiene una respuesta en el presente trabajo. Sin embargo, la mayor similitud entre el ranking del 2017 y CVI puede estar relacionada con la diferencia en la intensidad de este evento con la del año 2015, el cual fue de mayor

energía de acuerdo a, por ejemplo, la altura de las olas que arribaron al litoral arenoso de la bahía de Quintero. Es posible que los resultados de esta metodología pierdan sensibilidad ante eventos de gran magnitud, como el de agosto de 2015. No obstante, esto último debe ser comprobado en futuros trabajos para evaluar la idoneidad de la metodología utilizada en el presente trabajo.

6.1.2. Debilidades y fortalezas fundamentales del cálculo de CVI

El ejercicio de comparación realizado en el sub-capítulo 6.1.1. da cuenta de la capacidad limitada que tuvo la aplicación del cálculo de CVI para el caso particular del litoral arenoso de la bahía de Quintero frente a eventos de tipo meteo-oceanográficos extremos. Si bien en la comparación entre los resultados del ranking de CVI y los rankings de la respuesta del litoral arenoso de la bahía de Quintero para agosto de 2015 y para junio del 2016 hubo coincidencias, estas no fueron un resultado satisfactorio al número de estas. Respecto a la comparación de los rankings de CVI y la respuesta del litoral arenoso de agosto del 2015, se registraron ocho semejanzas; en cuanto a la comparación de los rankings de CVI y la respuesta del litoral arenoso de agosto del 2017, hubo 13 semejanzas. En ninguna de las dos comparaciones se alcanzó semejanzas en la mitad de las unidades de evaluaciones, por lo que la capacidad de predicción de CVI en este trabajo en particular no fue satisfactoria.

Entre las posibles explicaciones, se podrían encontrar las debilidades expuestas en la literatura. Por ejemplo, si bien el cálculo de CVI es capaz de obtener resultados con datos de diversa calidad (Rocha et al., 2023; de Araújo et al., 2022), los datos que se utilizan en metodologías basadas en índices para la evaluación de la vulnerabilidad en zonas costeras deben ser actualizadas y de la mayor confiabilidad posible (Pantusa et al., 2018). En el presente trabajo, los datos de pendiente y elevación fueron obtenidos a partir de la información proporcionada por Google Earth Pro (ver apartado II del sub-capítulo 4.1, letras a) y b)). Estos datos, a diferencia de las imágenes que pone a disposición esta misma plataforma, son únicos y no tienen la información de la fecha a la que corresponde su registro.

En lo que respecta a los datos propiamente tal, su calidad y cantidad son muy importantes para la obtención de resultados ajustados a la realidad en la evaluación de la vulnerabilidad de una zona costera en particular (Martins et al., 2017), por lo que es muy probable que de haber utilizado promedios mensuales de pendiente y elevación del litoral arenoso, los resultados hubiesen sido tal vez más precisos, especialmente considerando que estos dos sub-índices son los de mayor peso ponderado (Tabla 12). De hecho, la mayor correlación de los resultados de CVI con la respuesta de la línea litoral en junio de 2017 (ver Fig 80 y Fig 81), pueden explicarse en parte porque en agosto del 2015 hubo dos temporales en ese mismo mes, previo al evento del día 08 (Winckler et al., 2017), lo que pudo haber contribuido a un retroceso de la línea litoral mayor que el provocado por el evento principal de forma individual; no siendo considerado de esta forma en el cálculo de CVI, debido a la ausencia de información estadística a una escala mensual o de mayor detalle. Esto último debido a la limitación propia de los índices, los cuales se construyen con información de variables

correspondientes a un momento en particular, obteniendo resultados estáticos en término de temporalidad (Mclaughlin & Cooper, 2010).

En cuanto a la escala, Mclaughlin & Cooper (2010), señalan que los datos utilizados deben guardar relación con la escala de evaluación de la vulnerabilidad. Estos autores mencionan que los resultados finales no varían si se utiliza un mismo dato para toda el área de estudio (debido a un bajo nivel de detalle de acuerdo a la escala de trabajo). En esta investigación se utilizaron datos a escala de la bahía para cuatro sub-índices (rango mareal, frecuencia de tormentas, aumento del nivel del mar y tipo de línea litoral (Anexo 8)), debido principalmente a que su consideración en la ponderación establece un punto de comparación con otros litorales arenosos adjuntos a la bahía de Quintero, y con los cuales pueden ser comparados al utilizar la misma metodología. Además, el incluirlos en este trabajo tuvo como objetivo obtener un valor de CVI con una perspectiva en general, donde no solo se pudiesen obtener resultados únicamente sobre la base de la comparación entre las partes de la misma área de estudio, sino que también conforme al contexto físico en el que se enmarca la bahía.

La ausencia de datos de calidad es propio de zonas costeras en países subdesarrollados, ya que la escases de recursos económicos y técnicos impide poder manejar información estadística proveniente de modelos numéricos, que puedan ser contrastados con datos y observaciones levantadas en el área de estudio (de Araújo et al., 2022). La bahía de Quintero no escapa a esta realidad, ya que la información disponible se encuentra dispersa, y enfocada fundamentalmente en los problemas de contaminación que han existido en la zona desde la década de 1960. Existen algunos esfuerzos por poner a disposición datos modales y extremos del oleaje en la bahía de Quintero (Beyá et al., 2016), y datos del comportamiento de la línea litoral de los últimos años para la misma zona (MMA, 2019). Sin embargo, al no ser información sistematizada para la evaluación de los riesgos y de todas sus componentes, quedan únicamente como antecedentes aislados. Es bajo este contexto, donde el uso de información satelital se vuelve una opción válida para la evaluación de la vulnerabilidad, pudiendo obtener resultados para el apoyo en la gestión y la planificación territorial (de Araújo et al., 2022). De hecho, el presente trabajo se configuró sobre la base de información gratuita, y en general de libre acceso, pudiendo establecer el nivel de vulnerabilidad física del litoral arenoso de la bahía de Quintero, con las falencias anteriormente descritas, pero sentando un punto de referencia y comparación para futuras investigaciones en cuanto a la información recopilada y sistematizada (Sousa et al. 2013), y al hecho de poder construir un instrumento de evaluación de vulnerabilidad con escasos recursos, gracias a la capacidad de adaptación del método a la escala de trabajo y a los datos disponibles (Furlan et al., 2021).

La baja calidad de datos es un factor que puede afectar en mayor o menor medida los resultados del cálculo de CVI, para un área de estudio en particular. No obstante, esta falencia puede ser atenuada mediante la ponderación de la opinión de expertos en cuanto a la influencia de las variables que inciden en la vulnerabilidad (Sekovski et al., 2020). Uno de los métodos más utilizados para esto es AHP, el cual es capaz de categorizar y clasificar la importancia relativa de las diferentes variables, estableciendo las condiciones únicas de

como estas actúan en un área de estudio en particular (Roukounis & Tsihrintzis, 2022). Para este trabajo en particular, la asignación de pesos a cada subíndice se realizó sobre la base de consideraciones teóricas presentes en la literatura, y través de la experiencia en otros países expuesta en diversos trabajos científicos (Mclaughlin & Cooper, 2010; de Serio et al., 2017; Martins et al., 2017; Hzami et al., 2021; Furlan et al., 2021). Sin embargo, es posible que la relación positiva, pero moderada, entre CVI y las respuestas del 2015 y 2017 (Fig. 80 y Fig. 81), sea resultado no solo de datos de baja calidad, sino que también por una asignación de pesos que sobrestimó y/o subestimó las diferentes variables consideradas para el cálculo de CVI. Por ejemplo, el haber asignado los mayores pesos a dos variables cuyos datos son de dudosa calidad (pendiente y elevación) (Tabla 12), puede haber reducido la capacidad de predictibilidad del método al considerar el comportamiento de la línea litoral para los temporales de agosto del 2015 y junio del 2017 (Fig. 76; Fig.77; Fig. 78; Fig; 79). Ante esto, es importante consultar a más de un experto para asignar los pesos a los diversos sub-índices, de manera de reducir eventuales errores o falencias por datos de dudosa calidad. De hecho, también podría ser de mucha utilidad consultar a la comunidad residente y trabajadora del entorno de la bahía de Quintero, para que den su opinión en la asignación de pesos, tomando como referencia su experiencia frente a eventos meteo-oceanográficos extremos ocurridos en el litoral arenoso frente a su localidad. Todo lo anterior, para aminorar el sesgo de las opiniones personales que pueden inducir a la reducción de la sensibilidad del método frente a las amenazas consideradas.

CVI, potenciado con AHP, fue una herramienta que permitió evaluar la vulnerabilidad física del litoral arenoso de la bahía de Quintero, alcanzando resultados medianamente satisfactorios, de acuerdo a la correlación de Pearson calculada (Fig. 80 y Fig. 81), esto, aun cuando se utilizaron datos de dudosa calidad y con la ponderación de sub-índices a partir de la opinión construida sobre la base de bibliografía. Se debe aplicar este método, corrigiendo las falencias antes mencionadas, con el fin de ir mejorando la sensibilidad del instrumento creado para el litoral arenoso de la bahía de Quintero, y comparando sus resultados a futuro con el comportamiento de la línea litoral frente a eventos extremos meteo-oceanográficos en el área de estudio. Esto, con el fin de determinar si es un método válido para localidades como las adjuntas a la bahía de Quintero, que tengan escasos recursos técnicos y económicos, y que necesiten evaluar los diversos tipos de vulnerabilidades presentes en su territorio.

7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se calculó el Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI), para el litoral arenoso de la bahía de Quintero, con el objetivo de determinar la vulnerabilidad a la erosión frente a eventos meteo-oceanográficos extremos.

Respecto al cálculo del Desplazamiento de la Línea de Costa (DLC), para el periodo primavera-verano entre los años 2004 y 2019, los resultados indican que la zona con mayor retroceso fue Quintero, con un promedio de 16,23 m; la segunda zona de mayor retroceso fue Ventana, en el extremo norte de la bahía, con 15,29 m. La zona de menor retroceso fue Industrial Norte, la cual se encuentra justo al sur de Ventana, con 0,68 m.

En DLC para el periodo otoño-invierno, entre los años 2004 y 2020, la zona con un mayor promedio de retroceso fue Industrial Centro, con 29,10 m; el segundo lugar fue industrial sur con 26,17 m. La fecha en la cual se registró el mayor retroceso de la línea litoral fue para agosto de 2015, posterior al evento extremo ocurrido el día ocho de ese mes, con 39,09 m en promedio para todas las zonas, con un máximo de 46,14 m en Industrial Sur.

El Cálculo de la Tasa de Erosión Costera (TEC), para el periodo primavera-verano entre los años 2004 y 2019, determinó que el mayor promedio de tasa de retroceso fue en Quintero con 1,54 m/año, estando por lo tanto en un estado de alta erosión. El resto de las zonas se encuentran en un estado de erosión, salvo Industrial Norte, el cual se encuentra en estabilidad con una tasa de acreción promedio de 0,11 m/año.

