



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

“Determinación del efecto que tiene la existencia (o no  
existencia) de la barra litoral del río Aconcagua”



**Pia Monreal Donoso**

Diciembre 2014.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no existencia) de la barra litoral del río Aconcagua

**Determinación del efecto que tiene la existencia (o no existencia) de la flecha litoral del río  
Aconcagua**

Pia Monreal Donoso

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

Matías Quezada Labra

7,0



Profesor guía

Hernán Vergara Cortés

7,0



Docente

Mauricio Molina Pereira



Docente

## 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.

*Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento  
a quienes me apoyaron durante todo este proceso.*

*En especial a mi familia: mis padres Carlos y Sonia, mis hermanos Elizabeth y Carlos y mis maravillosos sobrinos Grace, Rodrigo, Macarena, Carlitos, EvaLuna, Mathilda y Máximo. A quienes espero este logro los haga sentir orgullosos de mí.*

*Además a mis grandes amigos quienes siempre están cuando se les necesita y cuando no también; Cindy, Maritza, Celeste, Felipe, Maca, Cote, Mauro, Carlita, Chufly y Pancho.*

*A Matías que no solo ha sido un gran profesor guía también ha sido un muy buen amigo en quien encontré apoyo y conocimientos que me ayudaron a lograr mis objetivos.*

*Así también me gustaría agradecer al Profesor Hernán Vergara quien no solo me facilitó información y datos de la zona, si no que estuvo atento a cualquier duda que tuviera para ayudar y aportar.*

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no existencia) de la barra litoral del río Aconcagua

*Dedicado a Elmira de las Mercedes Núñez Donoso*

*Quien nunca dudó.*

## ÍNDICE

1	Introducción .....	1
2	Objetivos del estudio .....	2
2.1	Motivación.....	2
2.2	Objetivo general.....	3
2.3	Objetivos específicos .....	3
3	Marco teórico .....	4
3.1	Definición y clasificación de estuarios .....	4
3.1.1	Definición .....	5
3.1.2	Clasificación.....	6
3.2	Geomorfología de estuarios .....	16
3.2.1	Formación de estuarios.....	16
3.2.2	Factores que influyen en la evolución de los estuarios.....	17
3.2.3	Sedimentación .....	17
3.3	Hidrodinámica de estuarios.....	17
3.4	Oleaje .....	20
3.4.1	Características principales. ....	21
3.4.2	Clasificación.....	22
3.4.3	Propagación de oleaje. ....	25
3.5	Transporte de sedimento .....	26
3.5.1	Transporte de sedimentos en la costa.....	28
3.5.2	Transporte de sedimento en ríos.....	30
3.5.3	Transporte de sedimentos en estuarios. ....	31

3.6	Barra litoral.....	32
<b>4</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>39</b>
4.1	Caracterización de la zona de estudio.....	39
4.1.1	Descripción del caudal del Río Aconcagua .....	41
4.1.2	Descripción del Oleaje .....	42
4.1.3	Caracterización de las Mareas .....	46
4.1.4	Caracterización de los Sedimentos superficiales .....	48
4.1.5	Caracterización del Viento. ....	53
4.1.6	Caracterización de Corrientes.....	55
4.2	Análisis histórico de la línea de costa.....	56
4.2.1	Cambio histórico .....	58
4.2.2	Análisis estacional.....	58
4.3	Simulación numérica - Modelo FESWMS.....	59
4.3.1	Generalidades del modelo FESWMS.....	59
4.3.2	Calibración del modelo .....	61
4.3.3	Escenarios simulados .....	63
<b>5</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>68</b>
5.1	Caracterización de la zona de estudio.....	68
5.1.1	Descripción de la cuenca del río Aconcagua.....	68
5.1.2	Descripción del caudal del río Aconcagua.....	70
5.1.3	Descripción del estuario del río Aconcagua.....	73
5.1.4	Caracterización del Oleaje .....	75
5.1.5	Caracterización de las mareas.....	80
5.1.6	Caracterización de Sedimentos.....	83
5.1.7	Caracterización de Corrientes .....	95



5.1.8	Caracterización del Viento .....	100
5.2	Análisis histórico de la línea de costa.....	104
5.2.1	Cambio histórico .....	104
5.2.2	Análisis estacional.....	122
5.3	Modelación numérica.....	131
5.3.1	Calibración del modelo.....	131
5.3.2	Escenarios simulados .....	132
<b>6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>150</b>
6.1	Caracterización de la zona de estudio.....	150
6.2	Análisis de la evolución de la línea de costa. ....	153
6.3	Simulación numérica. Modelo feswms. ....	154
6.3.1	Caracterización hidrodinámica del estuario.....	154
6.3.2	Transporte de sedimento con barra litoral. ....	154
6.4	Conclusiones Generales .....	155
6.5	recomendaciones.....	157
<b>7</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>160</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1-1: Rangos de marea .....	12
Tabla 3.2-1: Factores de influyen en la formación de estuarios.....	16
Tabla 3.4-1: Clasificación de las ondas según su periodo .....	24
Tabla 4.1-1: Datos de terrenos disponibles o generados para la caracterización de la zona de estudio. ....	40
Tabla 4.1-2: Coordenadas estación Puente Colmo. Sistema coordenadas Geográfico y UTM (WGS84) HUSO 19.....	41
Tabla 4.1-3: Casos simulados para todas grillas numéricas empleadas.....	44
Tabla 4.1-4: Grillas de propagación.....	44
Tabla 4.1-5: Fechas campañas II, III, IV. Sedimentos .....	51
Tabla 4.1-6: Ubicación de las muestras, campañas II, III, IV. Sedimentos.....	52
Tabla 4.1-7: Datos campaña de muestreo corrientes.....	55
Tabla 4.1-8: Coordenadas de las muestras campañas I; II, III. Corrientes.....	55
Tabla 4.2-1: Set de fotografías aéreas. ....	58
Tabla 4.3-1: Rangos de validez de las ecuaciones de transporte de sedimentos utilizadas en el modelo FESWMS.....	60
Tabla 4.3-2: Valores mínimo, promedio y máximo de caudales en [m <sup>3</sup> /s].....	63
Tabla 4.3-3: Casos simulados para el transporte de sedimentos.....	65
Tabla 4.3-4: Datos de configuración modelo FESWMS.....	66
Tabla 5.1-1: Uso del suelo de la cuenca del río Aconcagua. ....	70
Tabla 5.1-2: Valores estadísticos del caudal de las aguas del Río Aconcagua. Estación Puente Colmo. ....	71
Tabla 5.1-3: Valores estadísticos del caudal mensual de las aguas del río Aconcagua. Estación Puente Colmo.....	72
Tabla 5.1-4: Valores estadísticos estacionales del caudal de las aguas del Río Aconcagua. Estación Puente Colmo.....	73
Tabla 5.1-5: Características estuario río Aconcagua. ....	75
Tabla 5.1-6: Tabla de Incidencia de oleaje $T_p$ $\forall$ s DPK.....	77
Tabla 5.1-7: Tabla de Incidencia de oleaje $H_{mo}$ $\forall$ s DPK.....	78
Tabla 5.1-8: Tabla de Incidencia de oleaje $H_{mo}$ $\forall$ s $T_p$ .....	79
Tabla 5.1-9: Planos mareales respecto del cero instrumental. ....	82

Tabla 5.1-10: Parámetros estadísticos. Campaña I, Ante – Playa.....	87
Tabla 5.1-11: Parámetros estadísticos. Campaña I, Zona de rompiente .....	88
Tabla 5.1-12: Parámetros estadísticos. Campaña II.....	91
Tabla 5.1-13: Parámetros estadísticos. Campaña III.....	93
Tabla 5.1-14: Parámetros estadísticos. Campaña 4.....	95
Tabla 5.1-15: Datos correntómetro campaña I. 8 de Septiembre 2002.....	96
Tabla 5.1-16: Datos correntómetro campaña I, 11 de Septiembre2002.....	97
Tabla 5.1-17: Datos correntómetro campaña II. 17 de Julio, 2003.....	98
Tabla 5.1-18: Datos correntómetro campaña 18 de Abril. 2004.....	99
Tabla 5.1-19: Tabla de incidencia de vientos.....	100
Tabla 5.1-20: Magnitudes promedio y máximas globales y por dirección de procedencia de los vientos.....	103
Tabla 5.2-1: Fotografías aéreas. Análisis verano .....	123
Tabla 5.2-2: Fotografías aéreas. Análisis otoño. ....	126
Tabla 5.2-3: Fotografías aéreas. Análisis invierno.....	127
Tabla 5.2-4: Fotografías aéreas. Análisis primavera.....	129

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.3-1: Principales agentes que actúan en un estuario. ....	4
Figura 3.1-1: Elementos de un estuario (según Perillo, 1995) .....	6
Figura 3.1-2: Diagrama esquemático de un estuario tipo planicies costeras.....	7
Figura 3.1-3: Diagrama esquemático de un estuario tipo Fiordos.....	7
Figura 3.1-4: Clasificación de estuarios según su estatificación. Cuña salina.....	8
Figura 3.1-5: Clasificación de estuarios según su estatificación. Mezcla parcial.....	9
Figura 3.1-6: Clasificación de estuarios según su estatificación. Verticalmente homogéneo. .	9
Figura 3.1-7: Clasificación de estuarios según su estatificación. Seccionalmente homogéneo. .....	10
Figura 3.1-8: Diagrama de estratificación de Hansen y Rattray .....	11
Figura 3.1-9: Estuario micromareal. ....	12
Figura 3.1-10: Estuario mesomareal. ....	13
Figura 3.1-11: Estuario mesomareal. ....	13
Figura 3.1-12: Clasificación estuarios primarios según Perillo .....	15
Figura 3.1-13: Clasificación estuarios secundarios según Perillo .....	16
Figura 3.3-1: Esquema de estuario fuertemente estratificado.....	19
Figura 3.3-2: Esquema de estuario parcialmente mezclado. ....	20
Figura 3.3-3: Esquema de estuario bien mezclado.....	20
Figura 3.4-1: Características del oleaje .....	21
Figura 3.4-2: Tipos de Oleaje .....	22
Figura 3.4-3: Clasificación de las ondas según su periodo .....	24
Figura 3.5-1: Inicio del movimiento o suspensión de una partícula para distintos diámetros equivalentes. ....	27
Figura 3.5-2: Tipos de transporte en un ambiente litoral.....	28
Figura 3.5-3: Perfiles de playa de acreción y tormentas. ....	29
Figura 3.6-1: Características de la barra litoral de Hurst Castle en Hampshire, Reino Unido. .....	33
Figura 3.6-2: Barra litoral Hurst Castle. Hampshire .....	33
Figura 3.6-3: Ubicación barra litoral Río Guadiana, España. ....	34
Figura 3.6-4: Evolución histórica. Barra litoral río Guadiana .....	36
Figura 3.6-5: Evolución histórica. Bahía Popponesset – Massachusetts. EE.UU. (1) .....	37

Figura 3.6-6: Evolución histórica. Bahía Popponeset – Massachusetts. EE.UU (2).	38
Figura 4.1-1: Diagrama de flujo de la metodología aplicada.	39
Figura 4.1-2: Ubicación de los datos utilizados para la caracterización de la zona de estudio.	41
Figura 4.1-3: Estación Puente Colmo	42
Figura 4.1-4: Grillas de propagación	45
Figura 4.1-5: Ubicación de punto de extracción, datos de marea.	46
Figura 4.1-6: Zona de muestreo, campaña I.	50
Figura 4.1-7: Triángulo textural de Shepard (1954)	51
Figura 4.1-8: Ubicación de las muestras campañas II, III y IV.	52
Figura 4.1-9: Ubicación de las transectas. Campañas II, III y IV.	53
Figura 4.1-10: Ubicación del sitio seleccionado.	54
Figura 4.1-11: Ubicación de las muestras campañas I; II, III. Corrientes	56
Figura 4.2-1: Escalas temporales de los cambio de morfológicos en playas.	57
Figura 4.3-1: Ubicación del instrumento de medición utilizada en la calibración del modelo.	61
Figura 4.3-2: Dominio numérico empleado para la calibración del modelo FESWMS.	62
Figura 4.3-3: Malla modelo FESWMS para el transporte de sedimento.	64
Figura 4.3-4: Puntos de extracción de datos modelo FESWMS.	64
Figura 4.3-5: Primera configuración de la línea de costa. Barra litoral en su máxima longitud.	66
Figura 4.3-6: Segunda configuración de la línea de costa.	66
Figura 4.3-7: Tercera configuración de la línea de costa.	67
Figura 4.3-8: Cuarta configuración de la línea de costa Sin barra litoral.	67
Figura 5.1-1: Ubicación de la zona de estudio.	68
Figura 5.1-2: Cuenca del río Aconcagua.	69
Figura 5.1-3: Estuario Río Aconcagua.	74
Figura 5.1-4: Rosa de oleaje de periodos peak	78
Figura 5.1-5: Rosa de oleaje Alturas de olas	78
Figura 5.1-6: a) pronóstico de la marea [m] del período; b) registro del sensor de presión [m]; y c) residuales [m].	81
Figura 5.1-7: Planos de referencia de la marea con respecto del cero instrumental.	82
Figura 5.1-8: Clasificación de sedimentos. Estuario.	84
Figura 5.1-9: Correntometría campaña I. 8 de septiembre, 2002.	96

Figura 5.1-10: Correntimetría campaña I. 11 de septiembre, 2002.....	97
Figura 5.1-11: Correntimetría campaña II. 17 de Julio, 2003.....	98
Figura 5.1-12: Correntimetría campaña 18 de Abril, 2004.....	99
Figura 5.1-13: Rosa de vientos. Escala de Beaufort.....	102
Figura 5.2-1: Estuario del río Aconcagua años 1977 - 1980.....	108
Figura 5.2-2: Estuario del río Aconcagua años 1980 – 1994.....	109
Figura 5.2-3: Estuario del río Aconcagua años 1994 – 1997.....	110
Figura 5.2-4: Estuario del río Aconcagua años 1997 – 2004.....	111
Figura 5.2-5: Estuario del río Aconcagua años 2004 - 2005.....	112
Figura 5.2-6: Estuario del río Aconcagua años 2005 - 2007.....	113
Figura 5.2-7: Estuario del río Aconcagua años 2007 - 2008.....	114
Figura 5.2-8: Estuario del río Aconcagua años 2008 - 2009.....	115
Figura 5.2-9: Estuario del río Aconcagua años 2009 - 2009.....	116
Figura 5.2-10: Estuario del río Aconcagua años 2009 - 2010.....	117
Figura 5.2-11: Estuario del río Aconcagua años 2010 - 2011.....	118
Figura 5.2-12: Estuario del río Aconcagua años 2011 - 2011.....	119
Figura 5.2-13: Cambio de la línea de costa desde 1977 al 2011.....	121
Figura 5.2-14: Cambio anual entre la fotografía base y las anuales.....	121
Figura 5.2-15: Cambio de la línea de costa. Valores estadísticos. Entre 1977 – 2011.....	122
Figura 5.2-16: Rosa de oleaje periodo peak y altura Hmo. Verano.....	124
Figura 5.2-17: Estuario del río Aconcagua. Verano.....	124
Figura 5.2-18: Rosa de oleaje periodo peak y altura Hmo. Otoño.....	126
Figura 5.2-19: Estuario del río Aconcagua. Otoño.....	126
Figura 5.2-20: Rosa de oleaje periodo peak y altura Hmo. Invierno.....	128
Figura 5.2-21: Estuario del río Aconcagua. Invierno.....	128
Figura 5.2-22: Rosa de oleaje periodo peak y altura Hmo. Primavera.....	130
Figura 5.2-23: Estuario del río Aconcagua. Primavera.....	130
Figura 5.3-1: Comparación de series de tiempo de las mareas medidas (línea color rojo) y las obtenidas de la simulación numérica (línea color azul).....	131
Figura 5.3-2: Datos de validación entre las mareas medidas y modeladas.....	132
Figura 5.3-3: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Enero según Ackers-White-Day (1983).....	136

Figura 5.3-4: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Enero según Ackers-White-Day (1983).....	137
Figura 5.3-5: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Febrero según Ackers-White-Day (1983).....	137
Figura 5.3-6: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Febrero según Ackers-White-Day (1983).....	138
Figura 5.3-7: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Marzo según Ackers-White-Day (1983).....	138
Figura 5.3-8: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Abril según Ackers-White-Day (1983).....	139
Figura 5.3-9: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Mayo según Ackers-White-Day (1983).....	139
Figura 5.3-10: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Junio según Ackers-White-Day (1983).....	140
Figura 5.3-11: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Junio según Ackers-White-Day (1983).....	140
Figura 5.3-12: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Julio según Ackers-White-Day (1983).....	141
Figura 5.3-13: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Julio según Ackers-White-Day (1983).....	141
Figura 5.3-14: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Agosto según Ackers-White-Day (1983).....	142
Figura 5.3-15: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Agosto según Ackers-White-Day (1983).....	142
Figura 5.3-16: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Septiembre según Ackers-White-Day (1983).....	143
Figura 5.3-17: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Septiembre según Ackers-White-Day (1983).....	143
Figura 5.3-18: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Octubre según Ackers-White-Day (1983).....	144
Figura 5.3-19: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Noviembre según Ackers-White-Day (1983).....	144

Figura 5.3-20: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Noviembre según Ackers-White-Day (1983) .....	145
Figura 5.3-21: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Diciembre según Ackers-White-Day (1983) .....	145
Figura 5.3-22: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Diciembre según Ackers-White-Day (1983) .....	146
Figura 5.3-23: Transporte de sedimento. Primera configuración. Condición promedio de marea - caudal máximo. ....	147
Figura 5.3-24: Transporte de sedimento. Segunda configuración. Condición promedio de marea - caudal máximo. ....	147
Figura 5.3-25: Transporte de sedimento. Segunda configuración. Condición promedio de marea - caudal máximo. ....	148
Figura 5.3-26: Transporte de sedimento. Segunda configuración. Condición promedio de marea - caudal máximo. ....	148
Figura 6.5-1: Puntos de extracción de datos modelo FESWMS. ....	159

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1-1: Valores estadísticos del caudal anual de las aguas del río Aconcagua. Estación Puente Colmo.....	72
Gráfico 5.1-2: Valores estadísticos del caudal mensual de las aguas del río Aconcagua. Estación Puente Colmo.....	72
Gráfico 5.1-3: Valores estadísticos estacionales del caudal de las aguas del Río Aconcagua. Estación Puente Colmo.....	73
Gráfico 5.1-4: Funciones de transferencia de direcciones, punto de extracción.....	75
Gráfico 5.1-5: Funciones de transferencia de altura, punto de extracción.....	76
Gráfico 5.1-6: Histograma campaña I - Zona de ante playa.....	85
Gráfico 5.1-7: Histograma campaña I – Zona de Rompiente.....	86
Gráfico 5.1-8: Histograma. Campaña II.....	90
Gráfico 5.1-9: Histograma. Campaña 3.....	92
Gráfico 5.1-10: Histograma. Campaña 4.....	94
Gráfico 5.1-11: Histograma de frecuencia relativa de la procedencia de los vientos.....	101
Gráfico 5.1-12: Histograma de frecuencia relativa de la magnitud del viento.....	101
Gráfico 5.1-13: Variación de la magnitud promedio y máxima del viento por dirección de procedencia.....	103
Gráfico 5.1-14: Ciclo horario del viento.....	104
Gráfico 5.3-1: Resultados simulación numérica - Caudales máximos [m <sup>3</sup> /mes] – Condiciones de marea Sicigia y cuadratura.....	133
Gráfico 5.3-2: Resultados simulación numérica - Caudales mínimos [m <sup>3</sup> /mes] – Condiciones de marea Sicigia y cuadratura.....	134
Gráfico 5.3-3: Resultados simulación numérica - Caudales promedios [m <sup>3</sup> /mes] – Condiciones de marea Sicigia y cuadratura.....	134

# **1 INTRODUCCIÓN**

La zona estuarial es uno de los ambientes encargado de realizar la transición entre río y mar y que por lo mismo su dinámica es una mezcla compleja de los procesos físicos que ocurren en cada una de esas componentes. La marea y el oleaje interfieren en la salida del flujo al Océano en donde se crea una interacción entre ambos cuerpos acuáticos creando gradientes de densidad que afectan la capacidad del transporte de sedimento en la misma zona, dando origen a un fenómeno que muchos autores han denominado como máximo de turbidez.

Dependiendo del efecto de los factores mencionados el estuario puede tomar diferentes configuraciones morfológica además de presentar la existencia de una barra de sedimentos en la desembocadura más conocida como barra litoral, la cual es formada por los aportes de sedimento del río cuya forma se ve definida con el comportamiento del oleaje y el caudal los cuales afectan de corto a mediano plazo.

El estuario del río Aconcagua se encuentra ubicado en la comuna de Concón, Región de Valparaíso y fue escogido principalmente para entender su dinámica y el transporte de sedimento como parte de aumentar el conocimiento de este sistema en particular que ha suscitado la atención de diversos autores tales como Fierro (2004) quien estudio su hidrodinámica mareal, Martínez y Cortez (2007) quienes lo caracterizaron geomorfológicamente además de hidrológica y sedimentológicamente.

En el presente trabajo se analizó la capacidad del transporte de sedimento mediante la implementación del modelo FESWMS (Federal Highway Administration's Finite Element Surface-water Modeling System) que resuelve las ecuaciones promediadas de flujo (FST2DH) aplicando un esquema de elementos finitos, analizando la existencia y no existencia de la barra litoral en diferentes casos.

Adicionalmente se estudió la evolución histórica de la línea de costa, la zona estuarial y la barra litoral con las comparaciones históricas de fotografías aéreas desde el año 1977 al 2011.

## **2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

### **2.1 MOTIVACIÓN**

El comportamiento dinámico de un ambiente costero es uno de los fenómenos usualmente abordados por oceanógrafos e ingenieros de costas, que mediante la aplicación de conceptos relacionados con el oleaje, mareas y corrientes en las cercanías de la costa, intentan ligar el cambio de forma de éstas considerando la hidrodinámica como principal fuerza movilizadora.

Los ríos por su parte, usualmente son abordados y estudiados por ingenieros hidráulicos quienes mediante la relación hidrológica de cuencas, lluvias y otras fuentes de infiltración, determinan las crecidas a las que estos cuerpos de agua son sometidos estacionalmente y cómo este flujo tiene la capacidad de arrastrar sedimentos ya sea por fondo o en suspensión, siendo este caudal sólido el responsable de los cambios del lecho y energéticamente como desarrollan meandros u otras estructuras morfológicas de interés.

En el caso de los estuarios, la definición del profesional idóneo comienza a ser difusa, pues se mezclan conceptos de ríos y costas, y su dinámica, transporte de sedimentos y evolución morfodinámica, son características que usualmente se tornan complejas de definir.

Las motivaciones centrales para el desarrollo de este estudio están en la posibilidad de investigar y aprender nuevas aplicaciones para el análisis del transporte de sedimento en lugares tan complejos como un estuario, esto se basa esencialmente en que las costas al interactuar con ríos se comportan de una manera distinta que cada uno de los elementos mencionados, por lo tanto para un ingeniero civil oceánico es importante conocer este tipo de ambientes y generar las habilidades para poder caracterizarlos correctamente.

## **2.2 OBJETIVO GENERAL**

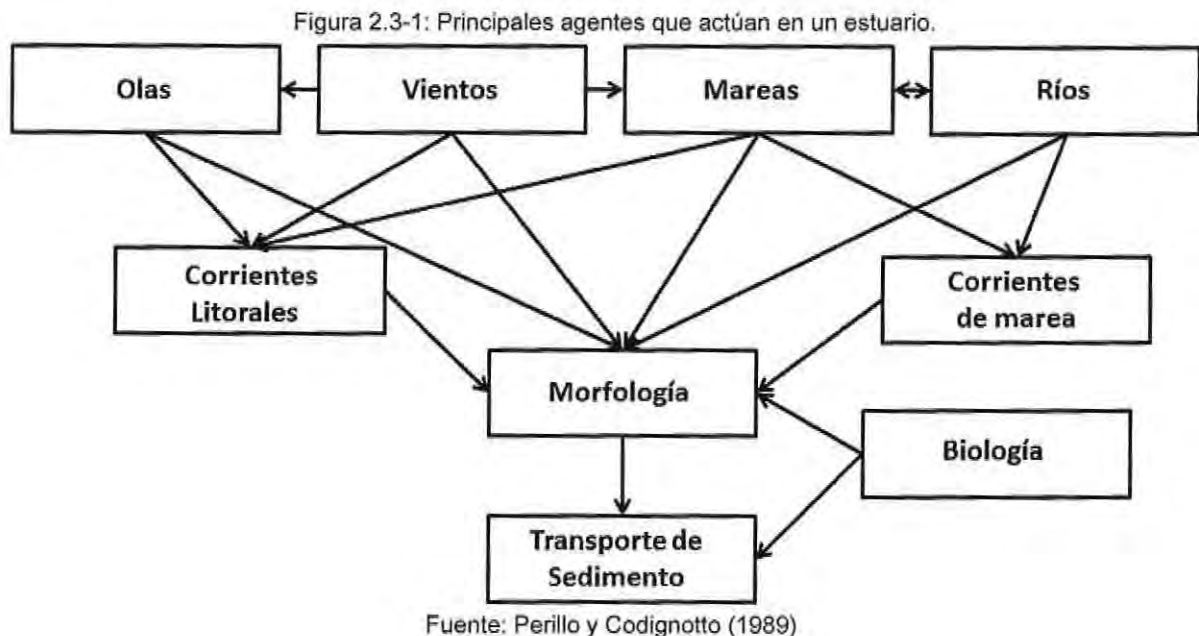
El objetivo general del estudio es determinar el efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral que limita el estuario del río Aconcagua, en lo referido al transporte de sedimentos y la hidrodinámica ambiental del sector.

## **2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar la zona estuarial en cuanto a: Las mareas, oleaje, corrientes y vientos que afectan el área.
- Caracterizar los sedimentos disponibles en la zona de estudio gracias a los datos recopilados.
- Analizar los cambios históricos en la línea de costa y zona estuarial estudiando fotografías históricas de la zona.
- Caracterizar la evolución de largo plazo de la barra litoral.
- Comprender los procesos de modelación hidrodinámica y de transporte de sedimentos en zonas estuariales gracias a simulaciones numéricas con el modelo FESWMS en diferentes casos de caudales y mareas.
- Caracterizar la hidrodinámica fluvial, estuarial y litoral del sector de la desembocadura del río Aconcagua, para la situación actual y tres escenarios de extensión de la barra litoral.

### 3 MARCO TEÓRICO

A continuación se presentan una descripción de los principales agentes (Figura 3.1-1) que afectan la zona estuarial, estas ayudarán a entender el comportamiento del mismo ya que a medida que interactúan entre ellos se producen diferentes procesos, los cuales son complejos ya que no solo se tiene que considerar el río como agente sino además las mareas, oleaje y viento lo que genera una hidrodinámica diferente.



#### 3.1 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ESTUARIOS

El estudio de los estuarios es complejo debido a los procesos dinámicos que en estos se presentan, la interacción del caudal de río con el oleaje y las mareas, hace que el análisis sea de forma interdisciplinaria.

Diversos autores han dedicado parte de sus carreras al estudio de estos ambientes aportando de distintas maneras a su entendimiento, permitiendo en la actualidad definirlos, clasificarlos y modelarlos numéricamente de manera adecuada. Estas se presentan en Perillo G. 1995.

### 3.1.1 DEFINICIÓN

Una de las primeras definiciones la entrega Dionne (1963) donde establece que "un estuario es un brazo de mar que penetra dentro de un valle fluvial hasta el límite superior del ascenso de la marea".

Tiempo después Pritchard (1967) define un estuario como "un cuerpo de agua costero que tiene conexión libre con el mar abierto y desde el cual el agua de mar es mesurablemente diluida con agua dulce, derivada del drenaje continental".

Al pasar de los años en 1973 Dyer considera a un estuario como un "cuerpo de agua costera semicerrado, donde el agua dulce se mezcla con el agua marina".

Así también Day (1980) propone que "un estuario es un cuerpo de agua costero parcialmente abierto ya sea permanente o periódicamente al mar y, dentro del cual, el agua de mar existe una variación conmensurablemente de la salinidad debido a la mezcla de agua de mar con agua dulce proveniente del drenaje terrestre"

IUCN (International Union for Conservation of Nature) los define como "masas de agua donde la desembocadura de un río se abre a un ecosistema marino, con una salinidad intermedia entre dulce y salada y en los que la acción de las mareas es un importante regulador biofísico"

Después de analizar diferentes definiciones encontradas en la literatura relacionada, Perillo (1995) propone una nueva que incorpora características nunca discutidas anteriormente, siendo esta:

"Un cuerpo semicerrado de agua costero que se extiende hasta el límite efectivo de la influencia de mareas, dentro del cual el agua de mar que ingresa por una o más conexiones con el mar abierto o cualquier otro cuerpo costero de agua salada, es significativamente diluida por agua dulce derivada del drenaje terrestre y puede sustentar especies biológicas eurihalinas por una parte o la totalidad de su ciclo de vida". Además el mismo define que de acuerdo con el grado de la dilución salina y la dinámica de mareas, un estuario puede ser dividido en tres tramos principales; Estuario exterior, medio e interior. Como se aprecia en la Figura 3.1-1.

Figura 3.1-1: Elementos de un estuario (según Perillo, 1995)



Fuente: Piccolo y Perillo, 1997.

De la Figura 3.1-1 se advierte que el estuario exterior o bajo está en libre conexión con el mar abierto y es donde dominan los procesos marinos, el sector del estuario medio está sujeto a fuertes mezclas entre los aportes del río (agua dulce) y los del mar y el estuario interior o estuario alto se caracteriza por estar dominado por los aportes del río, sin acción de la marea.

### 3.1.2 CLASIFICACIÓN

El proceso de clasificación de un estuario es importante debido a que dependiendo de esta se le atribuyen ciertas características hidrodinámicas, geomorfológicas y sedimentológicas que facilita comprender los procesos de un lugar específico. Estas dependen de diferentes factores que intervienen en la estructura de los mismos, se presentan a continuación clasificaciones dadas por diferentes autores, de las cuales se podrá obtener información para clasificar el estuario estudiado.

#### 3.1.2.1 Clasificación Morfológica

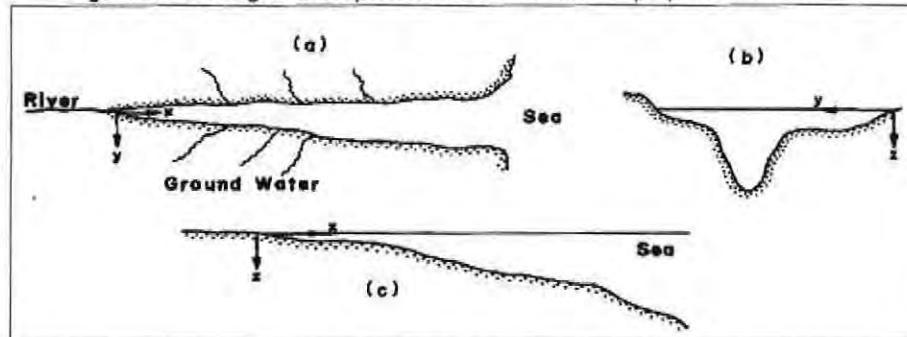
Entre los años 1952 y 1966 Pritchard realizó una clasificación morfológica de los estuarios, dividiéndolos en 3 grupos: Estuarios de planicies costeras o llanos, Fiordos y Estuarios con barreras.

##### I. Estuarios de planicies costeras:

Fueron formados por la inundación de valles, en este proceso no hubo sedimentación durante la inundación, por lo que la morfología del estuario es muy parecida a la original del valle. Las profundidades máximas de estos estuarios generalmente no exceden los 30 m y

se presentan en la boca del río en conjunto con los anchos máximos. La sección transversal se caracteriza por su forma triangular como se observa en la Figura 3.1-2.

Figura 3.1-2: Diagrama esquemático de un estuario tipo planicies costeras.



Fuente: Perillo 1995.

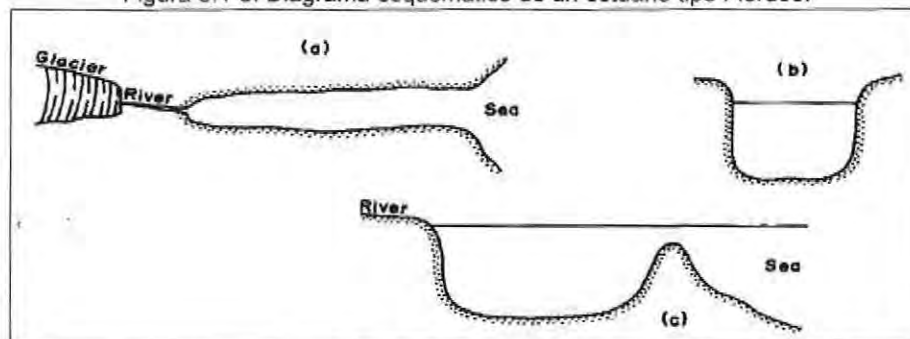
## II. Fiordos:

Los fiordos fueron formados en áreas cubiertas por capas de hielo del Pleistoceno.

La presión ejercida por las capas de hielo hace que los fiordos tengan una mayor profundidad, la proporción de la profundidad con la anchura es generalmente de 10:1. La sección transversal se caracteriza por tener una forma rectangular en la mayoría de los casos como se aprecia en la Figura 3.1-3. Además usualmente tienen fondos rocosos y la sedimentación queda restringida a la cabeza del mismo.

La descarga del río es relativamente pequeña comparada con el volumen total del fiordo. Se encuentran principalmente en latitudes altas en regiones montañosas.

Figura 3.1-3: Diagrama esquemático de un estuario tipo Fiordos.



Fuente: Perillo. 1995.

### III. Estuarios de barrera:

Han sido formados por inundación de valles durante la glaciación, aunque ha habido sedimentación reciente y tienen una barra característica transversal a la boca.

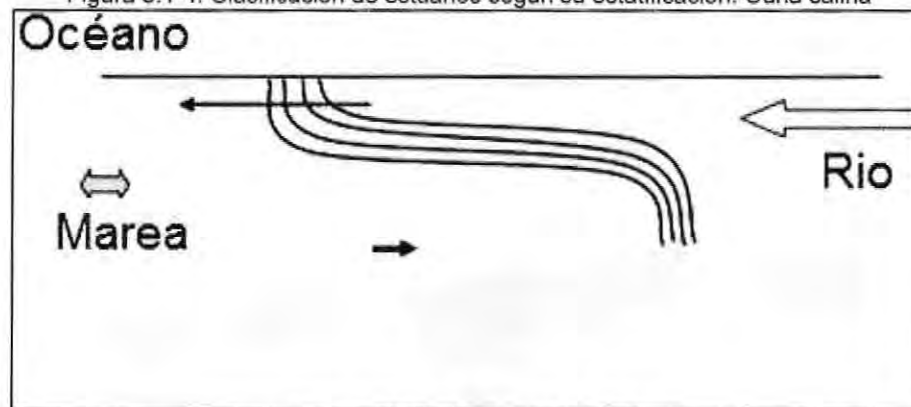
Estos estuarios están generalmente asociados con costas de sedimentación. Tienen poca profundidad y canales de agua poco profundos cercanos a la boca. Debido a la restricción del área transversal, las corrientes pueden ser rápidas en la boca, pero en las partes más anchas y alejadas disminuyen rápidamente. El flujo del río es grande y estacionalmente variable, y acarrea grandes volúmenes de sedimento por el río durante las inundaciones fluviales.

#### 3.1.2.2 Clasificación según su estratificación.

Además de la clasificación morfológica, Pritchard (1960) entrega una basada en la distribución vertical de salinidad promediada sobre el ciclo de marea, las que se presentan a continuación:

- I. **Cuña salina:** La descarga fluvial es elevada con respecto a la amplitud de marea. Las capas de agua dulce y salada se encuentran bien diferenciadas y separadas por una fuerte haloclina. En la Figura 3.1-4 se muestra una sección típica.

Figura 3.1-4: Clasificación de estuarios según su estratificación. Cuña salina



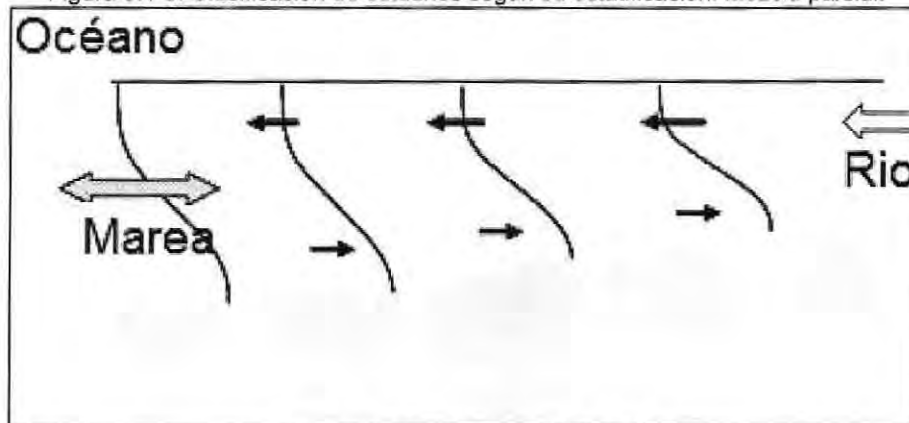
Fuente: Valle – Levinson A. 2010.

- II. **Mezcla parcial:** La carga del río no es el factor dominante. La acción de las mareas genera vórtices que introducen transporte de masas significativas. Son los más

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no existencia) de la barra litoral del río Aconcagua

comunes y los de mayor distribución mundial en todos los tipos de rango de marea y zonas climáticas (Figura 3.1-5)

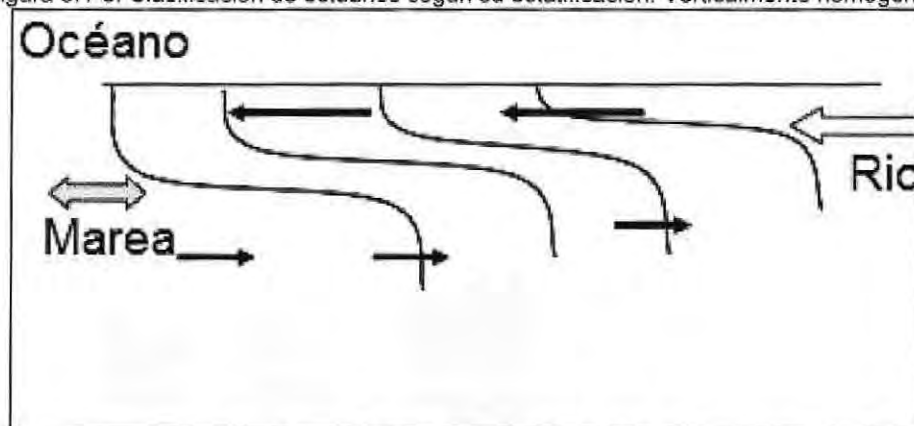
Figura 3.1-5: Clasificación de estuarios según su estratificación. Mezcla parcial.



Fuente: Valle – Levinson A. 2010.

- III. Verticalmente homogéneo: Son estuarios donde las corrientes de marea son fuertes en relación a las descargas fluvial, la mezcla turbulenta es muy importante. La columna de agua es agitada vigorosamente y tiende a una homogeneidad vertical, aunque exista un gradiente longitudinal (ver Figura 3.1-6).

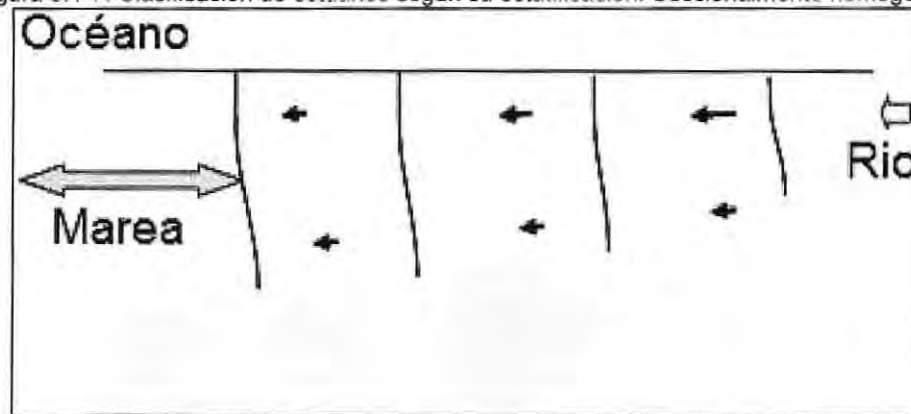
Figura 3.1-6: Clasificación de estuarios según su estratificación. Verticalmente homogéneo.



Fuente: Valle – Levinson A. 2010.

- IV. Seccionalmente homogéneo: Se los encuentra en estuarios angostos y profundos. En estas condiciones la salinidad no varía, lo hace solamente a lo largo del eje del canal y el flujo neto está dirigido hacia el mar en todos los niveles, a una tasa equivalente a la de la descarga del río como se aprecia en la Figura 3.1-7.

Figura 3.1-7: Clasificación de estuarios según su estratificación. Seccionalmente homogéneo.



Fuente: Valle – Levinson A. 2010.

### 3.1.2.3 Clasificación según el diagrama de Hansen y Rattray.

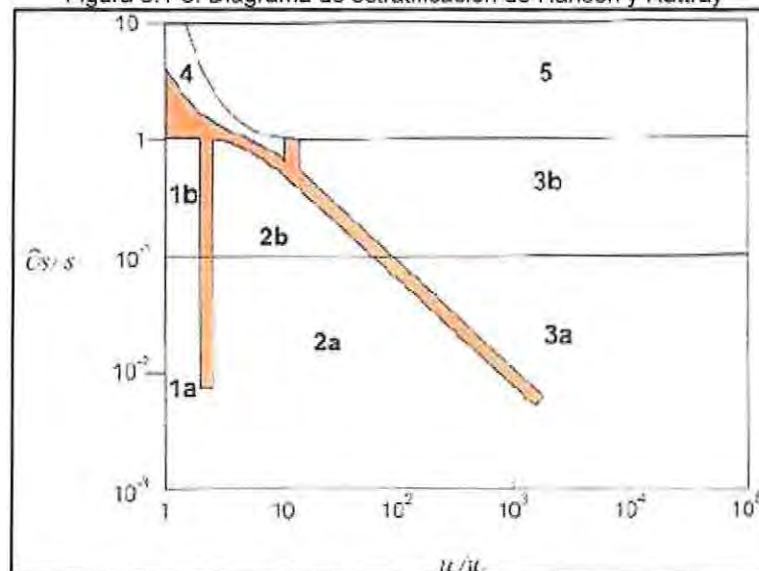
Hansen y Rattray (1966) emplearon un método de clasificación de estuarios basado en las velocidades promediadas de las mareas asociadas con el aporte de agua dulce al sistema y la circulación vertical residual.

Estos factores se representaron tomando la relación entre la circulación vertical y la velocidad media en la sección transversal,  $u_0$ , debida al flujo del río.

La estabilidad del sistema se consideraba usando la relación entre la diferencia de salinidad,  $\Delta s_0$ , entre la superficie y el fondo, y la salinidad media de la sección transversal,  $s_0$ .

El diagrama, Figura 3.1-8, se separa en regiones correspondientes a las diferentes condiciones de flujo y difusión. En la región 1, el flujo residual se dirige al mar en todas las profundidades y el flujo de sal corriente arriba es puramente por difusión. En la región 2 del diagrama, el flujo residual cambia de dirección en algún punto de profundidad intermedia y el flujo aguas arriba es debido tanto a difusión como a circulación. En ambas regiones de esta figura, las categorías a y b se refieren respectivamente a sistemas bien mezclados o estratificados. La región 3 corresponde a estuarios del tipo fiordos. La región 4 es característica de los estuarios de cuña salina.

Figura 3.1-8: Diagrama de estratificación de Hansen y Rattray



Fuente: Fierro, 2004.

La Figura 3.1-8 presenta el tipo de estuario según los parámetros mencionados anteriormente, esta clasificación es:

- 1A. Bien mezclado – Red Caudal a lado del mar; Río Arriba la transferencia es por difusión.
- 1B. Estratificación: difusión dominante.
- 2AB. Caudal medio se revierte al fondo, Advección + Difusión = Transferencia de sal río arriba.
- 3A. Advección = Transferencia de sal río arriba.
- 3B. Tipo Fiordo.
- 4. Cuña Salina.

Entre las ventajas destaca la facilidad para su uso, es capaz de clasificar de forma general un estuario. Entre sus desventajas las más importantes son que da una descripción cualitativa de un estuario y no es suficiente para muchos propósitos (calidad de agua, incidentes de contaminación), se puede clasificar de manera distinta en diferentes épocas o condiciones de la marea un mismo lugar. Y requiere una amplia gama de serie de datos sobre todas las condiciones del estuario.

### 3.1.2.4 Clasificación por rango de mareas

Hayes (1975) realizó una clasificación de los estuarios basada en sus rangos de mareas se muestran en la Tabla 3.1-1.

Tabla 3.1-1: Rangos de marea

Tipo	Rango [m]
<b>Micromareales</b>	< 2
<b>Mesomareales</b>	> 2 ; < 4
<b>Macromareales</b>	> 4

Fuente: Elaboración propia

En estuarios con mareas de alto rango el volumen del agua entre pleamar y bajamar (prisma de mareas) es grande comparado con el volumen de marea baja.

La interacción entre la propagación de la marea en el estuario y la morfología conllevan a variaciones en el rango de la marea y en la fuerza de las corrientes.

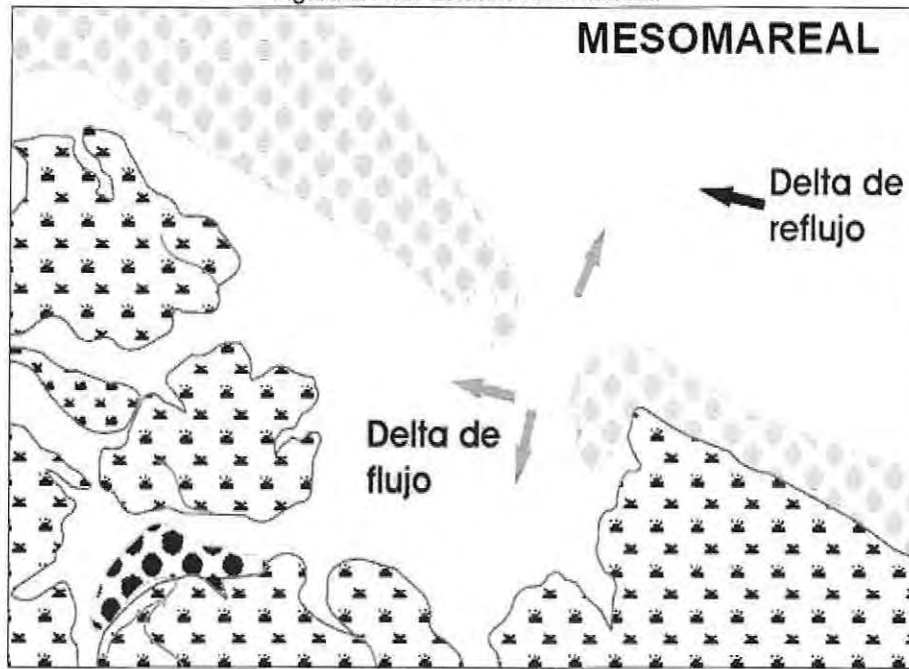
Figura 3.1-9: Estuario micromareal.



Fuente: Perillo, 1995.

