



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**Análisis y modificación de las ecuaciones de equilibrio en
planta aplicada a cuatro playas de las zonas del norte
chico y central de Chile.**

Patricio Enrique Opazo Arriagada

Junio 2012

I

**ANÁLISIS Y MODIFICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE EQUILIBRIO EN PLANTA APLICADA
A CUATRO PLAYAS DE LAS ZONAS DEL NORTE CHICO Y CENTRAL DE CHILE.**

Patricio Enrique Opazo Arriagada

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Matías Quezada Labra
Profesor guía

José Beyá Marshall
Docente

Hernán Vergara Cortés
Docente

VIÑA DEL MAR
Junio 2012

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

**MATÍAS QUEZADA LABRA
PROFESOR GUÍA**

**PATRICIO OPAZO ARRIAGADA
AUTOR**

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a Dios el Señor que me abrió el camino, bajo su voluntad se concibió este documento. Agradecer y dedicar esto a mis padres que me enseñan día a día ese camino y me guiaron para recorrerlo desde un principio.

Agradecer mi hermana Karina a quien admiro, y a mi princesa que con su amor se ha visto completo mi corazón.

Quisiera agradecer a la Universidad de Valparaíso, a sus docentes, quienes aportaron en mi formación e iniciaron mi transitar por este camino, especialmente a Matías quien brindó la oportunidad de que esta investigación se hiciera realidad. A los profesores Sergio Bidart, Felipe Caselli y Patricio Winckler.

Quisiera agradecer a mis compañeros, con ellos aprendí que el océano no es lineal, más que eso, entendí que un mar de sonrisas es mejor que una ecuación responsable de la no linealidad. A ellos, Mauricio, Rodrigo, Juan Carlos, Eduardo, Místico, Darinka, Alejandra y El Chico.

*El pesimista se queja
del viento; el optimista espera que cambie; el ingeniero ajusta las velas.*

Boccaccio Giovanni, modificada por mí.

CONTENIDOS

1	INTRODUCCION	2
1.1	MOTIVACION	3
1.2	CONTENIDOS DEL INFORME	4
2	MARCO TEORICO.....	6
2.1	GENERALIDADES DE LAS PLAYAS	6
2.1.1	CONCEPTO DE PLAYA	6
2.1.2	FORMACION DE PLAYAS.....	7
2.1.3	TIPOS DE PLAYAS.....	8
2.1.4	SEDIMENTACION.....	8
2.2	EVOLUCION MORFODINAMICA DE PLAYAS	9
2.2.1	INICIO DEL MOVIMIENTO.....	9
2.2.2	DIRECCIONES PRINCIPALES DEL TRANSPORTE EN PLAYAS.....	10
2.2.3	ESCALAS TEMPORALES.....	11
2.3	OLEAJE	11
2.3.1	GENERACION Y CARACTERISTICAS DEL OLEAJE.....	11
2.3.2	TEORIA DEL OLEAJE	12
2.3.3	METODOLOGIA DE REPRESENTACION DE LAS CONDICIONES DEL OLEAJE	13
2.3.4	PROPAGACION DE OLEAJE Y TRANSFERENCIA ESPECTRAL	15
2.3.5	PARAMETROS DEL OLEAJE EN RELACION A PROCESOS SEDIMENTARIOS.....	16
2.3.6	GENERALIDADES DEL OLEAJE EN CHILE	18
2.4	IMPLEMENTACION NUMERICA.....	19
2.4.1	IMPLEMENTACION NUMERICA Y TIPOS DE MODELOS	19
2.4.2	MODELOS DE PROPAGACION DE OLEAJE.....	20
2.4.3	MODELO STWAVE	20
2.5	ESTADOS DE EQUILIBRIO	21
2.5.1	FORMULACIONES DE EQUILIBRIO EN PLANTA.....	22
2.5.2	FORMULACIONES DE EQUILIBRIO EN PERFIL	25
3	OBJETIVOS.....	27
3.1	OBJETIVO GENERAL	27
3.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	27
4	PLAYAS EN EQUILIBRIO SELECCIONADAS.....	29
4.1	METODOLOGIA DE SELECCION DE PLAYA	29
4.2	SELECCIÓN DE PLAYAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	30
4.2.1	PLAYA LA SERENA.....	30
4.2.2	PLAYA GUANAQUEROS	31
4.2.3	PLAYA TONGOY	31
4.2.4	BAHÍA DE QUINTERO.....	32
4.3	DOCUMENTACION DE VARIABILIDAD HISTORICA.....	33
4.3.1	VARIABILIDAD HISTORICA DE LINEA LITORAL DE PLAYA LA SERENA	33
4.3.2	VARIABILIDAD HISTORICA DE LINEA LITORAL DE PLAYA GUANAQUEROS	34
4.3.3	VARIABILIDAD HISTORICA DE LINEA LITORAL DE PLAYA TONGOY.....	35
4.4	ANALISIS ESPACIO-TEMPORAL A LAS PLAYAS SELECCIONADAS.....	37
4.4.1	SET DE FOTOGRAFIAS HISTORICAS.....	37
4.4.2	ANALISIS HISTORICO DE LA LINEA DE PLAYA.....	45
5	CLIMA DE OLEAJE OPERACIONAL.....	54

5.1	OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS.....	54
5.2	TRANSFERENCIA ESPECTRAL DE OLAJE	58
5.2.1	METODOLOGIA DE TRANSFERENCIA ESPECTRAL	58
5.2.2	BATIMETRIA	60
5.2.3	RESULTADOS	62
5.3	OLEAJE OPERACIONAL EN PLAYA LA SERENA.....	65
5.3.1	OLEAJE EN EL SITIO.....	65
5.3.2	FLUJO MEDIO DE ENERGIA.....	68
5.3.3	ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	68
5.4	OLEAJE OPERACIONAL EN PLAYA GUANAQUEROS	69
5.4.1	OLEAJE EN EL SITIO.....	69
5.4.2	FLUJO MEDIO DE ENERGIA.....	71
5.4.3	ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	72
5.5	OLEAJE OPERACIONAL EN PLAYA TONGOY	72
5.5.1	OLEAJE EN EL SITIO.....	72
5.5.2	FLUJO MEDIO DE ENERGIA.....	75
5.5.3	ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	76
5.6	OLEAJE OPERACIONAL EN BAHÍA QUINTERO	76
5.6.1	OLEAJE EN EL SITIO.....	76
5.6.2	FLUJO MEDIO DE ENERGIA.....	78
5.6.3	ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	79
6	AJUSTE EN PLANTA.....	81
6.1	METODOLOGIA GENERAL DE PLAYAS EN EQUILIBRIO EN PLANTA.....	81
6.2	AJUSTE EN PLANTA PARA PLAYA LA SERENA.....	83
6.3	AJUSTE EN PLANTA PARA PLAYA GUANAQUEROS	84
6.4	AJUSTE EN PLANTA PARA PLAYA TONGOY	85
6.5	AJUSTE EN PLANTA PARA BAHÍA QUINTERO.....	86
6.6	RESULTADOS DEL AJUSTE EN PLANTA.....	87
7	ANALISIS DE LA ECUACION DE EQUILIBRIO PROPUESTA	92
7.1	GENERALIDADES DE LAS PLAYAS Y/O BAHIAS SELECCIONADAS	92
7.1.1	BAHIA MEJILLONES	93
7.1.2	BAHIA SAN VICENTE	94
7.2	CALCULO DE LA ECUACION EN BAHIA MEJILLONES	95
7.2.1	APLICACION DE LA ECUACION DE EQUILIBRIO.....	96
7.3	CALCULO DE LA ECUACION EN BAHIA SAN VICENTE	98
7.3.1	APLICACION DE LA ECUACION DE EQUILIBRIO.....	98
7.4	APLICACION DE LA ECUACION EN PLAYA ARTIFICIAL	100
7.5	COMPARACION CON METODOLOGIAS ACTUALES.....	101
7.5.1	COMPARACION CON METODOLOGIA CLASICA EN BAHIA MEJILLONES.....	101
7.5.2	COMPARACION CON METODOLOGIA CLASICA EN BAHIA SAN VICENTE	102
7.6	RESULTADOS DEL ANALISIS A LA ECUACION PROPUESTA	103
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
9	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	110
10	ANEXOS.....	115
10.1	ECUACIONES DE GOBIERNO DE STWAVE	115
10.2	TABLA CON PARAMETROS GEOMETRICOS PARA CADA PLAYA	119
10.3	PARAMETROS GEOMETRICOS DE PLAYA ARTIFICIAL EL ENCANTO, ANTOFAGASTA	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama que representa la composición de una playa.....	7
Figura 2: Formas de Movimiento de las partículas.....	10
Figura 3: Clasificación de distintas ondas generadas en el Océano.....	12
Figura 4: Espectro Unidimensional.....	14
Figura 5: Espectro direccional de oleaje.....	14
Figura 6: Esquema de una grilla cartesiana utilizada en STWAVE.....	21
Figura 7: Regiones de una playa por efecto de la refracción y difracción del oleaje.....	24
Figura 8: Sectores de estudio de las zonas del norte chico y central de Chile.....	29
Figura 9: Forma de la planta de playa La Serena.....	30
Figura 10: Forma de la planta de playa Guanaqueros.....	31
Figura 11: Forma de la planta de playa Tongoy.....	32
Figura 12: Imagen aérea de bahía de Quintero.....	32
Figura 13: Ubicación de los sitios de estudio.....	34
Figura 14: Variación en diferentes sitios de estudio. Playa Guanaqueros.....	35
Figura 15: Variación en diferentes sitios de estudio. Playa Tongoy.....	36
Figura 16: Fotos aéreas de Playa La Serena.....	37
Figura 17: Fotos aéreas de Playa La Serena.....	38
Figura 18: Fotos aéreas de Playa La Serena.....	38
Figura 19: Fotos aéreas de Playa La Serena.....	39
Figura 20: Fotos aéreas de Playa Guanaqueros.....	39
Figura 21: Foto aéreas de Playa Guanaqueros.....	40
Figura 22: Foto aérea de Playa Tongoy.....	40
Figura 23: Foto aérea de Playa Tongoy.....	41
Figura 24: Foto aérea de Playa Tongoy.....	41
Figura 25: Foto aérea de Playa Tongoy.....	42
Figura 26: Foto aérea de Playa Tongoy.....	42
Figura 27: Fotos aéreas de Bahía Quintero.....	43
Figura 28: Fotos aéreas de Bahía Quintero.....	43
Figura 29: Fotos aéreas de Bahía Quintero.....	44
Figura 30: Foto aérea de Bahía Quintero.....	44
Figura 31: Cambios espacios-temporales de la posición relativa de la línea de costa de playa La Serena.....	45
Figura 32: Líneas de costas históricas de playa La Serena.....	46
Figura 33: Cambios espacios temporales de la posición relativa de la línea de costa de playa Guanaqueros.....	47
Figura 34: Líneas de costas históricas de playa Guanaqueros.....	48
Figura 35: Cambios espacios temporales de la posición relativa de la línea de costa de playa Tongoy.....	49
Figura 36: Variación de línea de costa Playa Tongoy.....	50
Figura 37: Cambios espacios temporales de la posición relativa de la línea de costa de bahía Quintero.....	51
Figura 38: Variación de línea de costa Playa Quintero.....	52
Figura 39: Gráfica general (H, T, D) del oleaje en zona central. Olas Chile III.....	54
Figura 40: Histograma de alturas del oleaje.....	56
Figura 41: Histograma de periodos del oleaje.....	56
Figura 42: Histograma de dirección del oleaje.....	57
Figura 43: Rosa de altura del oleaje.....	57
Figura 44: Rosa de periodo del oleaje.....	57
Figura 45: Rosa de energía del oleaje.....	58
Figura 46: Representación de procedimientos desarrollados en Stwave.....	59
Figura 47: Esquema de mallas utilizadas en la propagación de oleaje.....	60
Figura 48: Representación de procesamiento de la batimetría utilizada. FUENTE: Elaboración propia.....	61
Figura 49: Representación en 3-D de la batimetría utilizada. FUENTE: Elaboración propia.....	61

Figura 50: Funciones de transferencia de playa La Serena. FUENTE: Elaboración propia.	62
Figura 51: Funciones de transferencia de playa Guanaqueros. FUENTE: Elaboración propia.	62
Figura 52: Funciones de transferencia de playa Tongoy. FUENTE: Elaboración propia.	63
Figura 53: Funciones de transferencia de Bahía Quintero. FUENTE: Elaboración propia.	63
Figura 54: Resultados gráficos de trans. de oleaje a playa Tongoy. Dirección SW. FUENTE: Elaboración propia.	64
Figura 55: Resultados gráficos de transferencia de oleaje a playa Tongoy. Dirección W.	64
Figura 56: Resultados gráficos de transferencia de oleaje a playa Tongoy. Dirección NW.	64
Figura 57: Histograma de altura del oleaje.	66
Figura 58: Histograma de periodos del oleaje.	66
Figura 59: Histograma de dirección del oleaje.	67
Figura 60: Rosa de altura del oleaje.	68
Figura 61: Rosa de periodo del oleaje.	68
Figura 62: Rosa de potencia del oleaje en playa La Serena.	68
Figura 63: Histograma de altura del oleaje.	70
Figura 64: Histograma de periodo del oleaje.	70
Figura 65: Histograma de dirección del oleaje.	70
Figura 66: Rosa de altura del oleaje.	71
Figura 67: Rosa de periodo del oleaje.	71
Figura 68: Rosa de potencia del oleaje en playa Guanaqueros.	72
Figura 69: Histograma de altura del oleaje.	74
Figura 70: Histograma de periodos del oleaje.	74
Figura 71: Histograma de dirección del oleaje en Playa Tongoy.	74
Figura 72: Rosa de altura del oleaje.	75
Figura 73: Rosa de periodo del oleaje.	75
Figura 74: Rosa de potencia del oleaje en playa Tongoy.	75
Figura 75: Histograma de alturas del oleaje.	77
Figura 76: Histograma de periodos del oleaje.	77
Figura 77: Histograma de direcciones del oleaje.	77
Figura 78: Rosa de altura del oleaje.	78
Figura 79: Rosa de periodo del oleaje.	78
Figura 80: Rosa de potencia del oleaje en Bahía Quintero.	79
Figura 81: Dirección del flujo medio de energía del oleaje en cada zona de estudio.	83
Figura 82: Representación del cálculo de constantes geométricas de playa La Serena.	84
Figura 83: Cálculo de constantes geométricas de playa Guanaqueros.	85
Figura 84: Cálculo de constantes geométricas de playa Tongoy.	86
Figura 85: Cálculo de constantes geométricas de Bahía Quintero.	87
Figura 86: Comparación de principales constantes morfodinámica de las playas versus constantes los parámetros de playas en equilibrio de la costa española.	88
Figura 87: Ubicación y forma característica de Bahía Mejillones.	93
Figura 88: Ubicación y forma característica de Bahía San Vicente.	95
Figura 89: Determinación de constantes geométricas en Bahía Mejillones.	96
Figura 90: Representación del cálculo de la ecuación de equilibrio propuesta para la Bahía Mejillones.	97
Figura 91: Determinación de constantes geométricas en Bahía San Vicente.	98
Figura 92: Representación del cálculo de la ecuación de equilibrio propuesta para la bahía San Vicente.	99
Figura 93: Representación de la validación de la ecuación de equilibrio propuesta para playa Paraíso.	100
Figura 94: Comparación de la línea litoral para ecuación de equilibrio en planta para playas de las zonas del norte chico y central versus la metodología de la parábola de Hsu, en Bahía Mejillones.	102
Figura 95: Comparación de la línea litoral para ecuación de equilibrio en planta para playas de la zona central versus la metodología de la parábola de Hsu, en Bahía San Vicente.	103
Figura 96: Vectores de corriente y olas.	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Autores y características de modelos de planta de equilibrio.	3
Tabla 2: Relación entre granulometría, tamaño y pendiente de la playa.	9
Tabla 3: Clasificación de tipos de ondas generadas en el océano.	12
Tabla 4: Características de los modelos y estudios de la forma en planta de equilibrio.	22
Tabla 5: Variabilidad de la línea litoral de playa La Serena.	34
Tabla 6: Variabilidad de la línea litoral de playa Guanaqueros.	35
Tabla 7: Variabilidad de la línea litoral de playa Tongoy.	36
Tabla 8: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje, aguas profundas.	55
Tabla 9: Tabla de incidencia porcentual Periodo-Dirección del oleaje, aguas profundas.	55
Tabla 10: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Playa La Serena.	65
Tabla 11: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje en Playa La Serena.	66
Tabla 12: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Playa Guanaqueros.	69
Tabla 13: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Playa Guanaqueros.	69
Tabla 14: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Playa Tongoy.	73
Tabla 15: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje en Playa Tongoy.	73
Tabla 16: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Bahía Quintero.	76
Tabla 17: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje en Bahía Quintero.	76
Tabla 18: Tabla de resultados de coeficientes C0, C1 y C2 para las zonas de estudio.	89
Tabla 19: Tabla de coeficientes a-dimensionales promediados para las cuatro zonas de estudio.	89
Tabla 20: Tabla de coeficientes a-dimensionales obtenidos en función de “ β ” mediante la metodología de la parábola de HSU 1989 para las cuatro playas de estudio.	90
Tabla 21: Principales mediciones geométricas de Bahía Mejillones.	96
Tabla 22: Principales mediciones geométricas de Bahía San Vicente.	98
Tabla 23: Parámetros Geométricos en zonas de estudio.	119
Tabla 24: Estimación en playa artificial El Encanto, Antofagasta.	119

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Número de Froude de acuerdo a Hellermeier (1978-1981).	16
Ecuación 2: Profundidad activa de acuerdo a Hellermeier (1978-1981).	16
Ecuación 3: Profundidad activa de acuerdo a Birkemeier (1985).	16
Ecuación 4: Profundidad activa de acuerdo a Houston (1995).	17
Ecuación 5: Profundidad de cierre de la zonificación del transporte de sedimentos.	17
Ecuación 6: Potencia de un campo de oleaje.	17
Ecuación 7: Celeridad de un grupo de ondas.	18
Ecuación 8: Celeridad de una onda de acuerdo a T.L.O.	18
Ecuación 9: constante “n” de acuerdo a T.L.O.	18
Ecuación 10: Potencia del oleaje.	18
Ecuación 11: Potencia del oleaje.	18
Ecuación 12: Formulación de espiral logarítmica de Yaso (1965).	23
Ecuación 13: Formulación de la parábola de Hsu (1989).	23
Ecuación 14: Ecuación para determinar el ángulo alfa mínimo.	25
Ecuación 15: Modelo parabólico de Hsu y Evans (1989).	82
Ecuación 16: Parábola de Hsu modificada para playas del norte chico y central de Chile.	90
Ecuación 17: Parábola de Hsu modificada para playas del norte chico y central de Chile.	92
Ecuación 18: Parábola de Hsu.	101
Ecuación 19: Ecuación de dispersión en STWAVE.	115
Ecuación 20: Ecuación de dispersión en un sistema de referencia.	115

Ecuación 21: Celeridad de onda.....	115
Ecuación 22: Dirección de onda y grupo en un sistema de referencia.	116
Ecuación 23: Ecuación de dirección ortogonal de ola.	116
Ecuación 24: conservación espectral de energía.	116
Ecuación 25: Energía de la ola debido a difracción.....	117
Ecuación 26: Relación de rompimiento del oleaje de acuerdo al criterio de Miche (1951).	117
Ecuación 27: Flujo de energía que contribuye al oleaje debido al viento.	117
Ecuación 28: Tiempo de paso de una ola por una celda de grilla.	117
Ecuación 29: Representación del cambio de frecuencia espectral.....	118
Ecuación 30: Tensores de radiación 1 de acuerdo a TLO.....	118
Ecuación 31: Tensores de radiación 2 de acuerdo a TLO.....	118
Ecuación 32: Tensores de radiación 3 de acuerdo a TLO.....	118
Ecuación 33: Gradientes de tensores en x e y.	118

RESUMEN

El estudio de playas en equilibrio en Chile Central, la forma en planta de éstas y el diseño artificial, pueden presentar algunos errores en sus estimaciones debido a que los cálculos para estos estudios, se desarrollan con ecuaciones que fueron validadas en otras costas donde las características hidrodinámicas y morfológicas difieren estructuralmente de las costas chilenas.

Dadas estas diferencias, se ha llevado a cabo una investigación mediante un estudio de cuatro playas en equilibrio pertenecientes al litoral de las Zonas del Norte Chico y Central de Chile. Considerando características morfodinámicas e hidrodinámicas de cada una de las zonas de estudio, se ha propuesto una nueva ecuación que permite calcular la forma que adoptan estas playas en el largo plazo. Esta formulación puede ser una herramienta útil para ejecutar el diseño artificial de playas en equilibrio en algunos sectores del litoral central, donde las metodologías clásicas pueden presentar algunas diferencias.

Se verificó la aplicabilidad de esta ecuación de equilibrio propuesta en otras zonas geográficas de Chile, particularmente, zonas norte y sur del país, de lo cual se obtuvieron buenos resultados que permiten atribuir el uso de esta formulación como alternativa a las ecuaciones clásicas de la literatura científica.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCION

En el siglo pasado se presentó un gran auge demográfico además de grandes cambios en las formas de vida y de trabajo, que de forma conjunta han potenciado y renovado los usos de las zonas litorales. Las playas, en el contexto antes mencionado, pasaron a ser los elementos más valorados de la costa, lo que ha propiciado que en ellas se realicen muchas intervenciones, de las cuales, en gran número generan importantes problemas de gestión en esta franja del territorio. Tomar la decisión sobre qué intervención es adecuada en cada caso es tarea fundamental de muchas personas, profesionales de distintas disciplinas. Es por tanto imprescindible, reconocer las falencias científicas e ingenieriles existentes en Chile sobre ámbitos del litoral, para así realizar lo correcto a la hora de desarrollar alguna intervención o proyecto en estos aspectos del borde costero.

Un resumen de la evolución de los conocimientos sobre morfodinámica de playas nos conduce a un camino con dos instancias: una basada en conceptos de equilibrio y otra basada en los procesos litorales (dinámicas y transporte de sedimentos). En efecto, hasta finales de los años 50 el conocimiento científico que se tenía de las playas era puramente empírico y estaba basado en las observaciones realizadas por físicos, geólogos y geomorfólogos. Estos investigadores fueron los primeros en reconocer ciertas propiedades “únicas” de la morfología de las playas. Estas resultaron ser las condiciones de equilibrio, que ponían de manifiesto que las playas, a pesar de estar formadas por infinidad de pequeñas partículas de arena, fácilmente susceptibles de ser erosionadas y transportadas, adoptaban una configuración determinada que seguía un cierto patrón reconocible en todas ellas. En esa época, y gracias al trabajo de algunos ingenieros de costas (Bruun, 1954; Silvester, 1960 & Dean, 1977), se propusieron formulaciones empíricas que permitían una primera aproximación a las formas de equilibrio antes mencionadas.

A finales de los años sesenta, con el descubrimiento de los flujos medios asociados al oleaje que alcanza a una playa (Bowen, 1969 & Longuet Higgins, 1970), se establecieron los principios básicos de los procesos que gobiernan la morfodinámica de las mismas. Este descubrimiento de dinámicas asociadas al oleaje no se detuvo desde entonces y a los términos que en su momento existían en la Ingeniería de Costas tales como: “corrientes longitudinales”, “corrientes de retorno”, “sobre-elevación del nivel del mar”, se le ha añadido otros como: “ondas de borde”, “ondas de cizalle”, “ondas infra gravitatorias” que nos ilustran sobre la complejidad de los procesos que acontecen en la zona de rotura de las playas. El conocimiento de estos procesos abrió una nueva línea de aproximación al estudio de una playa basada, ya no en elementos empíricos, sino en el análisis detallado de las dinámicas existentes en una playa y la evaluación del transporte de sedimento asociado a las mismas.

En la actualidad existen dos vías de análisis, una basada en conceptos de equilibrio, que entrega información sobre la morfología de una playa a largo plazo (meses, años, décadas) y otra que permite obtener información sobre la morfodinámica de una playa en corto plazo (horas, días). Hoy en día los estudios apuntan en lograr combinar ambas vías para lo cual se han desarrollado modelos de procesos que incluyen condiciones de equilibrio y formulaciones de equilibrio.

En tal sentido, esta investigación concentra esfuerzos en estudiar el equilibrio al largo plazo en algunas playas de Chile, por tanto, se desea contribuir con una nueva herramienta que

permita evaluar la forma en planta que adoptan algunos balnearios de la zona central del país, y que represente una alternativa válida a las ecuaciones clásicas expuestas en la literatura científica.

1.1 MOTIVACION

En términos generales, la forma en planta de una playa está determinada por lo que se conoce como la “planta de equilibrio” que corresponde a la forma que alcanza una playa una vez que se ha acomodado a las condiciones de oleaje y de contorno dadas, permaneciendo estable hasta que éstas se modifican, ya sea por procesos naturales o intervenciones antrópicos.

Para el estudio de este fenómeno particular, numerosos investigadores han propuesto diferentes formulaciones de forma en planta de equilibrio. La metodología más ampliamente utilizada es el modelo parabólico de Hsu y Evans (1989), éste es una expresión empírica obtenida a partir de ajustes en ensayos de laboratorio utilizando datos representativos de costas de EE.UU. Una breve descripción de los diferentes autores que han estudiado la planta de equilibrio de playas se presenta en la Tabla 1:

Autor	Año	Características
Mashima	1961	Elipses.
Yasso	1965	Espirales Logarítmicas.
Vicheptan-Ho-Silvester	1969-1971-1972	Espirales Logarítmicas. Relaciones geometría-oleaje.
Hsu	1987	Proposición de Modelo Parabólico.
Hsu y Evans	1989	Modelo Parabólico dependiente de la oblicuidad del oleaje.
Hsu y Silvester	1990	Aplicación de modelos parabólicos a otras formas de playas.
Mc Cormick	1993	Proposición de Modelo Elíptico.
Tan y Chiew	1994	Validan Modelo de Hsu y Evans. (Incidencia oblicua del oleaje).
González	1995	Propone metodología de diseño de playas artificiales basado en el modelo de Hsu y Evans.

Tabla 1: Autores y características de modelos de planta de equilibrio.
(FUENTE: Elaboración propia).

Para cada una de las investigaciones señaladas por los diversos autores a través del tiempo, se han obtenido ecuaciones con validaciones por medio de datos de las costas extranjeras, EE.UU y España preferentemente. Estas ecuaciones utilizan en su formulación coeficientes adimensionales típicos que se desprenden de las características sedimentológicas de las zonas de estudio, y que por lo general, difieren de las zonas chilenas por tanto al momento de desarrollar un estudio para algunos sectores costeros de este país basado en estos modelos, las condiciones pueden ser dispares y los resultados pueden presentar algunas diferencias.

La motivación de esta investigación es estudiar la configuración en planta para playas en equilibrio en la zonas del Norte Chico y Central de Chile y determinar una formulación en función de un ajuste con los coeficientes descritos, que se desprenden de las características hidrodinámicas y morfológicas típicas de ésta zona de estudio, para luego proponer esta formulación como una herramienta complementaria a las ecuaciones clásicas y verificar el diseño artificial de playas mediante esta propuesta.

1.2 CONTENIDOS DEL INFORME

En el Capítulo 2 se presenta una revisión de conceptos básicos y principales fundamentos teóricos que son relevantes para la comprensión de este Trabajo de Título.

En el Capítulo 3 se presentan los objetivos principales y específicos de este estudio.

En el Capítulo 4 se realiza una pre-selección de las playas y bahías de las zonas del norte chico y central de Chile. Se desarrolla una metodología de análisis de línea de costa por medio de un estudio histórico de fotografías aéreas y se comprueba el estado de equilibrio de cada zona para ser seleccionada.

Utilizando las zonas de estudio seleccionadas en el Capítulo 4, en el Capítulo 5 se desarrolla una climatología de oleaje de cada playa de estudio.

En el Capítulo 6 se calcula y se obtiene la ecuación de equilibrio en planta propuesta para las zonas del norte chico y central de Chile.

En el Capítulo 7 se estudia la aplicabilidad de la ecuación propuesta, para las zonas norte y sur del país. Además, se analiza la ecuación en una playa artificial del norte del país.

Para expresar los resultados obtenidos, en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones, además de las recomendaciones generales y particulares de este Trabajo de Título.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEORICO

2.1 GENERALIDADES DE LAS PLAYAS

Dentro de los tipos de costas y variadas configuraciones morfológicas del litoral, encontramos las zonas que pueden ser clasificadas como “zonas bajas deposicionales”. Este tipo de costas bajas de acumulación se generan en el borde costero cuando las cantidades de materiales disponibles sobrepasa el volumen de sedimentos que las olas y las corrientes litorales son capaces de desplazar, acumulándose cierto volumen de sedimentos, esto da origen a playas que constituyen áreas de protección-disipación de la energía del oleaje y en la cual se presentan fenómenos hidrodinámicos que son necesarios e imprescindibles de estudiar.

Un estudio de síntesis de escala mundial efectuado por Bird, F (1985), demostró que el 70% de las playas tienen una tendencia creciente a la erosión, mientras que solamente el 10% avanza creciendo hacia el mar y, el 20% restante muestra una relativa estabilidad que se relaciona a algún tipo de equilibrio temporal, asociada a las condiciones estacionales del oleaje. En base a lo anterior, se puede determinar que, la erosión actual de las playas, que por definición son formas de acumulación de material, constituye un importante testimonio de un cambio en su tendencia evolutiva actual.

2.1.1 CONCEPTO DE PLAYA

Para la definición de playa, la entendemos ésta como un depósito de sedimentos a la orilla del mar constituida por materiales no consolidados que se extiende hacia tierra desde la línea de más baja marea hasta un cambio en la topografía, tal como la línea de dunas de arena, un risco marino o el punto donde empieza la vegetación permanente o la construcciones urbanas. Los materiales que la conforman están constituidos por sedimentos que pueden ser desde arenas muy finas hasta gravas o cantos rodados. Las características del material constitutivo dependen de las condiciones e intensidad del oleaje y de los materiales que forman parte de las zonas aledañas.

Generalmente una playa comprende una parte constantemente sumergida o “surf zone” que presenta una suave pendiente. La parte superior o “back shore”, que constituye un cordón litoral cuya pendiente es generalmente más pronunciada y puede estar accidentada por escalones relacionados con las sucesivas posiciones de la pleamar o con los efectos de los temporales, y finalmente, la “berma” de playa por sobre el límite de las pleamares de aguas tranquilas.

El ancho y la pendiente de una playa son función los materiales disponibles y de la energía de las olas, las corrientes o cualquier otra fuerza susceptible de desplazarlos.

La Figura 1 representa la composición de una playa y sus características.

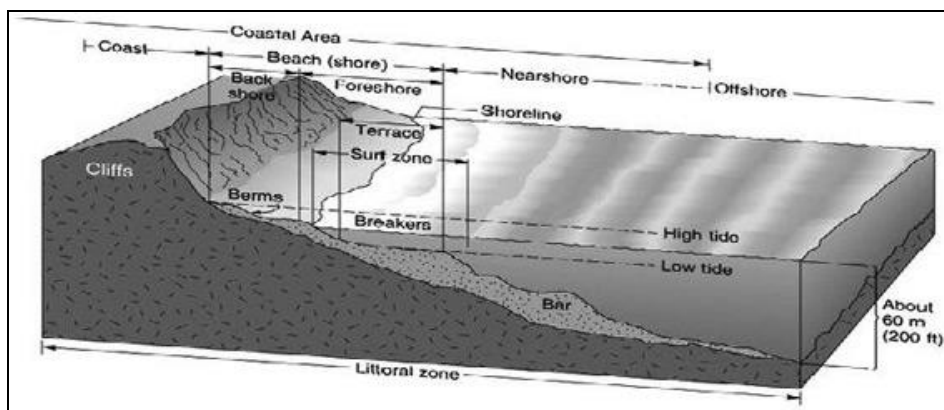


Figura 1: Diagrama que representa la composición de una playa.
FUENTE: "Beach Process and Sedimentation. Paul D. Komar".

2.1.2 FORMACION DE PLAYAS

Las playas en su origen, constituyen formaciones naturales eficaces de defensa de la costa frente al oleaje, debido a que tienen una estructura muy flexible que absorbe su energía. En su medio natural, las playas se forman, fundamentalmente, por el depósito de las arenas procedentes de los ríos, esteros, acantilados, barrancos y quebradas. La erosión de los acantilados y los restos de conchas y corales completan el aporte de los materiales que forman las playas.

Su formación geocronológica es producto del oleaje y las corrientes de deriva que interactúan en la hidrodinámica del sector. Son estos agentes principales los que transportan los materiales aportados por las corrientes fluviales a lo largo de la costa. En el primer momento la acción de las olas se ve frenada por la acumulación de depósitos a cierta distancia de la costa. Se forman así bancos litorales que acaban por emerger. Es entonces cuando el oleaje ataca el depósito remodelando su configuración y desplazándolo hacia la costa. La fuerza del "swash" es mayor que el flujo del retorno (backwash), lo que empuja el depósito en avances sucesivos hasta lograr un perfil de equilibrio en el que el "backwash" y el "swash" se compensan. Este perfil depende de la energía de las olas y el tamaño de las partículas, así que es muy inestable, pero constituye la primera fase de análisis de la formación de playas.

Los olas relativas a oleaje reinante, es decir el que se presenta la mayor parte del tiempo, sólo mueven arenas, mientras que las olas extremas asociadas a temporales, movilizan gravas y cantos, material de mayor tamaño, que pueden implicar modificaciones apreciables en cuanto a la forma de la playa. El oleaje reinante aporta material a la playa, engrosándola y levantándola, mientras que las olas de temporales desalojan, mar adentro, arena de la playa. Cuando un oleaje muy fuerte desaloja la arena de la playa hasta mostrar el sustrato en el que se asienta, se observa un pequeño escarpe (micro-acantilado) que marca el límite entre el continente y la acción de las olas. El equilibrio de las olas constructoras y destructoras depende del carácter del clima y sus variaciones estacionales.

En función a lo anterior, es que el tamaño del sedimento va a depender de la fuerza del oleaje en la playa, y su formación queda determinada a condiciones hidrodinámicas presentes en una determinada zona.

2.1.3 TIPOS DE PLAYAS

Del punto de vista de la tipología de las playas presentes, se puede entender que hay playas largas y rectilíneas y otras, que están asociadas a un relieve litoral rocoso y que ocupan el fondo de una bahía formando un arco entre los acantilados que les sirven de punto de apoyo, ya que generan en su interior un área de menor energía de las olas.

Algunas playas se apoyan en afloramientos rocosos en toda su longitud; otras llamadas flechas (spits) evolucionan libremente y alargándose en el sentido de la deriva litoral apoyándose solo en una parte en una saliente rocosa.

Las playas de fondos de bahía constituyen comportamientos independientes en los cuales los sedimentos se desplazan en función de los cambios de sentido de la deriva, pero sin necesariamente salir de la bahía. También existen pequeñas playas de bolsillo (pocket beach) en las bahías de los litorales.

Desde un punto de vista general que representa la exposición de la playa a los diferentes forzantes (oleaje preferentemente), que son los responsables de generar los procesos de sedimentación y regímenes de transporte de sedimentos presentes en un litoral, se puede clasificar las playas por su forma simple en:

- Playas Abiertas: Estas playas están directamente afectadas por las dinámicas litorales, tales como corriente y oleaje ya que están totalmente expuestas a estas forzantes. Debido a esto, su funcionamiento hidrodinámico está afecto tanto al transporte longitudinal como transversal de sedimentos.
- Playas Encajadas: Este tipo de playas están indirectamente afectadas a las dinámicas litorales, además son caracterizadas por condiciones geográficas o elementos antrópicos, es decir, están resguardadas y protegidas de las forzantes principales, ya sea entre afloramientos rocosos como condición natural u obras de abrigo generadas por el hombre. Su funcionamiento hidrodinámico está afecto principalmente al transporte transversal de sedimentos, debido a que el movimiento longitudinal está restringido.

2.1.4 SEDIMENTACION

La sedimentación comprende el estudio de los materiales sueltos que se encuentran presentes en las playas y que permite llegar a determinar y caracterizar aspectos fundamentales de los áridos que están presentes en estos ambientes.

El material de las playas es suministrado por los aportes fluviales, por la erosión de los acantilados o por la disgregación realizada por el mar de rocas previamente meteorizadas. Cuando la producción de residuos acumulados procede en gran parte del continente, el mar ejerce una acción de modelado muy característica generando arenas pulidas, de aspectos lisos y brillantes y otros desgastados de formas aplanados y a menudos ovoides. En la deposición hay una selección granulométrica quedando los materiales más finos en la parte inferior de la playa y los más gruesos en su parte superior. El movimiento de vaivén de las olas clasifica el material de la playa y le otorga un aspecto característico.

Las playas compuestas por sedimentos gruesos tienden a desarrollar pendientes de mayor gradiente, tal y como se muestra en la Tabla 2, fundamentalmente debido a su mayor permeabilidad. Después de romper, el oleaje barre los sedimentos hacia la playa alta y la “resaca” (corriente de retorno) tiende a devolverlos hacia la playa baja, pero la mayor permeabilidad de las playas de gravillas y arenas gruesas disminuye el efecto de la resaca y tienen pendientes menores, a menudo de arenas bien compactadas por donde pueden circular vehículos.

Granulometría	Cantos	Grava muy gruesa	Gravilla	Arena muy gruesa	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Arena muy fina
Pendiente de la playa	24°	17°	11°	9°	7°	5°	3°	1°

Tabla 2: Relación entre granulometría, tamaño y pendiente de la playa.

Fuente: Bird, E. 1985.

Para complementar esta investigación, se recomienda revisar el estudio de Vergara y Valenzuela (1981) que describe los fenómenos de sedimentación en playas (Referencia 46).

2.2 EVOLUCION MORFODINAMICA DE PLAYAS

2.2.1 INICIO DEL MOVIMIENTO

Cuando el oleaje se aproxima hacia la costa interactúa con el fondo sufriendo varios procesos de transformación, uno de ellos es la disipación de energía de manera turbulenta, la cual es tomada por los sedimentos presentes en el fondo y son puestos en movimiento. El lugar de mayor disipación de energía ocurre en la zona de rompiente, principalmente ahí es donde se generan las mayores tasas de transporte de sedimentos.

Para cuantificar la cantidad de sedimento que está en movimiento existen variados métodos, los cuales dependen principalmente del tipo de forzantes que los está transportando, siendo éstas las corrientes, el oleaje o una interacción de oleaje-corriente, además en algunas situaciones el viento es también una forzante. Sin embargo, para los efectos prácticos resulta más sencillo estudiar una gama de formulaciones ligadas al movimiento de los sedimentos sujetos a oleaje y corrientes generadas por incidencia del oleaje, esto debido a que principalmente nuestras costas oceánicas son dominadas por estos agentes.

El movimiento de una partícula en el fondo marino ocurre cuando la fuerza instantánea que ejerce el fluido sobre la partícula es mayor que la resistencia que se opone. A su vez, la resistencia de la partícula se debe fundamentalmente a dos fuerzas: peso sumergido y fricción (cohesión).

Desde un punto de vista hidráulico, conocer las condiciones de inicio del movimiento permite determinar el diámetro de sedimento o en su defecto de roca que es estable ante velocidades de corriente, y de este modo diseñar canales estables o situaciones para playas estables en un grado de equilibrio. En términos generales, conocer estas condiciones, permite determinar las condiciones de oleaje que mueven el sedimento del fondo, de este modo, se puede zonificar la franja de playa donde realmente se está moviendo el sedimento.

Una vez que la partícula está en movimiento, se presentan cuatro formas de movimiento (Figura 2): arrastre, rodadura, saltación o reptación y suspensión.

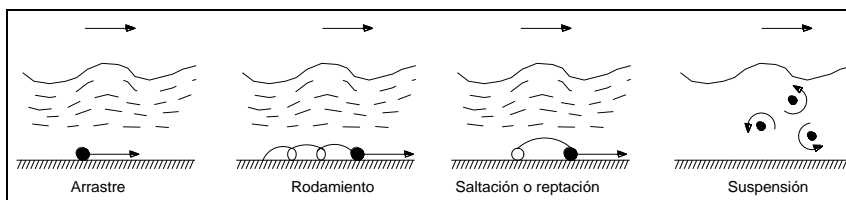


Figura 2: Formas de Movimiento de las partículas.
FUENTE: Beach Processes and Sedimentation. Paul D. Komar.

En resumen, para que una partícula empiece a moverse deben existir algunas condiciones necesarias que hacen que ésta sea transportada en alguna dirección. Una descripción teórica de esto es la expresada por el Esfuerzo de Corte Crítico y el Movimiento bajo Oleaje. Para más información ver Referencia 24.

2.2.2 DIRECCIONES PRINCIPALES DEL TRANSPORTE EN PLAYAS

El transporte de sedimentos que se presenta en playas se encuentra determinado por dos direcciones fundamentales y que predominan por sobre otras. Estas direcciones del transporte en playa como consecuencia de forzantes principales que es la corriente o el oleaje, le otorgan a la playa, la capacidad de ser susceptible a diversos cambios que representan su forma en planta y en perfil. Estas dos direcciones principales del transporte de sedimentos son:

Dirección Longitudinal del Transporte de Sedimentos:

Se entiende este transporte como la cantidad de arena que se mueve en el tiempo en una dirección paralela a la costa. Este es el responsable de la mayoría de los cambios morfodinámicos de las playas al largo plazo y gracias a estos cambios se pueden obtener indicios de la dirección del transporte longitudinal de sedimentos.

La generación de este tipo de transporte longitudinal de sedimentos, se debe a la variación del ángulo de incidencia del oleaje; sobre elevación del oleaje e incidencia oblicua del oleaje.

La incidencia oblicua del oleaje constituye el principal mecanismo de generación del transporte de sedimentos ya que bajo esta condición se presentan las mayores corrientes longitudinales y por lo tanto el mayor transporte en esa dirección. Además es el mecanismo predominante en las playas abiertas.

Dirección Transversal del Transporte de Sedimentos:

Este transporte corresponde a la cantidad de sedimentos que se mueve de manera perpendicular a la línea de costa por unidad de tiempo. Este es el responsable de los cambios del perfil y uno de los ejemplos clásicos es el perfil de verano y perfil de invierno. Estas situaciones se producen debido a las condiciones de oleaje presente en las estaciones del año, ya que en invierno las condiciones de oleaje son mucho más intensas que en verano. En el invierno el sedimento se mueve en dirección offshore (de costa a mar), la pendiente de la playa se torna más suave.

En verano la altura media del oleaje disminuye y el periodo del oleaje generalmente aumenta, el transporte de sedimentos se vuelve hacia la costa y se genera una nueva barra debido al run-up del oleaje. Como consecuencia de esto, la pendiente de la playa comienza a ser más empinada.

2.2.3 ESCALAS TEMPORALES

Una playa puede sufrir erosión o acreción y por consiguiente la formación o desaparición de uno o varios elementos importantes. Muchos de estos cambios pueden ser pequeños y pasar desapercibidos, otros pueden ser un problema si son muy grandes. Todos los cambios deben ser referenciados a una escala de tiempo. Una playa puede tener una tendencia general a acreción o a erosión, estableciéndose un perfil de equilibrio. Se habla entonces de cambios a largo plazo. De la misma manera, puede haber cambios a corto plazo, por ejemplo, una playa puede cambiar de aspecto drásticamente durante una tormenta y ser gradualmente recuperada por las posteriores condiciones de oleaje. Los cambios temporales en una playa estable son parte de un equilibrio dinámico. Las oscilaciones a corto término en una playa pueden ser de hasta ± 30 m en unos cuantos meses. Estos son los llamados cambios a escala de tiempo humano, mientras que los cambios a escalas de tiempo geológico pueden ser del orden de 10.000 años. Además de las escalas temporales, los cambios deben de ser contemplados y analizados también desde una escala espacial.

Cuando se analiza una playa en el largo plazo, lo que se intenta determinar es la posición de equilibrio que adopta ésta o, por otro lado, la forma que adoptaría si las dinámicas permanecieran constantes durante el tiempo suficiente. Una playa alcanzará de este modo un perfil de equilibrio (forma transversal) y una planta de equilibrio (forma longitudinal).

Como análisis de corto plazo, se encuentran la evaluación de formación de barras y la caracterización de la erosión del perfil de playa ante la presencia de una temporal.

2.3 OLEAJE

2.3.1 GENERACION Y CARACTERISTICAS DEL OLEAJE

En el océano siempre existe algún tipo de onda que es el resultado de la energía a lo largo de la interfase agua-atmósfera que constituye la superficie del mar. Estos mecanismos que aportan energía al mar son de diferente naturaleza: viento, perturbaciones meteorológicas, terremotos, atracción planetaria, etc. En las condiciones de mar abierto o en cercanías de la costa, resulta muy poco frecuente encontrar una masa de agua en contacto con la atmósfera que no posea movimiento en la superficie. Esta ondulación corresponde a la manifestación de estas fuerzas actuando sobre el fluido tratando de deformarlo en contra de la acción de gravedad y la tensión superficial. Por esto, se requiere una fuerza de algún tipo para generar olas, tales como el viento o la caída de una piedra que impacta al agua.