En cuanto a TEC para el periodo otoño-invierno, entre los años 2004 y 2020, todas las zonas alcanzaron la categoría de estado de erosión, con un máximo promedio de tasa de retroceso de 2,65 m/año en Industrial centro; el segundo mayor promedio de retroceso fue en Ventana, con 2,30 m/año. La menor tasa de retroceso fue calculada para Industrial Norte, con 1,54 m/año.

Con las tasas calculadas para todas las áreas de evaluación, la proyección a diez años (a contar del 2020), indica que Ventana perderá un 86,67% de su superficie; la segunda área con mayor pérdida fue Industrial Centro, con un 68,87%. La zona con menor pérdida de superficie es Loncura, con un 38,15%.

Los tres sub-índices con mayor peso en la vulnerabilidad a la erosión frente a eventos meteo-oceanográficos extremos son pendiente, elevación y ancho de playa. Respecto a la pendiente, se identificó que todo el litoral arenoso tiene una vulnerabilidad moderada, salvo en la unidad de evaluación Ventana 1, en la cual se identificó una vulnerabilidad baja. Para el sub-índice de elevación, cuatro unidades de evaluación alcanzaron una vulnerabilidad alta (Industrial 10, 11 y 12; Loncura 2); el resto de las veintitrés unidades fueron identificadas con una vulnerabilidad muy alta. En cuanto a ancho de playa, fueron identificados tres estados de vulnerabilidad, siendo predominante el estado muy bajo con quince unidades de evaluación, concentrados fundamentalmente en la parte centro-norte de la zona Industrial; el segundo estado es bajo, con nueve unidades de evaluación concentrados entre Industrial Sur y Loncura. Por último, el estado con menos unidades de evaluación

para el subíndice ancho de playa es moderado, con dos en el extremo norte de Ventana, y uno en el límite norte de Industrial Norte.

El Índice de Vulnerabilidad Costera calculado determinó que un 85,18% (23 unidades de evaluación) del litoral arenoso de la bahía de Quintero tiene un estado de vulnerabilidad moderado, con valores del índice de entre 2,43 y 3,02. Además, fue identificado el valor de vulnerabilidad alto con 7,41% (2 unidades de evaluación), ambos con un valor de CVI de 3,16, en el límite sur de Industrial Centro. Y, por último, se identificó el estado vulnerabilidad bajo, con 7,41% de las unidades de evaluación, en el límite sur de la bahía, en las dos últimas unidades de evaluación de Quintero, con valores de CVI de 2,17 y 2,19.

Los resultados calculados de CVI dan cuenta de que existe una mayor vulnerabilidad a la erosión del litoral arenoso ante eventos meteo-oceanográficos en la zona centro sur de la bahía, particularmente en Industrial Centro (2,99 de CVI promedio); Industrial Sur (2,90 de CVI promedio); y Loncura (2,71 CVI promedio). De esta forma, se comprueba la hipótesis respecto a que la zona de mayor vulnerabilidad a la erosión frente a eventos meteo-oceanográficos extremos se encuentra en la zona central de la bahía, frente al parque industrial; además, se cumple que el resto de la bahía no iba a tener una diferencia significativa con respecto a la zona de mayor vulnerabilidad, la cual corresponde al estado moderado (el rango de CVI es entre 2,17 y 3,16; de un espectro total que varía entre 1,43 y 4,87).

Los resultados se condicen con parte de la bibliografía revisada, la cual habla de que la mayor exposición de la costa depende en gran medida del tipo exposición al oleaje, en donde mientras el oleaje arribe directamente desde su fuente, sin ningún tipo de desvío, llegará con mayor energía a la costa. En el caso de las bahías, como la de Quintero, debido a su configuración morfológica, existirá un arribo diferenciado del oleaje modal y de alta energía, de acuerdo a la posición relativa de la línea de costa, situación condicionada por refracción del oleaje.

Más allá de las consideraciones anteriores, CVI permite establecer una diferencia mediante la asignación de un valor calculado en base a múltiples variables, lo cual genera una certeza mediante un resultado numérico, el que puede ser comparado en la misma área de estudio y con otras que utilizaron la misma metodología. Y si bien se utilizaron datos de baja calidad en algunas de las variables, esto puede ser mejorado a través de un sistema de ponderación en base a la asignación de pesos. En estos métodos de ponderación, como AHP, no solo pueden participar expertos en la asignación de pesos por variable, sino que también la comunidad que reside y trabaja, lo que enriquece la construcción de conocimiento en el propio territorio.

CVI es una opción más que válida para identificar la vulnerabilidad en la costa, no solo en términos físicos, sino que también aplicable a las dimensiones económica y social. Es un método que está enfocado en ilustrar el estado de vulnerabilidad de la costa a diferentes escalas y con información de diversa calidad, integrando diferentes variables e incluso experiencias, en cuanto al conocimiento del área de estudio, mediante el uso de ponderación de pesos. Esto lo hace una herramienta que puede ser utilizada no sólo con

finés académicos, sino que también para la gestión del territorio de unidades administrativas con escasos recursos técnicos y que necesitan, por ejemplo, construir instrumentos de ordenamiento territorial. La flexibilidad de CVI permite además mejorar sus resultados mediante la incorporación de datos recogidos en el área de estudio misma o de modelaciones numéricas; esto sin perder la capacidad de obtener una visión integrada de la realidad de una zona costera específica.

El presente trabajo sirve como antecedente para demostrar que es posible usar a CVI a escala de bahía en Chile, considerando la escasez de datos y su dispersión. Sin embargo, es necesario ampliar la cantidad de involucrados en la asignación de pesos a las variables, considerando no solo a expertos, sino que también a la comunidad que reside y trabaja en la zona, y que ha convivido con los diferentes eventos meteo-oceanográficos extremos pasados. Además, este trabajo sirve como referencia a futuras investigaciones de temas relacionados, gracias a la recopilación y sistematización de los datos utilizados. No obstante, es deseable contrastar los resultados con información registrada in situ de manera de mejorar su sensibilidad ajustando el método a la realidad del área de estudio en particular.

En síntesis, en un contexto de escasos datos adecuados, registrados in situ y sistematizados, más allá de las debilidades, metodologías como CVI potenciadas con AHP, permiten al menos determinar preliminarmente zonas de alta vulnerabilidad frente al cambio climático y sus consecuencias en, por ejemplo, el clima del oleaje y su aumento de la energía en eventos meteo-oceanográficos. Del mismo modo, los resultados obtenidos con esta clase de metodologías (basadas en índices), pueden ser mejorados con datos extraídos sistemáticamente en el área de estudio y/o con modelaciones numéricas, de manera de aumentar su sensibilidad y manteniendo las ventajas clave como la capacidad de síntesis y de informar de manera clara y sencilla respecto a cuáles áreas de una zona costera en particular son más vulnerables.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aagaard, T., Masselink, G. (1999). *The surf zone*. En Short, A. [ed.] Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. J. Wiley & Sons Ltd:72 – 113.
- Ahrens, C. D., & Henson, R. (2016). *Global climate. Meteorology Today: an introduction to weather, climate, and the environment*. 11th Edition. Belmont, CA: Cengage Learning. 10, 488-517. 662 pp.
- Alexandrakis, G., & Poulos, S. E. (2014). *An holistic approach to beach erosion vulnerability assessment*. Scientific reports, 4(1), 1-8.
- Ammirati, J. B., Vargas, G., Rebolledo, S., Abrahami, R., Potin, B., Leyton, F., & Ruiz, S. (2019). *The Crustal Seismicity of the Western Andean Thrust (Central Chile, 33°–34° S): Implications for Regional Tectonics and Seismic Hazard in the Santiago Area*
The Crustal Seismicity of the Western Andean Thrust (Central Chile, 33°–34° S). Bulletin of the Seismological Society of America, 109(5), 1985-1999.
- Anfuso, G., Postacchini, M., Di Luccio, D., & Benassai, G. (2021). *Coastal Sensitivity/Vulnerability Characterization and Adaptation Strategies: A Review*. Journal of Marine Science and Engineering, 9(1), 72.
- Araujo, S., Vieira Da Silva, D., Freitas, A. & Da Fontoura Klein, A. (2013). *Georreferenciamento de Fotografias Aéreas e Análise da Variação da Linha de Costa*. En Alcantara, J. [ed.], *Il Manual de Métodos en Teledetección Aplicada a la Prevención de Riesgos Naturales en el Litoral*. CYTED: 237-258.
- Araya, C. (2018). *Caracterización de los efectos geomorfológicos de los temporales de agosto de 2015 y junio de 2017, y su relación con las variables meteo-oceanográficas que los originaron, en el litoral arenoso de la bahía de Quintero, Región de Valparaíso*. Informe de Práctica, Carrera de Geografía. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Chile. 175 pp.
- Araya, M. (2008). *Restauración y Conservación Preventiva de Restos Humanos del Sitio Arqueológico El Macal, Peñaflo*. Proyecto Final para optar al Curso de Especialización de Postítulo en Restauración del Patrimonio Cultural Mueble. Escuela de Posgrado, Facultad de Artes, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 74 pp.
- Araya-Vergara, J. F. (1976). *Reconocimiento de tipos e individuos regionales en la costa de Chile*. *Informaciones Geográficas*, (23), pp 9-30.
- Araya-Vergara, J. F. (1979). *Las incidencias cataclísmicas de las bravesas en la evolución de la costa de Chile central*. *Informaciones Geográficas*, (26), pp 19-42.

- Araya-Vergara, J. F. (1982). *Análisis de la localización de los procesos y formas predominantes de la línea litoral de Chile: observación preliminar*. Investigaciones Geográficas, (29), pp 35–55.
- Bagdanavičiūtė, I., Kelpšaitė, L., & Soomere, T. (2015). *Multi-criteria evaluation approach to coastal vulnerability index development in micro-tidal low-lying areas*. Ocean & Coastal Management, 104, 124-135.
- Barrera, N. (2004). *Influencia del rebase del oleaje en playas sobre lagunas costeras*. El caso de la laguna de la Magarola. UPC: 165p.
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2009). *Atmosphere, weather and climate*. 9th ed. London: Routledge.
- Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras F., Winckler P., Molina M. (2016). *Atlas de Oleaje de Chile*. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
- Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology: An introduction*. 2nd Edition. J. Wiley & Sons Ltd. 411p.
- Boak, E., Turner, I. (2005). *Shoreline Definition and Detection: A Review*. Journal of Coastal Research. 21:688-703.
- Burvingt, O., Masselink, G., Russell, P., & Scott, T. (2017). *Classification of beach response to extreme storms*. Geomorphology, 295, 722-737.
- Calisto, M. (2014). *Observatorio del medioambiente Las Ventanas*. Memoria para optar al título de Arquitecto. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 114 pp.
- Campos, R. (2016). *Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile*. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico. Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, Chile. 136 pp.
- Carrasco, A. (2018). *Análisis de la sismicidad intraplaca asociada al terremoto Mw 8.4 de Illapel 2015*. Tesis para optar al grado de magister en ciencias, mención geofísica. FCFM, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 120 pp.
- Carvajal, M., & Melnick, D. (2020). *Fuentes de Sismicidad en Chile*. En Chile cambiando. Revisitando la geografía regional de Wolfgang Weischet. pp. 375-382. Santiago de Chile: Serie GEOlibros N°36, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de

Chile / Instituto de Ciencias Ambientales y Evolutivas, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, 2020.