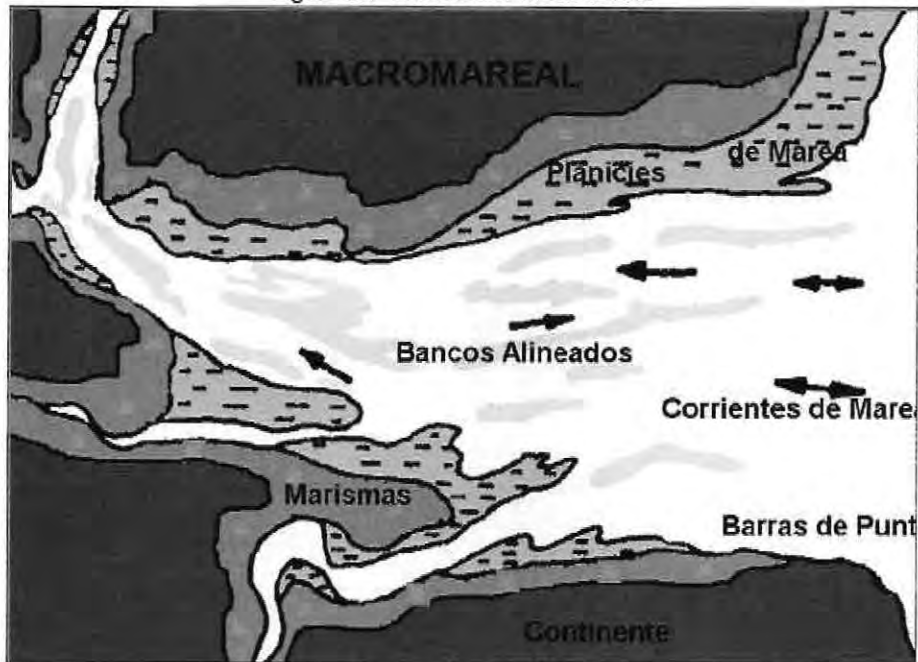
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no existencia) de la barra litoral del río Aconcagua

Figura 3.1-10: Estuario mesomareal.



Fuente: Perillo, 1995.

Figura 3.1-11: Estuario mesomareal.



Fuente: Perillo, 1995.

### 3.1.2.5 Clasificación Morfogenética

Por su parte Perillo (1995) introduce una clasificación basada en condiciones tanto genéticas como morfológicas (Figura 3.1-12). Basado en los criterios postulados por Shepard (1973) estableciendo los conceptos de estuarios primarios y secundarios.

#### V. Estuarios primarios

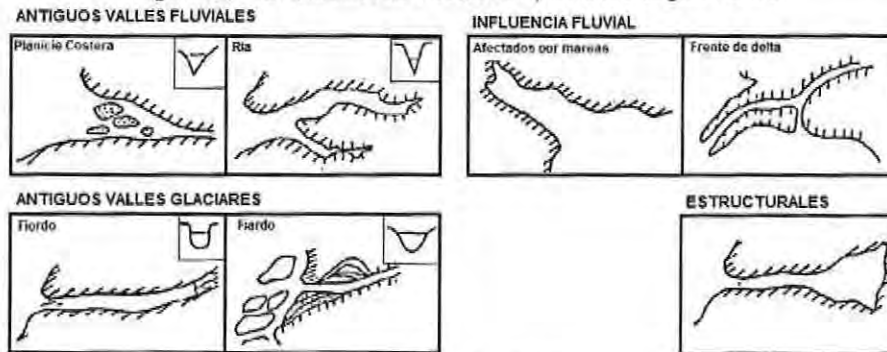
La forma de estos estuarios ha sido el resultado de procesos terrestres y/o tectónicos. La acción marina no ha cambiado significativamente su forma original. Se presentan cuatro categorías:

1. Antiguos valles fluviales: Formados por la inundación de los valles fluviales pleistocenos-holocenos durante la última transgresión postglacial. En promedio, estos estuarios tienen profundidades del orden de los 10 [m] alcanzando algunos casos 20 – 30 [m] en la boca. El valle tiene forma de V. De acuerdo con sus relieves costeros han sido divididos en dos subcategorías:
  - Estuarios de planicies costeras: Normalmente ocupan costas de relieve bajo producidas por el relleno sedimentario del río
  - Rías: Son antiguos valles fluviales desarrollados en costas de relieve alto (montañosas o acantiladas).
  
2. Antiguos valles glaciales: Los valles glaciales se asocian a latitudes altas. El ancho del valle es relativamente uniforme y su sección transversal tiene forma de U. Uno de los elementos más sobresalientes es la presencia de un umbral poco profundo en o cerca de la boca del estuario que cierra parcialmente un valle muy profundo. En función de sus relieves costeros han sido dividido en dos subcategorías: Fiordos y Fiardo.
  
3. Estuarios de influencia fluvial: ellos se refieren a aquellos formados por ríos con alta descarga en los cuales el valle no ha sido inundado por el mar. La circulación en los tramos inferiores del río es afectada por mareas. Estos estuarios han sido divididos en dos subcategorías:

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no existencia) de la barra litoral del río Aconcagua

- Estuarios influenciados por marea: Incluye aquellos ríos que aunque están afectados por la acción de la marea, la intrusión salina está limitada sola a su boca y no se aprecia dentro del valle del río. Normalmente están asociados a ríos de gran caudal.
  - Estuarios de frente de delta: esta categoría incluye a los estuarios encontrados en las porciones de deltas afectados por la dinámica de mareas y/o la intrusión salina.
4. Estuarios estructurales: Sus valles fueron formados por procesos neotectónicos tales como fallas, rebote postglacial, isostasia, vulcanismo, etc. ocurridos desde el pleistoceno hasta el presente.

Figura 3.1-12: Clasificación estuarios primarios según Perillo



Fuente: Perillo, 1995.

## VI. Estuarios secundarios

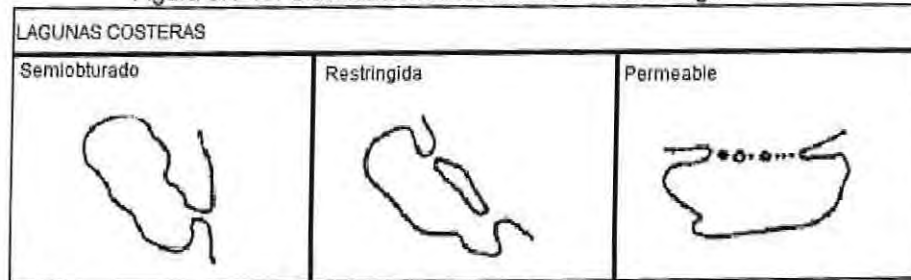
La forma observada es el producto de procesos marinos que afectaron la descarga fluvial desde que el nivel del mar alcanzó aproximadamente su posición actual. Un ejemplo de estos estuarios son las lagunas costeras las que se describen a continuación y se muestra en la Figura 3.1-13:

1. Lagunas costeras: la mayoría de ellas están localizadas en valles fluviales de costas de relieve muy bajos, con rangos de marea de poca amplitud y descargas fluviales pequeñas. Aunque existen ejemplos en costas meso y macromareales, los procesos litorales aparecen como dominantes en el ámbito local. Como consecuencia, la

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no existencia) de la barra litoral del río Aconcagua

dinámica está afectada por los vientos y el transporte de sedimentos litorales los cuales pueden llegar a construir una barrera que cierra a la laguna.

Figura 3.1-13: Clasificación estuarios secundarios según Perillo



Fuente: Perillo, 1995.

## 3.2 GEOMORFOLOGÍA DE ESTUARIOS

### 3.2.1 FORMACIÓN DE ESTUARIOS

Existen diversos factores que influyen en la formación de un estuario, tales como el clima, los tipos de costas (los que se muestran en la Tabla 3.2-1), las diferentes combinaciones de estos producen estuarios específicos con sus propios patrones, ya sea de circulación o de sedimentación.

Tabla 3.2-1: Factores de influyen en la formación de estuarios.

Factores	Subfactores
Clima	Polar y subpolar
	Templado
	Subtropical y tropical
Tipos de costas	De traslación
	Colisión
	Mares Marginales
Tipos de rocas	Roca dura
	Roca blanda (sedimentaria)
Amplitud de marea	Macromareal
	Mesomareal
	Micromareal
Estabilidad de la costa	Sumersión
	Emersión
	Estable
Caudal líquido y sólido de los ríos	Alto
	Medio
	Bajo
Fuerzas difusivas marinas (olas, mareas, corrientes)	Fuertes
	Moderadas
	Débiles
Fuerzas atmosféricas	Fuertes
	Moderadas
	Débiles

Fuente: Perillo, 1995.

### 3.2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EVOLUCIÓN DE LOS ESTUARIOS.

La diversidad de tamaños, formas, régimen de salinidad, sistema circulación y biota en un estuario es debido a la interacción de numerosos factores que pueden sintetizarse en dos clases:

- I. Factores geológicos (tipo de rocas, morfología costera entre otras) que controlan el tamaño y forma de la cuenca del estuario y la naturaleza de los sedimentos aportados a ella.
- II. Factores relacionados con la naturaleza de los procesos (corrientes de mareas, descarga fluvial) que influyen en los modos de sedimentación, hidrodinámica y biota del estuario.

Los diferentes tipos de estuarios presentan un propio comportamiento de la sedimentación, de la salinidad, del régimen de circulación de aguas y distribución de comunidades bentónicas en función de las condiciones características que presenta en el momento de su formación.

### 3.2.3 SEDIMENTACIÓN

Los procesos que intervienen en un estuario son muy complejos; factores dinámicos, químicos y biológicos, aparecen en clara relación con los mecanismos de sedimentación, estos están determinados por la disipación de energía de los flujos fluviales, gradientes de densidad, mareas, el oleaje y las fuerzas meteorológicas. A medida que esta energía se disipa los sedimentos son mezclados, transportados o acumulados modificando la morfología del estuario. Estos procesos son: erosión, acreción, transporte y consolidación, la ocurrencia depende de factores como la dinámica de los fluidos y las propiedades de las partículas (tamaño, forma, composición, densidad, empaquetamiento, etc.).

BIBLIOTECA

## 3.3 HIDRODINÁMICA DE ESTUARIOS

Las características hidrodinámicas de los estuarios varían a lo largo del tiempo, dependiendo de la variabilidad de las condiciones meteorológicas, de marea y de los afluentes fluviales. A continuación se exponen los efectos generados en los estuarios por diversas forzantes:

### I. Viento.

Es importante para el caso de estuarios anchos, en donde logra inducir corrientes de circulación. A diferencia de lo que sucede en lagos y océanos, en estuarios en general el viento no es una fuente importante de energía para el sistema.

### II. Marea

Está genera mezcla a través de diferentes mecanismos. Pudiendo producir mezcla turbulenta debido a la interacción de esta con el fondo del canal. Así también existe generación de corrientes por efecto de la interacción con la batimetría en la que se destacan tres casos: la dispersión producida por efectos de corte por la oscilación de la marea; la circulación residual, que en la mayoría de los estuarios se genera por la batimetría irregular mientras que en estuarios amplios puede ser generada por el efecto de Coriolis; y el efecto de la marea en zonas de aguas muertas.

### III. Río

El aporte de aguas dulce (de menor densidad que el agua marina) provee un déficit de energía potencial al sistema definido por el estuario, produciendo corrientes gravitacionales o baroclínicas, que se originan por la tendencia natural de las isohalinas a la horizontalidad.

Los agentes descritos generan los siguientes tipos de mezclas:

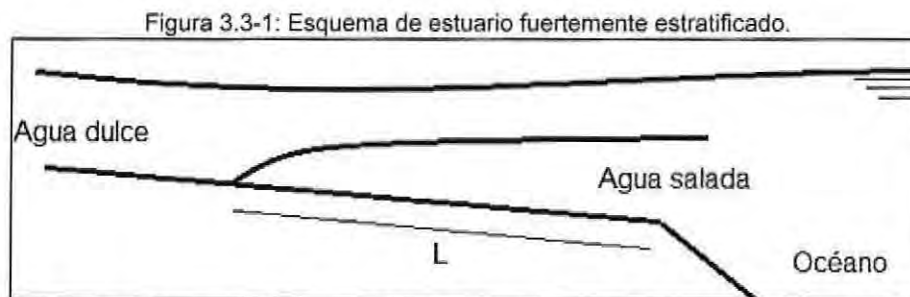
Dependiendo de las magnitudes de los afluentes, las condiciones de marea y morfología del cauce el estuario puede presentar diferentes niveles de mezcla o grados de estratificación, esté tiene relación con la capacidad del estuario para mezclar sus aguas, por lo que está ligado al caudal de dilución. Sin embargo, debido a la variabilidad de la cantidad de agua dulce afluente y de las condiciones de marea, un mismo estuario puede presentar diferentes grados de estratificación dependiendo de la fecha. Se pueden encontrar grados de estratificación fuerte y de mezcla parcial o completa.

A continuación se muestran las características de cada tipo de estratificación:

I. Estuario fuertemente estratificado.

La columna de agua se cuenta dividida en dos capas, las que presentan muy baja mezcla entre sí. La intrusión salina se da por medio del desarrollo de una cuña, cuya longitud depende del caudal del río.

Estos estuarios se caracterizan por ser angostos, además de tener amplitudes de mareas bajas y afluentes de agua dulce relativamente altos. La cuña salina avanza hacia aguas arriba debido a la diferencia de densidad con su entorno, mientras que el río lo hace en dirección al océano, lo que genera que entre ambos se produzcan esfuerzos de corte que favorecen la mezcla. Sin embargo, debido a la baja velocidad de desplazamiento de la cuña y la gran diferencia entre las densidades de ambas capas, la mezcla es más bien baja. La cuña salina tiene un alto tiempo de retención debido a su lento movimiento y puede provocar que masas de sal queden atrapadas en depresiones del río, además de favorecer el fenómeno de sedimentación. En la Figura 3.3-1 se muestra una representación esquemática de este tipo de estuarios.

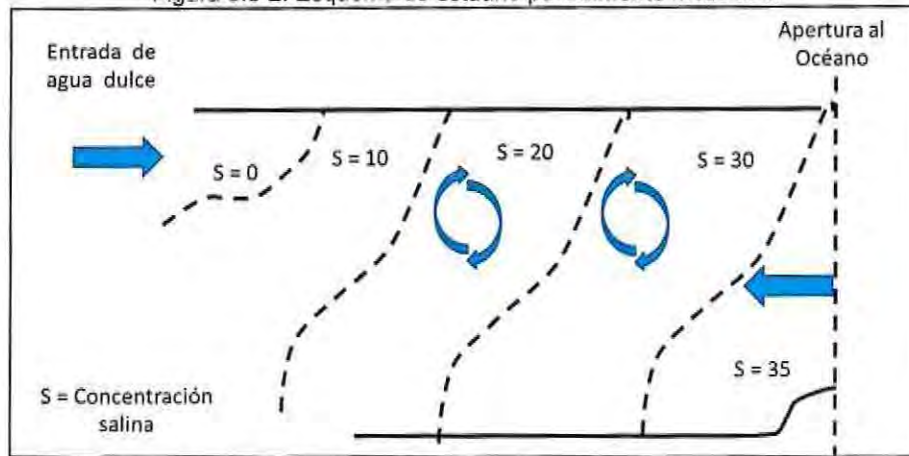


Fuente: Departamento de conservación y protección de recursos hídricos, 2009.

II. Estuarios parcialmente mezclados.

Debido al mayor aporte de la marea la salinidad de las capas superiores es mayor que para el caso de cuña salina, lo cual genera una estratificación débil. Las isohalinas se presentan inclinadas hacia el océano, lo que genera una corriente conocida como circulación baroclínicas, en donde las aguas superficiales tienden a moverse hacia el fondo y hacia el océano, y las del fondo hacia la superficie en dirección contraria como se muestra en la Figura 3.3-2.

Figura 3.3-2: Esquema de estuario parcialmente mezclado.

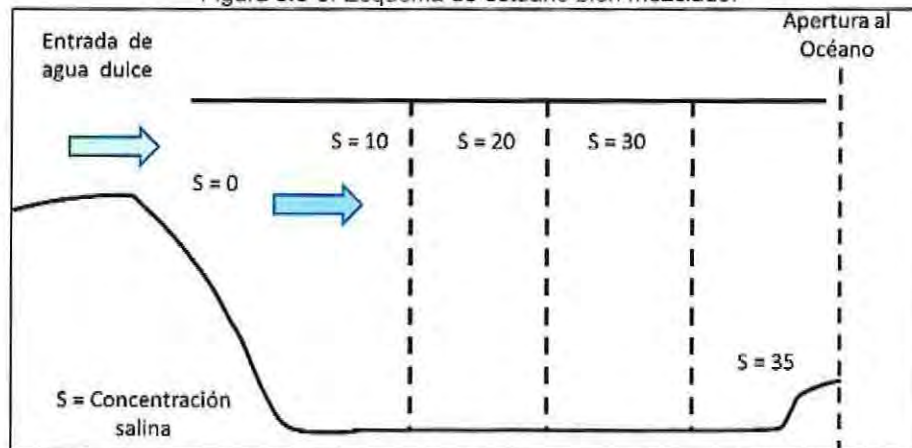


Fuente: Departamento de conservación y protección de recursos hídricos, 2009.

### III. Estuarios bien mezclados.

Estos se dan en ríos con caudales muy bajos, por lo que la marea domina el proceso de mezcla (amplitud de marea mayor a 2 metros). Las isohalinas son verticales y aumentan a medida en que se acerca al océano. El esquema se presenta en la Figura 3.3-3.

Figura 3.3-3: Esquema de estuario bien mezclado.



Fuente: Departamento de conservación y protección de recursos hídricos, 2009.

## 3.4 OLEAJE

Varios autores plantean que el oleaje es un fenómeno que está determinado por la acción de las fuerzas de la naturaleza en cualquier superficie libre de agua, las cuales condicionan el tipo de ola que será inducida. La más común de estas fuerzas es la acción del viento sobre la superficie del mar.

Al generarse el oleaje por viento, este adquiere ciertas características tanto geométricas como temporales, las que se describen a continuación.

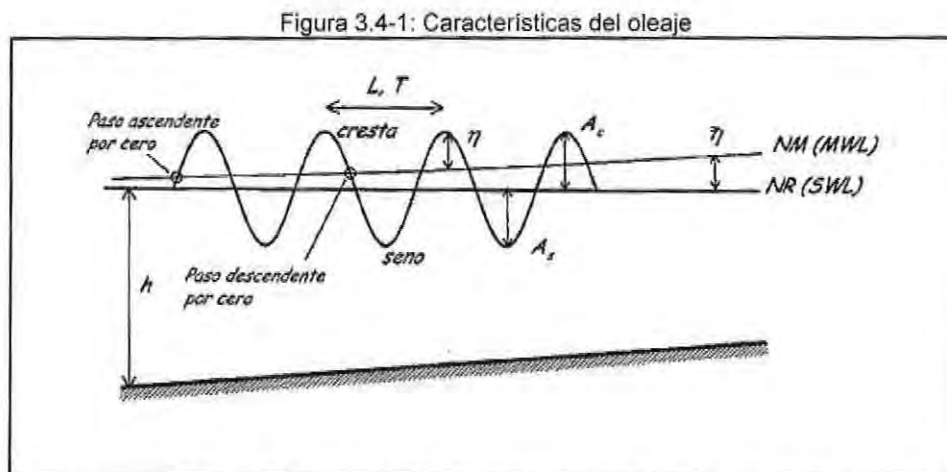
### 3.4.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.

Para caracterizar el oleaje de manera adecuada, se presenta la Figura 3.4-1, que muestra gráficamente los parámetros esenciales asociados a este.

El desplazamiento vertical de la superficie del fluido con respecto a un nivel medio de referencia (NM), se le denomina desnivelación instantánea  $\eta$  y cuando alcanza su máximo se conoce como cresta de la ola ( $A_c$ ), mientras que el mínimo es el seno de la misma ( $A_s$ ), por tanto la altura de la ola  $H$  es la suma de ( $A_c$ ) y ( $A_s$ ) si se asume un comportamiento lineal.

En la escala temporal, se define periodo del oleaje ( $T$ ) al tiempo necesario para que dos crestas (o valles) consecutivas crucen un mismo punto de referencia, mientras que a la distancia recorrida en dicho proceso se le conoce como longitud de onda ( $L$ ).

Geoméricamente el periodo y longitud representan la misma distancia (ver Figura 3.4-1), sin embargo, se diferencian en su escala de medición (temporal o espacial). Cabe destacar, que esta simplicidad en la definición del oleaje se realiza para el caso monocromático, es decir, que la onda mantiene sus características tanto temporal como espacialmente.



Fuente: Documento de referencia Volumen I Dinámicas



- Gran peralte de las olas. Las olas presentan una altura relativamente grande en comparación a su longitud de onda.

#### VII. Oleaje distante o *Swell*

Cuando el oleaje *Sea* se propaga y abandona el área de generación ocurren tres fenómenos (Losada y Giménez-Curto, 1979):

- Las olas viajan a expensas de su propia energía, perdiéndola en su trayectoria (decaimiento)
- El oleaje sufre una doble dispersión. Una angular, en la que las olas se dispersan en todas direcciones, y otra radial, debida a que la velocidad es función directa del periodo, por lo que las olas más largas viajan más rápido que las más cortas. Se produce un filtrado de olas.
- Fenómeno de soldadura, es decir, interacción no lineal, según el cual las ondas de periodos cercanos se fusionan en largas crestas de onda, lo cual origina que la superficie caótica se simplifique. Las ondas al envejecer y especialmente cuando abandona el área de generación va tendiendo a un oleaje de tipo *swell*.

Este tipo de oleaje se puede observar sobre la plataforma costera, especialmente en profundidades reducidas, donde a los fenómenos descritos anteriormente se añade el de la refracción, que hace que los frentes de olas tiendan a progresar en forma paralela a las líneas batimétricas. Así, él que se acerca a la costa es más regular, formando frentes de crestas más grandes, minimizando las diferencias entre periodos y longitudes de la onda surgiendo una periodicidad, las direcciones no son tan dispersas y presentan ciertas componentes predominantes, lo que proporciona un orden al fenómeno

#### 3.4.2.2 Clasificación según su periodo.

Un registro de oleaje se compone de diferentes ondas, con periodos, alturas y longitudes diferentes. En la Tabla 3.4-1 e Figura 3.4-3 se presentan clasificaciones de acuerdo a los

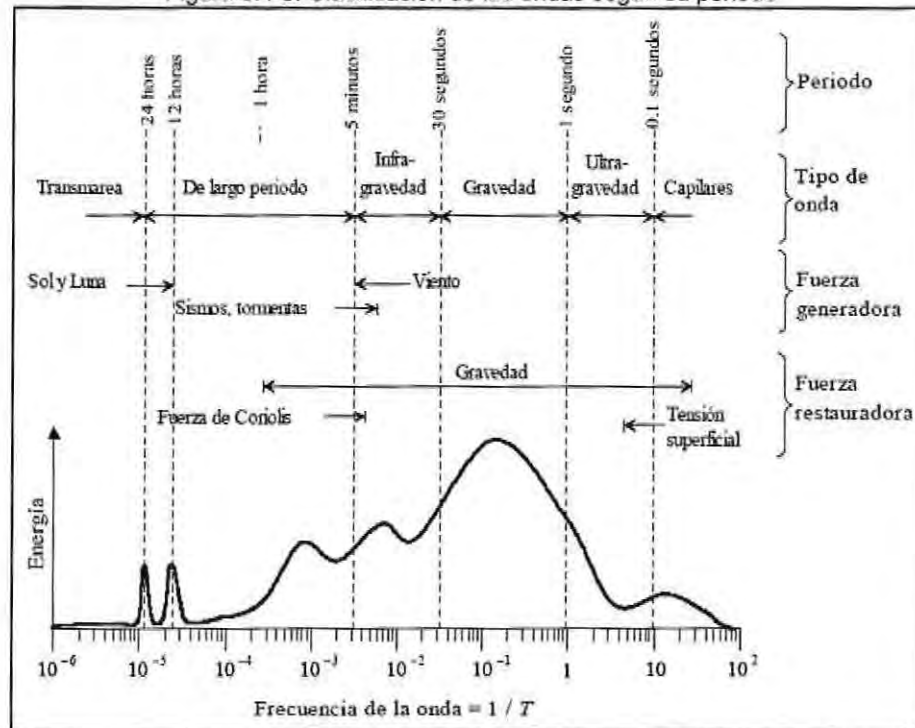
parámetros ya mencionados en conjunto con las fuerzas generadoras y restauradoras de las mismas.

Tabla 3.4-1: Clasificación de las ondas según su periodo

Nombre	Periodo (T)	Longitud (L)	Altura (H)	Fuerza generadora	Fuerza restauradora
Capilares	0 a 0.1 s	2 a 7 cm	1 a 2 mm	Viento	Tensión superficial
Ultragravedad	0.1 a 1 s	Centímetros	Centímetros	Viento	Tensión superficial y gravedad
Gravedad	1 a 30 s	De metros a cientos de metros	De centímetros a 15 m	Viento	Gravedad
Infragravedad	30 s a 30 min	100 a 200 m	Pequeña	Viento	Gravedad, fuerza de Coriolis
Periodo largo	5 min a 24 h	Pueden llegar a ser de escala planetaria	1 a 5 m	Sismo, derrumbes, atracción de cuerpos celestes	Gravedad, fuerza de Coriolis
Transmareal	Más de 24 h	-	0 a 12 m	Oscilaciones climáticas	Gravedad, fuerza de Coriolis

Fuente: Silva 2005

Figura 3.4-3: Clasificación de las ondas según su periodo



Fuente: Silva, 2005.

### 3.4.2.3 Clasificación de acuerdo a la profundidad relativa.

Esta clasificación tiene relación con la profundidad en la que se propaga el oleaje, los rangos de clasificación están dados por la relación entre esta y la longitud de la ola ( $h/L$ ).

- Aguas profundas. Se define así cuando la profundidad ( $h$ ) es igual o mayor que la mitad de su longitud de onda ( $L$ ), y el oleaje no experimenta modificaciones debido a que no siente el fondo.
- Aguas intermedias. Cuando la profundidad ( $h$ ) se encuentra entre la mitad y el vigésimo de su longitud de onda. Los procesos de modificación del oleaje comienzan a gestarse en esta zona.
- Aguas poco profundas. Cuando la profundidad ( $h$ ) es igual o menor que un vigésimo de su longitud de onda, ( $L$ ), el oleaje está completamente controlado por esta. Visto de otra forma, la clasificación del oleaje se puede también realizar utilizando el concepto de la celeridad, que es una relación directa entre la frecuencia y la longitud de onda.

### 3.4.3 PROPAGACIÓN DE OLAJE.

A medida que el oleaje se aproxima a la costa, sufre cambios debido a una serie de fenómenos, los más frecuentes son: refracción, difracción, reflexión, shoaling entre otros, los que se describen a continuación:

#### 3.4.3.1 Refracción

El proceso de refracción puede deberse a dos fenómenos: el primero es el cambio de profundidad al que se enfrenta un tren de olas, en este caso el frente de un tren de oleaje se propaga en aguas más someras que la parte posterior del mismo lo que genera cambios en la celeridad dando lugar a un cambio de dirección. De la misma manera en presencia de una corriente, puede producirse un retraso de parte del frente con el resultado cambio de dirección.

#### 3.4.3.2 Difracción

Este proceso se define como la cesión lateral de energía a lo largo del tren de ondas (cresta), es decir, en dirección perpendicular al sentido de la propagación del oleaje, debido al encuentro de algún obstáculo ya sea a floraciones rocosas o estructuras costeras.

#### 3.4.3.3 Reflexión

Es el cambio de dirección del tren de oleaje en la propagación de este, lo que genera un cambio en el sentido del mismo, esto sucede cuando el tren se encuentra con estructuras, por condiciones propias del fondo o por características propias de las playas.

#### 3.4.3.4 Asomeramiento

El asomeramiento es la transformación del oleaje a medida que se aproxima a la costa. A medida que el tren de ondas se aproxima a la costa aumenta la altura mientras se disminuye la longitud de la misma debido al efecto de la disminución de profundidad (efecto de fondo).

### 3.5 TRANSPORTE DE SEDIMENTO

El inicio de movimiento de una partícula en el lecho ocurre cuando la fuerza instantánea que ejerce el fluido sobre ésta es mayor que la resistencia que oponga la misma, la resistencia se debe fundamentalmente a dos fuerzas: Peso sumergido y Fricción (Cohesión), así se da comienzo al transporte de sedimento.

El transporte de sedimentos puede manifestarse como carga de fondo y/o suspensión, dependiendo del tamaño del grano a movilizar, así como también del tipo de flujo bajo el cual se encuentra dicha partícula. Los modos de movimiento del grano usualmente descritos son tres:

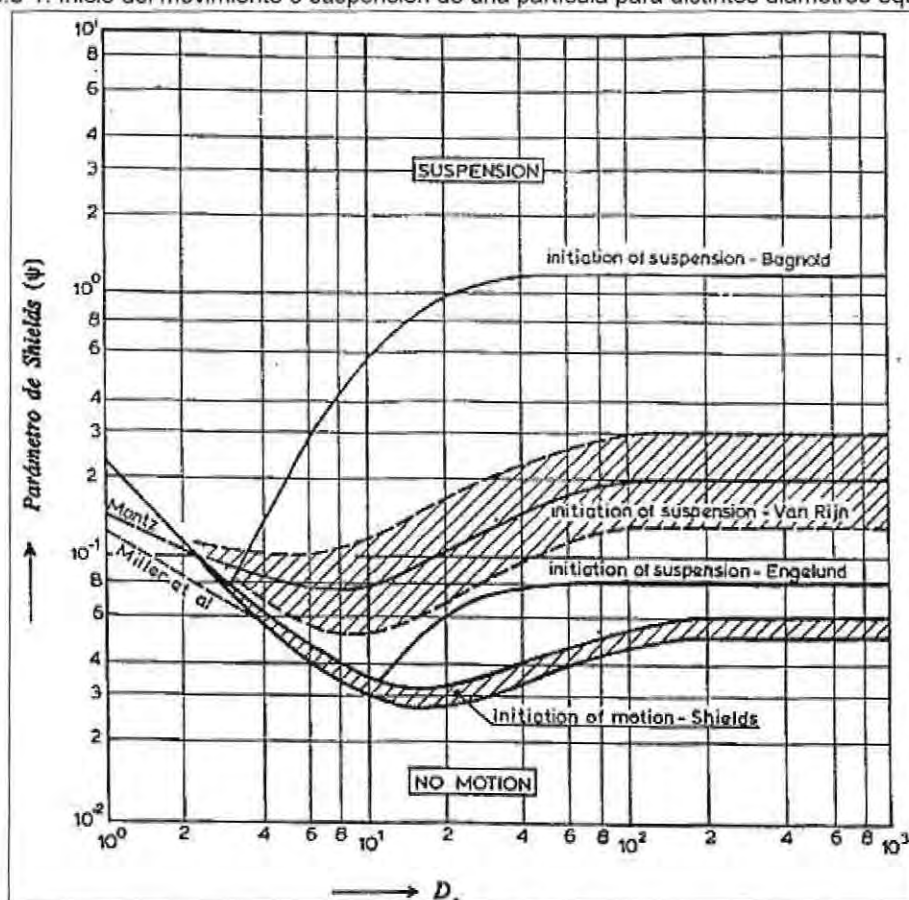
- Rodadura y deslizamiento: Esta forma se genera cuando es superada la tensión tangencial crítica para la cual se inicia el movimiento.
- Saltación: A medida que la tensión tangencial aumenta, los granos comienzan a sobrepasarse entre sí (granos más rápidos a los más lentos), formando una lámina de sedimento cercana al fondo.

- Suspensión: Se presenta cuando la velocidad de corte excede la velocidad de caída del grano, levantándolo del lecho hasta una cierta altura en la cual es transportado.

El inicio del movimiento de las partículas de sedimento que componen el lecho, depende tanto de las condiciones del flujo como de las características granulométricas del material. Este se da cuando la fuerza que ejerce el fluido sobre la partícula es mayor que la resistencia ejercida por esta.

La evaluación de las condiciones bajo las que se produce el inicio del movimiento se puede realizar a partir de diferentes aproximaciones, siendo la más utilizada la contenida en el Abaco de Shields (1936), el que se muestra en la Figura 3.5-1.

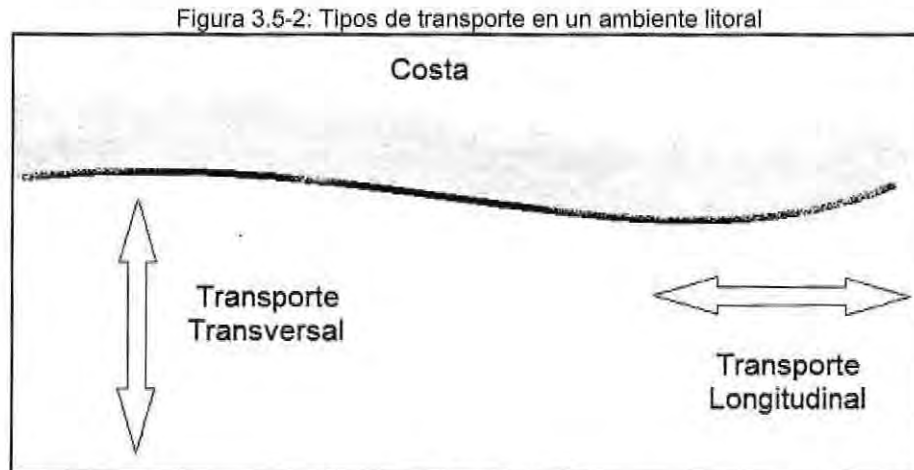
Figura 3.5-1: Inicio del movimiento o suspensión de una partícula para distintos diámetros equivalentes.



Fuente: Van Rijn, 1993.

### 3.5.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA COSTA

Por simplificación del fenómeno tridimensional, se definen dos tipos de transporte de sedimento en las costas: el longitudinal y transversal, tal como se aprecia en la Figura 3.5-2.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se describen de manera general cada uno de estos mecanismos de transporte litoral de sedimentos.

#### 3.5.1.1 Transporte longitudinal (LST)

Se puede definir como la cantidad de sedimento que se mueve de forma paralela a la costa, este tipo de transporte es el responsable de la morfología de la costa y los cambios a largo plazo de la misma. Gracias a estos indicios, es posible saber su dirección sin necesidad de determinarlo mediante alguna aproximación empírica o mediciones de campo.

Los mecanismos principales que generan LST son:

- Variación del Ángulo de Incidencia del Oleaje.
- Sobre elevación del Oleaje
- Incidencia Oblicua del Oleaje

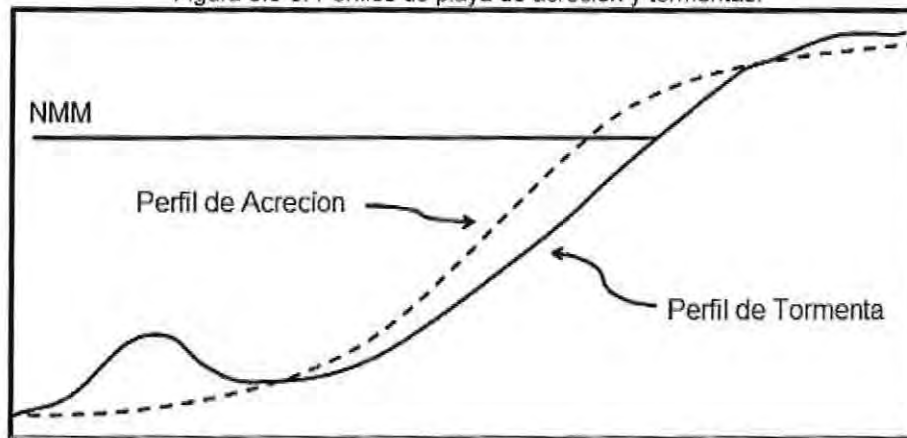
Tanto la variación del ángulo de incidencia como la sobre elevación del oleaje son mecanismos de generación de corrientes longitudinales y por lo tanto tiene la capacidad de

transportar sedimentos. 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. (Quezada, 2012).

### 3.5.1.2 Transporte transversal

Es la cantidad de arena que se mueve de manera perpendicular a la costa, este transporte es el encargado de los cambios en el perfil de las playas, uno de los ejemplos clásicos es el perfil de acreción y perfil de tormenta.

Figura 3.5-3: Perfiles de playa de acreción y tormentas.



Fuente: Elaboración propia.

El cambio en el perfil se debe a los diferentes tipos de oleaje que se presentan en la costa. Como se aprecia en la Figura 3.5-3 el perfil de tormenta se caracteriza por que generalmente se forma una barra, la que proviene de la erosión de la berma de la playa debido a la acción del oleaje que en esta época es más severo que en acreción en donde la altura media disminuye y el periodo generalmente aumenta transportando el sedimento de vuelta hacia la costa.

Las barras cumplen dos funciones fundamentales:

- Protegen la playa de temporales más severos, ya que generan su rotura.
- Constituye además una reserva de sedimentos y previene las pérdidas.

### 3.5.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN RÍOS.

Se puede clasificar el transporte de sedimentos en un río: según el modo de movilización y según el origen del material.

El material puede ser transportado por suspensión o por fondo, siempre se presentan estos dos tipos de transporte conjuntamente y las proporciones entre ellos dependen de las condiciones de la cuenca.

Según su procedencia, el material que trae el río puede tener origen en la cuenca o bien en zonas de la cuenca hidrográfica por las que no circula ningún curso de agua. El sedimento aportado por el cauce del río puede ser transportado en suspensión (material más fino) y de fondo (material más grueso). En cambio el material de lavado de la cuenca al ser muy fino solo se transporta en suspensión.

El conocimiento del volumen de sedimentos transportados por los ríos es de fundamental importancia en el planeamiento y gestión de la zona costera, ya que el proceso fluvial es considerado la fuente más importante de material para la deriva litoral. Cuando se trata del conjunto de procesos costeros, el material transportado por los ríos puede contribuir de forma importante al equilibrio del balance sedimentario y, en consecuencia, al mantenimiento de la estabilidad de la línea de playa, ya que la disminución del aporte o su interrupción interfieren en el balance sedimentario, generando desequilibrio del sistema costero y eventualmente erosión.

La cantidad total de sedimento transportado por un río se define como la suma de la carga de sedimento movilizado por arrastre de fondo, más la carga en suspensión y aquel procedente de la cuenca hidrográfica.

Para el cálculo del transporte de sedimentos en los ríos, como por los otros agentes dinámicos, existen dos procedimientos básicos y que consisten en la medición directa o estimar de forma indirecta el volumen de material transportado.

Para la cuantificación de forma directa es necesario conocer la concentración de sedimentos transportados en suspensión (muestras instantáneas por medio de botellas oceanográficas o por integración), y como carga de fondo (estudio de la migración de las formas de fondo y

utilizando trampas desarrolladas específicamente para este fin), además de las características hidráulicas de la sección y del material.

La forma indirecta consiste en la utilización de modelos matemáticos para estimar el transporte de sedimentos por medio de los parámetros hidráulicos de la corriente en una sección o tramo del río y de las características del material de fondo. Entre las herramientas existentes, algunas estiman la carga de fondo y en suspensión, obteniendo por la suma la cantidad total de material transportada por la corriente y otros determinan la carga total de material, sin hacer la diferenciación entre la carga de fondo y la carga en suspensión.

### 3.5.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN ESTUARIOS.

Los sedimentos encontrados en los estuarios tienen como fuente principal los aportes fluviales y marinos. Sin embargo, en la mayoría de ellos que han sido estudiados intensivamente, la descarga del río se ha mostrado como la fuente principal de material, en la zona interior, mientras que en el exterior y medio, la erosión costera es la fuente mayor de sedimentos acarreados hacia dentro del ambiente. El grado en que cada una de estas fuentes sedimentarias prevalecerá dependiendo de los procesos dinámicos de circulación y mezcla (Cabrera-Muro, H. 1975).

- Sedimentos de origen marino

Las bocas de numerosos estuarios están obstruidas con sedimentos derivados de islas de barrera o de la plataforma continental adyacente, siendo la mayoría de estas arenas. El movimiento de corrientes arriba de la capa inferior que caracterizan los estuarios estratificados y parcialmente mezclados puede ser un mecanismo importante para el transporte de estos hacia dentro del estuario (Cabrera-Muro, H. 1975). Como ejemplo Crommelin (1940) y Van Stratten (1960) estudiaron los tamaños de los sedimentos en el estuario Ems en Alemania y concluyeron que la mayoría de los sedimentos provienen del Mar del Norte. Otros son el Estuario de Mersey el cual fue estudiado por Steers (1967) en el cual se utilizaron trazadores radioactivos para demostrar el movimiento dentro del estuario de sedimentos provenientes de bancos de arenas localizados frente a la boca del estuario.

- Sedimentos de origen fluvial

Como se señaló anteriormente, en la mayoría de los estuarios han sido derivados de fuentes fluviales. La cantidad de sedimentos descargados por un río depende de factores tales como la variación temporal del flujo y el tipo de suelo en la cuenca. Estos mueven sedimentos con un amplio rango de tamaños desde arcillas a gravas en suspensión y tracción (Cabrera-Muro, H. 1975). En algunos ríos, tal como el Potomac, las descargas ocurren durante pocos días del año asociados a los escurrimientos de primavera la mayoría de la descarga queda en el estuario lo que fue estudiado por Schubel (1964).

Otros factores que afectan la cantidad de descarga de los ríos son las actividades humanas, como por ejemplo la limpieza de la tierra para cultivo y las construcciones son posibles fuentes de material (extracción de áridos).

La concentración de sedimento a transportar al igual que la dirección del mismo dependen de la mezcla de los aportes fluviales y los oceánicos, cuando se presentan los mayores caudales el sedimento viaja hacia la parte exterior del estuario debido a lo mismo se presenta en esta zona la concentración máxima de sedimentos. El cambio de dirección hacia el interior del estuario se debe al ingreso de la marea al sistema modificando también la concentración máxima de sedimentos, ubicándola en la zona del estuario interior.

### **3.6 BARRA LITORAL**

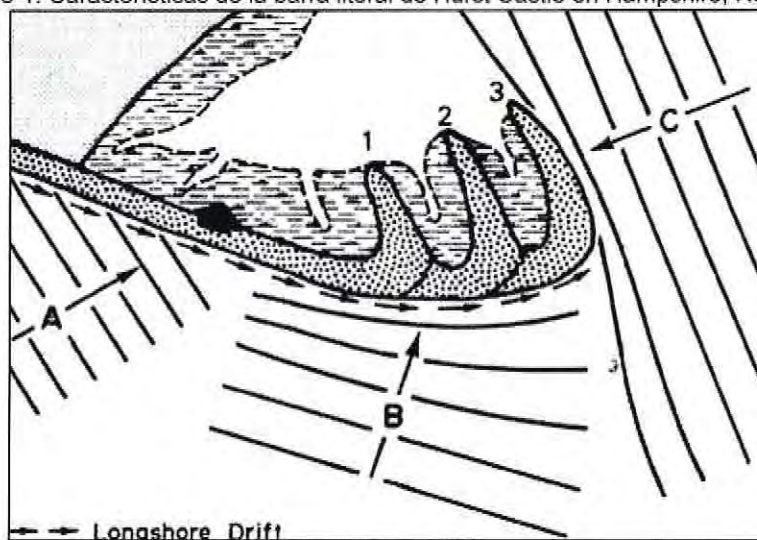
La barra litoral (spit bar) es un elemento característico de las desembocaduras de los ríos, ésta se forma gracias a los sedimentos transportados por el caudal fluvial y la acción del oleaje y las mareas en la zona. El comportamiento de esta (largo y ancho) dependen de las acciones de los agentes mencionados, por ejemplo el largo y la dirección en la cual se extiende depende de la incidencia del oleaje, y su existencia del caudal, ya que éste permite la depositación de sedimentos, esto quiere decir que la barra puede ser rota en niveles de alta energía fluvial y fuertes oleajes, por lo que su estabilidad puede ser de corto término.

La Figura 3.6-1 muestra un ejemplo de barra litoral y las diferentes configuraciones que estas pueden tomar según las direcciones del oleaje que afecta la zona. La forma curva de esta es

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no existencia) de la barra litoral del río Aconcagua

resultado de la acción de las olas proveniente de las direcciones A, B y C. La figura está basada en la barra litoral ubicada en Hurst Castle en Hampshire, Reino Unido.

Figura 3.6-1: Características de la barra litoral de Hurst Castle en Hampshire, Reino Unido.



Fuente: Bird, 2008.

Figura 3.6-2: Barra litoral Hurst Castle. Hampshire

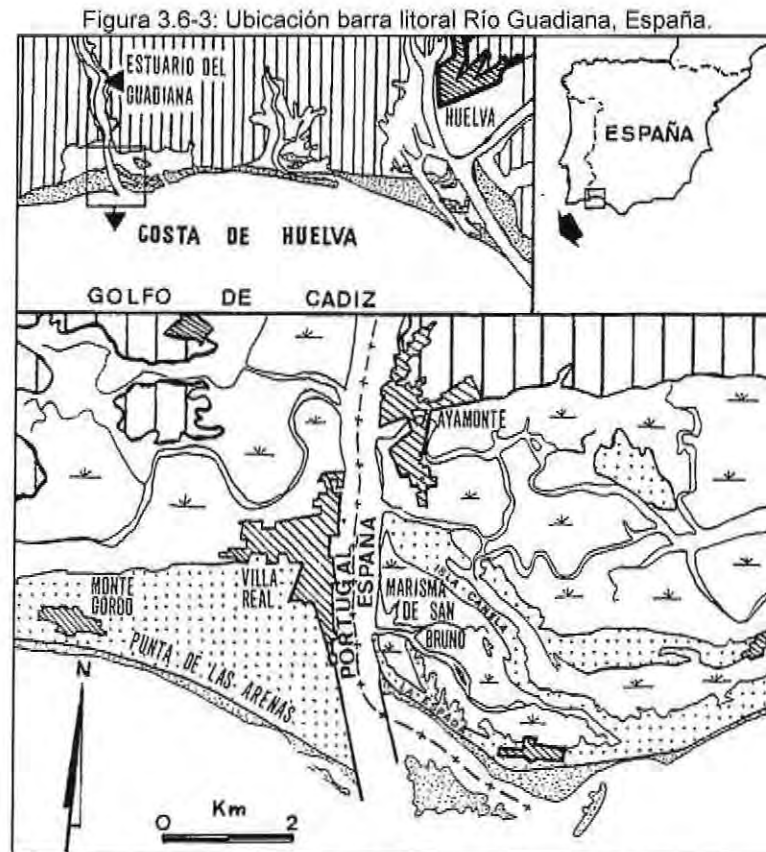


Fuente: Google earth.

Como se mencionó anteriormente las formas adoptadas por las barras litorales dependen de diferentes agentes, por lo mismo estas varían a lo largo de su formación y existencia a continuación se presentan algunos ejemplos de esto.

1. Barra litoral Río Guadiana, España. Situado en el centro – oeste del Golfo de Cádiz como se muestra en Figura 3.6-3.

La desembocadura del río Guadiana muestra una morfología de estuario mesomareal dominado por olas, cuya evolución morfo – sedimentaria se ve fuertemente influenciada por la actividad fluvial y mareal.



Fuente: Morales J., Pendon J. y Borrego 1994.

### ***Características Hidrodinámicas***

- ***Régimen mareal***

En esta costa es mesomareal y semidiurno, con leve desigualdad diaria

- ***Régimen de Oleaje***

El oleaje direccionalmente predominante es el procedente del SW, seguido por el SE. La ola significativa ( $H_{1/3}$ ) de todas las direcciones posee una altura media de 0,69 metros, mientras que las procedentes del SW y SE poseen respectivamente alturas de 0,4 y 0,7 m.

- ***Aportes fluviales***

El aporte fluvial es irregular, pasa de grandes descargas promedios anuales a valores bajos como por ejemplo de 13880,67 Hm<sup>3</sup> a 2280,80 Hm<sup>3</sup> en años consecutivos.