Una vez que las olas son creadas, tensiones gravitacionales y superficiales son activadas de manera tal que permiten que las olas se propaguen (Dean y Dalrymple, 1991). En base a cada una de las perturbaciones y forzantes es que se genera en el mar ondas que

difieren tanto en periodo como longitud. La Figura 3 presenta la descripción de cómo se clasifican las ondas generadas en el mar:

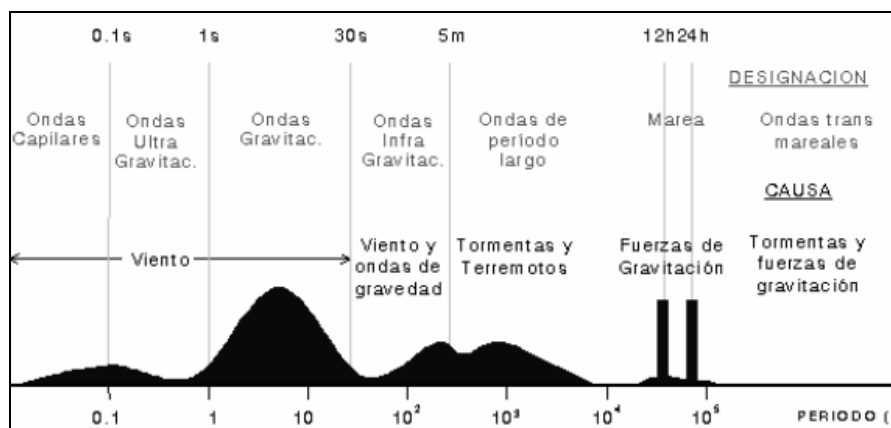


Figura 3: Clasificación de distintas ondas generadas en el Océano.
FUENTE: Documentos de Referencia de Universidad de Cantabria, 1995. (Referencia 18).

Para analizar y estudiar el fenómeno de la transferencia de energía para la interacción atmósfera y superficie del mar, los diferentes tipos de ondas creados difieren entre periodos y longitudes. En la Tabla 3 se presentan los distintos tipos de ondas clasificados por longitud de onda y duración de periodos, además de las fuerzas generadoras de la perturbación.

Tipo de Onda	Periodo // longitud	Fzas. Generadoras	Fzas. De Control	Ejemplo
Capilar	0.1 [s]//0.01 [m]	Viento	T.superf./gravedad	Rizado de viento
Ultragravitatoria	0.1-1 [s]//100 [m]	Viento	Gravedad	Ondas de viento
Gravitatoria	1-30 [s]//1-1000 [m]	Viento y olas de viento	Gravedad/fricción	Sea y Swell
Larga	5[min]//10^5-10^6 [m]	Terremotos	Gravedad/coriolis/fricción	Tsunami
Marea Astronómica	12.4-24.8[hrs]//10^7 [m]	Rot. Tierra/Atrac. Luna y sol	Gravedad/coriolis/fricción	Marea astron.
Trasmareales	24[hrs]//10^7 [m]	Orbita solar/Gravitación	Gravedad/coriolis/fricción	Marea meteorolog.

Tabla 3: Clasificación de tipos de ondas generadas en el océano.
FUENTE: Elaboración propia.

La gestación del oleaje debido a la acción del viento genera las fluctuaciones turbulentas de la presión atmosférica que induce olas de tamaño pequeño, llamadas olas capilares. Estas son usualmente inestables y son atenuadas una vez que el viento deja de soplar, debido a los efectos de la tensión superficial. Cuando la velocidad del viento aumenta, las olas crecen de tamaño y las fuerzas de origen gravitacional son suficientes como para mantener la propagación del oleaje (Massel, 1996). Esta propagación puede hacer transferir energía de olas que viajan en largas distancias, de un continente a otro.

2.3.2 TEORIA DEL OLEAJE

En el estudio teórico del oleaje, la descripción matemática de las ondas considera, en general, que las olas son oscilaciones uniformes y periódicas de la superficie del agua. Es decir, se asume que estas ondas se repiten una y otra vez, de donde se distinguen las de características progresivas y las ondas estacionarias. Las ondas progresivas se propagan

en una profundidad constante manteniendo su forma, mientras que las ondas estacionarias no se propagan. Al desplazamiento del fluido en la vertical con respecto a un nivel medio de referencia (MWL) se le denomina desplazamiento de la superficie libre (desnivelación).

En términos generales, el objetivo fundamental de cualquier teoría de olas es determinar la celeridad de la onda C cuando las magnitudes H (altura de ola), L (longitud de onda), h (profundidad) o T (periodo) son conocidas. Por lo tanto, cualquier teoría de ondas puede ser caracterizada por unos parámetros adimensionales obtenidos como los cocientes de estas magnitudes representativas de las ondas, entre éstas el parámetro conocido como profundidad relativa (h/L) adquiere importancia ya que entrega una descripción del lugar en donde se propaga la ola, es decir:

- Si $h/L > 0.5$; profundidades indefinidas (aguas profundas).
- Si $0.05 < h/L < 0.5$; profundidades intermedias (aguas poco profundas).
- Si $h/L < 0.05$; profundidades reducidas (aguas someras).

Para el planteamiento de una teoría del oleaje, como es el caso de cualquier otro problema de la física, el modelado físico-matemático de las ondas requiere de la resolución de un problema de contorno. Las ecuaciones que gobiernan el problema de un fluido como medio continuo son las de Conservación de Masa, Cantidad de Movimiento (Navier-Stokes) y Energía.

Desde el punto de vista matemático, las ondas son soluciones no estacionarias a un problema de contorno no lineal. Esta no linealidad viene impuesta por la dinámica del océano de forma natural, sin embargo, se puede obtener una gran información sobre el movimiento de las ondas utilizando la llamada "Teoría Lineal de las Ondas" (TLO), en la que la contribución de los términos no lineales a la solución se consideran despreciables. Por tanto, los efectos no lineales son pequeñas correcciones a las soluciones impuestas por la teoría lineal. Para más información sobre la TLO ver Referencias 10, 18 y 37.

Existen otras teorías de características distintas que consideran otros supuestos, entre ellas; Teoría de Onda de Stokes, Teoría de Onda Cnoidal y Teoría de Onda Solitaria. Para más información de otras teorías de oleaje ver Referencia 37.

2.3.3 METODOLOGIA DE REPRESENTACION DE LAS CONDICIONES DEL OLAJE

Para la representación y estudio de las condiciones de oleaje, durante el período 1950-1960 se extendió el trabajo de procesamiento de señales al análisis de las olas de los océanos. Tomando muestras discretas de un proceso continuo, como es el caso de las olas, los principios del análisis de Fourier pudieron ser utilizados para describir este movimiento (US Army Corps of Engineers, 1999). Esto generó grandes avances para poder caracterizar y cuantificar el fenómeno de las olas en términos de la representación del espectro de energía. En general, la forma que posee un espectro de energía de olas depende de las condiciones de la generación del oleaje, tales como: velocidad del viento, duración y fetch del viento, profundidad del agua y el tipo de tormenta; y también de mecanismos internos del oleaje tales como, interacción no lineal entre componentes de las olas y disipación de energía. Sin embargo, la configuración del espectro no es arbitraria y algunas propiedades fundamentales de distribución de energía se encuentran en todos

ellos (la energía alcanza un máximo y decrece para altas y bajas frecuencias). En la Figura 4 se presenta un espectro unidimensional (1D) de energía de olas (Massel, 1996).

El espectro unidimensional entrega una descripción adecuada de las olas sólo cuando se consideran éstas como una superposición lineal de muchos componentes sinusoidales de una sola dirección. Cuando el oleaje posee elementos armónicos que interactúan entre sí, en el espectro unidimensional se pueden formar dos peak, debido a dos frentes de olas convergiendo hacia el punto de medición. Estas dos fuentes podrían ser de la misma dirección, o de dos o más direcciones. En la realidad no ocurre de esta manera, por lo tanto, la representación de un clima de olas por medio del espectro unidimensional de energía no es adecuada en estos casos. Es necesario entonces describir el oleaje con un espectro bidimensional (Figura 5), el cual incluye la dirección de donde provienen las olas. Con esto se toma en cuenta la interacción ola-ola, reconociendo que en aguas profundas las olas son multidireccionales (Massel, 1996).

En términos generales, se pueden establecer tres formas de representar un clima de olas:

Espectro 2D: Conocido como espectro bidimensional o direccional de energía de olas, es la forma más completa de representar las condiciones de oleaje. Describiendo el oleaje con el espectro 2D de energía (Figura 5), se obtiene información de olas provenientes de todas las direcciones y todas las frecuencias, además de la energía asociada a la combinación de cada uno de los dos factores anteriores, es decir, se cuenta con una completa descripción de las características del oleaje en la zona de medición.

Espectro 1D: Conocido como espectro unidimensional de energía de olas, describe el oleaje con información de la energía asociada a cada uno de los periodos de las olas del clima de oleaje de la zona de medición. Esta representación considera que todas las olas provienen desde una sola dirección, colapsando las olas en la dirección promedio de la energía del oleaje (MWD), perdiendo así toda la información de la dirección de cada una de las olas incidentes a la zona de medición.

Parámetros de resumen: Describe el clima de olas resumiendo toda la información de las mediciones en tres parámetros principales: altura significativa del oleaje (H_s), período peak del oleaje (T_p), y dirección promedio de la energía de las olas (MWD). Con esta metodología de descripción se pierde la información individual que cada ola aporta al clima de olas.

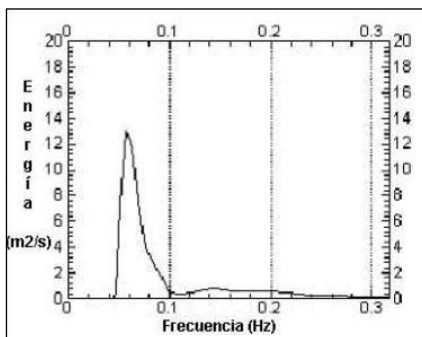


Figura 4: Espectro Unidimensional.
FUENTE: Massel, 1996.

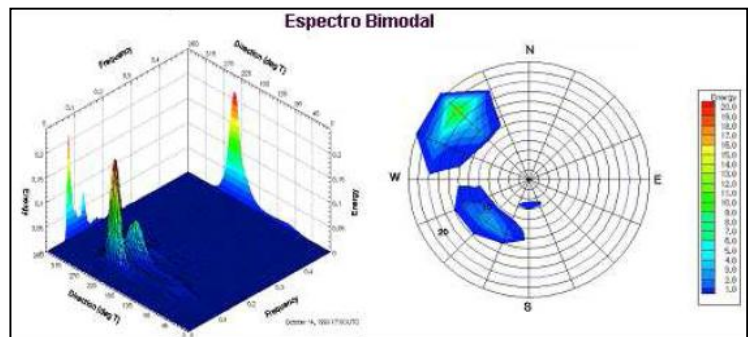


Figura 5: Espectro direccional de oleaje.
FUENTE: Massel, 1996.

2.3.4 PROPAGACION DE OLEAJE Y TRANSFERENCIA ESPECTRAL

A medida que el oleaje se acerca a la costa, éste empieza a sentir el efecto del fondo. De acuerdo a la TLO, se puede deducir que una onda comienza a sentir la presencia del fondo cuando la profundidad en la que se encuentra es menor que $L/2$, donde L es la longitud de onda. Como consecuencia de la interacción de las ondas con el fondo, éstas se transforman. Este proceso de transformación se traduce en variaciones en la altura de las olas y en la dirección de la propagación.

Los principales fenómenos que comprende la transferencia del oleaje desde sus procesos en aguas profundas hasta que se acerca a profundidades menores, son:

Asomeramiento (Shoaling): Este proceso de transformación del oleaje se genera a medida que éste se propaga a la costa. Consiste en variaciones naturales y físicas de las ondas mientras la propagación es por profundidades menores. En esta etapa se observa un cambio en la altura y dirección de la ola y un decrecimiento en su longitud que representa un aumento de su celeridad.

Refracción: Este fenómeno se presenta cuando un tren de ondas viaja oblicuamente sobre la costa y encuentra un cambio de profundidad. En este caso una parte del frente de la onda viaja en aguas más someras y, por tanto, con menor celeridad que el resto, dando lugar a un cambio de dirección. Análogamente, en presencia de una corriente, puede producirse un retraso de parte del frente con el consiguiente cambio de dirección. Por tanto, el fenómeno de refracción puede ser debido al efecto del fondo o la presencia de una corriente.

Difracción: este fenómeno consiste en una transferencia lateral de energía, en dirección perpendicular al sentido de la propagación del oleaje, cuando la onda viaja y en su paso se topa con un obstáculo.

Reflexión: se entiende como el cambio abrupto de dirección en la propagación del oleaje, esto hace que la onda cambie de sentido. Las ondas que se reproducen en un cuerpo sólido como por ejemplo un rompeolas, un acantilado, o una playa inclinada pueden reflejar. En caso de una estructura vertical, la fracción de energía de la ola reflejada puede ser grande. Para las estructuras permeables o cuestas suaves, la reflexión es menor, así como playas que disipan la energía del oleaje.

Otros fenómenos importantes a tener en cuenta son: disipación debido a la fricción; disipación debido a la percolación; ruptura; crecimiento adicional debido al viento; interacciones ola a ola.

La transferencia espectral de oleaje consiste en transferir el espectro completo desde aguas profundas, hasta un sitio de interés en aguas someras. Esta técnica es muy utilizada ya que relaciona los fenómenos de propagación de oleaje antes mencionados, con el espectro de energía que se tiene en aguas profundas para recomponerlo en aguas someras, de esta forma se obtienen las características espectrales del oleaje en el sitio cercano a la costa. Para el desarrollo de esta técnica existen tres metodologías que simplifican el problema: Método Cuasi-Purista, Método Semi-Purista y Método Purista. Para mayores referencias sobre estos métodos revisar Referencia 35.

2.3.5 PARAMETROS DEL OLAJE EN RELACION A PROCESOS SEDIMENTARIOS

Al ser el oleaje el fenómeno hidrodinámico más representativo de los esfuerzos que se ejercen sobre los sedimentos, haciendo que estos se pongan en movimiento y se genere una dinámica de la playa en función del transporte de sedimentos presente en el sector, es importante caracterizar componentes significativos del oleaje que intervienen en el funcionamiento morfodinámico y sedimentario de playas, entre ellos, la “Zonificación del Transporte de Sedimentos” que explica que, cuando las partículas se ponen en movimiento, las trayectorias que siguen son difíciles de describir de manera real, sin embargo, se puede estimar con cierto grado de exactitud en qué cantidad lo hacen de manera transversal a la playa y en qué cantidad lo hacen de manera longitudinal a la costa. Sin embargo, el ancho que tiene el movimiento longitudinal y el largo que tiene el movimiento transversal, no son infinitos. Bajo este concepto, es que surge la idea de que cada uno de los movimientos ortogonales del sedimento (longitudinal y transversal) están acotados hasta una cierta profundidad. A estas profundidades se les conoce como Profundidad Activa y Profundidad de Cierre.

Para la determinación de cada una de estas profundidades, diversos autores han desarrollado estudios para proponer fórmulas predictivas, entre ellos:

- A. Formulación de Hellermeier (1978, 1981): Esta ecuación se basa en el valor crítico del número de Froude que describe el umbral de erosión del fondo producto de la acción del oleaje. Se define por:

$$Fr = \frac{U_b^2}{\gamma'gd} = 0.03$$

Ecuación 1: Número de Froude de acuerdo a Hellermeier (1978-1981).

Donde γ' es la diferencia entre la proporción de la densidad del sedimento/fluido y fluido/fluido, y d es la profundidad. Hellermeier utilizando un valor de $\gamma'=1.6$ para arena de cuarzo y agua salada obtuvo una ecuación predictiva igual a:

$$d_1 = 2.28H_{s0.137} - 68.5 \left(\frac{H_{s0.137}^2}{gT_p^2} \right)$$

Ecuación 2: Profundidad activa de acuerdo a Hellermeier (1978-1981).

$H_{s0.137}$ corresponde a la ola que es excedida solo 12 horas al año, por lo tanto constituye una altura de ola muy grande, de manera tal, que si es representada en una tabla de incidencia, este dato queda determinado al final de ella.

- B. Birkemeier (1985) modifica la formulación de Hellermeier considerando ajustes realizados con datos in-situ, con esto obtiene:

$$d_1 = 1.75H_{s0.137} - 57.9 \left(\frac{H_{s0.137}^2}{gT_p^2} \right)$$

Ecuación 3: Profundidad activa de acuerdo a Birkemeier (1985).

Esta ecuación predice profundidades menores que la de Hellermeier. De este modo Hellermeier constituye una estimación conservadora.

C. Houston (1995) simplifica la ecuación de Birkemeier utilizando las propiedades del espectro de Pierson Moskowitz, una modificación de la distribución exponencial de la altura significativa y considerando la altura significativa promedio, obtuvo la siguiente expresión:

$$d_1 = 8.9\overline{H_s}$$

Ecuación 4: Profundidad activa de acuerdo a Houston (1995).

La ecuación de Houston (1995) presenta una ventaja respecto de las otras, ya que no depende de la altura de ola excedida 12 horas al año ni del periodo asociado a dicha ola.

Para la determinación de la profundidad de cierre, d_L se ha determinado la siguiente ecuación:

$$d_L = 3.5H_{S12}$$

Ecuación 5: Profundidad de cierre de la zonificación del transporte de sedimentos.

Altura de ola $H_{S0.137}$:

En la formulación de Hellermeier se define como la altura $H_{S0.137}$ de ola excedida 12 horas al año, lo que implica que podría ser definida con solo un año de estadística de oleaje. Si se piensa desde este punto de vista, esta altura de ola puede estar asociada a temporales dentro de un año y basta que exista uno o dos temporales con registros de 12 o más alturas de olas que superan un umbral determinado, y esta altura quedaría definida por estos temporales. Sin embargo, Krauss y Larson (1994) señalan que utilizar sólo un año presenta una mala definición de d_1 y es recomendable contar un periodo de tiempo mayor.

Para determinar el valor de $H_{S0.137}$, Krauss y Larson (1994) proponen varias formas, pero para cualquiera de ellas recomiendan que esta no sea estimada en aguas profundas, ya que esto es una aproximación errónea. En primera instancia Krauss y Larson (1994) sugieren que $H_{S0.137}$ debe ser obtenida para tormentas excedidas 12 horas de manera consecutiva en la base de datos analizada, sin embargo, este modo de cálculo presenta dificultades para datos de largo registro.

Una buena aproximación para esta altura también resulta del análisis de la tabla de incidencia (buscando la probabilidad de excedencia de 0.137%), para ello es necesario transferir el oleaje desde aguas profundas hasta una profundidad d que este entre $d_1 < d < 2d_1$ Krauss y Larson (1994) proponen que d sea aproximadamente 10 [m], ya que eventualmente a esa profundidad se cumple con el intervalo recomendado.

Flujo medio de energía:

El flujo medio de energía corresponde a la tasa en que la energía se propaga y representa la potencia del campo de oleaje. El flujo de energía se obtiene como el producto de la energía mecánica media del oleaje (E_t) y la celeridad de grupo (C_g), según la expresión:

$$P = E_t \times C_g$$

Ecuación 6: Potencia de un campo de oleaje.

La celeridad de grupo (C_g) es función de la celeridad de las ondas individuales (C) y un coeficiente (n) que depende de la profundidad relativa (d/L):

$$C_g = n \times C$$

Ecuación 7: Celeridad de un grupo de ondas.

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

Ecuación 8: Celeridad de una onda de acuerdo a T.L.O.

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh[4\pi d/L]} \right)$$

Ecuación 9: constante "n" de acuerdo a T.L.O.

Luego, la potencia se expresa según la expresión:

$$P = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T \times \left(1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh[4\pi d/L]} \right) \times \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

Ecuación 10: Potencia del oleaje

Para condición de aguas profundas ($d/L > 1/2$) la expresión se simplifica a:

$$P = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T$$

Ecuación 11: Potencia del oleaje.

2.3.6 GENERALIDADES DEL OLEAJE EN CHILE

Como consecuencia de la gran extensión del Océano Pacífico, es posible distinguir variados componentes de las condiciones de oleaje que puede ser generado. En la actualidad se reconocen cuatro formas de oleaje que llegan a las costas chilenas:

Swell del hemisferio Sur: Olas que se generan por ciclones extra-tropicales que tienen lugar mar adentro de la costa, entre las latitudes 30°S y 70°S. Este fenómeno está presente todo el año, pero tiene una mayor intensidad en los meses de invierno. Las olas incidentes a la costa chilena llegan con una dirección SW con alta energía, y periodos cortos (10-14 segundos), decreciendo su intensidad de Sur a Norte. Por estar presente este tipo de oleaje en la mayor parte del tiempo en las costas de Chile, se denomina "oleaje reinante".

Swell del hemisferio Norte: Estas olas son generadas en los alrededores de las Islas Aleutianas (situadas en el Océano Pacífico frente a la costa de Alaska, a una distancia de 15.000 kilómetros de Chile, 53° N 170° W), en los meses de verano de Chile. Las olas que inciden en la costa chilena llegan con una dirección NW, con periodos largos (20 a 25 segundos), decreciendo su intensidad de Norte a Sur.

Olas generadas en la costa: Son generadas por vientos locales que se producen en las cercanías de la costa. Estas olas tienen periodos relativamente cortos, y debido a su proximidad de la costa, no alcanza a desarrollarse el Swell.

Olas generadas por ciclones tropicales: Son olas generadas por tormentas que se producen en las cercanías de las costas de América Central. Ocurren con poca frecuencia, por lo que rara vez se consideran en un clima de olas operacional. Sin embargo, deben ser considerados en el clima de oleaje extremo. A este tipo de oleaje muchas veces se le denomina “oleaje dominante” en relación a la cantidad de energía con que llega.

En consecuencia, las olas incidentes a la costa chilena son principalmente de carácter bi-modal, y muchas veces pueden ser multi-modales (cuando existen olas locales o “seas”). Por esta razón es necesario realizar las transferencias de oleaje, desde aguas profundas hacia aguas someras, por medio del espectro 2D de energía, ya que al emplear el espectro 1D (o parámetros de resumen) se pierde el sentido de la dirección del Swell proveniente del Norte y la del Swell proveniente del Sur.

2.4 IMPLEMENTACION NUMERICA

2.4.1 IMPLEMENTACION NUMERICA Y TIPOS DE MODELOS

Para la determinación de cualquier problema de la física como es el caso de procesos costeros y litorales, la técnica de modelación que consiste en una implementación numérica, es una buena herramienta aunque difícil cuando se trata de resolver las ecuaciones de movimiento para flujos oceánicos y costeros. Los principales problemas se deben a términos no lineales, turbulencia, línea de costa, batimetría y dificultades de describir los océanos a partir de mediciones.

La implementación de modelos numéricos permite tener una visión general de diversos procesos costeros y oceánicos que afectan el funcionamiento de una obra marítima, desarrollando una gran gama de estudios y generando un gran número de simulaciones que resultarían imposibles de hacer por métodos de gabinete (limitaciones numéricas y tiempo de desarrollo de proyectos).

Dentro de los variados tipos de modelos asociados a procesos costeros, existen: Modelos de generación de oleaje; de propagación de oleaje; de agitación; de resonancia; hidrodinámicos (mareas, corrientes); de dispersión de contaminantes; de maniobras de buques; de buque atracado; de evolución de playas; de estabilidad y esfuerzo en diques, entre otros. En cuanto a los modelos numéricos de oleaje, se clasifican éstos en:

Modelos de primera generación: son aquellos que no consideran explícitamente las interacciones no lineales entre componentes del oleaje.

Modelos de segunda generación: incluyen interacciones no lineales de manera paramétrica. Utilizan algún espectro de referencia (por ejemplo JONSWAP) para reorganizar la energía.

Modelos de tercera generación: calculan la transferencia no lineal de energía de manera explícita utilizando una aproximación a la solución exacta. No existe restricción en la forma del espectro.

2.4.2 MODELOS DE PROPAGACION DE OLAJE

Para abordar el fenómeno de propagación del oleaje, existen modelos de oleaje que resuelven la fase y aquellos que promedian la fase, los primeros resuelven las ecuaciones de Balance de Momentum y Flujo de masa, mientras que los otros resuelven la ecuación de Balance de Energía Espectral. Los modelos que resuelven la fase son capaces de modelar de manera aproximada los procesos de difracción y la interacción onda a onda. Lo cual no ha podido ser bien implementado en los modelos que promedian la fase, sin embargo estos últimos simulan de mejor manera la generación de oleaje por viento. Para mayor información y características de estos tipos de modelos revisar Referencia 15.

Dentro de los diferentes tipos de modelos que simulan la propagación del oleaje, existe otro tipo de clasificación que los define de acuerdo a la ecuación que resuelven. De esta clasificación se destacan:

- Modelos Parabólicos: plantean el problema como estacionario y ocupan teoría de ondas Stokes.
- Modelos Elípticos: plantean el problema como estacionario y ocupan teoría de ondas Stokes.
- Modelos Hiperbólicos: plantean el problema con evolución en el tiempo y ocupan la teoría de ondas no lineal (Aproximaciones de Boussinesq).

2.4.3 MODELO STWAVE

El modelo de transferencia de oleaje STWAVE es una Aproximación Parabólica de pendiente suave que simula las ecuaciones de Radder (1979) para ser integrado verticalmente (eliminación de la tercera dimensión espacial). Este modelo simula refracción, shoaling, rompimiento de oleaje, difracción, crecimiento por viento e interacción ola-ola. Para realizar la transferencia desde aguas profundas hacia aguas someras, el modelo toma las siguientes suposiciones:

- Pendiente de fondo suave y reflexión despreciable: En STWAVE las olas sólo pueden propagarse desde costa afuera hacia costa adentro. Las olas que se reflejan en la costa son despreciadas.
- Condiciones de oleaje costa afuera homogéneas: La variación del espectro de oleaje en todo el campo de aguas profundas no se conoce, pero como no tiene variaciones de consideración se utiliza como representativo de toda la región costa afuera.
- Régimen permanente para olas, corrientes y vientos: En general, los cambios que afectan a las olas se producen más lentamente de lo que se demora el oleaje en pasar por la grilla del modelo. Por ello resulta conveniente usar modelos que trabajen en régimen permanente de modo de reducir los tiempos computacionales.
- Refracción y shoaling lineal: El modelo pierde un poco de precisión ya que la altura del oleaje se ve subestimada.
- Fricción de fondo despreciable: Si bien incluir la fricción de fondo en un modelo no es

difícil, determinar el coeficiente de fricción es complicado. Además la propagación hacia aguas someras ocurre en un tramo corto lo que hace despreciable el efecto de la fricción de fondo.

- Tensores de radiación lineal: Los tensores de radiación son calculados basados en la teoría lineal del oleaje.
- Discretización Numérica: STWAVE es un modelo numérico que utiliza diferencias finitas, formulado en una grilla cartesiana. Las celdas de la grilla son cuadradas ($x=y$). Se puede resolver un problema con varias grillas, anidando éstas entre sí, así una grilla gruesa es utilizada como condición de borde de una grilla más fina. En la Figura 6 se muestra un esquema de una grilla que se utiliza en STWAVE.

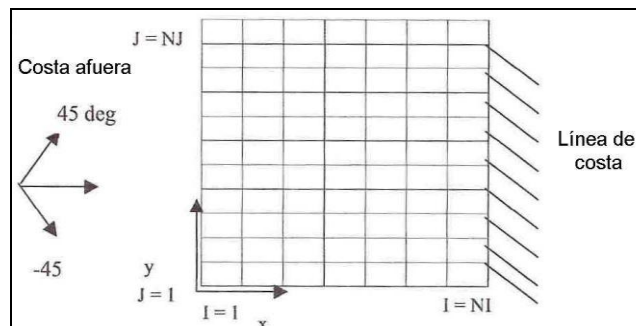


Figura 6: Esquema de una grilla cartesiana utilizada en STWAVE.
FUENTE: Manual de STWAVE.

- Datos de Entrada al Modelo: STWAVE tiene 4 archivos de entrada. Los archivos que se requieren son: Parámetros del modelo; Batimetría; Espectro de Energía incidente; Corrientes. Este último archivo es opcional, y se requiere solo si hay interacción ola-corriente, los otros tres son esenciales. Los archivos de entrada son generados con mayor facilidad por medio de la interfase SMS 8.0 (Surface-Water Modeling System).
- Datos de Salida del Modelo: Los datos de salida del modelo son archivos de visualización gráfica y archivo Shell Out de donde se extraen los principales parámetros del espectro propagado a aguas someras.

Las ecuaciones de gobierno y aproximaciones del modelo STWAVE se presentan en el Anexo 8.1.

2.5 ESTADOS DE EQUILIBRIO

Los estados de equilibrio en playas, permiten que éstas se puedan clasificar, desde el punto de vista de su evolución en planta o en perfil, como playas en equilibrio y playas en proceso de adaptación a sus condicionantes externos. Las playas en estado natural se encuentran en equilibrio, mientras que las artificiales o aquellas donde se ha producido una intervención humana (diques, puertos, paseos marítimos, obras de retención del material, etc.) no necesariamente están en equilibrio debido a un proceso de reacomodación de carácter temporal. Una playa en equilibrio, se puede clasificar en playas en equilibrio

estático y playas en equilibrio dinámico. Las de equilibrio estático, corresponden a sistemas relativamente cerrados, en las cuales el material presente es siempre el mismo, aunque puede ser removido dentro del sistema. Por el contrario, las playas en equilibrio dinámico reciben del exterior un cierto caudal de sedimentos y dejan salir otro de magnitud similar, con lo que su forma en planta prácticamente no varía.

2.5.1 FORMULACIONES DE EQUILIBRIO EN PLANTA

La planta de equilibrio corresponde a la forma que alcanza una playa una vez que se ha acomodado a unas condiciones de oleaje y de contorno dadas, permaneciendo estable hasta que éstas se modifican. Las playas abiertas presentan una forma de la línea de costa que es prácticamente recta, salvo posible existencia de fenómenos locales o formas rítmicas. Sin embargo, aquellas playas configuradas al abrigo de uno o varios salientes presentan geometrías curvas que pueden responder a una determinada expresión analítica o matemática a la que se le puede atribuir su forma y con la que se puede determinar una cierta ecuación teórica.

La predicción de la planta de una playa natural o que adoptará una artificial, resulta ser uno de los factores predominantes en el diseño o evaluación de la estabilidad de las mismas. Esta interrogante ha sido estudiada por muchos autores a lo largo del tiempo y cada uno de éstos ha planteado ecuaciones empíricas para la obtención de la fórmula.

Un buen resumen de estas formulaciones pueden obtenerse de la lectura de: “Aplicaciones de Modelos de Ajuste para el Análisis de los cambios Históricos de la Línea Litoral en Grandes Bahías. Ejemplos en Chile”. (Martínez et. al, 2008).

Para la determinación de la formulación al largo plazo de la planta de equilibrio, numerosos investigadores han reconocido la existencia de un patrón en la forma de las playas ubicadas al abrigo de un cabo o saliente. Sin embargo, puede considerarse que son los trabajos de Silvester (1960), quien realizó ensayos en un modelo físico de una playa recta encajada entre dos obstáculos bajo la influencia de un oleaje a 45° sin el suministro adicional de sedimentos, los que señalan el comienzo de una serie de formulaciones tendentes a proporcionar una expresión para representar las formas en planta de playas formadas al resguardo de obstáculos.

Como continuación a estos trabajos, diversos investigadores realizaron ensayos en laboratorio con el objetivo de determinar la forma en planta de una playa sometida a un oleaje estacionario (e.g. Vichetpan 1969; Ho, 1971), se suceden las formulaciones que intentan explicar la forma en planta de equilibrio que puede adoptar una playa.

La Tabla 4 muestra una descripción histórica breve de los diferentes autores que abordaron el problema.

Autor	Mashima	Yasso	Vichetpan-Ho-Silvester	Hsu	Hsu-Evans
Año	1961	1965	1969-1971-1972	1987	1989
Característica	Elipse	Espiral Logarítm.	Espiral Logarítmica	Modelo parabólico	Modelo paraból
Autor	Hsu-Silvester	Mc Cormick	Tan-Chiew	González	
Año	1990	1993	1994	1995	
Característica	Modelo paraból. a tómbolos	Modelo Elíptico	Ángulo de incid. del oleaje	Metodol. diseño paraból.	

Tabla 4: Características de los modelos y estudios de la forma en planta de equilibrio.

Fuente: Elaboración propia.

Con base a ensayos anteriores, Silvester (1970) propuso una formulación basada en la espiral logarítmica, como una primera aproximación a la forma en planta de una playa en equilibrio con el oleaje incidente. Posteriormente, diversas formulaciones fueron mejorando lo inicial, hasta obtener mejores resultados en la actualidad.

2.5.1.1ESPIRAL LOGARÍTMICA (YASO, 1965)

La espiral logarítmica cuya ecuación fue propuesta por Yaso (1965) se caracteriza por ser un método empírico obtenido de la observación de un conjunto de playas en las costas Este y Oeste de los Estados Unidos, por lo cual considera implícitamente las condiciones reinantes del oleaje que han definido la línea de costa en equilibrio. La formulación expuesta por Yaso 1965 se expresa por:

$$\frac{R}{R_0} = e^{\theta \cot \alpha}$$

Ecuación 12: Formulación de espiral logarítmica de Yaso (1965).

2.5.1.2PARÁBOLA DE HSU (HSU, 1989)

Posterior a la formulación de Yaso, los trabajos de Silvester (1970, 1976 y 1978) permitieron definir procesos prevalecientes en tres zonas afectadas por el ensemamiento que incluyeron el efecto de la refracción y difracción del oleaje, determinando valores óptimos en la ecuación de la espiral logarítmica que conducen a condiciones de equilibrio en planta. De ahí que Hsu et al., (1987); Hsu & Evans (1989) y Hsu et al., (1989), propusieron un modelo de ajuste con una función parabólica con las cuales se obtuvieron buenos resultados para playas en equilibrio estático.

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2$$

Ecuación 13: Formulación de la parábola de Hsu (1989).

Donde R_0 , β y θ son variables geométricas representadas de la playa, y C_0 , C_1 y C_2 son coeficientes que dependen del ángulo β .

Si bien Tan y Chiew (1994) propusieron algunas modificaciones a la expresión indicada en la ecuación anterior, es esta formulación la considerada como la que proporciona los mejores ajustes a datos de playas en equilibrio estático. Más aún, Gonzalez (1995) analizó la bondad de la expresión de Hsu y Evans (1989) llegando a la conclusión de que la misma es incluso aplicable en océanos con marea dado que representa adecuadamente tanto la línea de pleamar como la de bajamar. No obstante este autor puso de manifiesto la incapacidad de la misma para ser aplicada como formulación predictiva dado que no existe un criterio que permita relacionar el oleaje predominante de la zona con el frente en el límite “aguas arriba”, ni definir el punto de la playa “aguas abajo” donde comienza a ser válida la ecuación. Para solucionar dicho inconveniente Gonzalez y Medina (2001) propusieron una metodología basada en una aproximación teórica.

2.5.1.3 PARÁBOLA DE HSU MODIFICADA POR MEDINA (MEDINA, 2001)

En su formulación, Medina establece que la forma en planta de una playa viene condicionada, principalmente, por el sistema de corrientes asociado a la rotura del oleaje, por el sedimento existente (cantidad, tamaño) y por los contornos o geometría donde ha de encajarse dicha playa. Las corrientes longitudinales son de especial importancia en la disposición de equilibrio de una playa y, más concretamente, en su forma en planta, dado su importancia en el potencial transporte de arena.

Cuando un oleaje incide en una barrera o dique, tal como se muestra en la Figura 7, se producen efectos de refracción y difracción detrás del mismo, pudiéndose definir tres regiones desde el punto de vista del oleaje:

Región 1: donde no existe efecto del dique sobre el oleaje, los gradientes de altura de ola son prácticamente cero y los frentes del oleaje permanecen invariables;

Región 2: se presentan gradientes de altura de ola y los frentes sufren solo efecto de refracción;

Región 3: donde existen gradientes de altura de ola y giro de los frentes debido a la refracción-difracción del oleaje.

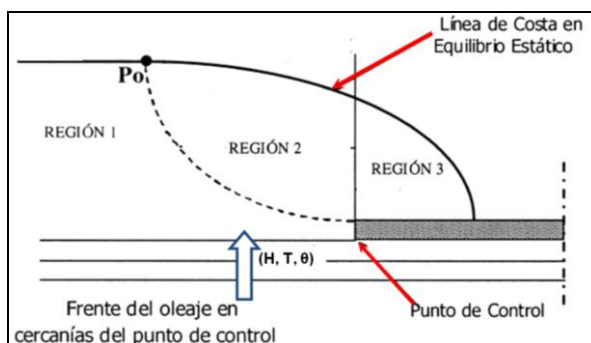


Figura 7: Regiones de una playa por efecto de la refracción y difracción del oleaje.
FUENTE: “Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de Equilibrio.

En la Figura 7, el punto P0 define el punto de inicio donde se aplica la ecuación parabólica y define, así mismo, la orientación del frente que ha de ser utilizado en la ecuación de Hsu et al., (1989), como el del flujo medio de energía del oleaje de la zona.

González y Medina (2001) propusieron como sistema para la determinación de dicho punto, P0, la evaluación de las variables α_{min} , Y/L , donde el ángulo α_{min} representa el ángulo complementario de β e Y/L representa la distancia a la cual se encuentra la playa a-dimensionalizada con la longitud de onda, (Figura 7)

Para obtener una expresión para α_{min} (Y/L) válida para playas naturales, estos autores seleccionaron playas de la costa Atlántica y Mediterránea Española, con los siguientes criterios: (1) playas desarrolladas; (2) con una zona recta “aguas abajo”, paralela al frente resultante del flujo medio de energía del oleaje en el punto de control.

Para definir el frente resultante en cada playa González y Medina (2001) realizaron el siguiente procedimiento:

- Determinaron, para diferentes sectores en aguas indefinidas, la altura de ola y períodos medios (correspondientes al flujo medio de energía por sector).
- Propagaron estos oleajes, hasta la playa.
- Determinaron el frente resultante del flujo de energía en el punto de control, (el cual corresponde a la parte recta de la playa).
- Posteriormente midieron en cada playa el ángulo, α min, y relacionaron este valor con el parámetro, Y/L , Figura 7.

Es importante señalar que para definición de la longitud de onda, L , en el punto de difracción, y por consistencia con el perfil de equilibrio que define la profundidad de cierre con H_{s12} , la determinación del valor de L se efectuó con el valor del período T_s , asociado a H_{s12} . La expresión que estos autores obtuvieron del ajuste fue:

$$\alpha_{\min} = \arctan \left[\frac{\left(\frac{\beta_r^4}{16} - \frac{\beta_r^2 Y}{2 L} \right)^{1/2}}{\frac{Y}{L}} \right]$$

Ecuación 14: Ecuación para determinar el ángulo alfa mínimo.

2.5.2 FORMULACIONES DE EQUILIBRIO EN PERFIL

El perfil de equilibrio representa, junto con la planta de equilibrio, uno de los pilares básicos en los que se sustenta el concepto de playa de equilibrio. Si bien en sentido estricto esta configuración de equilibrio no existe en la naturaleza, puesto que esta condición estacionaria es ideal, este concepto de equilibrio permite tener una representación aproximada de la morfología de una playa.

Las aplicaciones de este perfil de equilibrio son múltiples y se utilizan principalmente en las obras de regeneración y restauración de playas y en múltiples modelos numéricos y conceptuales que han de suponer una configuración previa de la morfología del perfil de playa. En lo que se refiere al primer aspecto, el perfil de equilibrio es utilizado, junto con la planta de equilibrio, en la cubicación del volumen de arena necesario para el relleno en una regeneración de playa o en el dimensionamiento de las longitudes y cotas de obras de protección del litoral tales como espigones de contención de arenas o diques exentos. En cuanto a las formulaciones se destaca; Brunn (1954), Dean (1977), Vellinga (1983), Bodge (1992), Komar y McDougal (1994)

Para el estudio de formulaciones que consideran el perfil de playa, se recomienda revisar las Referencias 4, 7, 25 y 45.

CAPÍTULO III

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este Trabajo de Título es encontrar los coeficientes que conformen una ecuación de equilibrio que modele la forma en planta de playas de las zonas central y norte chico de Chile y estudiar la aplicación de esta formulación en otros sectores del país, y en el diseño de playas artificiales.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar playas o bahías en equilibrio en las zonas del norte chico y central de Chile.
- Caracterizar el clima de oleaje para cuatro playas o bahías seleccionadas.
- Estudiar variabilidad histórica de líneas de costa para playas o bahías estudiadas.
- Zonificar del transporte de sedimentos en playas o bahías estudiadas.
- Determinar el flujo medio de energía del oleaje en playas estudiadas.
- Aportar con una propuesta metodológica para los estudios de playas en equilibrio aplicable a Chile.

CAPÍTULO IV

4 PLAYAS EN EQUILIBRIO SELECCIONADAS

4.1 METODOLOGIA DE SELECCION DE PLAYA

Para la determinación de los lugares de estudio se concentró la búsqueda de playas y bahías que preliminarmente están en equilibrio en las zonas del norte chico y central de Chile, entre los 28° y los 34° de latitud sur, considerando dos regiones geográficas del país (IV y V) de acuerdo a la Figura 8. Se analizaron bahías y playas que posiblemente están en equilibrio morfodinámico y que presentaran como requisito principal, una forma en planta característica que debía estar encajada entre dos salientes naturales o una natural y otra artificial, permitiendo asociar la forma de la planta a un patrón claro y conocido como por ejemplo, una ecuación característica de equilibrio, preferentemente, una parábola o espiral.

En base a la descripción anterior, se encontró una serie de bahías y playas de las cuales se recopiló información correspondiente a reportes históricos, estudios anteriores, estudios geográficos, registros fotográficos, estudios sedimentológicos, etc. Con estos antecedentes se elaboró una selección de playas que preliminarmente podrían estar en equilibrio en el largo plazo de acuerdo a su forma en planta.

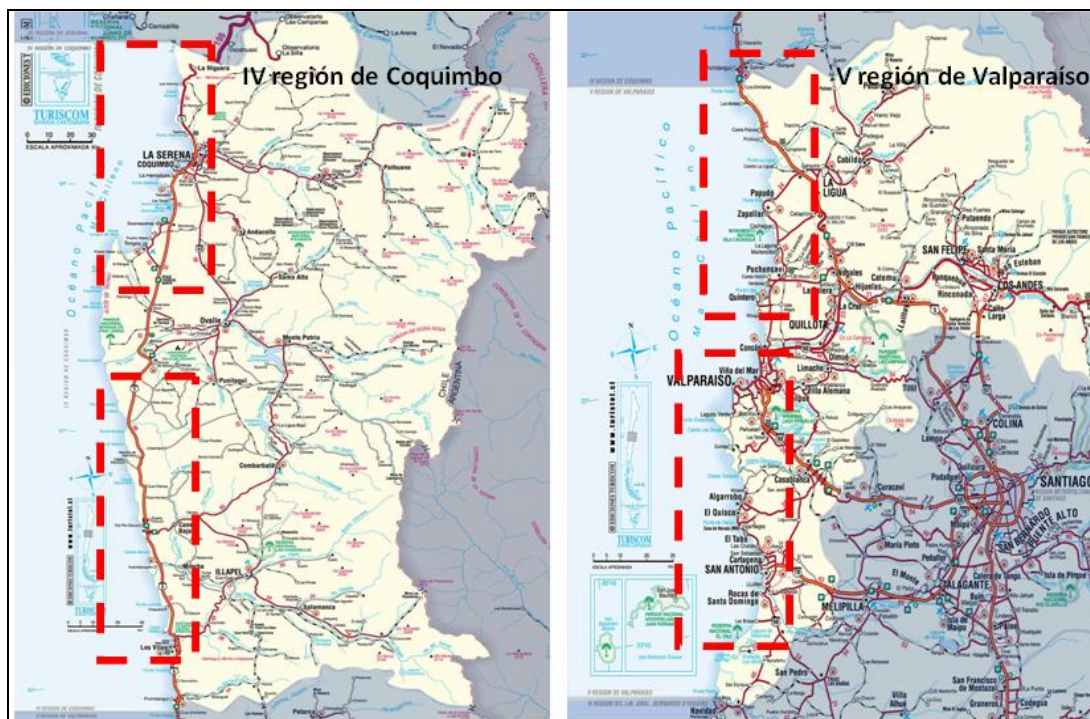


Figura 8: Sectores de estudio de las zonas del norte chico y central de Chile.

Fuente: Elaboración propia.

Se confeccionó un set fotográfico de las playas y bahías que se escogieron preliminarmente, para esto se buscaron fotografías aéreas históricas preferentemente de vuelos de propiedad y uso del Servicio Aereofotogramétrico (SAF), registros fotográficos del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y fotografía aérea de CONAMA. Además, la herramienta de visualización geo-espacial Google Earth resultó ser muy útil en este proceso.

Una vez completado el set fotográfico se procedió a determinar la variación al largo plazo en la forma de la planta y el comportamiento espacio-temporal de la línea de costa de cada playa, para esto se desarrolló un análisis que se presenta en el ítem 4.5.

4.2 SELECCIÓN DE PLAYAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la búsqueda y selección de playas y bahías de las zonas del norte chico y central de Chile, se utilizó la herramienta de referencia geo-espacial Google Earth. Con G.E. se buscó la costa de norte a sur, para esto se revisó desde la costa al norte de la Región de Coquimbo y se finalizó al sur de la Región Valparaíso.