- Castro, C. & Morales, E. (2006). *La zona costera. Medio natural y ordenación integrada*. 1ª ed. Santiago, Serie Geolibros, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. 210pp.
- Chaumillon, E., Bertin, X., Fortunato, A., Bajo, M., Schneider, J., Dezileau, L., Walsh, J., Michelot, A., CHauveau, E., Créach, A., Hénaff, A., Sauzeau, T., Waeles, B., Gervais, B., Jan, G., Baumann, J., Breilh, J., Pedreros, R. (2017). *Storm-induced marine flooding: Lessons from a Multidisciplinary approach*. *Earth-Science Reviews* 165: 151-184.
- Chhetri, S., & Kayastha, P. (2015). *Manifestation of an analytic hierarchy process (AHP) model on fire potential zonation mapping in Kathmandu Metropolitan City, Nepal*. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), 400-417.
- Coco, G., Murray, B., Ashton, A. (2020). *Rhythmic patterns in the surfzone*. In *Sandy Beach Morphodynamics*. pp. 297-316. Elsevier.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). *Social Vulnerability to Environmental Hazards*. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261.
- Davidson-Arnott, R. (2010). *An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Cambridge University Press. 442 pp.
- de Andrade, T. S., de Oliveira Sousa, P. H. G., & Siegle, E. (2019). *Vulnerability to beach erosion based on a coastal processes approach*. *Applied Geography*, 102, 12-19.
- de Araújo Queiroz, H., Gonçalves, R. & Mishra, M. (2022). *Characterizing global satellite-based indicators for coastal vulnerability to erosion management as exemplified by a regional level analysis from Northeast Brazil*. *Science of the Total Environment*, 817, 152849.
- de Serio, F., Armenio, E., Mossa, M., & Petrillo, A. F. (2018). *How to define priorities in coastal vulnerability assessment*. *Geosciences*, 8(11), 415.
- Delgado, R., Garrido, V., Jiménez, A., Olivares, F., Ramírez, J., Vergara, F. (2022). *Taller de Planificación Integrada en Contexto de Zonas de Sacrificio. El caso de Quintero - Puchuncaví*. Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales UC, Documentos de Taller IEUT, N° 2.
- Djouder, F., & Boutiba, M. (2017). *Vulnerability assessment of coastal areas to sea level rise from the physical and socioeconomic parameters: case of the Gulf Coast of Bejaia, Algeria*. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(14), 1-20.

- Do, K., & Yoo, J. (2020). *Morphological response to storms in an embayed beach having limited sediment thickness*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 234, 106636.
- Drejza, S., Bernatchez, P., Marie, G., & Friesinger, S. (2019). *Quantifying road vulnerability to coastal hazards: Development of a synthetic index*. Ocean & Coastal Management, 181, 104894.
- Erazo, S. (1993). *El Bosque Relicto de Quintero: Una Necesidad de Protección*. Revista Notas Históricas y Geográficas, N^{os} 5-6, 1994 – 1995: 417-422.
- Ferreira, Ó. (2018). *Coastal Hazard Indicators*. En Finkl C., Makowski C. (eds) Encyclopedia of Coastal Science. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham.
- Forman, E. H., & Gass, S. I. (2001). *The analytic hierarchy process—an exposition*. Operations research, 49(4), 469-486.
- Furlan, E., Dalla Pozza, P., Michetti, M., Torresan, S., Critto, A., & Marcomini, A. (2021). *Development of a Multi-Dimensional Coastal Vulnerability Index: Assessing vulnerability to inundation scenarios in the Italian coast*. Science of The Total Environment, 772, 144650.
- Gajardo, G. (2019). *Desplazamiento de la subjetividad en una bahía de sacrificio: perdida de lugar de la comunidad artesanal S-24 en el litoral de Quintero, Región de Valparaíso*. Tesis para optar al grado de magister en gestión de proyectos urbano regionales. Escuela de Arquitectura y Diseño, Universidad de Viña del Mar. Viña del Mar, Región de Valparaíso. 112 pp.
- Garreaud, R. (2018). *Tres Niños sorprendentes*. Boletín técnico: Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño, Instituto Geofísico del Perú, 5 (1), 5-9.
- Gazmuri, C. (1999). *La compañía de ferrocarril, puerto y balneario de Quintero (una empresa fracasada)*. Historia, Vol. 32, 77-101. Instituto de Historia, PUC. Santiago, Chile.
- Gómez-Pujol, L., & Orfila, A. (2020). *Reflective–dissipative continuum*. In Sandy Beach Morphodynamics. pp. 421-437. Elsevier.
- Harley, M., Turner, I., Kinsela, M., Middleton, J., Mumford, P., Splinter, K., Short, A. (2017). *Extreme coastal erosion enhanced by anomalous extratropical storm wave direction*. Scientific reports, 7(1), 1-9.

- Harris, L., & Defeo, O. (2022). *Sandy shore ecosystem services, ecological infrastructure, and bundles: New insights and perspectives*. *Ecosystem Services*, 57, 101477.
- Hesp, P. (1999). *The beach backshore and beyond*. En Short, A. [ed.] *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. J. Wiley & Sons Ltd: 145 – 170.
- Hesp, P. (2002). *Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics*. *Geomorphology* 48, 245–268.
- Hzami, A., Heggy, E., Amrouni, O., Mahé, G., Maanan, M., & Abdeljaouad, S. (2021). *Alarming coastal vulnerability of the deltaic and sandy beaches of North Africa*. *Scientific reports*, 11(1), 1-15.
- Ilustre Municipalidad de Puchuncaví. (2009). *Memoria Explicativa Plan Regulador Comunal de Puchuncaví, localidades de Puchuncaví, Maitencillo, Horcón y Ventana*. Puchuncaví, Región de Valparaíso, Chile. 51 pp.
- Ilustre Municipalidad de Puchuncaví. (2017). *Plan de Desarrollo Comunal 2017-2022*. Puchuncaví, Región de Valparaíso, Chile. 45 pp.
- Ilustre Municipalidad de Quintero. (2014). *Plan Municipal de Cultura de Quintero*. Quintero, Región de Valparaíso, Chile.
- Ilustre Municipalidad de Quintero. (2020). *Estudio Básico. Actualización Plan Desarrollo Estratégico Comunal Quintero*. Quintero, Región de Valparaíso, Chile. 220 pp.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas*. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 pp.
- Koroglu, A., Ranasinghe, R., Jimenez, J.A., Dastgheib, A. (2019). *Comparison of coastal vulnerability index applications for Barcelona Province*. *Ocean Coast Manag.* 178, 104799.
- Lemke, L., & Miller, J. (2020). *Evaluation of storms through the lens of erosion potential along the New Jersey, USA coast*. *Coastal Engineering*, 158, 103699.
- Martínez A. & Takahashi, K. (2017). *¿El Niño costero o Fenómeno El Niño?. Revista Moneda*, (170), 34-37.

- Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E., & Agredano, R. (2018). *Coastal erosion in central Chile: A new hazard?*. *Ocean & coastal management*, 156, 141-155.
- Martins, K., de Souza Pereira, P., Silva-Casarín, R., & Neto, A. V. N. (2017). *The influence of climate change on coastal erosion vulnerability in northeast Brazil*. *Coastal Engineering Journal*, 59(2), 1740007-1.
- Masselink, G. & Turner, I. (1999). *The effect of tides on beach morphodynamics*. En Short, A. [ed.] *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. J. Wiley & Sons Ltd: 204-229.
- Maturana, J., Bello, M., Manley, M. (2004). *Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur*. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Departamento de Oceanografía.
- McLaughlin, S., & Cooper, J. A. G. (2010). *A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers?*. *Environmental Hazards*, 9(3), 233-248.
- Misnisterio del Medio Ambiente. (2017). *Programa para la Recuperación Ambiental y Social (PRAS) de Quintero Puchuncaví*. Ministerio del Medio Ambiente. Santiago, Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2019). *Volumen 4: Vulnerabilidad y riesgos en playas*. En Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.
- Molina Pereira, M. (2022). *Marejadas en Chile: características, avances y desafíos pendientes*. En *Hacia una Ley de Costas en Chile: bases para una Gestión integrada de Áreas Costeras*. Martínez, C., Cienfuegos, R., Barragán, J. M., Navarrete, S., Hidalgo, R., Arenas, F., & Fuentes, L. (editores).
- Nealy, J. L., Herman, M. W., Moore, G. L., Hayes, G. P., Benz, H. M., Bergman, E. A., & Barrientos, S. E. (2017). *Valparaíso earthquake sequence and the megathrust patchwork of central Chile*. *Geophysical Research Letters*, 44(17), 8865-8872.
- Özyurt, G., & Ergin, A. (2010). *Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator-based methodology for decision makers*. *Journal of Coastal Research*, 26(2), 265-273.
- Pantusa, D., D'Alessandro, F., Riefolo L., Principato F., Tomasicchio G. (2018). *Application of coastal vulnerability index. A case study along the Apulian Coastline, Italy*. *Water* 10(9):1208.

- Parise, C., Calliari, L., Krusche, N. (2009). *Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion*. Brazilian Journal of Oceanography, 57(3), 175-188.
- Parthasarathy, A., & Natesan, U. (2015). *Coastal vulnerability assessment: a case study on erosion and coastal change along Tuticorin, Gulf of Mannar*. Natural Hazards, 75(2), 1713-1729.
- Paskoff, R. (2010). *Geomorfología de la costa de Chile*. En: Díaz-Naveas, J., Frutos, J. Geología Marina de Chile. CONA: 76-83.
- Peragallo, R. (2020). *La producción estatal de las zonas de sacrificio en Chile: Un estudio en profundidad del caso de Quintero-Puchuncaví*. Tesis para optar al grado de Mg. en Governance of Risk and Resources. Universität Heidelberg & Pontificia Universidad Católica de Chile. 248 pp.
- Quinteros, L. (2018). *Zonas de sacrificio: por contaminación en Chile*. Memoria para optar al título de Arquitecto. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 177 pp.
- Ranasinghe, R. (2016). *Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review*. Earth-science reviews, 160, 320-332.
- Rivano, S. (1996). *Geología de las hojas Quillota y Portillo*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, 232 pp.
- Rocha, C., Antunes, C., & Catita, C. (2023). *Coastal indices to assess sea-level rise impacts-A brief review of the last decade*. Ocean & Coastal Management, 237, 106536.
- Rojas, G (2015). *Historia ambiental de la generación termoeléctrica en Ventanas. La producción ecológica de la compensación económica*. Tesis para optar al grado de Magíster en Geografía mención Recursos Territoriales. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 186 pp.
- Roukounis, C., & Tsihrintzis, V. (2022). *Indices of coastal vulnerability to climate change: a review*. Environmental Processes, 9(2), 29.
- Ruiz, S. & Saragoni, G. (2005). *Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos de sismogénesis y los efectos del suelo*. IX Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Concepción, Chile, 16–19 de noviembre.
- Saaty, T. L. (2008). *Decision making with the analytic hierarchy process*. International journal of services sciences, 1(1), 83-98.