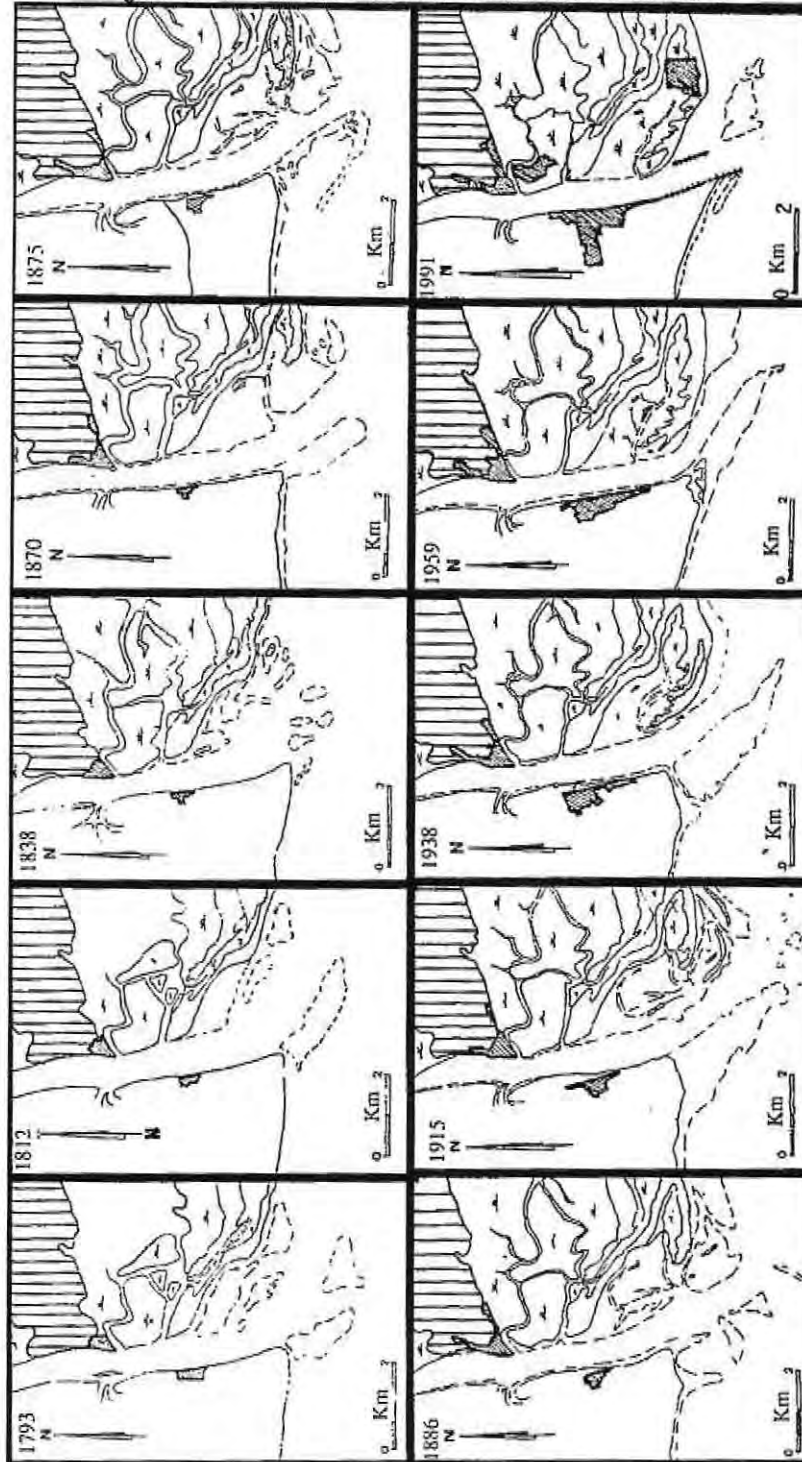
### ***Evolución Histórica***

El estudio cartográfico basado en las batimetrías históricas analiza desde 1793 a 1991 los que indican una estabilidad relativa de la barra de Punta de las Arenas; esto indica una evolución previa más rápida en el margen portugués, mientras que en la orilla opuesta se producen durante este periodo los cambios más significativos. La dirección de entrada y salida de las corrientes de marea hacia y desde el estuario, unido a la actividad de los trenes de olas dominantes y la acción de una componente de deriva litoral, permite el desarrollo de una plataforma de batida (swash plataform) en la parte frontal de la barra poniente (Punta de las Arenas). En condiciones en donde domina el oleaje, esta plataforma crece hacia el Este llenando parte del canal principal. Así cuando el dominio lo ejerce el caudal del río, el canal principal erosiona la cara occidental de la plataforma. En la orilla oriental se desarrolla otra plataforma, adosada a la cara opuesta de la barra litoral de Isla Canela y que esta bisectada por canales secundarios y sobre ellos migran en dirección NE las barras de batida. La acreción de barras sucesivas origina el desarrollo de las barras arenosas, que caracterizan el margen occidental de la desembocadura del Río

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no existencia) de la barra litoral del río Aconcagua

Guadiana. En las zonas más internas de esta plataforma se producen condiciones sedimentarias de llanura mareal.

Figura 3.6-4: Evolución histórica. Barra litoral río Guadiana



Fuente: Revista Sociedad Geológica, 1994.

## 2. Bahía Popponesset – Massachusetts. EE.UU.

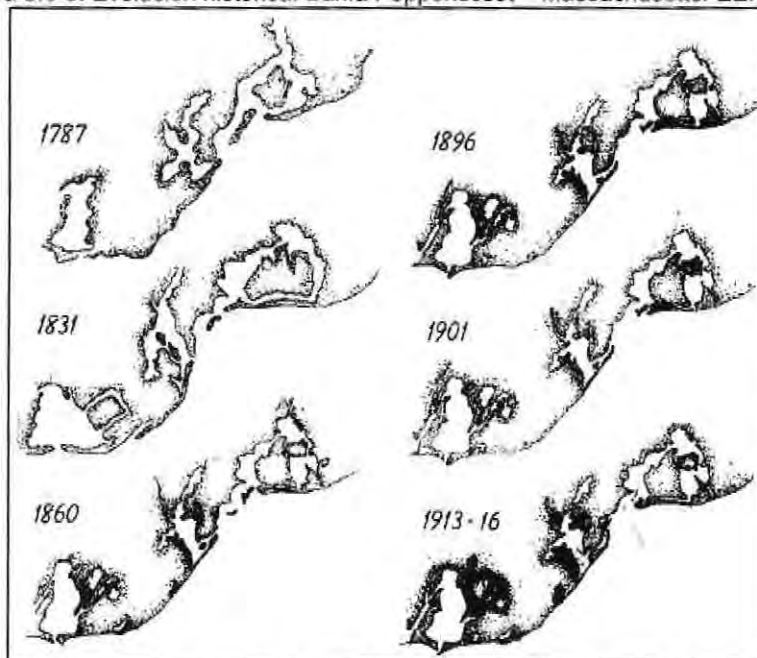
### **Características hidrodinámicas**

- Baja energía de las olas
- Prismas de marea pequeño
- Bajas tasas de transporte de sedimento

### **Evolución Histórica**

Se muestran las etapas claves de la evolución en la Figura 3.6-5. El primer cambio significativo en la configuración de la barra se muestra en 1857 en donde se presenta un alargamiento hacia el Noreste manteniendo esta tendencia hasta 1954 el año es que se presenta el mayor alargamiento con 2,8 Km, el mismo año tres huracanes (Carol, Edna, Hazel) los cuales crearon una brecha que dividió la barra en dos, una con direcciones Noreste y Suroeste. Eventualmente la sección NE desaparece por los efectos del oleaje regular lo que se aprecia en la imagen del año 1961. Manteniéndose estable en la forma y largo de esta en los años consecutivos. El ancho de la barra se mantuvo bastante constante a través del tiempo alcanzando por lo menos 100 m.

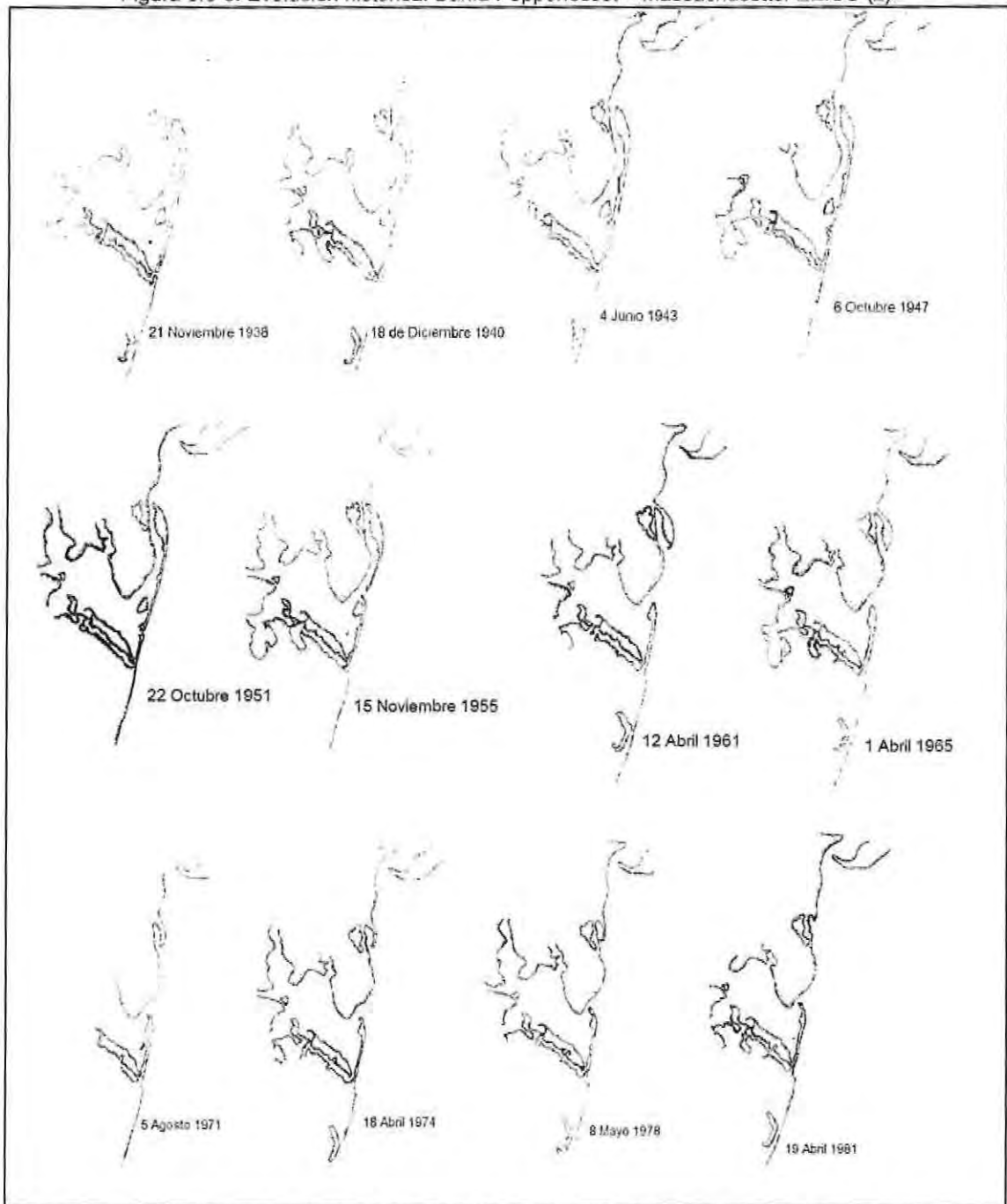
Figura 3.6-5: Evolución histórica. Bahía Popponesset – Massachusetts. EE.UU. (1)



Fuente: Marine Geology. (1982)

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 3.6-6: Evolución histórica. Bahía Popponeset – Massachusetts. EE.UU (2).



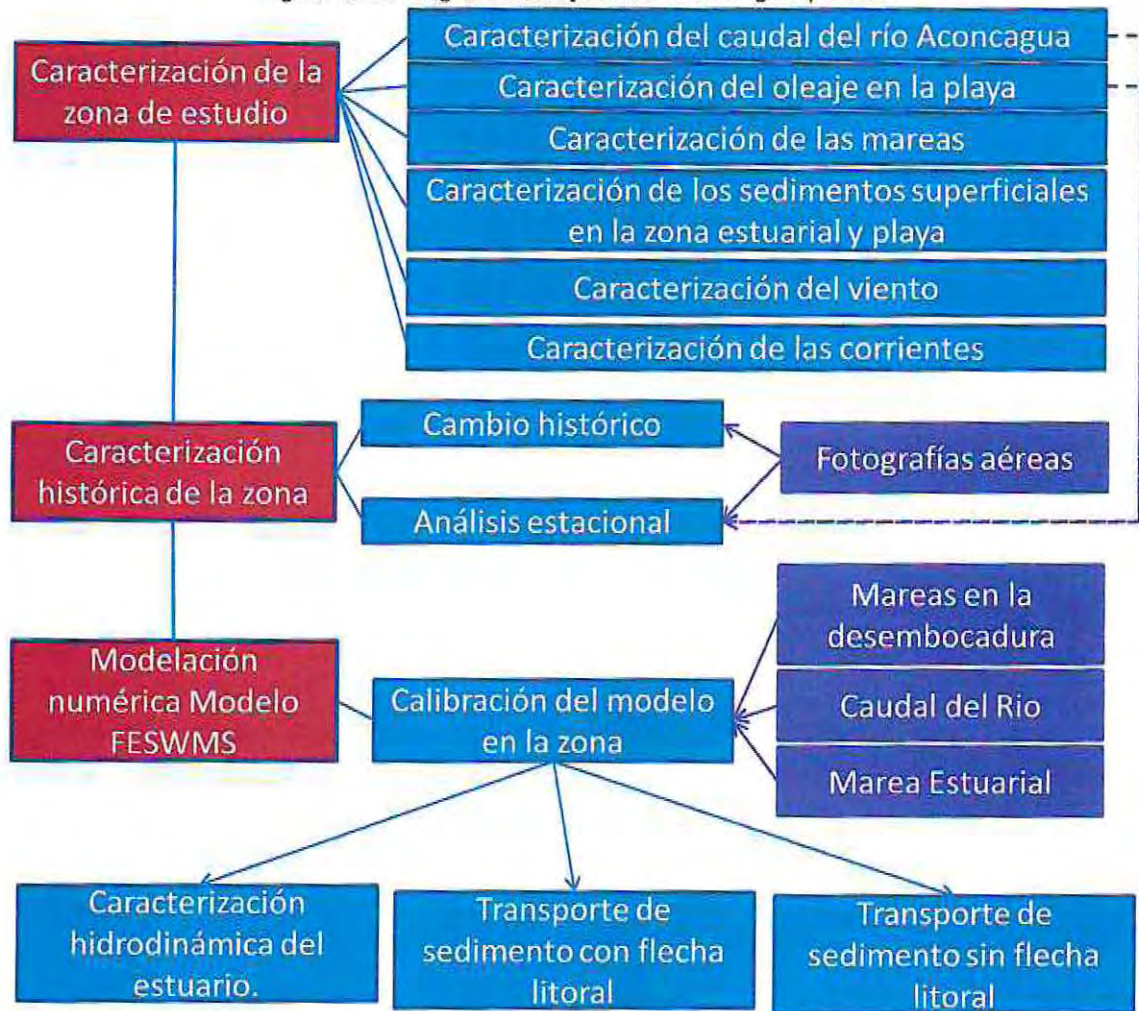
Fuente: Marine Geology, 1982.

## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

La metodología aplicada para estudiar la barra litoral, se muestra de manera resumida en el diagrama de flujo adjunto y cada una de sus tareas se describen a continuación

Figura 4.1-1: Diagrama de flujo de la metodología aplicada.



Fuente: Elaboración propia.

Para la caracterización de la zona de estudio se contó con datos de campo además de referencias bibliográficas que permitieron una descripción adecuada del sector de interés.

Para la descripción de la cuenca y estuario del río Aconcagua solo se consideraron las referencias bibliográficas ya que entregan la suficiente información de la zona, sin incorporar trabajos de campo específicos, pues la presente investigación no contó con financiamiento para dichos fines.

A continuación se encuentran resumidos en la Tabla 4.1-1 la procedencia de los datos mencionados además de la cobertura temporal de cada fuente de información, esto permitió un completo análisis del lugar. Cada estudio tuvo su propia metodología las que se detallan a continuación en los subcapítulos correspondientes. Así también se presenta la Figura 4.1-2 en donde se muestra la ubicación de los mismo.

Tabla 4.1-1: Datos de terrenos disponibles o generados para la caracterización de la zona de estudio.

<b>Datos</b>	<b>Fecha</b>	<b>Fuente</b>
Caudales	Enero de 1988 a Octubre de 2002	DGA Estación Puente Colmo
Oleaje	1 de Enero de 1980 al 1 de Enero de 2010	STWAVE - Olas Chile III
Marea	1 de Enero al 31 de Diciembre del 2010	Modelo OSU TIDAL
Viento	1 de Enero al 31 de Diciembre del 2010	Explorador de Energía Eólica
Sedimento	abr-03	Vergara, H. y Martínez, C., 2002. Geomorfología y dinámica del estuario del Aconcagua, Dirección de Investigación y Posgrado, Universidad de Valparaíso
	sep-02	
	jul-03	
	abr-04	
Corrientes	8 de Septiembre del 2002	
	17 de Julio del 2003	
	18 de Abril del 2004	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1-2: Ubicación de los datos utilizados para la caracterización de la zona de estudio.



#### 4.1.1 DESCRIPCIÓN DEL CAUDAL DEL RÍO ACONCAGUA

El estudio de caudal se realizó en base a datos proporcionados por el Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Centro de información de recursos hídricos. El registro analizado corresponde a valores instantáneos diarios de flujo en la Estación Puente Colmo, la que actualmente se encuentra deshabilitada, para el periodo de registro comprendido entre Enero de 1988 y Octubre 2002. En la Tabla 4.1-2 se muestran las coordenadas de la estación.

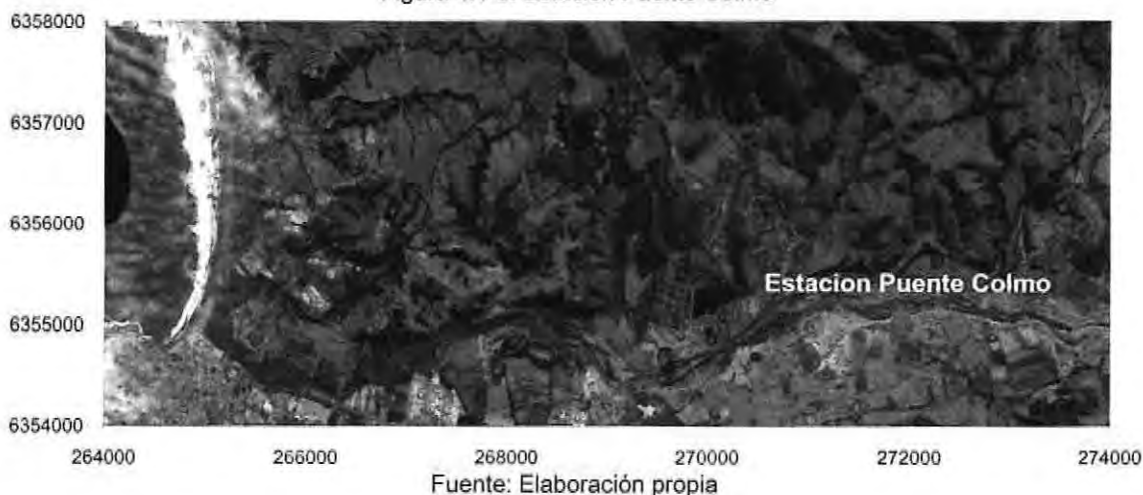
La serie de tiempo se analizó estadísticamente, obteniendo valores de caudal máximo, mínimo y promedio mensual de todo el registro, además se realizó un análisis estacional del caudal.

Tabla 4.1-2: Coordenadas estación Puente Colmo. Sistema coordenadas Geográfico y UTM (WGS84) HUSO 19

Coordenadas	Valor
Latitud	32°55'00" S
Longitud	71°25'00" W
Norte UTM	6355360,42
Este UTM	274005,44

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1-3: Estación Puente Colmo



#### 4.1.2 DESCRIPCIÓN DEL OLAJE

Para la caracterización del oleaje que afecta la zona de estudio se realizó una propagación espectral desde aguas profundas hacia aguas someras con el modelo STWAVE de la base de datos Olas Chile III nodo Valparaíso. Los resultados se presentan mediante tablas de incidencia de altura significativa espectral v/s período peak ( $H_{m0}/T_p$ ), período peak v/s dirección ( $T_p/DPK$ ) y altura significativa espectral v/s dirección ( $H_{m0}/DPK$ ), además de rosas de altura de ola que representan de forma gráfica rangos de magnitudes y periodos según su dirección.

##### 4.1.2.1 Modelo STWAVE.

STWAVE (Steady-State Spectral Wave Model), es un modelo de propagación de ondas gravitatorias generadas por viento (u oleaje) de tipo irregular (distribución espectral de altura, período y dirección) que resuelve las ecuaciones de balance de la acción del oleaje en forma estacionaria (permanente), por diferencias finitas. El modelo fue desarrollado por el "Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center" del U.S. Smith et al (2001).

Es un modelo espectral de fase promediada, en diferencias finitas, que simula el crecimiento, propagación y transformación del oleaje aproximándose a la costa, considerando los efectos de la refracción por fondo y por corrientes, difracción, asomeramiento, interacción ola – ola, rotura, redistribución y *whitecapping*.

#### 4.1.2.2 Método de transferencia aplicado

Existen diferentes tipos de metodologías de transferencia de oleaje disponibles para realizar la propagación del oleaje según Nicolau del Roure (2004). Cada una de ellas tiene sus propias características, las que se describen en términos generales a continuación:

- **Purista**  
Esta metodología propone la transferencia del registro completo de energía, cada espectro con sus características de altura (densidad espectral), periodo (frecuencia) y dirección.
- **Cuasipurista**  
Esta técnica propone obtener funciones de transferencia, esto se realiza propagando alturas de olas unitarias para distintos periodos y direcciones desde aguas profundas a someras fuera de la rompiente, las que posteriormente son aplicadas a los espectros de oleaje.
- **Cuasipurista modificado**  
Propone obtener funciones de transferencia al igual que la metodología cuasipurista, pero se incorporan propagaciones con alturas de olas de 1, 4 y 7 [m], con esto se pretende reflejar el oleaje rompiente y posibles no linealidades de la interacción entre componentes espectrales (aproximación).
- **Parámetros de resumen**  
Esta metodología propone obtener de cada espectro en aguas profundas los parámetros de resumen, altura significativa ( $H_{m0}$ ), periodo peak ( $T_p$ ) y dirección promedio de la energía (MWD) y estos son propagados como eventos individuales.

#### 4.1.2.3 Aplicación del modelo

Para la caracterización del oleaje en la zona de estudio se utilizó la metodología cuasi purista de transferencia espectral. Se empleó un rango de periodos de oleajes que van desde los 4 hasta los 24 segundos, lo que permite caracterizar todo el oleaje de viento (*Sea* y *Swell*) presente en la costas de Chile. En cuanto al dominio de las direcciones, se abarcó desde los 195° (SSW) a los 345° (N) con direcciones intermedias demarcadas cada 15° lo que permite definir el oleaje incidente desde todos los frentes de generación. Todos estos casos se

simularon con altura de ola igual a un metro. La propagación se realizó desde la profundidad de 500 m (para asegurar que se propaga desde aguas profundas) hasta una profundidad de 10 metros

Se realizó un total de 110 simulaciones (combinaciones de periodos y direcciones), estas fueron distribuidas en tres grillas orientadas al SW, W y NW. Cada una de estas se planteó bajo un esquema de anidamiento considerando una malla general de 250 metros de alto y ancho y una de detalle de 25 metros para una mejor representación del oleaje en la zona de interés. En la Tabla 4.1-3 se presentan los casos simulados según sus respectivas grillas, indicando la altura, el periodo y dirección propagada.

Tabla 4.1-3: Casos simulados para todas grillas numéricas empleadas.

<b>Grilla</b>	<b>Altura, Hmo (m)</b>	<b>Periodos, Tp (s)</b>	<b>Direcciones, Dpk (°)</b>
SW	1,0	4 a 24 @2	210, 225 y 240
W	1,0	4 a 24 @2	255, 270 y 285
NW	1,0	4 a 24 @2	300, 315, 330 y 345

Fuente: Elaboración propia.

Además se cuenta con la Figura 4.1-4 y la Tabla 4.1-4 que muestra las orientaciones y las dimensiones de cada grilla.

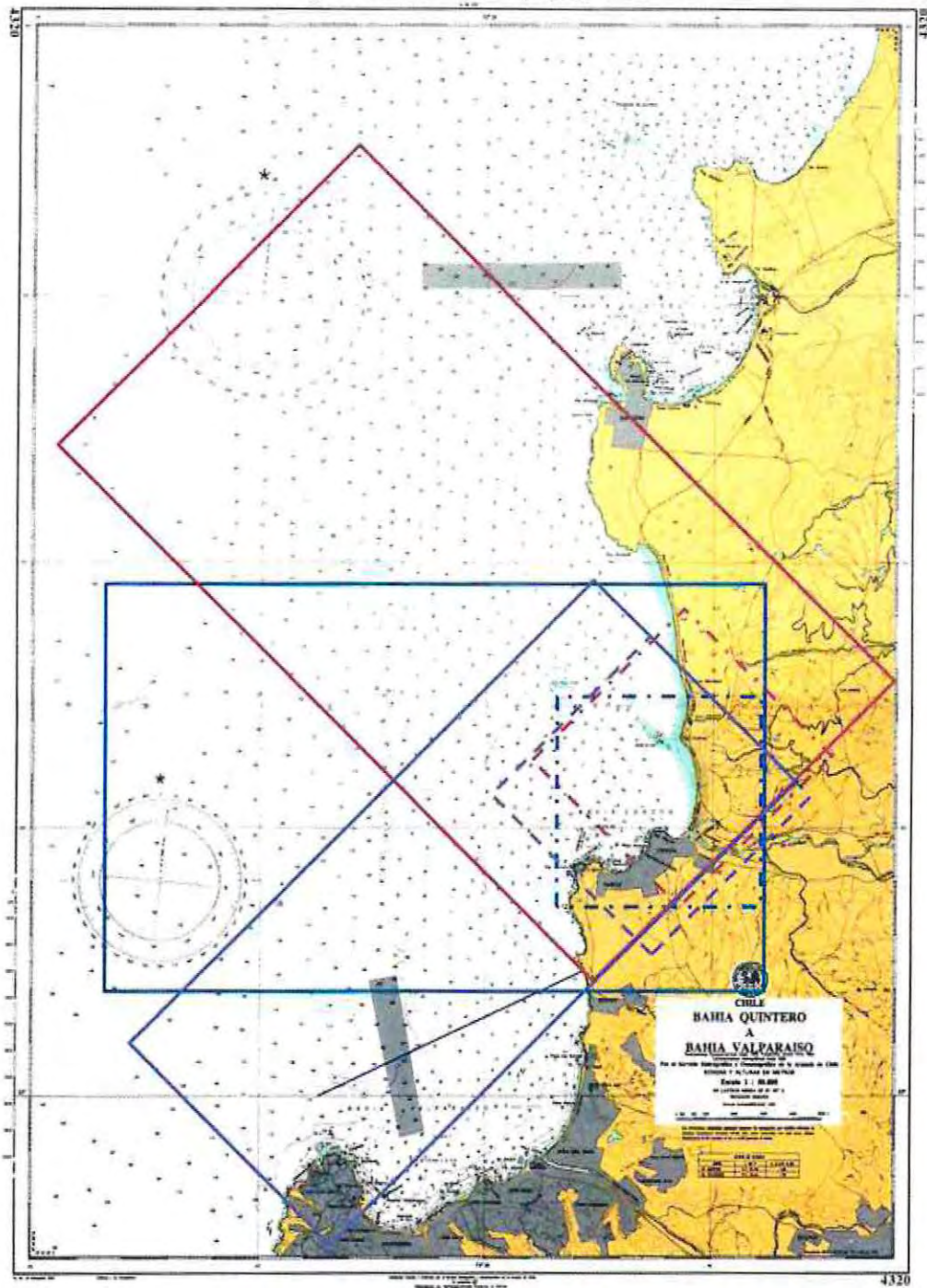
Tabla 4.1-4: Grillas de propagación

<b>Nombre grilla</b>	<b>Dirección grilla general</b>	<b>Dirección grilla detalle</b>
SW	225°	225°
W	270°	270°
NW	315°	315°

Fuente: Elaboración propia.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 4.1-4: Grillas de propagación



	Grilla general dirección NW
	Grilla general dirección NW
	Grilla detalle dirección W
	Grilla general dirección W
	Grilla general dirección SW
	Grilla general dirección SW

Fuente: Elaboración propia.

Con las funciones de transferencias y la base de datos de Olas Chile III se obtuvieron los datos de alturas de ola, periodo peak y direccione media, para un periodo de 30 años desde el 1 de enero de 1980 hasta el 1 de enero de 2010.

#### 4.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS MAREAS

Para el estudio y caracterización de la marea se emplearon datos obtenidos del modelo global del nivel del mar denominado *OSU TIDAL*<sup>1</sup> de la Universidad Estatal de Oregon, el cual para los fines del presente estudio entregó una serie de tiempo de altura desde el día 1 de Enero del 2010 a las 0:00 horas hasta el 31 de Diciembre a las 0:00 horas del mismo año, con un intervalo de muestreo de 10 min. La ubicación del punto de extracción de los datos se muestra en la Figura 4.1-5. Estos datos fueron calibrados con los pronósticos del SHOA para referenciarlos al nivel de marea en un plano equivalente al de las tablas de marea de Valparaíso.



El estudio de la serie de tiempo se realizó en base a dos análisis los cuales se describen a continuación.

<sup>1</sup> *OSU TIDAL* es un modelo de distribución gratuita que proporciona información del nivel del mar en el Océano Pacífico y Atlántico. Las series de tiempo las construye mediante la técnica conocida como inversión mareal.

#### 4.1.3.1 Análisis Armónico

Este se realizó con la rutina T\_Tide (Pawlowicz *et al.* 2002), la que a diferencia de otras permite tener series incompletas, usar series de tiempo espaciadas en 10 minutos, de larga data, entregando las constituyentes armónicas.

Con las constituyentes obtenidos se calcularon el nivel de reducción de sondas (NRS) de acuerdo con lo indicado en las Instrucciones Hidrográficas N°5 (SHOA PUB. 3105).

$$NRS = Z_0 - (M_2 + S_2 + N_2 + K_1 + O_1)$$

Fuente: SHOA PUB. 3105

Dónde:

NRS: nivel de reducción de sonda

$Z_0$ : nivel medio del mar referido al cero instrumental del período de registro.

$M_2$ : semiamplitud, constituyente lunar principal semidiurno.

$S_2$ : semiamplitud, constituyente solar principal semidiurno.

$N_2$ : semiamplitud, constituyente lunar eclíptica mayor semidiurno.

$K_1$ : semiamplitud constituyente lunisolar declinacional diurno.

$O_1$ : semiamplitud constituyente lunar declinacional diurno.

También se determinó el régimen mareal de acuerdo con el coeficiente de Courtier o factor de forma (Pugh, 1987), el cual consiste en el cociente de las cuatro principales constantes armónicas que determinarán el tipo de marea que corresponde.

$$\frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} < 0.25 \text{ Régimen semidiurno}$$
$$0.25 < \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} < 1.50 \text{ Régimen mixto semidiurno}$$
$$3.00 < \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \text{ Régimen Diurno}$$

Fuente: Pugh, D.T. 1987.

#### 4.1.3.2 Análisis no armónico

El análisis no armónico se basó en el cálculo de planos mareales los que se definen según lo indicado en las Instrucciones Hidrográficas N° 1 (SHOA PUB 3201). A continuación se mencionan algunos de estos:

- Altura Media de la Pleamar más alta.
- Altura Media de la Pleamar.
- Nivel Medio de la Marea.
- Nivel Medio del Mar.
- Altura Media de la Bajamar.
- Altura Media de la Bajamar más baja.
- Rango Medio de la Marea.
- Rango de la Marea en Sicigias.

#### 4.1.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES

Se contó con datos de cuatro campañas enmarcadas en diferentes proyectos de investigación en donde se tomaron muestras de sedimentos superficiales. Cada una de las campañas se describen a continuación.

##### 4.1.4.1 Campaña I

Esta campaña se realizó en Abril del 2001 para proveer información de campo empleada por Martínez y Cortez (2007) la zona muestreada abarcó desde el estuario hasta tres kilómetros aguas arriba y el sector de la playa delimitado por Punta Concón por el sur y Punta Piedra por el norte con 23 estaciones de muestreo dentro del estuario y 14 a lo largo de la playa como se aprecia en la Figura 4.1-6.

Los métodos utilizados para la toma de muestras y análisis de las mismas en el estuario y en la playa son diferentes. En el primer ambiente se utilizó una draga manual, luego los sedimentos se analizaron mediante densimetría, con el método Bouyoucus (1962). Para clasificar las muestras, se aplicó el triángulo textural de Shepard (1954) que se muestra en la Figura 4.1-7. Cabe destacar que solo se contó con los resultados del estudio para la zona

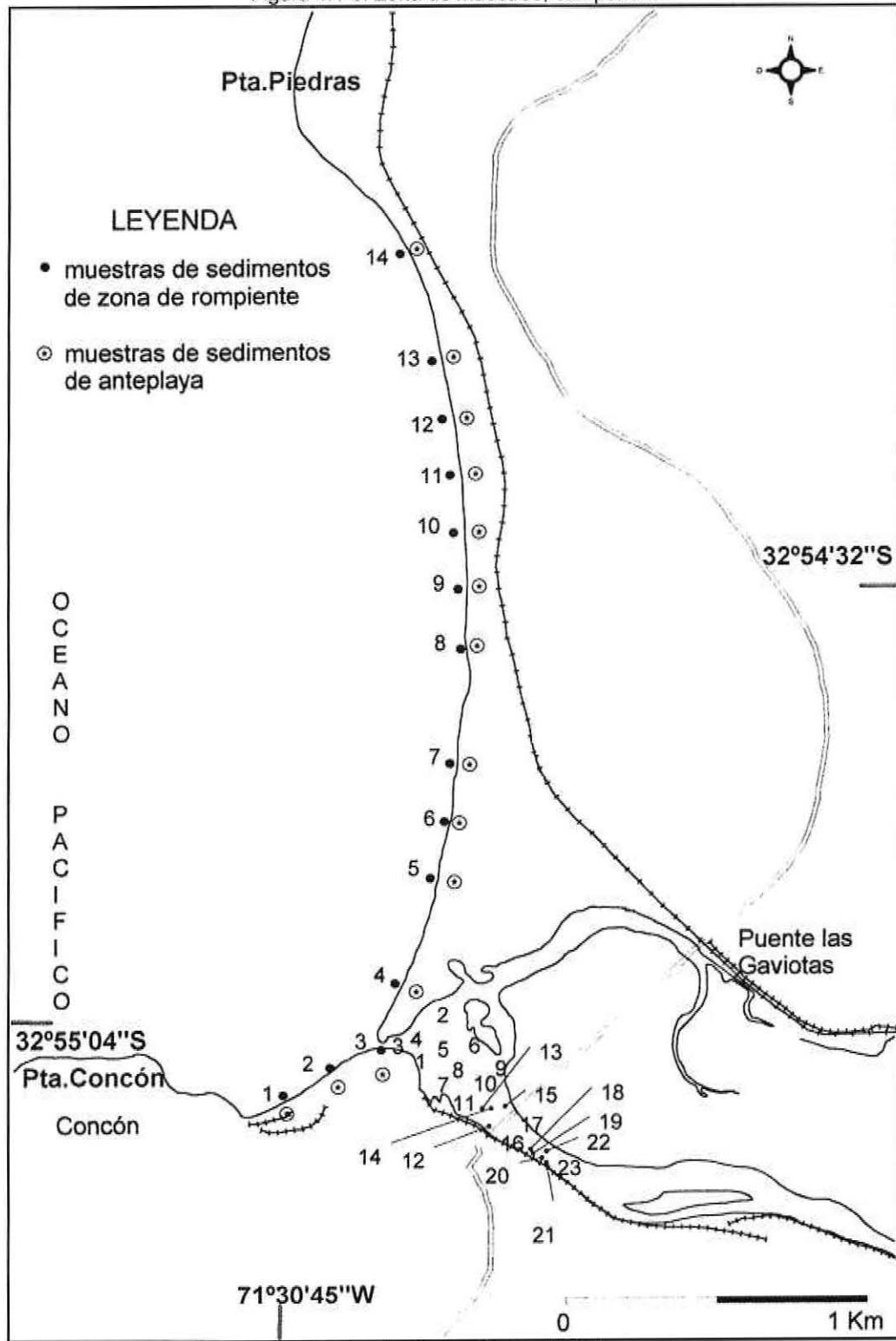
interior del estuario, por lo mismo se presentan las mismas imágenes que el estudio "Características hidrográficas y sedimentológicas en el estuario del río Aconcagua".

Las muestras que caracterizaron la playa fueron tomadas cada 200 metros, en la zona de rompiente y anteplaya, tal como se indica en la Figura 4.1-6. En este caso se obtuvieron datos del contenido de cada muestra lo que permitió realizar dos tipos de análisis: El primero es el granulométrico empleando la clasificación de Wentworth (1922) para catalogar el comportamiento textural. El segundo fue el estadístico el cual permitió identificar la forma en que se separan o aglomeran valores de acuerdo a su representación gráfica, estas medidas describen la manera como los datos tienden a reunirse de acuerdo con la frecuencia con que se hallen dentro de la información, su utilidad radica en la posibilidad de identificar las características de la distribución sin necesidad de generar el gráfico los parámetros son: Curtosis, Asimetría, Tamaño Promedio y Desviación estándar, los que permiten identificar el tipo de sedimento conforma la muestra con lo que se crearan mapas de colores en donde se podrá apreciar el tipo de sedimento en la zona muestreada.



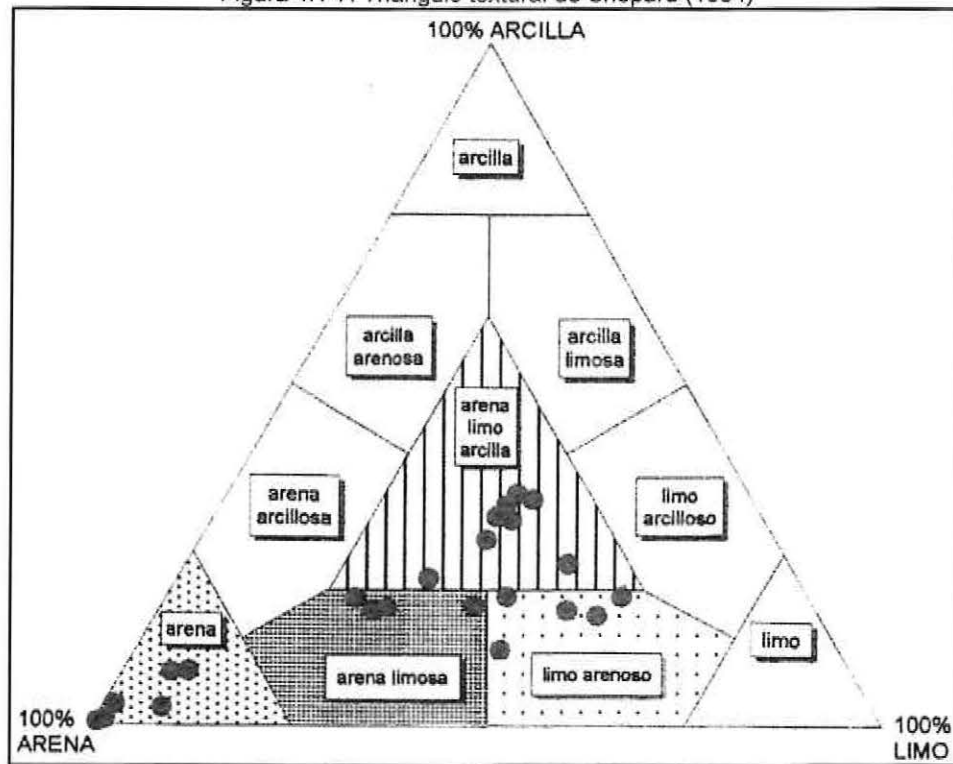
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 4.1-6: Zona de muestreo, campaña I.



Fuente: Martínez y Cortez (2007)

Figura 4.1-7: Triángulo textural de Shepard (1954)



Fuente: Martínez y Cortez (2007)

#### 4.1.4.2 Campañas II, III y IV

Estas campañas se enmarcaron bajo el proyecto DIPUV N°13 - 2002 de la Universidad de Valparaíso, para estudiar la "Geomorfología y dinámica del estuario Aconcagua". Debido a lo mismo el método de muestreo y la ubicación de las mismas fueron idénticos para las tres campañas. Las fechas de cada levantamiento se presentan en la Tabla 4.1-5 cabe destacar que en algunos casos no se pudieron extraer o procesar los datos ya que las mismas contaban con una gran cantidad de hidrocarburos, según declararon los autores.

Tabla 4.1-5: Fechas campañas II, III, IV. Sedimentos

Campaña	Fecha	N° De Estaciones	Muestras Analizadas
II	11 de Septiembre del 2002	24	22
III	17 de Julio de 2003	24	16
IV	18 de Abril de 2004	24	10

Fuente: Elaboración propia.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

El muestro se realizó en la zona interior del estuario del río, la ubicación de cada muestra se aprecia en la Figura 4.1-8 y las coordenadas se presentan en la Tabla 4.1-6.



Tabla 4.1-6: Ubicación de las muestras, campañas II, III, IV. Sedimentos

Estación	Este	Norte	Estación	Este	Norte
1	265330	6354999	13	266349	6354560
2	265362	6355027	14	266386	6354592
3	265485	6354847	15	266564	6354477
4	265534	6354905	16	266577	6354511
5	265613	6354736	17	266708	6354403
6	265643	6354767	18	266729	6354447
7	265809	6354613	19	266772	6354429
8	265831	6354644	20	266803	6354414
9	265963	6354500	21	265665	6355255
10	265984	6354576	22	265927	6355434
11	266197	6354591	23	266087	6355442
12	266209	6354642	24	266289	6355320

Fuente: Elaboración propia

Las muestras tomadas fueron superficiales, es decir, extraen sedimentos en los primeros 10 cm de profundidad, y tal como se mencionó anteriormente no se contó con todas las muestras, debido a esto los resultados se presentan considerando el valor promedio de en cada transecta (ver Figura 4.1-9), ya que no todas ellas cuentan con más de una muestra.



Al igual que en la campaña I se realizaron análisis granulométricos y estadísticos en cada campaña los que permitió identificar el tipo de sedimento conforma la muestra con lo que se crearon mapas de colores en donde se podrá apreciar el tipo de sedimento en la zona muestreada.

#### 4.1.5 CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO.

Para la caracterización del viento en la zona de estudio, se tomaron datos del proyecto "El Explorador de Energía Eólica", el cual es una herramienta en línea destinada a la evaluación del potencial eólico que resulta de una estrecha y prolongada colaboración entre el Ministerio de Energía, la Agencia de Cooperación Internacional Alemana (GIZ) y el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

##### 4.1.5.1 El Explorador de Energía Eólica

Esté forma parte de un avanzado sistema de modelación computacional de la atmósfera, dentro del cual su función fundamental es la divulgación facilitada de información relevante para la caracterización del recurso viento. En esta, su última versión, el Explorador de Energía Eólica pone a disposición una enorme cantidad de información cuya calidad y confiabilidad ha sido rigurosamente evaluada. Conjuntamente, ofrece un amplio y robusto conjunto de herramientas del más alto nivel, las cuales posibilitan que cualquier usuario ejecute análisis avanzados.

La modelación desarrollada proporciona datos simulados con un modelo atmosférico de mesoescala, el modelo empleado fue el WRF (Weather Research and Forecasting) versión 3.2 desarrollado por la NCAR (National Center of Atmospheric Research) en Estados Unidos. El modelo fue aplicado con una resolución de 1 kilómetro, además cuenta con 12 niveles verticales entre los 0 y 200 metros de altura.

A continuación se presenta la Figura 4.1-10 en donde se indica la ubicación del punto de extracción de los datos. Estos van desde el 1 de enero del 2010 hasta el 31 de diciembre del mismo año, con un espaciamiento de una hora entre ellos.



Para la caracterización del clima operacional del viento se realizó un análisis estadístico considerando la escala de Beaufort y una banda de 16 direcciones. Se generó una tabla de incidencia, además de histogramas de frecuencia relativa.

Para complementar el análisis de los datos de viento se genera el análisis de ciclo horario el cual enseña el cambio de las magnitud y direcciones promedio a lo largo del día.

#### 4.1.6 CARACTERIZACIÓN DE CORRIENTES

Al igual que los datos de sedimentos, las datos de corrientes analizadas proceden del proyecto DIPUV N°13 - 2002 de la Universidad de Valparaíso, para la "Geomorfología y dinámica del estuario Aconcagua".

Se contó con tres campañas las que se detallan a continuación en la Tabla 4.1-7, en estas los datos obtenidos representan la magnitud y dirección de procedencia de las corrientes en la superficie del estuario. Si bien se cuenta con 24 estaciones cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 4.1-8 (las mismas de los sedimentos ver Figura 4.1-11), no se obtuvieron datos en todas ellas debido a mal funcionamiento del instrumento utilizado, este fue un correntómetro del tipo yo-yo, el cual fue trasladado de estación en estación en una embarcación Zodiac MK III.

Tabla 4.1-7: Datos campaña de muestreo corrientes.

<b>Campaña</b>	<b>Fecha</b>	<b>N° de Estaciones</b>	<b>Datos Utilizados</b>
<b>Campaña I</b>	8 de Abril del 2002 entre las 14:50 a las 20:30 horas.	24	17
	11 de Septiembre del 2002 entre las 2:25 a las 6:47 horas.	24	22
<b>Campaña II</b>	17 de Julio del 2003 entre las 11:52 a las 16:19 horas.	24	11
<b>Campaña III</b>	18 de Abril del 2004 entre las 12:26 y las 19:12 horas.	24	16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1-8: Coordenadas de las muestras campañas I; II, III. Corrientes.

<b>Estación</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Estación</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>
<b>1</b>	265330	6354999	<b>13</b>	266349	6354560
<b>2</b>	265362	6355027	<b>14</b>	266386	6354592
<b>3</b>	265485	6354847	<b>15</b>	266564	6354477
<b>4</b>	265534	6354905	<b>16</b>	266577	6354511
<b>5</b>	265613	6354736	<b>17</b>	266708	6354403
<b>6</b>	265643	6354767	<b>18</b>	266729	6354447
<b>7</b>	265809	6354613	<b>19</b>	266772	6354429
<b>8</b>	265831	6354644	<b>20</b>	266803	6354414
<b>9</b>	265963	6354500	<b>21</b>	265665	6355255
<b>10</b>	265984	6354576	<b>22</b>	265927	6355434
<b>11</b>	266197	6354591	<b>23</b>	266087	6355442
<b>12</b>	266209	6354642	<b>24</b>	266289	6355320

Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

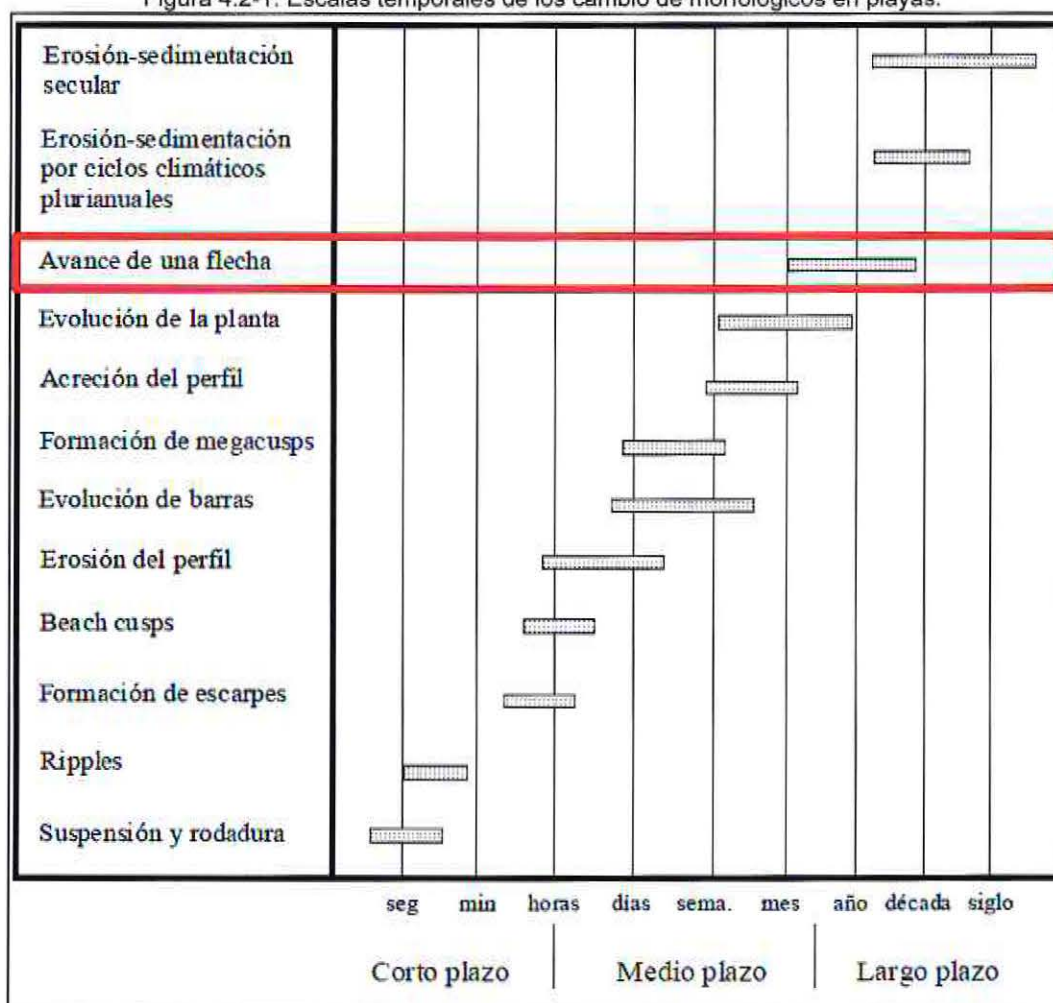


Los resultados se presentan en tablas donde se muestran las magnitudes y direcciones de las corrientes por estación además se muestran los datos de manera gráfica en figuras georreferenciadas.