Como se mencionó, el análisis se enfocó en playas con un patrón uniforme en su forma en planta. Como resultado preliminar, se seleccionaron las playas y bahías; La Serena, Guanaqueros, Tongoy y Quintero.

4.2.1 PLAYA LA SERENA

La playa La Serena fue seleccionada inicialmente por su forma característica de parábola cerrada por el norte y por el sur por configuraciones geográficas naturales (Figura 9)

Esta playa se ubica en la IV región de Chile, entre las ciudades de La Serena (Norte) y Coquimbo (Sur). Tiene un largo total aproximado de 20 kilómetros y su forma característica es de una parábola extendida en dirección norte a sur. La playa tiene su punto de control (polo de difracción del oleaje) en el extremo sur, éste está constituido por el afloramiento rocoso donde se ubica el Fuerte Lambert. Por el extremo norte, la playa tiene su límite en Punta Teatinos.

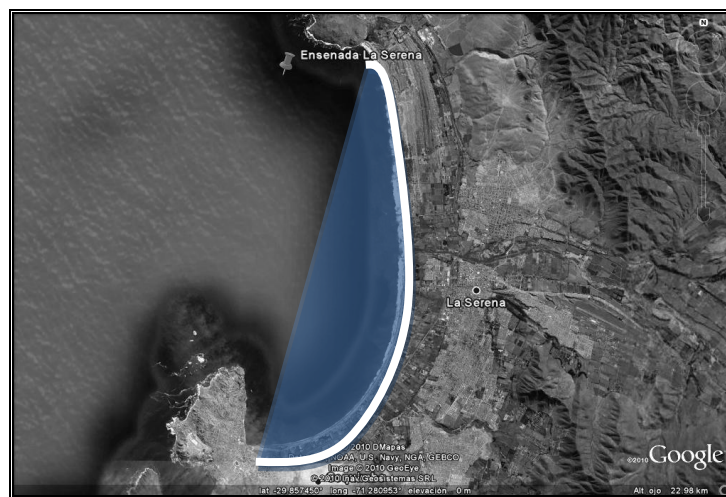


Figura 9: Forma de la planta de playa La Serena.

Fuente: Google Earth.

De acuerdo a los reportes encontrados en relación a las características geográficas que componen el sector, se destacan la desembocadura del Río Elqui, la Quebrada Romeral y la desembocadura del estero Culebrón. Estas formas geográficas pueden considerarse como agentes responsables del funcionamiento morfodinámico de la playa, además de la interacción de ésta con fenómenos hidrodinámicos asociados a oleaje y corrientes.

La playa la Serena es un centro turístico muy demandado de la zona central de Chile, es reconocido por la calidad del sector constituyéndose en uno de los principales balnearios del país. Es llamativa por la calidad de la arena además de las condiciones de oleaje presentes. El clima en general es cálido lo que hace más atractivo al sector.

4.2.2 PLAYA GUANAQUEROS

Se seleccionó la playa Guanaqueros por su forma de planta característica de espiral o parábola abierta de Norte a Sur (Figura 10). Esta playa se ubica en la IV Región de Chile, a 34 Km. al sur de Coquimbo y a 46 km. al sur de La Serena. Está representada por su forma de parábola debido a que se encuentra protegida del oleaje proveniente desde el S y SW por Punta Guanaqueros. Tiene un largo aproximado de 17 kilómetros y se cierra en el extremo norte en el sector de Quebrada Lagunillas. Otra característica geográfica importante es la presencia de Laguna Adelaida cuya influencia en la dinámica del transporte de sedimentos presente en la playa es relevante.

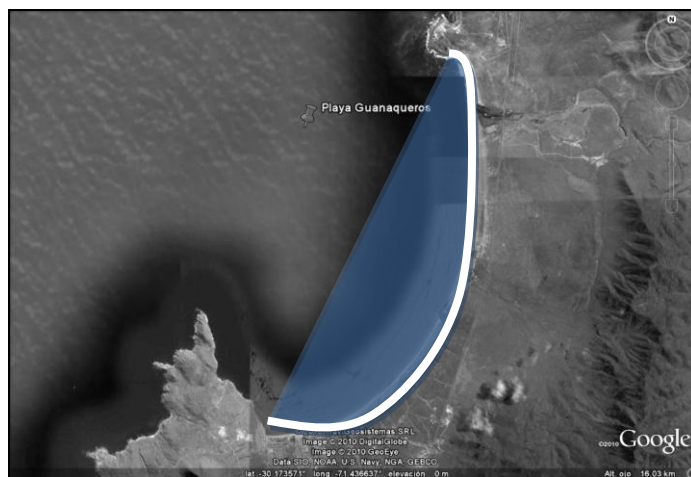


Figura 10: Forma de la planta de playa Guanaqueros.
Fuente: Google Earth.

El balneario de Guanaqueros es un centro turístico de la región de Coquimbo, característico por la tranquilidad de las aguas, además del tamaño fino del sedimento presente. Es un balneario apto para el baño ya que posee un grato clima templado la mayor parte del año.

4.2.3 PLAYA TONGOY

Esta playa se escogió debido a su forma característica de espiral, aunque su dirección no es de norte a sur como las anteriores, las condiciones morfológicas e hidrodinámicas presentes, permiten establecer de forma preliminar, que se encuentra en estado de equilibrio (Figura 11).

Playa Tongoy posee características particulares ya que se encuentra protegida del oleaje que viene de direcciones W y SW. Esto se debe a la Punta Lengua de Vaca, que constituye un resguardo por el extremo sur de la playa, lo que permite que las corrientes longitudinales sean prácticamente nulas, prevaleciendo los cambios asociados al movimiento transversal del sedimento presente en el sector.

Otras características relevantes que forman parte de la configuración costera del sector, la constituyen las quebradas Los Almendros, Los Litres y Pachingo, además de la presencia del estero Tongoy. Estos accidentes geográficos son de importancia ya que tienen relevancia en los procesos de transporte de sedimentos en la playa, y en el funcionamiento morfodinámico de la misma.

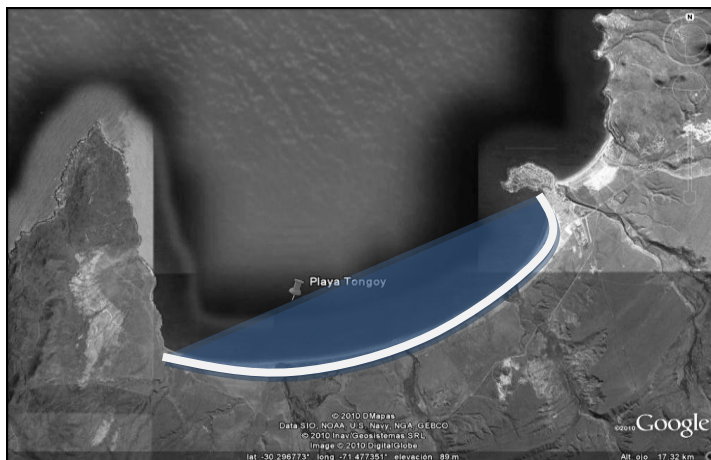


Figura 11: Forma de la planta de playa de playa Tongoy.
Fuente: Google Earth.

La playa Tongoy se ubica en la IV Región, a 48 Km al sur de Coquimbo. Se extiende de forma horizontal de W a E con un largo aproximado de 12 Km. Es un balneario principal de la región, debido a las buenas condiciones del mar y lo llamativo de sus arenas blancas.

4.2.4 BAHÍA DE QUINTERO

La Bahía de Quintero se seleccionó por que se constituye en la única zona costera (playa y/o bahía) de la V Región con forma característica de espiral o parábola. (Figura 12). Las condiciones morfológicas del sector permiten atribuir a ésta bahía un estado de equilibrio al largo plazo considerando las características del oleaje reinante, el que es refractado desde el extremo sur. En la zona norte la forma de parábola se cierra en la localidad de Ventana.

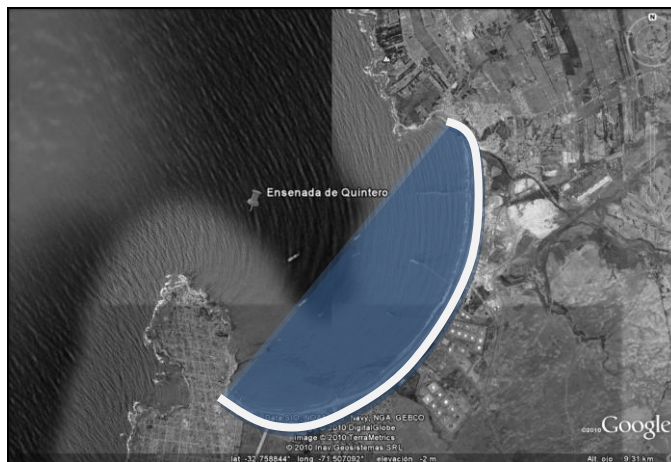


Figura 12: Imagen aérea de bahía de Quintero.
Fuente: Google Earth.

La Bahía Quintero es un sector de gran auge económico de crecimiento urbano e industrial de la zona central de Chile. Se constituye por una serie de playas y terminales portuarios que forman parte importante de la actividad marítima nacional. Se ubica en la V Región, siendo Quintero su principal ciudad, localizada a 28 kilómetros al norte de Valparaíso.

Del punto de vista geográfico, la bahía se encuentra protegida por dos salientes rocosos, siendo el principal, la del sur, conocido como Península Los Molles, que ofrece protección al oleaje proveniente del SW, ésta característica es fundamental para la actividad portuaria que se desarrolla en el sector.

4.3 DOCUMENTACION DE VARIABILIDAD HISTORICA

4.3.1 VARIABILIDAD HISTORICA DE LINEA LITORAL DE PLAYA LA SERENA

Para analizar la variabilidad histórica de la línea de costa de playa la Serena se recopiló información de varias fuentes relevantes, siendo la Revista Geográfica de Chile Terra Australis (Referencia 36) la que desarrolló en su versión del año 1991, un estudio y análisis completo a la línea litoral y registro histórico de este balneario. De acuerdo a esta documentación, se analizó la línea de playa para un intervalo de 25 años, periodo en el cual se presentó una variación aunque no significativa de la línea litoral, se destacó una característica marcada por un avance de la playa hacia el norte y un retroceso hacia el sur, preferentemente donde se encuentra la desembocadura del río Elqui. Se determinó que la variación de la línea litoral, así como el funcionamiento morfodinámico de la playa se encuentra condicionada por el aporte sedimentario de este río.

Dentro de la configuración geográfica del sector que compone la playa, existen otras formas naturales que intervienen en el proceso sedimentario, entre ellas, se destaca la quebrada El Romeral que constituye una fuente de aporte de sedimentos, mientras que el estero El Culebrón, de acuerdo a la referencia expuesta, no aporta los sedimentos suficientes como para mantener la línea de costa y en base a esto es que se presenta la tendencia regresiva de la playa en la zona sur y progradada en la zona norte.

De acuerdo al estudio revisado (Ref. 36), la evolución de la línea de costa en un periodo de 25 años tomando como año final 1990, para ocho sectores de la playa, se representa en la Tabla 5. La ubicación de los sectores analizados se muestra en la figura 13.

Los resultados muestran que la evolución de la línea de costa en la Playa La Serena presenta tendencia progradada y regresiva en cada uno de los sitios analizados (Figura 13). En total, la variación general progresiva es de 285 metros aproximadamente, mientras que el retroceso fue de 125 metros, por lo que se puede concluir que, para un periodo de 25 años, la variación de la línea de costa no es significativa. El promedio de variación de la línea de costa es de 20 metros para este intervalo de tiempo analizado. Lo anterior permite concluir que, en términos de transporte de sedimentos neto, se observó un retroceso promedio de la línea de costa del orden de 0.75 metros al año.

Si se consideran cada uno de los agentes que intervienen en el proceso sedimentario de la playa, además de los resultados obtenidos en el estudio de la Referencia analizada, se

puede concluir de forma preliminar, que la playa se encuentra en estado de equilibrio morfodinámico al largo plazo. Sin embargo, este equilibrio debe ser comprobado por medio de un análisis espacio-temporal para verificar el comportamiento de la línea de costa de la playa. Este estudio se presenta en la ítem 4.5.

Playa La Serena		
Sector	Variación en 25 años [m]	Tendencia
1	217	Progresiva
2	42	Progresiva
3	27	Progresiva
4	-3	Regresiva
5	-40	Regresiva
6	-36	Regresiva
7	-27	Regresiva
8	-22	Regresiva

Tabla 5: Variabilidad de la línea litoral.
FUENTE: Revista Geográfica de Chile.

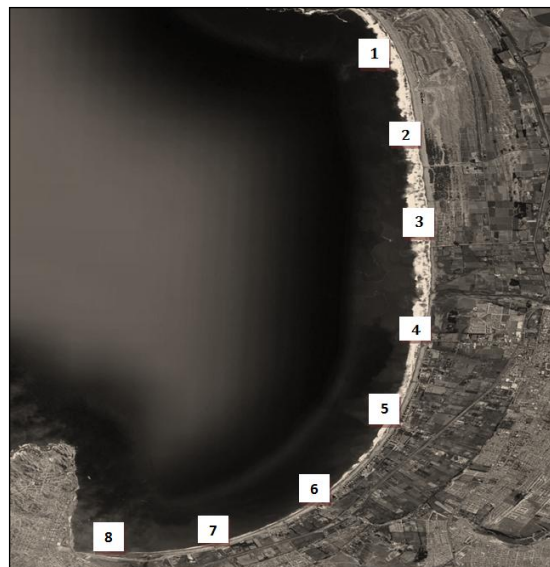


Figura 13: Ubicación de los sitios de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 VARIABILIDAD HISTORICA DE LINEA LITORAL DE PLAYA GUANAQUEROS

Para el análisis de la variabilidad histórica de la línea de costa de playa Guanaqueros, tal y como se desarrolló en playa La Serena, se tomó como referencia el estudio de la Revista Geográfica de Chile Terra Australis (Referencia 36) la que presenta en su versión del año 1991, una investigación referente a los cambios de la línea litoral para un periodo de 25 años. Este estudio se realizó utilizando registros históricos que caracterizaron el balneario.

En base a esta investigación, se concluyó que playa Guanaqueros muestra una tendencia progradada en los tramos de las zonas norte y centro, esto demuestra que en zonas donde se ubica Quebrada Lagunillas y Morrillos existe un aporte sedimentario significativo.

El estudio destaca la importancia de la Laguna Adelaida, cuyo sistema estuarino se constituye como una barrera natural al aporte sedimentario de la Quebrada Lagunillas y Morrillos por lo que el sedimento que proviene desde esa fuente, llega reducido a zonas del sector sur de la playa. Esto explica la tendencia regresiva que se presenta este sector sur del balneario, sumado también la “zona de sombra” generada por la punta Guanaqueros (límite sur de la playa).

Los resultados de la referencia analizada se presentan en la Tabla 6, en donde se muestra la evolución de la línea de costa en un periodo de 25 años, tomando como año final 1990, para tres sectores distintos de la playa. Las tres zonas que se analizaron se muestran en la Figura 14.

Playa Guanaqueros		
Sitio	Variación en 25 años [m]	Tendencia
1	15	Progresiva
2	15	Progresiva
3	-83	Regresiva

Tabla 6: Variabilidad de la línea litoral de playa Guanaqueros.
FUENTE: Revista Geográfica de Chile Terra Australis ,1991.

Los resultados indican que la evolución histórica de la línea de costa de Playa Guanaqueros presenta variaciones progradadas y regresivas en los diferentes sitios estudiados (Figura 14). En total la variación general de la línea litoral tiene una tendencia regresiva en 53 metros aproximadamente; de acuerdo a esto, para un periodo de 25 años, la variación no es significativa. Mientras que el promedio de variación es de 26 metros para el intervalo de tiempo analizado. Lo anterior demuestra que, en términos de transporte de sedimentos neto, se observó un retroceso promedio de la línea de costa del orden del metro por año.

Si se consideran los agentes que intervienen en el proceso sedimentario de la playa, como la Quebrada Lagunillas y Morrillos y la influencia de Punta Guanaqueros, además de las conclusiones obtenidas en estudio de referencia citada, se determinó de forma preliminar que la playa se encuentra en estado de equilibrio morfodinámico en el largo plazo.

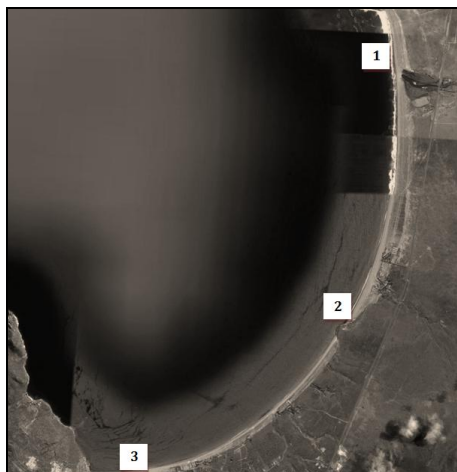


Figura 14: Variación en diferentes sitios de estudio. Playa Guanaqueros.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 VARIABILIDAD HISTORICA DE LINEA LITORAL DE PLAYA TONGOY

Se estudió y analizó la línea litoral de playa Tongoy para lo cual se utilizó, de igual forma a los casos anteriores, el estudio de la Revista Geográfica de Chile Terra Australis (1991). Tal y como se describió antes, esta investigación obtuvo la variación histórica de la línea litoral de ésta playa, para un periodo de 25 años.

En la Tabla 7 se presenta la variación de la línea litoral para el periodo de tiempo señalado, tomando como año final 1990, para cuatro sectores en que se dividió la playa. Éstos se muestran en la Figura 15.

Playa Tongoy		
Sitio	Variación en 25 años [m]	Tendencia
1	130	Progresiva
2	339	Progresiva
3	226	Progresiva
4	299	Progresiva

Tabla 7: Variabilidad de la línea litoral de playa Tongoy.
FUENTE: Revista Geográfica de Chile Terra Australis, 1991.

Como resultado se observó que la evolución histórica de la línea de costa de Playa Tongoy presenta variaciones progradadas en los cuatro sitios estudiados (Figura 15). En total la variación general de la línea litoral tiene una tendencia de progradación de 994 metros aproximadamente. De acuerdo a esto, para un periodo de 25 años, la variación de la línea de costa puede llegar a ser significativa, sin embargo, se puede estimar que este aumento en el sedimento de la playa obedece a fenómenos de acreción por aportes de sedimentos del Estero Tongoy y las quebradas adyacentes. El promedio de acreción fue de 248.5 metros. Lo anterior demuestra que, en términos de transporte de sedimentos neto, se observó un aumento promedio de la línea de costa del orden de 10 metros al año.

Se destaca la importancia que genera la protección de la Punta Lengua de Vaca (límite sur del balneario) para el funcionamiento morfodinámico de la playa. Este accidente geográfico restringe el movimiento del sedimento en dirección paralela en la zona sur del balneario, mientras que desde la zona central al norte, existe transporte longitudinal de sedimentos. Esto puede ser la causa principal del crecimiento que ha manifestado la línea litoral de playa Tongoy en 25 años.

Si se consideran los principales agentes que intervienen en el proceso sedimentario de la playa, como las Quebradas Los Almendros, Los Litres y Pachingo y el aporte del Estero Tongoy, y de acuerdo a los resultados presentados en la referencia citada para complementar esta investigación, se determinó de forma preliminar que la playa se encuentra en estado de equilibrio morfodinámico al largo plazo.

Para verificar el estado de equilibrio al largo plazo para esta playa, se complementa el estudio con el análisis de la variabilidad histórica que se presenta en los ítems 4.4 y 4.5 de este documento, en los que se muestra un set de fotografías aéreas y variaciones de la línea litoral para los años que comprende cada foto histórica.

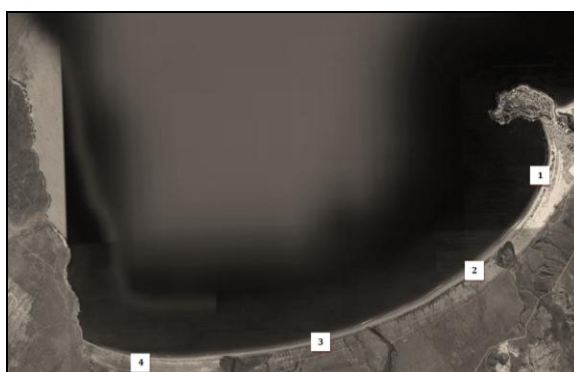


Figura 15: Variación en diferentes sitios de estudio. Playa Tongoy.
Fuente: Elaboración propia.

4.4 ANALISIS ESPACIO-TEMPORAL A LAS PLAYAS SELECCIONADAS

4.4.1 SET DE FOTOGRAFIAS HISTORICAS

Para la determinación del equilibrio morfodinámico al largo plazo en planta de las playas seleccionadas se obtuvo un set de fotografías aéreas como registro histórico de acuerdo a las fuentes de información antes señaladas. En este registro de fotografías se observan las variaciones asociadas a retroceso o aumento de la línea de costa de cada sector en un análisis histórico que comprende varios años.

La elaboración de este set de fotografías aéreas por cada zona de estudio tiene por objetivo comprobar el equilibrio de cada playa en el largo plazo y complementar los resultados obtenidos hasta ahora.

A continuación, se presenta el set fotográfico que se construyó por cada zona de estudio. Se muestran el año y fuente de cada foto recopilada.

4.4.1.1 SET FOTOGRAFICO PLAYA LA SERENA

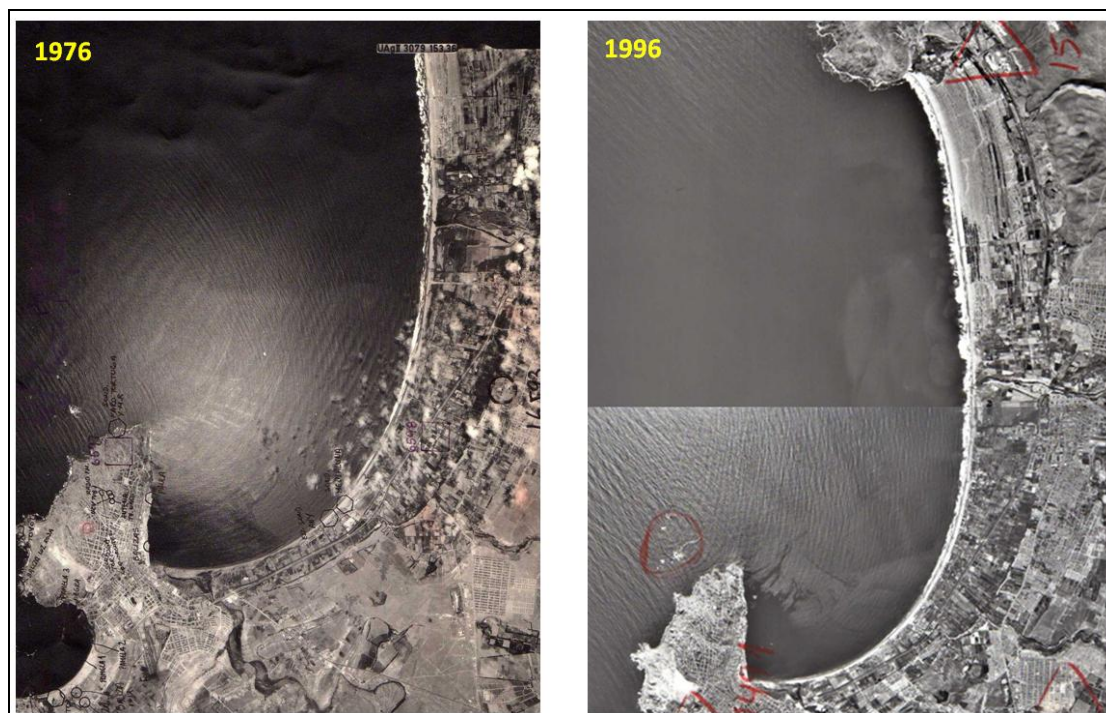


Figura 16: Fotos aéreas de Playa La Serena.
 Imagen Izquierda: Año 1976. Fuente SAF.
 Imagen Derecha: Año 1996. Fuente SHOA.



Figura 17: Fotos aéreas de Playa La Serena.
Imagen Izquierda: Año 2001. Fuente CONAF/CONAMA.
Imagen Derecha: Año 2004. Fuente Google Earth.

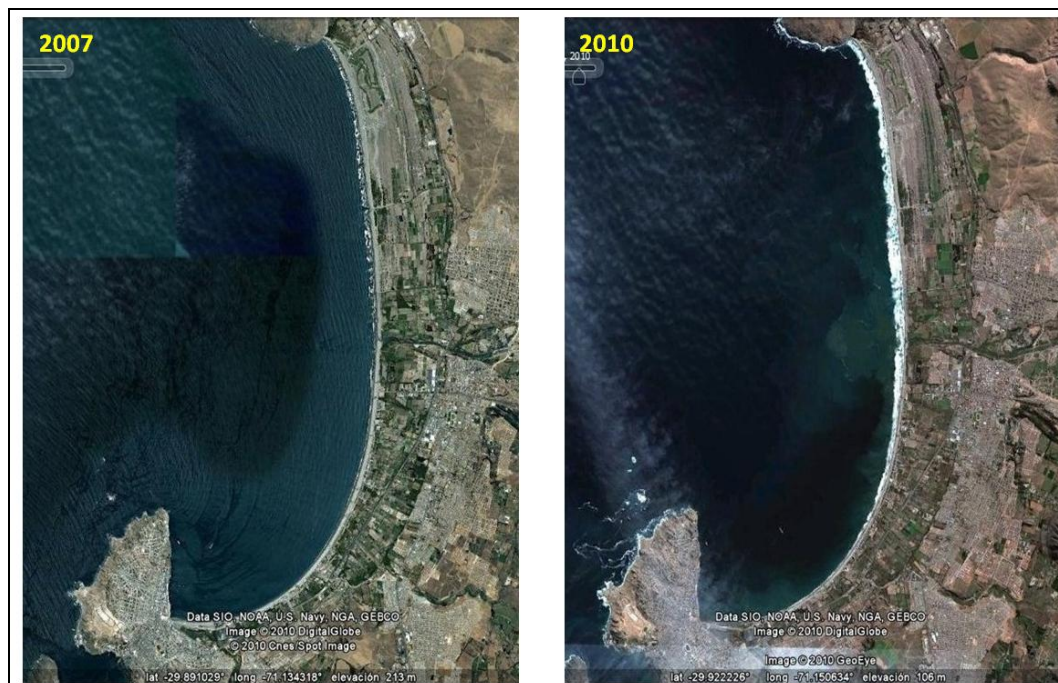


Figura 18: Fotos aéreas de Playa La Serena.
Imagen Izquierda: Año 2007. Fuente Google Earth.
Imagen Derecha: Año 2010. Fuente Google Earth.

4.4.1.2 SET FOTOGRÁFICO PLAYA GUANAQUEROS

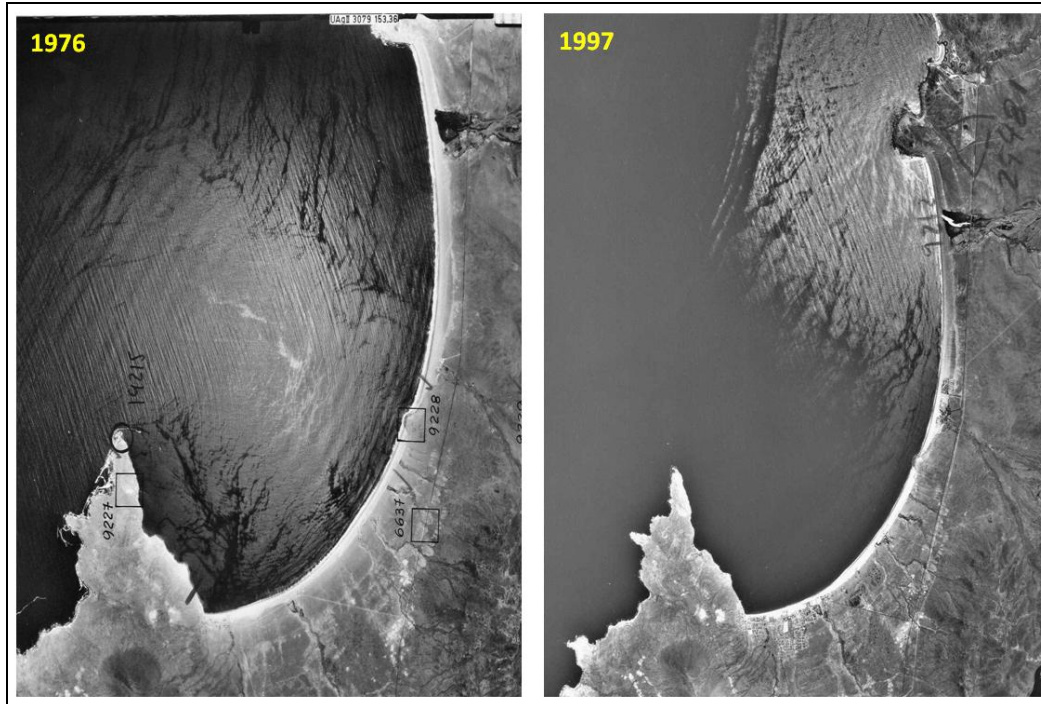


Figura 19: Fotos aéreas de Playa Guanaqueros.

Imagen Izquierda: Año 1976. Fuente SAF.

Imagen Derecha: Año 1997. Fuente SHOA.



Figura 20: Fotos aéreas de Playa Guanaqueros.

Imagen Izquierda: Año 2001. Fuente CONAF/CONAMA.

Imagen Derecha: Año 2005. Fuente Google Earth.



Figura 21: Foto aéreas de Playa Guanaqueros.
Imagen: Año 2010. Fuente Google Earth.

4.4.1.3 SET FOTOGRÁFICO PARA PLAYA TONGOY



Figura 22: Foto aérea de Playa Tongoy.
Imagen: Año 1976. Fuente SAF.

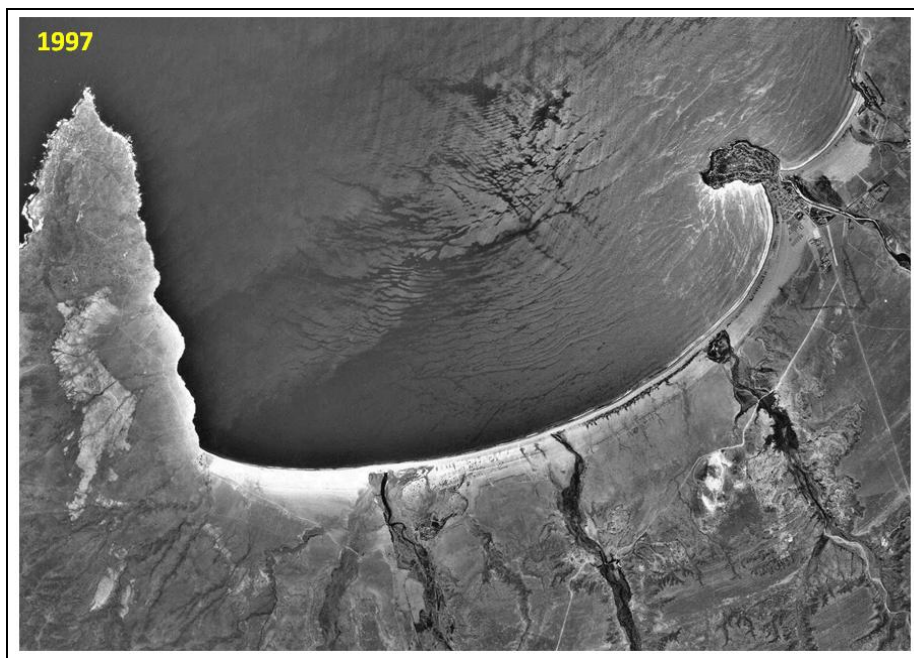


Figura 23: Foto aérea de Playa Tongoy.
Imagen: Año 1997. Fuente SHOA

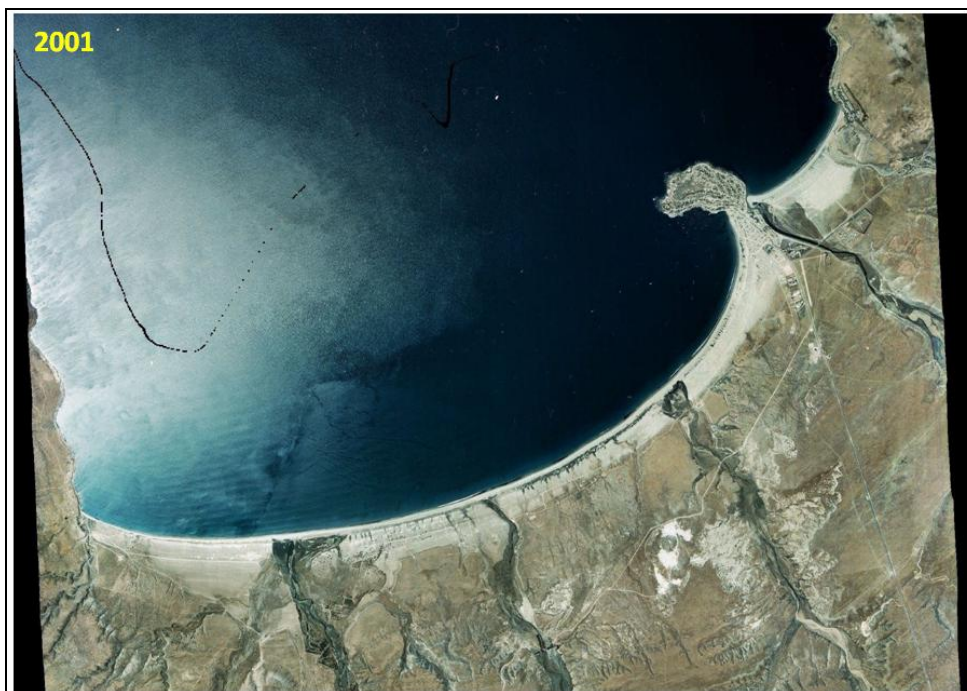


Figura 24: Foto aérea de Playa Tongoy.
Imagen: Año 2001. Fuente CONAF/CONAMA.



Figura 25: Foto aérea de Playa Tongoy.
Imagen: Año 2004. Fuente Google Earth.

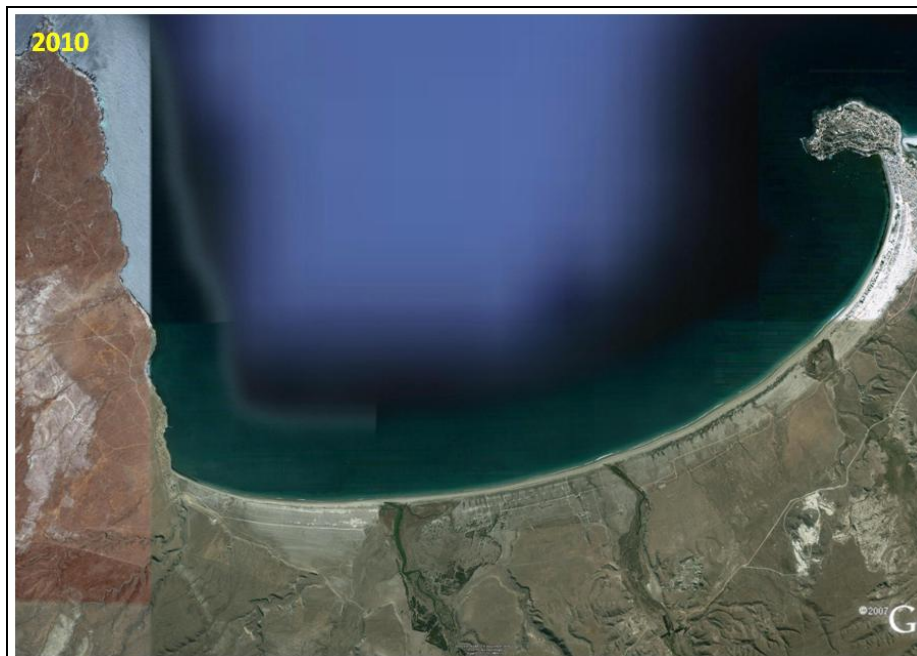


Figura 26: Foto aérea de Playa Tongoy.
Imagen: Año 2010. Fuente Google Earth.

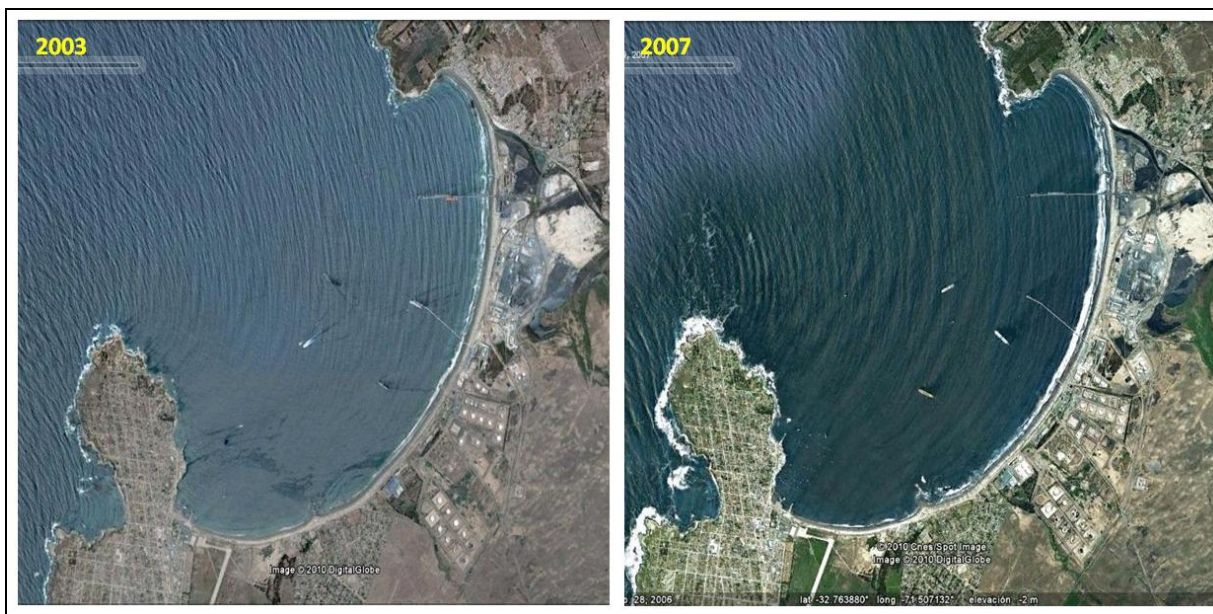
4.4.1.4 SET PARA BAHÍA DE QUINTERO



Figura 27: Fotos aéreas de Bahía Quintero.
 Imagen Izquierda: Año 1964. Fuente SAF.
 Imagen Derecha: Año 1970. Fuente SAF.



Figura 28: Fotos aéreas de Bahía Quintero.
 Imagen Izquierda: Año 1976. Fuente SAF.
 Imagen Derecha: Año 1996. Fuente SHOA.



**Figura 29: Fotos aéreas de Bahía Quintero.
Imagen Izquierda: Año 2003. Fuente Google Earth.
Imagen Derecha: Año 2007. Fuente Google Earth.**



**Figura 30: Foto aérea de Bahía Quintero.
Imagen: Año 2010. Fuente Google Earth.**

4.4.2 ANALISIS HISTORICO DE LA LINEA DE PLAYA

Para el análisis histórico de cada línea de playa en los sectores seleccionados, se estableció una metodología en la que se procedió a geo-referenciar cada línea obtenida a partir de la imagen histórica que compone el set fotográfico recopilado. Este proceso entregó como resultado distintas líneas litorales asociadas a cada una de las playas, las que se visualizaron en una sola imagen en periodo actual y en una misma escala con el objeto de determinar principales variaciones históricas y verificar el estado de equilibrio al largo plazo de acuerdo a su forma de planta.

La metodología de análisis consideró un proceso de georeferenciación de la línea litoral utilizando herramientas de ingeniería y de sistemas de información geográfica (SIG). En este caso se utilizaron los softwares Autocad2007 y Global Mapper 9. Con estas herramientas se estandarizaron las escalas de las fotografías históricas para trabajarlas en un mismo sistema geográfico. El objetivo principal de este procedimiento es exportar las líneas de costas en cualquier formato a otro sistema de referencia como es el caso de Google Earth que utiliza formato “kmz” o “kml” para cargar archivos.

4.4.2.1 PLAYA LA SERENA

Al geo-referenciar cada una de las líneas litorales correspondientes a las fotografías históricas analizadas, se estudiaron los cambios espacio-temporales de la posición relativa de la línea litoral en playa La Serena tomando como año de referencia 1976, debido a que ese año corresponde a la fotografía histórica más antigua que se analizó.

La gráfica de la Figura 31 muestra los avances y retrocesos de la línea litoral en intervalos de 3000 metros partir del extremo norte de la playa.

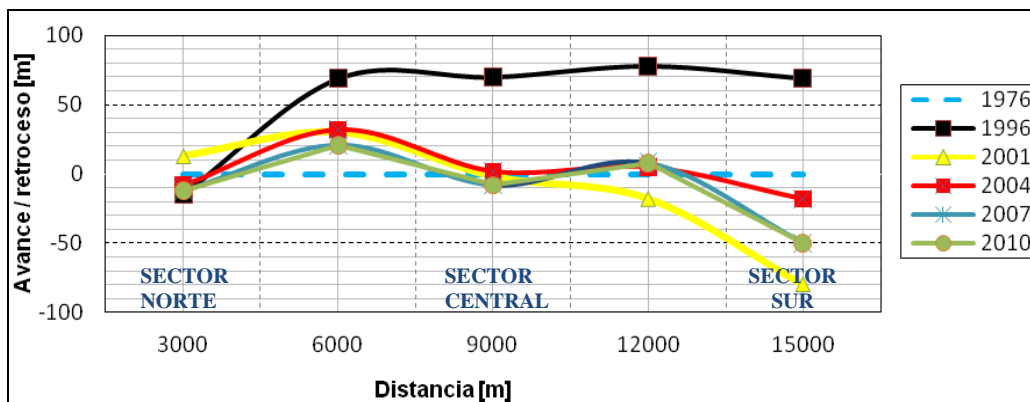


Figura 31: Cambios espacios-temporales de la posición relativa de la línea de costa de playa La Serena. FUENTE: Elaboración propia.

Los resultados indican que las principales variaciones corresponden a un aumento de la línea litoral, del orden de 70 [m] para el año 1996 con respecto al año de origen. La variación para los otros años muestra una tendencia similar entre sí, es decir, se observa un aumento menor en la zona norte de la playa y un retroceso en el extremo sur.

Se estudiaron las variaciones de cada línea litoral histórica asociada a los años que se tiene registro. Para esto, se cargaron las líneas georeferenciadas en una imagen actual

como se presenta la Figura 32. En ésta se muestra que no existen variaciones mayores con alguna tendencia al aumento o retroceso de la línea litoral de esta playa y las diferencias encontradas pueden deberse a distintos instantes de marea en que se tomó la foto aérea.

Al realizar un análisis en distintos sectores de la playa; en la zona norte del balneario la línea de costa se mantuvo sin cambios significativos ya que la variación promedio no alcanzó los 10 metros, mientras que la variación mayor no superó los 40 metros entre los años 1996 y 2010. En la zona central de la playa se observa una variación similar del orden de 45 metros entre el año 1996 y la fecha actual. En sector sur se observan variaciones mayores a las otras zonas ya que la línea litoral del año 1996 se encuentra cerca de 100 metros hacia costa generando una diferencia mayor con las líneas de los otros años, en particular con la del año 2001. Estas diferencias podrían deberse a cierta inexactitud en los procesos de escalamiento o geo-referencia de las imágenes, además de los distintos instantes de marea u otros fenómenos particulares no considerado en la investigación.

La variación promedio en toda la playa no supera los 20 metros. Si se considera la diferencia mayor histórica (entre 1976 y 2010) no supera los 50 metros y se presenta en la zona sur de la playa, mientras que en otros sectores la diferencia es menor. Mientras que la variación anual es del orden de 0.5 metros.