- Sekovski, I., Del Río, L., Armaroli, C. (2020). *Development of a coastal vulnerability index using analytical hierarchy process and application to Ravenna province (Italy)*. *Ocean Coast. Manage.* 183, 104982.
- Serafim, M., Siegle, E., Corsi, A., & Bonetti, J. (2019). *Coastal vulnerability to wave impacts using a multi-criteria index: Santa Catarina (Brazil)*. *Journal of environmental management*, 230, 21-32.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. (1992). *Glosario de Marea y Corrientes*. 2° Edición. Publicación 3013.
- Sfreddo, G., da Silva, T., & Barboza, E. (2023). *Assessment of local coastal vulnerability based on a global model: A case study in Jaguaruna, southern Brazil*. *Regional Studies in Marine Science*, 61, 102824.
- Short, A. (1999 a). *Beaches*. En Short, A. [ed.] *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. J. Wiley & Sons Ltd: 3-20.
- Short, A. (1999 b). *Wave-Dominated Beaches*. En Short, A. [ed.] *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. J. Wiley & Sons Ltd: 173-203.
- Sippl, C., Moreno, M., & Benavente, R. (2021). *Microseismicity appears to outline highly coupled regions on the Central Chile megathrust*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(11), e2021JB022252.
- Sousa, P., Siegle, E., Gonzalez Tessler, M. (2013). *Vulnerability assessment of massaguaçu beach (SE Brazil)*. *Ocean Coast Manag.* 77, 24–30.
- Takahashi, K. (2017). *Fenómeno El Niño: “Global” vs “Costero”*. Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño, Instituto Geofísico del Perú, 4 (4), 4-7.
- Toimil, A., Losada, I. J., Camus, P., & Diaz-Simal, P. (2017). *Managing coastal erosion under climate change at the regional scale*. *Coastal Engineering*, 128, 106-122.
- Torres, V., Márquez, A., Bolongaro, A., Chavaría, J., Expósito, G., & Márquez, E. (2010). *Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debido a efectos del cambio climático*. pp 325-344. En *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. SEMARNAT-INE. UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Verdejo, K. (2014). *Discursos y apropiación de espacio en Caleta Ventanas, 1960-2011*. Memoria para optar al Título de Antropóloga Social. Escuela de Antropología, Universidad Academia de Humanismo Cristiano. Santiago, Chile. 178 pp.

- Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beyá, J. & Molina M. (2017). *El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central*. Latin American Journal of Aquatic Research, 622-648.

Recursos en línea

- Astudillo, D. (2017). Efecto marejadas: se pierden más de 6 km de playas en la Región de Valparaíso. *La Tercera*. [en línea] 28 de junio de 2017. Recuperado en: <<http://www2.latercera.com/noticia/efecto-marejadas-valparaiso/>> Consultado el: 15 marzo de 2023.
- Barría, A. (2017). Marejadas han causado daños por US\$ 11,5 millones en la V Región, en menos de dos años. *El Mercurio, E&N*. [en línea] 16 de julio de 2017. Recuperado en: <<http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=379589>> Consultado el: 8 de junio de 2023.
- Centro de Ciencias Climáticas y Resiliencia (CR2). Explorador Climático [en línea]. Recuperado en: <<http://explorador.cr2.cl/>> Consultado el: 26 de septiembre de 2021.
- Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil. [en línea]. Recuperado en: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>> Consultado el: 26 de septiembre de 2021.
- Consejo Nacional de Monumentos Nacionales. Bosque Las Petras de Quintero y su entorno. [en línea]. Recuperado en: <<https://www.monumentos.gob.cl/monumentos/santuarios-de-la-naturaleza/bosque-petras-quintero-su-entorno>> Consultado el: 11 de octubre de 2023.
- Cooperativa. (2017). Armada emitió alerta por marejadas anormales en casi toda la costa del país. *Cooperativa en internet*. [en línea] 8 de agosto, 2017. Recuperado en: <<https://cooperativa.cl/noticias/pais/tiempo/armada-emitio-alerta-por-marejadas-anormales-en-casi-toda-la-costa-del/2017-08-07/122209.html>> Consultado el: 26 septiembre de 2021.
- Equipo Crónica. (2017). Fuerte oleaje arrasó con un centro de madres en Horcón. *El Mercurio de Valparaíso*. [en línea]. 26 de junio de 2017. Recuperado en: <<https://www.mercuriovalpo.cl/impresa/2017/06/26/full/cuerpo-principal/3/>> Consultado el: 11 de octubre de 2021.
- Explorador de Energía Eólica. [en línea]. Recuperado en: <<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>> [consulta: 31 agosto 2018]. Consultado el: 26 de septiembre de 2021.

- Fuentes, R. (2017). Cómo afecta El Niño costero a Chile, el fenómeno que ha dejado a más de 60 mil damnificados en Perú. *La Tercera*. [en línea] 17 de marzo de 2017. <<https://www.latercera.com/noticia/afecta-nino-costero-chile-fenomeno-ha-dejado-mas-60-mil-damnificados-peru/>> Consultado el: el 15 de agosto de 2023.

- Fundación Terram. (2014). Minuta sobre derrame de petróleo en la Bahía de Quintero. [en línea]. Recuperado en: <<https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmTIPO=DOCUMENTOCOMISION&prmID=22130>> Consultado el: 10 de octubre de 2023.

- GISWEB. [en línea]. Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá. España. Recuperado en: <https://www.geogra.uah.es/gisweb/1modulosespanyol/AnalisisTerreno/DEMModule/DEM_T_SI.htm> Consultado el: 10 de abril de 2021.

- GNL. (2015 a). Elementos para una estrategia de desarrollo económico: Caleta de Pescadores Artesanales Loncura de Quintero. [en línea]. Recuperado en: <<http://diseno.microexpertos.cl/gnlquintero/2013/pdf/libros/loncura.pdf>> Consultado el: 10 de septiembre de 2023.

- GNL. (2015 b). Elementos para una estrategia de desarrollo económico: Caleta de Pescadores Artesanales El Manzano de Quintero. [en línea]. Recuperado en: <<https://issuu.com/jorgeidee/docs/manzano>> Consultado el: 10 de septiembre de 2023.

- Gobierno Regional de Valparaíso. (2014). Plano Plan Regulador Metropolitano de Valparaíso. [en línea]. Recuperado en: <<https://www.munipuchuncavi.cl/pdf/transparencia/planregulador/2.pdf>>. Consultado el: 20 de abril de 2023.

- Guía Minera de Chile. [en línea]. Recuperado en: <<https://www.guiaminera.cl/codelco-division-ventanas/>> Consultado el: 10 de octubre de 2023.

- Historia de mi pueblo. [en línea]. Recuperado en: <<https://sites.ualberta.ca/~fvelasqu/qtrohistoria.htm>> Consultado el: 23 de Agosto de 2021.

- Ilustre Municipalidad de Puchuncaví. (2009). Plano Plan Regulador Comunal de Puchuncaví, Horcón, y Ventana. [en línea]. Recuperado en: <<https://www.munipuchuncavi.cl/pdf/transparencia/planregulador/horcon%20ventanas.pdf>> Consultado el: 20 de abril de 2023.

- Ilustre Municipalidad de Quintero. (1984). Plano Plan Regulador Comunal Quintero. [en línea]. Recuperado en: <<http://discap.muniquintero.cl/gobiernotransparente/archivos%20compartmentos/3.%20A>>

[ctos%20y%20Resoluciones/3.8%20Plan%20Regulador%20Comunal/2.%20Plano%20Regulador%20de%20Quintero.pdf](#)> Consultado el: 20 de abril de 2023.

- Mayorga, F. (2023). El esperado (y sentido) cierre de la fundición Ventanas de Codelco. *La Tercera*. [en línea] 21 de mayo de 2023. Recuperado en: <<https://www.latercera.com/pulso/noticia/el-esperado-y-sentido-cierre-de-la-fundicion-ventanas-de-codelco/F2YRB6KF3ZFZJLWJYYRSGFKOPE/>> Consultado el: 10 de octubre de 2023.
- Mesa de noticias de El Mostrador. (2022). Ministra Rojas dice que empresas del cordón industrial Quintero-Puchuncaví «van a salir» y que Chile se dirige a la «desfosilización». *El Mostrador*. [en línea] 26 de junio de 2022. Recuperado en: <<https://www.elmostrador.cl/destacado/2022/06/26/ministra-rojas-dice-que-empresas-del-cordon-industrial-quintero-puchuncavi-van-a-salir-y-que-chile-se-dirige-a-la-desfosilizacion/>> Consultado el: 10 de octubre de 2023.
- ONU. (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. [en línea]. Recuperado en: <https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf> Consultado el: 10 de abril de 2021.
- Puerto Ventanas S.A. [en línea]. Recuperado en: <<https://puertoventanas.cl/nuestra-empresa/>> Consultado el: 5 de octubre de 2023.
- Resolución exenta N° 452, SUBPESCA. (2021). Aprueba proyecto técnico y autoriza para realizar actividades de acuicultura experimental en área de manejo Ventanas (Punta Lunes), Región de Valparaíso. [en línea]. 16 de febrero de 2021. Recuperado en: <https://www.subpesca.cl/portal/615/articles-109973_documento.pdf> Consultado en: 10 de agosto 2023.
- Resultados Censo. (2017). [en línea]. Instituto Nacional de Estadística. Recuperado en: <<http://resultados.censo2017.cl/>> Consultado el: 23 de marzo de 2023.
- Riquelme, J. (2017). Goleta pesquera encalló en Quintero: municipio advierte daños serios en borde costero. *Soy Chile*. [en línea] 25 de junio de 2017. Recuperado en: <<https://www.soychile.cl/Valparaiso/Sociedad/2017/06/25/472078/Goleta-pesquera-encallo-en-Quintero-municipio-advierte-danos-serios-en-borde-costero.aspx>> Consultado el: 26 de septiembre de 2021.
- Rodríguez, Claudia. (2019). Informe comisión especial investigadora sobre causas de alta contaminación ambiental, especialmente en Concón, Quintero y Puchuncaví y de responsabilidades en ejecución del plan de descontaminación. [en línea]. 23 de enero de 2019. Recuperado en: <<https://www.camara.cl/verDoc>.

[aspx?prmTipo=SIAL&prmID=45601&formato=pdf](#)> Consultado el: 5 de octubre de 2023.

- Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA). [en línea]. Registro Organización Artesanal (RPA). Recuperado en: <http://prod.registropublico.sernapesca.cl/reportes/regorganizacionartesanal_publico/index.php> Consultado el 10 de agosto de 2023.
- Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). [en línea]. Recuperado en: <<https://sinca.mma.gob.cl/>> Consultado el: 26 de septiembre de 2021.
- Tabla de Mareas. [en línea]. Recuperado en: <<https://tablademareas.com>> Consultado el: 26 de septiembre de 2021.
- Union of Concerned Scientists. (2013). Causes of sea level rise. Union of Concerned Scientists. [en línea]. Cambridge, United States of America. 8 pp. <<https://www.ucsusa.org/global-warming/science-and-impacts/impacts/causes-of-sea-level-rise.html#.WxBep9KjIU>> Consultado el: 10 de mayo de 2021.
- Valverde, N. (2015). Lo que el viento se llevó, según los municipios tras el temporal. *La Estrella de Valparaíso*. [en línea]. 10 de agosto de 2015. Recuperado en: <<https://www.estrellavalpo.cl/impresa/2015/08/10/full/cuerpo-principal/5/>> Consultado el: 11 de octubre de 2021.
- Vergara, D. (2013). Loncura: una historia que contar. [en línea]. *Programa Servicio País Cultura. Taller de Historia Local*. 83 pp. Recuperado en: <<https://www.cultura.gob.cl/wp-content/uploads/2013/02/Loncura-ok5.pdf>> Consultado el: 23 de Agosto de 2021.

Recursos Audiovisuales en línea

- Cosas Cotidianas de La Vida. (8 de agosto de 2015). Temporal V Región embarcaciones destruidas Quintero [Archivo de Vídeo]. Youtube. <<https://www.youtube.com/watch?v=DwNLpTldKEY>>
- Dunas de Ritoque. (8 de agosto de 2015). Embarcaciones varadas Caleta El Manzano Quintero [Archivo de Vídeo]. Youtube. <<https://www.youtube.com/watch?v=jSrijLWB9P4>>.
- Francisco Arriagada. (9 de agosto de 2015). Loncura Borde Costero Quintero Loncura [Archivo de video]. Youtube. <<https://www.youtube.com/watch?v=zQixNoTwd4Y>>.
- 24 Horas, TVN. (2017). [Archivo de video]. Recuperado en: <<https://t.co/dXvbzFFCnO>>. Consultado el: 26 de septiembre de 2021.

9. ANEXOS

Anexo N° 1: Zonas de uso de suelo y uso actual por localidad, de acuerdo a plan regulador vigente.

Localidad	Zona de uso de suelo	Uso actual	Clase de uso	Características	Otros
Ventana*	Z3	Residencial	Vivienda	Residencial	S/I (Sin Información)
		Residencial	Vivienda	Residencial	S/I
	ZEQC	Equipamiento	Comercio	Comercio	S/I
		Equipamiento	Comercio	Embarcadero	Caleta Ventanas
	Z3	Residencial	Local destinado a hospedaje	Turístico (cabañas)	Cooperativa Rancho Eugenia
	Z1	Equipamiento	Comercio	Comercio	S/I
		Equipamiento	Comercio	Comercio	En desuso
		Equipamiento	Comercio	Comercio	Restaurant
		Residencial	Local destinado a hospedaje	Comercio	Residencia turística
		Residencial	Local destinado a hospedaje	Comercio	Residencia turística
		Residencial	Vivienda	Residencial	S/I
		Equipamiento	Comercio	Comercio	Aparente desuso
		Equipamiento	Comercio	Comercio	Aparente desuso
		Equipamiento	Comercio	Comercio	Savory
		Equipamiento	Comercio	Comercio	Almacén
		Equipamiento	Comercio	Comercio	Bazar Condorito
		Equipamiento	Esparcimiento	Esparcimiento	Entretenciones Don Lalo
		Equipamiento	Comercio	Comercio	Restaurant Don Cangrejo (1er piso); Nueva Hosteria Ventanas (2do piso)
		Residencial	Local destinado a hospedaje	Comercio	Cabañas Las Ventanas
		Equipamiento	Comercio	Comercio	Restaurant La Farola
	Residencial	Vivienda	Residencial	S/I	
	Equipamiento	Social	Social	Centro Comunitario Puerto Abierto (R.S.E. empresa PVSA)	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	S/I	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	S/I	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Comida rápida Las Delicias	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Comida rápida y servicios higiénicos La Picá de Marco	
	Equipamiento	Esparcimiento	Esparcimiento	Ribotta Entretenciones	
	Residencial	Local destinado a hospedaje	Comercio	Residencia turística	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Comida rápida La Picá de Angelito	
	Residencial	Vivienda	Residencial	S/I	
	Residencial	Local destinado a hospedaje	Comercio	Residencia turística	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Restaurant, estacionamiento privado y servicios sanitarios.	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	S/I	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Restaurant La Frontera	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	S/I	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Comida rápida Norris	
	Equipamiento	Seguridad	Seguridad	Retén Ventanas	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Almacén	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Almacén Paulina	
	Equipamiento	Culto	Culto	Templo Testigos de Jehova	
	Residencial	Vivienda	Residencial	S/I	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Botillería y abarrotes Santa Marta	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Bar restaurant pub	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Feria Artesanal	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Feria Artesanal	
	Residencial	Vivienda	Residencial	S/I	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Ferretería Industrial	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	S/I	
	Residencial	Vivienda	Residencial	S/I	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Feria, comercios varios	
ZEC	Equipamiento	Comercio	Comercio	Venta de comida y artículos de playa (Kiosko de temporada)	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Venta de comida y artículos de playa (Kiosko de temporada)	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Venta de comida y artículos de playa (Kiosko de temporada)	
	Equipamiento	Salud	Comercio	Primeros auxilios salvavidas	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Venta de comida y artículos de playa (Kiosko de temporada)	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Venta de comida y artículos de playa (Kiosko de temporada)	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Puesto feria artesanal	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Puesto feria artesanal	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Puesto feria artesanal	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Puesto feria artesanal	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Puesto feria artesanal	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Puesto feria artesanal	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Puesto feria artesanal	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Puesto feria artesanal	
	Equipamiento	Comercio	Comercio	Puesto feria artesanal	
Sector Industrial **	ZEUPP (Zona Productiva Peligrosa, Plano Regulador Regional Valpo.)	Infraestructura	Energética	Industrial	AES Gener
		Infraestructura	Transporte	Industrial	Puerto Ventanas
		Actividades productivas	Explotación de minas y canteras	Industrial	Codeco División Ventanas
		Actividades productivas	Industrial	Industrial	Oxiqum Puerto El Bato
		Infraestructura	Energética	Industrial	Enap Refinería de Petróleo
		Infraestructura	Energética	Industrial	GNL Quintero, Muelle y Planta Regasificadora
Infraestructura	Energética	Industrial	Copec Planta de Lubricantes		

Anexo N° 2: Valores del área (m²) continental del litoral arenoso de la bahía de Quintero, para cada fecha según unidad de evaluación.

		ÁREA (m ²) CONTINENTAL																	
		17-dic-04	28-abr-07	22-mar-10	01-feb-11	01-dic-12	14-jul-13	24-jul-14	13-mar-15	30-ago-15	18-sep-2015	03-abr-16	19-ene-17	13-ago-17	21-sep-2017	15-mar-18	12-ago-18	08-mar-19	05-abr-20
VENTANA	1	12451,26	11125,81	10992,87	8631,12	9642,13	7102,81	5304,85	8780,18	380,35	11167,24	8979,77	10284,50	7016,21	3566,49	3478,97	1032,90	3640,71	2582,97
	2	16182,26	13699,59	14967,81	12075,72	13023,60	11087,50	8785,09	14052,30	3862,64	15064,14	12475,61	13960,22	7717,91	4104,51	6877,31	1597,35	5221,92	6533,61
	3	18920,27	15264,71	18500,74	14940,95	15557,44	9912,42	10650,40	18671,51	3537,24	18105,55	16661,95	17225,88	7934,16	5248,65	11708,87	11708,87	7948,00	10524,50
INDUSTRIAL	1	21654,59	18294,17	26131,46	18587,27	21080,35	18892,72	18202,00	25215,22	12371,62	21040,82	23478,79	21897,75	15155,50	13256,08	18304,21	11832,00	14613,91	16330,19
	2	14263,29	9738,42	16265,52	10845,75	13983,97	8726,97	9787,68	20967,05	6578,55	14436,17	20106,85	18267,39	7834,86	5988,18	10534,15	5184,64	10939,63	9602,95
	3	11982,37	12303,46	18061,28	13105,30	14947,28	6237,05	11412,05	19388,19	4261,94	12495,11	14811,59	16535,33	7283,54	4329,12	10340,00	3559,23	8494,64	8602,86
	4	18133,38	16474,24	20511,21	15703,57	16190,52	12239,84	13714,66	18770,99	8805,37	11920,60	13383,08	15460,15	10000,66	6935,37	12184,30	5985,45	10394,27	9470,92
	5	17733,66	13579,95	18512,11	15114,11	15302,83	9754,46	12189,18	18293,91	6267,52	10426,18	11013,17	15423,37	8035,95	6650,41	10642,63	5461,24	10563,05	9470,92
	6	16873,19	12516,53	17765,00	15316,25	13923,55	8526,29	9996,25	16244,48	7162,30	7823,80	9374,37	14054,07	6926,90	4997,34	9441,61	4599,07	7915,90	10138,29
	7	16481,83	10913,77	15481,70	13748,76	11693,04	6892,50	8921,11	13924,75	5095,56	6389,09	6234,82	14388,48	6255,95	4791,00	7884,65	5438,41	6989,13	8920,65
	8	15994,43	15857,25	14359,88	10337,36	11063,95	7430,71	8574,73	13366,75	1758,78	5437,12	8501,84	13351,37	5582,15	4528,19	8076,87	5841,58	6772,51	7566,23
	9	15842,94	18327,68	17617,03	11178,22	11425,64	6489,02	7774,20	14416,05	776,01	4840,48	9801,85	14117,06	5729,93	5406,95	10361,36	4999,92	7381,24	7110,97
	10	15971,04	16284,90	16077,31	11698,63	10594,65	5792,71	7316,59	12676,02	780,82	5539,36	9023,33	13852,81	4452,35	4024,95	8709,69	3193,28	7676,18	5563,70
	11	13718,10	14454,61	13756,39	9753,03	9147,26	5585,03	5776,44	12196,75	0,00	3548,42	3402,20	12762,88	3050,20	2851,94	7755,41	2876,14	2876,14	5958,20
	12	13662,83	14172,46	14474,19	9979,73	10197,00	5263,57	7234,42	13142,14	0,00	3453,50	4979,32	13061,43	4233,37	2040,31	8806,40	3988,49	7022,64	6390,95
	13	13652,97	17659,25	14175,15	9406,57	9516,08	6559,76	6660,71	11384,87	121,11	6127,51	7994,96	14145,80	6649,89	3910,83	9946,48	5669,36	8808,67	6846,63
	14	15733,65	19758,84	15897,39	11906,37	11751,30	8527,62	7939,74	12623,40	1076,37	8405,73	11873,84	16709,89	8985,57	7034,24	12491,16	10086,66	11797,36	10318,90
LONCURA	1	13658,47	16903,51	18220,37	10379,22	10362,02	7133,72	6416,27	10765,05	863,73	7756,18	12983,51	16699,27	6542,55	5374,09	10842,45	7776,07	11594,96	7508,36
	2	13006,58	16929,63	19648,83	10413,15	8974,62	7403,40	5661,46	11880,21	569,35	8143,47	13403,82	18637,57	7100,24	6751,12	11120,39	6078,01	13387,87	7655,01
	3	23391,34	23553,19	23515,31	17992,22	16276,83	16511,31	13555,58	21755,89	7858,49	17189,61	22120,54	25810,02	15557,05	12181,58	18625,26	9897,13	18613,01	15848,28
	4	17684,12	12800,31	19018,56	11385,51	12404,76	8719,33	7008,31	15694,27	4898,89	9206,03	13288,06	15969,58	7842,43	5384,54	10145,28	5818,23	12178,22	10463,19
	5	16228,18	11293,58	16934,92	10613,55	11439,82	7110,07	3289,10	13277,01	1186,97	7125,95	10404,32	13160,94	4647,46	4091,02	8935,43	5657,75	9194,79	10185,54
QUINTERO	1	15293,60	10808,02	14247,35	8481,29	10846,48	6374,20	2407,75	11619,56	2971,24	6105,62	7955,61	12050,71	3651,83	2325,23	6905,77	4706,48	6824,59	7826,70
	2	16917,50	16650,92	13402,87	11332,12	12866,69	10989,81	7197,85	13561,63	6541,41	8412,34	9284,14	11612,90	7162,93	5673,81	9037,15	6853,38	7212,57	9707,21
	3	15710,97	19964,25	13946,77	11021,83	11920,91	11707,36	8453,14	12612,26	4493,19	9168,62	9489,20	10347,63	9063,39	6219,52	6936,07	5053,02	5247,43	8830,40
	4	13317,11	16584,10	11220,91	9800,20	9648,06	10176,37	8173,53	12031,73	7132,78	10145,83	8574,19	9249,04	7945,13	7307,29	7405,03	8186,88	6674,03	9270,45
	5	7791,17	7132,46	7256,79	6506,75	3929,51	4954,83	3663,82	6211,56	0,00	5018,20	4899,58	5611,59	4392,22	3020,09	4491,76	3562,16	5261,91	5319,95