## 4.2 ANÁLISIS HISTÓRICO DE LA LÍNEA DE COSTA

Los cambios presentados en una barra litoral se consideran procesos entre mediano y largo plazo como se aprecia en la Figura 4.2-1, es decir, que se presentan debido a la acción de los agentes involucrados ya sean los ciclos pluviales y anuales de un río o bien el oleaje operacional que actúan en periodos de meses a años, por ejemplo.

Figura 4.2-1: Escalas temporales de los cambio de morfológicos en playas.



Fuente: Documento temático, regeneración de playas. Universidad de Cantabria.

Mediante el uso de un set de fotografías aéreas de la zona representativo de 34 años (ver Tabla 4.2-1), se pudo realizar una comparación histórica del cambio y tendencias estacionales.

Estas fotografías fueron georreferenciadas, el error en este proceso se calculó mediante el valor residual (RMS), este no sobre paso los 0,30 [m], lo que quiere decir que cada punto podría tener 30 [cm] de diferencia entre la posición real y la posición digitalizada.

Además se cuenta con la base de datos de oleaje y caudales que permiten relacionar el comportamiento de la barra ya sea en su formación o en forma.

Tabla 4.2-1: Set de fotografías aéreas.

<b>Fuente</b>	<b>Vuelo</b>	<b>Escala</b>	<b>Fecha</b>	<b>Estación</b>
<b>SHOA</b>	No aplica	No aplica	Octubre de 1977	Primavera
<b>SAF</b>	CH:30	1:30000	12 de Junio de 1980	Otoño
	Fomdec	1:20000	21 de Octubre de 1994	Primavera
	Geotec	1:70000	23 de Diciembre de 1997	Verano
	Color	1:20000	Septiembre de 2005	Invierno
<b>Google earth</b>	No aplica	No aplica	17 de Diciembre de 2004	Primavera
	No aplica	No aplica	19 de Agosto de 2007	Invierno
	No aplica	No aplica	14 de Octubre de 2008	Primavera
	No aplica	No aplica	28 de Marzo de 2009	Otoño
	No aplica	No aplica	31 de Mayo de 2009	Otoño
	No aplica	No aplica	8 de Marzo de 2010	Verano
	No aplica	No aplica	1 de Febrero de 2011	Verano
	No aplica	No aplica	2 de Agosto de 2011	Invierno

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.1 CAMBIO HISTÓRICO

Para estudiar el cambio histórico en la línea de costa se presentan ilustraciones en donde se muestra una fotografía como situación base (Octubre de 1977, la más antigua del set), además de dos líneas de costa de años consecutivos para poder evaluar los cambios a lo largo de la historia. En base a esto se realizó un análisis cualitativo en donde se describe los cambios notorios de la zona de la playa y el estuario. Igualmente se realizó un análisis cuantitativo en donde se cuantificó la diferencia entre líneas de costa consecutivas, estos resultados se muestran en gráficos.

#### 4.2.2 ANÁLISIS ESTACIONAL

Para el análisis estacional se separó el set fotográfico según las estaciones centrandolo análisis en la zona del estuario. También se contó con los datos de oleaje y caudal en las mismas estaciones a lo largo del tiempo lo que permitió un mejor estudio. Los resultados de esto se presentan de manera gráfica en el capítulo correspondiente.

### 4.3 SIMULACION NUMÉRICA - MODELO FESWMS.

La caracterización hidrodinámica y morfodinámica del sector del estuario Aconcagua se realizó mediante la aplicación del modelo numérico FESWMS (Federal Highway Administration's Finite Element Surface-water Modeling System) desarrollado por Froehlich (2003), que resuelve las ecuaciones promediadas de flujo y transporte de sedimentos (FST2DH) aplicando un esquema de elementos finitos.

#### 4.3.1 GENERALIDADES DEL MODELO FESWMS

El modelo FESWMS puede ser aplicado para simular los flujos y transporte de sedimentos no cohesivos en ríos, estuarios y zonas costeras. Su configuración permite adoptar soluciones estacionarias (steady-state) o con dependencia del tiempo (dynamic), siendo capaz de simular tensión de corte y fricción en el fondo, tensión de corte inducida por el viento, efectos de Coriolis, tensión de corte inducida por la turbulencia, tensión de corte en régimen mixto de olas y corrientes, gradientes de presión barométrica y ciclones tropicales, marejadas (storm surge), inundación y vaciado, presiones bajo losas de puentes (por aumento de caudal), resistencia al flujo impuesta por pilas de un puente, socavación local en las pilas de un puente, transporte de sedimentos para diversos tamaños de partículas no-cohesivas, erosión y depositación de sedimentos, efectos del oleaje en aguas someras sobre el transporte de sedimentos, flujos supercríticos y resaltos hidráulicos, combinación de flujos uni y bi-dimensionales en el flujo y transporte de sedimentos.

Para resolver la hidrodinámica se aplican las ecuaciones promediadas en la profundidad para representar las velocidades ortogonales (U y V) y posteriormente resuelve la ecuación de continuidad del flujo de masa. Dichas ecuaciones se presentan a continuación:

$$U = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_w} u(z) dz \quad V = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_w} v(z) dz \quad \frac{\partial z_w}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} = q_m$$

Donde  $z_b$  es la elevación del fondo,  $z_w$  es la elevación de la superficie del mar, H profundidad del agua,  $q_1 (=UH)$  flujo de agua en la dirección x,  $q_2 (=VH)$  flujo de agua en la dirección y; y  $q_m$  es el flujo de masa que ingresa o sale del dominio (término no conservativo).

La ecuación de gobierno general que describe el transporte de momentum tanto para el eje x como el eje y, se presenta a continuación:

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{q_1^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + g H \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \Omega q_2 + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{bx} - \tau_{sx} - \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right] = 0$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \beta \frac{q_1^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + g H \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \Omega q_1 + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{by} - \tau_{sy} - \frac{\partial(H\tau_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right] = 0$$

Donde  $\beta$  corresponde al coeficiente de corrección de flujo de momento isotrópico que representa la variación vertical de la velocidad del flujo, por su parte  $g$ ,  $\rho$ ,  $p_a$  y  $\Omega$  son la aceleración de gravedad, densidad del fluido, presión atmosférica y parámetro de Coriolis, respectivamente. Los términos turbulentos son incluidos separándolos en dos tipos, los asociados a la fricción de fondo ( $\tau_{bx}$  y  $\tau_{by}$ ) y debido a la turbulencia del flujo ( $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yx}$  y  $\tau_{yy}$ ).

Como modelo de turbulencia FESWMS aplica el concepto de la viscosidad de Eddy, ligándola al movimiento mediante la ecuación de Smagorinsky (1963), mientras que para representar la fricción de fondo emplea la aproximación por coeficientes de Manning o Chezy, según seleccione el modelador.

Tomando los resultados de salida de la hidrodinámica, FESWMS determina el transporte de sedimentos mediante la solución de la ecuación promediada en la profundidad y aplicando diversas ecuaciones de caudal sólido, siendo estas las que se presentan en la Tabla 4.3-1 donde además se muestran los rangos de validez para su aplicación, los cuales están ligados al diámetro de las partículas del lugar a modelar.

Tabla 4.3-1: Rangos de validez de las ecuaciones de transporte de sedimentos utilizadas en el modelo FESWMS.

Fórmula	Rango de validez [mm]
Power Formula	No especificado
Engelund-Hansen Formula (1967)	No especificado por los autores.
Ackers-White Formula (1973)	0.04 a 7.0
Ackers-White-Day Formula (1983)	0.04 a 7.0
Laursen Formula (1958)	0.062 a 2.0
Yang's Sand and Gravel Formula (1972, 1973, 1984)	0.15 a 7.0
Meyer-Peter—Mueller Formula (1948)	0.4 a 29
Garbrecht et al. Approach	0.15 a 7.0

Fuente: Elaboración propia

Complementariamente el modelo FESWMS brinda la capacidad de obtener la evolución morfodinámica mediante la configuración de aporte permanente de sedimentos (equilibrio) o reales de caudal sólido en las condiciones de borde para las cuales se ha definido un flujo, lo

que mediante el comportamiento hidrodinámico del lugar, brinda la posibilidad de estimar zonas de erosión o depositación.

#### 4.3.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO

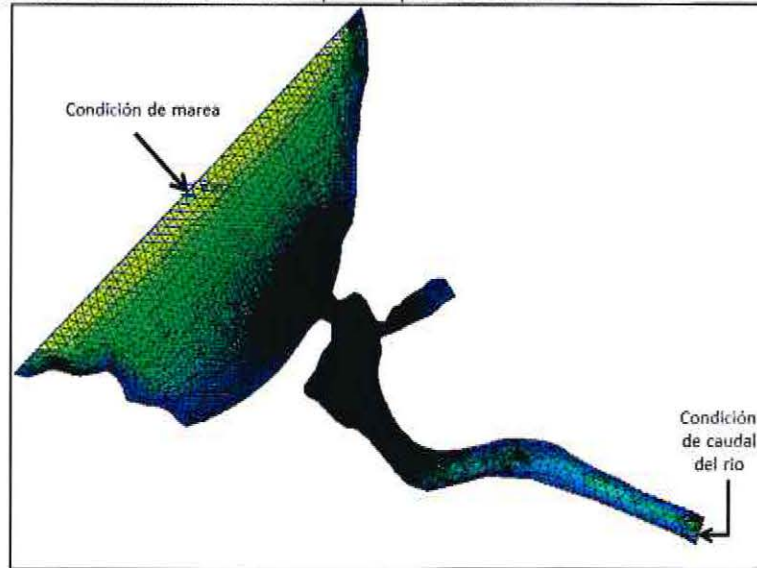
Para la calibración del modelo se contó con información de campo lo que consistió en datos de mareas en la laguna estuarial la que tuvo una extensión de 14 días de mediciones, las cuales van desde el día 19 de Agosto del 2002 a las 9:45 horas hasta el día 2 de Septiembre de 2002 a las 21:45 horas con un intervalo de tiempo de 5 minutos entre cada dato. En la Figura 4.3-1 se muestra la ubicación del instrumento.



El modelo FESWMS se configuró mediante 9.863 elementos finitos y con un total de 20.340 nodos, en lo relativo a su geometría. Temporalmente se consideró un intervalo de tiempo de 10 minutos para la extracción de los resultados. El área de modelado se presenta en la Figura 4.3-2 la que muestra además la malla de simulación, las condiciones de borde se ingresaron aguas arriba con el caudal del río y en la zona costera la condición de marea.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 4.3-2: Dominio numérico empleado para la calibración del modelo FESWMS.



Fuente: Elaboración propia

Así también se define la rugosidad del sedimento presente en el lecho del río, con el coeficiente de Manning y el de Chezy, los que generalmente se encuentran tabulados. En este caso se empleó valores dependientes del diámetro de las partículas presentes del sector y la profundidad a la cual se encuentra de acuerdo a las fórmulas de García Flores:

$$n = \frac{0.111d^{\frac{1}{6}}}{2\log\left(\frac{d}{D_{84}}\right) + 0.7919}$$

$$C = 5.756\log\left(\frac{d}{D_{84}}\right) + 3.698$$

Donde  $n$  es el coeficiente de Manning,  $d$  la profundidad y  $D_{84}$  el diámetro del sedimento excedido por el 84% de la muestra y  $C$  el coeficiente de Chezy.

### 4.3.3 ESCENARIOS SIMULADOS

#### 4.3.3.1 Caracterización hidrodinámica del estuario.

La variación del nivel del mar en la boca del estuario, en conjunto con la magnitud del caudal afluente y la morfología del cauce, condicionan el escurrimiento y por ende sus procesos de mezcla. Es por este motivo que se considera crítica la condición de marea de sicigia, dado que conceptualmente implica un mayor alcance de la influencia del mar dentro del cauce del río, definiendo finalmente un estuario de mayor extensión. Por otro lado, la condición de marea de cuadratura puede implicar una menor capacidad de mezcla por parte del mar, por lo cual también se considera igualmente crítica.

Por lo anteriormente mencionado se simulan series de tiempo de marea de 24 horas con intervalos de 10 minutos para las condiciones de sicigia y cuadratura de cada mes, además de los caudales máximo, medio y mínimo mensual los que se presentan en Tabla 4.3-2, lo que genera un total de 72 simulaciones para caracterizar el comportamiento de las corrientes en el estuario. Después del análisis de los resultados se redujo el número de modelaciones para el análisis de transporte de sedimentos.

Tabla 4.3-2: Valores mínimo, promedio y máximo de caudales en [m<sup>3</sup>/s].

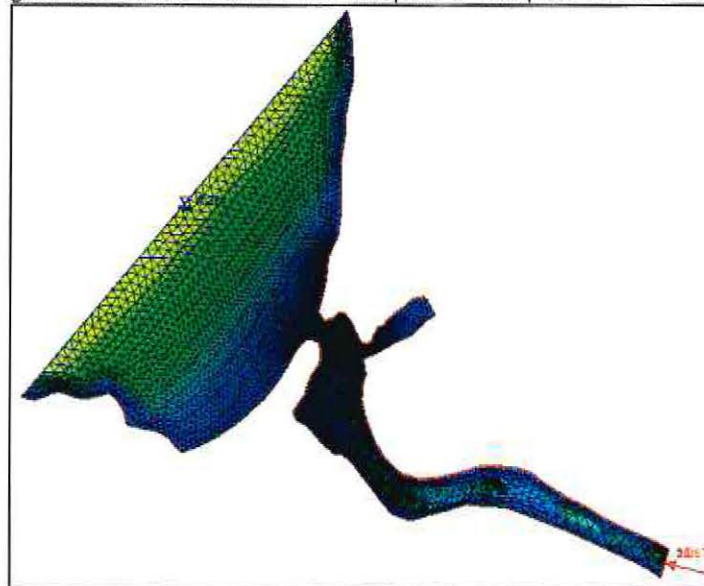
<b>Mes</b>	<b>Mínimo [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Promedio [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Máximo [m<sup>3</sup>/s]</b>
<b>Enero</b>	0.07	31.22	115.08
<b>Febrero</b>	0.03	16.65	80.07
<b>Marzo</b>	0.19	12.99	45.39
<b>Abril</b>	0.03	13.40	36.67
<b>Mayo</b>	1.13	21.01	55.41
<b>Junio</b>	8.01	32.02	96.31
<b>Julio</b>	10.49	38.92	103.75
<b>Agosto</b>	5.79	32.08	107.58
<b>Septiembre</b>	2.25	26.31	153.52
<b>Octubre</b>	0.43	21.61	48.42
<b>Noviembre</b>	0.22	35.86	117.90
<b>Diciembre</b>	0.19	37.21	156.70

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la malla esta se configuró con 9.863 elementos y 20.340 nodos como se muestra en la Figura 4.3-3.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 4.3-3: Malla modelo FESWMS para el transporte de sedimento.



Fuente: Elaboración propia.

Se analizaron series de tiempo de velocidad de corrientes en cuatro secciones del estuario como se aprecia en la Figura 4.3-4, en la primera y última se tomaron 3 puntos de extracción, mientras que en la segunda y tercera fueron cuatro las estaciones de monitoreo, enumeradas desde la ribera norte hacia la sur. Además de seis estaciones en la ribera interior de la barra litoral. Los resultados detallados se presentan en Anexo B – Resultados de la simulación numérica – Modelo FESWMS.

Figura 4.3-4: Puntos de extracción de datos modelo FESWMS.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.3.2 Transporte de sedimento con barra litoral.

Para determinar el transporte de sedimento del estuario del río Aconcagua se realizaron 24 simulaciones numéricas (Tabla 4.3-3), las cuales contemplaron dos series de mareas en condición de sicigia y cuadratura y caudal máximo de cada mes, para todos aquellos en donde el flujo fue mayor a 60m<sup>3</sup>/s.

Cuando los caudales máximos no superaron el valor mencionado solo se consideró la condición de sicigia. Con esto se caracterizó la situación más favorable y desfavorable en cuanto a las mareas, mientras que para el caudal se analizó el máximo ya que este es el que genera mayores corrientes las que a su vez inducen el mayor transporte de sedimento.

La configuración del modelo fue la misma empleada para la caracterización de las corrientes (Figura 4.3-3). Cabe destacar que el conjunto de escenarios simulados se consideró la fórmula de Ackers – White – Day debido al rango de validez en relación al tamaño de los sedimentos presentes en el lecho.

Tabla 4.3-3: Casos simulados para el transporte de sedimentos.

Mes	Cuadratura	Sicigia	Caudal Máximo
Enero	X	X	115.08
Febrero	X	X	80.07
Marzo		X	45.39
Abril		X	36.67
Mayo		X	55.41
Junio	X	X	96.31
Julio	X	X	103.75
Agosto	X	X	107.58
Septiembre	X	X	153.52
Octubre		X	48.42
Noviembre	X	X	117.90
Diciembre	X	X	156.70

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.3.3 Transporte de sedimento sin barra litoral.

Para caracterizar el transporte de sedimento en la zona de la desembocadura se plantó la evolución de la barra para diferentes longitudes, siendo cuatro las configuraciones adoptadas y que se muestran en las Figura 4.3-5, 3 – 4, 3 – 5 y 3 – 6, además se presenta la Tabla 4.3-4 en donde se indican la cantidad de elementos y nodos de cada malla utilizada en conjunto con el largo de la barra modelada. Se realizaron en total cuatro modelaciones con la

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

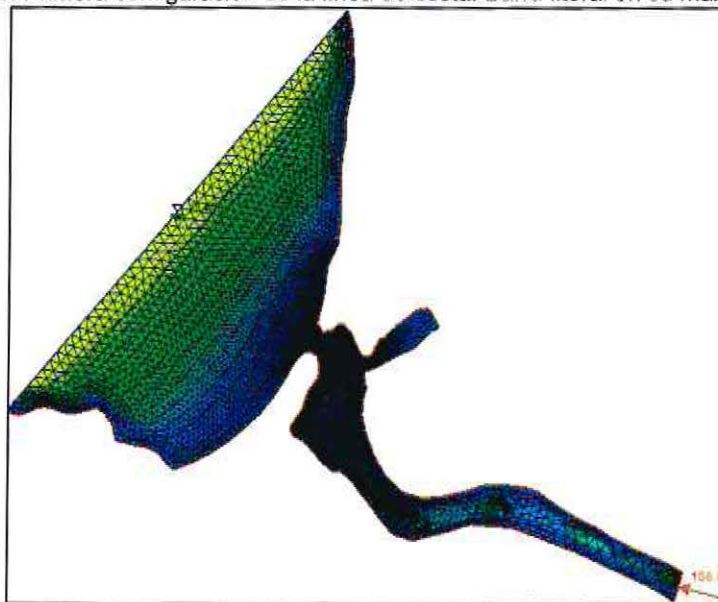
misma serie de tiempo de marea de 24 horas con intervalos de 10 minutos con el caudal máximo registrado en el periodo analizado de los caudales.

Tabla 4.3-4: Datos de configuración modelo FESWMS.

<b>Configuración de la línea de costa</b>	<b>Largo de la barra</b>	<b>Elementos</b>	<b>Nodos</b>
Primera configuración	320 metros	1.967	5.382
Segunda configuración	260 metros	1.908	5.243
Tercera configuración	160 metros	1.880	5.165
Cuarta configuración	-----	1.842	5.081

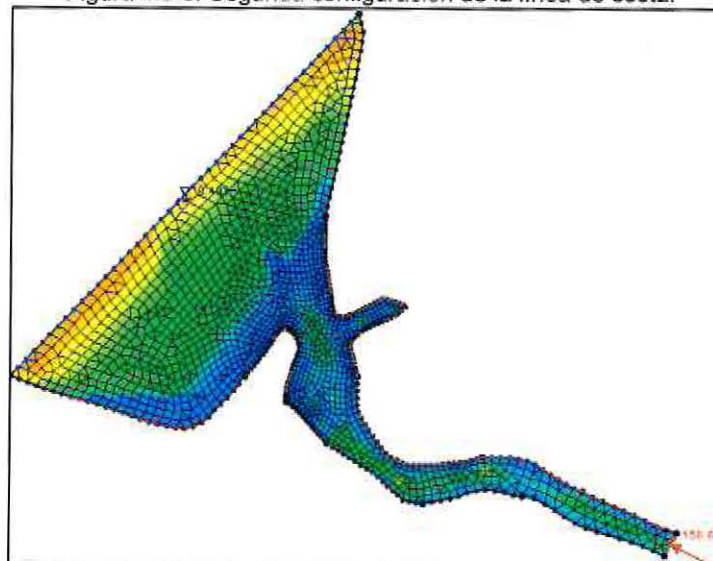
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3-5: Primera configuración de la línea de costa. Barra litoral en su máxima longitud.



Fuente: Elaboración propia

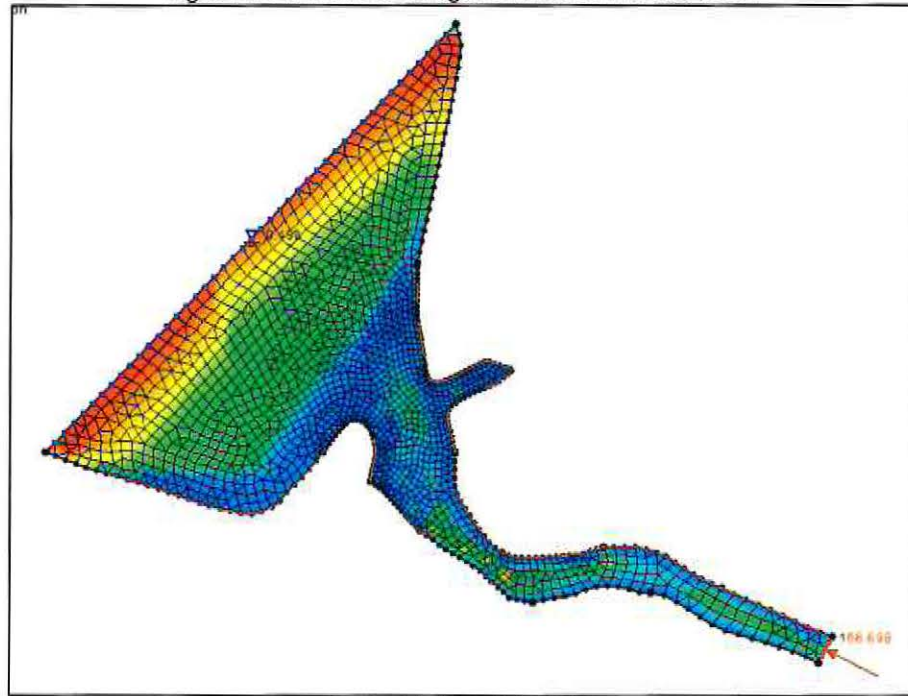
Figura 4.3-6: Segunda configuración de la línea de costa.



Fuente: Elaboración propia

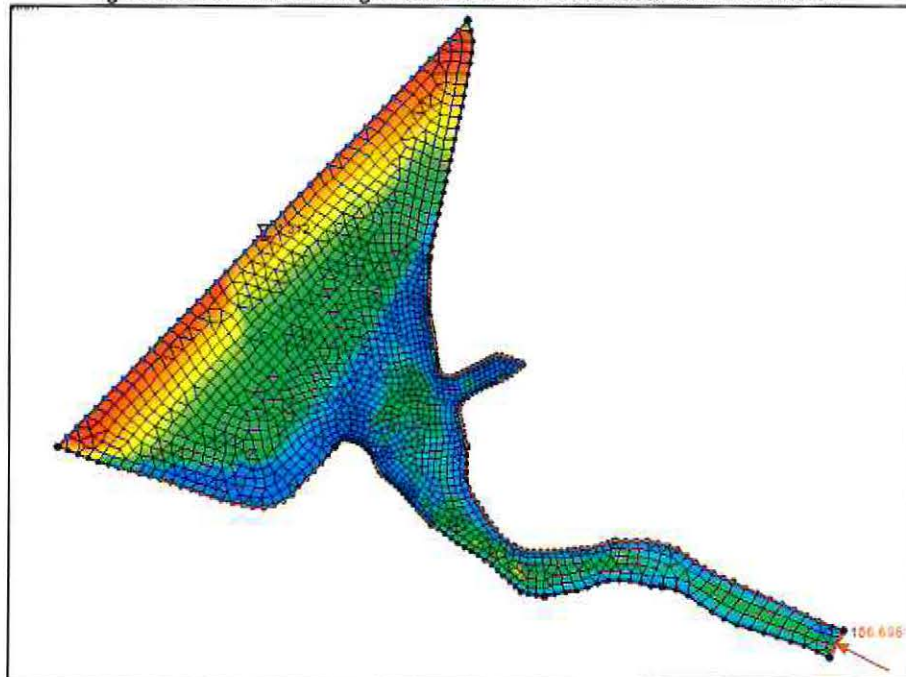
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 4.3-7: Tercera configuración de la línea de costa.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3-8: Cuarta configuración de la línea de costa Sin barra litoral.



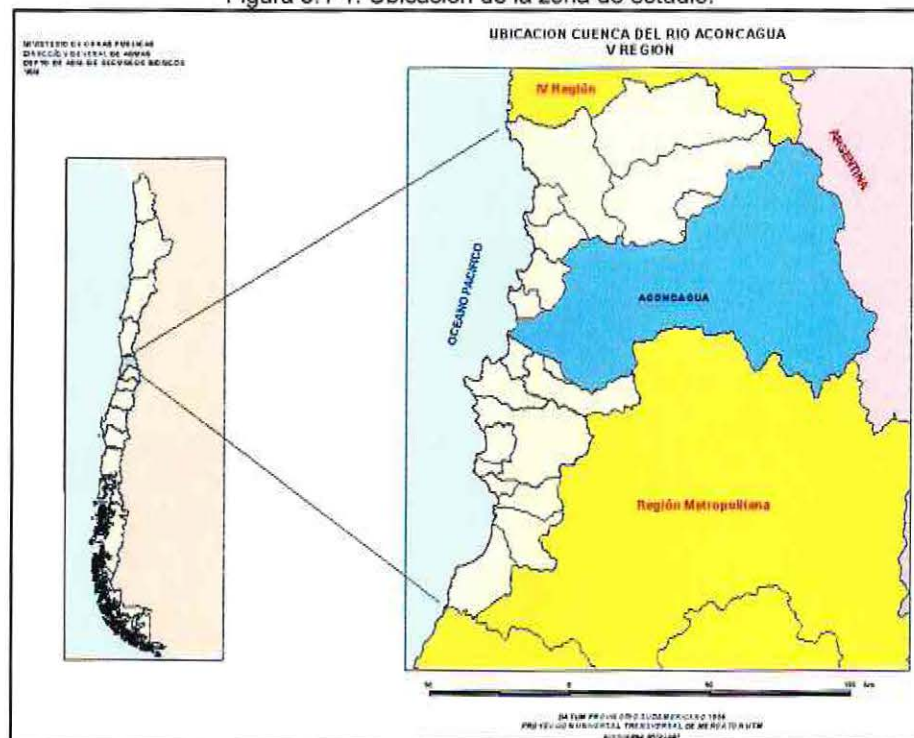
Fuente: Elaboración propia

## 5 RESULTADOS

### 5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio (Figura 5.1-1) se encuentra ubicada en la Quinta Región de Chile, específicamente en la desembocadura del Río Aconcagua en la comuna de Concón, está emplazada en la zona norte del Gran Valparaíso, limita además con Quintero.

Figura 5.1-1: Ubicación de la zona de estudio.



Fuente: DGA 2004

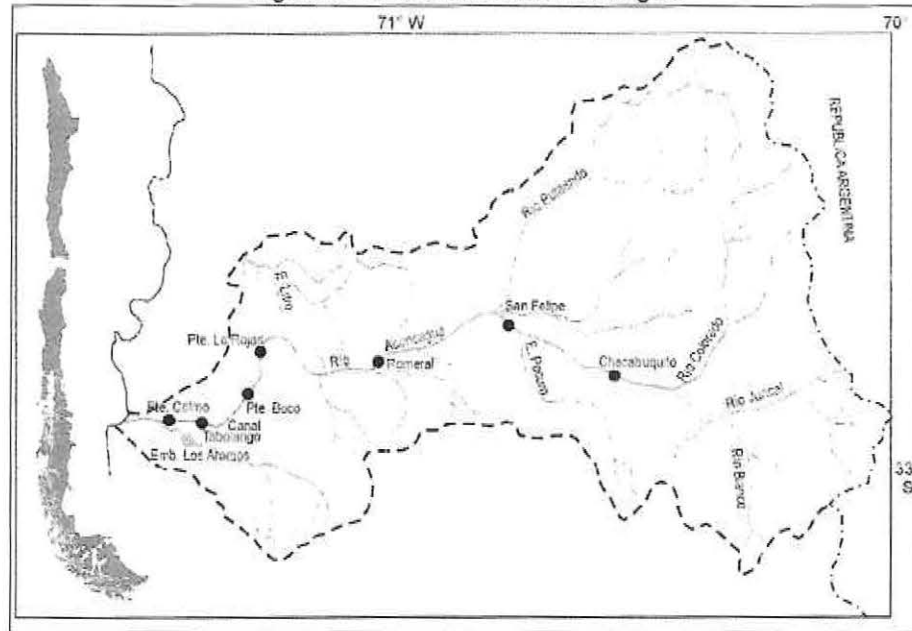
#### 5.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA

La cuenca del río Aconcagua tiene una extensión de 7.340 Km<sup>2</sup> y su rumbo general es de E a W. El cauce se forma de la confluencia de los ríos Juncal y Blanco a 1.430 m de altura en la cordillera de los Andes, sin embargo, en la carta oficial publicada recientemente por el IGM, aparece el río Aconcagua formado por la reunión de los ríos Juncal, que se prolonga hacia aguas abajo de la junta de los afluentes Blanco y Colorado. Desde la primera unión mencionada como se muestra en la Figura 5.1-2 el Aconcagua recorre 142 km hasta su

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

desembocadura en la bahía de Concón en el Mar Chileno. Sin embargo, si se considera el desarrollo del río Juncal desde su nacimiento, el recorrido alcanza a 177 km. (DGA, 2004)

Figura 5.1-2: Cuenca del río Aconcagua.



Fuente: Fierro 2004.

#### 5.1.1.1 Sistema Natural

Los climas que se distinguen en ésta cuenca corresponden a: Templado de tipo Mediterráneo con estación seca prolongada y Frío de altura en la Cordillera de los Andes.

El régimen del río es pluvio-nival, con sus mayores caudales en verano, producto de los deshielos, especialmente en el curso superior; sin embargo, las crecidas extraordinarias más importantes han tenido origen pluvial y se han originado como producto de lluvias con línea de nieve alta (D.G.A., 2003).

La cuenca está influenciada en el sector alto por rocas sulfuradas, materiales volcánicos vítreos de texturas gruesas ubicados en los sectores de mayores pendientes en la Cordillera de los Andes. En el sector de río Aconcagua, localidad de San Felipe, existe influencia de rocas ácidas y en sectores próximos a la desembocadura, existe influencia mixta de rocas sulfuradas y de caliza. El río Aconcagua escurre por el último de los valles que conforman la zona de los Valles Transversales, y está separado del Núcleo o Valle Central por el Cordón de Chacabuco. Su cuenca posee unidades taxonómicas características de la V Región de

Valparaíso y corresponden básicamente a suelos anfisoles, inceptisoles y mollisoles (D.G.A., 2004).

#### 5.1.1.2 Sistema humano

Desde el punto de vista político - administrativo, la cuenca del río Aconcagua forma parte de la V Región abarcando parcialmente las provincias de Quillota, San Felipe, Aconcagua, Los Andes y Valparaíso.

Las principales actividades económicas en esta cuenca son agricultura, minería e industria. Respecto a la actividad industrial, la minería metálica más importante de la cuenca corresponde a la explotación de cobre fino en sectores de Los Andes y Catemu (D.G.A., 2004). En la Tabla 5.1-1 se presentan los usos del suelo de la zona.

Tabla 5.1-1: Uso del suelo de la cuenca del río Aconcagua.

Cuenca del Río Aconcagua (Ha)	Usos de suelo	Superficie (Ha)	Superficie de la cuenca para cada uso (%)
734.000	Praderas	7.721	1
	Terrenos agrícolas y agricultura de riego	86.237	12
	Plantaciones e industriales	3.390	0
	Áreas urbanas e industriales	6.000	1
	Minería industrial	1.037	0
	Bosque nativo y bosque mixto	29.227	4
	Otros usos	407.670	56
	Áreas sin vegetación	192.718	26

Fuente: Escobar 2009.

#### 5.1.2 DESCRIPCIÓN DEL CAUDAL DEL RÍO ACONCAGUA

Los resultados del análisis de la información de caudal proveniente desde la estación Puente Colmo para el periodo de tiempo comprendido entre Enero de 1988 hasta Octubre del 2002, son presentados a continuación.

La Tabla 5.1-2 en conjunto con el Gráfico 5.1-1, indican que los valores promedios anuales en los 15 años variaron desde los 5,8 a los 57,62 [m<sup>3</sup>/s], además que los años con mayor caudal promedio se registraron en los años 1.997, 1.992 y 2.002 todos ellos asociados al

fenómeno del niño el cual usualmente viene acompañado de intensos y prolongados periodos de lluvias, las que por infiltración y escorrentía colaborar en el aumento de flujo.

Además se exhibe la Tabla 5.1-3 y Gráfico 5.1-2 en donde se encuentran los valores promedios, máximos y mínimos mensuales. Los promedios más altos de cada año variaron según las precipitaciones o deshielos, en la mayoría de los años en que la zona se ve afectada por el fenómeno del niño los caudales aumentan en la época de otoño – invierno a causa de las precipitaciones, así mismo cuando la zona se ve afectada por el fenómeno de la niña el caudal no sobrepasa significativamente al promedio de los 15 años del registro.

Así también se muestra en el Gráfico 5.1-3 y Tabla 5.1-4 los valores estadísticos del caudal por estación, en donde se aprecia que los valores máximos se presentan en invierno y otoño, los valores mínimos se presentan en las estaciones de primavera y verano debido al ciclo pluvial que afecta la zona.

De los caudales bajos se puede esperar que no presenten grandes cambios en la barra, desembocadura o el mismo estuario debido a la poca energía que producirían, situación que se confirmará en el proceso de modelación de estas condiciones.

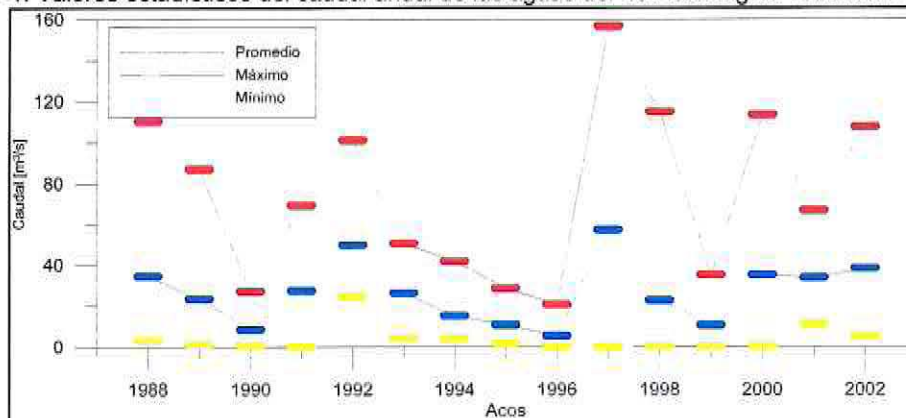
Tabla 5.1-2: Valores estadísticos del caudal de las aguas del Río Aconcagua. Estación Puente Colmo.

<b>Año</b>	<b>Promedio [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Media [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Máximo [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Mínimo [m<sup>3</sup>/s]</b>
1988	34,7	26,4	110,37	3,2
1989	23,64	15,6	87,19	1,35
1990	8,64	7,2	27,17	0,8
1991	27,52	30,6	69,53	0,05
1992	50,04	42	101,18	24,9
1993	26,5	25,6	50,74	4,31
1994	15,28	11	41,99	4,22
1995	10,89	9	28,81	1,75
1996	5,8	2	20,89	0,03
1997	57,62	22	156,7	0,03
1998	23,01	9,6	115,08	0,26
1999	10,72	6,3	35,37	0,25
2000	35,43	26,1	113,57	0,46
2001	33,95	30,1	66,81	11,1
2002	38,59	37,7	107,58	5,41

Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Gráfico 5.1-1: Valores estadísticos del caudal anual de las aguas del río Aconcagua. Estación Puente Colmo.



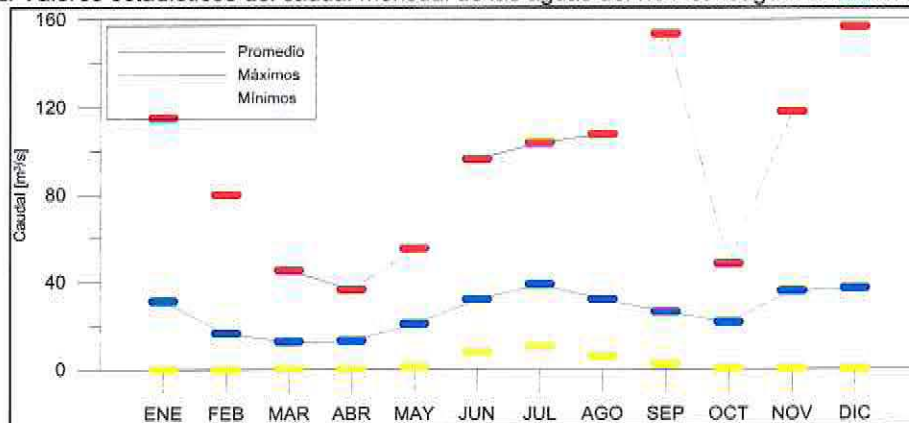
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.1-3: Valores estadísticos del caudal mensual de las aguas del río Aconcagua. Estación Puente Colmo

<b>Año</b>	<b>Promedio [m³/s]</b>	<b>Máximo [m³/s]</b>	<b>Mínimo [m³/s]</b>
<b>Enero</b>	31.22	115.08	0.07
<b>Febrero</b>	16.65	80.07	0.03
<b>Marzo</b>	12.99	45.39	0.19
<b>Abril</b>	13.40	36.67	0.03
<b>Mayo</b>	21.01	55.41	1.13
<b>Junio</b>	32.02	96.31	8.01
<b>Julio</b>	38.92	103.75	10.49
<b>Agosto</b>	32.08	107.58	5.79
<b>Septiembre</b>	26.31	153.52	2.25
<b>Octubre</b>	21.61	48.42	0.43
<b>Noviembre</b>	35.86	117.90	0.22
<b>Diciembre</b>	37.21	156.70	0.19

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5.1-2: Valores estadísticos del caudal mensual de las aguas del río Aconcagua. Estación Puente Colmo.



Fuente: Elaboración propia

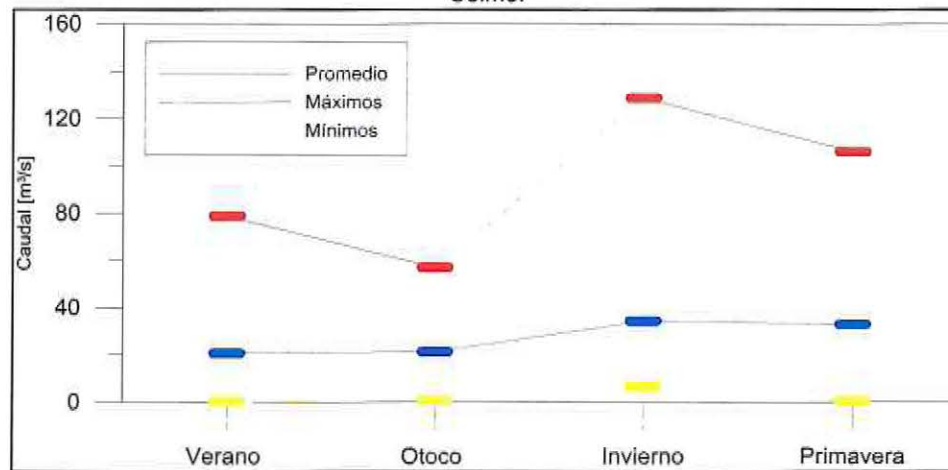
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Tabla 5.1-4: Valores estadísticos estacionales del caudal de las aguas del Río Aconcagua. Estación Puente Colmo.

Estación	Promedio [m <sup>3</sup> /s]	Máximo [m <sup>3</sup> /s]	Mínimo [m <sup>3</sup> /s]
Verano	20,5	78,61	0,1
Otoño	21,22	56,92	0,58
Invierno	34,13	128,63	6,34
Primavera	32,71	105,83	0,28

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5.1-3: Valores estadísticos estacionales del caudal de las aguas del Río Aconcagua. Estación Puente Colmo.



Fuente: Elaboración propia

### 5.1.3 DESCRIPCIÓN DEL ESTUARIO DEL RÍO ACONCAGUA

El estuario está ubicado en la desembocadura del río Aconcagua, tiene una orientación preferentemente N y las playas aledañas son de arenas oscuras. (Municipalidad de Concón, 2010), las que presumiblemente provienen desde la cordillera de la costa.

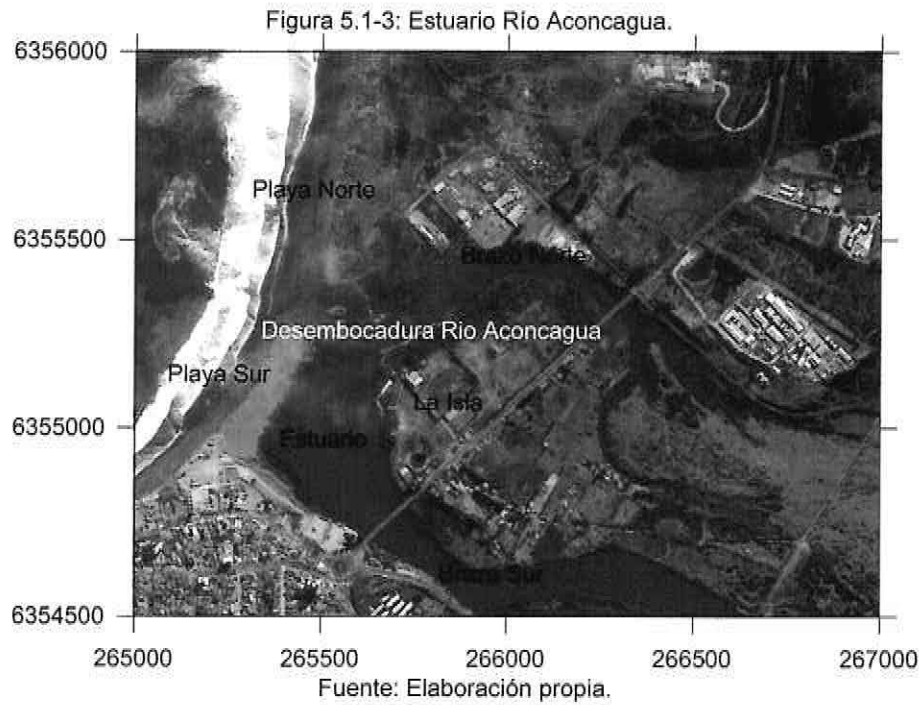
Del estudio realizado por Fierro (2004) el estuario del río Aconcagua se clasifica como un micro mareal según la clasificación por rangos de marea de Hayes (1975). Otra clasificación que se puede desprenderse del mismo estudio es que la zona inferior del río Aconcagua se caracteriza por ser un estuario Tipo 4, es decir del tipo cuña salina, variando en el Verano a estuario Tipo 2b , o sea parcialmente mezclado

Cabe destacar que en esta área se encuentran elementos naturales de importancia, como los humedales del río Aconcagua. Estos en conjunto con el estuario constituyen, uno de los lugares de mayor biodiversidad biológica y valor paisajístico natural existente en la V Región.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Lo anterior es debido a que en ellos se sustenta la vida y alimentación de un número importante de especies de flora y fauna nacional propia de Chile central. (Municipalidad de Concón 2010).

La Figura 5.1-3 muestra la desembocadura del río. Está presenta dos brazos, que caracterizan el ambiente estuarial: El brazo sur recoge directamente las aguas provenientes de la parte alta de la cuenca, mientras que el norte se alimenta principalmente de aguas subterráneas. Además de la formación un área denominada “La isla” que se encuentra rodeada por ambos cauces.



Alguna de las características adicionales de la zona de estudio son presentadas en la Tabla 5.1-5.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Tabla 5.1-5: Características estuario río Aconcagua.

<b>Estuario Río Aconcagua</b>	
<b>Zona de playa:</b> Norte: desembocadura hacia la playa Concón. Sur: desembocadura hacia la playa la Boca.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dominancia de rocas en sector norte</li> <li>• Avifauna: gaviotas, chorlos, pilpilenes, zarapitos, pitotoi, playeros, colegiales.</li> </ul>
<b>Zona estuarial:</b> Brazo norte: poca corriente Brazo sur: canal principal área permanentemente húmeda.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetación de tipo pajonal</li> <li>• Avifauna: triles, trabajadores, sietecolores, run run, hualas, blanquillos, pelicanos, gaviotas, yecos, taguas, golondrinas, queltehues, colegiales, churretes, zarapitos, chorlos, garzas, huairavos, perritos.</li> </ul>
<b>Sector La Isla:</b> Entre ambos brazos del río Ribera norte: instalaciones industriales Parque La isla.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona abierta con matorrales</li> <li>• Avifauna: palomas, queltehues, jilgueros, zorzales, dormilonas tontinas, tiques, loicas.</li> </ul>

Fuente: Ilustre municipalidad de Concón - 2010

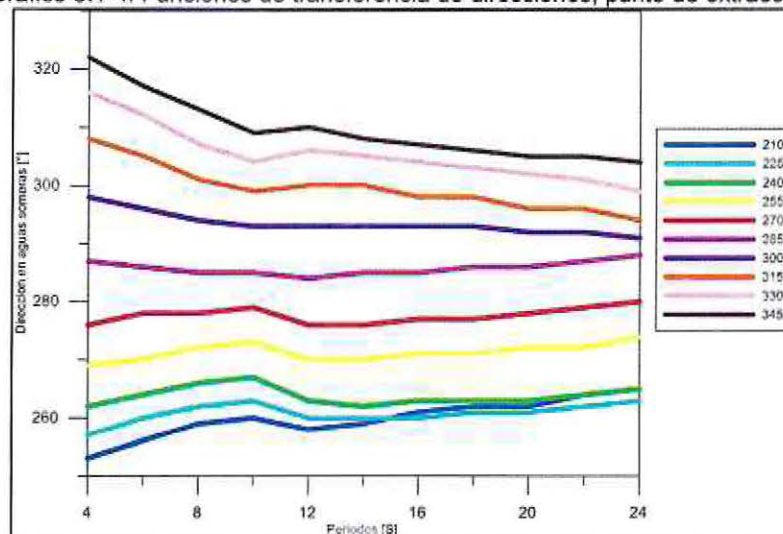
## 5.1.4 CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE

### 5.1.4.1 Resultados del modelo STWAVE.

El Gráfico 5.1-4 muestra los resultados de las funciones de transferencia en el dominio de las direcciones. Ellas indican la existencia de un cambio de direcciones desde el cuarto al tercer cuadrante quedando el oleaje perpendicular a la costa.