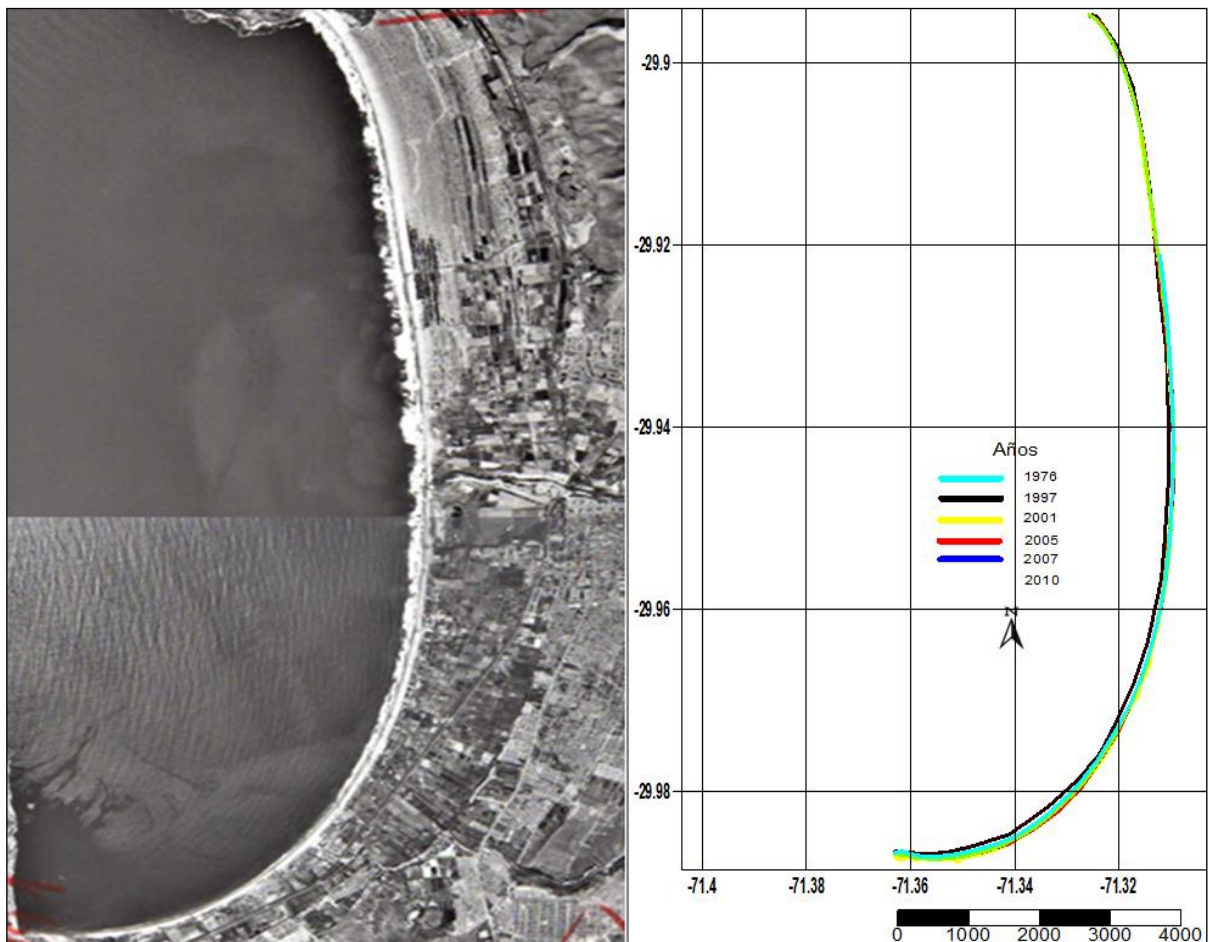


Figura 32: Líneas de costas históricas de playa La Serena.
FUENTE: Elaboración propia.

En cuanto a las tendencias, la variación es positiva en la zona norte de la playa, mientras que en el centro no se observa una tendencia clara ya que el cambio de la línea de playa es prácticamente nulo, y en el sector sur se presenta un aumento de la línea de costa que corresponde a lo actual con respecto al año 1976.

Tomando en cuenta que si bien existen variaciones en la línea litoral de La Serena, éstas no son significativas considerando la escala de tiempo analizada, se explica que existe un equilibrio dinámico en la playa, es decir, hay transporte longitudinal de sedimento, sin embargo, es posible que el volumen de sedimento que entra y sale sea idéntico, lo que hace relación a la definición de equilibrio morfodinámico. Además, estos resultados se corroboraron con lo que se mostró en la investigación presentada en el estudio de la revista geográfica (Ref. 36).

4.4.2.2 PLAYA GUANAQUEROS

Utilizando el mismo procedimiento descrito para playa La Serena, se geo-referenciaron las líneas históricas de Guanaqueros y se analizaron los cambios espacio-temporales que presentó esta playa. Para esto se tomó como año de referencia 1976, considerando que éste corresponde a la foto más antigua del set histórico de esta playa.

La Figura 33 muestra los avances y retrocesos de la línea litoral en intervalos de 2500 metros partir del extremo norte de la playa.

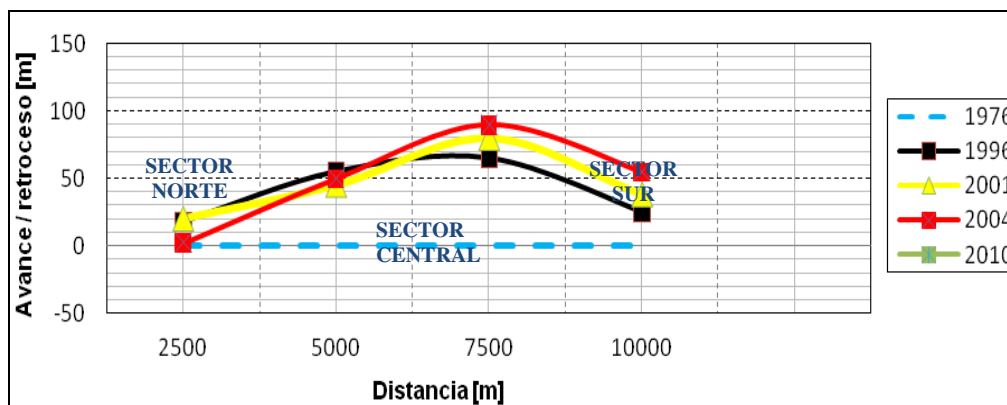


Figura 33: Cambios espaciales temporales de la posición relativa de la línea de costa de playa Guanaqueros. FUENTE: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados, las variaciones mayores correspondieron a un aumento del orden de 70 [m] para todos los años estudiados, representado en el sector central de la playa. En los extremos, las variaciones son menores o prácticamente nulas.

Para analizar las diferencias históricas con respecto a la actualidad se presenta en la Figura 34 las líneas históricas cargadas sobre una foto actual de Guanaqueros. Los resultados indican que, no se observan variaciones significativas con tendencia a aumento o retroceso de la línea litoral. En particular, en el sector norte del balneario, la línea de costa se mantuvo sin cambios significativos ya que la variación promedio no es mayor a 8 metros, mientras que la variación mayor no supera los 35 metros entre los años 1976 y 2010. En la zona central de la playa se observan variaciones mayores que en promedio

superan 50 metros entre el año 1976 y el resto de líneas analizadas, específicamente, con respecto a las dos últimas décadas. En el sector sur, las variaciones son menores a las otras zonas ya que las líneas litorales de cada año son similares.

La variación promedio en toda la playa no alcanza 15 metros. Si se analiza la diferencia mayor histórica (entre 1976 y 2010), no supera los 60 metros, en el sector central de la playa, mientras que en las otras zonas la diferencia es menor. De acuerdo al tiempo analizado, la variación anual es del orden de 0.4 metros.

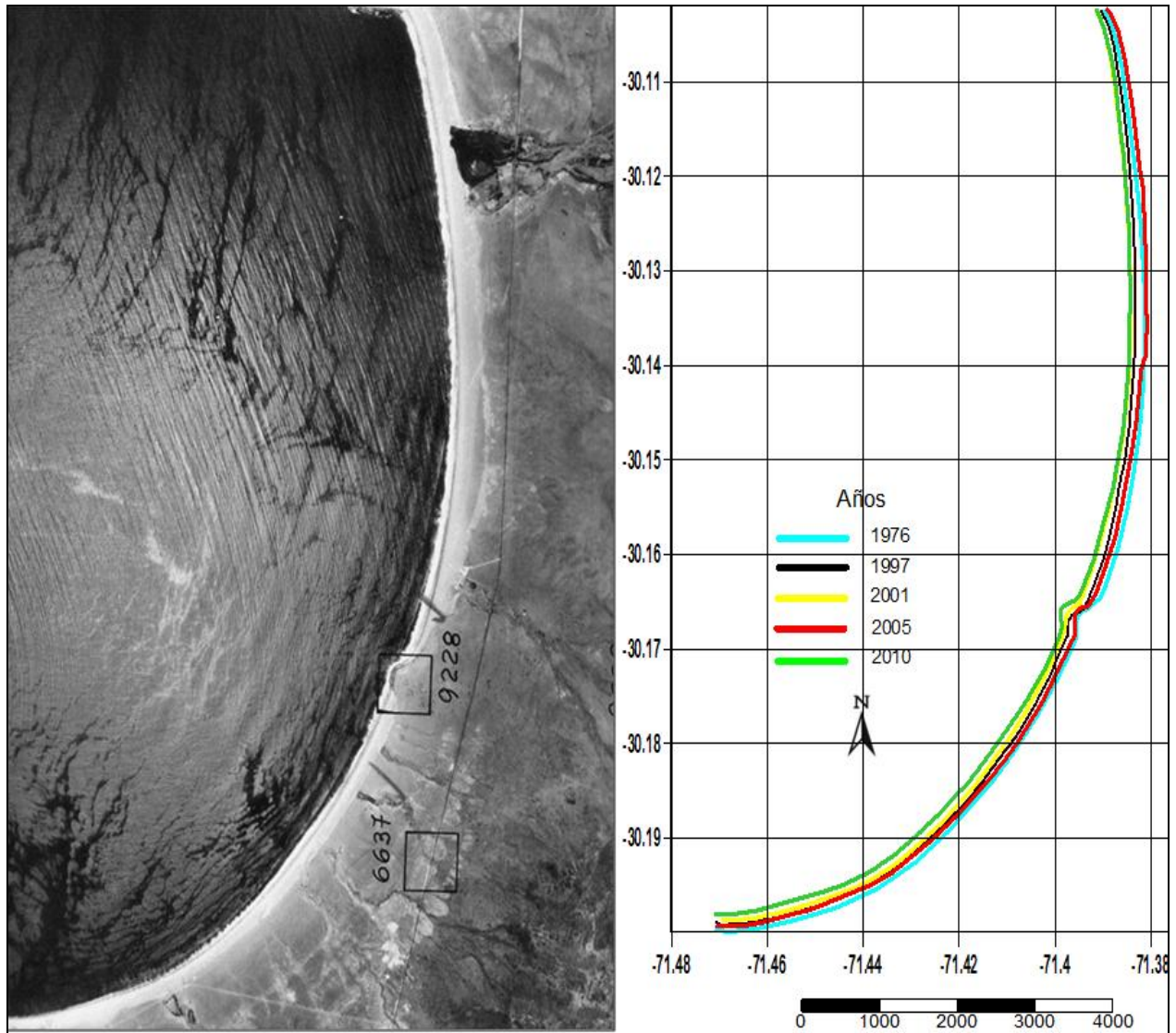


Figura 34: Líneas de costas históricas de playa Guanaqueros.
FUENTE: Elaboración propia.

Al analizar las tendencias, la variación mayor observada se presenta en la zona centro de la playa, ésta consiste en un crecimiento de la misma y aumento de la línea de costa que podría ser consecuencia del depósito de material sedimentario en ese sector, considerando que en esa zona se presenta un relieve geográfico que restringe el transporte de

sedimentos en dirección paralela a la línea litoral, y acumula arena en todo el sector centro del balneario. Este elemento corresponde a los roqueríos ubicados en el centro de la playa que genera un relieve característico en forma de tómbolo.

En base a lo estable que se mantuvo la línea litoral de Guanaqueros, se verificó el equilibrio dinámico al largo plazo (34 años) de la playa, considerando también que ésta se acomodó a las condiciones de oleaje y corrientes inducidas en este periodo de tiempo estudiado. Este resultado es similar a lo concluido en la investigación presentada en la Referencia 36.

4.4.2.3 PLAYA TONGOY

Se estudiaron los cambios espacio-temporales de la posición relativa de la línea litoral de playa Tongoy. Se consideró como año de referencia 1976, en consecuencia a que la fotografía histórica de este año es la más antigua del registro.

La Figura 35 muestra los avances y retrocesos de la línea litoral en intervalos de 2500 metros partir del extremo Norte-Este de la playa.

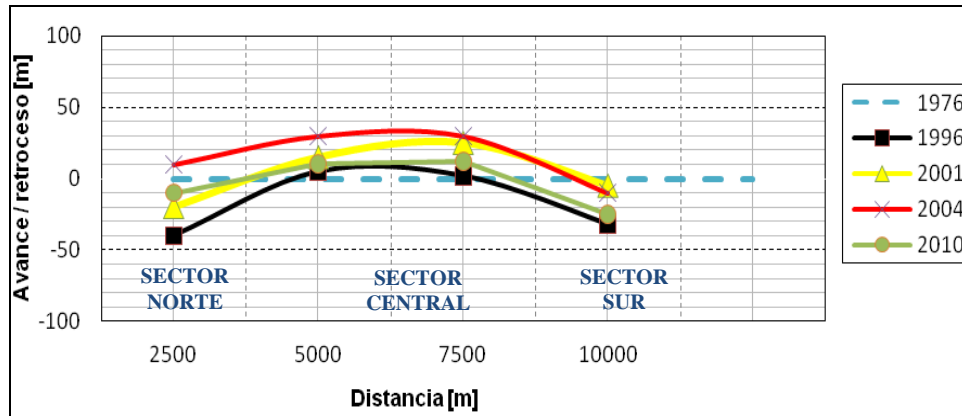


Figura 35: Cambios espaciales temporales de la posición relativa de la línea de costa de playa Tongoy. FUENTE: Elaboración propia

Se observaron variaciones mayores asociadas al retroceso de la línea litoral, del orden de 30 [m] en los extremos del balneario. Particularmente, en la zona norte de la playa se observó el retroceso mayor entre los años 1996 y 1976.

En la Figura 36 se muestra el estudio por cada línea de acuerdo a la condición actual. En la imagen se observa que en la zona norte del balneario la línea de costa presenta cambios, aunque no significativos con variaciones promedio del orden de 35 metros, mientras que la variación mayor no alcanza los 55 metros entre los años 1976 y 2001. En sector central de la playa no se generan variaciones importantes ya que en promedio no son mayores a 10 metros. Mientras que en el sector sur las variaciones son menores a la zona norte y coinciden con el sector central ya que la línea litoral que representa cada año estudiado se observa sin cambios significativos. La variación promedio no alcanza 18 metros, y al considerar la diferencia mayor histórica (entre 1976 y 2010), el promedio no supera los 70 metros y se presenta en la zona norte, mientras que en las otras zonas la diferencia es menor. Para el periodo de tiempo de estudio analizado, la variación anual es del orden de 0.52 metros.

En relación a las tendencias, la variación mayor observada se presenta en la zona norte de la playa, ésta consiste en un decrecimiento de la misma y está asociada a un retroceso de la línea de costa que podría deberse al depósito de material sedimentario en el sector sur, ya que el sedimento se ha depositado en este sector para equilibrar el retroceso en la zona norte. Este proceso explica un grado de equilibrio dinámico que presenta la playa, además, se puede entender esto debido a la dirección que tiene la playa que es prácticamente horizontal y no norte-sur como las anteriores, el funcionamiento morfodinámico obedece sólo al transporte de sedimentos transversal ya que las otras direcciones están restringidas.

En consecuencia que la línea litoral de playa Tongoy a través del tiempo se mantuvo estable, es decir, la línea costera se acomodó a las condiciones de oleaje y de corrientes inducidas por oleaje en el sector, se establece un equilibrio dinámico al largo plazo, de similar modo a lo concluido en la investigación presentada en la Referencia 36.

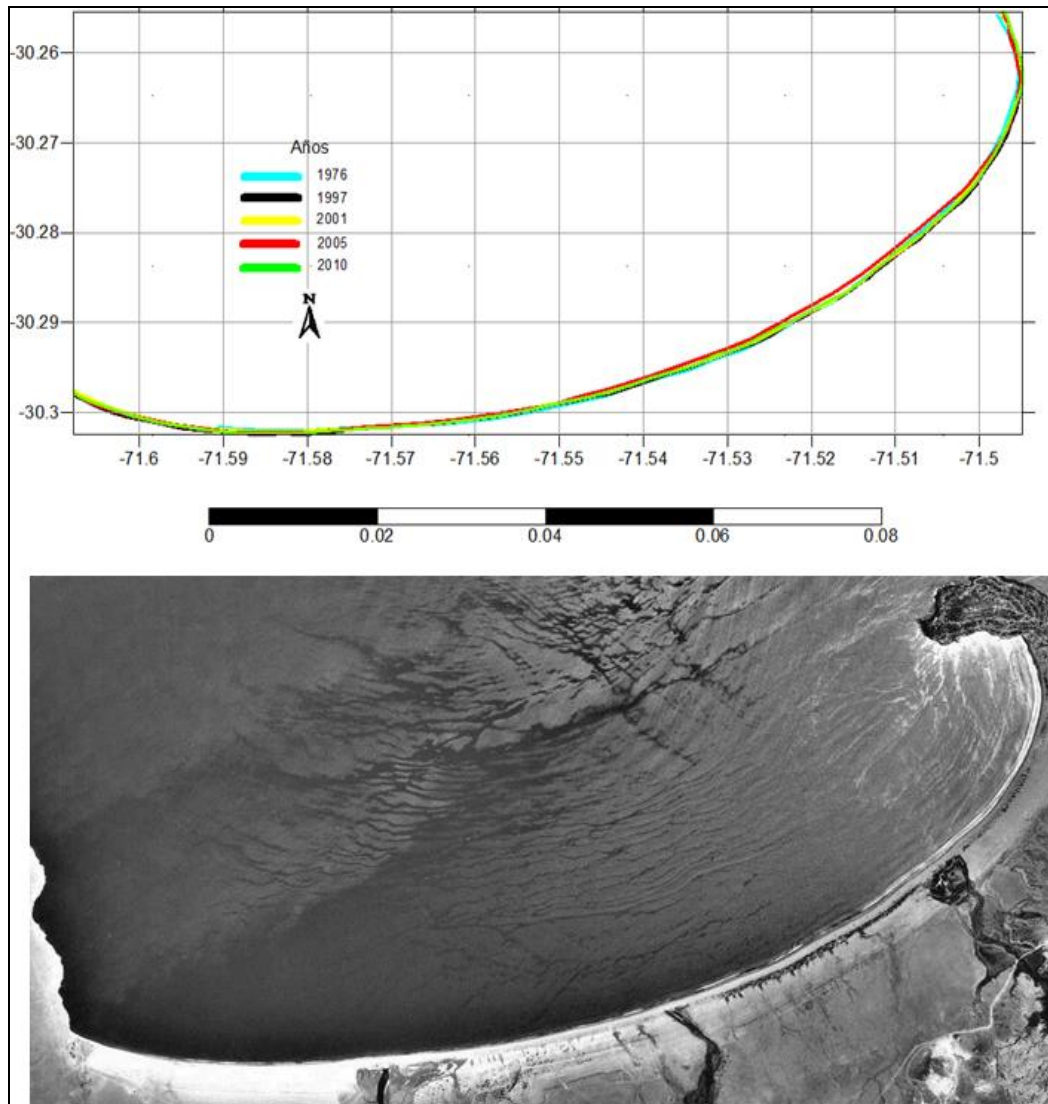


Figura 36: Variación de línea de costa Playa Tongoy.
FUENTE: Elaboración propia.

4.4.2.4 BAHÍA QUINTERO

Se estudiaron los cambios espacio-temporales de la posición relativa de la línea litoral en la bahía Quintero mediante las líneas asociadas a los registros históricos, tomando como año de referencia 1976 ya que corresponde a la imagen más antigua del registro.

En el gráfico de la Figura 37 se presentan los avances y retrocesos de la línea litoral en intervalos de 2500 metros partir del extremo Norte de la bahía.

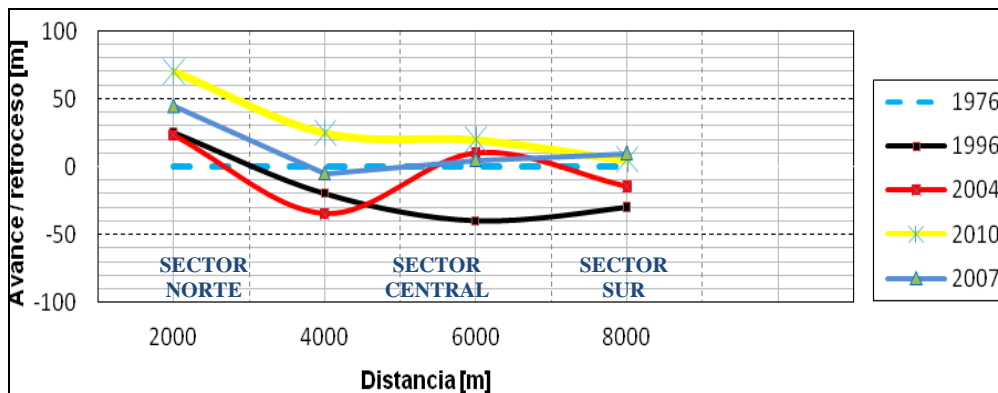


Figura 37: Cambios espacios temporales de la posición relativa de la línea de costa de bahía Quintero. FUENTE: Elaboración propia.

Se observaron variaciones mayores de avance de la línea litoral del orden de 50 [m] en el extremo norte de la bahía, particularmente, el retroceso fue mayor entre los años 1976 y 2010. En la zona central, los cambios de la línea litoral son irregulares ya que presentan tendencias al aumento y retroceso. En la zona sur la variación es menor a las otras zonas y tiende a retroceder.

En la Figura 38 se presentan las líneas en relación a la situación actual. En esta imagen se observaron variaciones menores con tendencia al aumento aunque no significativo de la línea litoral para esta bahía. En particular, en la zona norte la línea de costa presenta cambios que corresponden a variaciones promedio que alcanzan 40 metros, mientras que la variación mayor no supera los 50 metros entre los años 1976 y 2010. En el sector central no se observaron variaciones importantes ya que en promedio no sobrepasa 8 metros. En la zona sur las variaciones son prácticamente nulas por lo que no se presenta ninguna tendencia que permita atribuir un cambio significativo de la línea litoral.

La variación promedio es del orden 20 metros, y al considerar la diferencia mayor histórica (entre 1976 y 2010), el promedio no supera los 35 metros, presentándose éste en la zona norte de la playa, mientras que en los otros sectores la diferencia es menor. Para el periodo de tiempo estudiado, la variación anual es del orden de 0.58 metros.

Considerando las tendencias, la variación mayor observada se presenta en el sector norte de la bahía y obedece a un aumento de la línea litoral aunque no significativo para el periodo analizado. Esto podría ser consecuencia de la hidrodinámica presente en el sector considerando que el transporte de sedimentos que predomina es en dirección transversal y con menor influencia, se presenta el que circula de forma paralela a la línea de costa.

De acuerdo a estos resultados se verificó el equilibrio dinámico que tiene la bahía al mediano-largo plazo. Esto permite concluir que la zona costera de Quintero se ha mantenido estable a las condiciones de oleaje y corrientes longitudinales a través del tiempo y por tanto las zonas de erosión se han visto compensadas con sectores de depósitos de material. De todas formas, se incluye la necesidad de analizar en futuros trabajos, la influencia de las obras costeras actuales en el funcionamiento morfodinámico futuro de la bahía.

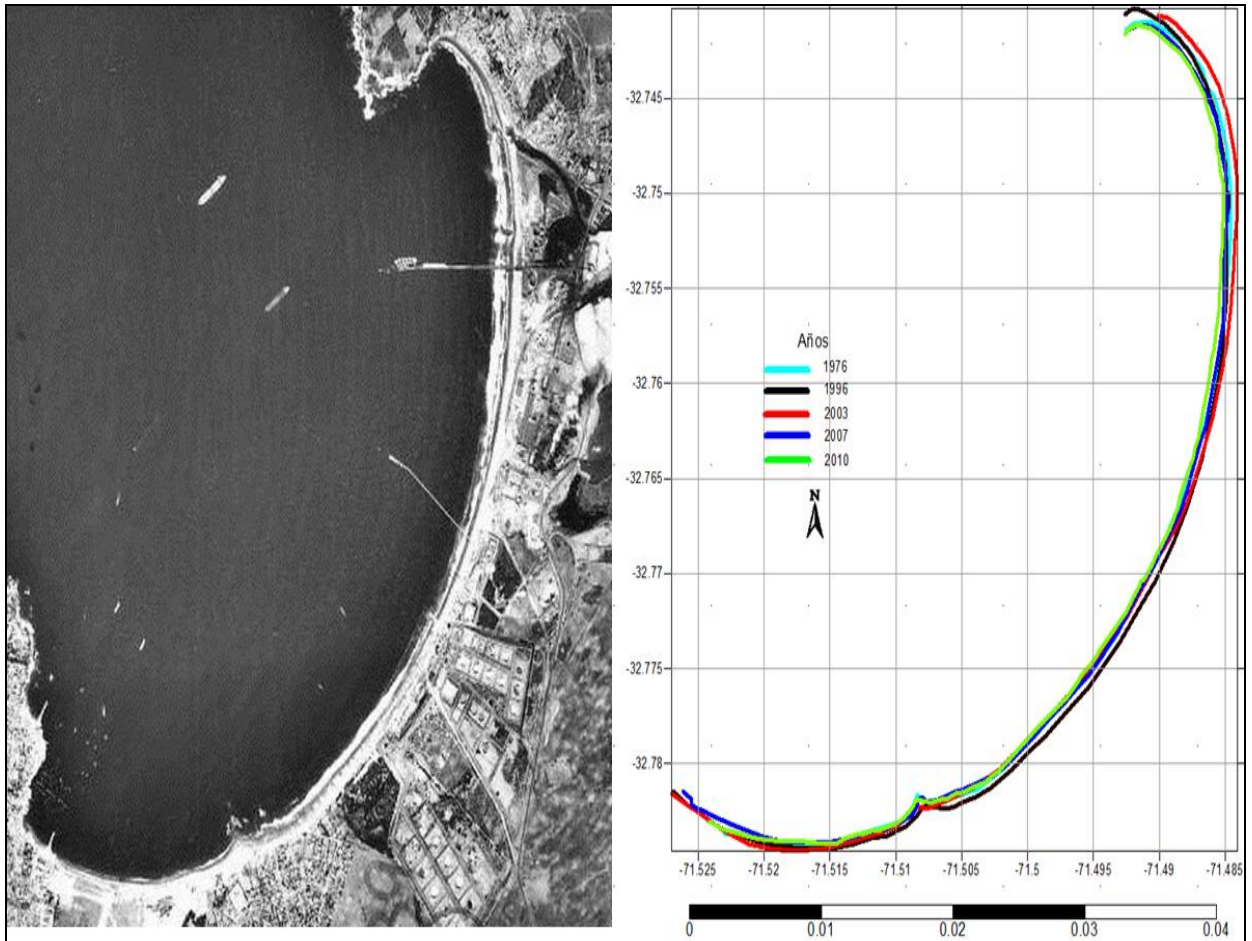


Figura 38: Variación de línea de costa Playa Quintero.
FUENTE: Elaboración propia.

CAPÍTULO V

5 CLIMA DE OLEAJE OPERACIONAL

5.1 OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS

Para el estudio y análisis del clima de oleaje en aguas profundas, se recopilaron los datos que corresponden a espectros bidimensionales del proyecto de Olas Chile en su versión III. Este proyecto forma parte de un convenio del año 2002 entre el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y la Empresa de ingeniería Baird & Associates S.A. La data recopilada corresponde a 22 años de estadística de oleaje que se encuentra disponible para el uso de esta memoria.

Para el análisis de la base de datos de Olas Chile III, se procesó la información por medio de algoritmos matemáticos de generación y uso personal utilizando la herramienta MATLAB 2009, con esto se elaboró un clima de oleaje operacional determinando el comportamiento y principales características de este fenómeno hidrodinámico.

Se utilizó la data descrita bajo el supuesto que el oleaje tiene un comportamiento similar en aguas profundas en la zona central y este aspecto es característico de todo el sector estudiado, por tanto se utilizó los datos del nodo de Valparaíso para propagar a costas de la quinta región y los de el nodo Coquimbo para la propagación a costas de las cuarta región.

En la Figura 39 se procesaron los promedios de los datos de ambos nodos utilizados para observar los rangos generales de los parámetros de resumen, de donde se identificaron máximos y mínimos, además de las mayores frecuencias de altura, periodo y dirección del oleaje para cinco años de muestra que incluye el periodo de 2000 a 2005:

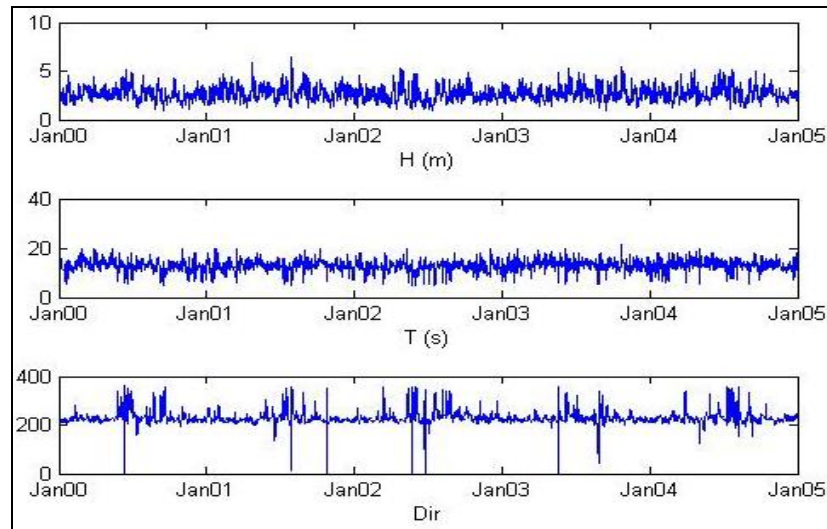


Figura 39: Gráfica general (H, T, D) del oleaje en zona central. Olas Chile III.
Fuente: Elaboración propia.

En general se observa de la Figura 39 que el oleaje es similar en toda la zona central de Chile. Las alturas de olas presentan unos valores elevados que se asocian a temporales históricos y los periodos históricamente se mantienen en el mismo rango de valores.

Para el procesamiento de la información se consideraron los resultados preliminares que se representan en la Figura 39. En base a esto, las alturas de ola se encuentran en el intervalo de 1 a 6 metros, los periodos entre 4 y 20 segundos y las direcciones entre los 180° y los 370° (10°), es decir, pertenecen al tercer y cuarto cuadrante.

Como resultado de parámetros de estadística básica, se procesó la información completa de oleaje en tablas de incidencia, histogramas de frecuencia y rosas de periodo, altura y flujo de energía de oleaje.

Tablas de Incidencia:

Se desarrollaron algoritmos matemáticos para crear un código de uso propio utilizando Matlab para contabilizar los estados de mar en los que las alturas se dividieron en intervalos de 0.5 metros, los periodos en intervalos de 2 [s] y las direcciones en intervalos de 11.75 grados. Con esto se elaboraron las tablas de incidencia Altura v/s Dirección (Tabla 8) y Periodo v/s Dirección (Tabla 9) del oleaje.

		Direcciones															TOTAL		
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW	
Alturas [m]	[0 - 0.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	[0.5 - 1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.02	0	0	0	0	0.05	
	[1 - 1.5]	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0	0	0.01	0.01	0.35	1.64	0.6	0.12	0.01	0.01	0.04	2.82	
	[1.5 - 2]	0.01	0.01	0.03	0	0.01	0.01	0.05	0.03	0.15	1.32	8.45	2.31	0.71	0.16	0.11	0.09	13.45	
	[2 - 2.5]	0.04	0	0.01	0.03	0.01	0.01	0.04	0.05	0.21	2.7	18.97	3.72	0.44	0.23	0.15	0.18	26.81	
	[2.5 - 3]	0.1	0.01	0	0	0	0	0	0.03	0	2.93	17.44	3.63	0.62	0.22	0.19	0.18	25.34	
	[3 - 3.5]	0.1	0	0	0	0	0	0	0.02	0.01	1.98	12.16	2.39	0.76	0.39	0.23	0.21	18.25	
	[3.5 - 4]	0.09	0.01	0	0	0	0	0	0	0	1.24	4.66	1.03	0.39	0.36	0.25	0.24	8.27	
	[4 - 4.5]	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.47	1.44	0.51	0.25	0.2	0.26	0.14	3.28	
	[4.5 - 5]	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0.13	0.72	0.16	0.08	0.08	0.1	0.12	1.42	
	[5 - 5.5]	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.12	0.05	0	0	0.04	0.02	0.25	
	[5.5 - 6]	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0.03	0.05	
	[6 - 6.5]	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	
	[6.5 - 7]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL	0.42	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03	0.09	0.14	0.39	11.15	65.63	14.42	3.35	1.65	1.33	1.25	100		

Tabla 8: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje, aguas profundas. Fuente: Elaboración propia.

		Direcciones															TOTAL	
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW
Periodos [s]	[0 - 2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	[2 - 4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	[4 - 6]	0.06	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0	0.03	0.02	0.03	0	0	0.01	0.04	0.18	0.44
	[6 - 8]	0.25	0.01	0.01	0.02	0	0	0	0.01	0.01	0.5	0.93	0	0.02	0.1	0.36	0.53	2.75
	[8 - 10]	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0.81	2.01	0.38	0.21	0.23	0.14	0.14	3.94
	[10 - 12]	0.02	0.01	0	0	0.01	0.01	0.05	0.01	0.1	2.03	13.91	3.82	1.27	0.57	0.27	0.18	22.24
	[12 - 14]	0.04	0.02	0.01	0	0	0	0.03	0.05	0.16	5.8	30.99	6.49	1.09	0.54	0.37	0.14	45.72
	[14 - 16]	0.01	0	0	0	0	0	0	0.07	0.07	1.59	14.07	2.48	0.57	0.17	0.11	0.07	19.21
	[16 - 18]	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0.03	0.34	3.26	1.12	0.17	0.03	0.03	0.01	5.01
	[18 - 20]	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0.07	0.4	0.14	0.02	0.01	0	0	0.66
	[20 - 22]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0.02
	[22 - 24]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	[24 - 26]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	[26 - inf]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	0.42	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03	0.09	0.14	0.39	11.15	65.63	14.42	3.35	1.65	1.33	1.25	100	

Tabla 9: Tabla de incidencia porcentual Periodo-Dirección del oleaje, aguas profundas. Fuente: Elaboración propia.

El oleaje presenta alturas entre 2 y 3 metros, donde más del 50% de las alturas están en ese intervalo. Más del 26% de los datos tienen altura de ola en el intervalo entre los 3 y 4 metros, y más del 15% se encuentran en el intervalo de 1 y 2 metros. Alturas de olas mayores a 4 metros tienen una frecuencia del 5%.

En general se observa que el oleaje en aguas profundas en el nodo de Valparaíso tiene dirección predominante del SW donde cerca del 65% de los datos vienen desde esa dirección. Las direcciones WSW y SSW tienen una relevancia menor ya que se distribuyen entre el 14.4% y el 11.2% respectivamente. Las direcciones E no están presentes en el registro ya que no superan el 0.2% del total y se deben a oleajes tipo “sea” originados en la costa.

Los periodos de oleaje claramente presentan una preponderancia entre los 12 y 14 segundos, con más de un 45% de los datos. Se observa también que olas con periodos entre 10 y 12 segundos se presentan en más del 22% de los casos y para periodos de olas entre 14 y 16 segundos el registro corresponde a más del 19%. El 5% de los datos tiene periodos entre 16 y 18 segundos. El registro no presenta olas de periodo largo superior a 20 segundos.

Histogramas de frecuencia:

Se desarrollaron algoritmos matemáticos para crear un código de uso propio utilizando Matlab para agrupar los registros de altura, periodo y dirección del oleaje que se obtuvieron a partir de las tablas de incidencia y se presentaron por medio de histogramas de frecuencia. Esto permitió visualizar de mejor forma la información contenida ya que se muestran en un primer histograma los datos puntuales de donde se contó el número total de datos de la muestra y un segundo histograma los valores porcentuales.

Para el procesamiento del registro estadístico se elaboró un histograma de altura (Figura 40) en el que se procesaron los datos en intervalos de 0.5 [m], un histograma de periodos (Figura 41) con los datos en intervalos de 1 [s] y un histograma de direcciones (Figura 42) con los datos en intervalos de 22.5 grados.

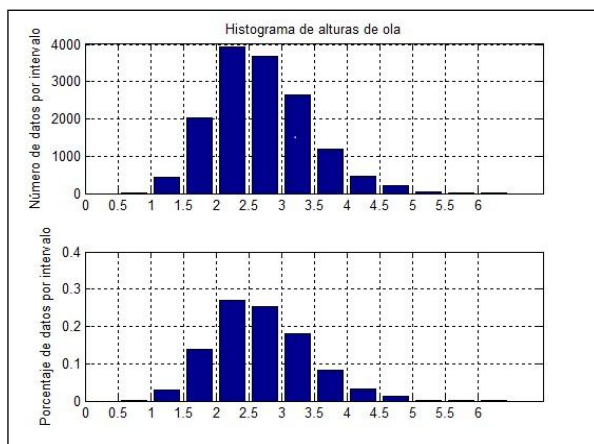


Figura 40: Histograma de alturas del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

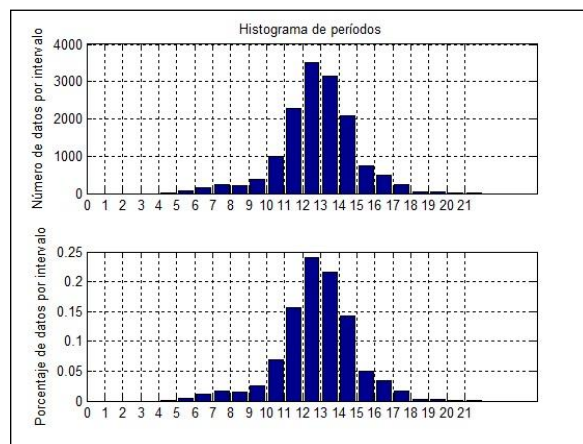


Figura 41: Histograma de periodos del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

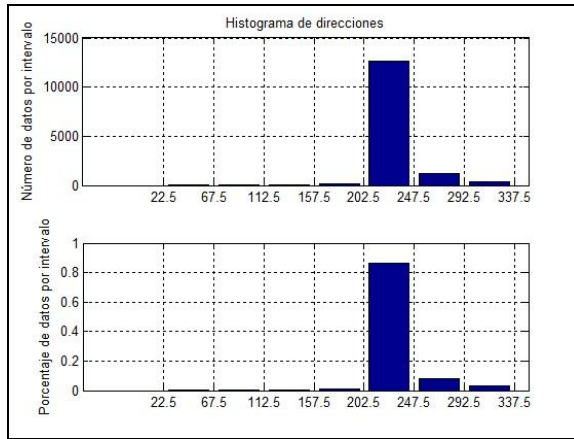


Figura 42: Histograma de dirección del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

El oleaje costa afuera para la zona central de Chile, las alturas de olas que predominan se encuentran entre los 2 y 3.5 [m], ya que en el análisis de esta muestra, estos datos representan sobre el 70% del registro total.

Los periodos típicos de olas están entre los 11 y 14 [s], ya que en el análisis de esta muestra, estos datos representan sobre el 75% del registro total.

Las direcciones típicas vienen desde el SW, ya que en el análisis de esta muestra, estos datos representan sobre el 85% del registro total. Lo anterior es evidencia del oleaje reinante en este sector de estudio.

Rosas de Oleaje:

Se configuró un código de programación en Matlab de elaboración y uso propio para procesar los datos de altura y periodo con respecto a la dirección del oleaje que se representaron de forma gráfica en rosas de oleaje.

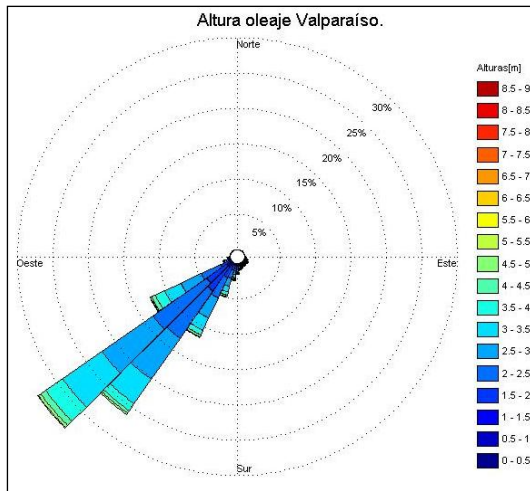


Figura 43: Rosa de altura del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

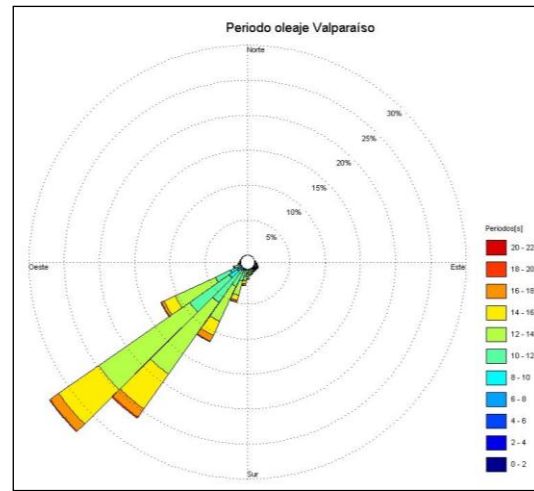


Figura 44: Rosa de periodo del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

Se procesó el flujo de energía del oleaje utilizando la formulación expuesta en el Capítulo 2 (2.3.5) de este documento. Se calculó la potencia del oleaje por medio de
$$P = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T$$

La rosa del flujo de energía del oleaje que se obtuvo:

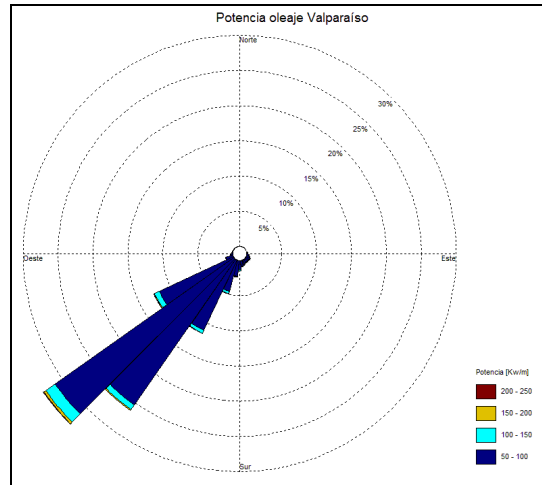


Figura 45: Rosa de energía del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

El flujo medio de energía del oleaje fue de 48.78 [Kw/m], con dirección 217°, es decir, cercano al SW.

5.2 TRANSFERENCIA ESPECTRAL DE OLAJE

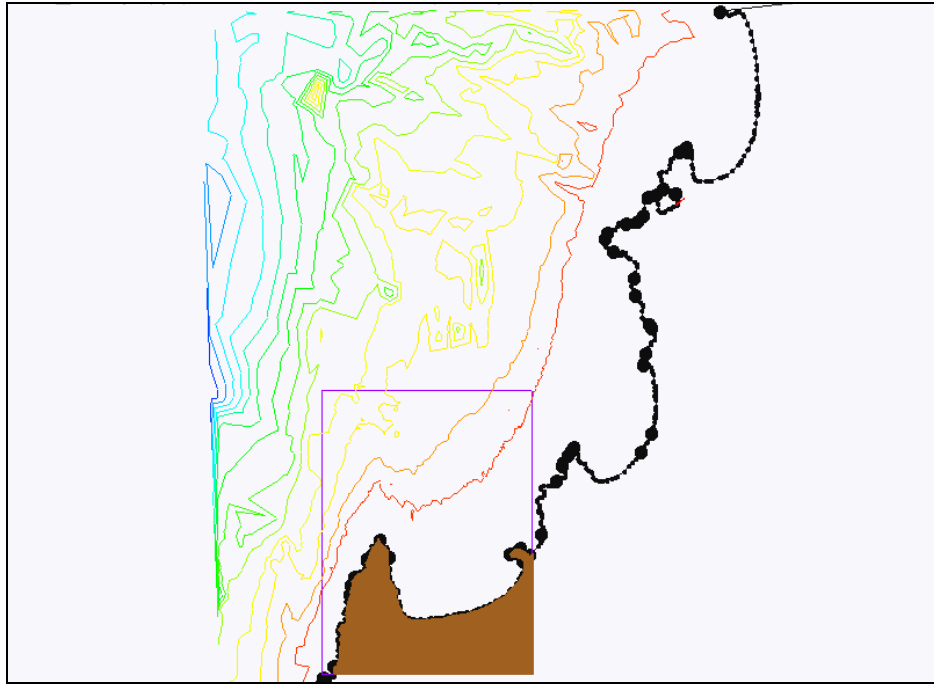
5.2.1 METODOLOGIA DE TRANSFERENCIA ESPECTRAL

El estudio de oleaje en las playas y bahías seleccionadas se completó con una metodología que representa la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta las zonas de estudio con el objeto de calcular el flujo medio de energía y principales parámetros del oleaje en los sectores seleccionados en el Capítulo 4. En estas zonas se propagó oleaje a 10 metros de profundidad ya que en esa franja de playa es en donde efectivamente se presenta el funcionamiento hidrodinámico de la misma. Este procedimiento se realizó mediante una transferencia espectral direccional desde aguas profundas hacia cada playa en particular.