Anexo N° 3: Longitud (m) de la línea litoral, frente al litoral arenoso, de la bahía de Quintero para cada fecha según unidad de evaluación.

		LONGITUD (m)																	
		17-dic-04	28-abr-07	22-mar-10	01-feb-11	01-dic-12	14-jul-13	24-jul-14	13-mar-15	30-ago-15	18-sep-2015	03-abr-16	19-ene-17	13-ago-17	21-sep-2017	15-mar-18	12-ago-18	08-mar-19	05-abr-20
VENTANA	1	244	238	248	268	261	273	280	262	308	245	274	248	265	288	290	301	298	290
	2	295	287	317	293	292	294	297	295	306	287	288	289	293	299	295	310	295	302
	3	293	293	312	295	293	299	297	302	323	299	291	290	300	302	294	282	295	299
INDUSTRIAL	1	273	286	269	275	275	279	274	271	314	267	262	271	295	283	277	274	278	279
	2	307	305	326	335	306	320	311	306	309	307	304	300	314	312	305	305	304	312
	3	312	312	332	309	305	316	312	313	306	306	304	308	305	309	307	313	304	309
	4	300	295	302	305	299	304	301	298	323	300	299	298	302	298	297	299	298	307
	5	307	299	332	311	299	298	305	301	303	301	300	300	302	300	299	303	300	309
	6	316	299	340	308	305	304	300	303	301	303	299	299	301	305	301	313	314	304
	7	325	301	360	304	303	306	303	310	306	303	299	298	304	303	302	301	302	306
	8	305	305	435	303	303	304	302	307	314	303	299	298	302	305	303	305	304	315
	9	311	294	306	301	298	308	302	299	305	300	297	294	301	301	299	306	304	321
	10	301	302	332	301	303	306	308	305	318	305	302	305	305	309	306	309	303	310
	11	302	299	316	304	303	306	310	318	300	301	301	303	305	308	303	311	302	322
	12	301	300	367	312	306	310	311	310	300	302	301	300	301	306	304	329	304	315
	13	337	300	403	302	308	305	309	304	305	303	299	298	302	311	304	347	303	314
	14	371	298	354	300	305	314	315	306	310	300	299	298	305	331	305	307	301	305
LONCURA	1	312	295	328	301	299	306	307	302	323	303	296	292	307	314	302	309	297	310
	2	315	290	293	299	300	301	305	308	318	295	291	287	308	301	296	304	292	308
	3	367	352	374	325	320	339	330	328	338	324	321	352	368	319	311	327	321	315
	4	365	376	376	327	323	333	342	343	369	325	335	339	322	318	322	316	316	324
	5	342	295	297	299	305	299	316	300	370	295	294	299	298	299	298	298	296	317
QUINTERO	1	316	296	311	297	299	302	316	300	426	297	296	309	299	300	299	299	298	318
	2	307	291	311	303	300	300	311	297	319	295	294	303	297	305	296	299	296	302
	3	293	279	298	289	300	293	295	292	307	289	290	288	296	301	307	297	299	291
	4	322	315	330	342	332	332	340	338	333	323	327	333	325	329	329	324	333	331
	5	140	130	133	137	168	136	151	135	102	137	136	128	125	152	149	194	129	131

Anexo N° 4: Valores calculados para el desplazamiento de la línea litoral, DLC (m), para cada fecha según unidad de evaluación en el periodo primavera-verano.

	Unidad de evaluación	DLC (m) PRIMAVERA-VERANO POR UNIDAD DE EVALUACIÓN						
		2004- mar 2010	2004-feb 2011	2004-dic 2012	2004-mar 2015	2004-ene 2017	2004-mar 2018	2004-mar 2019
VENTANA	1	-5,88	-14,25	-10,76	-14,01	-8,74	-30,94	-29,57
	2	-3,83	-14,02	-10,82	-7,22	-7,69	-31,54	-37,15
	3	-1,34	-13,49	-11,48	-0,82	-5,84	-24,53	-37,19
INDUSTRIAL	1	16,64	-11,15	-2,09	13,14	0,90	-12,10	-25,33
	2	6,14	-10,20	-0,91	21,91	13,35	-12,23	-10,93
	3	18,31	3,63	9,72	23,66	14,78	-5,35	-11,47
	4	7,87	-7,97	-6,50	2,14	-8,97	-20,03	-25,97
	5	2,34	-8,42	-8,13	1,86	-7,70	-23,72	-23,90
	6	2,62	-5,06	-9,67	-2,07	-9,43	-24,69	-28,53
	7	-2,78	-8,99	-15,80	-8,25	-7,02	-28,47	-31,43
	8	-3,76	-18,67	-16,27	-8,56	-8,87	-26,13	-30,34
	9	5,80	-15,50	-14,82	-4,77	-5,87	-18,33	-27,83
	10	0,32	-14,19	-17,74	-10,80	-6,95	-23,73	-27,38
	11	0,12	-13,04	-15,09	-4,78	-3,15	-19,68	-35,90
	12	2,21	-11,80	-11,33	-1,68	-2,00	-15,98	-21,84
	13	1,30	-14,06	-13,43	-7,46	1,65	-12,19	-15,99
	14	0,46	-12,76	-13,06	-10,16	3,28	-10,63	-13,08
LONCURA	1	13,91	-10,89	-11,02	-9,58	10,41	-9,32	-6,95
	2	22,67	-8,67	-13,44	-3,66	19,62	-6,37	1,31
	3	0,33	-16,61	-22,23	-4,99	6,87	-15,33	-14,89
	4	3,55	-19,26	-16,34	-5,80	-5,06	-23,41	-17,42
	5	2,38	-18,78	-15,70	-9,84	-10,26	-24,47	-23,76
QUINTERO	1	-3,36	-22,94	-14,87	-12,25	-10,49	-28,05	-28,42
	2	-11,30	-18,43	-13,50	-11,30	-17,51	-26,62	-32,79
	3	-5,92	-16,23	-12,63	-10,61	-18,62	-28,58	-35,00
	4	-6,35	-10,28	-11,05	-3,80	-12,22	-17,97	-19,95
	5	-4,02	-9,38	-22,99	-11,70	-17,03	-22,14	-19,61

Anexo N° 5: Valores calculados para el desplazamiento de la línea litoral, DLC (m), para cada fecha según unidad de evaluación en el periodo otoño-invierno.

Unidad de evaluación		DLC (m) OTOÑO-INVIERNO POR UNIDAD DE EVALUACIÓN									
		2004-abr 2007	2004-jul 2013	2004-jul 2014	2004-ago 2015	2004-sep 2015	2004-abr 2016	2004-ago 2017	2004-sep 2017	2004- ago 2018	2004-abr 2020
VENTANA	1	-5,57	-19,59	-25,52	-39,15	-5,24	-12,67	-20,51	-30,85	-37,93	-33,98
	2	-8,65	-17,33	-24,91	-40,20	-3,90	-12,87	-28,89	-40,39	-47,05	-31,93
	3	-12,48	-30,13	-27,84	-47,56	-2,72	-7,76	-36,62	-45,27	-25,57	-28,06
INDUSTRIAL	1	-11,75	-9,90	-12,60	-29,55	-2,30	6,96	-22,03	-29,68	-35,85	-19,09
	2	-14,84	-17,30	-14,39	-24,86	0,56	19,22	-20,47	-26,52	-29,77	-14,93
	3	1,03	-18,18	-1,83	-25,21	1,68	9,31	-15,41	-24,77	-26,91	-10,95
	4	-5,62	-19,39	-14,68	-28,88	-20,71	-15,89	-26,93	-37,58	-40,63	-28,21
	5	-13,89	-26,78	-18,18	-37,87	-24,28	-22,40	-32,11	-36,94	-40,50	-26,78
	6	-14,57	-27,46	-22,92	-32,29	-29,87	-25,08	-33,04	-38,94	-39,21	-22,15
	7	-18,50	-31,34	-24,95	-37,26	-33,31	-34,27	-33,64	-38,58	-36,69	-24,72
	8	-0,45	-28,17	-24,57	-45,37	-34,84	-25,06	-34,48	-37,59	-33,29	-26,71
	9	8,45	-30,37	-26,72	-49,33	-36,67	-20,34	-33,60	-34,67	-35,43	-27,16
	10	1,04	-33,26	-28,10	-47,84	-34,20	-23,01	-37,77	-38,66	-41,35	-33,61
	11	2,46	-26,58	-25,62	-45,73	-33,79	-34,27	-34,98	-35,28	-34,86	-24,13
	12	1,70	-27,09	-20,67	-45,54	-33,81	-28,85	-31,33	-37,98	-29,41	-23,06
	13	13,35	-23,26	-22,63	-44,36	-24,84	-18,92	-23,19	-31,33	-23,01	-21,66
	14	13,51	-22,95	-24,74	-47,21	-24,43	-12,91	-22,12	-26,28	-18,39	-17,74
LONCURA	1	11,00	-21,32	-23,59	-39,65	-19,48	-2,28	-23,18	-26,38	-19,04	-19,86
	2	13,53	-18,62	-24,08	-39,12	-16,49	1,37	-19,18	-20,78	-22,79	-17,39
	3	0,46	-20,30	-29,81	-45,94	-19,14	-3,96	-21,29	-35,14	-41,27	-23,98
	4	-12,99	-26,92	-31,22	-34,68	-26,09	-13,12	-30,56	-38,68	-37,55	-22,29
	5	-16,73	-30,50	-40,95	-40,71	-30,86	-19,81	-38,86	-40,59	-35,47	-19,07
QUINTERO	1	-15,15	-29,53	-40,78	-28,92	-30,94	-24,79	-38,94	-43,23	-35,41	-23,47
	2	-0,92	-19,76	-31,25	-32,54	-28,83	-25,96	-32,84	-36,86	-33,66	-23,89
	3	15,24	-13,66	-24,60	-36,54	-22,64	-21,45	-22,46	-31,53	-35,89	-23,64
	4	10,37	-9,46	-15,13	-18,59	-9,82	-14,50	-16,53	-18,27	-15,83	-12,21
	5	-5,07	-20,86	-27,33	-76,07	-20,24	-21,26	-27,19	-31,39	-21,80	-18,89

Anexo N° 6: Valores calculados para la tasa de erosión costera, TEC (m/año), para cada fecha según unidad de evaluación en el periodo primavera-verano.