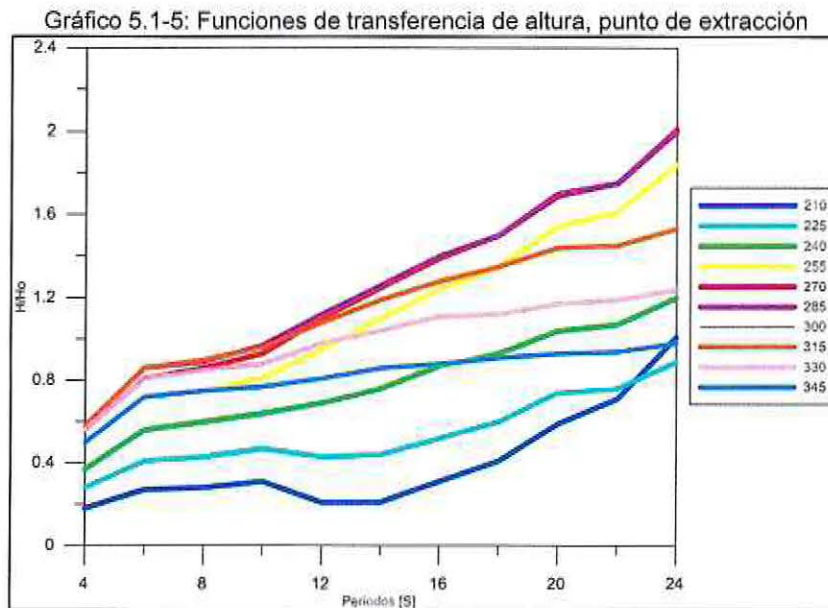
El cambio de dirección indicado por las funciones de transferencia es característico de las costas abiertas sin obstrucciones significativas (baja difracción), donde el proceso de refracción es la mayor forzante principal.

Gráfico 5.1-4: Funciones de transferencia de direcciones, punto de extracción.



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte se presenta en el Gráfico 5.1-5 muestra el resultado de las funciones de transferencia en el dominio de las alturas con relación a las direcciones off shore y el periodo. Se aprecia que a medida que los periodos aumentan los coeficientes de altura también, es decir, son directamente proporcionales.



Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.4.2 Clima de oleaje operacional en aguas someras

Mediante las funciones de transferencias y la base de datos de Olas Chile III se obtuvieron los datos de alturas de ola, periodo peak y direccione media, para un periodo de 30 años desde el 1 de enero de 1980 hasta el 1 de enero de 2010. A continuación se presentan los resultados obtenidos para el punto de interés.

Las Tabla 5.1-6, 1-7 y 1-8 muestran las tablas de incidencia de periodo peak  $\frac{1}{s}$  dirección media, altura de ola  $\frac{1}{s}$  dirección media y altura de ola  $\frac{1}{s}$  periodo peak respectivamente, por otra parte en las Figura 5.1-4 y 1-4 se presentan los datos en rosas de oleaje de altura y periodos en función de las direcciones.

Del análisis de la Tabla 5.1-6 y Figura 5.1-4 y 1-4 se puede inferir que el periodo de ola más frecuente que afecta la Playa La Boca está en el rango de 12 a 14 segundos con el 31,38% de la data, seguido por los rangos de 14 a 16 y de 10 a 12 con el 27,21% y 15,90% de los casos respectivamente.

De la Tabla 5.1-7 se puede observar que las alturas más frecuentes de la data están entre el rango de 1,0 a 1,5 [m] con un 43,12%, seguidos por olas de 0,5 a 1,0 [m] con el 25,26% de los eventos. Además cabe destacar que el 88,58% del tiempo analizado la altura de ola en la zona no supera los 2,0 metros, también se puede decir que se presentan eventos con alturas mayores a los 4,0 metros el 0,41% del tiempo.

Del análisis de las tablas y gráficos en conjunto se puede concluir en su mayoría el oleaje proviene de la dirección W con 72,98% seguido por la dirección WNW con el 26.5% de los datos. Del mismo modo se puede observar que la mayoría del oleaje proviene del tercer cuadrante.

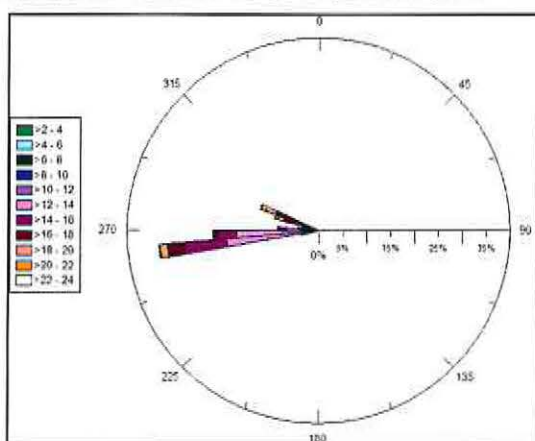
Tabla 5.1-6: Tabla de Incidencia de oleaje  $T_p$  y/s DPK.

Intervalo $T_p$ [s]	Intervalo de DPK [°]				Total %	A (%)	C (%)
	WSW	W	WNW	NW			
4.0 - 6.0	0	0,02	0,04	0,06	0,1	0,1	99,9
6.0 - 8.0	0	0,39	0,5	0,23	1,1	1,25	98,8
8.0 - 10.0	0	3,3	0,68	0,04	4	5,27	94,7
10.0 - 12.0	0,03	15,63	0,24	0	15,9	21,17	78,8
12.0 - 14.0	0,07	28,29	3,03	0	31,4	52,55	47,4
14.0 - 16.0	0,08	17,62	9,51	0	27,2	79,76	20,2
16.0 - 18.0	0,05	5,46	6,95	0	12,5	92,22	7,8
18.0 - 20.0	0,01	1,91	3,77	0	5,7	97,92	2,1
20.0 - 22.0	0	0,32	1,43	0	1,7	99,67	0,3
22.0 - 24.0	0	0,03	0,3	0	0,3	99,34	0
<b>Total %</b>	0,2	73	26,5	0,3	100		
<b>A (%)</b>	0,24	73,22	99,67	100			
<b>C (%)</b>	99,76	26,78	0,33	0			

Fuente: Elaboración propia

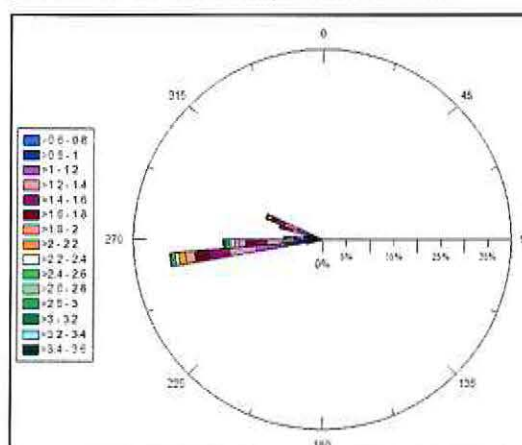
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.1-4: Rosa de oleaje de periodos peak



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.1-5: Rosa de oleaje Alturas de olas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.1-7: Tabla de Incidencia de oleaje Hmo <sup>v</sup>/s DPK.

Intervalo Hmo	Intervalo de DPK				Total %	A (%)	C (%)
	WSW	W	WNW	NW			
0.0 - 0.5	0.03	0.51	0.04	0	0.6	0.6	99.4
0.5 - 1.0	0.17	18.53	6.53	0.03	25.3	25.84	74.2
1.0 - 1.5	0.04	29.52	13.43	0.12	43.1	68.96	31
1.5 - 2.0	0	14.53	4.98	0.11	19.6	88.58	11.4
2.0 - 2.5	0	5.76	0.91	0.06	6.7	95.31	4.7
2.5 - 3.0	0	2.39	0.31	0.01	2.7	98.02	2
3.0 - 3.5	0	0.93	0.14	0	1.1	99.09	0.9
3.5 - 4.0	0	0.42	0.07	0	0.5	99.59	0.4
4.0 - 4.5	0	0.21	0.01	0	0.2	99.81	0.2
4.5 - 5.0	0	0.08	0	0	0.1	99.9	0.1
5.0 - 5.5	0	0.05	0	0	0.1	99.95	0.1
5.5 - 6.0	0	0.02	0	0	0	99.97	0
6.0 - 6.5	0	0.01	0	0	0	99.98	0
6.5 - 7.0	0	0	0	0	0	99.99	0
>7.0	0	0.01	0	0	0	100	0
<b>Total %</b>	0.2	73	26.5	0.3	100		
<b>A (%)</b>	0.24	73.22	99.67	100			
<b>C (%)</b>	99.76	26.78	0.33	0			

Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Tabla 5.1-8: Tabla de Incidencia de oleaje Hmo  $\forall$  Tp

Intervalo Hmo	Intervalos de Tp										Total %	A (%)	C (%)
	4.0 - 6.0	6.0 - 8.0	8.0 - 10.0	10.0 - 12.0	12.0 - 14.0	14.0 - 16.0	16.0 - 18.0	18.0 - 20.0	20.0 - 22.0	22.0 - 24.0			
0.0 - 0.5	0.01	0.01	0.06	0.18	0.18	0.08	0.05	0.01	0.01	0	0.6	0.6	99.4
0.5 - 1.0	0.04	0.32	1.29	5	9.11	6.08	2.21	0.85	0.28	0.09	25.3	25.84	74.2
1.0 - 1.5	0.07	0.32	1.61	6.59	12.92	12.34	5.61	2.63	0.86	0.18	43.1	68.96	31
1.5 - 2.0	0.01	0.32	0.48	2.47	5.44	5.57	3.24	1.55	0.49	0.06	19.6	88.58	11.4
2.0 - 2.5	0	0.13	0.27	0.96	2.16	1.73	0.91	0.47	0.09	0.01	6.7	95.31	4.7
2.5 - 3.0	0	0.03	0.19	0.45	0.91	0.7	0.27	0.14	0.02	0	2.7	98.02	2
3.0 - 3.5	0	0	0.09	0.13	0.37	0.35	0.08	0.04	0	0	1.1	99.09	0.9
3.5 - 4.0	0	0	0.03	0.09	0.15	0.16	0.05	0.01	0	0	0.5	99.59	0.4
4.0 - 4.5	0	0	0	0.03	0.08	0.09	0.03	0	0	0	0.2	99.81	0.2
4.5 - 5.0	0	0	0	0.01	0.03	0.05	0	0	0	0	0.1	99.9	0.1
5.0 - 5.5	0	0	0	0	0.02	0.02	0.01	0	0	0	0.1	99.95	0.1
5.5 - 6.0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0	99.97	0
6.0 - 6.5	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	99.98	0
6.5 - 7.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99.99	0
>7.0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	100	0
<b>Total %</b>	0.1	1.12	4	15.9	31.4	27.2	12.5	5.7	1.7	0.3	100		
<b>A (%)</b>	0.13	1.25	5.27	21.17	52.55	79.76	92.22	97.92	99.67	100			
<b>C (%)</b>	99.87	98.75	94.73	78.83	47.45	20.24	7.78	2.08	0.33	0			

Fuente: Elaboración propia

## 5.1.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS MAREAS

### 5.1.5.1 Análisis Armónico

De la ejecución de la rutina *T\_tide* se obtuvieron los 59 constituyentes de (Anexo – A4- Constituyentes armónicos de la marea.) siendo los que más aportan en semiamplitud los siguientes: M2 (42,8 cm); K1 (15,1 cm); S2 (14,2 cm) y N2 (9,5 cm).

Los constituyentes obtenidos permitieron determinar el nivel de reducción de sonda (NRS) obteniéndose un valor de 0,167 [m] sobre el cero instrumental. Por su parte, el indicador de Courtier mostró que el régimen de mareal es del tipo mixto semidiurno con desigualdad diurna.

La Figura 5.1-6 muestra las series de tiempo de nivel del mar asociadas a:

- El pronóstico de marea del periodo (Figura 5.1-6a) mediante la serie de Fourier de las constituyentes determinadas. Los valores predichos oscilaron entre 0,165 [m] y 1,95 [m].

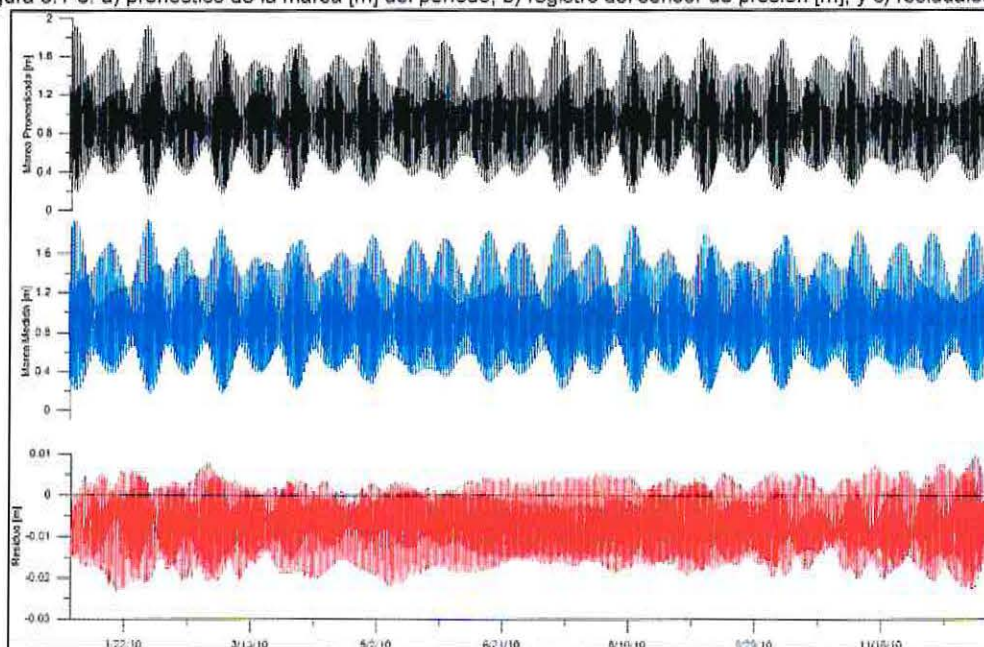
El registro obtenido desde el modelo numérico *OSU Tidal* (Figura 5.1-6 b), cuyos valores fluctúan desde los 0,169 [m] a los 1,93 [m].

- Los valores residuales (Figura 5.1-6 c) que advierten una buena correspondencia entre los datos del modelo global y la predicción mediante los constituyentes armónicos. El rango de magnitudes del residuo va desde los – 1,75 [cm] a 1,43 [cm].

Al correlacionar linealmente la serie de tiempo de mareas del modelo global y los pronósticos con armónicos, se obtuvo un 100% de correspondencia entre ambas bases de datos, lo que permiten adoptar los valores de las constituyentes como válidas para la zona de estudio.

Cabe destacar que para tener certeza de la representatividad del modelo *OSU Tidal*, este se vinculó altimétricamente a las mareas del puerto patrón de Concón, el que corresponde a Valparaíso.

Figura 5.1-6: a) pronóstico de la marea [m] del periodo; b) registro del sensor de presión [m]; y c) residuales [m].



Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.5.2 Análisis no armónico

El análisis no armónico de la marea realizado arrojó como resultados los planos mareales que se presentan en la Tabla 5.1-9 los que originan la Figura 5.1-7. Estos indican que el nivel medio del mar es de 94 [cm] por sobre el cero del sensor, además que la altura media de la pleamar alcanza los 1,39 [m]. El mayor rango de marea registrado durante el periodo analizado alcanzo los 1,86 metros en la cuadratura del 30 de marzo de 2010.

El rango medio de mareas de 0,908 [m] clasifica al ambiente como micromareal según la escala de Hayes (1975), lo que define que el prisma de mareas tiene potencial de ingresar al río Aconcagua con baja magnitud, por lo que es de esperar que sus efectos en la cuña salina a lo largo del cauce sea de poca incidencia y penetración, esperándose también que el estuario desde un punto de vista químico sea de menor extensión que el físico.

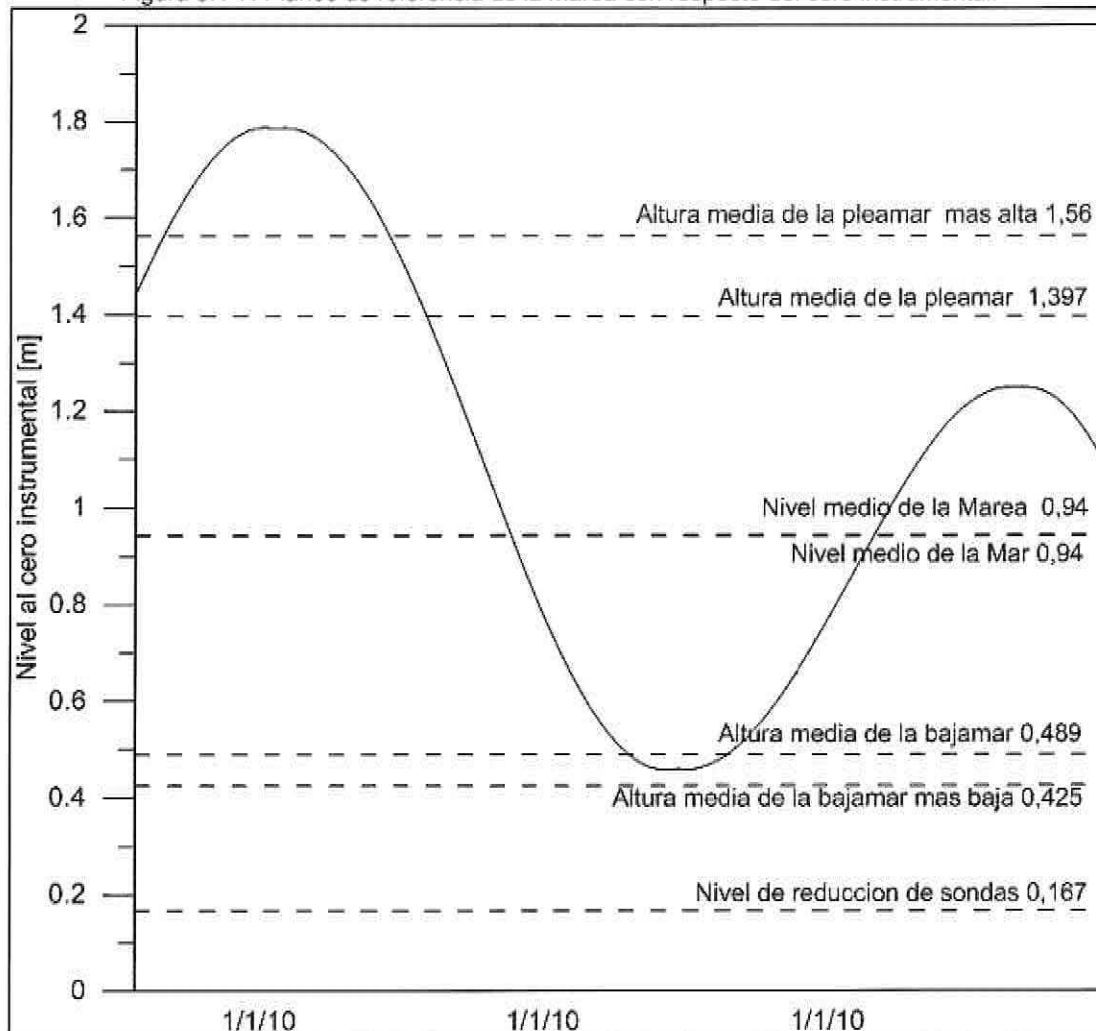
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Tabla 5.1-9: Planos mareales respecto del cero instrumental.

<b>Componentes no armónicos de la marea</b>	<b>[m]</b>
Nivel medio de la Marea	0,940
Altura media de la pleamar	1,397
Altura media de la pleamar más alta	1,562
Altura de la pleamar máxima	1,950
Altura media de la bajamar	0,489
Altura media de la bajamar más baja	0,425
Altura de la bajamar mínima	0,083
<b>Rangos</b>	<b>[m]</b>
Rango medio de la marea	0,908
Rango medio de la marea en sicigias	1,500
Desigualdad media diaria en Pleamar	0,165
Desigualdad media diaria en Bajamar	0,063

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.1-7: Planos de referencia de la marea con respecto del cero instrumental.



Fuente: Elaboración propia

## 5.1.6 CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS

### 5.1.6.1 Campaña I

#### *I. Análisis granulométrico*

Se presenta la Figura 5.1-8 donde se observa que los sedimentos de fondo del estuario presentan un predominio de arenas, fluctuando en las categorías de arena, arena limo arcilla, limo arcilloso y arena limosa. El tamaño de estos sedimentos infiere que han sufrido una gran meteorización debido a un proceso de transporte intensivo.

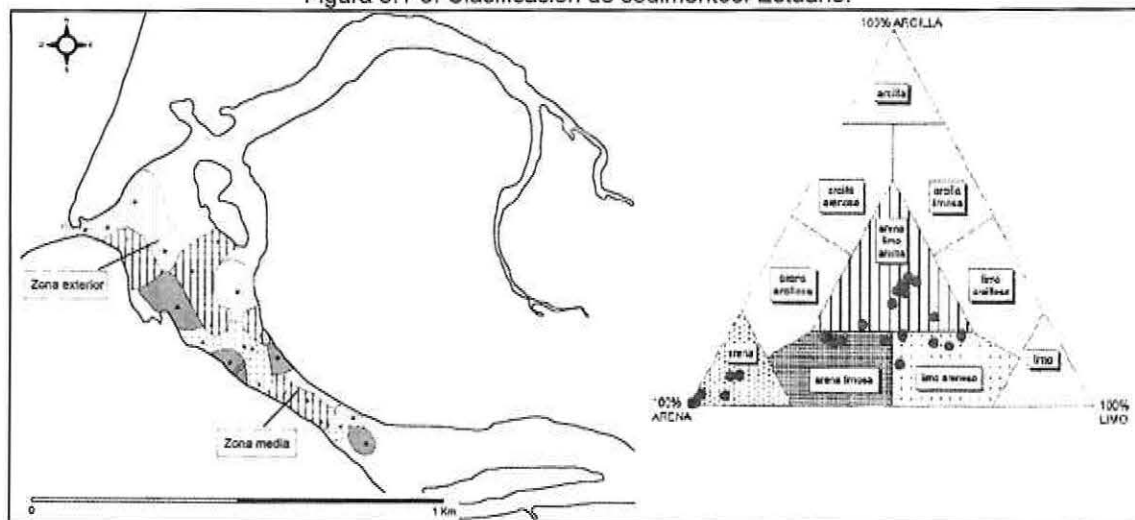
Un aspecto importante de destacar es la presencia de granos de mayor tamaño en las cercanías de la desembocadura, lo que podría deberse a alguna de las siguientes dos hipótesis:

- El Océano impone una condición de alta energía en la forzante que ingresa al estuario y no permite la depositación de la fracción fina, desplazándola de dicha zona.
- El río tiene una baja capacidad de transporte y permite de este modo la depositación de sedimentos finos, pues no tiene la velocidad necesaria para movilizar los sedimentos del tipo cohesivos.

La primera de las hipótesis aparentemente resulta contrapuesta a la clasificación del estuario debido al rango de mareas, sin embargo, podría ser igualmente válida debido a que la capacidad de transporte de la marea no es solamente una función de su rango, sino que también de la profundidad del lecho que se inunda en el proceso de ascenso y descenso.

Por su parte, la segunda de las hipótesis se desarrolla de manera implícita en las modelaciones numéricas realizadas y cuyos resultados se muestran en las siguientes secciones del presente documento.

Figura 5.1-8: Clasificación de sedimentos. Estuario.



Fuente: Martínez y Cortez 2007

En el Gráfico 5.1-6 se puede apreciar el contenido de las muestras obtenidas en la zona de ante playa la cual abarca desde Punta Concón hasta Punta Piedra, se puede concluir que el sedimento con mayor presencia es la arena fina que está en el rango de 0,25 a 0,125 [mm], seguida de arenas medianas las que se encuentran en el rango de 0,5 a 0,25 [mm] a lo largo de toda la playa. Cabe destacar que el porcentaje de arenas finas aumenta desde la desembocadura hasta las cercanías de punta piedra, también se presentan mayores porcentajes de arenas medias en la cercanía de la desembocadura, al igual que la presencia leve de arenas gruesas.

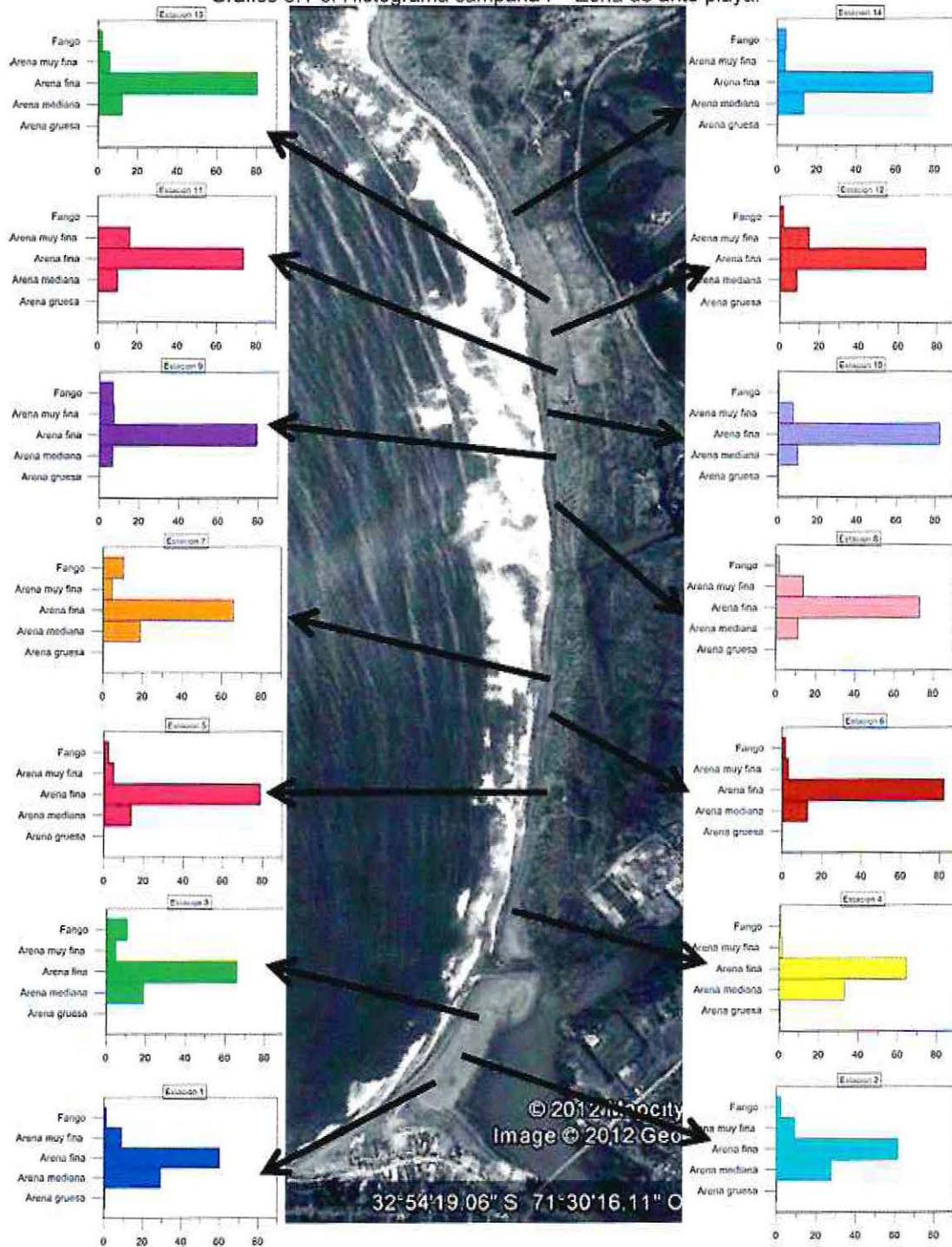
Las mayores gradaciones de los sedimentos en el sector de playa analizado podrían ser indicadores físicos de que su principal fuente de material no está ligada al aporte del río Aconcagua, al menos para el instante de tiempo en que se analizó.

El Gráfico 5.1-7 muestra el contenido de las muestras obtenidas en la zona de rompiente, se puede apreciar que los sedimentos más finos, en relación al resto de las muestras, se encuentran cerca del área de la desembocadura.

La presencia de arenas medias en los sedimentos superficiales se ve incrementada a medida que se aleja desde la desembocadura. Esto podría deberse a que el aporte del río de sedimentos finos es bajo y se distribuyen en un área acotada entorno del estuario y por lo tanto, no alteran la composición sedimentológica de las zonas alejadas.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

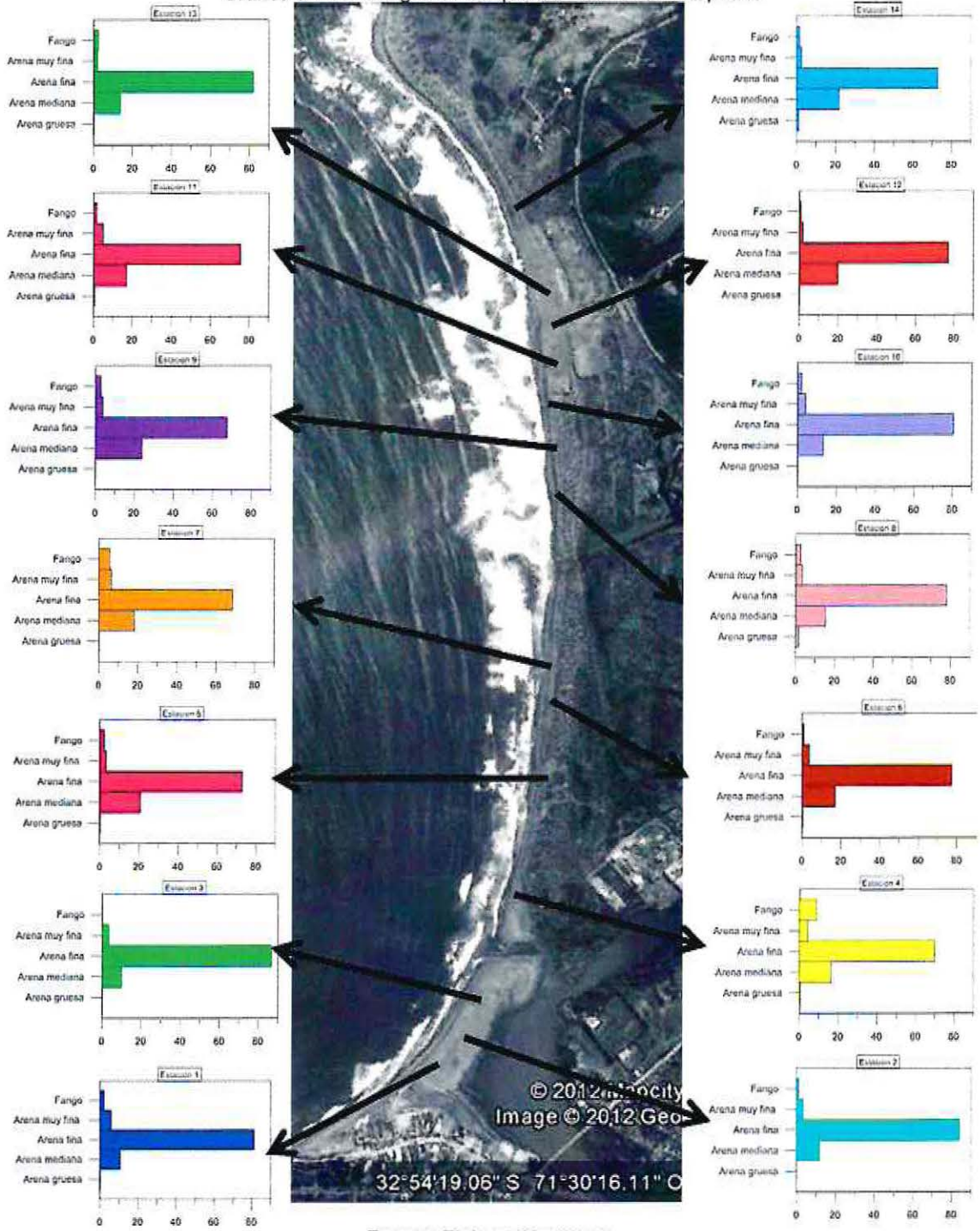
Gráfico 5.1-6: Histograma campaña I - Zona de ante playa.



Fuente: Elaboración propia.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Gráfico 5.1-7: Histograma campaña I – Zona de Rompiente



Fuente: Elaboración propia

## II. Análisis estadístico

Se presenta en las Tabla 5.1-10 y 5.1-11 los parámetros estadísticos de las muestras obtenidas en la ante playa y zona de rompiente, éstas indican que el tamaño medio del sedimento en la área de estudio en su mayoría es arena fina, además se encuentran en el rango de muy clasificadas esto quiere decir que los sedimentos tienen un tamaño similar entre sí en cada muestra.

Esta homogeneidad del tamaño de los granos podría ser indicadora de que la meteorización de los granos presentes en la playa, se debe a una sola forzante y adicionalmente, los aportes de sedimentos desde otras fuentes sería poco significativo para la campaña de terreno analizada.

Por otro lado las muestras obtenidas en la ante playa se caracterizan por tener un alto exceso de finos en las cercanías de la desembocadura, al igual que las muestras más lejanas en la zona de rompiente.

En ambas áreas las muestras además se clasifican desde leptocúrtica a muy leptocúrtica, es decir, el diámetro existente del sedimento está por sobre la media del muestreo.

Tabla 5.1-10: Parámetros estadísticos. Campaña I, Ante – Playa

	E1	E 2	E3	E 4	E 5	E 6	E 7
<b>Tamaños Promedios M</b>	0.24	0.23	0.20	0.25	0.19	0.19	0.20
<b>Clasificación</b>	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Mediana	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina
<b>Desviación Estándar <math>\sigma_1</math></b>	0.10	0.10	0.08	0.10	0.06	0.06	0.08
<b>Clasificación</b>	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada
<b>Asimetría SK</b>	0.44	0.44	0.34	0.48	0.23	0.29	0.34
<b>Clasificación</b>	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Moderado Exceso de Finos	Moderado Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos
<b>Cúrtosis K</b>	1.12	1.26	1.62	1.03	1.75	1.51	1.62
<b>Clasificación</b>	Leptocúrtica	Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Mesocúrtica	Muy Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

	E8	E 9	E10	E 11	E 12	E 13	E 14
<b>Tamaños Promedios M</b>	0.18	0.18	0.19	0.18	0.18	0.19	0.19
<b>Clasificación</b>	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina
<b>Desviación Estándar <math>\sigma_1</math></b>	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
<b>Clasificación</b>	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada
<b>Asimetría SK</b>	0.24	0.15	0.25	0.23	0.19	0.25	0.24
<b>Clasificación</b>	Moderado Exceso de Finos	Moderado Exceso de Finos	Moderado Exceso de Finos	Moderado Exceso de Finos	Moderado Exceso de Finos	Moderado Exceso de Finos	Moderado Exceso de Finos
<b>Cúrtosis K</b>	1.50	1.29	1.52	1.45	1.34	1.53	1.68
<b>Clasificación</b>	Leptocúrtica	Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Leptocúrtica	Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.1-11: Parámetros estadísticos. Campaña I, Zona de rompiente

	E1	E 2	E3	E 4	E 5	E 6	E 7
<b>Tamaños Promedios M</b>	0.19	0.19	0.19	0.19	0.22	0.20	0.20
<b>Clasificación</b>	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina
<b>Desviación Estándar <math>\sigma_1</math></b>	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08
<b>Clasificación</b>	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada
<b>Asimetría SK</b>	0.25	0.28	0.22	0.31	0.43	0.38	0.36
<b>Clasificación</b>	Moderado Exceso de Finos	Moderado Exceso de Finos	Moderado Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos
<b>Cúrtosis K</b>	1.60	1.48	1.87	1.44	1.66	1.56	1.71
<b>Clasificación</b>	Muy Leptocúrtica	Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica

	E8	E 9	E10	E 11	E 12	E 13	E 14
<b>Tamaños Promedios M</b>	0.20	0.23	0.20	0.20	0.22	0.19	0.23
<b>Clasificación</b>	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina	Arena Fina
<b>Desviación Estándar <math>\sigma_1</math></b>	0.07	0.09	0.04	0.07	0.08	0.06	0.09
<b>Clasificación</b>	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada
<b>Asimetría SK</b>	0.34	0.40	0.05	0.33	0.45	0.35	0.48
<b>Clasificación</b>	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Simétrica	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos
<b>Cúrtosis K</b>	1.37	1.63	0.82	1.59	1.61	1.26	1.58
<b>Clasificación</b>	Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Platicúrtica	Muy Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.6.2 Campaña II

#### ***I. Análisis granulométrico***

A partir del histograma representativo de esta campaña, el cual se presenta en el Gráfico 5.1-8, se puede apreciar que los sedimentos no tienen el mismo tamaño en toda la zona y no muestran un comportamiento similar en cuanto a la composición de cada muestra.

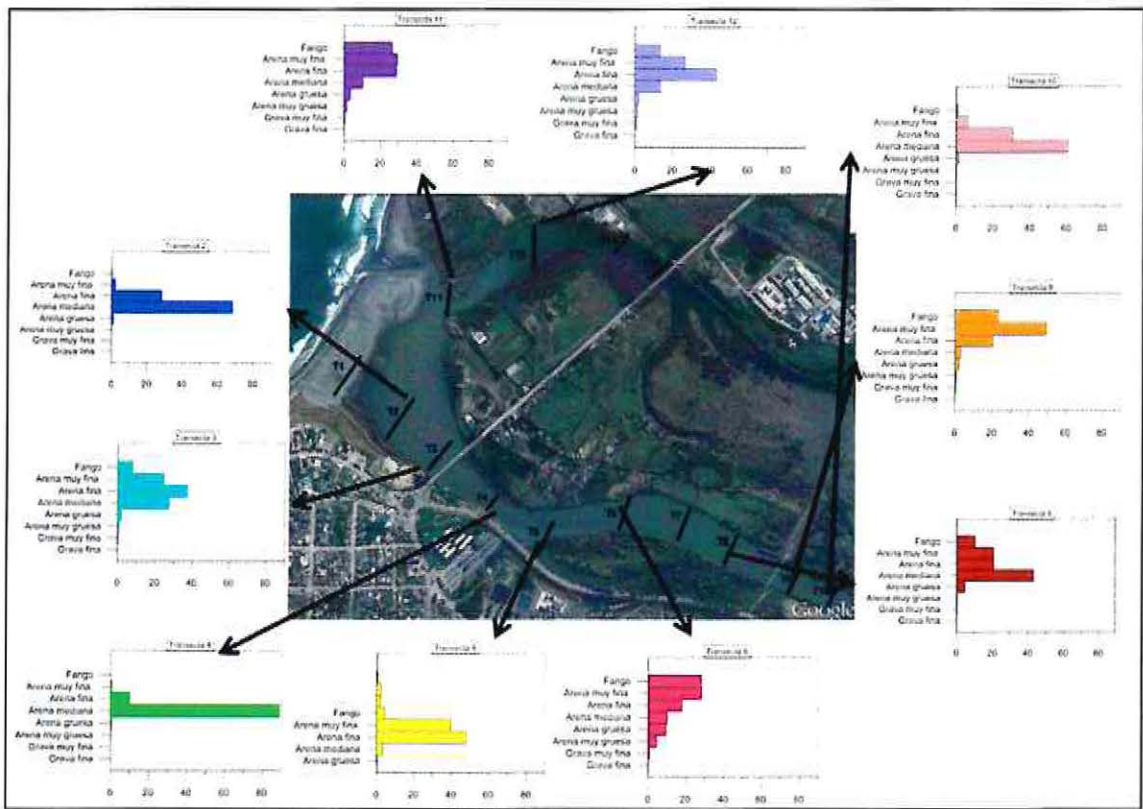
El brazo principal (brazo sur) cuenta con la mayor variedad de tamaños medios, el área cercana a la desembocadura se caracteriza por tener arenas medianas destacando la presencia de arenas muy gruesas en la transecta 5 (T5) esta diferencia se puede deber a la cercanía de una pequeña isla, además se aprecia que las transectas 11 y 12 presentan mayor presencia de finos que el resto de las muestras.

Los resultados encontrados en esta campaña son concordantes con los publicados por Martínez y Cortez (2007) y denotan nuevamente el comportamiento esperado para el transporte de sedimentos en el río Aconcagua, en lo relativo a la zona de estuario.

El brazo secundario (brazo norte) se caracteriza por presentar sedimentos que se encuentran en el rango de fangos, lo cual sería característico de un ambiente poco energético que permite la presencia de granos de tamaños menores. La baja energía se puede deber a la poca circulación ya sea de caudal o marea, esta zona podría considerarse como un brazo muerto lo que implica que no modifica o afecta su presencia al resto del estuario.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Gráfico 5.1-8: Histograma. Campaña II.



Fuente: Elaboración propia

## II. Análisis estadístico

Según los parámetros estadísticos que se encuentran en la Tabla 5.1-12, las zonas cercanas a la desembocadura el tamaño medio del sedimento es mayor que en el resto del estuario exceptuando en la transecta 5, además las muestras están en la categoría de muy clasificadas lo que quiere decir que el tamaño de las partículas es similar entre sí. En cuanto a la asimetría, las muestras no entregan un comportamiento marcado, lo que se puede rescatar es que se presentan varias con excesos de finos. Estos resultados pueden deberse a que el muestreo se realizó después de una condición de alta energía en el estuario como por ejemplo una crecida en el caudal lo que podría generar que sedimentos de mayor tamaño se hayan depositado en zonas donde antes no habían.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Tabla 5.1-12: Parámetros estadísticos. Campaña II.

	T2	T3	T4	T5	T6
<b>Tamaños Promedios M</b>	0.32	0.21	0.36	1.12	0.21
<b>Clasificación</b>	Arena Mediana	Arena Fina	Arena Mediana	Arena Muy Gruesa	Arena Fina
<b>Desviación Estándar <math>\sigma_1</math></b>	0.1	0.13	0.07	0.47	0.25
<b>Clasificación</b>	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Bien Clasificada	Muy Clasificada
<b>Asimetría SK</b>	0.02	0.38	0.05	0.26	0.82
<b>Clasificación</b>	Simétrica	Alto Exceso de Finos	Simétrica	Moderado Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos
<b>Cúrtosis K</b>	0.76	0.9	0.9	0.83	2.24
<b>Clasificación</b>	Platicúrtica	Mesocúrtica	Platicúrtica	Platicúrtica	Muy Leptocúrtica
	T8	T9	T10	T11	T12
<b>Tamaños Promedios M</b>	0.25	0.12	0.3	0.14	0.17
<b>Clasificación</b>	Arena Mediana	Muy Fina	Arena Mediana	Arena Fina	Arena Fina
<b>Desviación Estándar <math>\sigma_1</math></b>	0.15	0.08	0.11	0.11	0.11
<b>Clasificación</b>	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada
<b>Asimetría SK</b>	0.16	0.55	0.06	0.6	0.36
<b>Clasificación</b>	Moderado Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Simétrica	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos
<b>Cúrtosis K</b>	0.67	1.65	0.77	1.33	1.27
<b>Clasificación</b>	Extremadamente Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Platicúrtica	Leptocúrtica	Leptocúrtica

Fuente: Elaboración propia

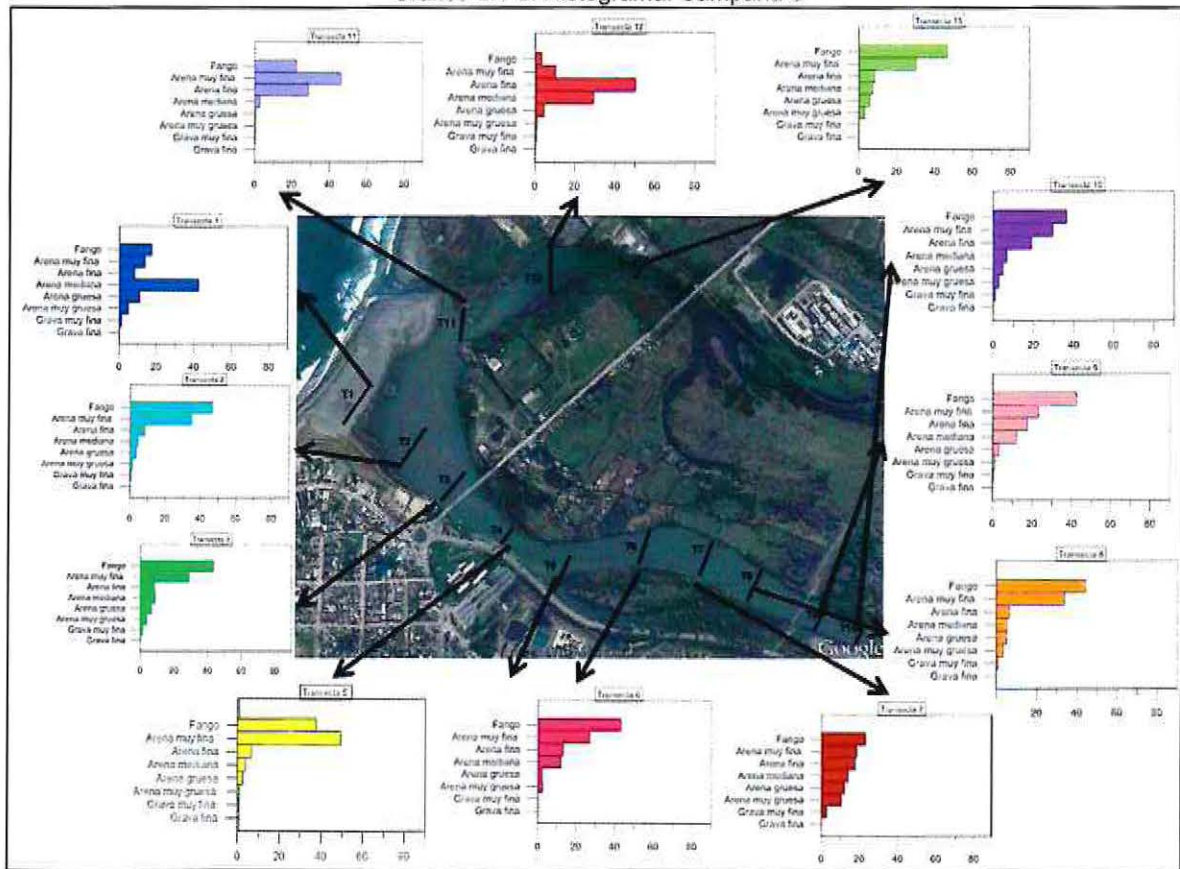
### 5.1.6.3 Campaña III

#### *I. Análisis granulométrico*

El histograma de la campaña 3 se presenta en el Gráfico 5.1-9, ésta indica que las muestras cuentan con un mayor rango de sedimentos finos, ya sea entre arenas muy finas a fangos en su mayoría, además muestra que la transecta 1 (playa trasera) contiene una mayor cantidad de sedimentos en el rango de arenas mediana. Este tamaño puede deberse a procesos propios del estuario asociados mayores energías o bien las distancias recorridas por los mismos.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Gráfico 5.1-9: Histograma. Campaña 3



Fuente: Elaboración propia

## II. Análisis estadístico.

De la Tabla 5.1-13, la cual presenta los valores estadísticos obtenidos de las muestras de la tercera campaña se puede inferir que el tamaño medio varía desde arenas medianas a muy finas, asimismo el rango de clasificación está entre muy clasificada a bien clasificada, lo que quiere decir que los tamaños de los sedimentos son similares en cada muestra. Igualmente la asimetría indica que las muestras en su mayoría se encuentran con un alto exceso de finos.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Tabla 5.1-13: Parámetros estadísticos. Campaña III.