La transformación de oleaje se efectuó utilizando el modelo espectral STWAVE (Steady State Spectral Wave Model) desarrollado por el Coastal and Hydraulics Laboratory (USACE). Este modelo se formuló teóricamente por Smith et al. (2001). En términos generales, con STWAVE se modeló los efectos de refracción, asomeramiento, difracción¹, refracción debido a las corrientes, rompiente debido a esbeltez e influencia del fondo,

¹ La difracción que resuelve STWAVE responde a un suavizado del espectro que no responde a un fenómeno físico, sino a un algoritmo matemático. A profundidades importantes y en casos donde no existen barreras a la propagación del oleaje, esta aproximación es razonable.

efectos de viento, interacción ola-ola y whitecapping. Con STWAVE se simularon espectros multidireccionales y olas irregulares, además, se recurrió a la interfaz gráfica del software SMS (Surface Water Modeling System) para ejecutar la configuración del modelo y desplegar los resultados en forma gráfica. (Figura 46).



**Figura 46: Representación de procedimientos desarrollados en Stwave.
FUENTE: Elaboración propia.**

En cada playa o bahía seleccionada en el Capítulo 4 se transfirió el oleaje a aguas someras, para esto se obtuvieron funciones de transferencia que definen el cambio en la altura y dirección de olas en los puntos seleccionados (a una profundidad de 10 [m] para cada playa), respecto de los valores en aguas profundas. Con estas funciones se transfirieron los espectros bidimensionales sintéticos hacia cada nodo y se estimaron los parámetros de resumen asociados a cada estado de mar. La discretización de períodos fue de 2 [s] entre los 6 y 24 [s], comprendiendo un total de 10 períodos. Para las direcciones se utilizó un intervalo de $22,5^\circ$ correspondientes a 7 direcciones (NNW, NW, WNW, W, WSW, SW y SSW). Con esto se efectuaron 70 simulaciones numéricas por cada playa de estudio.

Con el objeto de minimizar los errores del modelo, se utilizaron tres mallas de simulación denominadas Grilla Noroeste (con la que se propagaron las direcciones NNW y NW), Grilla Oeste (con la que se propagaron las direcciones WNW, W y WSW) y Grilla Sur (con la que se propagaron las direcciones SW y SSW), según se indica en la Figura 47. Se utilizaron grillas anidadas de mayor resolución en las cercanías de la zona de estudio. Las grillas generales se determinaron con un espaciamiento de 100 [m], mientras que las grillas específicas se configuraron con espaciamiento de 25[m].

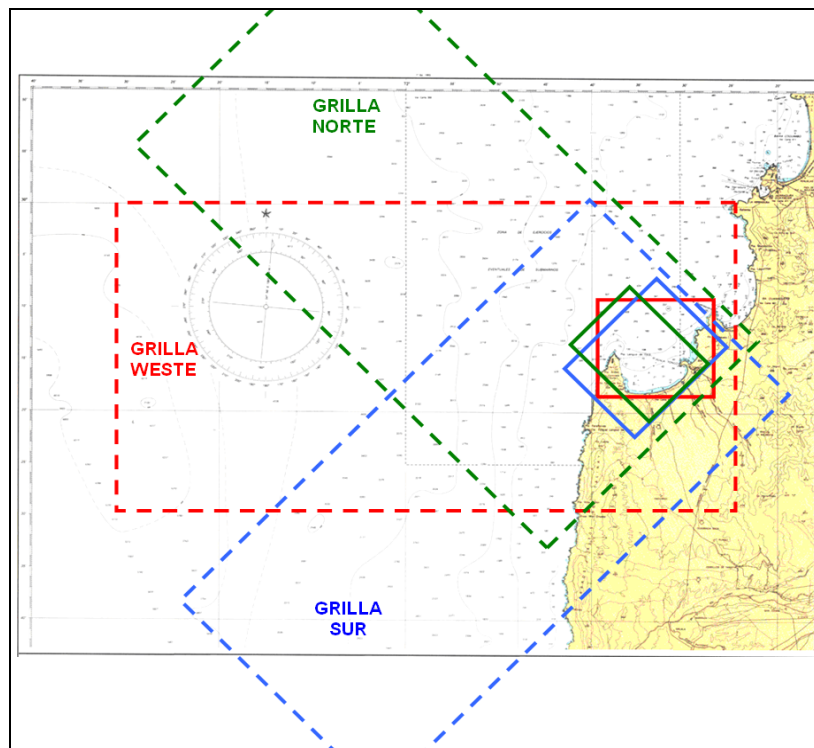


Figura 47: Esquema de mallas utilizadas en la propagación de oleaje.
FUENTE: Elaboración propia.

En forma general, el procedimiento de transformación del oleaje se completó con la transferencia del espectro bin a bin en su matriz, multiplicándolo por su debido coeficiente de transformación obtenido de las funciones de transferencia para cada uno de los periodos y direcciones que se simularon en la modelación. El espectro ahora transferido fue reconstruido en el sitio de estudio.

5.2.2 BATIMETRIA

La batimetría utilizada correspondió a un compendio de cartas náuticas del SHOA. Se ajustaron cartas generales con cartas más específicas, a objeto de obtener una mayor resolución de puntos en la zona de interés. Para el procedimiento se utilizaron las cartas náuticas generales 3000 y 4000 que se ajustaron con la carta intermedia 4100 y las de mayor resolución, correspondientes a las cartas 4111, 4112 y 4113 que entregan mayor información relativa al sector de estudio. Para las otras zonas estudiadas se utilizó el mismo criterio anterior en donde se usaron las cartas náuticas 4000, 4320 y 4321.

Con las cartas mencionadas se procesó toda la información para geo-referenciar cada punto batimétrico y los contornos correspondientes a la línea de costa. Para esto se utilizaron las herramientas Global Mapper 9, Golden Software Surfer 8, Golden Software Digger 3.

La Figura 48 representa una descripción gráfica en 2-dimensiones de la batimetría que se utilizó. Se destacan las líneas de igual profundidad, además de la línea de costa que se utilizaron como principales datos de entrada para la configuración del modelo.

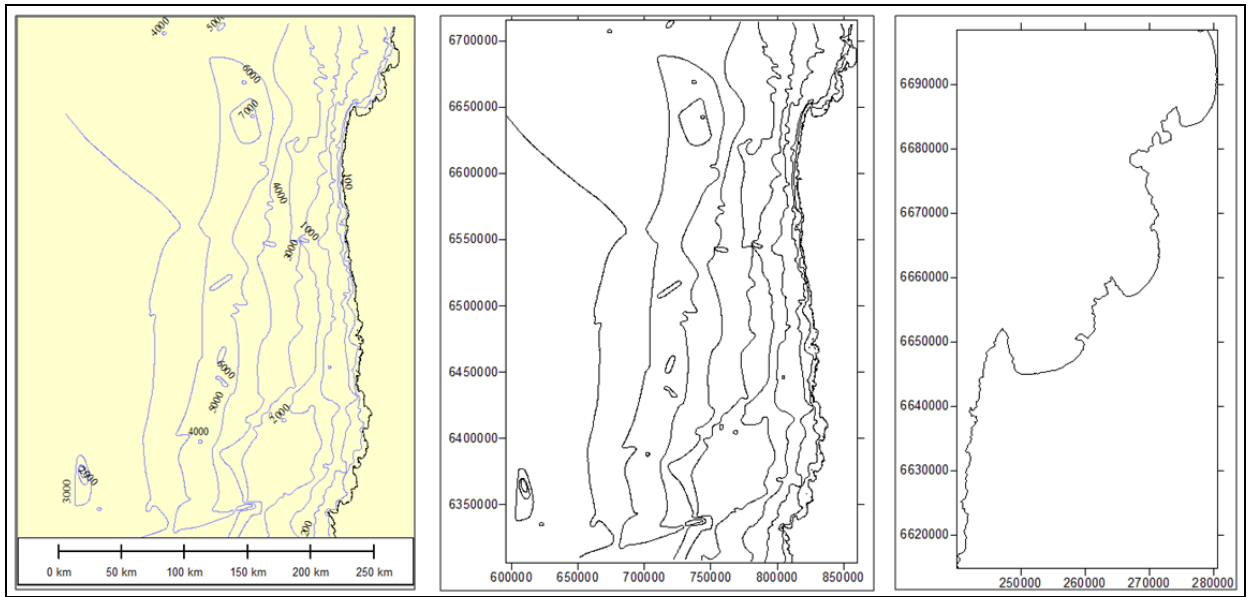


Figura 48: Representación de procesamiento de la batimetría utilizada.
FUENTE: Elaboración propia.

Para presentar el registro batimétrico en un prototipo de 3-dimensiones, se desarrolló una grilla batimétrica y se interpolaron de forma lineal las profundidades mediante el procesamiento y uso de Golden Software Surfer 8.

En la Figura 49 se presenta la descripción gráfica en 3-dimensiones de la batimetría que se utilizó para la configuración del modelo.

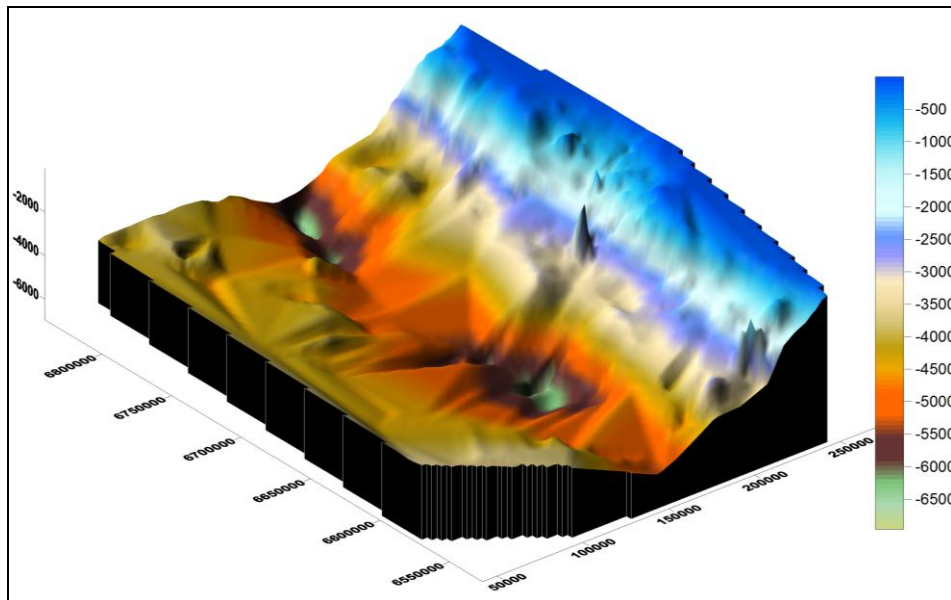


Figura 49: Representación en 3-D de la batimetría utilizada.
FUENTE: Elaboración propia.

5.2.3 RESULTADOS

Los resultados principales de este proceso de propagación de oleaje se presentan por medio de coeficientes de propagación por altura y dirección, estos son representativos de las funciones de transferencia que se pueden construir.

Playa La Serena: Se propagó a Lat. 29°56'39.5" S; Long 71°17'59.9" O. Prof. 10 [m].

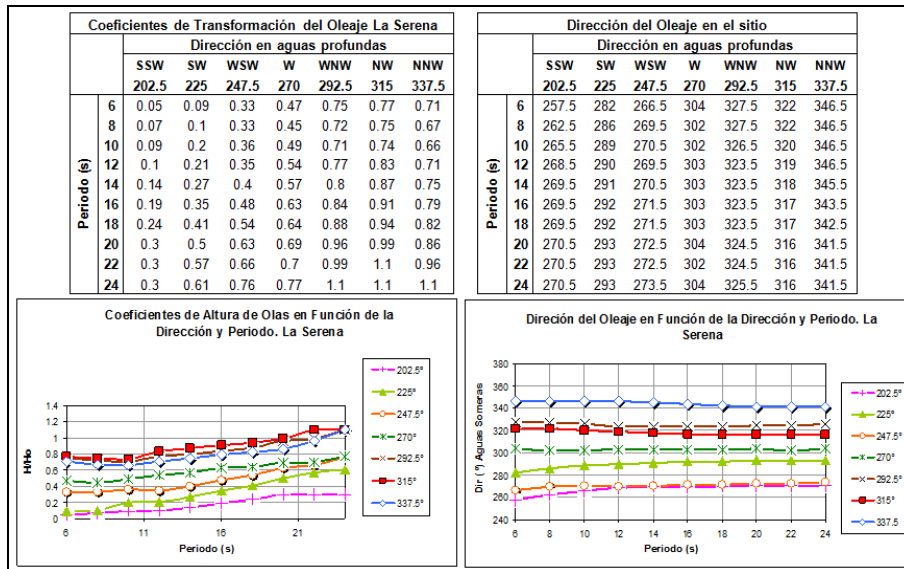


Figura 50: Funciones de transferencia de playa La Serena.
FUENTE: Elaboración propia.

Playa Guanaqueros: Se propagó oleaje a Lat. 30°9'22.9" S; 71°23'2.3" O. Prof. 10 [m].

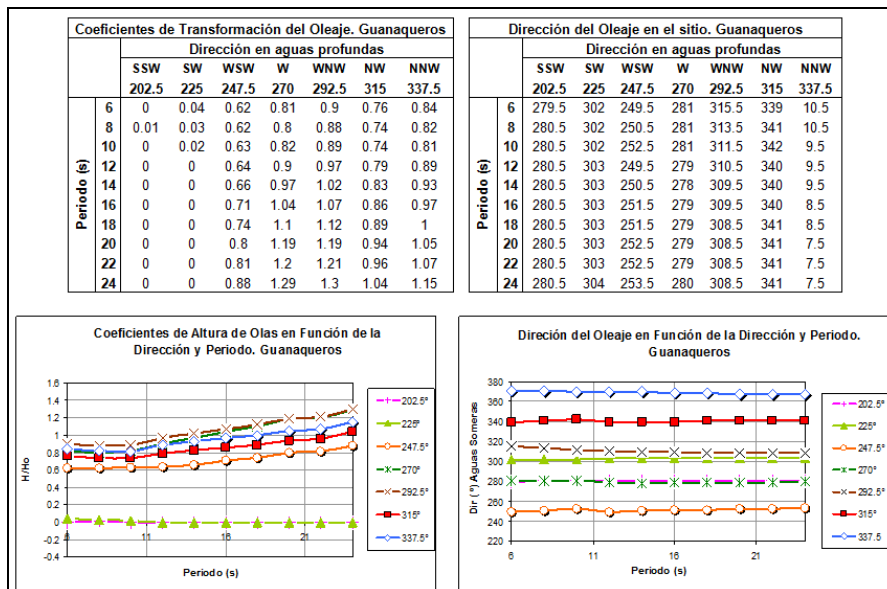


Figura 51: Funciones de transferencia de playa Guanaqueros.
FUENTE: Elaboración propia.

Playa Tongoy: Se propagó a Lat. 30°17'18.9" S; Long. 71°32'20.4" O. Prof. 10 [m].

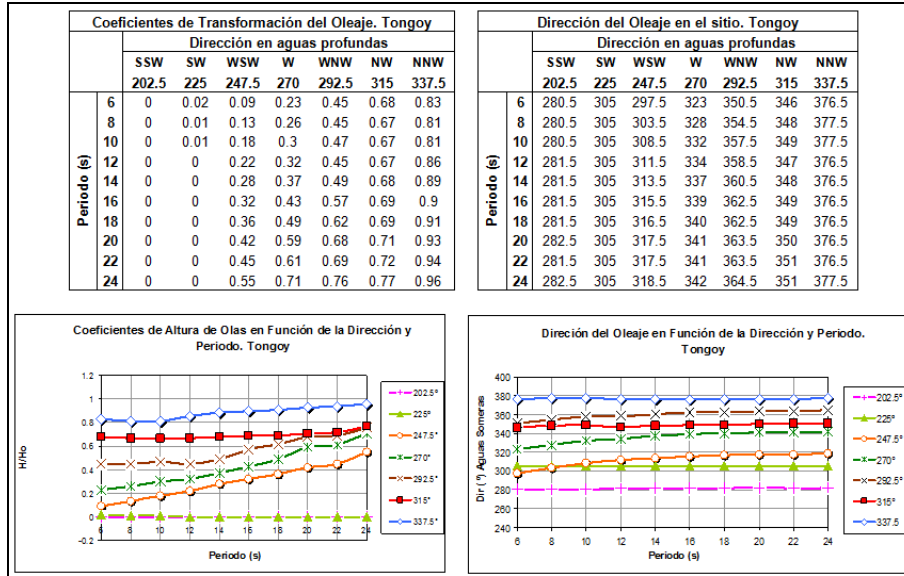


Figura 52: Funciones de transferencia de playa Tongoy.
FUENTE: Elaboración propia.

Bahía Quintero: Se propagó oleaje a Lat. 32°46'33.3" S; 71°30'5.3" O. Prof. 10 [m].

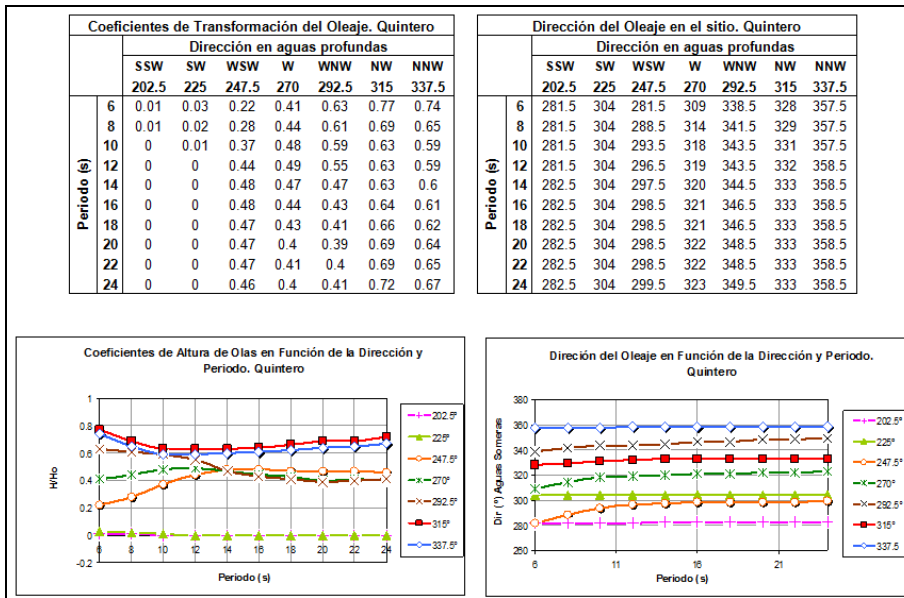


Figura 53: Funciones de transferencia de Bahía Quintero.
FUENTE: Elaboración propia.

De forma gráfica, los resultados obtenidos al transferir las condiciones de oleaje desde aguas profundas hasta a cada una de las playas se presentan a través de las Figuras 54, 55 y 56 que se obtuvieron como resultado de la implementación numérica con Stwave. En este caso particular se presenta el resultado en interfaz gráfica de playa Tongoy;

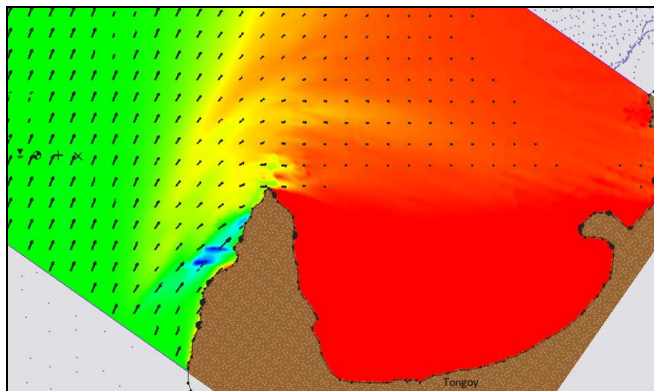


Figura 54: Resultados gráficos de transferencia de oleaje a playa Tongoy. Dirección SW.
FUENTE: Elaboración propia.

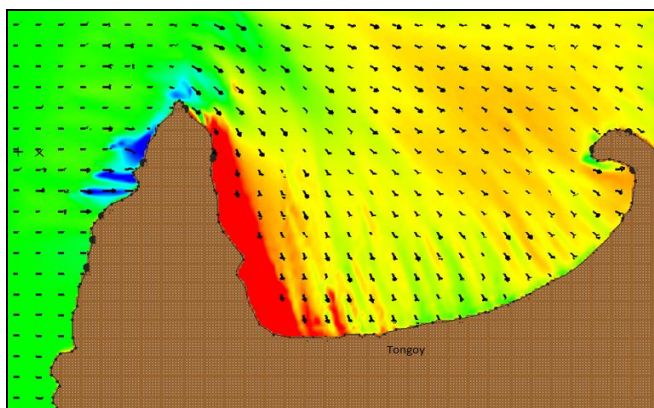


Figura 55: Resultados gráficos de transferencia de oleaje a playa Tongoy. Dirección W.
FUENTE: Elaboración propia.

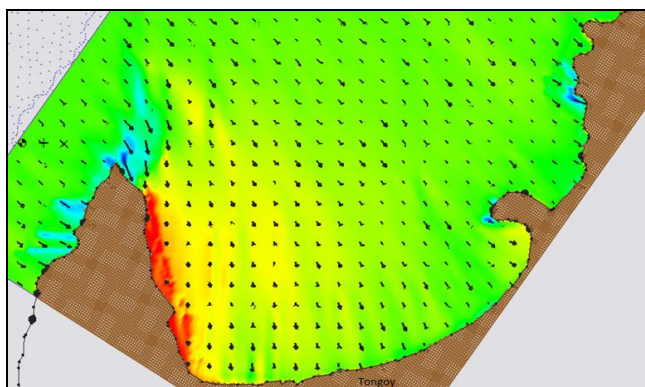


Figura 56: Resultados gráficos de transferencia de oleaje a playa Tongoy. Dirección NW.
FUENTE: Elaboración propia.

En general se observa los cambios de dirección y altura de oleaje para las direcciones propagadas. Los colores cálidos (rojo y naranja) representan una disminución de la altura de ola debido al cono de sombra que genera el polo de refracción en este caso particular de playa Tongoy, la Punta Lengua de Vaca. En estas zonas el oleaje es menor o prácticamente nulo. Las zonas de colores amarillo y verde muestran que las alturas de olas

se mantienen generalmente sin cambios mientras llegan a costa. Los colores fríos (celeste y azul) representan un incremento en la energía del oleaje que es sinónimo de un aumento gradual de las alturas de las olas en esas zonas.

En particular, se observa como resultado de propagar oleaje reinante (SW) a playa Tongoy, que las olas que llegan a la costa son de baja altura. Además, las direcciones cambian de 225° a 270° o más (Figura 54). El oleaje propagado con dirección W se ve menos refractado en la punta Lengua de Vaca por lo tanto la zona de sombra es mucho menor que la propagación de oleaje del SW. Las direcciones cambian de 225° a 315° en la costa (Figura 55). Como resultado del oleaje propagado con dirección NW, el polo de refracción es mucho menor que las propagaciones de las direcciones anteriores por lo que la energía de las olas no se altera al llegar a la costa. Las direcciones pasan de 315° a 350° o 360° (Figura 56).

5.3 OLEAJE OPERACIONAL EN PLAYA LA SERENA

Como resultado de la modelación del proceso de transferencia espectral de oleaje desde aguas profundas hasta playa La Serena, se procesó la información obtenida en tablas de incidencia, histogramas de frecuencia y rosas de periodo, altura y potencia de oleaje. Así mismo, se calculó el flujo medio de energía y el área donde se presenta el transporte de sedimentos para esta playa en particular, para esto se realizó una zonificación del transporte de sedimento en playa La Serena.

5.3.1 OLEAJE EN EL SITIO

Tablas de Incidencia: Se desarrollaron algoritmos matemáticos para crear un código de uso propio utilizando Matlab para contabilizar los estados de mar en los que las alturas se dividieron en intervalos de 0.2 metros, los periodos en intervalos de 2 [s] y las direcciones en intervalos de 11.75 grados. Con esto se elaboraron las tablas de incidencia Altura v/s Periodo (Tabla 10) y Altura v/s Dirección (Tabla 11) del oleaje.

		Periodo [s]												
H - T		[0 - 2]	[2 - 4]	[4 - 6]	[6 - 8]	[8 - 10]	[10 - 12]	[12 - 14]	[14 - 16]	[16 - 18]	[18 - 20]	[20 - 22]	[22 - +]	TOTAL
Altura [m]	[0 - 0.2]	0	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.08	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.23
	[0.2 - 0.4]	0	0.00	0.04	0.08	0.37	2.13	5.91	2.76	1.04	0.33	0.13	0.03	12.81
	[0.4 - 0.6]	0	0.02	0.06	0.09	0.67	3.21	13.61	11.77	4.10	1.53	0.49	0.15	35.71
	[0.6 - 0.8]	0	0	0.14	0.07	0.33	1.90	6.72	11.84	4.88	1.96	0.63	0.14	28.61
	[0.8 - 1]	0	0	0.14	0.07	0.16	0.78	1.99	5.17	3.52	1.42	0.48	0.05	13.78
	[1 - 1.2]	0	0	0.06	0.06	0.13	0.40	0.76	1.43	1.40	0.72	0.22	0.02	5.21
	[1.2 - 1.4]	0	0	0.02	0.06	0.06	0.20	0.30	0.49	0.49	0.35	0.08	0.02	2.05
	[1.4 - 1.6]	0	0	0	0.08	0.05	0.11	0.14	0.18	0.17	0.10	0.02	0	0.86
	[1.6 - 1.8]	0	0	0	0.05	0.02	0.05	0.09	0.09	0.08	0.04	0.02	0	0.43
	[1.8 - 2]	0	0	0	0.02	0.01	0.03	0.04	0.05	0.00	0.03	0	0	0.18
	[2 - 2.2]	0	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0.06
	[2.2 - 2.4]	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.00	0	0	0	0.03
	[2.4 - 2.6]	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0.02
[2.6 - +]	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0.02	
TOTAL		0.00	0.02	0.45	0.58	1.85	8.88	29.67	33.86	15.72	6.48	2.08	0.40	100

Tabla 10: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Playa La Serena. Fuente: Elaboración propia.

H - D	Direcciones																TOTAL	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW		
[0 - 0.2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07	0.09	0	0	0.17
[0.2 - 0.4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.41	9.56	0.79	0	11.76
[0.4 - 0.6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.18	29.17	5.96	0.03	36.34
[0.6 - 0.8]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.41	20.27	7.36	0.03	28.07
[0.8 - 1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.13	9.25	5.24	0.04	14.66
[1 - 1.2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	3.21	2.05	0.03	5.3
[1.2 - 1.4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.17	0.89	0.03	2.08
[1.4 - 1.6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.44	0.39	0.02	0.84
[1.6 - 1.8]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.23	0.23	0.01	0.46
[1.8 - 2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0.1	0.01	0.19
[2 - 2.2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.02	0.01	0.06
[2.2 - 2.4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0.03
[2.4 - 2.6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.01	0	0.02
[2.6 - +]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
TOTAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.22	73.53	23.04	0.21	100

Tabla 11: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje en Playa La Serena.
Fuente: Elaboración propia.

En general se observa que el oleaje en playa La Serena tiene dirección predominante desde el WNW, donde más del 75% de los datos provienen de esa dirección. La dirección NW es la segunda en importancia ya que tiene un porcentaje cercano al 23% del registro.

Los periodos de oleaje claramente presentan una preponderancia entre los 12 y 16 segundos, con más del 63% de los datos. Se observa también que olas con periodos entre 16 y 20 segundos se presentan en más del 22% de los casos, y para periodos de olas entre 8 y 12 segundos el registro corresponde al 10%.

Las alturas de ola presentan registros entre 0.6 y 0.8 metros, donde más del 68% están en ese intervalo. Más del 16% de los datos tienen altura de ola en el intervalo entre los 0.8 y 1 metros, y cerca del 11% son menores a 0.4 metros.

Histogramas de frecuencia: Para el procesamiento del registro estadístico se elaboró un histograma de altura (Figura 57) en el que se procesaron los datos en intervalos de 0.2 [m], un histograma de periodos (Figura 58) con los datos en intervalos de 1 [s] y un histograma de direcciones (Figura 59) con los datos en intervalos de 22.5 grados.

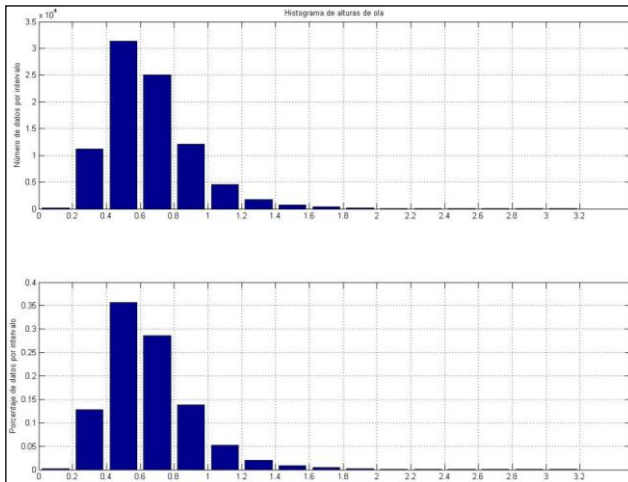


Figura 57: Histograma de altura del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

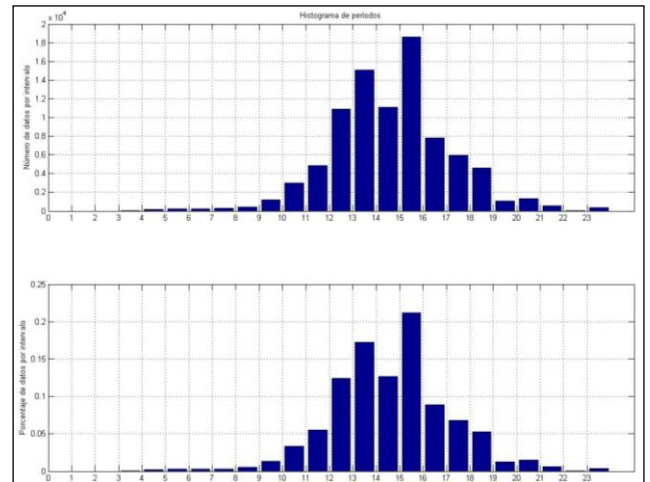


Figura 58: Histograma de periodos del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

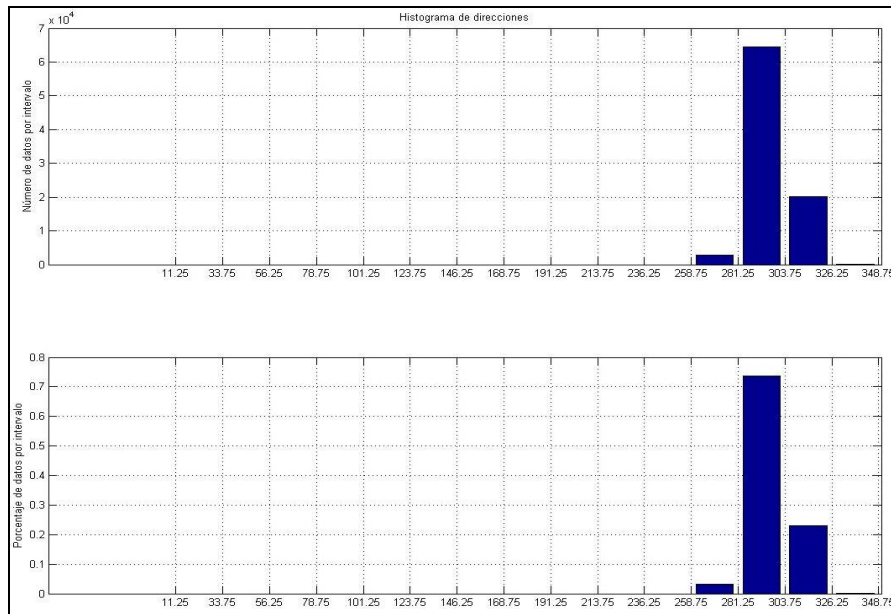


Figura 59: Histograma de dirección del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

El histograma de altura de olas muestra que más del 35% son alturas de olas que se encuentran en el intervalo de 0.4 y 0.6 metros. Cerca del 28% del registro son de alturas de olas pertenecientes al intervalo entre 0.6 y 0.8 metros y alrededor del 10% son alturas de olas que superan el metro.

El histograma de periodos del oleaje muestra que el 22% de los datos de olas tiene periodo entre 15 y 16 segundos, el 27% tiene periodo de olas entre 13 y 14 segundos, el 13% tiene periodo entre 14 y 15 segundos y el 8% del total presenta periodos de ola entre 16 y 17 segundos, siendo estos intervalos los de mayor relevancia del registro.

Al analizar el histograma representado en la Figura 59, se observa que predominan cerca del 74% del registro total, direcciones de olas que vienen desde el intervalo entre 281,25° y 303,75°. La dirección entre 303.75° y 326.25° presenta cerca del 22% del total. Lo anterior demuestra el cambio de dirección que manifiesta el oleaje al entrar en la zona de bahía y los fenómenos de refracción, difracción y asomeramiento.

Rosas de oleaje: Con la implementación de nuevos algoritmos matemáticos se configuró un código de programación en Matlab de elaboración y uso propio para procesar los datos de altura y periodo con respecto a la dirección del oleaje que se representaron de forma gráfica en rosas de oleaje.

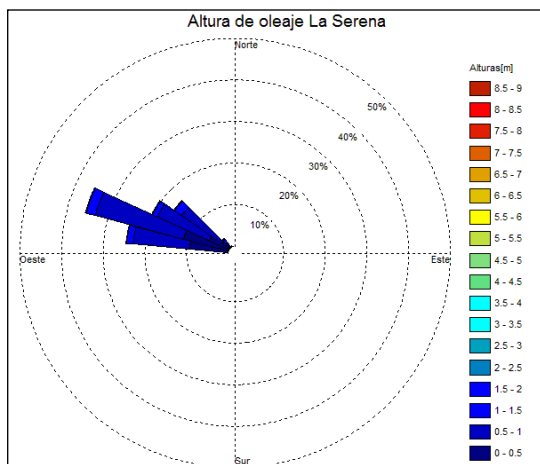


Figura 60: Rosa de altura del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

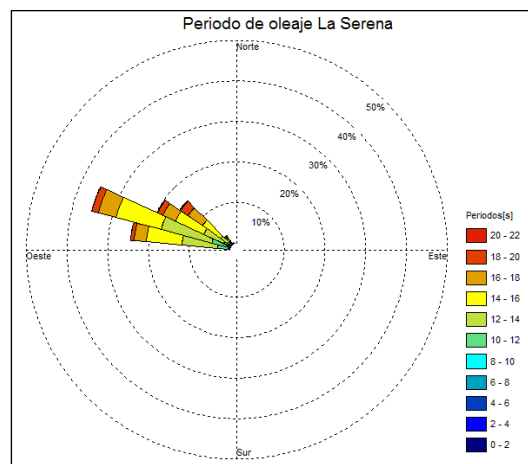


Figura 61: Rosa de periodo del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 FLUJO MEDIO DE ENERGIA

La rosa de Potencia de Energía del oleaje:

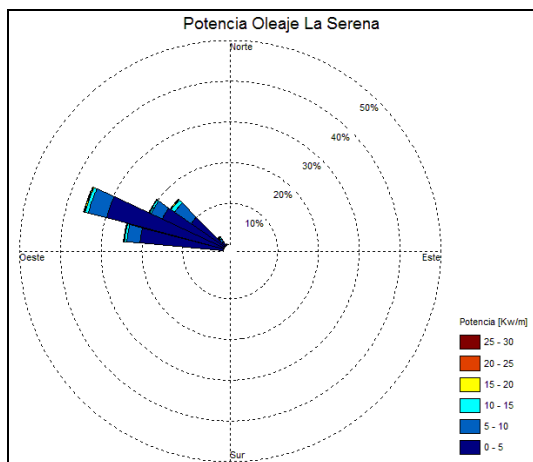


Figura 62: Rosa de potencia del oleaje en playa La Serena.
Fuente: Elaboración propia.

El flujo medio de energía del oleaje fue de 3.63 [Kw/m], con dirección 291°, es decir, cercano al WNW.

5.3.3 ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para zonificar el transporte de sedimentos en playa La Serena, se calculó el parámetro HS0.137 que corresponde a la altura de ola que es superada doce horas al año en un registro de oleaje. Utilizando las formulaciones expuestas por tres autores (Capítulo 2.3.5), se calculó la profundidad activa y la profundidad de cierre con las que se determinó la zona donde efectivamente se produce el transporte de sedimentos. Los resultados fueron los siguientes:

HS0.137 = 1.98 [m].
 Profundidad activa = 4.45 [m]. Por Hellermeier.
 Profundidad activa = 3.41 [m]. Por Birkemeier.
 Profundidad activa = 5.84 [m]. Por Houston.
 Profundidad de cierre = 6.93 [m].

5.4 OLEAJE OPERACIONAL EN PLAYA GUANAQUEROS

Como resultado de la modelación del proceso de transferencia espectral de oleaje desde aguas profundas hasta playa Guanaqueros, se procesó la información obtenida en tablas de incidencia, histogramas de frecuencia y rosas de periodo, altura y potencia de oleaje. Así mismo, se calculó el flujo medio de energía y el área donde se presenta el transporte de sedimentos para esta playa en particular, para esto se realizó una zonificación del transporte de sedimento en playa Guanaqueros.

5.4.1 OLEAJE EN EL SITIO

Tablas de Incidencia: Con el uso de Matlab se contabilizaron los estados de mar en los que las alturas se dividieron en intervalos de 0.2 [m], los periodos en intervalos de 2 [s] y las direcciones en intervalos de 11.75 grados. Con esto se elaboraron las tablas de incidencia Altura v/s Periodo (Tabla 12) y Altura v/s Dirección (Tabla 13) del oleaje.

H - T		Periodo [s]											TOTAL	
		[0 - 2]	[2 - 4]	[4 - 6]	[6 - 8]	[8 - 10]	[10 - 12]	[12 - 14]	[14 - 16]	[16 - 18]	[18 - 20]	[20 - 22]		[22 - +]
Alturas [m]	[0 - 0.2]	0	0.00	0.01	0.01	0.03	0.08	0.09	0.07	0.04	0.01	0.00	0.00	0.36
	[0.2 - 0.4]	0	0.04	0.14	0.34	1.20	1.79	3.51	1.53	0.61	0.25	0.10	0.04	9.55
	[0.4 - 0.6]	0	0.06	0.30	0.63	2.55	4.31	9.77	5.90	2.35	0.97	0.38	0.10	27.31
	[0.6 - 0.8]	0	0.01	0.19	0.36	1.90	4.20	7.79	7.81	3.50	1.47	0.47	0.16	27.88
	[0.8 - 1]	0	0	0.13	0.16	0.95	2.56	3.86	5.27	2.95	1.34	0.52	0.07	17.81
	[1 - 1.2]	0	0	0.09	0.09	0.36	1.44	1.75	1.75	1.59	0.78	0.33	0.03	8.21
	[1.2 - 1.4]	0	0	0.04	0.09	0.22	0.80	1.15	0.56	0.56	0.42	0.12	0.02	3.98
	[1.4 - 1.6]	0	0	0.01	0.05	0.14	0.44	0.67	0.32	0.21	0.13	0.04	0.01	2.02
	[1.6 - 1.8]	0	0	0.00	0.04	0.06	0.29	0.44	0.19	0.09	0.05	0.02	0	1.19
	[1.8 - 2]	0	0	0	0.03	0.05	0.16	0.20	0.16	0.04	0.04	0.01	0	0.69
	[2 - 2.2]	0	0	0	0.02	0.03	0.12	0.16	0.09	0.02	0.02	0	0	0.46
	[2.2 - 2.4]	0	0	0	0.02	0.01	0.06	0.08	0.05	0.01	0	0	0	0.22
	[2.4 - 2.6]	0	0	0	0	0.01	0.03	0.05	0.03	0.00	0	0	0	0.14
[2.6 - +]	0	0	0	0	0	0.01	0.09	0.06	0.01	0	0	0	0.09	
TOTAL		0.00	0.11	0.93	1.85	7.53	16.29	29.61	23.80	11.99	5.48	1.97	0.43	100

Tabla 12: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Playa Guanaqueros. Fuente: Elaboración propia.

H - D		Direcciones														TOTAL		
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW		NW	NNW
Alturas [m]	[0 - 0.2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.23	0.04	0	0	0.27
	[0.2 - 0.4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.01	2.17	0.61	0.03	8.83
	[0.4 - 0.6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17.2	8.13	2.31	0.14	27.77
	[0.6 - 0.8]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14.89	8.76	3.42	0.11	27.18
	[0.8 - 1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.28	5.73	3.5	0.12	18.64
	[1 - 1.2]	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.16	2.07	2.03	0.08	8.35
	[1.2 - 1.4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.25	0.73	1.01	0.06	4.05
	[1.4 - 1.6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.2	0.32	0.42	0.03	1.97
	[1.6 - 1.8]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.84	0.2	0.19	0.02	1.25
	[1.8 - 2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.41	0.16	0.12	0.02	0.71
	[2 - 2.2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.26	0.15	0.06	0.01	0.48
	[2.2 - 2.4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.13	0.07	0.04	0.01	0.24
	[2.4 - 2.6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0.04	0.02	0.01	0.15
[2.6 - +]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.03	0	0	0.1	
TOTAL		0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56.98	28.61	13.75	0.64	100	

Tabla 13: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje en Playa Guanaqueros. Fuente: Elaboración propia.

En general se observa que el oleaje en playa Guanaqueros tiene dirección predominante desde el W, donde el del 57% de los datos provienen de esa dirección. Las direcciones WNW y NW tienen un porcentaje cercano al 42% del registro.

Los periodos de oleaje claramente presentan una preponderancia entre los 12 y 16 segundos, con más del 54% de los datos. Se observa también que olas con periodos entre 8 y 12 segundos se presentan en más del 24% de los casos, y para periodos de olas sobre 16 segundos el registro corresponde al 20%.

Las alturas de ola presentan registros entre 0.4 y 0.8 metros, donde más del 55% están en ese intervalo. Más del 18% de los datos tienen altura de ola en el intervalo entre los 0.8 y 1 metros, y cerca del 19% son mayores al metro.

Histogramas de frecuencia: Para el procesamiento del registro estadístico se elaboró un histograma de altura (Figura 63) en el que se procesaron los datos en intervalos de 0.2 [m], un histograma de periodos (Figura 64) con los datos en intervalos de 1 [s] y un histograma de direcciones (Figura 65) con los datos en intervalos de 22.5 grados.

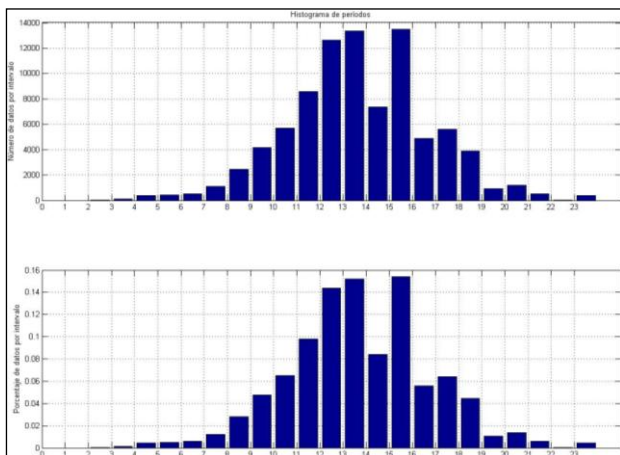


Figura 63: Histograma de altura del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

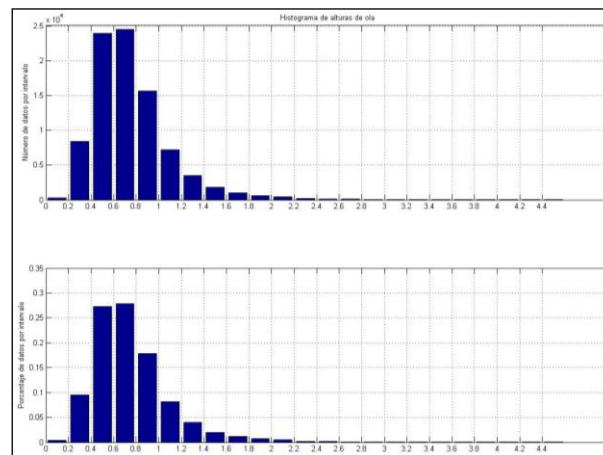


Figura 64: Histograma de periodo del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

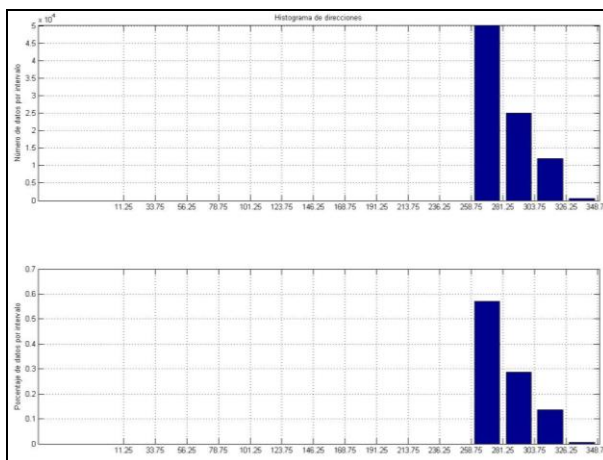


Figura 65: Histograma de dirección del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

El histograma de altura de olas muestra que más del 55% de éstos son alturas de olas que se encuentran en el intervalo de 0.4 y 0.8 metros. Cerca del 18% del registro es de alturas de olas pertenecientes al intervalo entre 0.6 y 0.8 metros y el 10% son alturas de olas que superan el metro.