	Unidad de evaluación	TEC (m/año) PRIMAVERA-VERANO POR UNIDAD DE EVALUACIÓN						
		2004-mar 2010	2004-feb 2011	2004-dic 2012	2004-mar 2015	2004-ene 2017	2004-mar 2018	2004-mar 2019
VENTANA	1	-0,98	-2,04	-1,35	-1,27	-0,67	-2,21	-1,97
	2	-0,64	-2,00	-1,35	-0,66	-0,59	-2,25	-2,48
	3	-0,22	-1,93	-1,43	-0,07	-0,45	-1,75	-2,48
INDUSTRIAL	1	2,77	-1,59	-0,26	1,19	0,07	-0,86	-1,69
	2	1,02	-1,46	-0,11	1,99	1,03	-0,87	-0,73
	3	3,05	0,52	1,22	2,15	1,14	-0,38	-0,76
	4	1,31	-1,14	-0,81	0,19	-0,69	-1,43	-1,73
	5	0,39	-1,20	-1,02	0,17	-0,59	-1,69	-1,59
	6	0,44	-0,72	-1,21	-0,19	-0,73	-1,76	-1,90
	7	-0,46	-1,28	-1,98	-0,75	-0,54	-2,03	-2,10
	8	-0,63	-2,67	-2,03	-0,78	-0,68	-1,87	-2,02
	9	0,97	-2,21	-1,85	-0,43	-0,45	-1,31	-1,86
	10	0,05	-2,03	-2,22	-0,98	-0,53	-1,69	-1,83
	11	0,02	-1,86	-1,89	-0,43	-0,24	-1,41	-2,39
	12	0,37	-1,69	-1,42	-0,15	-0,15	-1,14	-1,46
	13	0,22	-2,01	-1,68	-0,68	0,13	-0,87	-1,07
	14	0,08	-1,82	-1,63	-0,92	0,25	-0,76	-0,87
LONCURA	1	2,32	-1,56	-1,38	-0,87	0,80	-0,67	-0,46
	2	3,78	-1,24	-1,68	-0,33	1,51	-0,46	0,09
	3	0,06	-2,37	-2,78	-0,45	0,53	-1,09	-0,99
	4	0,59	-2,75	-2,04	-0,53	-0,39	-1,67	-1,16
	5	0,40	-2,68	-1,96	-0,89	-0,79	-1,75	-1,58
QUINTERO	1	-0,56	-3,28	-1,86	-1,11	-0,81	-2,00	-1,89
	2	-1,88	-2,63	-1,69	-1,03	-1,35	-1,90	-2,19
	3	-0,99	-2,32	-1,58	-0,96	-1,43	-2,04	-2,33
	4	-1,06	-1,47	-1,38	-0,35	-0,94	-1,28	-1,33
	5	-0,67	-1,34	-2,87	-1,06	-1,31	-1,58	-1,31

Anexo N° 7: Valores calculados para la tasa de erosión costera, TEC (m/año), para cada fecha según unidad de evaluación en el periodo otoño-invierno.

Unidad de evaluación	TEC (m/año) OTOÑO-INVIERNO POR UNIDAD DE EVALUACIÓN										
	2004-abr 2007	2004-jul 2013	2004-jul 2014	2004-ago 2015	2004-sep 2015	2004-abr 2016	2004-ago 2017	2004-sep 2017	2004-ago 2018	2004-abr 2020	
VENTANA	1	-1,86	-2,18	-2,55	-3,56	-0,48	-1,06	-1,58	-2,37	-2,71	-2,12
	2	-2,88	-1,93	-2,49	-3,65	-0,35	-1,07	-2,22	-3,11	-3,36	-2,00
	3	-4,16	-3,35	-2,78	-4,32	-0,25	-0,65	-2,82	-3,48	-1,83	-1,75
INDUSTRIAL	1	-3,92	-1,10	-1,26	-2,69	-0,21	0,58	-1,69	-2,28	-2,56	-1,19
	2	-4,95	-1,92	-1,44	-2,26	0,05	1,60	-1,57	-2,04	-2,13	-0,93
	3	0,34	-2,02	-0,18	-2,29	0,15	0,78	-1,19	-1,91	-1,92	-0,68
	4	-1,87	-2,15	-1,47	-2,63	-1,88	-1,32	-2,07	-2,89	-2,90	-1,76
	5	-4,63	-2,98	-1,82	-3,44	-2,21	-1,87	-2,47	-2,84	-2,89	-1,67
	6	-4,86	-3,05	-2,29	-2,94	-2,72	-2,09	-2,54	-3,00	-2,80	-1,38
	7	-6,17	-3,48	-2,50	-3,39	-3,03	-2,86	-2,59	-2,97	-2,62	-1,55
	8	-0,15	-3,13	-2,46	-4,12	-3,17	-2,09	-2,65	-2,89	-2,38	-1,67
	9	2,82	-3,37	-2,67	-4,48	-3,33	-1,70	-2,58	-2,67	-2,53	-1,70
	10	0,35	-3,70	-2,81	-4,35	-3,11	-1,92	-2,91	-2,97	-2,95	-2,10
	11	0,82	-2,95	-2,56	-4,16	-3,07	-2,86	-2,69	-2,71	-2,49	-1,51
	12	0,57	-3,01	-2,07	-4,14	-3,07	-2,40	-2,41	-2,92	-2,10	-1,44
	13	4,45	-2,58	-2,26	-4,03	-2,26	-1,58	-1,78	-2,41	-1,64	-1,35
	14	4,50	-2,55	-2,47	-4,29	-2,22	-1,08	-1,70	-2,02	-1,31	-1,11
LONCURA	1	3,67	-2,37	-2,36	-3,60	-1,77	-0,19	-1,78	-2,03	-1,36	-1,24
	2	4,51	-2,07	-2,41	-3,56	-1,50	0,11	-1,48	-1,60	-1,63	-1,09
	3	0,15	-2,26	-2,98	-4,18	-1,74	-0,33	-1,64	-2,70	-2,95	-1,50
	4	-4,33	-2,99	-3,12	-3,15	-2,37	-1,09	-2,35	-2,98	-2,68	-1,39
	5	-5,58	-3,39	-4,09	-3,70	-2,81	-1,65	-2,99	-3,12	-2,53	-1,19
QUINTERO	1	-5,05	-3,28	-4,08	-2,63	-2,81	-2,07	-3,00	-3,33	-2,53	-1,47
	2	-0,31	-2,20	-3,13	-2,96	-2,62	-2,16	-2,53	-2,84	-2,40	-1,49
	3	5,08	-1,52	-2,46	-3,32	-2,06	-1,79	-1,73	-2,43	-2,56	-1,48
	4	3,46	-1,05	-1,51	-1,69	-0,89	-1,21	-1,27	-1,41	-1,13	-0,76
	5	-1,69	-2,32	-2,73	-6,92	-1,84	-1,77	-2,09	-2,41	-1,56	-1,18

Anexo N° 8: Valores de vulnerabilidad por cada sub-índice, asignados de acuerdo a ranking de vulnerabilidad establecido.