	T1	T2	T3	T5	T6	T7
<b>Tamaños Promedios M</b>	0.31	0.09	0.16	0.09	0.13	0.37
<b>Clasificación</b>	Arena Mediana	Muy Fina	Arena Fina	Muy Fina	Arena Fina	Arena Mediana
<b>Desviación Estándar <math>\sigma_1</math></b>	0.29	0.09	0.21	0.07	0.12	0.46
<b>Clasificación</b>	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Bien Clasificada
<b>Asimetría SK</b>	0.28	0.84	0.9	0.59	0.84	0.79
<b>Clasificación</b>	Moderado Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos
<b>Cúrtosis K</b>	1.31	3.38	3.53	2.6	1.54	1.59
<b>Clasificación</b>	Leptocúrtica			Muy Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica

	T8	T9	T10	T11	T12	T13
<b>Tamaños Promedios M</b>	0.12	0.13	0.13	0.12	0.25	0.12
<b>Clasificación</b>	Muy Fina	Arena Fina	Arena Fina	Muy Fina	Arena Mediana	Muy Fina
<b>Desviación Estándar <math>\sigma_1</math></b>	0.18	0.12	0.16	0.06	0.14	0.16
<b>Clasificación</b>	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada
<b>Asimetría SK</b>	0.87	0.82	0.78	0.41	0.49	0.9
<b>Clasificación</b>	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos
<b>Cúrtosis K</b>	5.63	1.34	2.65	0.87	1.2	4.71
<b>Clasificación</b>		Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica	Platicúrtica	Leptocúrtica	

Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.6.4 Campaña IV.

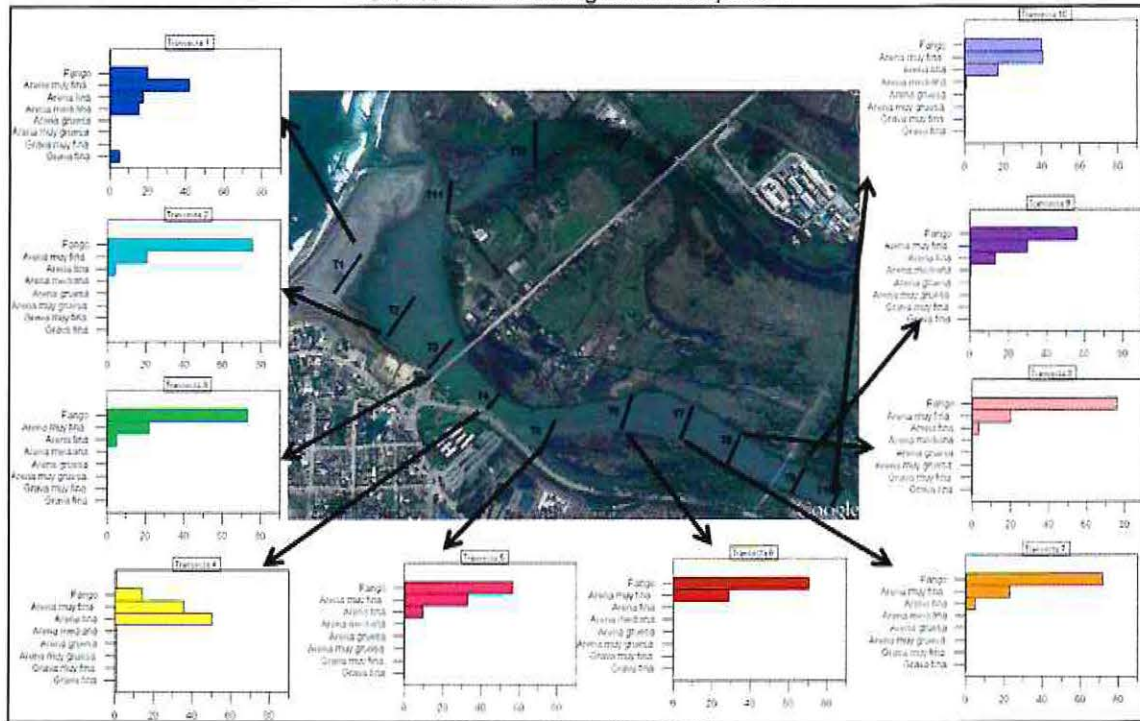
##### ***I. Análisis granulométrico***

El histograma que se presenta en el Gráfico 5.1-10, enseña que el sedimento presente en el estuario se encuentra mayormente en el rango de arenas muy finas a fango en la mayoría de las muestras. Además cabe destacar la presencia de grava fina en la primera transecta que corresponde a la playa trasera o playa interior del estuario.

El tamaño de los sedimentos encontrados en esta campaña son similares a los de la campaña anterior, lo que puede significar que el estuario en general se caracteriza por tener

sedimentos finos, por el origen de los sedimentos y su trayectoria, o bien al gasto energético del estuario.

Gráfico 5.1-10: Histograma. Campaña 4



Fuente: Elaboración propia

## II. Análisis estadístico

La Tabla 5.1-14 muestra los parámetros estadísticos de cada transecta de la campaña 4, de esta se puede desprender que el tamaño medio de las muestras varía de arena fina a muy fina desde la desembocadura hacia el interior del estuario, además las muestras se encuentran en el rango de muy clasificadas esto quiere decir que el tamaño de los sedimentos en cada muestra es similar entre sí. Además todas las muestras se clasifican con un alto exceso de finos en cuanto a la cúrtosis no tiene un comportamiento semejante.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Tabla 5.1-14: Parámetros estadísticos. Campaña 4.

	T1	T2	T3	T4	T5
<b>Tamaños Promedios M</b>	0.16	0.07	0.07	0.13	0.08
<b>Clasificación</b>	Arena Fina	Muy Fina	Muy Fina	Arena Fina	Muy Fina
<b>Desviación Estándar <math>\sigma_1</math></b>	0.13	0.02	0.02	0.06	0.03
<b>Clasificación</b>	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada
<b>Asimetría SK</b>	0.68	0.82	0.87	0.22	0.82
<b>Clasificación</b>	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Moderado Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos
<b>Cúrtosis K</b>	1.21	5.25	1.92	0.69	1.42
<b>Clasificación</b>	Leptocúrtica		Muy Leptocúrtica	Platicúrtica	Leptocúrtica

	T6	T7	T8	T9	T10
<b>Tamaños Promedios M</b>	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09
<b>Clasificación</b>	Muy Fina	Muy Fina	Muy Fina	Muy Fina	Muy Fina
<b>Desviación Estándar <math>\sigma_1</math></b>	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04
<b>Clasificación</b>	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada	Muy Clasificada
<b>Asimetría SK</b>	0.86	0.86	0.83	0.84	0.67
<b>Clasificación</b>	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos	Alto Exceso de Finos
<b>Cúrtosis K</b>	1.36	2.12	5.43	1.38	1.29
<b>Clasificación</b>	Leptocúrtica	Muy Leptocúrtica		Leptocúrtica	Leptocúrtica

Fuente: Elaboración propia

## 5.1.7 CARACTERIZACIÓN DE CORRIENTES

### 5.1.7.1 Campaña I.

De los dos set de datos con que se contó, el primero de ellos fue levantado el día 8 de Septiembre del 2002 entre las 14:50 horas y las 20:30 (Tabla 5.1-15); mientras que el segundo el día 11 del mismo mes entre las 2:25 horas y las 6:47 horas de la mañana (Tabla 5.1-16). Los datos se presentan de forma gráfica en la Figura 5.1-9 y 5.1-9 en donde se aprecia la línea de costa (color negro) y las magnitudes (color azul) con sus respectivas escalas. Estos indican que la dirección de las corrientes es predominantemente hacia dentro

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

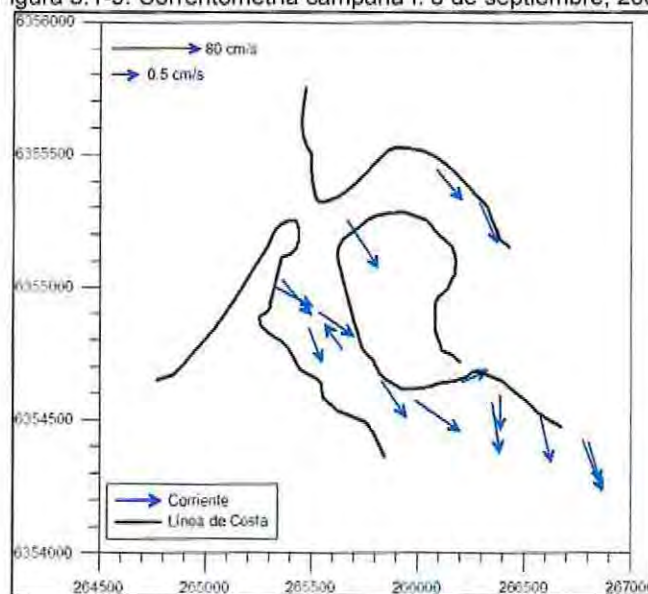
del estuario con magnitudes máximas de 69,6 [cm/s] y 62,6 [cm/s] en las estaciones 17 y 12 el día 8, en cambio el día 11 los máximos no sobrepasaron los 40 [cm/s] alcanzando los 38,8 [cm/s] y 36,6 [cm/s] en las estaciones 21 y 19 respectivamente. Este cambio de magnitud podría deberse al caudal del río y/o la baja intensidad de las mareas. Es importante recordar que las mediciones de corrientes de las que se dispuso fueron puntuales e instantáneas, no permitiéndose el análisis estadístico para una serie de tiempo.

Tabla 5.1-15: Datos correntómetro campaña I. 8 de Septiembre 2002

Estación	Velocidad [cm/s]	Dirección [°]	Fecha [dd:mm:aaaa]	Hora [hh:mm]	Estado de la marea
1	23,4	307	08-09-2002	14:52	Vacante
2	33,8	322	08-09-2002	15:08	Vacante
3	24,4	305	08-09-2002	15:08	Vacante
4	28,0	317	08-09-2002	15:19	Vacante
5	36,4	317	08-09-2002	15:24	Vacante
6	41,8	316	08-09-2002	15:45	Vacante
7	21,4	327	08-09-2002	15:50	Vacante
8	17,6	319	08-09-2002	15:58	Vacante
9	2,4	289	08-09-2002	16:03	Vacante
10	31,8	293	08-09-2002	16:12	Vacante
11	50,8	218	08-09-2002	16:33	Vacante
12	62,4	226	08-09-2002	16:52	Vacante
13	38,2	326	08-09-2002	19:56	Plea
14	34,6	313	08-09-2002	20:04	Llenante
15	34,4	289	08-09-2002	20:12	Llenante
16	52,0	242	08-09-2002	20:22	Llenante
17	69,6	254	08-09-2002	20:32	Llenante

Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.1-9: Correntometría campaña I. 8 de septiembre, 2002.



Fuente: Elaboración Propia



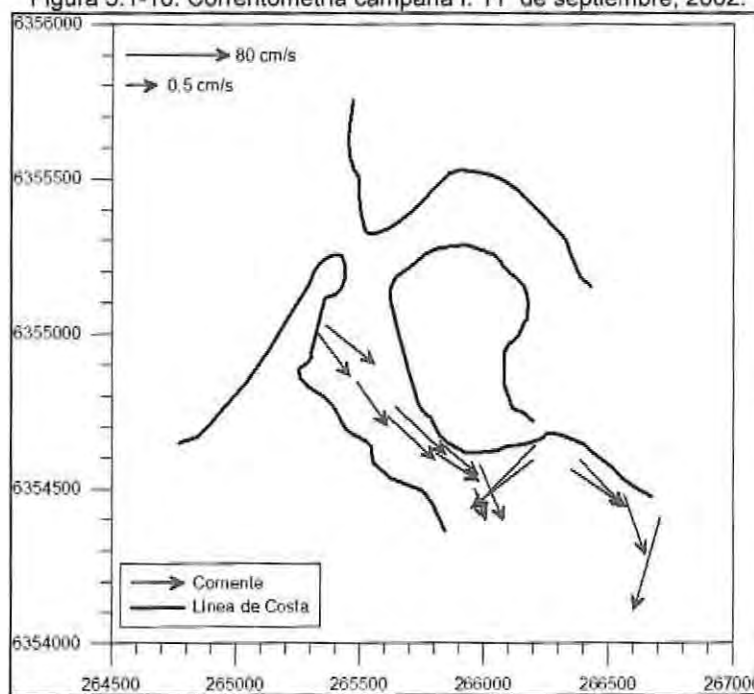
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Tabla 5.1-16: Datos correntómetro campaña I, 11 de Septiembre 2002.

Estación	Velocidad [cm/s]	Dirección [°]	Fecha [dd:mm:aaaa]	Hora [hh:mm]	Estado de la marea
1	18,8	333	11-09-2002	3:26	Vaciante
2	23,6	309	11-09-2002	3:38	Vaciante
3	12,6	292	11-09-2002	3:59	Vaciante
4	19,2	326	11-09-2002	4:04	Vaciante
5	0,8	3	11-09-2002	4:13	Vaciante
6	3,2	125	11-09-2002	4:18	Vaciante
7	2,0	122	11-09-2002	4:34	Vaciante
8	20,2	304	11-09-2002	4:45	Vaciante
9	5,0	20	11-09-2002	4:50	Vaciante
10	36,4	326	11-09-2002	4:59	Vaciante
11		Sin dato			
12	1,4	26	11-09-2002	5:24	Vaciante
13	28,6	279	11-09-2002	5:34	Vaciante
14	9,4	271	11-09-2002	5:39	Vaciante
15	40,0	269	11-09-2002	5:46	Vaciante
16	24,4	283	11-09-2002	5:51	Vaciante
17	36,0	249	11-02-2002	5:57	Vaciante
18	44,0	292	11-02-2002	6:06	Vaciante
19	36,6	291	11-09-2002	6:14	Vaciante
20	17,6	286	11-09-2002	6:25	Vaciante
21	38,8	303	11-09-2002	6:36	Llenante
22		Sin dato			Llenante
23	15,2	311	11-09-2002	6:41	Llenante
24	21,6	295	11-09-2002	6:47	Llenante

Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.1-10: Correntometría campaña I. 11 de septiembre, 2002.



Fuente: Elaboración Propia

### 5.1.7.2 Campaña II.

La campaña II se realizó durante el día 17 de Julio de 2002, entre las 11:52 y 16:19 horas. De las 24 estaciones iniciales solo se registraron datos en 11 de ellas debido a fallas del instrumento, tal como se muestra en la Tabla 5.1-17.

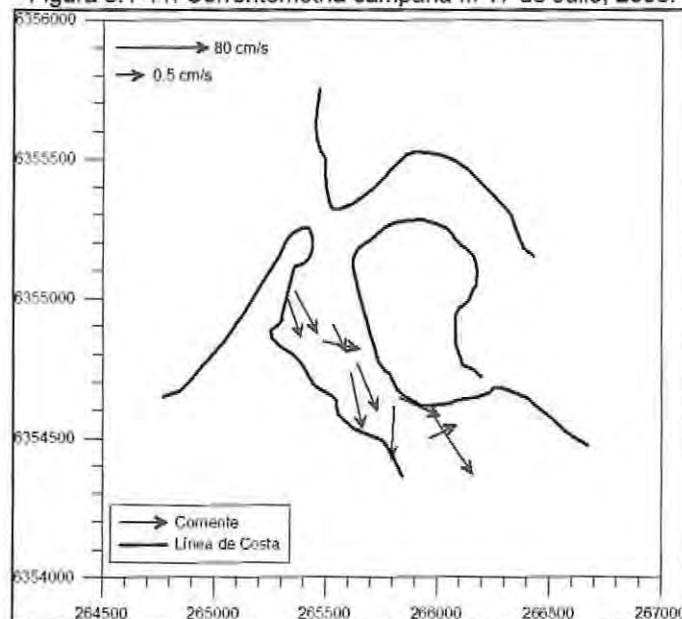
Las direcciones de la corriente superficial en su mayoría son hacia el río al igual que las campañas anteriores, las magnitudes máximas se presentan en las estaciones 11 y 6 con 49,8 [cm/s] y 36,4 [cm/s] respectivamente. En el resto de los puntos de muestreo la velocidad de la corriente no sobrepaso los 30 cm/s siendo en algunos de los casos prácticamente un estado de calma (estación 5 y 10, con 1,4 y 1,8 cm/s de magnitud, respectivamente).

Tabla 5.1-17: Datos correntómetro campaña II. 17 de Julio, 2003.

Estación	Velocidad [cm/s]	Dirección [°]	Fecha [dd:mm:aaaa]	Hora [hh:mm]	Estado de la marea
1	15,0	289°	17-07-2003	11:52	Llenante
2	24,2	298°	17-07-2003	12:09	Llenante
3	Sin dato				
4	11,0	348°	17-07-2003	12:40	Llenante
5	1,4	296°	17-07-2003	12:57	Vacante
6	36,4	282°	17-07-2003	14:44	Vacante
7	28,2	293°	17-07-2003	15:00	Vacante
8	29,4	266°	17-07-2003	15:16	Vacante
9	20,2	335°	17-07-2003	15:36	Vacante
10	1,8	24°	17-07-2003	15:58	Vacante
11	49,8	304°	17-07-2003	16:19	Vacante

Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.1-11: Correntometría campaña II. 17 de Julio, 2003.



Fuente: Elaboración Propia

### 5.1.7.3 Campaña III.

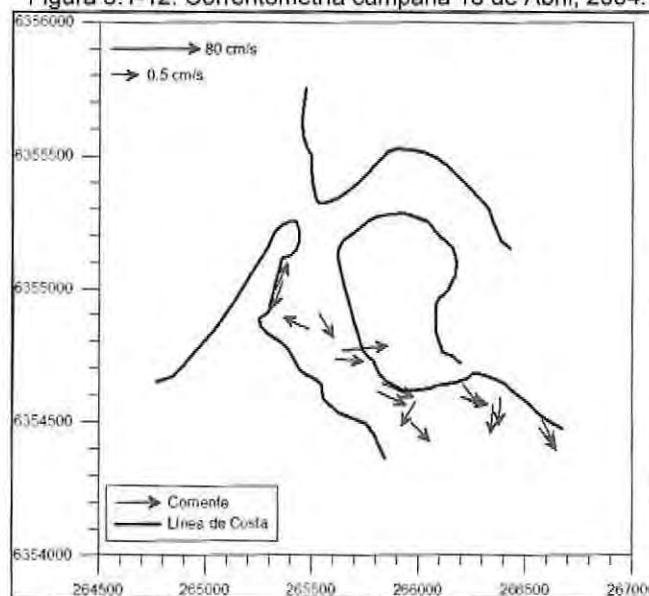
Esta campaña se realizó el día 18 de Abril del 2002 entre las 12:26 y las 19:12. Como se presenta en la Tabla 5.1-18 y solo se registraron 16 de las 24 estaciones. Cabe destacar que la mayoría de las magnitudes de las corrientes fueron de 1,0 [cm/s] o menor, esto se debe a fallas del instrumento que el autor del trabajo de campo declara en su reporte de campo, sin embargo, al ser las direcciones medidas con veleta, se ha decidió conservar sus resultados, considerando además que están son concordantes con las demás campañas.

Tabla 5.1-18: Datos correntómetro campaña 18 de Abril, 2004.

Estación	Velocidad [cm/s]	Dirección [°]	Fecha [dd:mm:aaaa]	Hora [hh:mm]	Estado de la marea
1	1,0	65	18-04-2004	12:26	Vacante
2	1,0	250	18-04-2004	12:40	Vacante
3	0,8	155	18-04-2004	13:08	Vacante
4	1,0	300	18-04-2004	13:22	Vacante
5	1,2	353	18-04-2004	13:58	Vacante
6	23,4	6	18-04-2004	14:13	Vacante
7	6,0	334	18-04-2004	14:33	Vacante
8	9,6	335	18-04-2004	14:48	Vacante
9	0,2	315	18-04-2004	15:11	Vacante
10	0,6	240	18-04-2004	15:26	Baja
11	1,0	345	18-04-2004	16:25	Llenante
12	1,0	307	18-04-2004	17:52	Llenante
13	1,0	266	18-04-2004	18:12	Llenante
14	1,0	266	18-04-2004	18:31	Llenante
15	1,0	309	18-04-2004	18:54	Llenante
16	1,2	297	18-04-2004	19:12	Llenante

Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.1-12: Correntometría campaña 18 de Abril, 2004.



Fuente: Elaboración Propia

## 5.1.8 CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO

### 5.1.8.1 Descripción estadística del viento

El comportamiento estadístico del viento en la zona de estudio, de acuerdo al análisis del registro obtenido desde el explorador eólica indica que las magnitudes con mayor ocurrencia son las brisas leves alcanzando el 48,85%, seguida por las brisas con 39,73% de los datos, las calmas alcanzaron el 3,82% de la data, tal como se indica en la Tabla 5.1-19 en conjunto con el Gráfico 5.1-11 y Gráfico 5.1-12, además de la Figura 5.1-13.

En cuanto a las direcciones predominantes de los vientos fueron SE y WNW con el 16,87% y 10,90%. Cabe destacar que el 39% y 38% de los datos registrados provienen de direcciones del segundo y cuarto cuadrante respectivamente, lo que indica un cambio en la dirección de procedencia del viento, la que podría deberse a ciclos diarios de enfriamiento/calentamiento de la plataforma continental, es decir, el fenómeno de brisa marina.

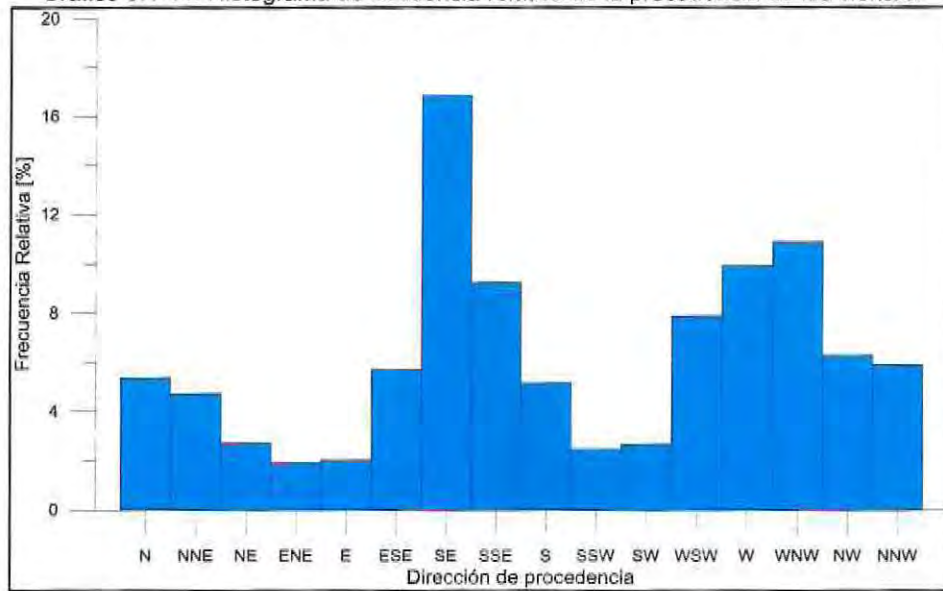
Tabla 5.1-19: Tabla de incidencia de vientos.

		Intervalos de Intensidad [m/s] Escala de Beaufort							Total [%]
		0.0 - 0.3	0.3 - 1.5	1.5 - 3.3	3.3 - 5.5	5.5 - 8.0	8.0 - 11	11-14	
		Calma	Brisa leve	Brisa	Viento suave	Viento moderado	Viento regular	Viento fuerte	
Intervalo de Direcciones	N	0,29	2,88	1,63	0,35	0,11	0,11	0	5,38
	NNE	0,22	2,54	1,56	0,32	0,06	0,05	0	4,74
	NE	0,15	1,55	0,77	0,17	0,07	0,02	0	2,72
	ENE	0,09	1,3	0,4	0,13	0	0	0	1,92
	E	0,05	1,27	0,61	0,13	0	0	0	2,05
	ESE	0,21	2,76	2,4	0,3	0,03	0,02	0	5,72
	SE	0,71	8,4	7,14	0,54	0,05	0,02	0,01	16,87
	SSE	0,5	5,55	2,91	0,23	0,05	0,02	0	9,26
	S	0,23	3,15	1,49	0,31	0	0	0	5,17
	SSW	0,11	1,44	0,71	0,22	0	0	0	2,48
	SW	0,13	1,56	0,76	0,25	0	0	0	2,69
	WSW	0,19	3,66	2,79	1,19	0,06	0	0	7,9
	W	0,21	3,66	5,05	0,97	0,07	0	0	9,96
	WNW	0,23	3,48	6,47	0,7	0,01	0,01	0	10,9
	NW	0,18	2,67	2,94	0,52	0	0	0	6,31
NNW	0,33	2,98	2,13	0,42	0,06	0,01	0	5,93	
<b>Total [%]</b>		3,82	48,85	39,74	6,74	0,56	0,27	0,01	100

Fuente: Elaboración propia

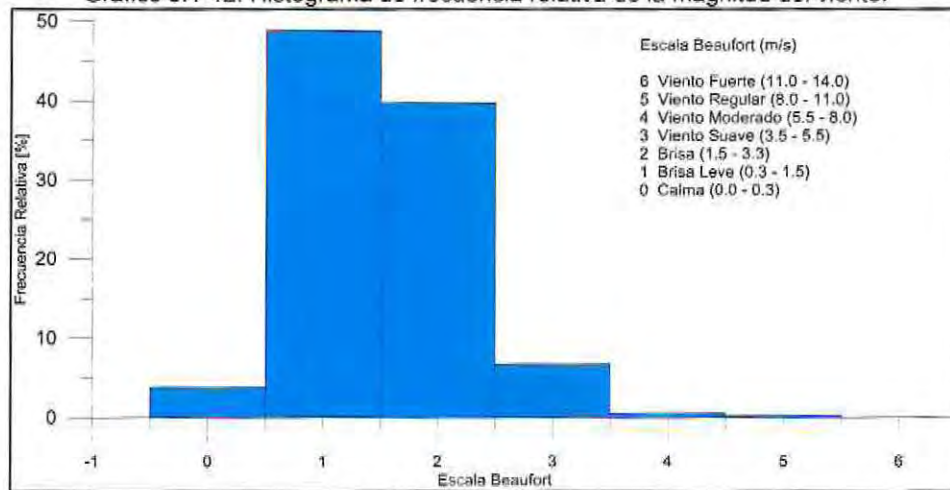
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Gráfico 5.1-11: Histograma de frecuencia relativa de la procedencia de los vientos.



Fuente: Elaboración propia

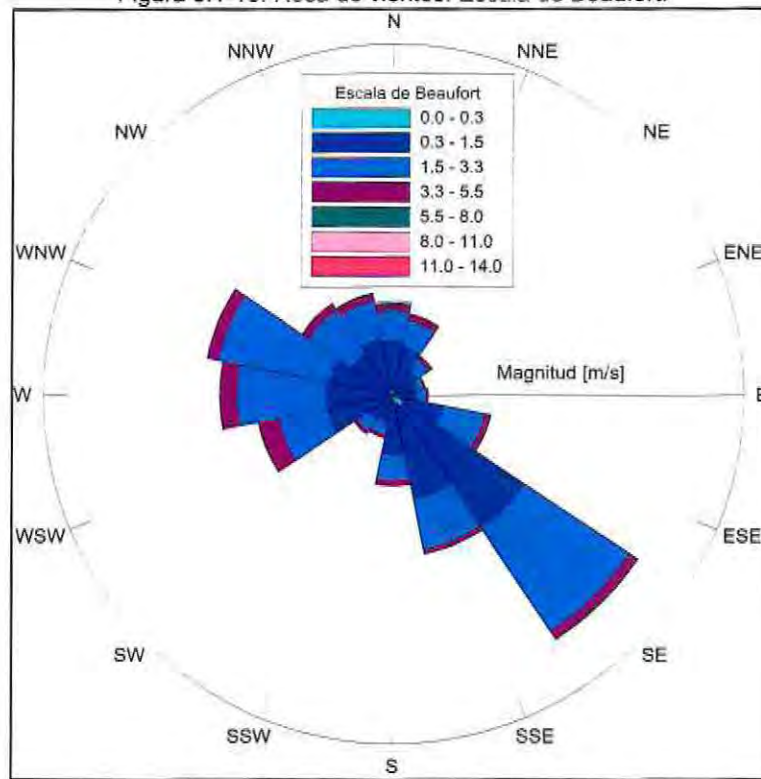
Gráfico 5.1-12: Histograma de frecuencia relativa de la magnitud del viento.



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.1-13: Rosa de vientos. Escala de Beaufort.



Fuente: Elaboración propia

También se presentan en la Tabla 5.1-20 las magnitudes máximas y promedios por dirección, en conjunto con el Gráfico 5.1-13. De su análisis se puede concluir que la máxima magnitud registrada fue de 11,90 [m/s] (23,14 nudos) proveniente del SE. Así también se puede desprender que la magnitud promedio del viento fue de 1,62 [m/s] (3,25 nudos) en el periodo analizado.

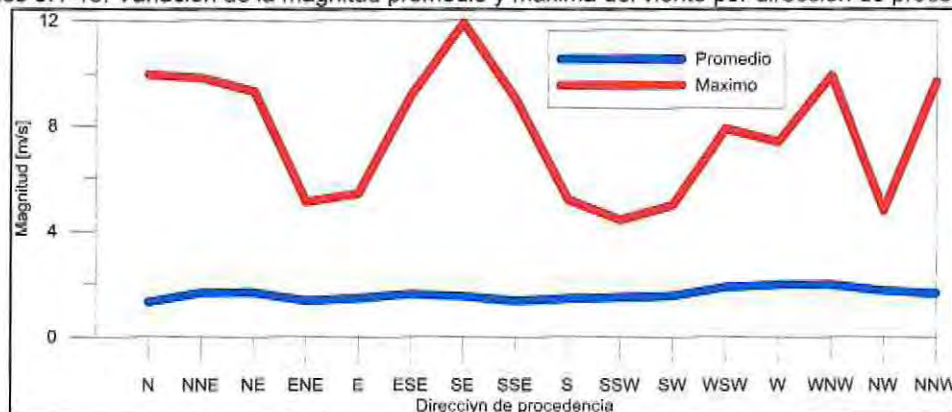
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Tabla 5.1-20: Magnitudes promedio y máximas globales y por dirección de procedencia de los vientos

Dirección	Máxima		Promedio	
	[m/s]	[nudos]	[m/s]	[nudos]
N	9,95	19,35	1,34	2,6
NNE	9,82	19,09	1,67	3,25
NE	9,3	18,09	1,69	3,28
ENE	5,12	9,95	1,38	2,68
E	5,44	10,57	1,47	2,86
ESE	9,16	17,81	1,64	3,18
SE	11,9	23,14	1,55	3,01
SSE	9	17,5	1,37	2,67
S	5,2	10,11	1,46	2,84
SSW	4,44	8,63	1,51	2,93
SW	4,99	9,7	1,56	3,03
WSW	7,9	15,35	1,9	3,7
W	7,4	14,38	1,99	3,86
WNW	9,91	19,26	1,99	3,87
NW	4,78	9,3	1,77	3,44
NNW	9,65	18,77	1,65	3,21
Global	11,9	23,14	1,62	3,15

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5.1-13: Variación de la magnitud promedio y máxima del viento por dirección de procedencia



Fuente: Elaboración propia

### 5.1.8.2 Análisis de ciclo horario.

En el Gráfico 5.1-14 se ilustran los ciclos medios diarios tanto de las magnitudes como de las direcciones. De su análisis se puede advertir que el rango de las celeridades varía desde un intervalo constante de 1,4 [m/s] durante las primeras 14:00 horas del día hasta los 2,8 [m/s] entre las 14:00 y 20:00 horas para disminuir nuevamente hacia el final del día.

En cuanto a las direcciones también presentan variaciones entre los mismos horarios mencionados anteriormente, estas van desde el SSE – S hacia el WSW – W, lo que indica que el viento sopla desde el océano hacia la costa en el día y luego en sentido contrario en la noche, siendo condición característica de la brisa marina inducida por la circulación termal de la interfaz mar-continente.



Fuente: Elaboración propia

## 5.2 ANÁLISIS HISTÓRICO DE LA LÍNEA DE COSTA

### 5.2.1 CAMBIO HISTÓRICO

#### 5.2.1.1 Análisis cualitativo

En primera instancia se presentan los resultados de la comparación de las líneas de costa de los años 1977 y 1980, que corresponden a las dos imágenes aéreas de mayor antigüedad a las cuales se tuvo acceso para el presente estudio.

Las variaciones entre los años 1977 y 1980 se presenta en la Figura 5.2-1 en donde se nota que a lo largo de la playa no se presenta un mayor cambio en su forma y posición que sea significativo o se pueda vincular con un evento extremo de avance/retroceso debido a sedimentación/erosión. Sin embargo, el estuario sufre cambios en su forma, en 1980 las barras norte y sur se encuentran casi en contacto en medio de la desembocadura y el brazo norte pasa de estar cerrado a abierto al estuario, además hay un retroceso en la playa sur lo que podría explicar la redistribución del sedimento de la barra sur.

Este estado morfodinámico de las barras litorales produce un angostamiento en el cauce y por lo tanto impone una restricción al aporte de sedimentos desde el río hacia la playa. Sin embargo, esta condición no refleja sus efectos en la estabilidad de la línea de costa norte, es decir, no produce un retroceso por desbalance sedimentario.

En la Figura 5.2-2 se muestran la variación entre los años 1980 y 1994, (este es el periodo de separación más largo entre fotografías) en ésta se ve claramente un cambio de dirección en las barras, es decir, la barra norte es mucho más alargada que la sur, a diferencia del año 1980 además se aprecia una acumulación de sedimentos frete a la isla la que puede deberse a un desprendimiento de la misma. También se presenta un pequeño retroceso en la línea de costa a lo largo de la playa, el que sin embargo, podría deberse a diferencias en los instantes de mareas en los cuales se obtuvo cada una de las fotografías aéreas.

Para este nuevo intervalo de tiempo se advirtieron situaciones similares a las indicadas previamente, es decir, a pesar de que hay una alta variación dinámica del estuario y su sedimentación y que nuevamente se presenta un eventual cierre de la desembocadura, no se advierten grandes efectos en la playa ubicada al norte por lo que se puede estimar de manera aproximada, que la cantidad de sedimentos que aporta el río no son determinantes en la estabilidad aparente de la playa.

Entre los años 1994 y 1997 (Figura 5.2-3) se aprecian cambios, tales como la desaparición de la acumulación de sedimentos frete a la isla, además las barras presentes se juntan en la desembocadura este efecto puede deberse a la combinación de muchos factores que podrían ser, por ejemplo, del bajo caudal del río en conjunto con la marea y si bien es primera vez que se aprecia no se puede descartar que se halla presentado en otras oportunidades.

Basados en la información provista por la imagen de 1994 y 1997, se puede establecer que ambas corresponden a la evolución de un estado morfodinámico, por lo que se puede aproximar que en este intervalo de tiempo de 3 años, la desembocadura se cierra e impide el tránsito de sedimentos desde el río hacia la playa del norte, sin embargo y al igual que los instantes anteriormente analizados, esta situación no genera efectos significativos en la línea de costa.

En la Figura 5.2-4 se presenta la variación entre los años 1997 y 2004, ella indica un gran cambio en cuanto a la configuración de la barra litoral, en las ilustraciones anteriores se apreciaron dos prolongaciones de la costa en cambio desde el año 2004 en adelante solo se presenta una. La barra Norte desaparece, lo que genera que la desembocadura se desplace en la misma dirección, existiendo solamente acumulación en el sur, la cual abarca la extensión que antes abarcaban las dos barras.

En las líneas de costa asociadas a la playa se aprecia un retroceso significativo del año 2004 respecto de 1997, sin embargo, es general a lo largo de toda la franja litoral por lo que podría deberse a un instante asociado a un nivel de marea alto.

Desde el 2004 al 2010 se cuenta casi una fotografía anual, por lo que la definición de los movimientos relativos se realizó con mayor nivel de detalle. La Figura 5.2-5 muestra la variación de la línea de costa entre los años 2004 y 2005, a lo largo de la línea de costa se presenta un avance pequeño el cual puede deberse al instante de marea en el cual se tomó la fotografía, en la zona de la desembocadura, la forma de las barras varía pero su configuración general es similar. La barra Sur retrocede en cuanto a su largo y en la Norte se aprecia una mayor acumulación lo cual podría ser producto de una redistribución de los sedimentos presentes en el sistema.

Los cambios sufridos entre los años 2005 y 2007 se muestran en la Figura 5.2-6, en la zona del estuario no se aprecia cambios significativos en cuanto a la forma o posición de la barra sur, es importante mencionar que desde aquí en adelante no se presenta la barra norte en ningunas de las imágenes analizadas, en cuanto a la línea de costa, ésta presenta un retroceso el cual puede explicarse por la influencia de la marea al instante en el cual se tomó alguna de las fotografías analizadas, la forma de la costa es similar a lo largo de toda ésta.

Las variaciones entre los años 2007 y 2008 se observan en la Figura 5.2-7, esta indica que a lo largo de toda la costa se presenta un retroceso al igual que en la zona estuarial, y tal como se ha mencionado anteriormente éste podría deberse solamente al efecto de las mareas, siendo una combinación posible que la fotografía del año 2007 se haya tomado en condición de baja marea y la del año 2008 en alta, esto explicaría por qué no se ven cambios mayores en la zona.

En la Figura 5.2-8 se aprecian los cambios de la zona de estudio entre los años 2008 y 2009, en el área del estuario no se muestran mayores cambios al igual que en la barra Sur la cual es prácticamente idéntica en los años analizados así también la playa sur formada por la misma barra, los cambios mayores se ven en la playa Norte cerca de Punta Piedra en donde se produce una acumulación de sedimentos.

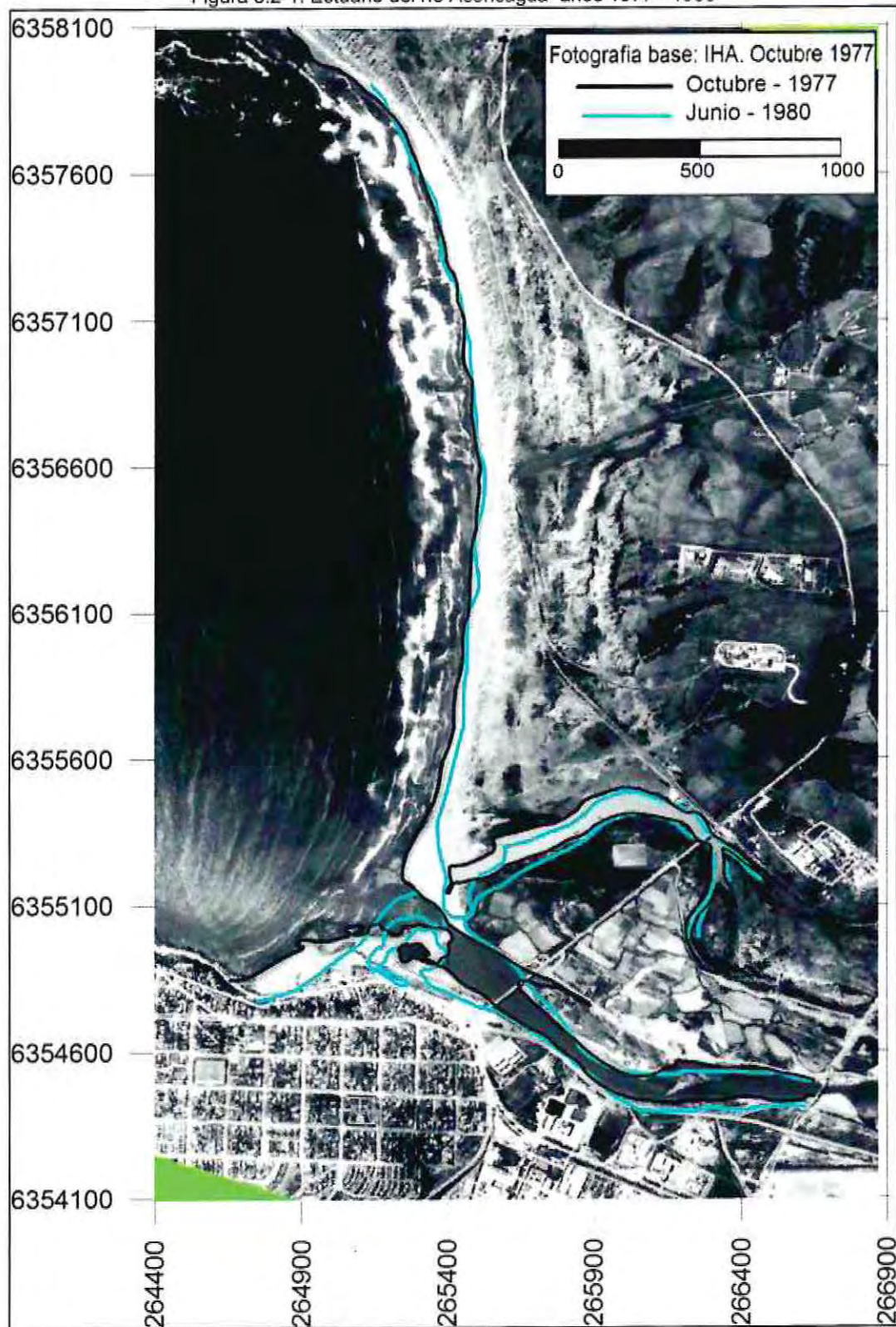
Para el año 2009 se obtuvieron dos fotografías aéreas para analizar, estas se presentan en la Figura 5.2-9 en donde se aprecia un avance en la línea de costa a lo largo de la playa exceptuando en el área cercana a Punta Piedra donde se ve un retroceso de esta, este comportamiento se ha presentado anteriormente en otras fotografías analizadas y estaría asociado a las mareas, este comportamiento también se aprecia entre los años 2009 y 20010 (ver Figura 5.2-10) donde solo en la zona superior de la playa Norte hay un avance de la línea de costa.

Entre los años 2010 y 2011 se percibe un cambio significativo en la zona del estuario, al igual que Figura 5.2-3 la desembocadura del río se encuentra bloqueada por la unión de las barras, esto puede deberse a los efectos de bajo caudales de la estación ya que como se mencionó esta condición también se presenta en primavera.