En el histograma de periodos del oleaje se observa que el 15% de los datos de olas tiene periodo entre 15 y 16 segundos al igual que 13 y 14 segundos. El 14% tiene periodo de olas entre 12 y 13 segundos, mientras que 7% tiene periodo entre 14 y 15 segundos.

En el histograma de direcciones, predominan cerca del 58% del registro total, olas que vienen desde el intervalo entre 258,75° y 281,25°. Entre 281.25° y 303.75° presenta cerca del 39% del total, y el intervalo de direcciones 303.75° y 326.25° corresponde al 13% del total. Lo anterior demuestra el cambio de dirección que manifiesta el oleaje al entrar en la zona de bahía y los fenómenos de refracción, difracción y asomeramiento.

Rosas de oleaje: Se utilizó el algoritmo descrito para procesar los datos de altura y periodo con respecto a la dirección del oleaje. Esto se presenta en las Figuras 66 y 67.

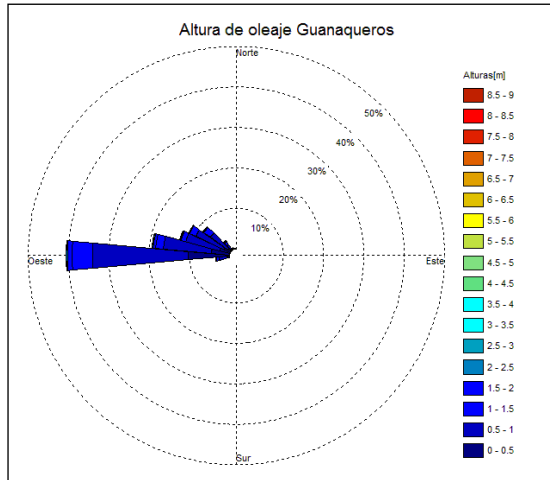


Figura 66: Rosa de altura del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

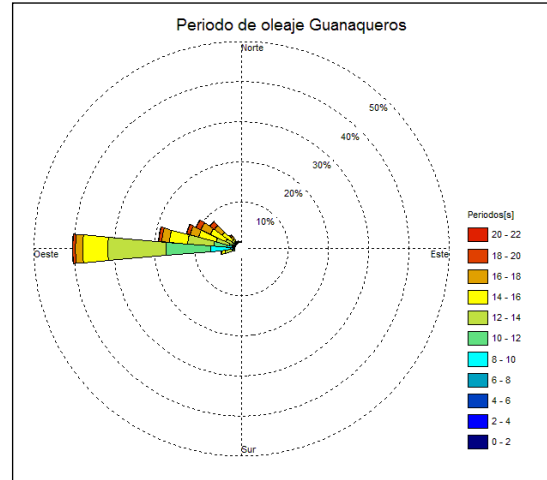


Figura 67: Rosa de periodo del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

5.4.2 FLUJO MEDIO DE ENERGIA

Se calculó la potencia en el sector de Guanaqueros, para lo cual se midió un valor de flujo medio de energía del oleaje de 4.66 [Kw/m]. Ésta se presentó con dirección correspondiente a 274°, es decir, cercana al W.

El cálculo anterior se presenta gráficamente a través de la rosa de energía del sector, en la Figura 68.

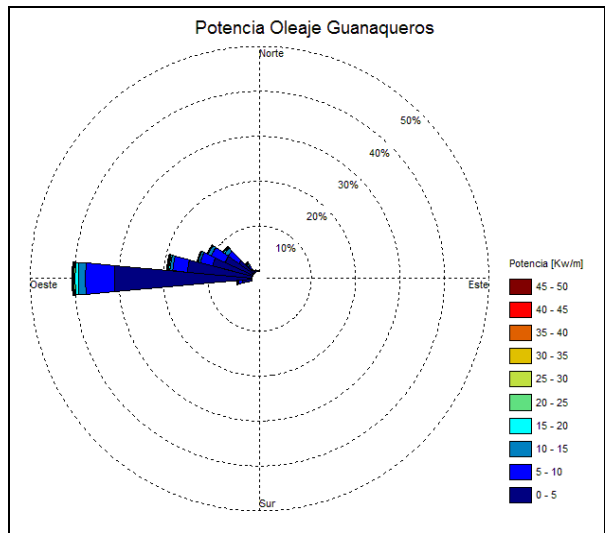


Figura 68: Rosa de potencia del oleaje en playa Guanaqueros. Fuente: Elaboración propia.

5.4.3 ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para zonificar el transporte de sedimentos en playa Guanaqueros, se calculó de la misma forma que para playa La Serena, el parámetro HS0.137, además se determinaron las profundidades activas y de cierre. Los resultados fueron los siguientes:

- HS0.137 = 2.54 [m].
- Profundidad activa = 5.70 [m]. Por Hellermeier.
- Profundidad activa = 4.37 [m]. Por Birkemeier.
- Profundidad activa = 6.71 [m]. Por Houston.
- Profundidad de cierre = 8.90 [m].

5.5 OLEAJE OPERACIONAL EN PLAYA TONGOY

Como resultado de la modelación del proceso de transferencia espectral de oleaje desde aguas profundas hasta playa Tongoy, se procesó la información obtenida en tablas de incidencia, histogramas de frecuencia y rosas de periodo, altura y potencia de oleaje. Así mismo, se calculó el flujo medio de energía y el área donde se presenta el transporte de sedimentos para esta playa en particular, para esto se realizó una zonificación del transporte de sedimento de playa Tongoy.

5.5.1 OLEAJE EN EL SITIO

Tablas de Incidencia: Para contabilizar los estados de mar en esta zona de estudio, el algoritmo consideró alturas de ola en intervalos de 0.2 metros, los periodos en intervalos de 2 [s] y las direcciones en intervalos de 11.75 grados. Con esto se elaboraron las tablas de incidencia Altura v/s Periodo (Tabla 14) y Altura v/s Dirección (Tabla 15) del oleaje.

H - T		Periodo [s]											TOTAL	
		[0 - 2]	[2 - 4]	[4 - 6]	[6 - 8]	[8 - 10]	[10 - 12]	[12 - 14]	[14 - 16]	[16 - 18]	[18 - 20]	[20 - 22]		[22 - +]
Altura [m]	[0 - 0.2]	0	0.14	0.15	0.18	1.43	4.89	10.02	4.01	1.62	0.84	0.41	0.17	23.87
	[0.2 - 0.4]	0	0.31	0.34	0.18	0.93	4.38	17.73	15.11	6.23	2.65	0.86	0.27	48.99
	[0.4 - 0.6]	0	0.07	0.60	0.16	0.31	1.14	3.20	6.59	4.11	1.82	0.68	0.13	18.80
	[0.6 - 0.8]	0	0	0.53	0.09	0.14	0.37	0.68	1.20	1.31	0.82	0.30	0.02	5.47
	[0.8 - 1]	0	0	0.23	0.11	0.07	0.14	0.24	0.26	0.32	0.25	0.07	0.02	1.70
	[1 - 1.2]	0	0	0.05	0.17	0.05	0.05	0.11	0.09	0.07	0.05	0.02	0	0.66
	[1.2 - 1.4]	0	0	0	0.15	0.01	0.01	0.05	0.03	0.01	0.03	0.01	0	0.31
	[1.4 - 1.6]	0	0	0	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0.11
	[1.6 - 1.8]	0	0	0	0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.04
	[1.8 - 2]	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.01
[2 - +]	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0	0.02	
TOTAL		0.00	0.53	1.91	1.14	2.97	11.01	32.02	27.32	13.68	6.45	2.35	0.61	100

Tabla 14: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Playa Tongoy.
Fuente: Elaboración propia.

H - D		Direcciones														TOTAL	
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW		NW
Alturas [m]	[0 - 0.2]	0.29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.35	8.66	21.31
	[0.2 - 0.4]	5.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.66	29.44	51.15
	[0.4 - 0.6]	7.62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.42	8.07	19.12
	[0.6 - 0.8]	3.19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.68	1.55	5.42
	[0.8 - 1]	1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.16	0.57	1.83
	[1 - 1.2]	0.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.25	0.67
	[1.2 - 1.4]	0.23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09	0.32
	[1.4 - 1.6]	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.11
	[1.6 - 1.8]	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.05
	[1.8 - 2]	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
[2 - 2.2]	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.02	
[2.2 - 2.4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
[2.4 - 2.6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
[2.6 - +]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL		18.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33.28	48.68	100

Tabla 15: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje en Playa Tongoy.
Fuente: Elaboración propia.

En general se observa que el oleaje en playa Tongoy tiene dirección predominante desde el NNW, donde más del 48% de los datos provienen de esa dirección. La dirección NW es la segunda en importancia ya que tiene un porcentaje cercano al 34% del registro. Se destaca la dirección norte con un porcentaje no menor del orden de 18%.

Los periodos de oleaje claramente presentan una preponderancia entre los 12 y 16 segundos, con cerca del 60% de los datos. Se observa también que olas con periodos entre 16 y 20 segundos se presentan en cerca del 20% de los casos, y para periodos de olas entre 8 y 12 segundos el registro corresponde al 14%.

Las alturas de ola presentan registros entre 0.2 y 0.4 metros, donde más del 51% están en ese intervalo. Más del 21% de los datos tienen altura de ola menores a 0.2 metros, y cerca del 20% están en el intervalo de 0.4 a 0.6 metros.

Histogramas de frecuencia: Para el procesamiento del registro estadístico se elaboró un histograma de altura (Figura 69) en el que se procesaron los datos en intervalos de 0.2 [m], un histograma de periodos (Figura 70) con los datos en intervalos de 1 [s] y un histograma de direcciones (Figura 71) con los datos en intervalos de 22.5 grados.

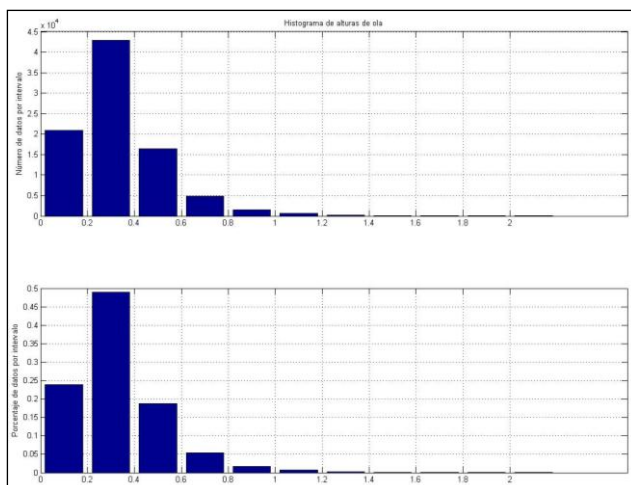


Figura 69: Histograma de altura del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

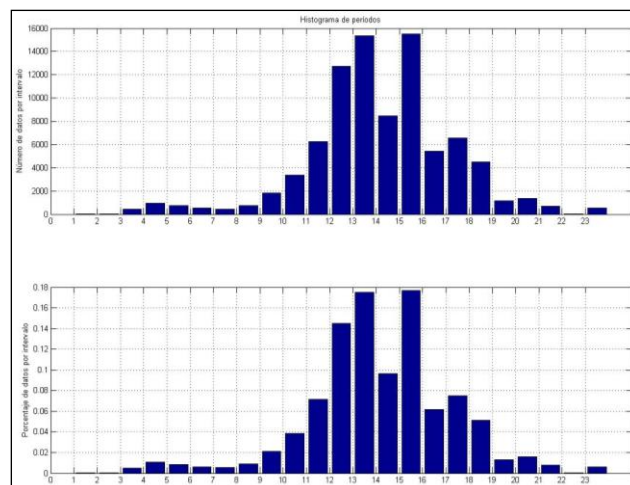


Figura 70: Histograma de periodos del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

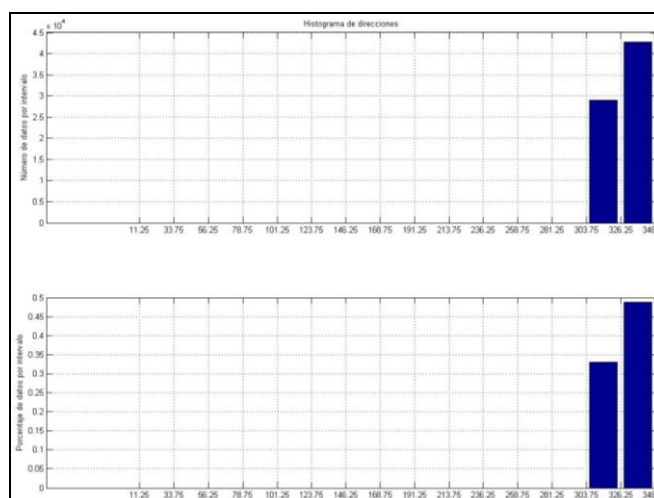


Figura 71: Histograma de dirección del oleaje en Playa Tongoy.
Fuente: Elaboración propia.

El histograma de altura muestra que, más del 48% son alturas de olas que se encuentran en el intervalo de 0.2 y 0.4 metros. Cerca del 24% del registro es de alturas de olas son menores a 0.2 metros y alrededor del 25% son alturas de olas que superan los 0.4 [m].

Del histograma de periodos del oleaje, se observa que el 17% de los datos de olas tiene periodo entre 15 y 16 segundos al igual que 13 y 14 segundos. El 9% tiene periodo de olas entre 12 y 13 segundos, mientras que 7% tiene periodo entre 11 y 12 segundos al igual que el intervalo de 17 y 18 segundos.

Al analizar el histograma representado en la Figura 71, se observa que predominan cerca del 50% del registro total, direcciones de olas que vienen desde el intervalo entre 326,25° y 348,75°. La dirección entre 303.75° y 326.25° presenta cerca del 33% del total. Lo anterior demuestra el cambio de dirección que pasa a ser Norte como resultado de los fenómenos de refracción, difracción y asomeramiento del oleaje al propagarse a costa.

Rosas de oleaje: Con la implementación de nuevos algoritmos matemáticos se configuró un código de programación en Matlab de elaboración y uso propio para procesar los datos de altura y periodo con respecto a la dirección del oleaje que se representaron de forma gráfica en rosas de oleaje.

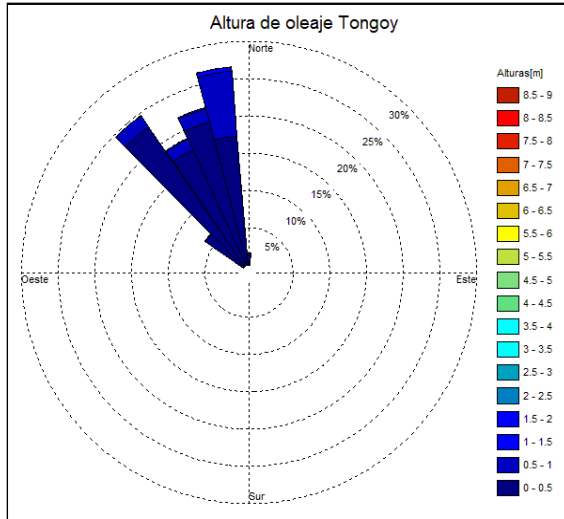


Figura 72: Rosa de altura del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

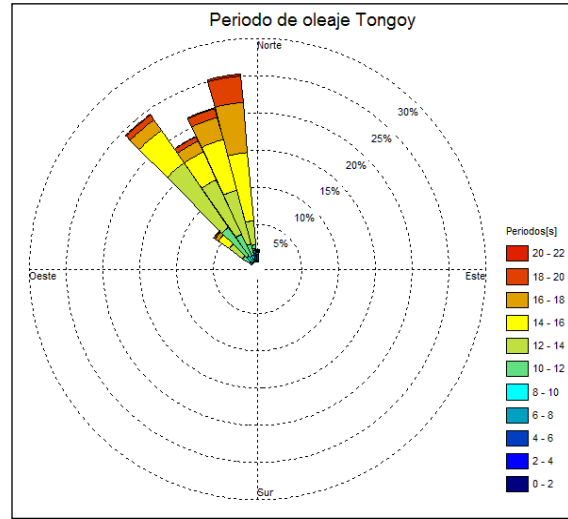


Figura 73: Rosa de periodo del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

5.5.2 FLUJO MEDIO DE ENERGIA

La rosa de Potencia de Energía del oleaje:

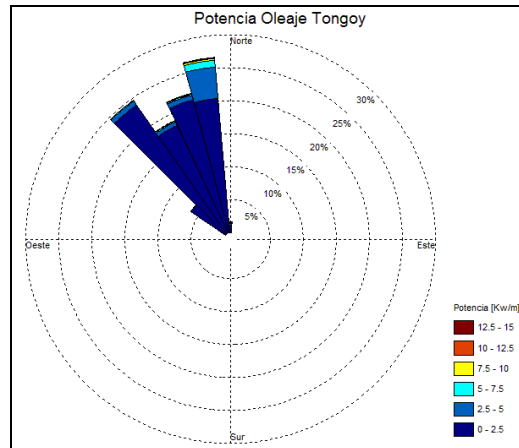


Figura 74: Rosa de potencia del oleaje en playa Tongoy.
Fuente: Elaboración propia.

El flujo medio de energía del oleaje fue de 1.05 [Kw/m], con dirección 326°, es decir, cercano al NNW.

5.5.3 ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los parámetros calculados para la zonificación en playa Tongoy fueron los siguientes:

- HS0.137 = 1.50 [m].
- Profundidad activa = 3.37 [m]. Por Hellermeier.
- Profundidad activa = 2.58 [m]. Por Birkemeier.
- Profundidad activa = 3.02 [m]. Por Houston.
- Profundidad de cierre = 5.25 [m].

5.6 OLEAJE OPERACIONAL EN BAHÍA QUINTERO

Como resultado de la transferencia espectral de oleaje desde aguas profundas hasta bahía Quintero, se procesó la información obtenida en tablas de incidencia, histogramas de frecuencia y rosas de periodo, altura y potencia de oleaje. Así mismo, se calculó el flujo medio de energía y el área donde se presenta el transporte de sedimentos del sector.

5.6.1 OLEAJE EN EL SITIO

Tablas de Incidencia: Se utilizaron los mismo intervalos que en los caso anteriores, para elaborar tablas de incidencia Altura v/s Periodo y Altura v/s Dirección del oleaje.

H - T		Periodo [s]											TOTAL	
		[0 - 2]	[2 - 4]	[4 - 6]	[6 - 8]	[8 - 10]	[10 - 12]	[12 - 14]	[14 - 16]	[16 - 18]	[18 - 20]	[20 - 22]		[22 - +]
Alturas [m]	[0 - 0.2]	0	0.01	0.04	0.15	0.52	0.80	1.07	0.48	0.20	0.08	0.03	0.01	3.39
	[0.2 - 0.4]	0	0.06	0.10	0.27	2.12	5.71	13.19	6.78	2.50	1.01	0.39	0.12	32.25
	[0.4 - 0.6]	0	0.05	0.25	0.26	1.19	5.14	10.75	9.72	4.60	1.95	0.70	0.14	34.75
	[0.6 - 0.8]	0	0.01	0.37	0.24	0.61	2.40	4.36	3.30	2.02	0.99	0.35	0.04	14.69
	[0.8 - 1]	0	0	0.40	0.27	0.36	1.29	2.24	0.91	0.48	0.26	0.06	0.01	6.28
	[1 - 1.2]	0	0	0.25	0.37	0.22	0.69	1.16	0.45	0.13	0.07	0.02	0	3.37
	[1.2 - 1.4]	0	0	0.05	0.47	0.18	0.46	0.64	0.23	0.04	0.02	0	0	2.09
	[1.4 - 1.6]	0	0	0	0.31	0.17	0.29	0.37	0.16	0.01	0	0	0	1.31
	[1.6 - 1.8]	0	0	0	0.23	0.15	0.09	0.19	0.08	0.01	0	0	0	0.76
	[1.8 - 2]	0	0	0	0.09	0.14	0.06	0.11	0.07	0	0	0	0	0.46
	[2 - 2.2]	0	0	0	0.02	0.11	0.06	0.08	0.02	0	0	0	0	0.29
	[2.2 - 2.4]	0	0	0	0	0.08	0.04	0.05	0.01	0	0	0	0	0.18
	[2.4 - 2.6]	0	0	0	0	0.03	0.02	0.01	0.01	0	0	0	0	0.08
[2.6 - +]	0	0	0	0	0.02	0.02	0.03	0.03	0	0	0	0	0.11	
TOTAL		0.00	0.12	1.47	2.68	5.93	17.05	34.25	22.24	10.01	4.37	1.54	0.33	100

Tabla 16: Tabla de incidencia porcentual Altura-Periodo del oleaje en Bahía Quintero.
Fuente: Elaboración propia.

H - D		Direcciones														TOTAL		
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW		NW	NNW
Alturas [m]	[0 - 0.2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.39	1.36	0.06	2.81
	[0.2 - 0.4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.89	20.97	1.65	31.51
	[0.4 - 0.6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.41	24.85	4.33	35.6
	[0.6 - 0.8]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.06	9.72	2.82	14.59
	[0.8 - 1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.49	4.57	1.6	6.66
	[1 - 1.2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07	2.33	1.06	3.45
	[1.2 - 1.4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.32	0.82	2.14
	[1.4 - 1.6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.71	0.58	1.29
	[1.6 - 1.8]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.47	0.8
	[1.8 - 2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.29	0.49
	[2 - 2.2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0.2	0.31
	[2.2 - 2.4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.16	0.2
	[2.4 - 2.6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.06	0.09
[2.6 - +]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.04	0.07	
TOTAL		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19.3	66.55	14.15	100

Tabla 17: Tabla de incidencia porcentual Altura-Dirección del oleaje en Bahía Quintero.
Fuente: Elaboración propia.

El oleaje al interior de la bahía tiene dirección NW ya que más del 66% de los datos provienen desde esa dirección. Las direcciones WNW y NNW son importantes ya que presentan porcentajes del orden de 19% y 14%, respectivamente.

Los periodos de están entre los 12 y 16 segundos, con más del 57%. Se observa también que olas con periodos entre 10 y 12 segundos corresponden al 17% de los casos, y para periodos de olas sobre 16 segundos el registro no supera el 16%.

Las alturas de ola presentan registros entre 0.2 y 0.6 metros, donde más del 67% están en ese intervalo. Más del 14% de los datos tienen altura de ola en el intervalo entre los 0.6 y 0.8 metros, y cerca del 15% superan los 0.8 metros.

Histogramas de frecuencia: Para el procesamiento del registro estadístico se elaboró un histograma de altura (Figura 75) en el que se procesaron los datos en intervalos de 0.2 [m], un histograma de periodos (Figura 76) con los datos en intervalos de 1 [s] y un histograma de direcciones (Figura 77) con los datos en intervalos de 22.5 grados.

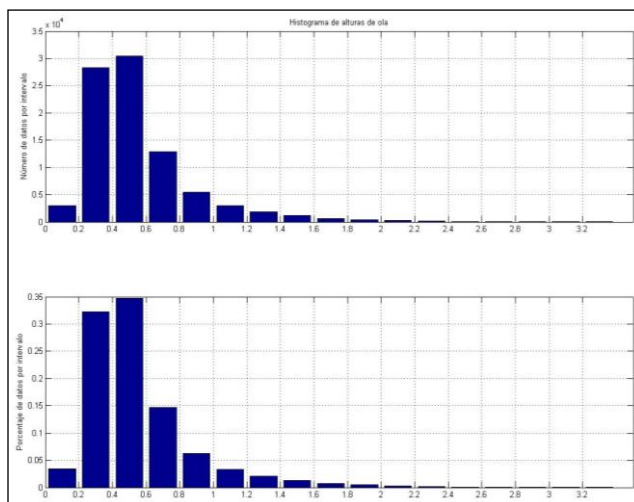


Figura 75: Histograma de alturas del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

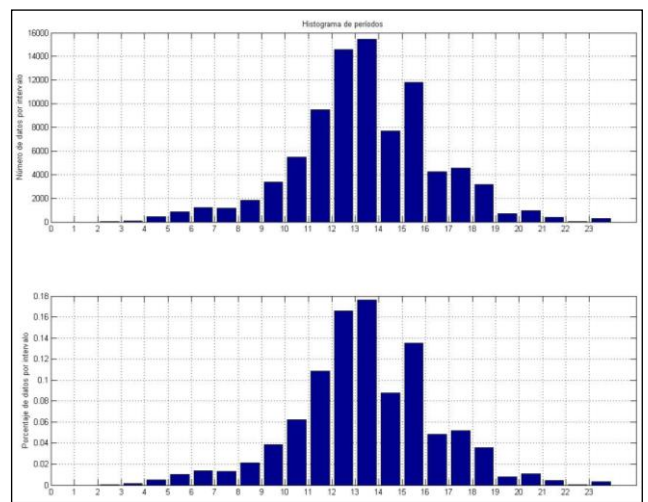


Figura 76: Histograma de periodos del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

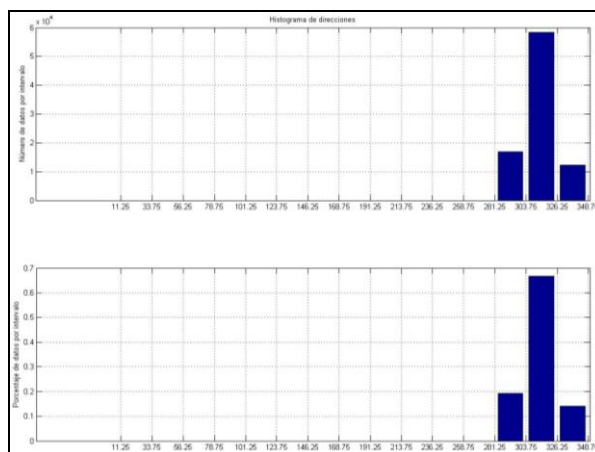


Figura 77: Histograma de direcciones del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

El histograma de altura de olas muestra que, más del 35% de éstos son alturas de olas que se encuentran en el intervalo de 0.4 y 0.6 metros. Cerca del 33% del registro es de alturas de olas pertenecientes al intervalo entre 0.2 y 0.4 metros y alrededor del 15% son alturas de olas que están en el intervalo entre 0.6 y 0.8 metros.

Del histograma de periodos del oleaje se observa que el 18% de los datos de olas tiene periodo entre 13 y 14 segundos, el 17% tiene periodo de olas entre 12 y 13 segundos, el 13% tiene periodo entre 15 y 16 segundos y el 8% del total presenta periodos de ola entre 14 y 15 segundos, siendo estos intervalos los de mayor relevancia del registro.

Al analizar el histograma representado en la Figura 77, se observa que predominan cerca del 70% del registro total, direcciones de olas que vienen desde el intervalo entre 303,75° y 326,25°. La dirección entre 281.25° y 303.75° presenta cerca del 20% del total, mientras que el intervalo entre 326.25° y 348.75° es del orden de 14%.

Rosas de oleaje: Con la implementación de nuevos algoritmos matemáticos se configuró un código de programación en Matlab de elaboración y uso propio para procesar los datos de altura y periodo con respecto a la dirección del oleaje que se representaron de forma gráfica en rosas de oleaje.

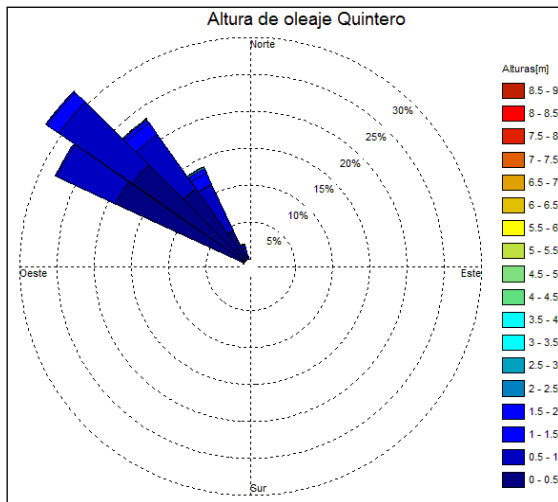


Figura 78: Rosa de altura del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

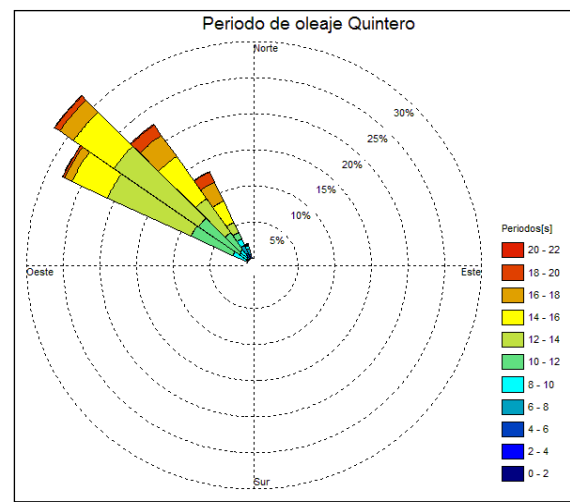


Figura 79: Rosa de periodo del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

5.6.2 FLUJO MEDIO DE ENERGIA

Se calculó la potencia del oleaje en el sector mediante la representación gráfica que se muestra en la Figura 80.

Como resultado, se obtuvo el flujo medio de energía del oleaje que fue de 2.58 [Kw/m], con dirección 301°, es decir, cercano al NW.

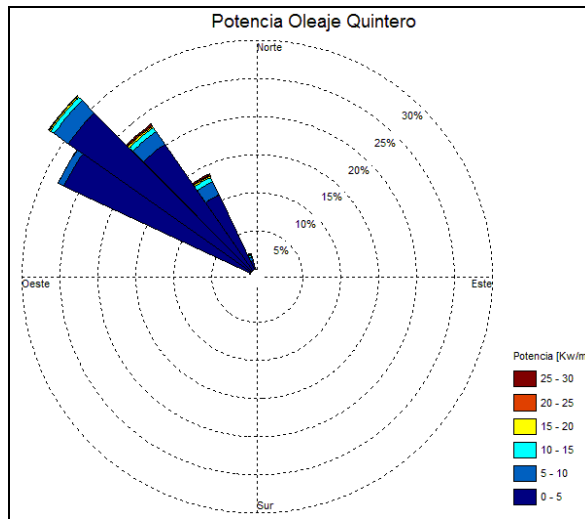


Figura 80: Rosa de potencia del oleaje en Bahía Quintero.
Fuente: Elaboración propia.

5.6.3 ZONIFICACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los resultados de Zonificación del transporte de sedimento para bahía Quintero son:

HS0.137 = 2.43 [m].

Profundidad activa = 5.46 [m]. Por Hellermeier.

Profundidad activa = 4.19 [m]. Por Birkemeier.

Profundidad activa = 4.97 [m]. Por Houston.

Profundidad de cierre = 8.53 [m].

CAPÍTULO VI

6 AJUSTE EN PLANTA

6.1 METODOLOGIA GENERAL DE PLAYAS EN EQUILIBRIO EN PLANTA

En base a diversas teorías y formulaciones de equilibrio desarrolladas por numerosos autores que se presentaron en el Capítulo 2, se calcula en este capítulo la ecuación que se propone como alternativa al modelado la forma clásica en planta que adoptan las playas de las zonas del Norte Chico y Central de Chile, además, la forma que adoptará una playa artificial en respuesta a las condiciones locales y particulares de esta zona costera.

La formulación resultante se obtuvo a partir de los análisis de las condiciones hidrodinámicas y morfológicas particulares de las cuatro playas analizadas, que forman parte del alcance de esta investigación. Para lo anterior, se desarrolló una metodología que se explica mediante el siguiente procedimiento:

1. Se determinó la orientación del flujo medio de energía del oleaje en el punto de difracción (Figura 81) para lo cual se calcularon los principales parámetros del oleaje (altura, periodo y dirección) en las cercanías de este punto. Este procedimiento consistió en propagar oleaje desde aguas profundas por medio de un proceso de transferencia espectral desarrollado en el Capítulo 5, hasta los 10 metros de profundidad que corresponde a la zona donde efectivamente se produce el funcionamiento hidrodinámico de la playa, es decir, el sector donde existe transporte de sedimentos.
2. Una vez determinadas las condiciones de oleaje en el polo de difracción o punto de control, y de acuerdo a las características geométricas de cada playa, además de las condiciones morfológicas estudiadas en el Capítulo 4, se definieron los principales parámetros a utilizar. Éstos corresponden al punto inicio y cierre de la playa, punto de control y factor limitante. Estos elementos conforman los sectores limítrofes de la playa (extremo sur; extremo norte), debido a que el avance de la misma está limitado por cada apoyo en particular. Cada uno de estos elementos determinados permitieron distinguir la forma característica de parábola o espiral con la que se modeló la línea de costa.
3. Con las características geométricas de la playa definidas, se calculó la longitud de onda del frente de oleaje en el polo de difracción, de acuerdo a la ecuación $L = f(Ts_{12}, hp)$, donde "hp" no es un valor constante en cercanías del punto de control, por esto, se consideró un valor medio a lo largo del frente de oleaje.
4. Se determinaron las otras constantes geométricas para cada playa de estudio. Para esto se utilizó la herramienta Autocad, con el que se escaló la imagen actual seleccionada para cada zona de estudio y se midieron los diferentes radios de parábola con sus respectivos ángulos. Se evaluó el ángulo " α min", y se definió el ángulo β , ya que $\alpha + \beta = 90$.

5. A partir del Modelo Parabólico de Hsu y Evans (1989), cuya formulación se presenta en la ecuación 15, se desprenden las tres constantes que fueron evaluadas con las condiciones locales y geométricas de las cuatro playas analizadas.

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2$$

Ecuación 15: Modelo parabólico de Hsu y Evans (1989).

6. Mediante el uso de los parámetros geométricos ya obtenidos para cada playa, se calcularon los coeficientes a-dimensionales C0, C1 y C2 que mejor representaron la forma de planta que alcanzan éstas. Mediante este procedimiento, se seleccionaron los coeficientes que minimizaron el error entre lo teórico y lo real. Para esto se resolvieron sistemas de ecuaciones ordinarios de 3x3 variables donde las incógnitas fueron los respectivos coeficientes C0, C1 y C2.
7. Por último, con los coeficientes a-dimensionales definidos se presentó la ecuación que se propone como alternativa para el cálculo y evaluación de la forma en planta que adoptan las playas en equilibrio. Esta ecuación se propone como alternativa para utilizarla en sectores costeros de las zonas del norte chico y central de Chile.

En la Figura 81 se presenta una descripción obtenida de la modelación numérica para la determinación del clima de oleaje operacional, desarrollada en el Capítulo 5. En esta imagen se pueden observar las direcciones principales de los frentes de onda para las cuatro zonas de estudio, en particular, se destaca la dirección del flujo medio de energía del oleaje en el punto de refracción. Este dato es el más relevante ya que de acuerdo a la dirección del flujo medio de energía del oleaje, se presenta el comportamiento posterior asociado a la forma en planta que adopta la playa considerando que el sedimento es susceptible a ser desplazado mediante las forzantes principales que genera el oleaje.

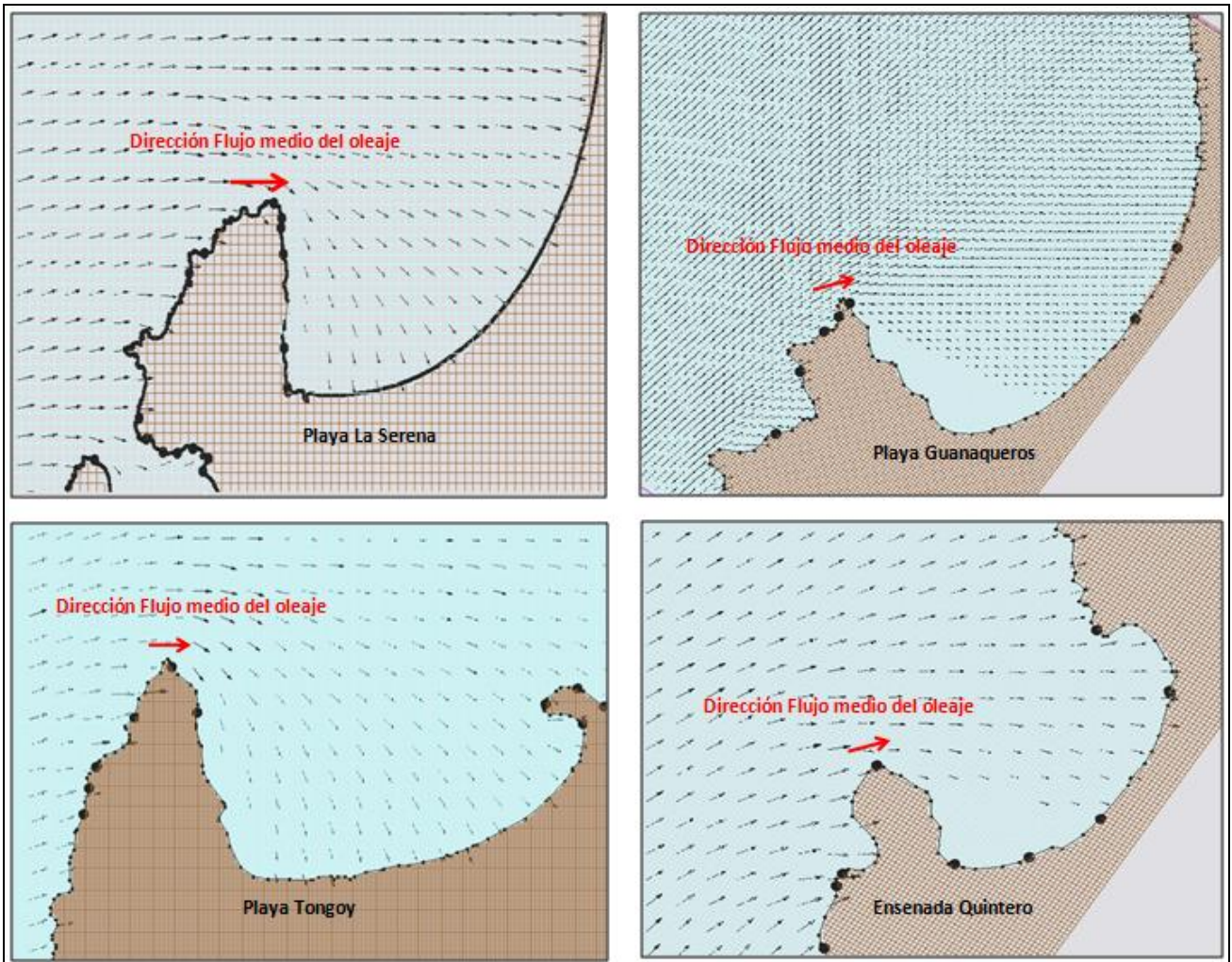


Figura 81: Dirección del flujo medio de energía del oleaje en cada zona de estudio.
FUENTE: Elaboración propia. Resultados Capítulo 5.

6.2 AJUSTE EN PLANTA PARA PLAYA LA SERENA

Para realizar el ajuste en planta para esta playa, se calcularon los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 para La Serena de acuerdo a la metodología que se describió anteriormente. Para lo anterior, se desarrolló un algoritmo matemático automatizado para cada zona de estudio mediante la implementación de MATLAB.

La Figura 82 muestra los principales elementos extraídos de la imagen actual del sitio de estudio. Estos son radios y ángulos de parábola que se midieron de la imagen escalada en Autocad. Para la medición de los radios, se evaluó la distancia entre el punto de control o polo de difracción del oleaje (“Fuerte Lambert” en el caso de La Serena) a la línea litoral de la playa.

Para esta playa se midieron radios y ángulos en intervalos de 5 grados, en total, se calcularon 29 radios y ángulos de parábola.

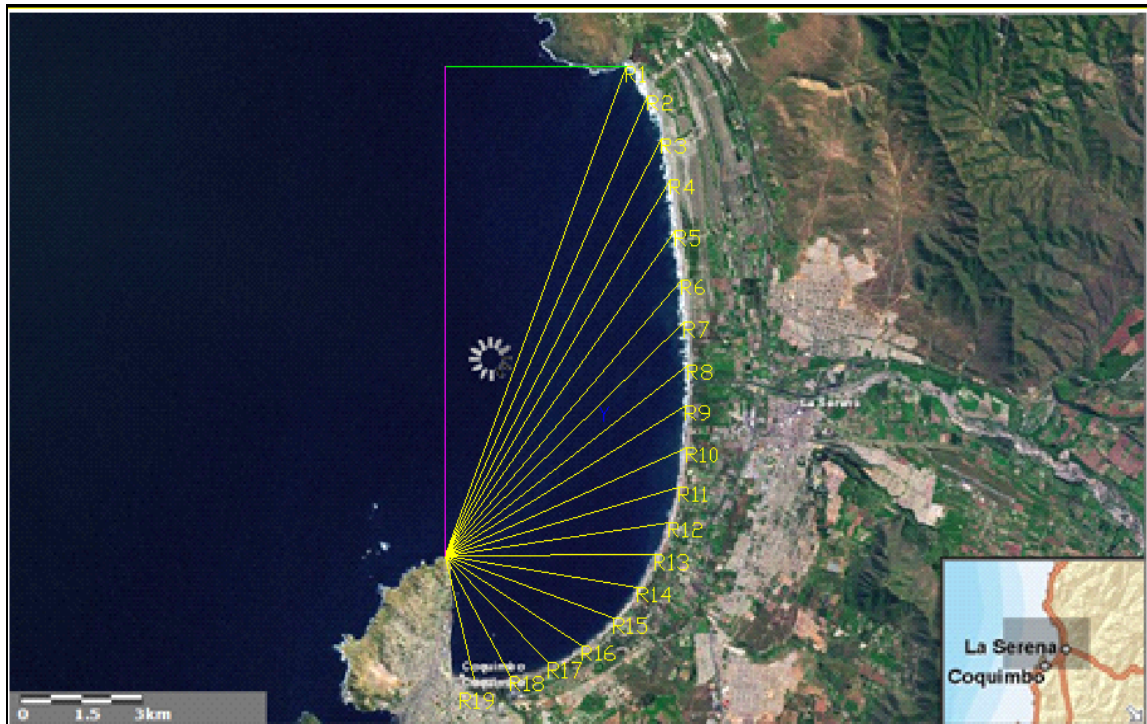


Figura 82: Representación del cálculo de constantes geométricas de playa La Serena.
FUENTE: Elaboración propia.

Para la medición de cada ángulo “ θ_c ” en Autocad, se evaluó este parámetro, como la medida angular que hay entre la línea que representa la dirección media del oleaje en el polo de refracción y cada radio representado en la Figura 82.

En el Anexo 8.2 se presenta la Tabla 23 que contiene los detalles de cada uno de los parámetros geométricos de esta playa. En este, la distancia geométrica “Y” corresponde a un radio que forma un ángulo recto entre el polo de refracción y la línea de costa de la playa, además se destaca el radio “Ro” que corresponde a la distancia entre el polo de refracción y la línea litoral que se genera en la prolongación de ésta hasta el punto de cierre de la parábola formada.

6.3 AJUSTE EN PLANTA PARA PLAYA GUANAQUEROS

Se estimaron los coeficientes C0, C1 y C2 para playa Guanaqueros de acuerdo a la metodología descrita. Para esto se empleó de forma similar, el algoritmo mencionado en el cálculo de las constantes para playa La Serena.

En la Figura 83 se observan los parámetros geométricos que se utilizaron en Guanaqueros. La metodología fue similar que para playa La Serena mediante el uso de la herramienta Autocad.

Así mismo, se midieron radios y ángulos en intervalos de 5 grados, en total se calcularon 22 radios y ángulos de parábola para esta playa.

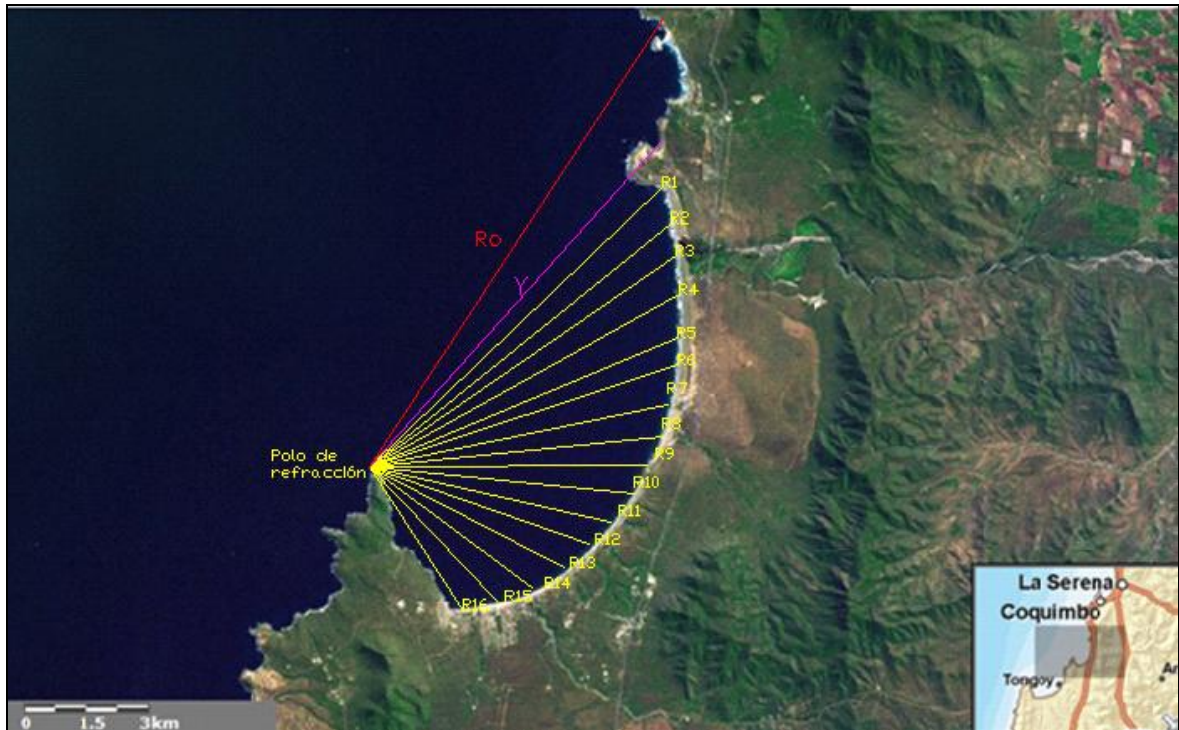


Figura 83: Cálculo de constantes geométricas de playa Guanaqueros.
FUENTE: Elaboración propia.