Sub índice	Un. de eval.	DIF. ALTURA OLAS MODALES Y DE TORMENTA		ÁNGULO DE INDICENCIA DEL OLEAJE		FRECUENCIA DE TORMENTAS		ALTURA SIGNIFICATIVA OLA		RANGO MAREAL		AUMENTO NIVEL DEL MAR		ORIENTACIÓN		PENDIENTE		ELEVACIÓN		ANCHO DE PLAYA		TIPO DE LÍNEA LITORAL		RETROCESO LÍNEA LITORAL	
		Valor (m)	Vulnerabilidad	Valor (°)	Vulnerabilidad	Valor (%)	Vulnerabilidad	Valor (m)	Vulnerabilidad	Valor (m)	Vulnerabilidad	Valor (m/año)	Vulnerabilidad	Valor (°)	Vulnerabilidad	Valor (%)	Vulnerabilidad	Valor (m.s.n.m.)	Vulnerabilidad	Valor (m)	Vulnerabilidad	Valor	Vulnerabilidad	Valor (m/año)	Vulnerabilidad
VENTANA	1	1,30	2	81	1	4,50	2	0,20	1	1 a 2	4	0,05	1	161	1	9,35	2	0,84	5	19,16	3	Playas arenosas	5	-2,12	5
	2	1,10	2	97	1	4,50	2	0,40	1	1 a 2	4	0,05	1	199	1	7,44	3	1,18	5	18,07	3	Playas arenosas	5	-2,00	4
	3	1,10	2	85	1	4,50	2	0,40	1	1 a 2	4	0,05	1	244	1	6,35	3	1,75	5	29,23	2	Playas arenosas	5	-1,75	4
INDUSTRIAL	1	1,40	2	105	1	4,50	2	0,60	2	1 a 2	4	0,05	1	246	1	4,84	3	1,52	5	35,39	1	Playas arenosas	5	-1,19	4
	2	1,20	2	97	1	4,50	2	0,80	3	1 a 2	4	0,05	1	230	1	5,16	3	0,71	5	29,04	2	Playas arenosas	5	-0,93	3
	3	1,70	3	86	1	4,50	2	0,80	3	1 a 2	4	0,05	1	275	2	6,59	3	1,05	5	28,74	2	Playas arenosas	5	-0,68	3
	4	1,70	3	89	1	4,50	2	0,80	3	1 a 2	4	0,05	1	268	1	7,6	3	0,72	5	20,72	2	Playas arenosas	5	-1,76	4
	5	2,20	3	100	1	4,50	2	0,80	3	1 a 2	4	0,05	1	276	2	5,2	3	1,44	5	23,09	2	Playas arenosas	5	-1,67	4
	6	2,50	3	96	1	4,50	2	1,00	3	1 a 2	4	0,05	1	282	3	5,76	3	1,34	5	27,07	2	Playas arenosas	5	-1,38	4
	7	3,00	4	97	1	4,50	2	1,00	3	1 a 2	4	0,05	1	281	3	5,93	3	0,50	5	21,62	2	Playas arenosas	5	-1,55	4
	8	3,20	5	97	1	4,50	2	0,80	3	1 a 2	4	0,05	1	295	4	5,98	3	0,57	5	22,88	2	Playas arenosas	5	-1,67	4
	9	3,20	5	96	1	4,50	2	0,80	3	1 a 2	4	0,05	1	292	4	4,54	3	1,59	5	22,24	2	Playas arenosas	5	-1,70	4
	10	3,50	5	92	1	4,50	2	0,50	1	1 a 2	4	0,05	1	291	3	6,62	3	2,26	4	19,33	3	Playas arenosas	5	-2,10	5
	11	3,20	5	89	1	4,50	2	0,30	1	1 a 2	4	0,05	1	301	4	7,09	3	2,39	4	29,86	2	Playas arenosas	5	-1,51	4
	12	3,70	5	99	1	4,50	2	0,30	1	1 a 2	4	0,05	1	308	5	7,23	3	2,16	4	30,58	1	Playas arenosas	5	-1,44	4
	13	3,10	5	93	1	4,50	2	0,40	1	1 a 2	4	0,05	1	301	4	6,17	3	1,87	5	28,12	2	Playas arenosas	5	-1,35	4
	14	2,60	4	87	1	4,50	2	0,40	1	1 a 2	4	0,05	1	298	4	4,86	3	1,21	5	32,63	1	Playas arenosas	5	-1,11	4
LONCURA	1	2,10	3	101	1	4,50	2	0,40	1	1 a 2	4	0,05	1	318	5	5,57	3	1,68	5	26,21	2	Playas arenosas	5	-1,24	4
	2	1,60	3	91	1	4,50	2	0,40	1	1 a 2	4	0,05	1	325	5	6,7	3	2,29	4	35,97	1	Playas arenosas	5	-1,09	4
	3	2,10	3	70	3	4,50	2	0,40	1	1 a 2	4	0,05	1	195	1	4,46	3	1,79	5	38,37	1	Playas arenosas	5	-1,50	4
	4	1,60	3	85	1	4,50	2	0,40	1	1 a 2	4	0,05	1	311	5	6,67	3	0,90	5	34,38	1	Playas arenosas	5	-1,39	4
	5	2,10	3	85	1	4,50	2	0,40	1	1 a 2	4	0,05	1	335	5	5,63	3	0,61	5	35,48	1	Playas arenosas	5	-1,19	4
QUINTERO	1	2,60	4	80	1	4,50	2	0,40	1	1 a 2	4	0,05	1	79	1	4,88	3	0,56	5	30,07	1	Playas arenosas	5	-1,47	4
	2	2,60	4	85	1	4,50	2	0,40	1	1 a 2	4	0,05	1	62	1	8,13	3	0,50	5	28,93	2	Playas arenosas	5	-1,49	4
	3	1,30	2	79	1	4,50	2	0,20	1	1 a 2	4	0,05	1	47	1	6,14	3	0,40	5	25,05	2	Playas arenosas	5	-1,48	4
	4	0,80	1	64	3	4,50	2	0,20	1	1 a 2	4	0,05	1	52	1	7,79	3	0,10	5	0,00	0	Playas arenosas	5	-0,76	3
	5	0,80	1	92	1	4,50	2	0,20	1	1 a 2	4	0,05	1	149	1	4,59	3	0,67	5	44,56	1	Playas arenosas	5	-1,18	4

Anexo N° 9: Matriz de comparación por pares de sub-índices, matriz normalizada y cálculo de la Razón de Consistencia (CR).

	Pendiente litoral arenoso	Elevación	Ancho de la playa	Tipo de línea litoral	Dif. altura de olas modales y de tormenta	Ángulo de incidencia del oleaje extremo	Orientación	Frecuencia de tormentas	Altura significativa de ola	Rango mareal	Aumento del nivel del mar	Retroceso línea litoral	MATRIZ NORMALIZADA	VECTOR PROMEDIO	λ_{max}
Pendiente litoral arenoso	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	5	5	0,16 0,16 0,23 0,20 0,17 0,15 0,15 0,12 0,11 0,11 0,11 0,11	0,15	1,90
Elevación	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	5	5	0,16 0,16 0,23 0,20 0,17 0,15 0,15 0,12 0,11 0,11 0,11 0,11	0,15	1,90
Ancho de la playa	1/2	1/2	1	2	2	2	2	2	3	3	5	5	0,08 0,08 0,12 0,20 0,17 0,15 0,15 0,12 0,11 0,11 0,11 0,11	0,13	1,62
Tipo de línea litoral	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2	2	3	3	5	5	0,08 0,08 0,06 0,10 0,17 0,15 0,15 0,12 0,11 0,11 0,11 0,11	0,11	1,45
Dif. entre altura de olas modales y de tormenta	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2	3	3	5	5	0,08 0,08 0,06 0,05 0,09 0,15 0,15 0,12 0,11 0,11 0,11 0,11	0,10	1,29
Ángulo de incidencia del oleaje extremo	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	2	3	3	5	5	0,08 0,08 0,06 0,05 0,04 0,08 0,07 0,12 0,11 0,11 0,11 0,11	0,09	1,07
Orientación	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	2	3	3	5	5	0,08 0,08 0,06 0,05 0,04 0,04 0,07 0,12 0,11 0,11 0,11 0,11	0,08	1,03
Frecuencia de tormentas	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	3	3	5	5	0,08 0,08 0,06 0,05 0,04 0,04 0,04 0,06 0,11 0,11 0,11 0,11	0,07	0,91
Altura significativa de ola	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	2	3	3	0,05 0,05 0,04 0,03 0,03 0,03 0,02 0,02 0,04 0,07 0,06 0,06	0,04	0,53
Rango mareal	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	2	2	0,05 0,05 0,04 0,03 0,03 0,03 0,02 0,02 0,02 0,04 0,04 0,04	0,04	0,43
Aumento del nivel del mar	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1/2	1	1	0,03 0,03 0,02 0,02 0,02 0,02 0,01 0,01 0,01 0,02 0,02 0,02	0,02	0,25
Retroceso línea litoral	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1/2	1	1	0,03 0,03 0,02 0,02 0,02 0,02 0,01 0,01 0,01 0,02 0,02 0,02	0,02	0,25
SUMA	6,07	6,07	8,57	10,07	11,57	13,07	13,57	16,07	26,17	28,00	47,00	47,00			12,64

$CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$	0,06
RI=	1,53
CR=CI/RI	0,04

Anexo N° 10: Tabla con pesos de sub-índices, valores de vulnerabilidad por subíndice y resultados de CVI por unidad de evaluación.

Un. de evaluación	Sub índice	PENDIENTE		ELEVACIÓN		ANCHO DE PLAYA		TIPO DE LÍNEA LITORAL		DIF. ALTURA OLAS MODALES Y DE TORMENTA		ÁNGULO INDICENCIA DEL OLEAJE		ORIENTACIÓN		FRECUENCIA DE TORMENTAS		ALTURA SIGNIFICATIVA OLA		RANGO MAREAL		AUMENTO NIVEL DEL MAR		RETROCESO LÍNEA LITORAL		CVI
		Peso	Vulnerabilidad	Peso	Vulnerabilidad	Peso	Vulnerabilidad	Peso	Vulnerabilidad	Peso	Vulnerabilidad	Peso	Vulnerabilidad	Peso	Vulnerabilidad	Peso	Vulnerabilidad	Peso	Vulnerabilidad	Peso	Vulnerabilidad	Peso	Vulnerabilidad	Peso	Vulnerabilidad	
VENTANA	1		2		5		3		5		2		1		1		2		1		4		1		5	2,77
	2		3		5		3		5		2		1		1		2		1		4		1		4	2,90
	3		3		5		2		5		2		1		1		2		1		4		1		4	2,78
INDUSTRIAL	1		3		5		1		5		2		1		1		2		2		4		1		4	2,70
	2		3		5		2		5		2		1		1		2		3		4		1		3	2,85
	3		3		5		2		5		3		1		2		2		3		4		1		3	3,03
	4		3		5		2		5		3		1		1		2		3		4		1		4	2,97
	5		3		5		2		5		3		1		2		2		3		4		1		4	3,05
	6		3		5		2		5		3		1		3		2		3		4		1		4	3,13
	7		3		5		2		5		4		1		3		2		3		4		1		4	3,23
	8		3		5		2		5		5		1		4		2		3		4		1		4	3,42
	9		3		5		2		5		5		1		4		2		3		4		1		4	3,42
	10		3		4		3		5		5		1		3		2		1		4		1		5	3,24
	11	0,15	3	0,15	4	0,13	2	0,11	5	0,10	5	0,09	1	0,08	4	0,07	2	0,04	1	0,04	4	0,02	1	0,02	4	3,18
	12		3		4		1		5		5		1		5		2		1		4		1		4	3,14
	13		3		5		2		5		5		1		4		2		1		4		1		4	3,33
	14		3		5		1		5		4		1		4		2		1		4		1		4	3,10
LONCURA	1		3		5		2		5		3		1		5		2		1		4		1		4	3,21
	2		3		4		1		5		3		1		5		2		1		4		1		4	2,93
	3		3		5		1		5		3		3		1		2		1		4		1		4	2,92
	4		3		5		1		5		3		1		5		2		1		4		1		4	3,08
	5		3		5		1		5		3		1		5		2		1		4		1		4	3,08
QUINTERO	1		3		5		1		5		4		1		1		2		1		4		1		4	2,85
	2		3		5		2		5		4		1		1		2		1		4		1		4	2,98
	3		3		5		2		5		2		1		1		2		1		4		1		4	2,78
	4		3		5		0		5		1		3		1		2		1		4		1		3	2,58
	5		3		5		1		5		1		1		1		2		1		4		1		4	2,55

Anexo N° 11: Tabla de comparación de ranking CVI versus ranking de respuestas de la línea litoral de los temporales del 08 de agosto del 2015 y 25 del junio del 2017 (el primer lugar de todos los rankings representa la mayor erosión registrada, y el último lugar la menor erosión).

		Pocisión CVI	Posición respuesta 2015	Posición respuesta 2017
VENTANA	1	20	14	23
	2	13	12	14
	3	19	4	4
INDUSTRIAL	1	22	22	21
	2	17	26	24
	3	12	25	27
	4	14	24	16
	5	8	16	11
	6	7	21	9
	7	4	17	7
	8	1	9	6
	9	1	2	8
	10	3	3	3
	11	6	7	5
	12	10	8	12
	13	2	10	17
	14	11	5	20
LONCURA	1	5	13	18
	2	21	15	25
	3	16	6	22
	4	15	19	13
	5	15	11	2
QUINTERO	1	18	23	1
	2	9	20	10
	3	19	18	19
	4	24	27	26
	5	23	1	15