La Figura 5.2-12 se expone el cambio en el área estudiada entre Febrero del 2011 y Agosto del mismo año. La desembocadura ya no se encuentra bloqueada por la unión de las barras además la formación del Sur se restauró al igual que años anteriores, la línea de costa no se muestran cambios significativos en cuanto a zonas de retrocesos o acumulaciones

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

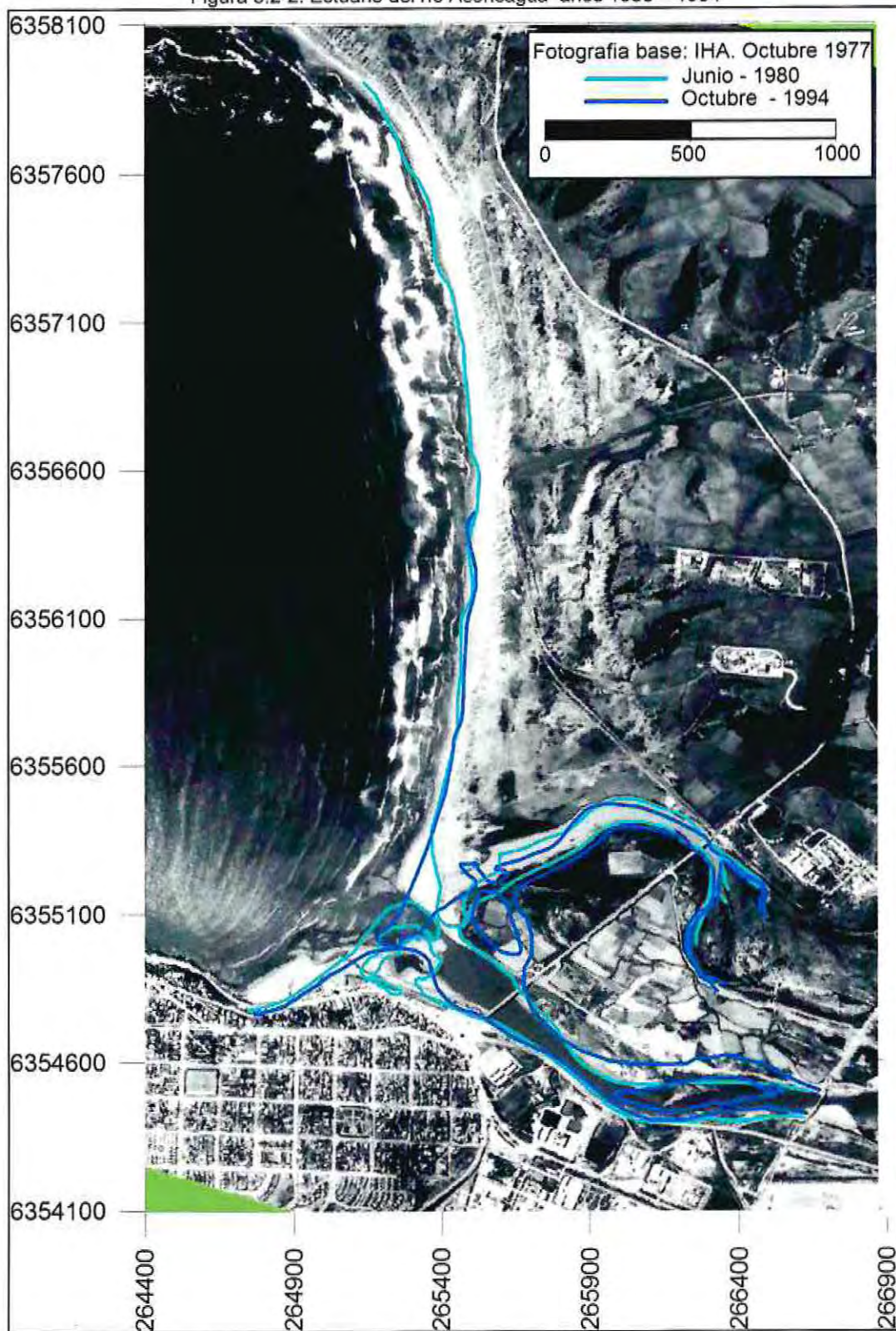
Figura 5.2-1: Estuario del río Aconcagua años 1977 - 1980



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

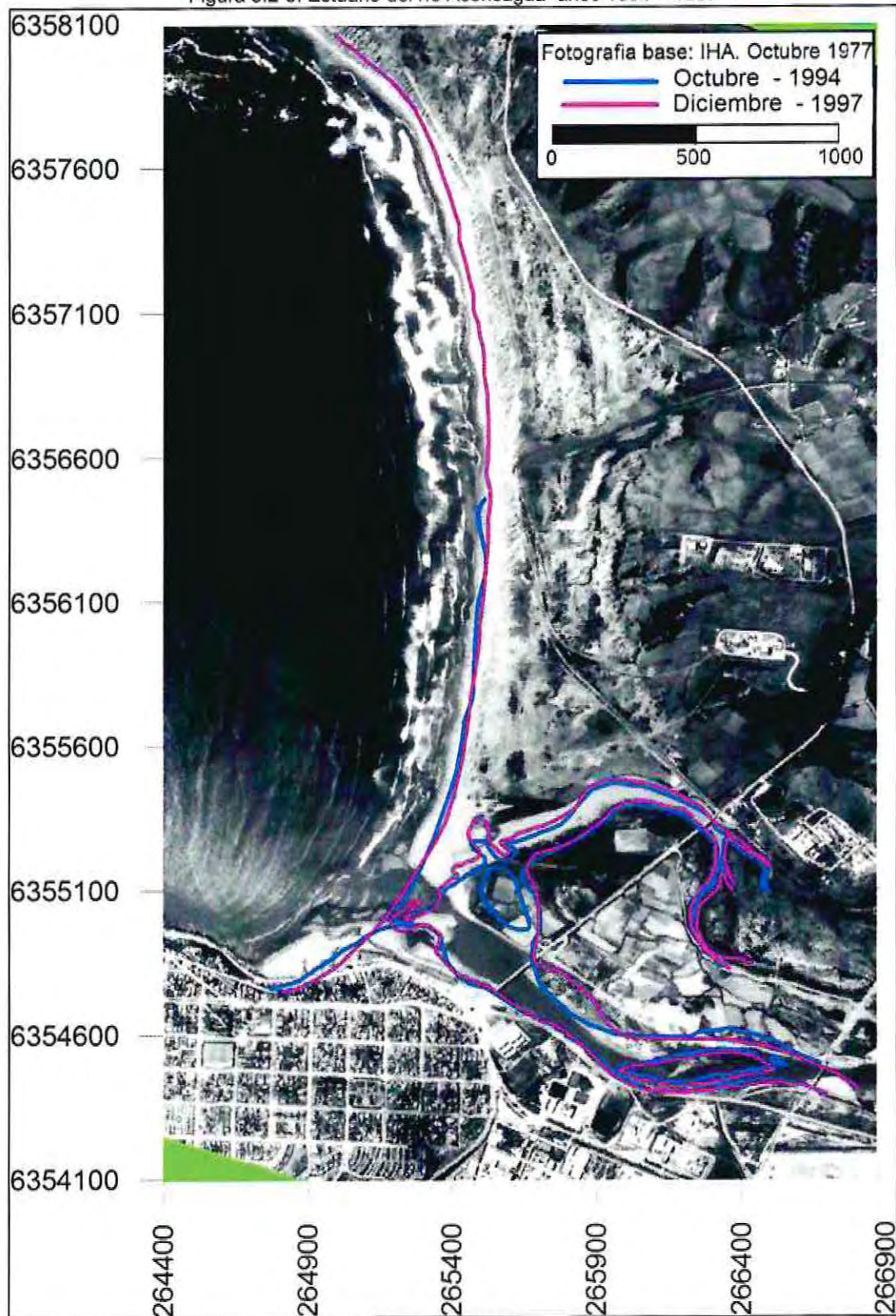
Figura 5.2-2: Estuario del río Aconcagua años 1980 – 1994



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

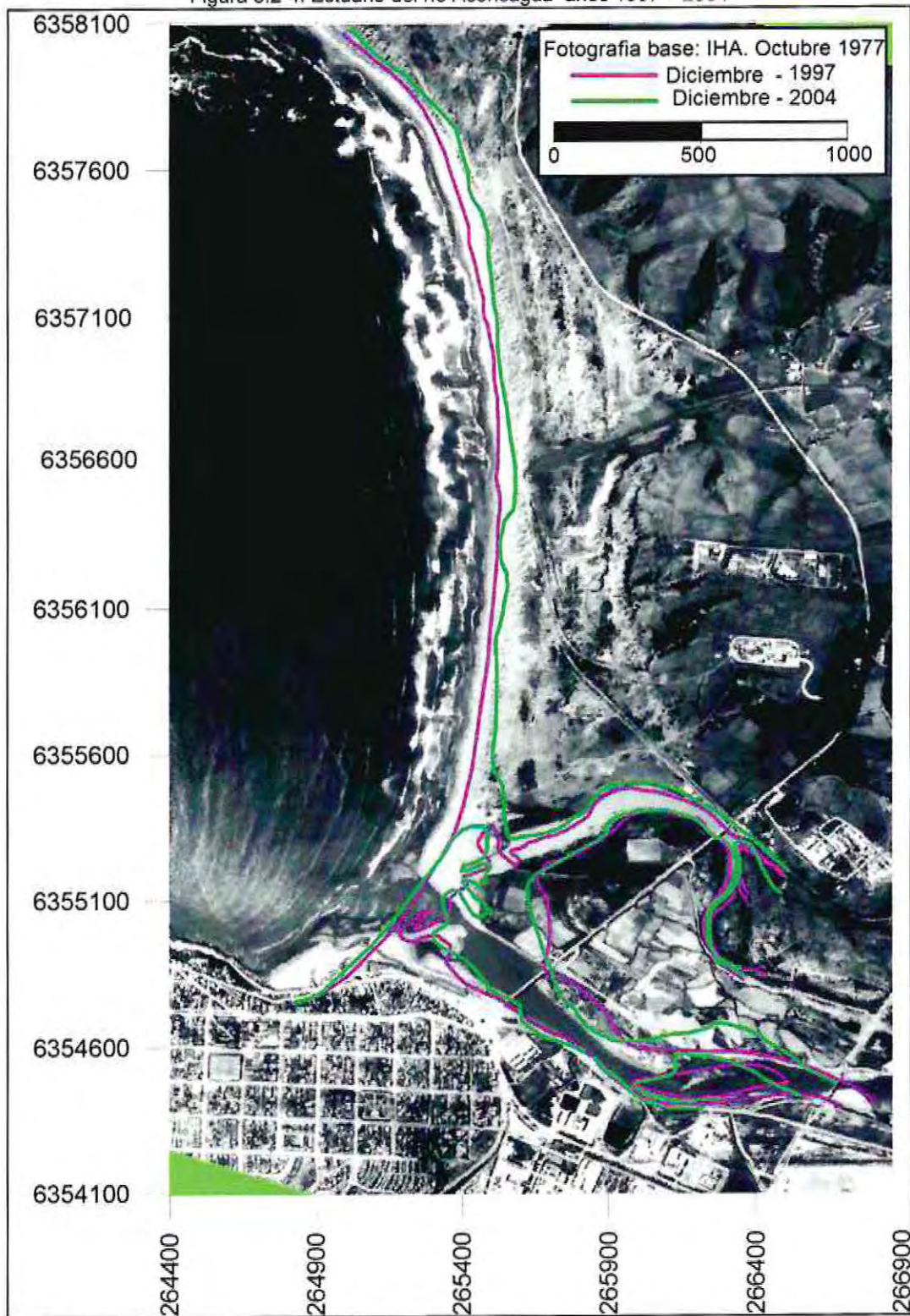
Figura 5.2-3: Estuario del río Aconcagua años 1994 – 1997



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

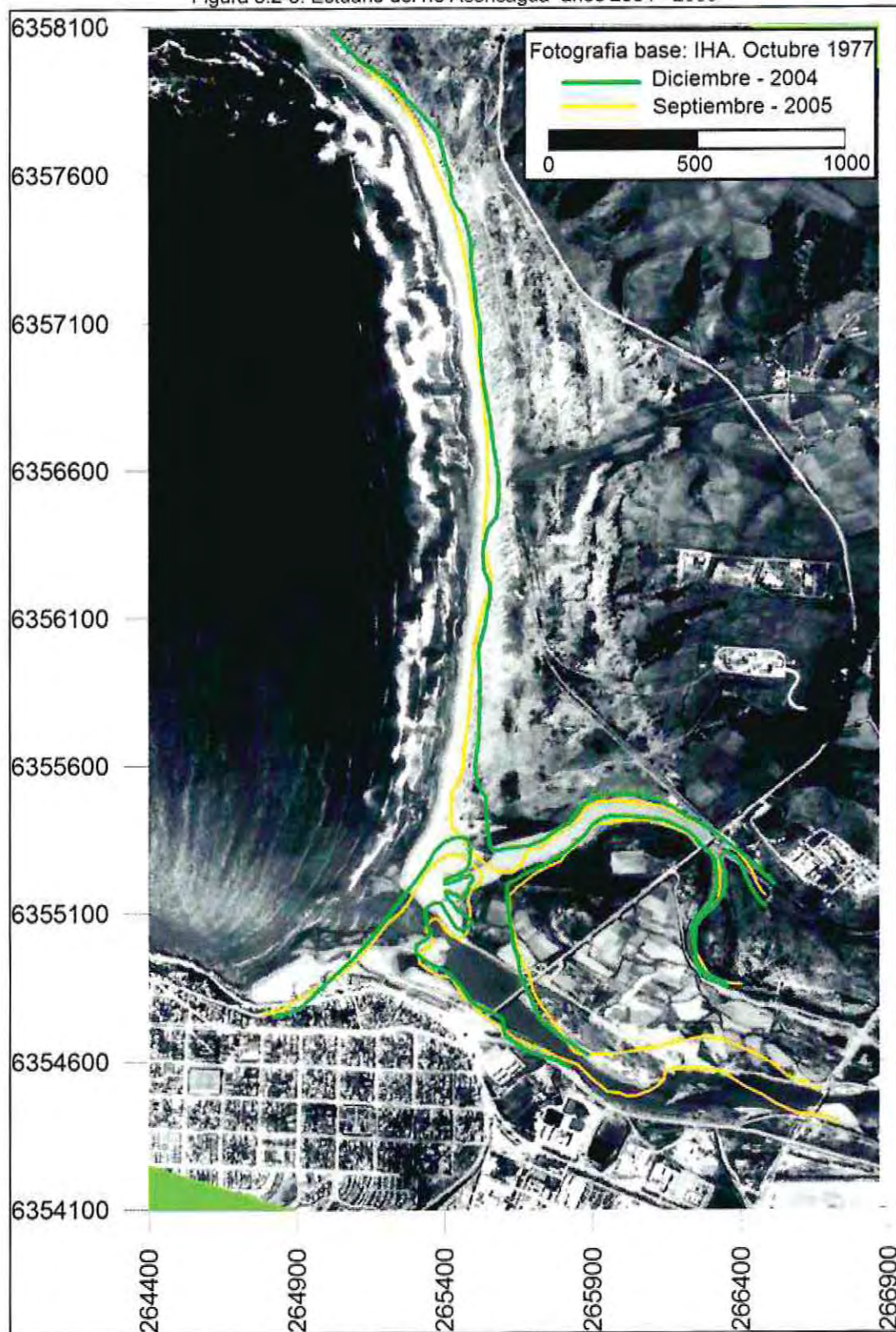
Figura 5.2-4: Estuario del río Aconcagua años 1997 – 2004



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

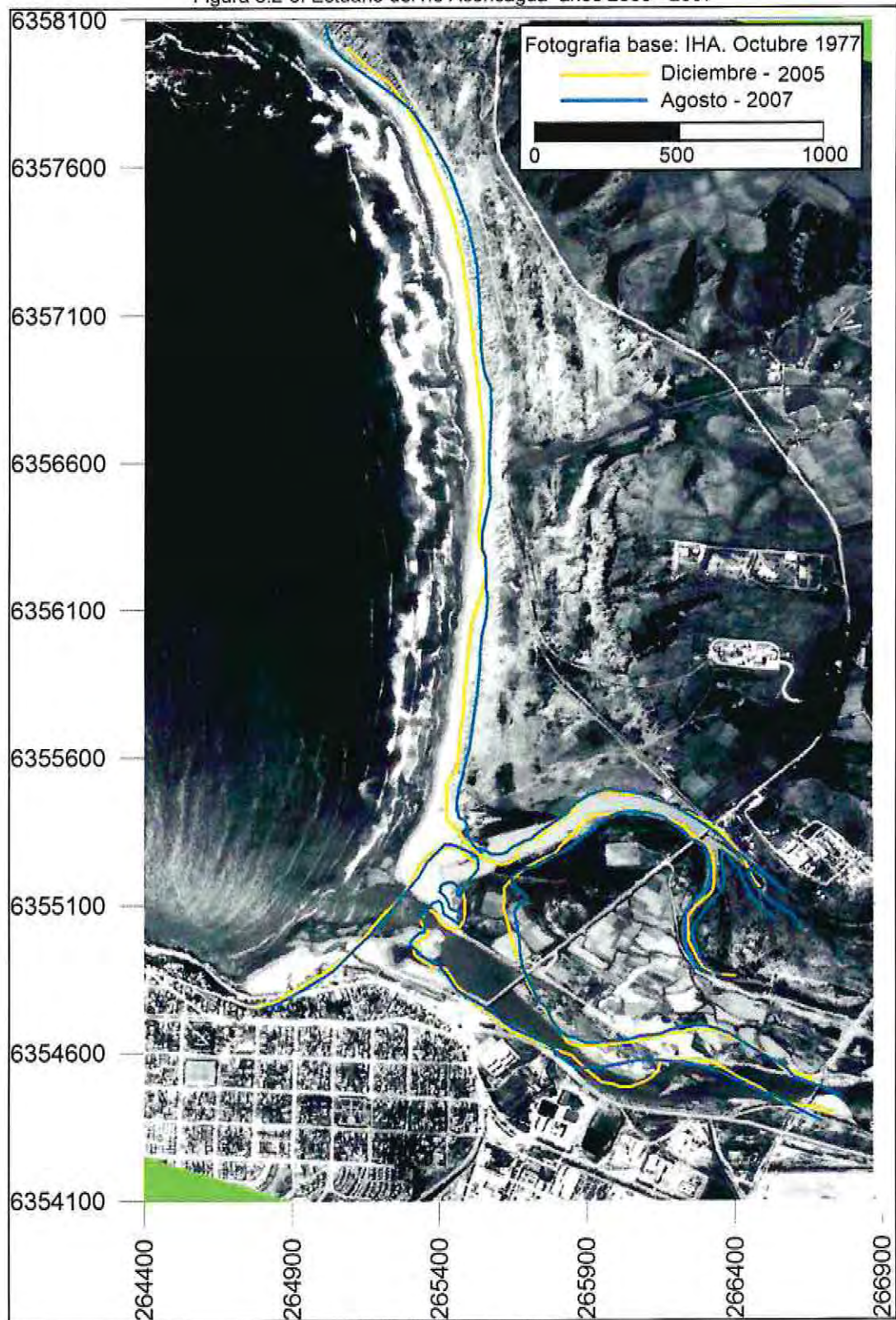
Figura 5.2-5: Estuario del río Aconcagua años 2004 - 2005



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

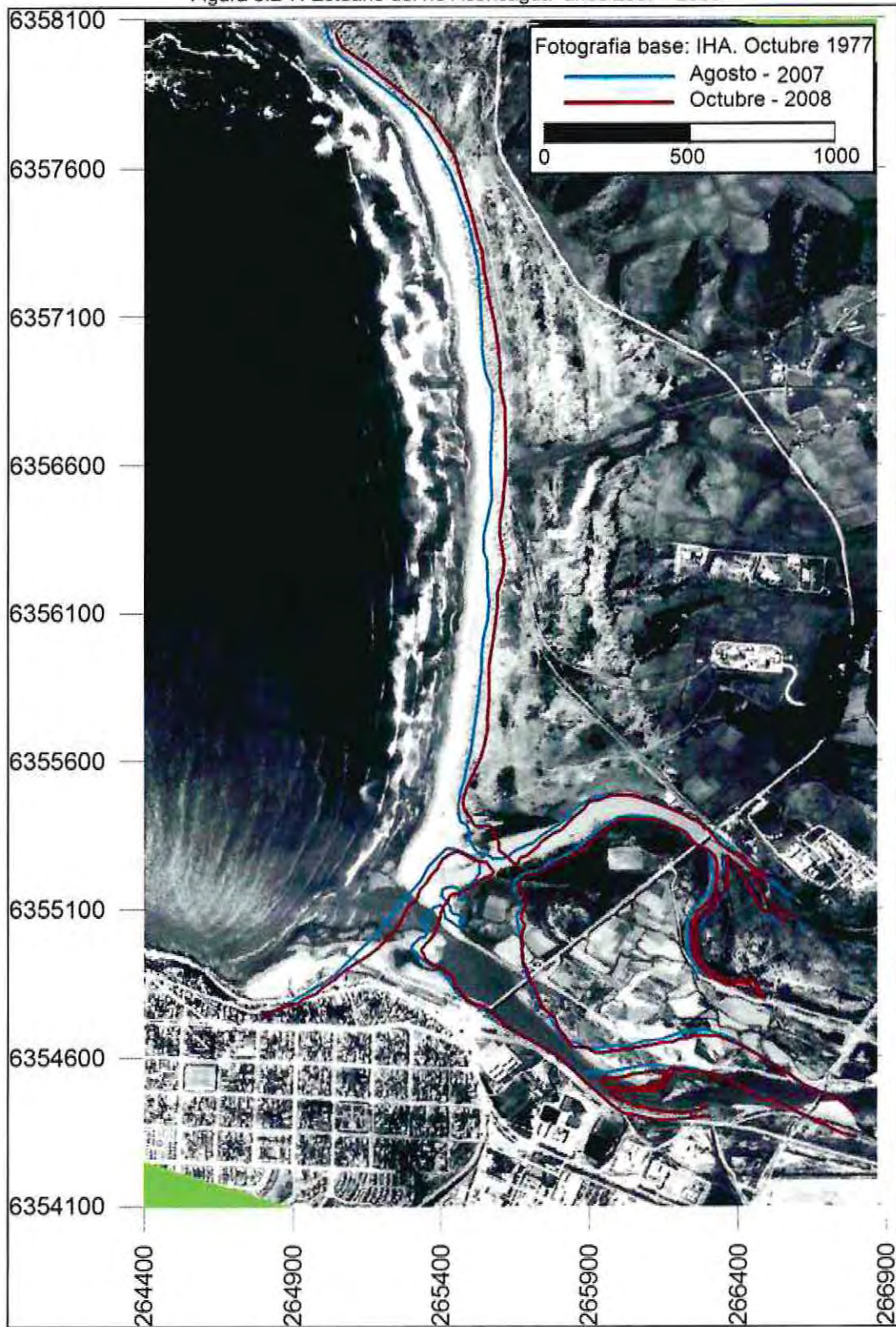
Figura 5.2-6: Estuario del río Aconcagua años 2005 - 2007



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

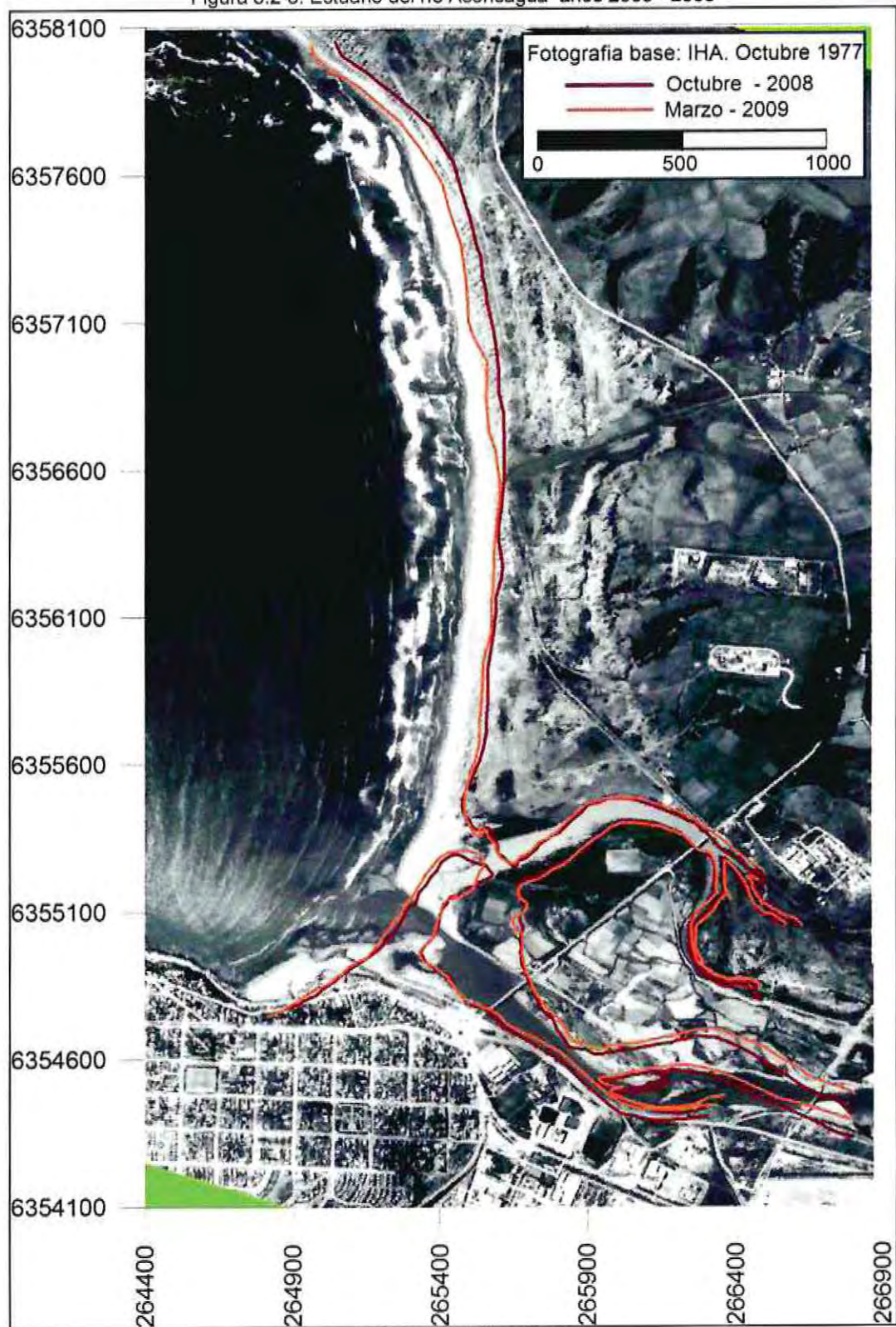
Figura 5.2-7: Estuario del río Aconcagua años 2007 - 2008



Fuente: Elaboración propia.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

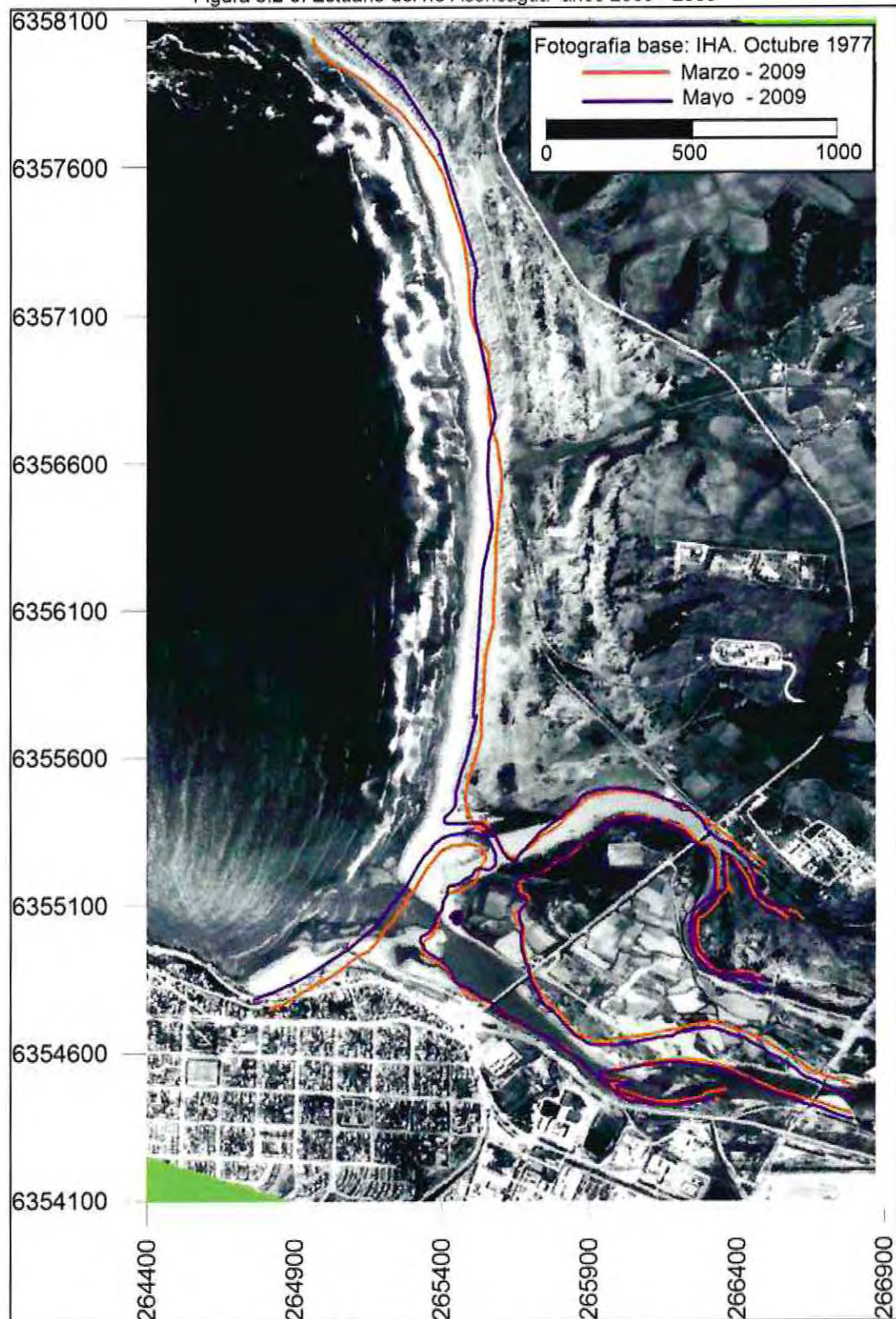
Figura 5.2-8: Estuario del río Aconcagua años 2008 - 2009



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

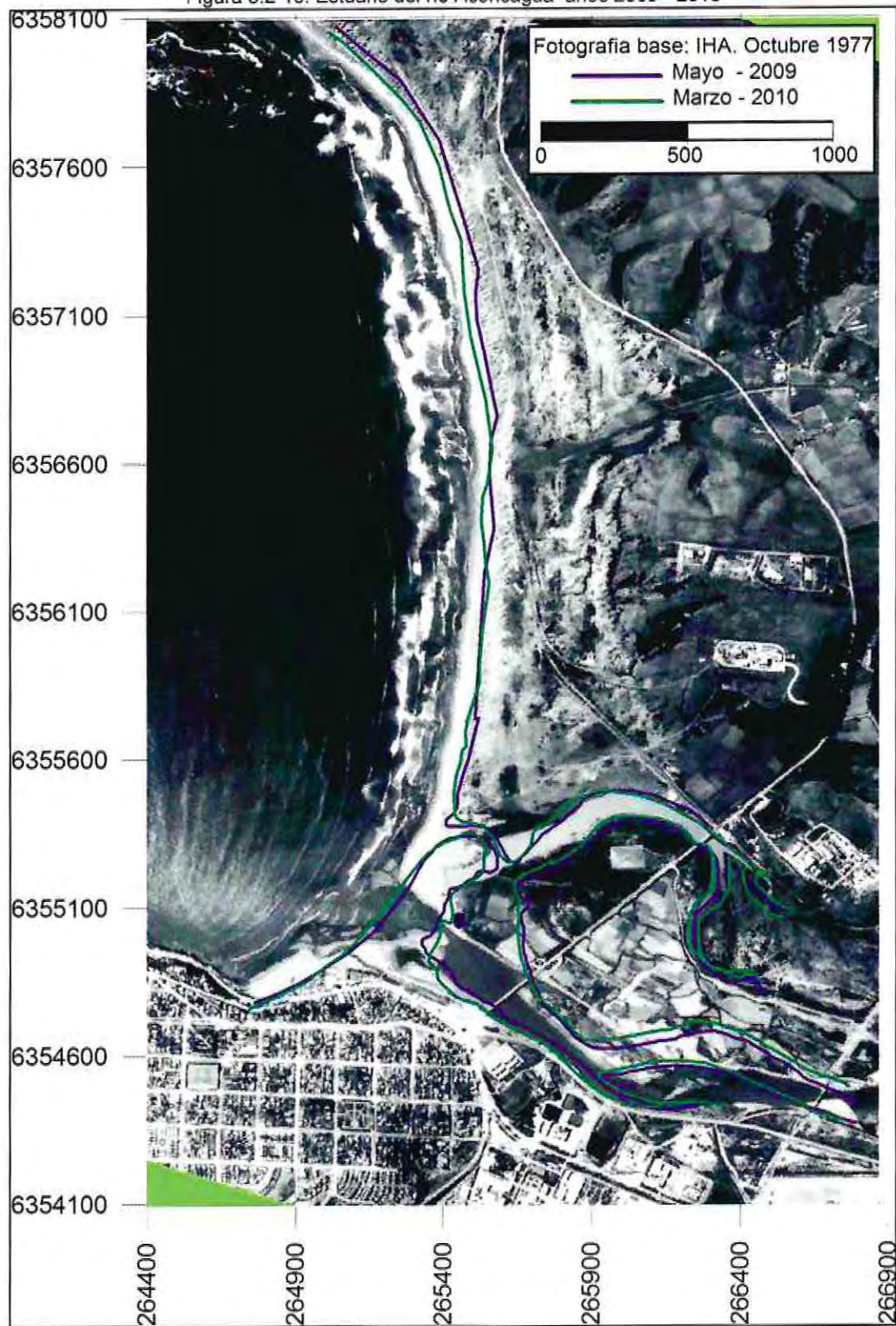
Figura 5.2-9: Estuario del río Aconcagua años 2009 - 2009



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

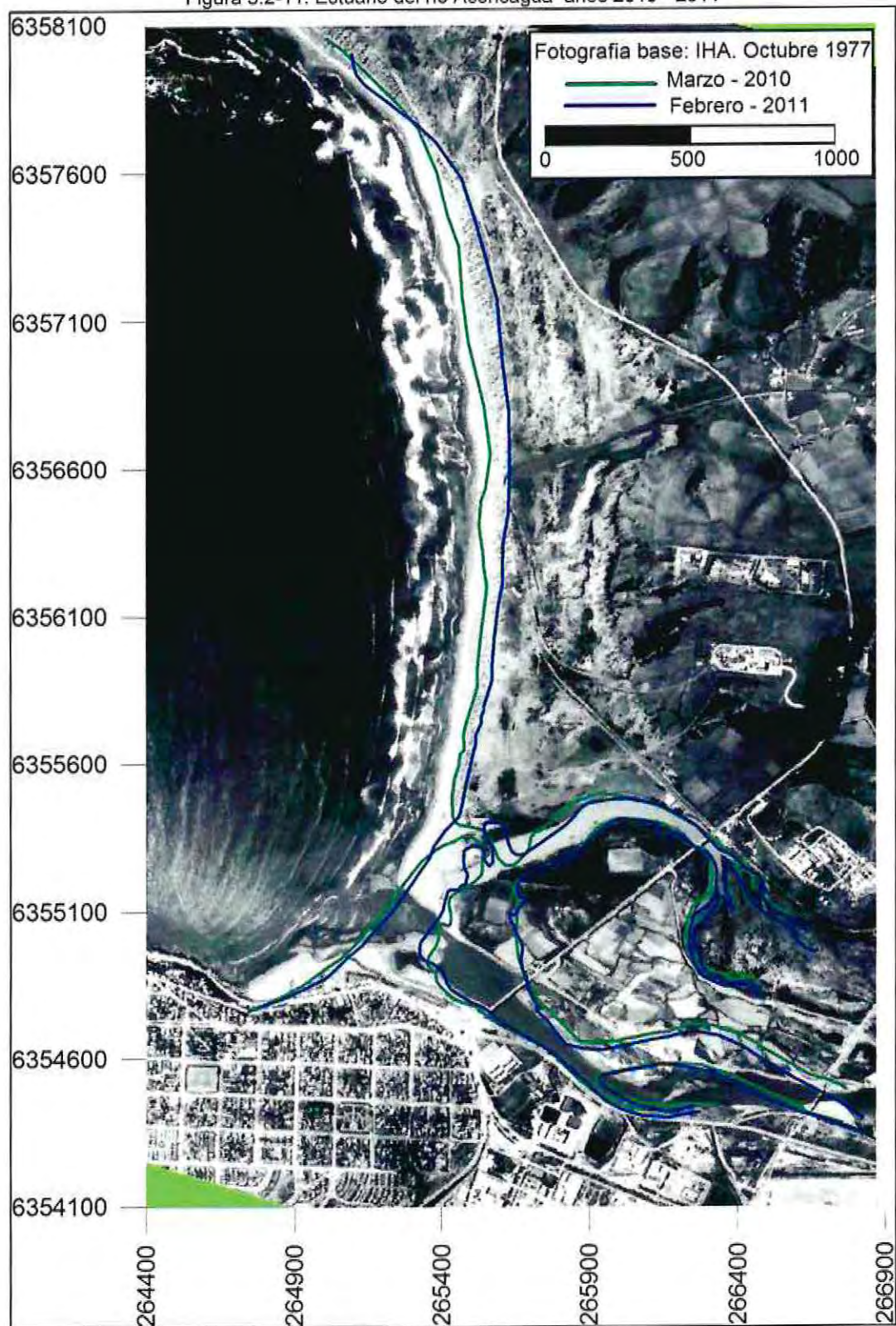
Figura 5.2-10: Estuario del río Aconcagua años 2009 - 2010



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

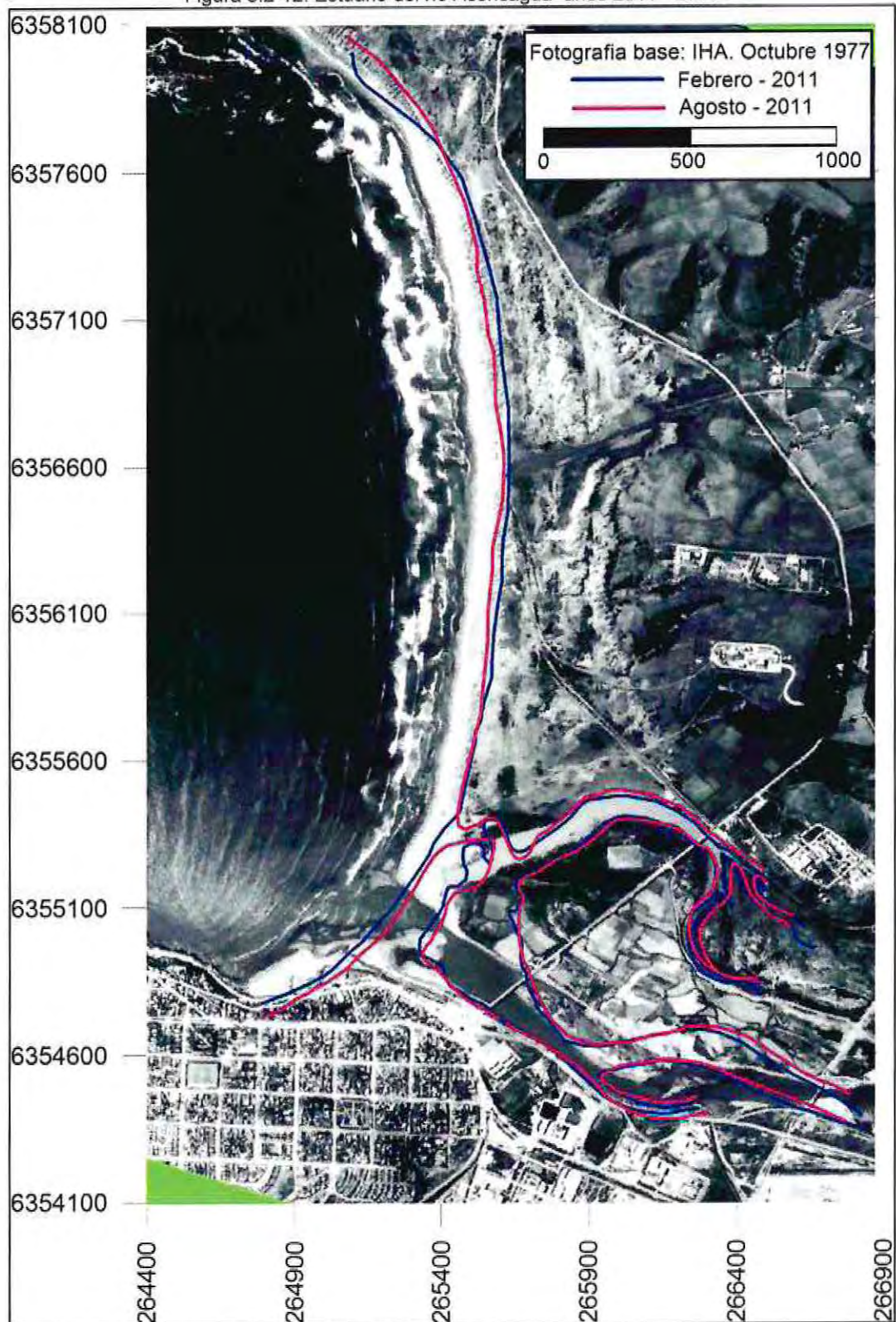
Figura 5.2-11: Estuario del río Aconcagua años 2010 - 2011



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.2-12: Estuario del río Aconcagua años 2011 - 2011



Fuente: Elaboración propia

#### 5.2.1.2 Análisis cuantitativo

La variación sufrida en la zona entre desde el año 1977 y 2011 se presenta en la Figura 5.2-13, considerando la diferencia de las líneas de costa entre el escenario base (1977) y cada año registrado. Como se aprecia en la zona de la desembocadura se ven las mayores variaciones, entre los años 1977 – 1980 alcanzando un máximo avance de 133 metros aproximadamente, mientras que el máximo retroceso fue de 270 m.

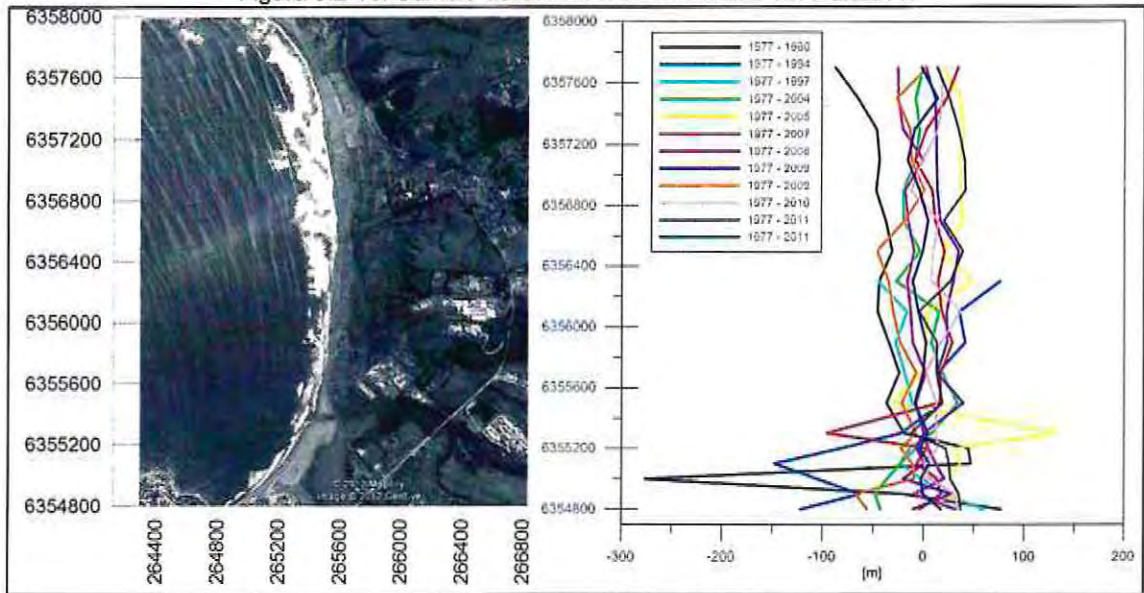
En términos generales la morfología de la playa no cambió para el periodo de tiempo analizado, presentando solamente en sitios focalizados algunos avances o retrocesos. Cabe destacar que las magnitudes de los desplazamiento relativos no han podido ser filtradas del efecto de los instantes mareales, debido a que se desconoce la hora exacta de la toma de las fotografías aéreas y por ende la fase del ciclo de desplazamiento del nivel del mar.

Así también se presenta la Figura 5.2-14 en donde se muestra el movimiento anual registrado entre cada año analizado desde la línea de costa base (1977) en donde confirma que los mayores movimientos se presentan en la zona de la desembocadura específicamente en la barra litoral, además a medida que pasan los años las variaciones van disminuyendo, es decir, la tasa de cambio de la posición de cada uno de los puntos de la línea litoral es baja y por lo tanto indicadora un estado de equilibrio.

Además en la Figura 5.2-15 se muestran las variaciones máximas (línea roja), mínimas (línea verde) y promedio (línea negra). En esta se aprecia un retroceso promedio de 1,71 metros por año en la toda la zona analizada, específicamente en la línea de costa (playa norte) retrocede 67 centímetros por año, en cambio en la zona del estuario se presenta un retroceso de 3,78 metros por año, esto se debe a los movimientos de la barra litoral

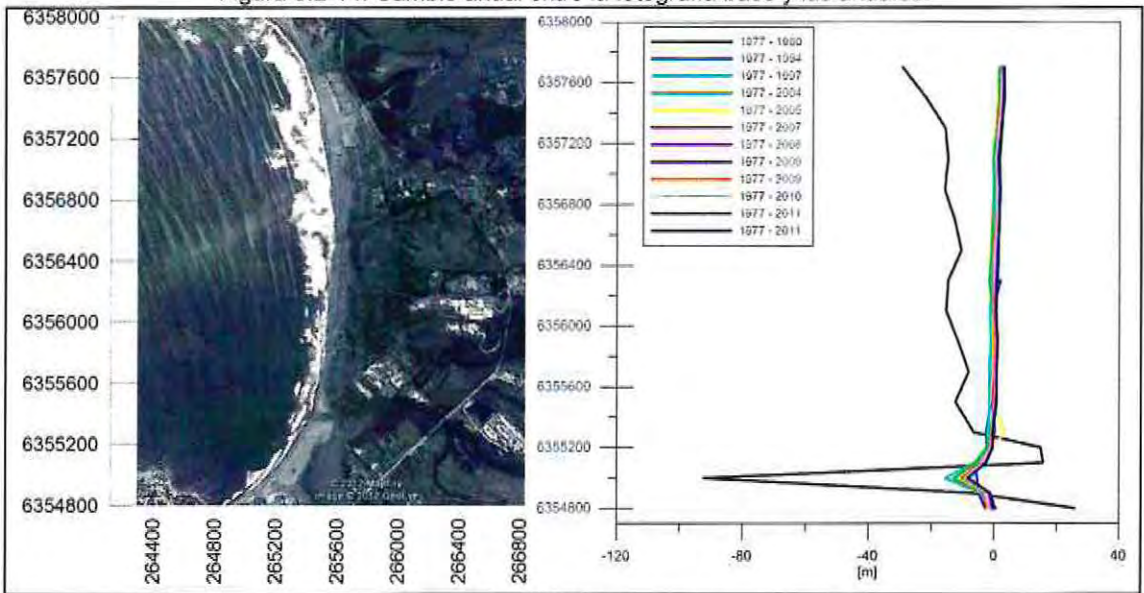
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.2-13: Cambio de la línea de costa desde 1977 al 2011.



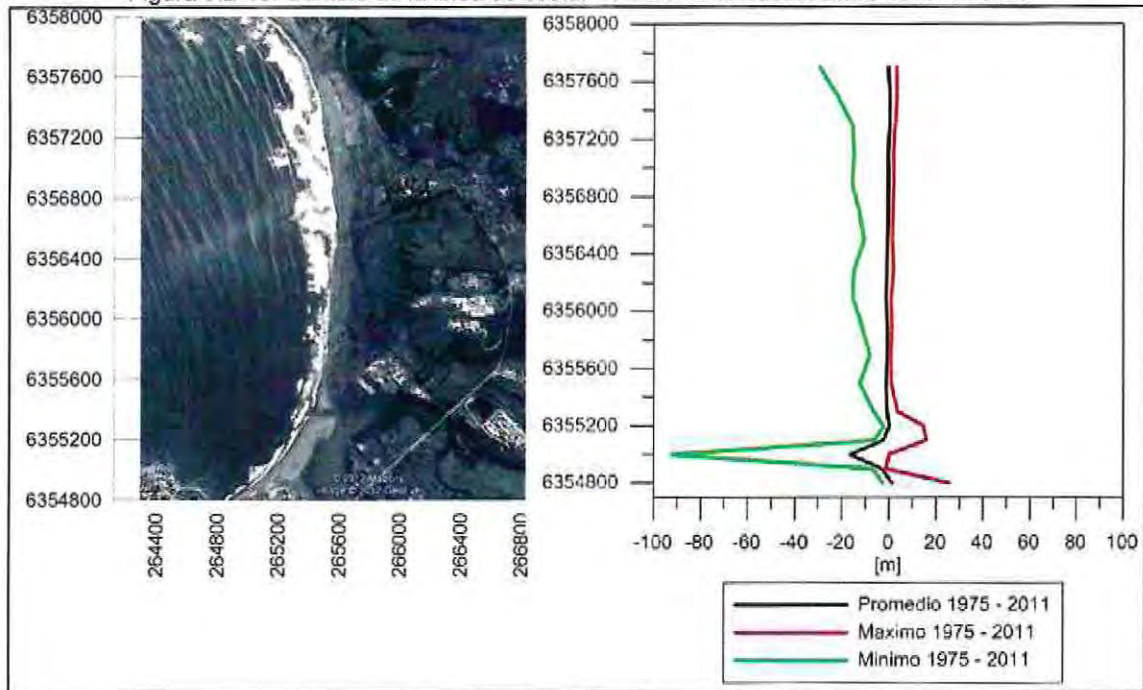
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.2-14: Cambio anual entre la fotografía base y las anuales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.2-15: Cambio de la línea de costa. Valores estadísticos. Entre 1977 – 2011.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en cuanto al movimiento de la línea de costa a lo largo de la playa Norte son similares a los registrados en el estudio de Martínez *et al.* (2011) el cual indica que la playa se retrocede a una tasa de 67 cm por año, siendo esto una confirmación no solo los resultados obtenidos sino también la metodología aplicada, lo que valida los resultados para la zona del estuario.

## 5.2.2 ANÁLISIS ESTACIONAL

El análisis estacional se realizó solo en el área del estuario, ya que en ésta se centra el estudio y es en ella donde se produce el mayor cambio en cuanto a la posición y desplazamiento de la barra litoral.

### 5.2.2.1 Verano.

Para realizar este análisis se contó con cuatro fotografías aéreas cuya información se presenta en la Tabla 5.2-1.

Al analizar las fotografías aéreas (ver Figura 5.2-17) se advirtió que históricamente el comportamiento de la barra litoral tuvo variaciones significativas, en las cuales se vio involucrada su posición y adicionalmente su formación. Los instantes críticos de la evolución morfodinámica estuvieron marcados por los siguientes estados:

- **Barras litorales en la ribera Norte y Sur:** Este estado morfodinámico se presentó en el año 1975
- **Barra litoral en una de las riberas:** De acuerdo al análisis desarrollado, este estado morfodinámico se presentó en el año 2010, desarrollándose solamente el lado sur de la ribera.
- **Ausencia de barra litoral, por cierre de la desembocadura:** Ésta condición se presentó tanto en 1997 como en el 2011.

La condición de cierre de la desembocadura reportada en los años 1997 y 2011, podrían deberse a un estado extraordinario de sedimentación el que asociada a bajos caudales del río, facilitaron la depositación. Además se muestra la formación de una pequeña isla aguas abajo del puente colmo la cual se adhiere a la ribera sur del río.

La dirección predominante del oleaje fue WNW para la estación del año analizada, tal como se muestra en Figura 5.2-16, lo que no tendría relación directa con la forma de la barra, en ninguno de sus estados morfodinámicos.

La Figura 5.2-17 muestra en conjunto todas las fotografías correspondientes a verano, de ella se aprecia un retroceso en la barra litoral promedio de 2,77 m/año, considerando solo los datos de estos años.