En la Tabla 23 del Anexo 8.2 se presenta el detalle de las mediciones de cada elemento geométrico evaluado a partir de la Figura 83.

6.4 AJUSTE EN PLANTA PARA PLAYA TONGOY

Para realizar el ajuste en planta para playa Tongoy, se calcularon los coeficientes analizando la geometría del sector costero de este balneario, para lo cual se utilizó el algoritmo automatizado de MATLAB que se describió anteriormente.

En la Figura 84 se muestra una descripción de los radios y ángulos parábola generados desde el polo de difracción del oleaje, en este caso, los radios van desde el sector denominado Punta Lengua de Vaca hasta la línea litoral de la playa.

Para este ajuste en planta, se midieron radios y ángulos en intervalos de 5 grados, en total se calcularon en total, 14 radios y ángulos de parábola para Tongoy.

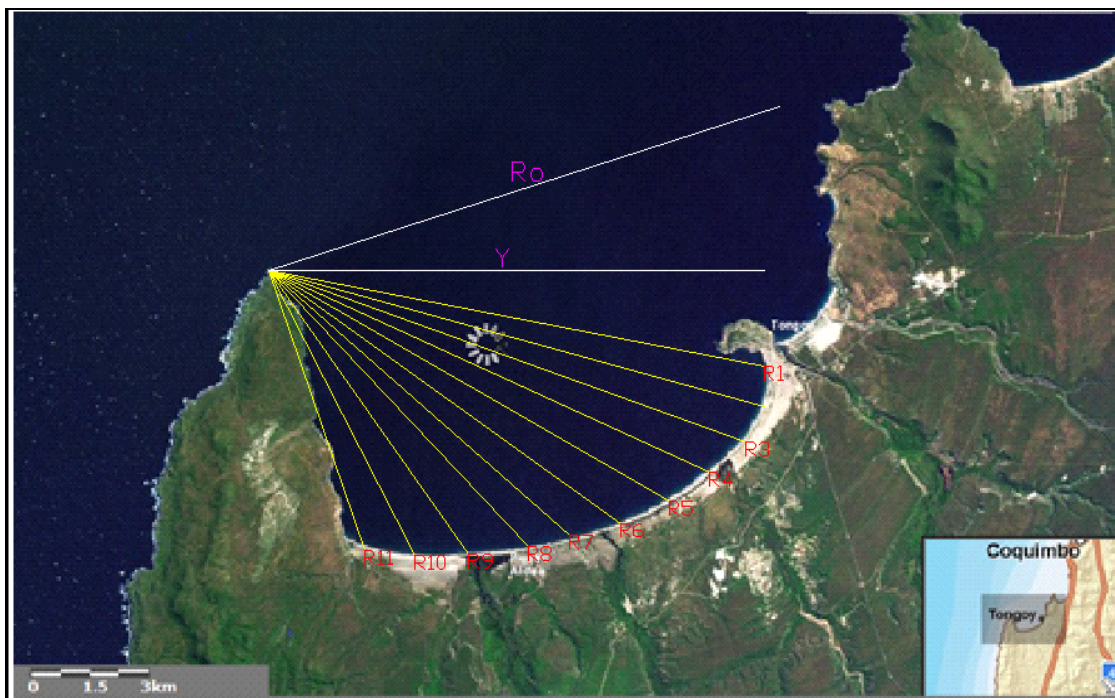


Figura 84: Cálculo de constantes geométricas de playa Tongoy.
FUENTE: Elaboración propia.

En la Tabla 23 del Anexo 8.2 está el detalle de los elementos geométricos que se calcularon en la Figura 84.

6.5 AJUSTE EN PLANTA PARA BAHÍA QUINTERO

Para el estudio de la forma en planta de la bahía Quintero, se calcularon los coeficientes siguiendo la metodología de la misma forma que se desarrolló para las otras zonas de estudio. Con los parámetros geométricos del sector se utilizó el algoritmo automatizado para evaluar las constantes de esta zona.

En la Figura 85 se muestran los elementos geométricos de la bahía y la representación de los radios y ángulos de parábola medidos. Para esto, se siguieron los procedimientos de forma similar a las otras tres playas estudiadas.

Igualmente, se evaluaron radios y ángulos en intervalos de 5 grados. Se midieron de la imagen escalonada en Autocad, un total de 15 radios y ángulos de parábola para Quintero.

La Tabla 23 del Anexo 8.2 presenta el detalle de los elementos geométricos desprendidos a partir de la Figura 85 para la bahía Quintero.

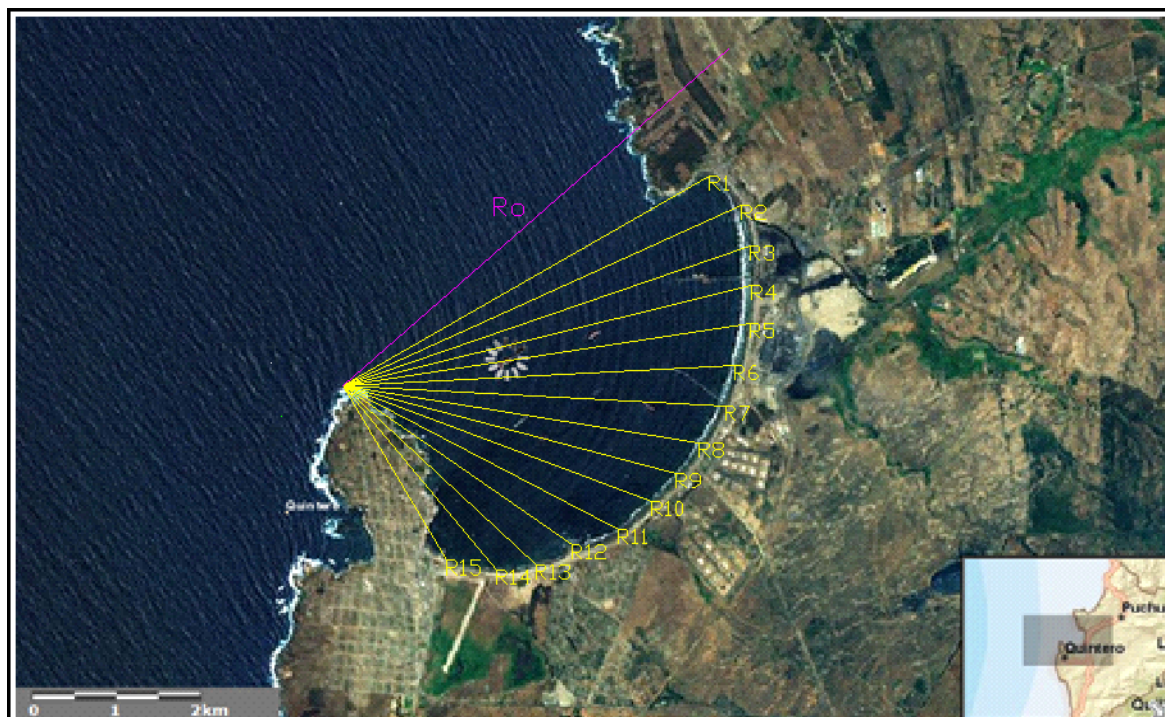


Figura 85: Cálculo de constantes geométricas de Bahía Quintero.
FUENTE: Elaboración propia.

6.6 RESULTADOS DEL AJUSTE EN PLANTA

En el análisis de equilibrio y forma en planta de las cuatro playas estudiadas, se determinaron los coeficientes que relacionan la geometría con las características hidrodinámicas en los sectores de estudio. Para la determinación de estos coeficientes adimensionales, se calcularon distintos parámetros de la literatura científica para formulaciones de equilibrio en planta. Con estos cálculos se desarrolló una comparación entre los distintos factores morfológicos de las playas estudiadas, además de las condiciones hidrodinámicas presentes en cada sector en particular.

Para lo anterior, se graficaron los ángulos “ α min” de cada sitio de estudio, versus un coeficiente denominado “ Y/L ”, que físicamente corresponde al dimensionamiento entre la longitud de onda y un radio típico representativo del sector estudiado que se mide como la distancia que existe entre el polo de difracción del oleaje y la línea costera de la playa.

Como resultado de este análisis, se presenta una comparación preliminar en el gráfico de la Figura 86 que muestra lo que se evidenció para las cuatro playas en equilibrio estudiadas versus los datos de playas en equilibrio de la costa española de acuerdo a una zonificación del litoral de este país. Estos datos se obtuvieron del estudio denominado “Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de Equilibrio” presentado en la Referencia 32.

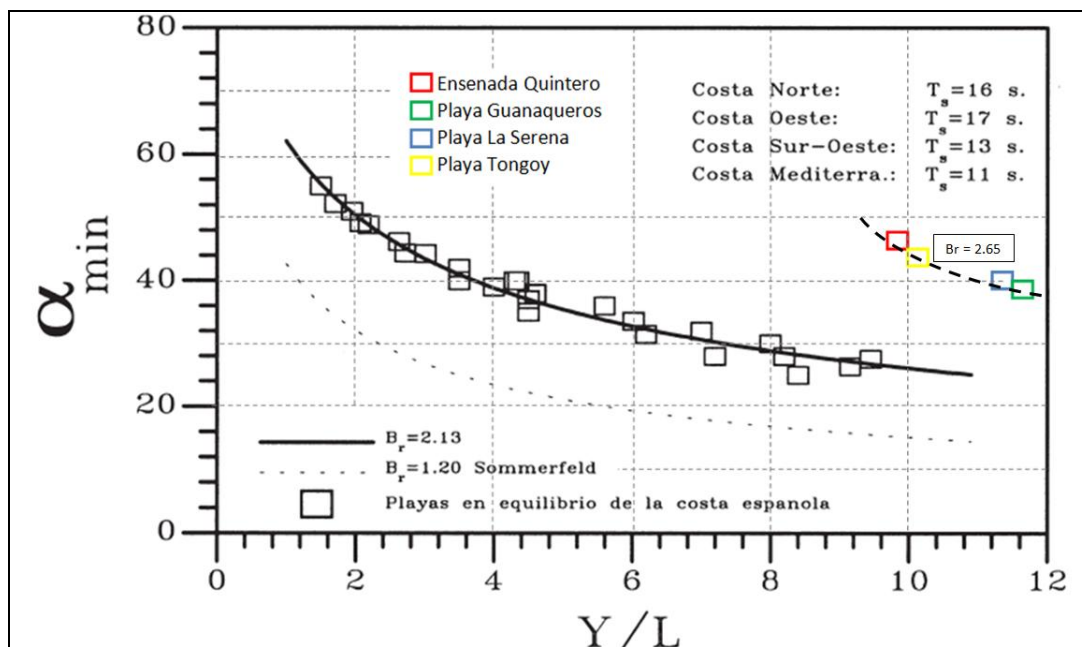


Figura 86: Comparación de principales constantes morfodinámicas de las playas estudiadas versus constantes los parámetros de playas en equilibrio de la costa española.

FUENTE: "Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de Equilibrio"

En el gráfico se observa que los datos que representan las playas y bahías en equilibrio de las costas de las zonas norte chico y central de Chile, presentan diferencias de los registros que se validaron para las costas de España, en particular, se destaca que para playa Tongoy y bahía Quintero, la curva de equilibrio se ubica por sobre la curva que representan los parámetros de las costas españolas. Esto se explica debido a que el ángulo " α_{min} " presenta valores mayores con respecto a los datos de las costas españolas, mientras que los cocientes " Y/L " son muy mayores para las playas chilenas. Lo anterior es consecuencia de que estas últimas tienen dimensiones mayores a las playas españolas por lo que los radios de parábola son mayores, además, las condiciones hidrodinámicas son diferentes ya que el comportamiento del oleaje (direccional principalmente) en costas de Chile central, difiere de la costa de ese país.

En el análisis de parámetros asociados a la forma en planta de equilibrio en playas, mediante el algoritmo descrito antes, se mantuvieron fijos los coeficientes calculados para cada playa, y se evaluó la constante denominada " Br ". Se obtuvo un valor promedio representativo de la zona de estudio que correspondió a 2.65. Este es mayor a lo expuesto teóricamente en la formulación de Sommerfeld (Referencia 32) y al resultado de las costas españolas.

De acuerdo a los parámetros y cálculos desarrollados, se determinó que las costas de Chile tienen condiciones hidrodinámicas y morfológicas diferentes a las costas españolas, por lo que existe un fundamento teórico que puede ser considerado en relación al uso de las ecuaciones clásicas de equilibrio en playas chilenas. Este fundamento permite relacionar las metodologías clásicas como el método de la Parábola de Hsu con parámetros locales de las costas chilenas, por lo que es importante buscar los coeficientes que ajusten de mejor forma la ecuación de equilibrio para nuestras playas. Con estos coeficientes, se

puede obtener una ecuación que se propone como alternativa para ser utilizada en sectores donde las ecuaciones clásicas pueden presentar diferencias.

Se calcularon los tres coeficientes a-dimensionales C0, C1 y C2 para cada playa estudiada. Éstos se presentan en la Tabla 18.

LA SERENA			GUANAQUEROS			TONGOY			QUINTERO		
Co	C1	C2	Co	C1	C2	Co	C1	C2	Co	C1	C2
-0.69	5.23	-5.05	-0.79	6.00	-5.78	-6.74	55.22	-105.47	-6.75	34.16	-38.24
-3.11	20.33	-28.49	-3.59	23.35	-32.57	-1.24	10.80	-15.75	-0.86	7.44	-8.04
-2.27	16.54	-25.01	-2.62	19.00	-28.59	-0.12	1.05	5.35	-3.39	22.04	-29.11
-0.29	3.22	-2.64	-0.34	3.70	-3.02	-0.14	1.40	3.96	-3.08	21.74	-31.20
0.18	-0.50	4.75	0.20	-0.57	5.43	---	---	---	10.96	-79.71	152.26
-1.14	10.62	-18.77	-1.32	12.20	-21.45	---	---	---	-3.93	30.10	-50.17
1.81	-17.32	47.38	2.09	-19.89	54.15	---	---	---	---	---	---
PROMEDIO			PROMEDIO			PROMEDIO			PROMEDIO		
-0.79	5.45	-3.98	-0.91	6.26	-4.55	-2.06	17.12	-27.98	-1.18	5.96	-0.75
MAX			MAX			MAX			MAX		
1.81	20.33	47.38	2.09	23.35	54.15	-0.12	55.22	5.35	10.96	34.16	152.26
MIN			MIN			MIN			MIN		
-3.11	-17.32	-28.49	-3.59	-19.89	-32.57	-6.74	1.05	-105.47	-6.75	-79.71	-50.17

Tabla 18: Tabla de resultados de coeficientes C0, C1 y C2 para las zonas de estudio.
FUENTE: Elaboración propia.

Se muestran los resultados obtenidos, y la estadística básica; los valores de promedio, máximos y mínimos en cada playa.

De la tabla se observan valores del coeficiente Co que están en el intervalo de -6.75 a 10.96, mientras que valores para el coeficiente C1 en el intervalo de -79.71 a 55.22 y valores para C2 entre -105.47 a 152.26.

Se resumieron los resultados obtenidos para lo cual se promediaron los coeficientes. Este resultado se muestra en la Tabla 19a, además, en la Tabla 19b se presenta el promedio de los coeficientes sin los valores extremos que se escapan del rango de -10 a 10.

a)	Co	C1	C2	b)	Co	C1	C2
LA SERENA	-0.79	5.45	-3.98	LA SERENA	-0.79	5.45	-3.98
GUANAQUEROS	-0.91	6.26	-4.55	GUANAQUEROS	-0.91	6.26	-4.55
TONGOY	-2.06	---	---	TONGOY	-2.06	17.12	-27.98
QUINTERO	-1.18	5.96	-0.75	QUINTERO	-1.18	5.96	-0.75

Tabla 19: Tablas de coeficientes a-dimensionales promediados para las cuatro zonas de estudio.
FUENTE: Elaboración propia.

Se realizó el cálculo de los coeficientes C0, C1 y C2 para las cuatro playas de estudio, mediante el método clásico de la Parábola de Hsu modificada. Los resultados se presentan en la Tabla 20. En el Anexo 8.2 se muestra el resumen de los coeficientes estimados para este cálculo en función del ángulo "β".

	β [°]	C0	C1	C2
La Serena	41.54	-0.008	1.359	-0.354
Guanaqueros	41.74	-0.009	1.364	-0.358
Tongoy	31.31	0.043	1.156	-0.202
Quintero	41.58	-0.008	1.360	-0.355

Tabla 20: Tabla de coeficientes a-dimensionales obtenidos en función de “ β ” mediante la metodología de la parábola de HSU 1989 para las cuatro playas de estudio.

FUENTE: Elaboración propia.

Se compararon los resultados de las Tablas 19b y 20 de donde se obtuvo que los coeficientes “C0”, en general, son menores para la estimación en relación a los obtenidos mediante la metodología de Hsu. Los coeficientes “C1” son mayores para la estimación en relación a los obtenidos por Hsu, y los coeficientes “C2” son menores para la estimación en relación a los obtenidos la formulación de Hsu.

Para el caso presentado en la Tabla 19a, se calculó el promedio para las cuatro playas. Los coeficientes a-dimensionales obtenidos son:

$$-C0 = -1.24. \quad -C1 = 5.89. \quad -C2 = -3.09.$$

Para el caso presentado en la Tabla 19b, se calculó el promedio de las cuatro playas de estudio. Los coeficientes a-dimensionales obtenidos son:

$$-C0 = -1.24. \quad -C1 = 8.7. \quad -C2 = -9.32.$$

Para determinar el resultado, se utilizaron los coeficientes del primer caso (Tabla 19a) ya que éstos son los que modelan de mejor forma la línea litoral para las cuatro playas estudiadas. Estos coeficientes son los que minimizaron el error medio observado que se genera entre la línea litoral media de las zonas de estudio reales y lo modelado teóricamente.

Con estos resultados se pudo determinar la ecuación que se presenta como una alternativa a la formulación clásica del “Modelo de la Parábola de Hsu”, ahora calculado mediante parámetros de cuatro playas en equilibrio en las costas de las zonas del norte chico y central de Chile. Esta formulación es la que se propone como alternativa también para desarrollar el diseño de playa artificial en estos sectores costeros. Ecuación 16.

$$\frac{R}{R_0} = -1,24 + 5,89\left(\frac{\beta}{\theta}\right) - 3,09\left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2$$

Ecuación 16: Parábola de Hsu modificada para playas del norte chico y central de Chile.

Donde:

R = Radios R (i), medidos desde el punto de control a distintos tramos de la línea litoral.

R₀ = Radio de cierre de la parábola, medido desde el punto de control al punto de cierre de la parábola.

β = Ángulo descrito entre la dirección del frente de onda y el radio R₀.

θ = Ángulos θ (i), medidos desde la línea que representa la dirección del flujo medio de energía del oleaje y cada radio R (i).

CAPÍTULO VII

7 ANÁLISIS DE LA ECUACION DE EQUILIBRIO PROPUESTA

Es necesario realizar un análisis de la Ecuación 17 que se obtuvo en el Capítulo 6, con el objeto de estudiar el uso de esta propuesta en playas en equilibrio en otras zonas del país, considerando que las condiciones hidrodinámicas y morfológicas son diferentes a las de las zonas del norte chico y central de Chile. Con este estudio se desea verificar la aplicabilidad de la ecuación propuesta en estos sectores.

$$\frac{R}{R_0} = -1,24 + 5,89\left(\frac{\beta}{\theta}\right) - 3,09\left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2$$

Ecuación 17: Parábola de Hsu modificada para playas del norte chico y central de Chile.

Se estudió la aplicación de la ecuación de equilibrio en planta propuesta como alternativa, para la zona norte y sur del país, para lo cual se recopiló información de bahías y playas que se encuentran en estado de equilibrio y se escogió una playa o bahía en particular por cada zona de estudio. Con esta pre-selección, se analizaron las principales características del área de interés, en particular, la morfología de la línea litoral, la hidrodinámica presente y los agentes responsables de éstas formas particulares, como las corrientes, el oleaje y el viento principalmente. Estas forzantes generan los regímenes de transporte de sedimento y funcionamiento morfo-dinámico de la playa.

Para ambas playas y/o bahías seleccionadas por cada zona de estudio (norte y sur) se evaluaron los principales parámetros geométricos que la componen, entre estos, se midieron los puntos de abertura y cierre de la playa, punto de control o polo de difracción del oleaje, radios de parábola, ángulos de parábola, etc. Con estos elementos se estimó la forma en planta del litoral mediante la formulación obtenida para las costas de la zona central y se utilizaron las condiciones locales que varían de acuerdo a la ubicación geográfica de los dos sectores estudiados.

7.1 GENERALIDADES DE LAS PLAYAS Y/O BAHIAS SELECCIONADAS

Para cada zona de estudio se buscó entre bahías y playas que preliminarmente se les puede atribuir un estado de equilibrio al largo plazo, además, que su forma en planta estuviese determinada por un patrón particular y reconocido como una parábola o espiral logarítmica. Este procedimiento puede considerarse como similar al desarrollado en el Capítulo 4, en el que se seleccionaron las cuatro playas con las que se llevó a cabo la investigación.

En la zona norte del país, se analizaron costas de Chile, desde la Región de Arica y Parinacota (XV) hasta Región de Atacama (III), mientras que en la zona sur, se buscó entre la Región del Maule (VII) y Región de los Lagos (X). No se estudiaron zonas costeras en las regiones más australes, desde Canal de Chacao al sur, debido a que la costa cambia su configuración y las condiciones locales e hidrodinámicas son diferentes.

En base a las principales características de equilibrio de cada sector estudiado, se escogió en la zona norte, la *Bahía Mejillones* considerando su forma característica de parábola que

presenta la línea de costa y la condición de equilibrio morfodinámico que tiene.

En la zona sur se seleccionó la *Bahía San Vicente* ya que la línea litoral tiene forma de espiral logarítmica, esto es una característica particular debido a que se presenta en muy pocas playas y bahías en la zona sur de Chile.

7.1.1 BAHIA MEJILLONES

La Bahía de Mejillones (Lat. 23°00' S; Long. 70°27' W) se ubica en la II Región de Antofagasta, a 60 km al norte de la ciudad del mismo nombre. Esta zona costera se destaca por ser uno de los pocos lugares a lo largo de la costa de Chile con una entrada abierta al mar hacia el norte y protegida por la Península de Mejillones por el sur. Esta península tiene un largo aproximado de 12 kilómetros y posee una morfología particular en el territorio nacional como se observa en la Figura 87.

Debido a las características geográficas y a la morfología del sector, esta bahía no se encuentra bajo los efectos directos de las corrientes costeras que se mueven en sentido sur-norte, éstas sólo afectan en la zona norte, además que las condiciones locales permiten filtrar gran parte del oleaje reinante que viene de la dirección SSW. En relación a lo anterior, no existe una gran capacidad de transporte de material debido a la forma “semi-cerrada” y a la baja velocidad de las corrientes presentes (Escribano 1998, Ortlieb et al. 2000). Los sedimentos marinos acumulados en el fondo están conformados principalmente por restos biológicos y en proporción mucho menor por aportes del continente, arrastrados por el viento dominante del Sur (Navea & Miranda 1980, Vargas 1998). La granulometría presenta mayoritariamente sedimentos tipo limo, arena fina y arena muy fina (Valdés et al. 2001).



Figura 87: Ubicación y forma característica de Bahía Mejillones.
FUENTE: Bathymetry Data Viewer, NOAA.

Del punto de vista morfológico, la Bahía Mejillones tiene forma de una espiral con un largo aproximado de 20 kilómetros y un ancho de 15 kilómetros. En el extremo sur, la bahía se cierra en Punta Angamos, mientras que en el norte tiene su límite en roqueríos donde empieza Playa Chacaya.

En el sector costero y en zonas que rodean la bahía no se destacan rasgos del relieve que aportan sedimentos como desembocaduras de ríos o quebradas que lleguen directamente a la costa, siendo lo más importante la cantidad de sedimentos que pueden ser puestos en suspensión bajo la acción del viento que predomina desde el sur.

7.1.2 BAHIA SAN VICENTE

La Bahía San Vicente (Lat. 36°44' S; Long. 73°09' W) ubicada en la VIII Región del Biobío, a 3 kilómetros al sur de la ciudad de Talcahuano, forma parte de un sistema de cuatro bahías pertenecientes a la zona centro-sur de Chile. Se destaca principalmente por una gran actividad industrial, pesquera y siderúrgica que aporta al polo de desarrollo productivo de la región. Figura 88.

Las principales condiciones hidrodinámicas al interior de Bahía San Vicente demuestran que, mediante el estudio de Ahumada et al. (1989), las corrientes presentes no tienen grandes velocidades ya que no superan 10 [cm/s]. De acuerdo a Brito (1993) se destaca que el principal causante del movimiento de las aguas en el interior de la bahía es la interacción de la "corriente externa" con la topografía que fluye hacia el suroeste perpendicular a la boca de la bahía, la cual al "chocar" con la costa en el sector de punta Hualpén puede generar dinámicas importantes responsables de los principales regímenes de transporte de sedimentos en sentido transversal que existe en la bahía. Las condiciones de oleaje en el sector están influenciadas por Península Hualpén que ofrece protección a la bahía de olas que vienen desde el SW. El régimen de vientos no es menor, sin embargo, no se considera como agente responsable del transporte de sedimentos ya que no existe material susceptible a ser puesto en movimiento por su acción.

De acuerdo al estudio de Declaración de Impacto Ambiental para el muelle San Vicente, Pesquera Biobío, preparado por SIRIUS LTDA (2004), el análisis granulométrico de los sedimentos de la Bahía de San Vicente indica que en el sector central predominan sedimentos correspondientes a arenas muy gruesas a arenas muy finas.

Del punto de vista morfológico, la bahía San Vicente tiene forma de una espiral extendida en dirección SW-NE con un largo aproximado de 6 kilómetros y un ancho de 2 kilómetros.

En el extremo sur, la bahía se cierra en "Península Hualpén" mientras que en el norte, tiene su límite en las principales obras costeras que conforman el sector del Puerto San Vicente.

En el sector costero se destaca una zona en la que se presenta una de las desembocaduras del río Biobío, este sector del estuario coincide con la zona donde se ubica Caleta Lengua. Este elemento geográfico permite entregar cierto volumen de sedimentos al interior de la bahía. Sin embargo, otro factor relevante tiene relación con la influencia del "Cañón Submarino Bio-Bio", elemento del fondo marino que absorbe gran parte de sedimentos, tal y como se presenta en el estudio de "Morfología y Procesos

Dinámicos del Cañón Submarino del Bio-Bio”1997 (Referencia 40) que indica que la plataforma continental en esta zona se encuentra muy reducida con un talud continental de gran pendiente que permite la presencia de estos grandes cañones que vierten todo el sedimento directamente a la fosa oceánica. El estudio señala que los sedimentos muestreados en el cañón provienen directamente de la franja costera y en particular en esta zona, de las descargas del río Bio-Bio de donde los sedimentos presentes (principalmente arenas negras) se depositan progresivamente mediante transporte gravitacional (por peso).

El régimen anterior permite atribuir la importancia que ejerce el cañón submarino del Bio-Bio en las dinámicas presentes en la bahía, factor a no desconocer.



Figura 88: Ubicación y forma característica de Bahía San Vicente.
FUENTE: Bathymetry Data Viewer, NOAA.

7.2 CALCULO DE LA ECUACION EN BAHIA MEJILLONES

Se calculó la ecuación obtenida en el Capítulo 6 para la forma en planta de Bahía Mejillones, procedimiento que consideró utilizar un registro estadístico de oleaje de una medición in-situ de un periodo de un mes, información proporcionada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). Este describe las principales características del oleaje y en particular, la determinación de la dirección del flujo medio de energía en el polo de difracción del oleaje. En base a la referencia anterior, la dirección del flujo medio de energía del oleaje es 255° del cual se utilizó el intervalo 240° a 270° , es decir $\pm 15^\circ$, debido a la incertidumbre en la definición del oleaje con un mes de mediciones.

Para desarrollar este cálculo, se midieron los principales parámetros geométricos de la bahía que completan la ecuación de equilibrio. Estos se obtuvieron del procesamiento de

escalonar una imagen actual representativa de la bahía mediante el uso del software Autocad. Con esta herramienta se determinaron los elementos geométricos que se utilizan en la ecuación de equilibrio, entre ellos, el radio “Ro” el coeficiente “Y” y los ángulos “α min” y “β”, tal y como se muestra en la Figura 89. Para el proceso anterior se calcularon los radios y ángulos de la parábola de Hsu modificada mediante la ecuación propuesta para playas en equilibrio de la zona central.

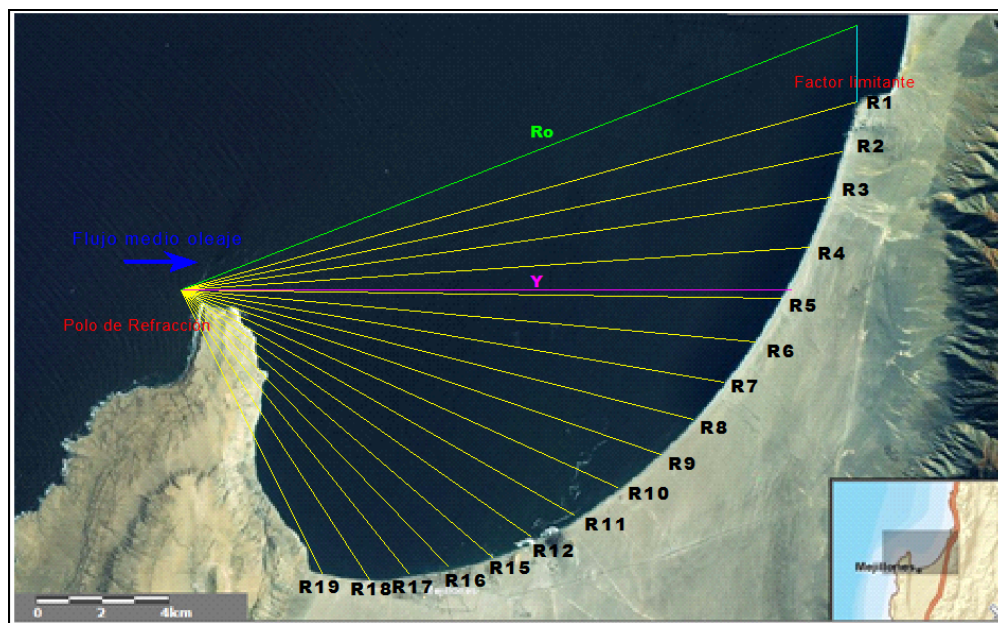


Figura 89: Determinación de constantes geométricas en Bahía Mejillones.
FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 89 se muestran también, los radios que forman gradualmente la parábola, así mismo se calcularon cada uno de los ángulos que forman estos radios con respecto a la dirección principal del flujo medio de energía del oleaje expresada en la imagen. La Tabla 21 presenta estos datos representativos de la bahía.

RADIOS	20.6	19.5	17.4	16.5	15.4	14.4	13.6	12.8	11.9	11	9.9	8.85
ANGULOS	178	183	188	193	198	203	208	213	218	223	228	233

Tabla 21: Principales mediciones geométricas de Bahía Mejillones.
FUENTE: Elaboración propia.

7.2.1 APLICACION DE LA ECUACION DE EQUILIBRIO

Como resultado del Capítulo 6 se obtuvo la ecuación 16 (página 107) que propone una alternativa a la ecuación de Hsu, para describir el equilibrio en planta para costas de las zonas del norte chico y central de Chile. Esta ecuación se aplicó a los datos medidos de las características locales de la bahía Mejillones, además de las condiciones hidrodinámicas presentes, tal y como se mencionó anteriormente, la dirección media del frente de energía asociada al oleaje.

Se obtuvieron los siguientes resultados mediante el uso de ésta ecuación, los que fueron expresados en la Figura 90 en donde se representa el borde costero que forma la línea litoral de bahía Mejillones y la línea costera que modela la nueva ecuación de equilibrio que se propuso para costas de las zonas del norte chico y central de Chile.

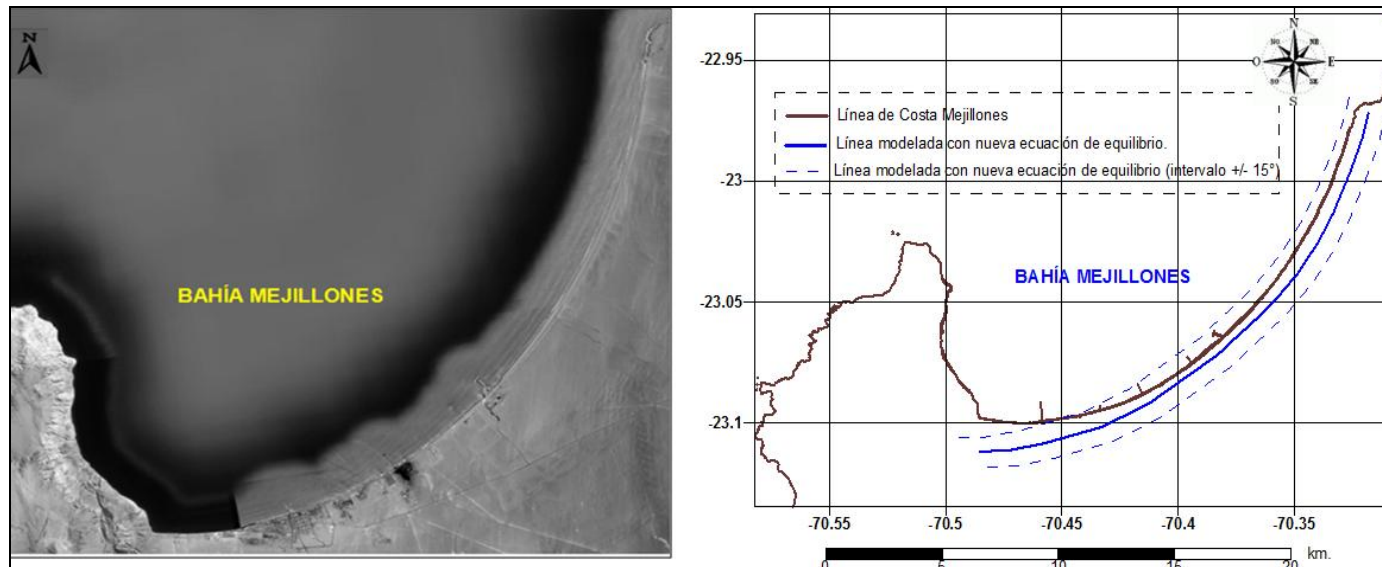


Figura 90: Representación del cálculo de la ecuación de equilibrio propuesta para la Bahía Mejillones.

FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 90 se observa que las formas de la línea litoral modelada por la nueva ecuación de equilibrio que se propuso en el Capítulo 6 y la línea de costa de la Bahía Mejillones se asemejan bastante presentándose diferencias en un solo sector. Al analizar los sectores de la bahía; en la zona sur, la línea teórica difiere un tanto con respecto a la línea real, mientras que en la zona central el acoplamiento mejora con respecto al sector anterior, y en la zona norte las diferencias son menores.

En cuanto a las variaciones mayores cuantitativamente se presentan éstas en el extremo sur de la bahía donde la diferencia mayor es de 0.95 kilómetros entre ambas líneas. En la zona norte la diferencia disminuye y es del orden de 0.20 kilómetros.

Para complementar los resultados, se tomó en cuenta el registro relativo a la dirección del flujo medio del oleaje en el intervalo de +/- 15° de lo cual se obtuvieron mejores resultados considerando una dirección de 270°, aunque lo observado con la dirección media de 255° resultó ser bastante bueno. Para una dirección de 215° la línea modelada no representa bien la línea de costa real de la bahía Mejillones.

En conclusión a lo anterior, teniendo en cuenta que las diferencias observadas son sólo un tanto mayor en el extremo sur de la bahía, y que en los otros sectores, es decir, más del 75% de la línea de costa, se observaron buenos resultados. Por lo tanto, se puede aplicar esta nueva ecuación de equilibrio propuesta como una alternativa a la parábola de Hsu en esta bahía. Los resultados evidencian que el uso de esta formulación en el sector de Mejillones puede mejorar los resultados en relación al cálculo de la forma en planta de la bahía mediante los métodos convencionales.

7.3 CALCULO DE LA ECUACION EN BAHIA SAN VICENTE

Se desarrolló el cálculo de la ecuación propuesta para la forma en planta de bahía San Vicente considerando un registro de mediciones de oleaje in-situ del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), esta información describe las principales características del oleaje y en particular, la determinación de la dirección del flujo medio de energía en el polo de refracción del oleaje, esto para un periodo de un mes de medición. En base a la referencia anterior y considerando que sólo un mes no es representativo de un registro completo de oleaje, se consideró un intervalo de +/- 15°, es decir, la dirección del flujo medio de energía del oleaje que se utilizó está en el rango 225° a 235°, debido a la incertidumbre en la definición del oleaje en este periodo de mediciones.

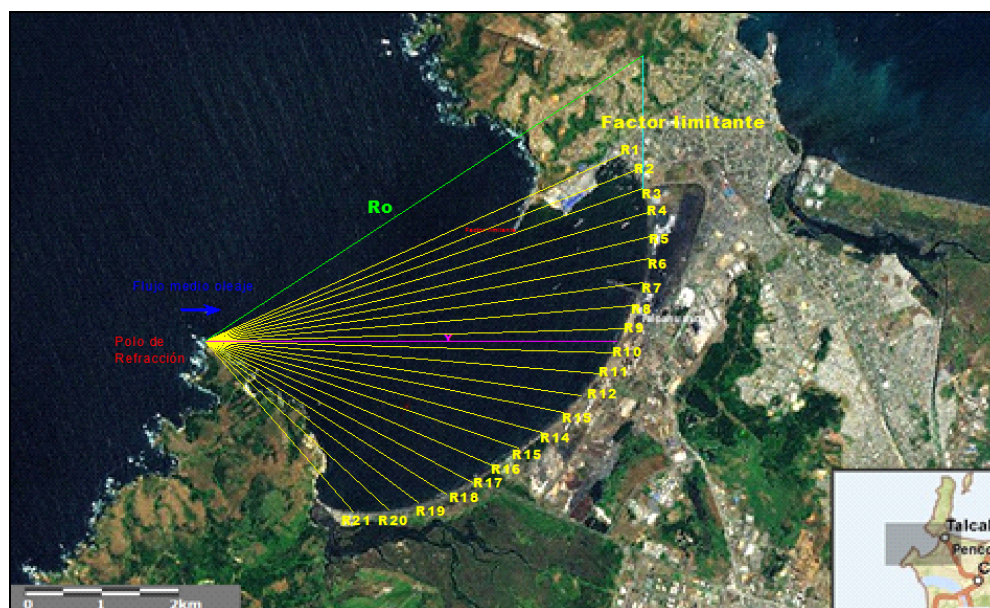


Figura 91: Determinación de constantes geométricas en Bahía San Vicente.
FUENTE: Elaboración propia.

Se evaluaron los radios y ángulos que determinan la parábola de la línea litoral en este sector. La tabla 22 representa estos elementos geométricos de la bahía.

Radios	5.75	5.81	5.79	5.7	5.53	5.34	5.05	4.73	4.47	4.18	3.77	3.53	3.35	3.03	2.54
Angulos	84	91	97	103	109	115	121	127	133	139	145	152	158	164	170

Tabla 22: Principales mediciones geométricas de Bahía San Vicente.
FUENTE: Elaboración propia.

7.3.1 APLICACION DE LA ECUACION DE EQUILIBRIO

Como resultado del Capítulo 6, se obtuvo la ecuación de equilibrio propuesta que describe la forma en planta para costas de las zonas del norte chico y central de Chile. Mediante esta ecuación se estudió el equilibrio en la bahía San Vicente a partir de los datos obtenidos de las características locales del lugar de estudio, además, de las condiciones hidrodinámicas presentes, siendo el flujo medio de energía del oleaje el dato más representativo para desarrollar esta aplicación.

En la Figura 92 se muestran los resultados obtenidos. Se describe la zona costera que forma la línea litoral de la bahía San Vicente y la línea costera modelada mediante la ecuación de equilibrio propuesta.

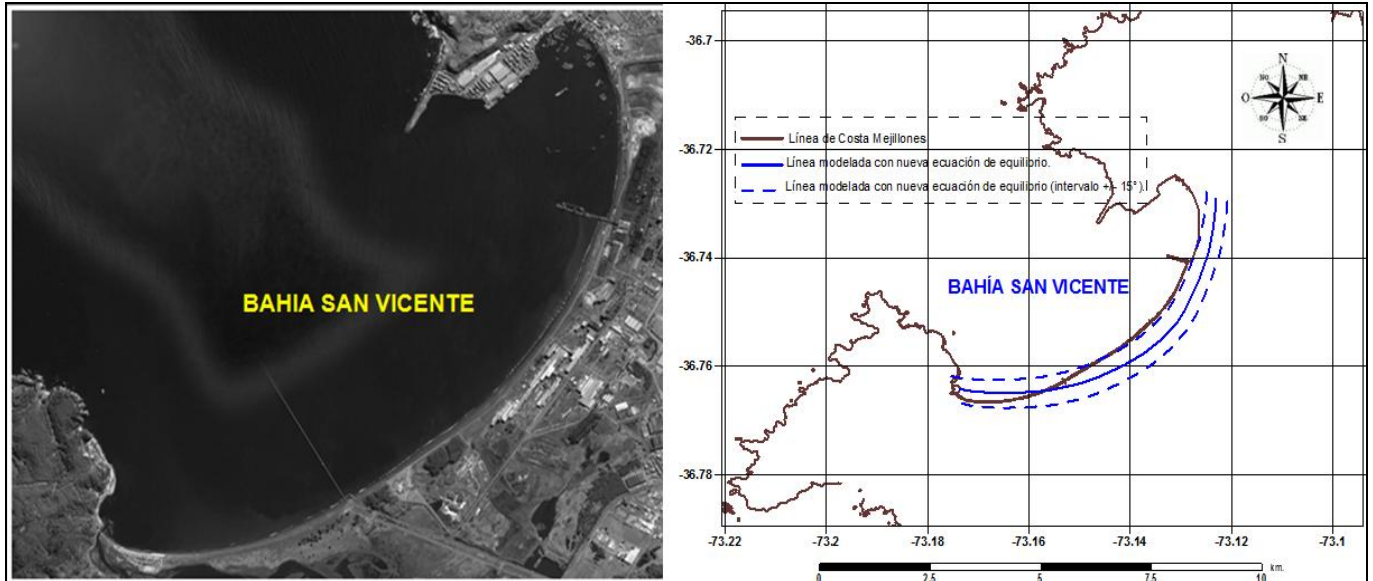


Figura 92: Representación del cálculo de la ecuación de equilibrio propuesta para la bahía San Vicente.
FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 92 se observa que el ajuste de la línea litoral modelada mediante la ecuación de equilibrio propuesta con respecto a la línea de costa de la bahía San Vicente presenta resultados diferentes. Se destacan sectores donde la línea teórica se ajusta bastante bien y en otros sectores las diferencias son un tanto mayores.

Analizando por sectores al interior de la bahía; en la zona norte la línea teórica presenta una separación significativa con respecto a la línea real, mientras que en la zona central el acoplamiento mejora, por último, en el sector sur ambas líneas se juntan más, siendo en esta zona de la bahía donde lo modelado representa mejores resultados en relación a la a la línea real.

En cuanto a las variaciones mayores cuantitativamente se presentan éstas en el extremo norte de la bahía, donde la variación es del orden de 0.29 kilómetros, mientras que en el extremo sur la diferencia es del orden de 80 metros.

Al utilizar un intervalo de dirección del flujo medio del oleaje de +/- 15° se obtuvieron mejores resultados considerando una dirección de 235°. Para una dirección de 215° la línea modelada no representa bien la línea de costa real de la bahía San Vicente.

En relación a estos resultados presentados para esta zona de estudio considerando que la forma general que tiene la línea litoral de la bahía San Vicente es bastante similar a la que se obtuvo mediante a la ecuación propuesta y las variaciones no son significativas, como lo obtenido con los resultados en el sector de bahía Mejillones, el ajuste puede considerarse como confiable.

7.4 APLICACION DE LA ECUACION EN PLAYA ARTIFICIAL

Considerando que, si bien la ecuación propuesta en esta memoria de título presentó buenos resultados cuando se aplicó en las zonas norte y sur del país para obtener una validación, se observaron algunas diferencias menores entre las líneas modeladas por ésta y las líneas reales de cada zona de estudio. Estas diferencias podrían deberse a que la ecuación propuesta en este estudio se realizó mediante el cálculo en playas y bahías de menores dimensiones como el caso de Quintero, mientras que la validación hasta ahora expuesta, se realizó en bahías de mayor tamaño como el caso de Mejillones, por lo que los parámetros geométricos son un tanto diferentes.

Para completar este proceso de validación, además, objeto de establecer esta formulación propuesta como una alternativa a la ecuación clásica en el diseño artificial de playas, se implementó la ecuación en la playa artificial Paraíso en Antofagasta, también conocida como El Carboncillo. Los resultados se presentan en la Figura 93.

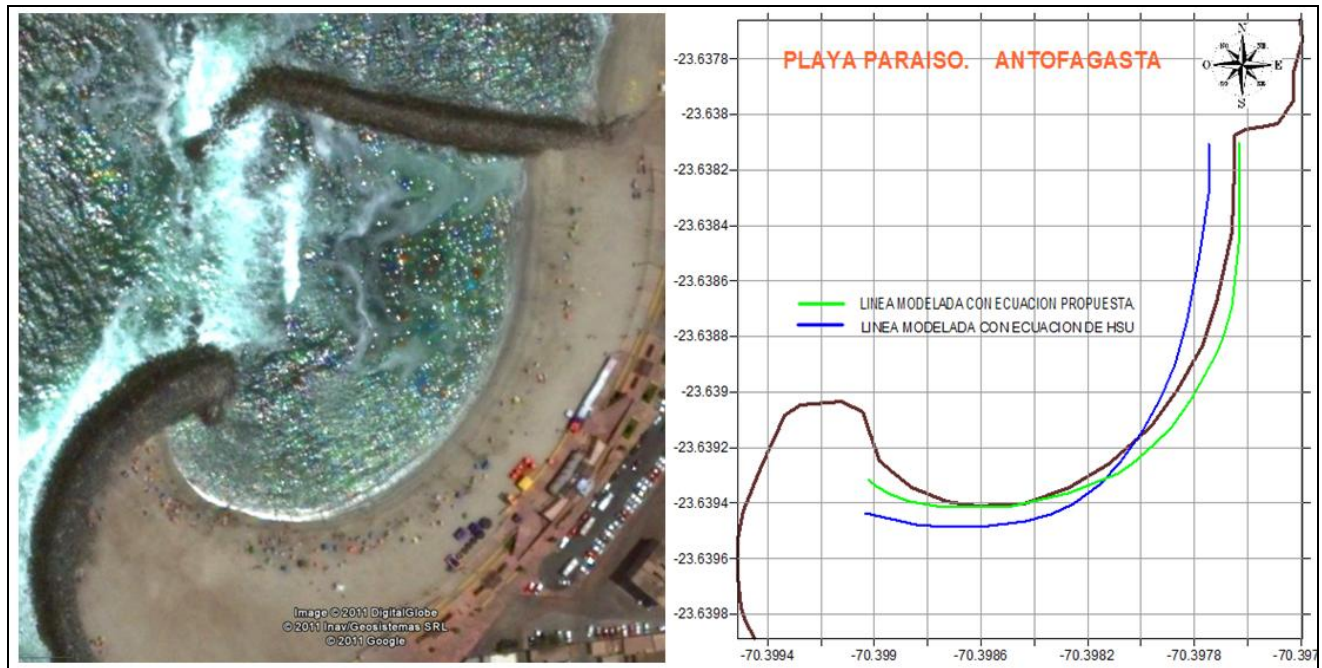


Figura 93: Representación de la validación de la ecuación de equilibrio propuesta para playa Paraíso.
 Ubicación: Lat.: 23°38'19" S; Lon.: 70°23'53" W
 FUENTE: Elaboración propia.

En la figura anterior se presenta la aplicación de la ecuación teórica para esta playa artificial de donde se observa que la línea obtenida mediante la nueva ecuación de equilibrio tiene un ajuste bastante bueno. Se observa un acople que se extiende por el contorno que forma la línea litoral. La línea modelada mediante el método de la parábola de Hsu modificada presenta buenos resultados aunque se separa en el extremo sur de la playa, exactamente en el sector que proyecta la sombra de la estructura de protección diseñada.

Para cuantificar el error asociado a la estimación de la línea litoral mediante la ecuación

propuesta, se utilizaron formulaciones clásicas con las que se calculó el error cuadrático medio utilizando la variable “radios de parábola”. Con esto se obtuvo una medida de error de 2.46 para la estimación mediante la ecuación propuesta y de 3.22 para el método de la parábola de Hsu. Se calculó el porcentaje de error medio absoluto para ambas metodologías del que se obtuvo un porcentaje de error de 3.17% para la ecuación propuesta y del 4.72% para el método de Hsu.

En el capítulo 10 se presentan las tablas resumen con los radios medidos y observados para la estimación del error en la playa artificial estudiada.

De acuerdo al análisis, se concluyó que es posible utilizar el método de la parábola de Hsu como una ecuación clásica, y la ecuación propuesta como una alternativa, para modelar la forma de la línea litoral que siguen las playas diseñadas artificialmente, aunque es necesario considerar que las dimensiones de éstas son menores a las playas utilizadas para la estimación de la ecuación. Si bien los resultados para este caso evidencian que la línea litoral se modela levemente mejor mediante la ecuación propuesta, con la metodología de la parábola de Hsu también se obtienen buenos resultados, por lo tanto, se debería evaluar mediante ambas formulaciones y definir el mejor resultado según sea el caso que se diseñe.

En conclusión, el uso de la ecuación propuesta puede ser una alternativa a las metodologías clásicas, considerando que en algunos sectores puede entregar mejores resultados en la estimación de la forma de una playa para el diseño artificial de ésta.

7.5 COMPARACION CON METODOLOGIAS ACTUALES

Para completar el estudio, se realizó una comparación entre la ecuación teórica propuesta y la formulación de equilibrio representada por el modelo parabólico de Hsu. La formulación del modelo parabólico de Hsu, tal y como se mostró en el Capítulo 2, se representa mediante la ecuación 18.

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2$$

Ecuación 18: Parábola de Hsu.

Además, se consideró la modificación expuesta por Gonzalez y Medina en 2001 quienes incluyeron la evaluación de las variables “α min” e “Y/L”.

Esta formulación convencional se utilizó para modelar la línea litoral de las bahías Mejillones y San Vicente, y realizar la comparación con la ecuación propuesta en este estudio.

7.5.1 COMPARACION CON METODOLOGIA CLASICA EN BAHIA MEJILLONES

Se consideraron los datos de oleaje y geometría del sector costero de la bahía Mejillones para estimar la línea litoral mediante metodología clásica de estudio por una parte, y mediante la utilización de la ecuación alternativa que se ha propuesto.

Los resultados se presentaron en forma gráfica en la Figura 94. Se destaca que el mejor ajuste se obtuvo con la ecuación de equilibrio propuesta considerando que ésta fue formulada a partir de condiciones y parámetros diferentes a la zona geográfica de bahía Mejillones, aunque las tres playas pertenecientes al norte chico, poseen condiciones locales similares. Sin embargo, los resultados se ajustan de mejor forma ya que la hidrodinámica presente en el sector y las características del oleaje (dirección principal del flujo medio de energía del oleaje) se mantienen de forma constante a lo largo de la costa de Chile, sólo varían cuando las condiciones locales son diferentes lo que ocurre en algunos casos particulares.

Al realizar el ajuste con el método de Hsu, si bien los resultados en cuanto a la forma de la línea modelada pueden tener un cierta tendencia a la línea real, se destaca que el desarrollo mediante este planteamiento puede diferir un tanto de la realidad para algunas playas o bahías de Chile.

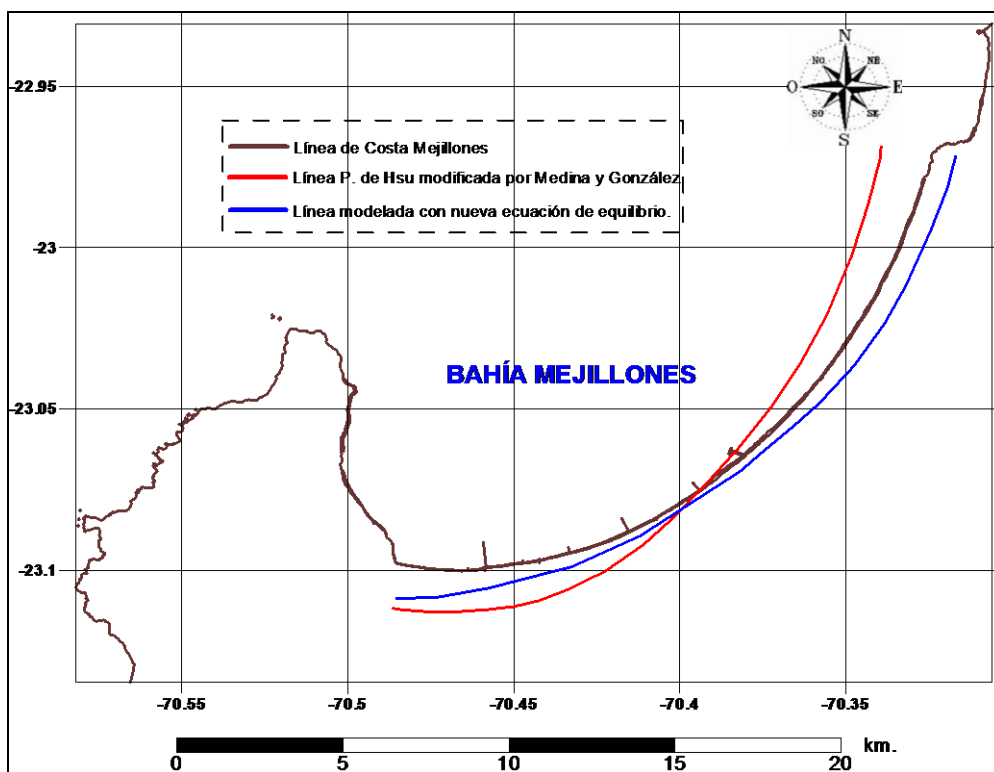


Figura 94: Comparación de la línea litoral para ecuación de equilibrio en planta para playas de las zonas del norte chico y central versus la metodología de la parábola de Hsu, en Bahía Mejillones. FUENTE: Elaboración propia.

7.5.2 COMPARACION CON METODOLOGIA CLASICA EN BAHIA SAN VICENTE

De acuerdo a los datos obtenidos a partir de la geometría de bahía San Vicente, además del flujo de energía del oleaje, se aplicó el modelo de Hsu para estimar la línea de litoral de de esta bahía. Se desarrolló el mismo procedimiento de cálculo mediante la formulación propuesta como alternativa y se realizó la comparación gráficamente. Ésta se describe en la Figura 95.

La comparación muestra que la ecuación teórica expresada por el modelo de la parábola de Hsu mantiene la forma de la bahía, observándose un buen ajuste de la línea litoral. No obstante, se aprecia que el ajuste que se obtuvo con ecuación propuesta mejora levemente la estimación anterior.

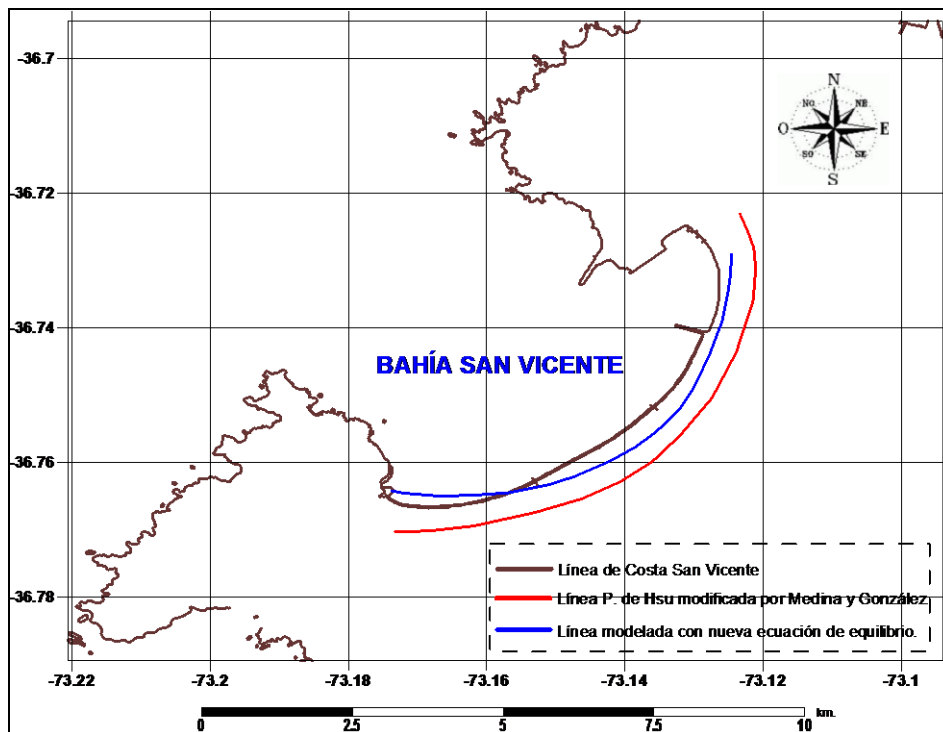


Figura 95: Comparación de la línea litoral para ecuación de equilibrio en planta para playas de las zonas norte y central versus la metodología de la parábola de Hsu, en Bahía San Vicente.
FUENTE: Elaboración propia.

7.6 RESULTADOS DEL ANALISIS A LA ECUACION PROPUESTA

Se presentó la línea de costa modelada como resultado de este nuevo planteamiento, con el objeto verificar la ecuación de equilibrio que se ha propuesto para playas en equilibrio pertenecientes a las zonas del norte chico y central de Chile. Para el análisis, se realizaron comparaciones que consideraron como punto de aplicación, las líneas de costa de bahía Mejillones en el norte y bahía San Vicente en el sur de Chile.

La comparación incluyó la línea modelada mediante la utilización de la formulación clásica ampliamente usada en estos estudios que corresponde a la “Parábola de Hsu” modificada por Medina y Gonzalez en 2001” válida para costas españolas y los resultados más importantes fueron los siguientes:

1. La ecuación de equilibrio propuesta caracteriza de buena forma la línea litoral en la zona norte de Chile. En este sector, la hidrodinámica y funcionamiento morfodinámico puede considerarse como similar a la del norte chico y central, sin embargo, la línea modelada expresa de buena forma a la línea observada. Si bien se observaron algunas diferencias, éstas son menores.

2. Para el sur del país se obtuvieron resultados que se asemejan a lo observado en Mejillones. En bahía San Vicente la ecuación de equilibrio propuesta representa bien la línea litoral en todos los sectores con diferencias menores no significativas.
3. Al considerar la metodología de la parábola de Hsu se observó que los resultados representan bien la forma que tienen las respectivas bahías, se presentaron algunas diferencias aunque no importantes. En particular, en Mejillones se observaron variaciones en los extremos de la bahía, mientras que en San Vicente la diferencia se mantuvo constante a lo largo del litoral costero.
4. Al aplicar la ecuación de equilibrio propuesta en una playa artificial previamente diseñada en Antofagasta, se obtuvieron buenos resultados. Se concluyó que éstos resultados fueron mejores que en las bahías debido a que esta formulación se obtuvo a partir de datos de playas de dimensiones menores, y no de grandes bahías, como es el caso de Mejillones. Además, se verificó el uso de esta ecuación de equilibrio como una alternativa válida a las formulaciones clásicas para el diseño de playas artificiales en Chile.
5. Los resultados indican que la ecuación de equilibrio planteada comparada con la formulación de la Parábola de Hsu son similares, por lo que es posible utilizar esta ecuación como alternativa considerando que se ha determinado con parámetros locales de playas chilenas. Esto permite establecer el uso de ésta ecuación en playas del país ya que los resultados en las zonas norte y sur lo demuestran. Sin embargo, es conveniente realizar una zonificación y obtener nuevos coeficientes y por lo tanto, nuevas ecuaciones por cada zona específica que se desee estudiar.

CAPITULO VIII

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha realizado un estudio y análisis de cuatro playas de las zonas del norte chico y central de Chile, del cual se determinó una ecuación de equilibrio alternativa que modela la forma en planta que alcanza la línea de costa y, una vez estudiada dicha formulación en otros sectores geográficos del país, en las zonas norte y sur, se puede afirmar que esta ecuación que describe la parábola de Hsu modificada para estas zonas, constituye una buena aproximación para complementar este tipo de estudio y en algunos casos puede representar un mejor ajuste a las formulaciones clásicas utilizadas hasta ahora.

En general, se destaca la aplicabilidad de esta ecuación ya que considera fenómenos particulares de la hidrodinámica y morfología de éstas costas, con las que se determinó el uso de esta ecuación de equilibrio modificada como una alternativa para las costas de las zonas del norte chico y central de Chile.

En sectores donde las ecuaciones clásicas no obtienen buenos resultados, esta ecuación propuesta puede ser utilizada como alternativa en el diseño de playas, ya que a partir de ésta, se puede modelar las nuevas formas que adoptarán las playas que sean diseñadas artificialmente.

En base al proceso de desarrollo, obtención y estudio de esta ecuación de equilibrio propuesta, se obtuvieron las siguientes conclusiones y recomendaciones particulares:

1. La morfología de las costas de las zonas del norte chico y central de Chile, tal como se discutió y presentó en el Capítulo 4 de este documento, se caracterizan por tener condiciones únicas que se distinguen de otras áreas geográficas del país.
2. Las condiciones hidrodinámicas y ambientales de las costas de las zonas del norte chico y central de Chile, en particular, el viento, oleaje y corrientes, son peculiares ya que se encuentran estrechamente relacionadas con las dinámicas asociadas al funcionamiento morfológico del sector, características atmosféricas, etc.
3. En las zonas del norte chico y central del país se destacan una serie de playas y bahías que poseen una morfología singular a las que se les puede atribuir un grado de equilibrio morfo-dinámico al largo plazo. Esto es, la zona en particular tiende a mantener las condiciones sedimentológicas estables en la escala de tiempo y espacio.
4. Se destacaron las playas La Serena, Guanaqueros y Tongoy en el norte chico, además de la bahía Quintero en la zona central, como los elementos geográficos representativos de la costa central que presentaron un equilibrio al largo plazo. Esto se comprobó mediante la recolección de fotos con las que se confeccionó un set fotográfico histórico en vista aérea de cada zona litoral. Con este set fotográfico se estudió la línea litoral.
5. Se determinó que las líneas de costa de las playas La Serena, Guanaqueros y Tongoy, además de la bahía Quintero no variaron de forma significativa en 30 años de estudio. Se verificó que la línea litoral de playa La Serena aumentó en 20 metros

durante este periodo, la línea litoral de playa Guanaqueros experimentó un retroceso de 26 metros, la línea costera de playa Tongoy se mantuvo en un aumento constante y acreción en consideración a la morfología particular que tiene esta playa cuya forma difiere de los otros lugares estudiados.

6. Se confeccionó un set fotográfico histórico de cada zona de estudio con el que se corroboró el estado de equilibrio de cada playa en particular. Se observaron variaciones no significativas de la línea litoral y se extrapolaron los resultados en un “Sistema de Geo-referencia” como es el caso de los formatos “KMZ” que se visualizan en la interfaz de Google Earth.
7. Se determinaron las principales características de oleaje en las playas La Serena, Guanaqueros y Tongoy, además de bahía Quintero. Las condiciones del oleaje en playa La Serena indicaron que la dirección predominante es del WNW mientras que la altura de ola significativa no supera el metro. En playa Guanaqueros se observó una dirección principal proveniente del W y una altura significativa que no superó el metro; mientras que en playa Tongoy la dirección predominante es del NNW lo que demostró la característica peculiar de la morfología en este sector. La altura de ola significativa no supera 0.5 [m], con lo que se verificó que gran parte de la energía del oleaje es filtrado en la zona de protección en el sector sur del balneario. En la bahía Quintero se observaron alturas significativas del orden de 0.6 [m] y con dirección proveniente del NW. Los periodos en aguas someras, para todos los sectores de estudio se mantuvieron constantes en el rango de 12 a 16 segundos.
8. Se determinó la zona donde se presentan los procesos sedimentarios de cada sector de estudio y en particular, se definieron las zonas donde ocurre el transporte de sedimentos en cada playa. Se calculó la altura H_{s12} en cada sector de estudio. Se determinó que el transporte de sedimento en playas La Serena y Tongoy está presente entre las profundidades de 1.5 y 6 [m], mientras que éste ocurre entre los 2.5 y 9 [m] de profundidad en playa Guanaqueros y en la bahía Quintero.
9. Se desarrolló una metodología de cálculo para estudiar el equilibrio en playas chilenas, con ésta se obtuvo una nueva ecuación de equilibrio propuesta como una alternativa para modelar la forma en planta que alcanzan las playas en equilibrio de las zonas de norte chico y central de Chile.
10. Se aplicó la ecuación de equilibrio propuesta en sectores con condiciones morfo-dinámicas diferentes obteniendo resultados similares a lo representado por el modelo parabólico de Hsu. En algunos sectores se obtuvieron algunas diferencias que fueron mejoradas al aplicar la ecuación propuesta.

En conclusión, la ecuación de equilibrio propuesta se constituye como una formulación alternativa y como herramienta de apoyo a las ecuaciones clásicas ya que puede mejorar los resultados en los estudios de las formas en playas de equilibrio y en el diseño artificial de playas, considerando el cálculo de una estructura marítima en un sector costero no intervenido que permita mejorar la operatividad de los balnearios.

En el estudio se establecieron supuestos y aproximaciones que permitieron completar el alcance de esta memoria de título de acuerdo a la planificación inicial. En base a esto y a los resultados obtenidos, se recomienda lo siguiente:

1. Realizar una zonificación por distintos sectores de Chile para determinar nuevas ecuaciones de equilibrio que sean alternativas a las ecuaciones convencionales en distintos sectores del país. En consecuencia, se propone analizar la mayor cantidad de playas y bahías en equilibrio ya que es importante considerar un mayor número de variables para obtener un buen resultado en la determinación de una nueva ecuación de equilibrio. En este punto se recomienda incluir más información que represente los diversos tipos de playas con los que se va a realizar el ajuste de datos en futuros trabajos.
2. Realizar clasificaciones de los tipos de playas en Chile para su uso en el cálculo y determinación de los coeficientes de ajuste en futuros trabajos.
3. Establecer un criterio cuantitativo para playas en equilibrio en general, y aplicarlo a Chile. A partir de este criterio determinar el estado de equilibrio de una playa para determinar y proponer una nueva de ecuación de equilibrio alternativa.
4. Implementar otro modelo hidrodinámico de propagación de oleaje que considere fenómenos no estudiados en este trabajo, como por ejemplo, en playa Tongoy donde la difracción del oleaje predomina, sin embargo, el modelo STWAVE no resuelve bien. Lo anterior es significativo ya que la técnica de implementación de modelos numéricos computacionales es fundamental en términos de costo y beneficio versus las mediciones de oleaje in situ.
5. Se recomienda utilizar esta metodología o una similar para realizar el cálculo del diseño artificial de playas en futuros trabajos, además, se establece la necesidad de cuantificar errores en el pronóstico de la ecuación de equilibrio y comparar con otras formulaciones existentes en la literatura científica.
6. Verificar el uso de la ecuación de equilibrio propuesta en otras playas artificiales ya que esta formulación se obtuvo a partir de parámetros representativos de playas de dimensiones mayores a las que comúnmente son las playas artificiales.
7. Se recomienda estudiar los procesos sedimentológicos que no están en el alcance de esta memoria de título ya que éstos intervienen en la forma que alcanza una playa. A modo de complemento de esta investigación, es importante analizar fenómenos como el transporte de sedimentos en playas, evoluciones morfodinámicas, variaciones al corto plazo, perfiles de equilibrio, etc. Lo anterior consiste en ejecutar campañas de muestreo, trabajo en laboratorio sedimentológico, estudios de corrientes generadas por incidencia del oleaje y la implementación de modelos numéricos que reproduzcan procesos sedimentarios.

CAPITULO IX

9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ref. 1 Ahumada, R., Rudolph, A. Madariaga, S. & Carrascon F., 1989. Descripción de las condiciones oceanográficas de Bahía San Vicente y antecedentes sobre efectos de la contaminación. En: Revista de Biología Pesquera 18: 37-52. Concepción.
- Ref. 2 Armono, H.D. and Hall, K.R., 2003. Wave transmission on Sumerged Breakwaters Made of Hollow Hemispherical Shape Artificial Reefs, 151-166. Intitute Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya Indonesia.
- Ref. 3 Birkemeier, W.A., 1985. Field data on seaward limit of profile change. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engieneering. En: ASCE, 111 (3) 598-102.
- Ref. 4 Bodge, K.R., 2006. Design Aspects of Groins and Jetties, 98-99. World Scientific Publishing Co., International Conf. on Coastal Engineering, San Diego.
- Ref. 5 Bodge, K.R., 2006. Groins, Headlands, and Cutting an Island in two in the Maldives, 101-123. World Scientific Publishing Co, International Conf. on Coastal Engineering, San Diego.
- Ref. 6 Brito, F. & Figueroa D., 1993. Estudio de la circulación de las aguas de la Bahía de San Vicente para la estimación del tiempo de residencia, 120 pp. En: Onceavo Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Editorial Aníbal Pinto, Concepción.
- Ref. 7 Bruun, P., 1954. Coast erosion and the development of beach profiles. Beach Erosion Board, Technical Memorandum, N° 44.
- Ref. 8 Castro C, Morales E., 2006. La Zona Costera; Medio Natural y Ordenación Integrada, 35-48. Instituto de Geografía Pontificia Universidad Católica, Santiago.
- Ref. 9 Castro C. & Brignardello L., 1997. Geomorfología aplicada a la ordenación territorial de la franja costera entre Concón y Quintay (32° 05's y 33° 15's). En: Revista de Geografía Norte Grande, 24:113-125. Instituto de Geografía Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago.
- Ref. 10 Coastal Engineering Research Center U.S., 1975. Coastal Engineering Manual, 4-1-26, 4-50-107. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Washington, DC.
- Ref. 11 Dean R. G., 1977. Equilibrium beach profiles. Ocean Engrg, Report No. 12. Dept of Civil Engrg, US Univ of Delaware Atlantic and Gulf coasts.

- Ref. 12 Dean R. G and Dalrumple R. A., 1991. Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*. Vol. 7. 53-84.
- Ref. 13 Del Canto S. Canto & Paskoff R., 1983. Características y evolución geomorfológica actual de algunas playas de Chile central, entre Valparaíso y San Antonio (V Región). En: *Revista de Geografía Norte Grande*, 10:31-45. Instituto de Geografía Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago.
- Ref. 14 Escribano R., 2000. Distribution of *Euphausia mucronata* at the upwelling area of Peninsula de Mejillones, Northern Chile: The influence of the oxygen minimum layer. En: *Scientia Marina* 64: 69-77.
- Ref. 15 Gonzalez D.M., 2005. Modelado numérico de la propagación del oleaje. Una herramienta para la ingeniería marítima y la predicción operativa, 33-39. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Ref. 16 González, E. M., 1995. Morfología de playas en equilibrio: planta y perfil. 270 pp. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, Santander.
- Ref. 17 Grupo de ingeniería Oceanográfica y de costas, 1998. Documento Temático Regeneración de Playas, pp 2-45 101-157. Universidad de Cantabria, Santander.
- Ref. 18 Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de costas, 2000, Documento de Referencia Vol. 2, pp. 1-21, 25-43, 147-159. Procesos Litorales, Universidad de Cantabria, Santander.
- Ref. 19 Hallermeier, R. J., 1978. Uses for a calculated limit depth to beach erosion *Proceedings*, 1493-1512. 16th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, Hamburg.
- Ref. 20 Hallermeier, R. J., 1981. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate, 253-277. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, VA 22060 U.S.A.
- Ref. 21 Harry, F.L., 2003. A new wave Transmission Coefficient Model for Submerged Breakwaters, 77-81. U.S. Army Corps Engineer, Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, VA 22060 U.S.A.
- Ref. 22 Houston, J.R., 1995. Beach-fill volume required to produce specified dry beach width. 11-32. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Ref. 23 Hsu, J. R. C. and C. Evans., 1989. Parabolic Bay Shapes and Applications, Vol. 87 (Part 2), 556-570. *Proc.*, Institution of Civil Engineers, London.
- Ref. 24 Komar, D.P., 1997. Beach Processes and Sedimentation, 44-187. College of Oceanic & Atmospheric Sciences, Oregon.

- Ref. 25 Komar, P. D. & McDougal, W. G., 1994. The analysis of exponential beach profiles, 10-1, 59-69. En: Journal of Coastal Research.
- Ref. 26 Kraus, N.C., 2003. Shoreline Response to Breakwaters with Time-Dependent Wave Transmission, 101-121. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS.
- Ref. 27 Kraus, N.C., 2002. Wave Transmission at Detached Breakwaters for Shoreline Response Modeling. 88-91. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS.
- Ref. 28 Larson, M., & Kraus, N.C., 1994. Temporal and spatial scales of beach profile change, 117, 75-94. Marine Geology. Duck, North Carolina.
- Ref. 29 Martínez, E., Jaque, M., Quezada, L. Flores, J. Quezada A. Fernández., 2009. Aplicaciones de modelos de ajuste para el análisis de los cambios históricos de la línea litoral en grandes bahías. Ejemplos en Chile. En: Metodologías en Teledetección aplicada a la prevención de amenazas naturales en el litoral. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 159-163.
- Ref. 30 Massel, S.R., 1996. Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction, Advanced Series on Ocean Engineering. En: World Scientific, 11, 491 pp. Singapore.
- Ref. 31 Medina, J.M., 1998. Hidrodinámica del Perfil de Playa, 22-30. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- Ref. 32 Medina, R., 2001. Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de Equilibrio, 95-117. Universidad de Cantabria, 2001.
- Ref. 33 Medina, R., Bernabeu, A. M., Vidal, C. & González, E. M., 2000. Relationships between beach morphodynamics and equilibrium profiles, 2589-2601. En: Proc. 27th Int. Coastal Engineering Conf., A.S.C.E., Sydney.
- Ref. 34 Navea E. & Miranda O., 1980. Ciclo anual de las condiciones oceanográficas en Mejillones del Sur. En: Revista de Biología Marina (Chile) 17: 97-133.
- Ref. 35 Nicolau F.J., 2004. Evaluación de Metodologías de Transferencia de Oleaje desde Aguas Profundas hacia Aguas Someras, 3-19. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile, Santiago.
- Ref. 36 Novoa Jerez, J.E., 1991. Cambios recientes en la línea litoral área intercomunal La Serena-Coquimbo IV Región. Chile semiarido análisis comparativo 1954-1978. En: Revista Geográfica de Chile Terra Australis N° 35 PP. 35-45. Instituto de Geográfico Militar, Santiago.

- Ref. 37 OCIDI (2002), The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, Daikousha PrintingCo., Ltd., Tokyo.
- Ref. 38 Ortlieb L, R Escribano, R Follegati, O Zúñiga, I Kong, L Rodríguez, J Valdés, N Guzmán & P Iratchet. 2000. Recording of ocean-climate changes during the last 2,000-years in a hypoxic marine environment off northern Chile (23° S). *Revista Chilena de Historia Natural* 73: 221-242.
- Ref. 39 Pilarczyk, K W., 2003 Design of low-crested (sumerged) Structures – an Overview, Delft Hydraulics, Netherlands.
- Ref. 40 Pineda M, & Pincheira N., 1997. Morfología y procesos dinámicos del cañón submarino del Biobío Chile (36°49's). 385-389. En: VIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta.
- Ref. 41 SIRIUS LTDA., 2004. Declaración de impacto ambiental muelle San Vicente, pesquera Biobío Bahía de San Vicente, Talcahuano VIII Región del Biobío pp 84-92. Estudio preparado para Pesquera BioBio. Talcahuano.
- Ref. 42 Smith, J. M., and Ebersole, B. A. (2000). "Modeling and analysis of short waves," Technical Report ERDC-00-6, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Ref. 43 United States Army. Corps of Engineers & Coastal Engineering Research Center, 1984. Shore Protection Manual, 1-1-26, 2-31-59. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Ref. 44 Valdés J & Ortlieb L., 2001. Paleoxigenación subsuperficial de la columna de agua en la bahía Mejillones del Sur (23o S): indicadores geoquímicos en testigos de sedimento marino. *Investigaciones Marinas (Chile)* 29: 25-35.
- Ref. 45 Vellinga, P., 1983. Predictive computational model for beach and dune erosion during storm surges. ASCE, pp. 806-819. En: Proceedings of the Specialty Conf. of Coastal tructures'83, Arlington, Virginia.
- Ref. 46 Vergara C. H, Valenzuela A. E., 1981. Sedimentación reciente en playas de Valparaíso, V Región, Chile. *Revista de Biología Marina*, 17 (2): 267-283. Instituto de Oceanología. Universidad de Chile.

CAPITULO X

10 ANEXOS

10.1 ECUACIONES DE GOBIERNO DE STWAVE

Las ecuaciones de gobierno del modelo STWAVE consideran los parámetros de la ola que se denotan con la letra r, estos son relativos a la corriente, y los parámetros que se denotan con la letra a, son valores absolutos. La ecuación de dispersión que domina el modelo es la siguiente:

$$\omega_r^2 = gk \cdot \tanh(kd)$$

Ecuación 19: Ecuación de dispersión en STWAVE.

Donde:

- g : Aceleración de gravedad.
- k : Número de ola.
- d : Profundidad.
- ω : Frecuencia Angular.

La ecuación de dispersión en un sistema de referencia absoluto es:

$$\omega_a = \omega_r + kU \cdot \cos(\delta - \alpha)$$

Ecuación 20: Ecuación de dispersión en un sistema de referencia.

Donde:

- U : Velocidad de la corriente.
- δ : Dirección de la corriente con respecto al eje de referencia.
- α : Dirección de la ola.

Las soluciones para la refracción y shoaling del oleaje también requieren de la celeridad de la ola (C) y del grupo de olas (Cg), luego:

$$C_r = \frac{\omega_r}{k}, \quad C_{gr} = 0.5 \cdot C_r \left(1 + \frac{2kd}{\operatorname{senh}(2kd)} \right)$$

Ecuación 21: Celeridad de onda.

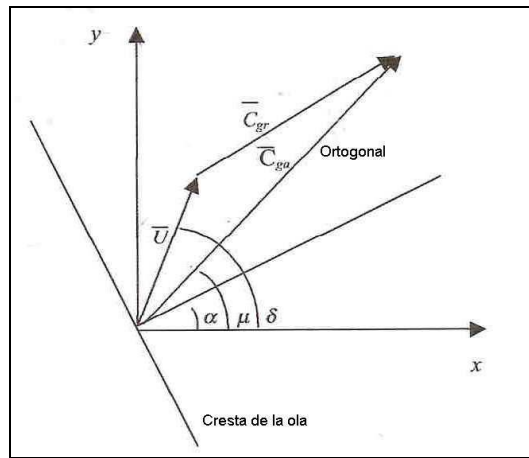


Figura 96: Vectores de corriente y olas.
Fuente: Manual de Stwawe.

La dirección del grupo de olas y de la ola es α , que es la dirección perpendicular a la ola. En un sistema de referencia absoluto:

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i \quad C_a = C_r + U \cdot \cos(\delta - \alpha)$$

Ecuación 22: Dirección de onda y grupo en un sistema de referencia.

El subíndice i denota el tensor de las componentes direccionales x e y . La celeridad absoluta del grupo define la dirección del ortogonal de la ola,

$$u = \tan^{-1} \left(\frac{C_{gr} \cdot \text{sen}(\alpha) + U \cdot \text{sen}(\delta)}{C_{gr} \cdot \text{cos}(\alpha) + U \cdot \text{cos}(\delta)} \right)$$

Ecuación 23: Ecuación de dirección ortogonal de ola.

Cabe destacar que sin corrientes se tendría $u = \alpha$.

La ecuación gobernante para la conservación espectral de energía en régimen permanente a lo largo de un ortogonal es,

$$(C_{ga})_i \frac{d}{dx_i} \frac{C_g C_{ga} \cdot \cos(u - \alpha) \cdot E(\omega_a, \alpha)}{\omega_r} = \sum \frac{S}{\omega_r}$$

Ecuación 24: conservación espectral de energía.

Donde:

E : Densidad de la energía de ola dividida por $(\rho_w g)$, donde w representa la densidad del agua, y α : Fuente de energía.

Refracción y Shoaling: Se implementa aplicando la conservación de energía hacia atrás a lo largo del ortogonal de energía. Solamente se incluyen olas propagándose hacia la costa. Se va resolviendo la grilla, celda por celda, hacia atrás con las ecuaciones presentadas

anteriormente.

Difracción: La difracción se incluye en una manera de simplificada, suavizando a lo largo de una columna, la energía de la ola:

$$E_j(\omega_a, \alpha) = 0.55E_j(\omega_a, \alpha) + 0.22(E_{j+1}(\omega_a, \alpha) + E_{j-1}(\omega_a, \alpha))$$

Ecuación 25: Energía de la ola debido a difracción.

El subíndice j denota la fila de la grilla (a lo largo de la costa).

Rompimiento de ola: La relación de rompimiento de oleaje en la forma del criterio de Miche (1951), es simple y precisa,

$$H_{m0_{max}} = 0.1L \cdot \tanh(kd)$$

Ecuación 26: Relación de rompimiento del oleaje de acuerdo al criterio de Miche (1951).

Donde:

H_{m0} : Máxima altura rompiente de la ola y L: Largo de ola.

Generación de oleaje por medio de viento: Las olas crecen por la transferencia de momentum desde el campo del viento al campo de las olas. El flujo de energía hacia la ola en STWAVE es (Resio, 1988),

$$F_{in} = \lambda \frac{\rho_a}{\rho_w} 0.85 C_m \frac{u_*^2}{g}$$

Ecuación 27: Flujo de energía que contribuye al oleaje debido al viento.

Donde:

λ : Coeficiente que representa el porcentaje de transferencia de momentum de agua que va desde la atmosfera a la ola.

ρ_a : Densidad del aire.

C_m : Celeridad media de la ola.

u_* : Velocidad friccional.

La energía ganada por el espectro es calculada multiplicando el flujo de energía, por un tiempo equivalente al que se demora la ola en atravesar una celda.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\beta C_g \cdot \cos(\alpha_m)}$$

Ecuación 28: Tiempo de paso de una ola por una celda de grilla.

Donde:

Δt : Tiempo equivalente de viaje.

- x : Espaciado de la grilla.
- β : Factor igual a 0.9 para vientos.
- Cg : Celeridad promedio del espectro del grupo de olas.
- α_m : Dirección media, relativa a la grilla.

Solamente vientos que soplan en dirección a la costa son tomados en cuenta.

Interacción ola-ola: La energía se transfiere desde la frecuencia peak hacia frecuencias menores (decreciendo la frecuencia peak o aumentando el periodo peak) y hacia frecuencias mayores (donde se disipa). En STWAVE, la frecuencia del peak espectral puede crecer con el fetch. La ecuación para este cambio de fp es:

$$(f_p)_{i+1} = \left((f_p)_i^{7/3} - \frac{9}{5} \zeta \left(\frac{u_*}{g} \right)^{4/3} \Delta t \right)^{-3/7}$$

Ecuación 29: Representación del cambio de frecuencia espectral.

Donde i denota el número de la columna de la grilla, y ζ es una constante a-dimensional. La energía ganada por el espectro es distribuida en frecuencias menores que la peak.

Tensores de radiación lineal: Los gradientes de radiación se calculan en STWAVE para sumar corrientes hacia áreas cercanas a la costa y que el nivel de agua cambie. Las corrientes generadas por las olas son la fuerza dominante del transporte de sedimento.

Los tensores de radiación basados en la teoría lineal del oleaje son:

$$S_{xx} = \rho_{\omega} g \iint E(f, \alpha) \left(0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) (\cos^2(\alpha) + 1) - 0.5 \right) df d\alpha$$

Ecuación 30: Tensores de radiación 1 de acuerdo a TLO.

$$S_{xx} = \rho_{\omega} g \iint \frac{E(f, \alpha)}{2} \left(0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \sin(2\alpha) \right) df d\alpha$$

Ecuación 31: Tensores de radiación 2 de acuerdo a TLO.

$$S_{xx} = \rho_{\omega} g \iint E(f, \alpha) \left(0.5 \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) (\sin^2(\alpha) + 1) - 0.5 \right) df d\alpha$$

Ecuación 32: Tensores de radiación 3 de acuerdo a TLO.

Los gradientes de los tensores son calculados:

$$\tau_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad \tau_y = -\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}$$

Ecuación 33: Gradientes de tensores en x e y.

10.2 TABLA CON PARAMETROS GEOMETRICOS PARA CADA PLAYA

Playa La Serena		Playa Guanaqueros		Playa Tongoy		Bahía Quintero	
Radio	Ángulo	Radio	Ángulo	Radio	Ángulo	Radio	Ángulo
13.23	144	9.67	107	12.73	157	4.97	86
12.42	149	9.27	112	12.97	162	5.26	91
11.16	154	8.86	117	12.84	167	5.21	97
10.17	159	8.44	121	12.23	173	5.05	102
9.48	164	8.11	127	11.77	177	4.93	107
8.91	169	7.69	132	11.19	182	4.79	112
8.06	174	7.41	137	10.52	187	4.61	118
7.64	179	7.12	142	9.98	192	4.48	122
7.28	184	6.84	146	9.38	198	4.27	127
6.91	189	6.5	152	8.85	202	4.1	132
6.62	194	6.24	157	8.44	207	3.93	137
6.32	199	5.99	162	7.98	213	3.77	141
6.05	204	5.75	167	7.57	217	3.58	147
5.79	209	5.53	172	7.04	222	3.34	151
5.5	214	5.33	177	Ro	Y	3.19	156
5.26	219	5.1	182	26.4	13.02	2.99	162
5.02	224	4.88	187			2.77	167
4.81	229	4.65	192			2.53	172
4.61	234	4.42	197			Ro	Y
4.41	239	4.21	202			6.05	4.44
4.2	244	4.05	207				
4.03	249	3.83	212				
3.85	254	Ro	Y				
3.7	259	14.4	6.38				
3.5	264						
3.36	269						
3.19	274						
3.02	279						
2.9	284						
Ro	Y						
16.62	5.26						

Tabla 23: Parámetros Geométricos en zonas de estudio
FUENTE: Elaboración propia.

10.3 PARAMETROS GEOMETRICOS DE PLAYA ARTIFICIAL EL ENCANTO, ANTOFAGASTA

Estimación mediante Ec de equilibrio propuesta					Estimación mediante el metodo de la parábola de Hsu				
N° de radio	R medido	R estimado	(Re-Rm)2	(Re-Rm) / Ri	N° de radio	R medido	R medido	(Re-Rm)2	(Re-Rm) / Ri
1	134.2	135.2	1.00	0.007	1	134.2	131.2	9.00	0.069
2	132.4	132.9	0.25	0.002	2	132.4	130.1	5.29	0.041
3	131.8	132.5	0.49	0.004	3	131.8	131.55	0.06	0.000
4	128.2	129.9	2.89	0.022	4	128.2	129.3	1.21	0.009
5	124.3	125.7	1.96	0.016	5	124.3	125.5	1.44	0.011
6	119.6	121.1	2.25	0.019	6	119.6	121.35	3.06	0.025
7	116.2	118.7	6.25	0.053	7	116.2	118.5	5.29	0.045
8	110.8	113.5	7.29	0.064	8	110.8	113.3	6.25	0.055
9	107.2	110.1	8.41	0.076	9	107.2	109.9	7.29	0.066
10	101.1	103.2	4.41	0.043	10	101.1	101.9	0.64	0.006
11	97.5	98.9	1.96	0.020	11	97.5	97.9	0.16	0.002
12	91.9	92.8	0.81	0.009	12	91.9	92.2	0.09	0.001
13	87.8	88.5	0.49	0.006	13	87.8	88.1	0.09	0.001
14	78.7	79.3	0.36	0.005	14	78.7	79.5	0.64	0.008
15	71.3	71.9	0.36	0.005	15	71.3	71.97	0.45	0.006
16	62.5	62.8	0.09	0.001	16	62.5	63.6	1.21	0.019
17	54	54.4	0.16	0.003	17	54	55.2	1.44	0.026
18	46.2	46.5	0.09	0.002	18	46.2	48.7	6.25	0.128
19	36.8	38.9	4.41	0.113	19	36.8	38.9	4.41	0.113
20	29.6	31.9	5.29	0.166	20	29.6	32.8	10.24	0.312
Suma			49.22	0.63	Suma			64.51	0.95

Tabla 24: Estimación en playa artificial El Encanto, Antofagasta.
FUENTE: Elaboración propia.