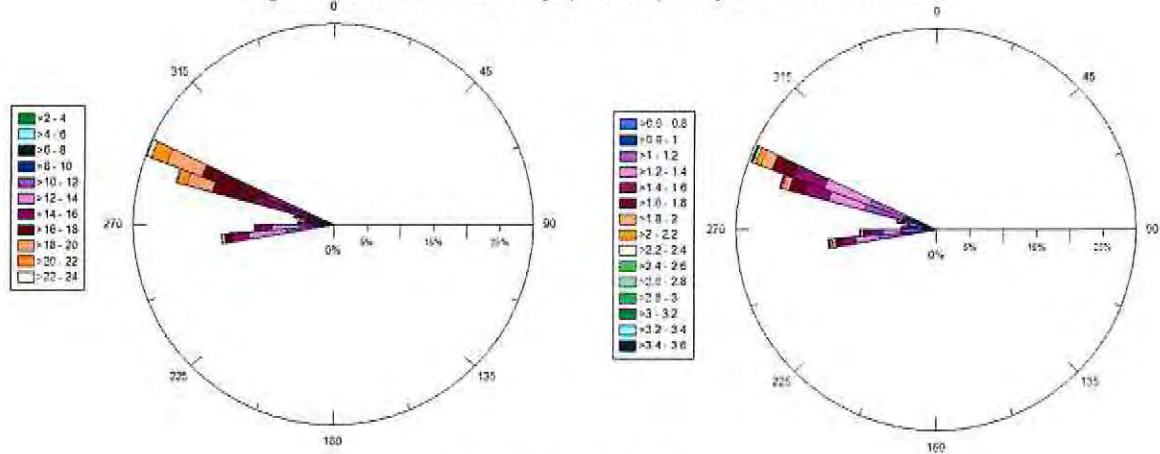
Tabla 5.2-1: Fotografías aéreas. Análisis verano

Fuente	Vuelo	Escala	Fecha
SHOA	No aplica	No aplica	Febrero de 1975
SAF	Geotec	1:70000	23 de Diciembre de 1997
Google earth	No aplica	No aplica	8 de Marzo de 2010
	No aplica	No aplica	1 de Febrero de 2011

Fuente: Elaboración propia

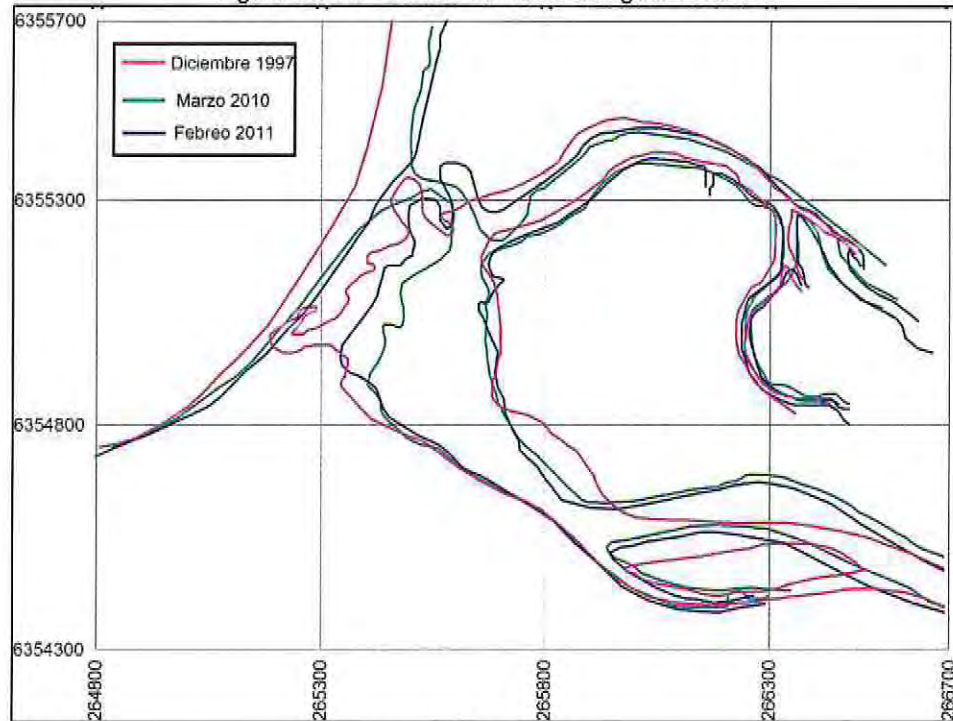
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.2-16: Rosa de oleaje periodo peak y altura Hmo. Verano



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.2-17: Estuario del río Aconcagua. Verano.



Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.2 Otoño

El análisis de la estación de Otoño contó con tres fotografías aéreas cuyas características se presenta en la Tabla 5.2-2.

Los cambios registrados históricamente se presentan en la Figura 5.2-19, estos fueron significativos en cuanto a las formas y tamaños de las barras, estos cambios son:

- **Barras litorales en la ribera Norte y Sur:** Este estado morfodinámico se presentó en el año 1980. La barra sur presenta un menor tamaño y su forma es más bien rosca en comparación que la norte.
- **Barra litoral en una de las riberas:** Se desarrolla en el año 2009 para las dos fotografías analizadas, prolongándose hasta los 550 metros lo que produce un desplazando la desembocadura del río hacia el Norte
- **Ausencia de barra litoral, por cierre de la desembocadura:** Esta condición no se presenta en la estación de otoño.

El desplazamiento de la desembocadura generado por la mayor extensión de la barra litoral, se podría deber a la acción del oleaje y el caudal en conjunto.

El primero de los agentes (oleaje) mostró que para ésta estación del año su dirección está asociada preferentemente al W y WSW (Figura 5.2-19). Esta condición generaría que la barra se alargará producto del transporte litoral generado por la incidencia oblicua del mismo. No se cuenta con datos del caudal del río desde el primera fotografía analizada por lo mismo no se puede analizar el comportamiento de este por completo, cabe destacar que en esta estación el caudal máximo alcanza los 60 m<sup>3</sup>/segundo lo que podría generar el desplazamiento del sedimento de la barra sur.

Las fotografías aéreas correspondientes al otoño en su conjunto indicaron un retroceso en la línea de costa 1,59 m/año como valor promedio, considerando solo los datos de estos años.

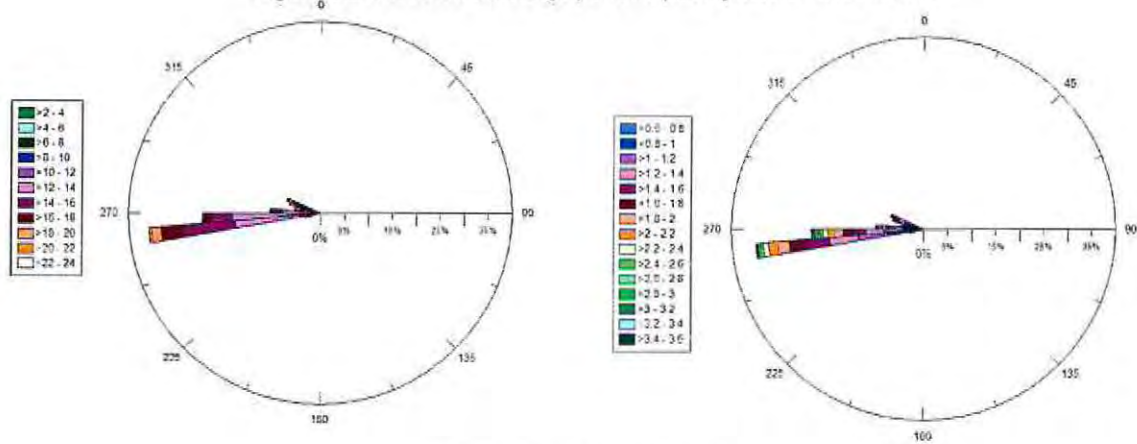
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Tabla 5.2-2: Fotografías aéreas. Análisis otoño.

Fuente	Vuelo	Escala	Fecha
SAF	CH:30	1:30000	12 de Junio de 1980
Google earth	No aplica	No aplica	28 de Marzo de 2009
	No aplica	No aplica	31 de Mayo de 2009

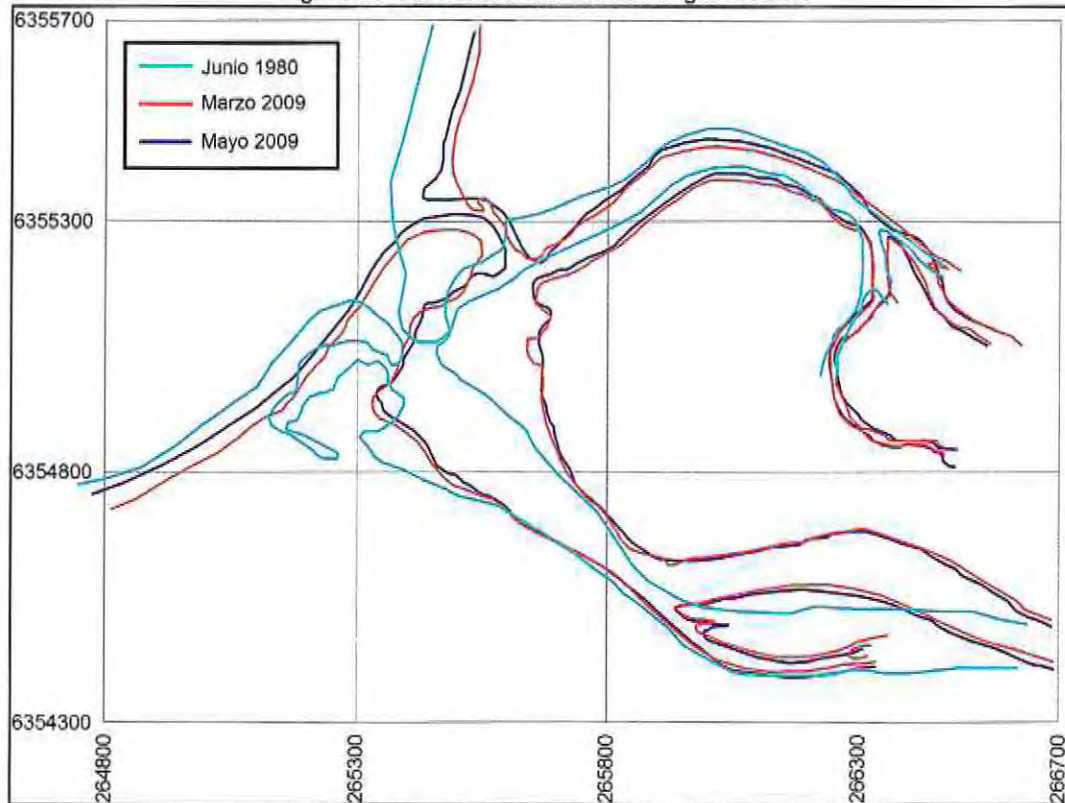
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.2-18: Rosa de oleaje periodo peak y altura Hmo. Otoño



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.2-19: Estuario del río Aconcagua. Otoño.



Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.3 Invierno

Para el análisis de invierno se contó con tres fotografías aéreas de la zona, con las cuales se generó la Figura 5.2-21, mientras la información de estas se presenta en la Tabla 5.2-3.

Las fotografías aéreas analizadas muestran que no hay cambios significativos en cuanto a:

- **Barras litorales en la ribera Norte y Sur:** No se reconoce la presencia de la barra norte, aunque hay acumulación de sedimentos en la zona norte de la desembocadura.
- **Barra litoral en una de las riberas:** Solo se aprecia la presencia de la barra litoral sur.
- **Ausencia de barra litoral, por cierre de la desembocadura:** Esta condición no se presentó para esta estación.

Si bien en invierno los caudales alcanzan los máximos registrados no se advierte consecuencia de esto en la zona de la desembocadura ya sea cambio en el largo de la barra o bien no existencia de esta. El oleaje proviene del WSW y W en su mayoría lo que puede influir en el largo y tamaño de la barra debido a la incidencia del mismo sobre la costa.

De la Figura 5.2-21 se puede concluir que en la zona se presenta un avance promedio de 1,21m/año aprox. Considerando solo los datos de esta estación.

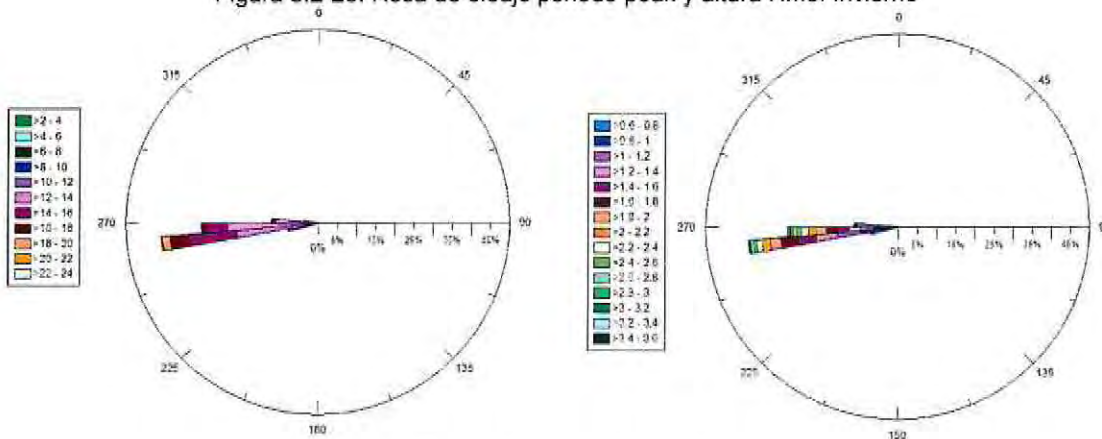
Tabla 5.2-3: Fotografías aéreas. Análisis invierno.

Fuente	Vuelo	Escala	Fecha
SAF	Geotec	1:70000	Septiembre de 2005
Google earth	No aplica	No aplica	19 de Agosto de 2007
	No aplica	No aplica	2 de Agosto de 2011

Fuente: Elaboración propia

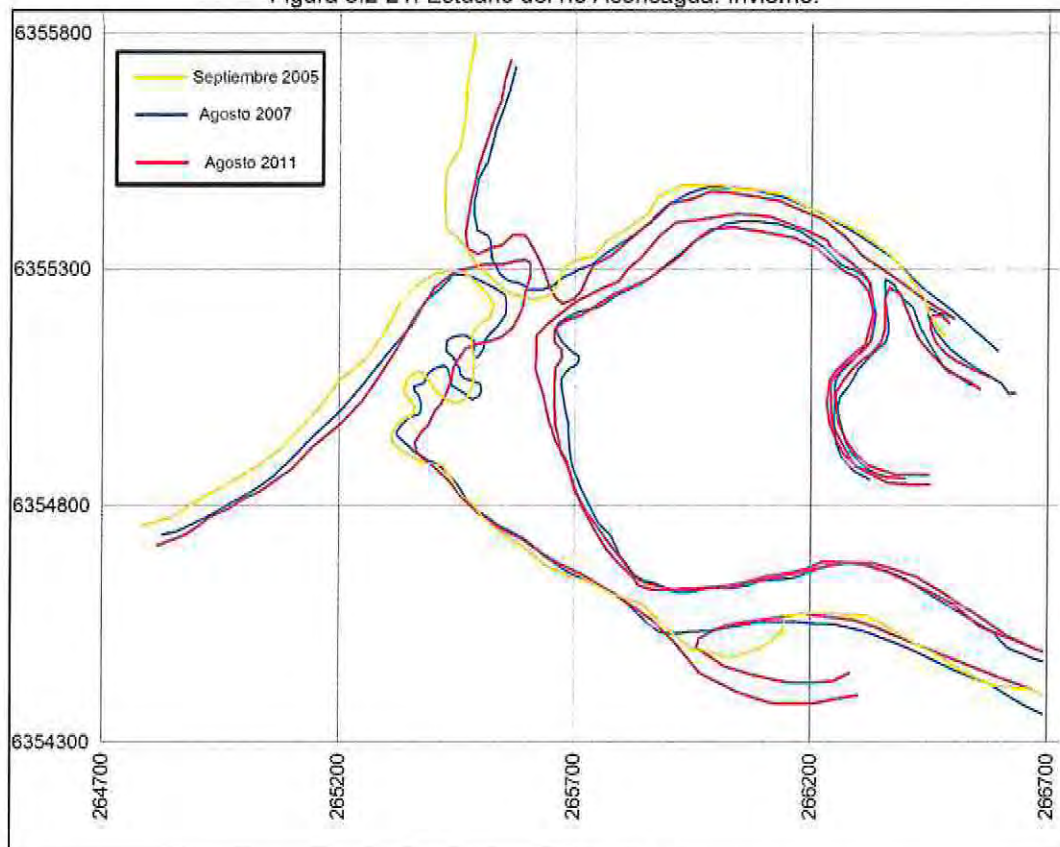
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.2-20: Rosa de oleaje periodo peak y altura Hmo. Invierno



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.2-21: Estuario del río Aconcagua. Invierno.



Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.2.4 Primavera

Se contó con cuatro fotografías aéreas para realizar el análisis estacional de primavera, los detalles de estas se presentan en la Tabla 5.2-4. En base a ellas se realizó la Figura 5.2-23 de las que se puede concluir que se presentan los siguientes cambios.

- **Barras litorales en la ribera Norte y Sur:** No se presenta en esta estación.
- **Barra litoral en una de las riberas:** Se aprecia una barra norte en 1994 y una sur en el año 2004.
- **Ausencia de barra litoral, por cierre de la desembocadura:** No se presenta en esta estación.
- **Ausencia de barra litoral:** Esta configuración se presenta en la primera imagen analizada correspondiente al año 1977 en donde se aprecia una acumulación de sedimentos en la zona interior del estuario cerca de la desembocadura en la ribera sur.

Como se mencionó no hay mayor parecido en las formas de la barra, esto puede deberse a oleaje que afecta la zona en conjunto con los caudales del río. El oleaje proviene desde la dirección W en su mayoría lo que explicaría la dirección de la barra sur y aunque en invierno se presentan los mayores caudales, en esta estación también se presentan valores altos debido a los deshielos en cordillera lo que puede explicar el comportamiento registrado en 1977 en donde no se ve una barra definida.

En la Figura 5.2-23 se muestra un retroceso en la zona de estudio de aproximadamente 2,98 m/año. Tomando en consideración solo los datos de esta época.

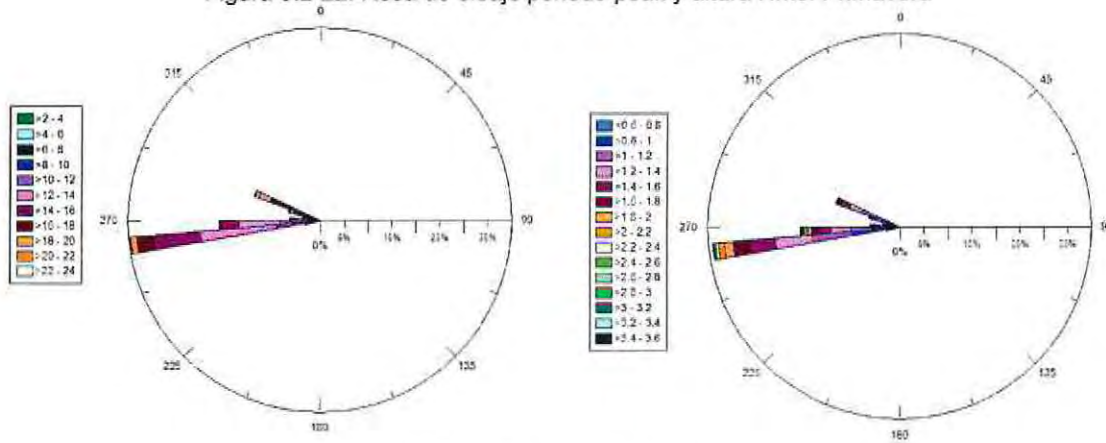
Tabla 5.2-4: Fotografías aéreas. Análisis primavera.

Fuente	Vuelo	Escala	Fecha
SHOA	No aplica	No aplica	Octubre de 1977
SAF	Fondec	1:20000	21 de Octubre de 1994
Google earth	No aplica	No aplica	17 de Diciembre de 2004
	No aplica	No aplica	14 de Octubre de 2008

Fuente: Elaboración propia

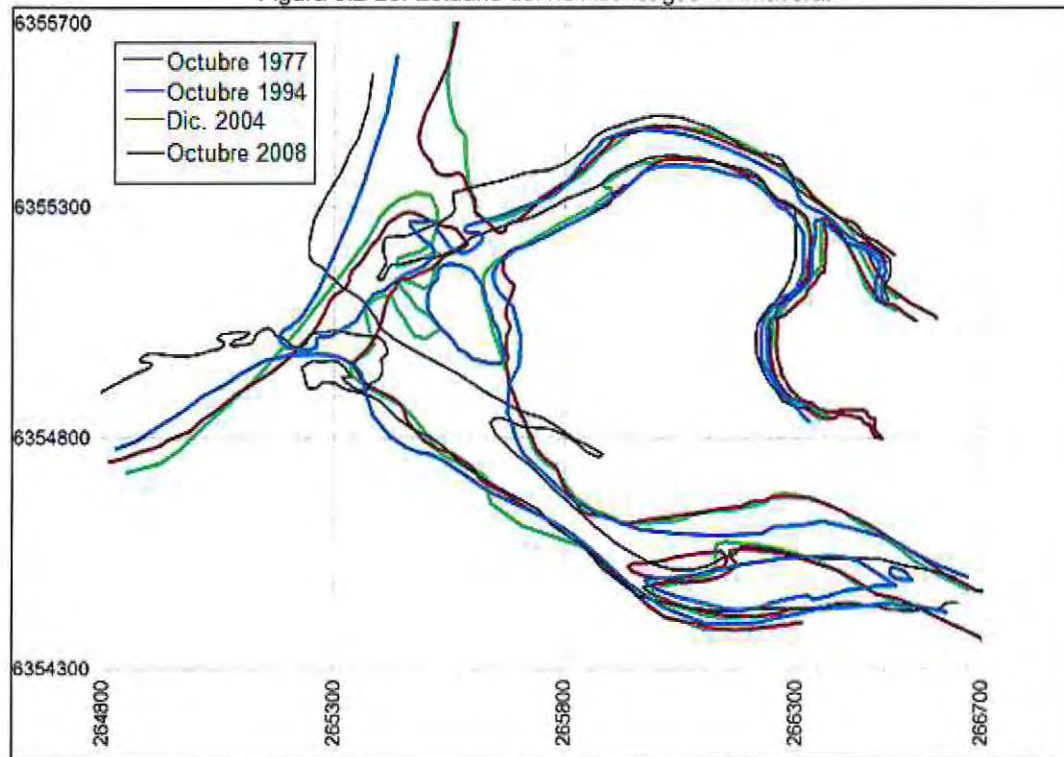
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.2-22: Rosa de oleaje periodo peak y altura Hmo. Primavera



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.2-23: Estuario del río Aconcagua. Primavera.



Fuente: Elaboración propia

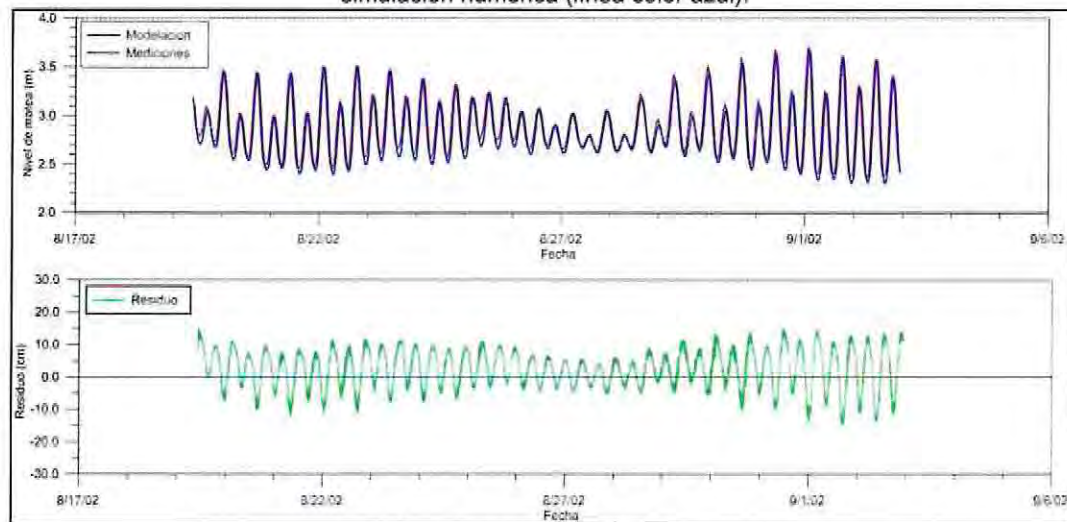
## 5.3 MODELACIÓN NUMÉRICA.

### 5.3.1 CALIBRACION DEL MODELO

Los resultados obtenidos de la calibración del modelo son presentados en las Figura 5.3-1 y 4 – 2. De su análisis se puede indicar que las mareas simuladas (Figura 5.3-1 línea de color azul) son capaces de representar de manera adecuada las registradas en el estuario (Figura 5.3-1 línea de color rojo), además se muestra que el residuo entre las series de tiempo, este registra valores entre los -14,402 y 15,794 centímetros.

Por su parte, la Figura 5.3-2 muestra una comparación dato a dato, esto quiere decir que se grafican uno a uno los datos medidos con los datos modelados sin considerar su dependencia temporal. La relación entre estos alcanza el 96% de correlación, lo que indica que los datos están bien representados en relación a la estadística, por ende las estimaciones que se realicen con el modelo numérico serán adecuadas con las forzantes en condiciones naturales.

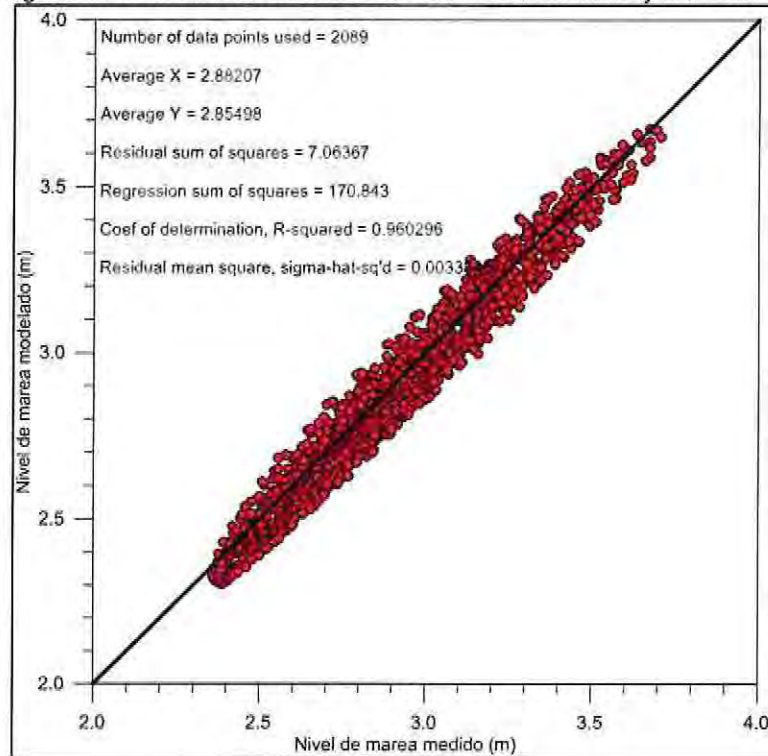
Figura 5.3-1: Comparación de series de tiempo de las mareas medidas (línea color rojo) y las obtenidas de la simulación numérica (línea color azul).



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-2: Datos de validación entre las mareas medidas y modeladas.



Fuente: Elaboración propia

## 5.3.2 ESCENARIOS SIMULADOS

### 5.3.2.1 Caracterización hidrodinámica del estuario.

Como se mencionó anteriormente se obtuvieron series de tiempo de las corrientes en cuatro secciones del estuario, los resultados de éstas se presentan en el Anexo B – Resultados de la simulación numérica – Modelo FESWMS. De estas series se calcularon los promedios de cada transecta y punto de medición, siendo estos valores reportados en el presente capítulo.

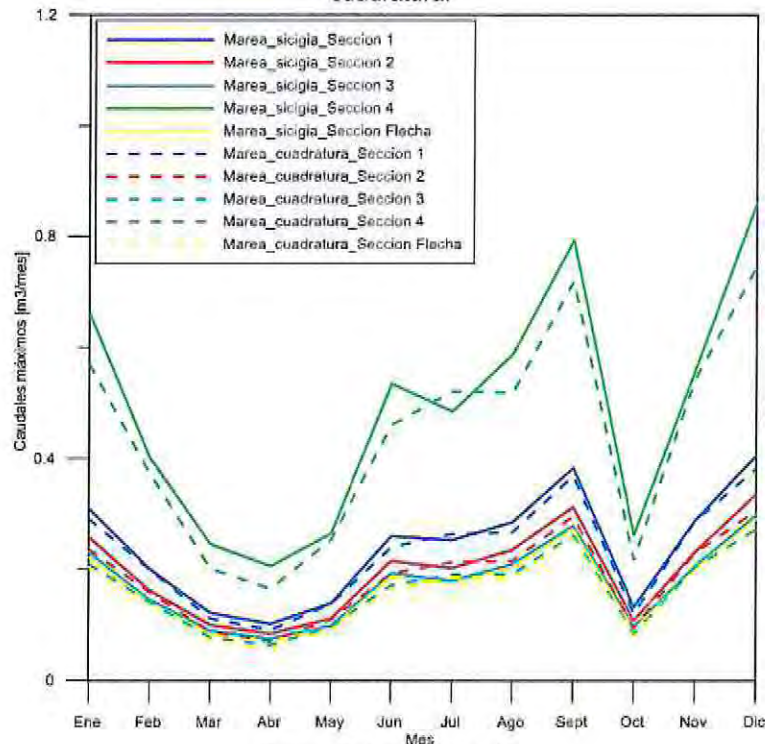
Los resultados obtenidos indican que en la zona de la desembocadura se presentan las mayores magnitudes de corrientes en todas las simulaciones (Gráfico 5.3-1), en condición de sicigia estas varían desde los 0,205 a 0,859 m<sup>3</sup>/mes, mientras que en cuadratura los valores máximos varían entre los 0,164 y 0,745 m<sup>3</sup>/mes, en los meses de abril y diciembre.

Cabe destacar que en todas las secciones, las mayores magnitudes de corriente se obtuvieron para los caudales máximos. En el sector específico de la barra se registran menores corrientes en comparación con las demás secciones analizadas. Es importante

mencionar que para la condición de sicigia las corrientes registradas son mayores en todas las simulaciones.

Los caudales mínimos generaron corrientes máximas entre los 0,086 y 0,161 m/s, mientras que los valores mínimos variaron entre los 0,022 y 0,042 m/s (Gráfico 5.3-2), lo destacable de estos resultados es la forma de la serie de tiempo de corrientes resultantes, está claramente muestra la incidencia de la marea en todas las estaciones en ambas condiciones analizadas.

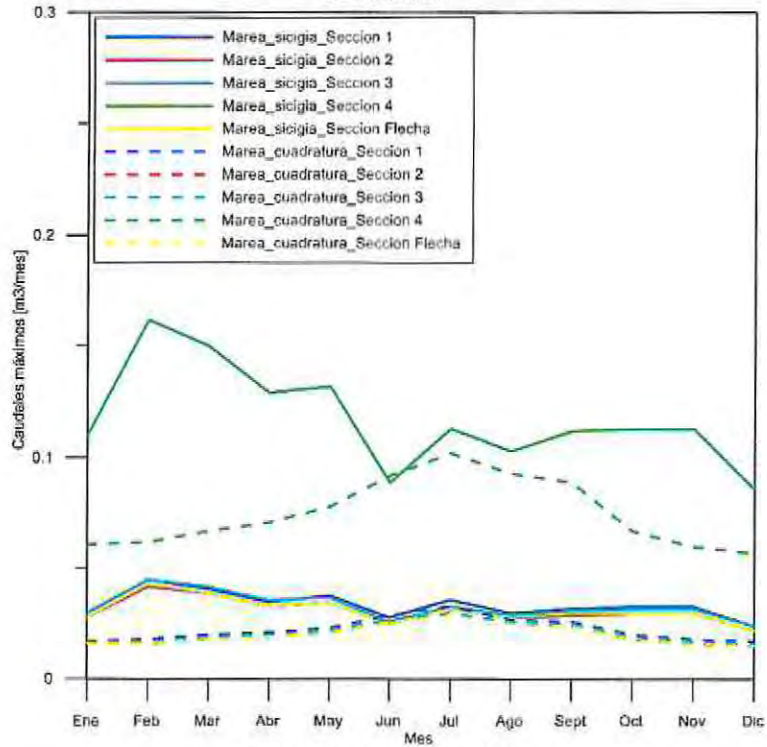
Gráfico 5.3-1: Resultados simulación numérica - Caudales máximos [m<sup>3</sup>/mes] – Condiciones de marea Sicigia y cuadratura.



Fuente: Elaboración propia

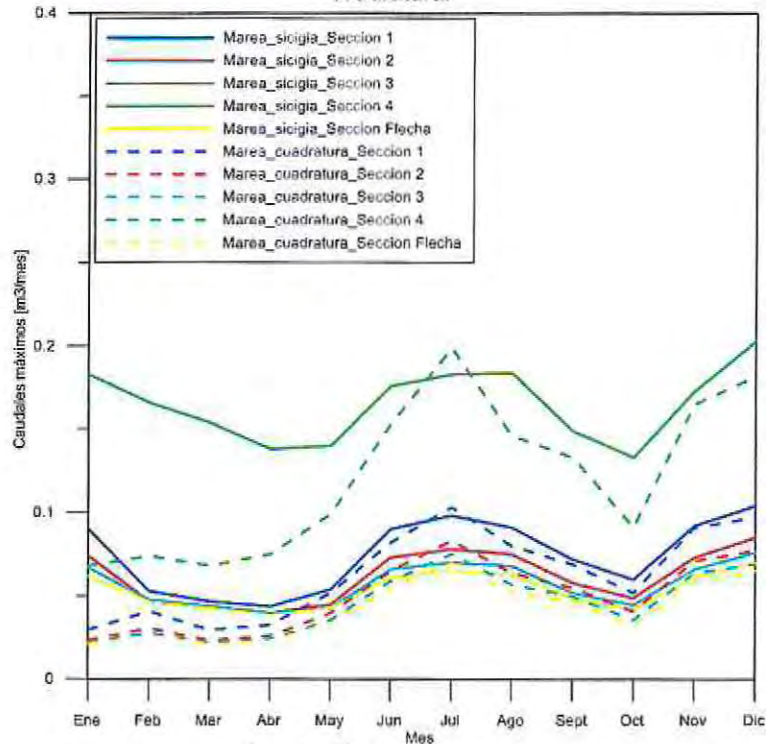
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Gráfico 5.3-2: Resultados simulación numérica - Caudales mínimos [m<sup>3</sup>/mes] – Condiciones de marea Sicigia y cuadratura.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5.3-3: Resultados simulación numérica - Caudales promedios [m<sup>3</sup>/mes] – Condiciones de marea Sicigia y cuadratura.



Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2.2 Transporte de sedimento con barra litoral.

Los resultados de las simulaciones numéricas del transporte de sedimento, muestran el promedio mensual de este bajo las condiciones de marea de sicigia y cuadratura en conjunto con el caudal máximo asociado al mismo mes.

El mes de enero en condición de sicigia (ver Figura 5.3-3) se presentó el mayor transporte de sedimentos, no solo tasa sino también en el área de cobertura alcanzando hasta los 82,5 m<sup>3</sup>/mes, en cambio para la cuadratura (Figura 5.3-4) el gasto sólido fue de 69,1 m<sup>3</sup>/mes en un área más reducida.

Tanto en marea de sicigia como de cuadratura, el transporte de sedimentos se concentró preferentemente en la desembocadura del río con dirección resultante hacia el mar, sin embargo, aguas arriba la capacidad de movilizar sedimentos por parte del caudal son bajas y por lo tanto es de esperar que para el mes de Enero, el gasto sólido fluvial no aporte significativamente a la unidad fisiográfica marina.

En la Figura 5.3-5 se presenta el arrastre de sedimento promedio de Febrero para sicigia con el caudal máximo, el que al igual que el mes de Enero se presenta el máximo en la boca del estuario alcanzando hasta los 98,2 m<sup>3</sup>/mes. La Figura 5.3-6 presenta el promedio del transporte en condición de cuadratura el cual resultó menor que el escenario anterior con magnitud del orden de 13,5 m<sup>3</sup>/mes, en la misma zona.

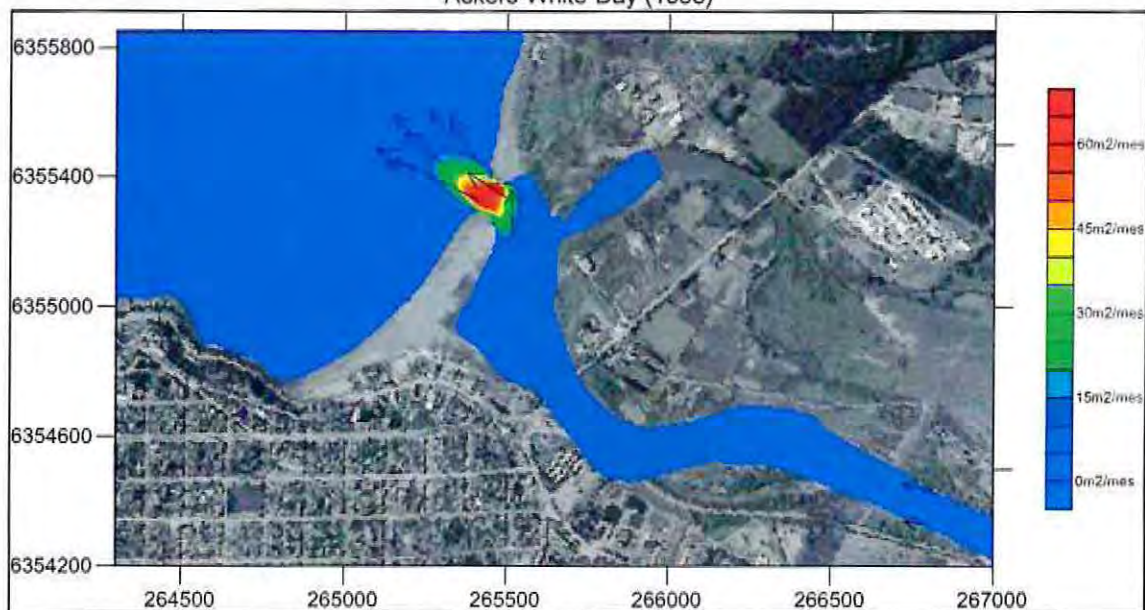
Para los meses de Marzo, Abril, Mayo y Octubre (Figura 5.3-7, Figura 5.3-8, Figura 5.3-9 y Figura 5.3-18) solo se simuló la marea en sicigia ya que el caudal máximo es bajo comparado con el resto de los meses. Los resultados obtenidos registraron valores máximos de transporte de partículas de 6,7; 10,8 y 2,46 m<sup>3</sup>/mes respectivamente en la zona de la desembocadura del río.

Los meses de Junio, Julio, Agosto y Noviembre muestran comportamientos similares, en condición de sicigia (Figura 5.3-10, Figura 5.3-12, Figura 5.3-14 y Figura 5.3-19 ) con alto transporte de sedimento en la misma área de las simulaciones anteriores, los valores máximos alcanzan hasta los 134,58; 80,36; 115,80 y 150,64m<sup>3</sup>/mes respectivamente. En cambio para las condiciones de cuadratura (Figura 5.3-11, Figura 5.3-13, Figura 5.3-15 y Figura 5.3-20) el transporte máximo no superó los 13,00 m<sup>3</sup>/mes.

Como se aprecia las Figura 5.3-16 y 3 – 21 el mayor transporte de sedimento ya sea en la boca, estuario y río se registró los meses de Septiembre y Diciembre en condición de sicigia para caudales sobre los  $150 \text{ m}^2/\text{s}$  el transporte de sedimento alcanza máximos de  $421,64$  y  $548,63 \text{ m}^3/\text{mes}$  los que son hasta un  $300\%$  más altos que los máximos registrados para caudales bajo los  $120 \text{ m}^2/\text{s}$ , lo que indica que las velocidades de corrientes generadas por estos son capaces de mover más sedimentos a lo largo de toda la zona estudiada. Otra gran diferencia es que en condición de cuadratura (Figura 5.3-17 y 3 – 22) también se ve gran movimiento de los sedimentos a lo largo del río y estuario a diferencia de los otros meses analizados, los valores máximos alcanzan los  $135,39$  y  $167,29 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

Los resultados indican que el río con caudales mínimos y promedios no sería capaz de generar corrientes lo suficientemente fuertes para transportar el sedimento en la zona, lo que implica que este río no es fuente sedimentaria para la barra litoral o la las playas aledañas a este.

Figura 5.3-3: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Enero según Ackers-White-Day (1983)

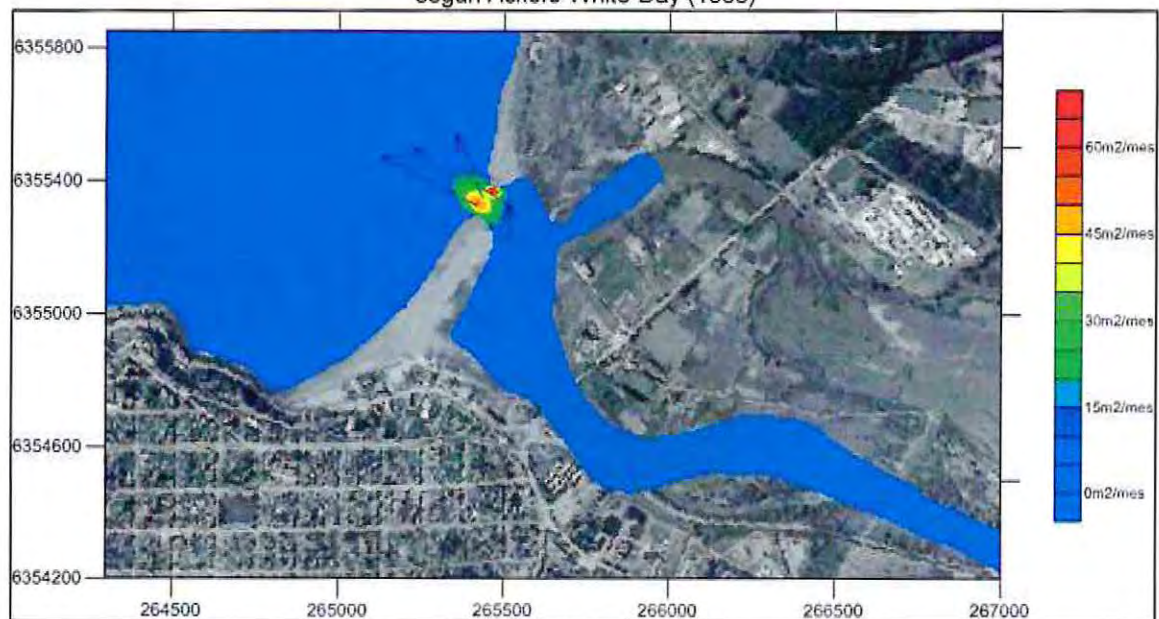


Fuente: Elaboración propia



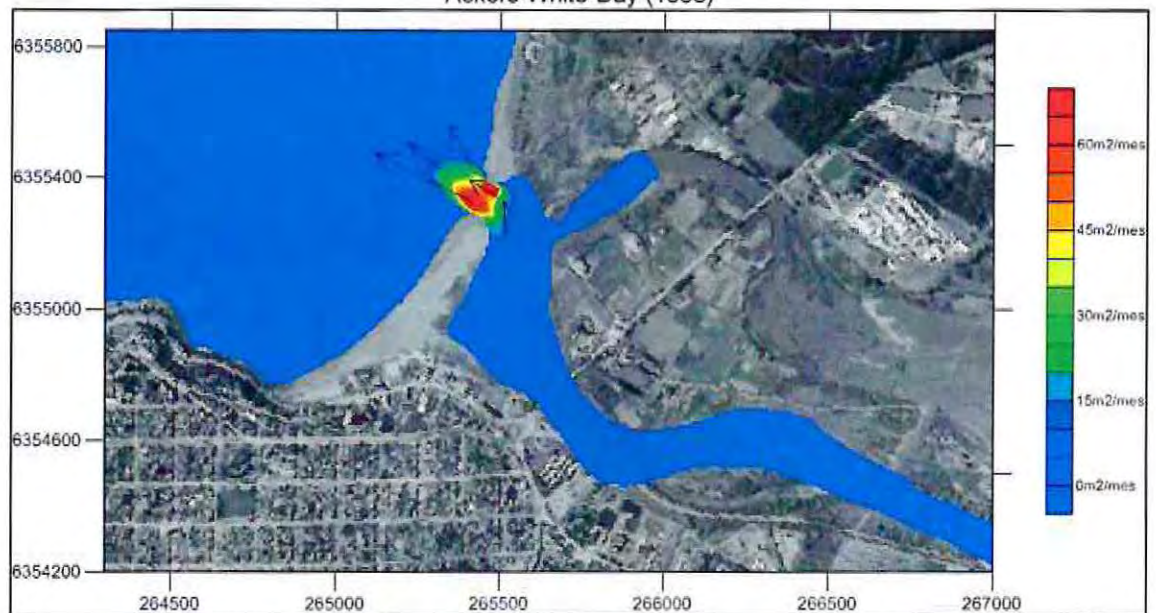
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-4: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Enero según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

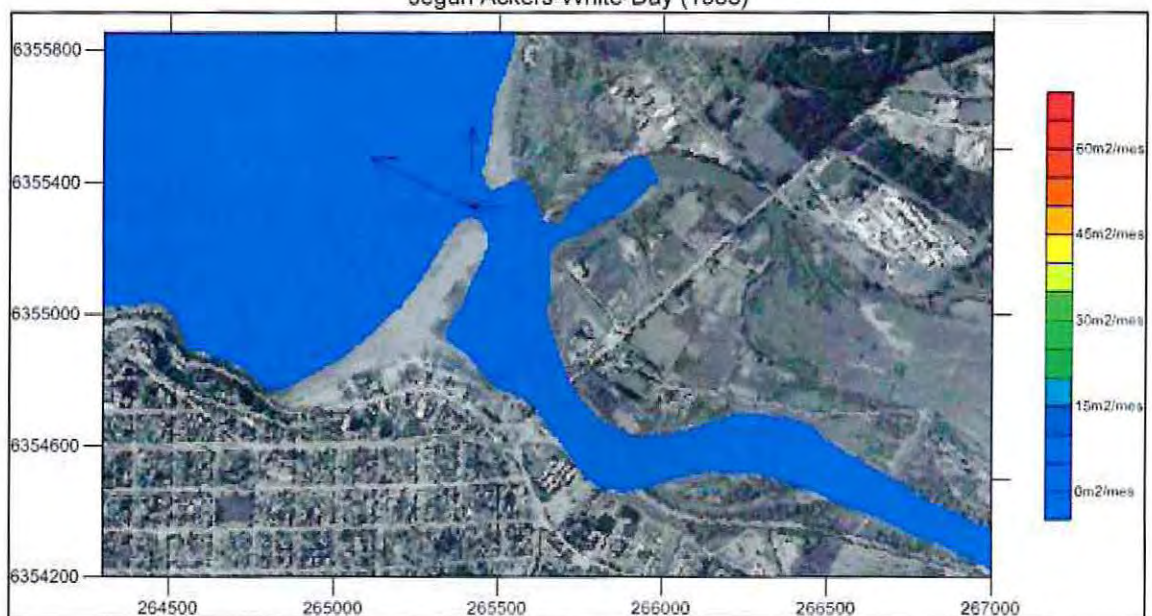
Figura 5.3-5: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Febrero según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

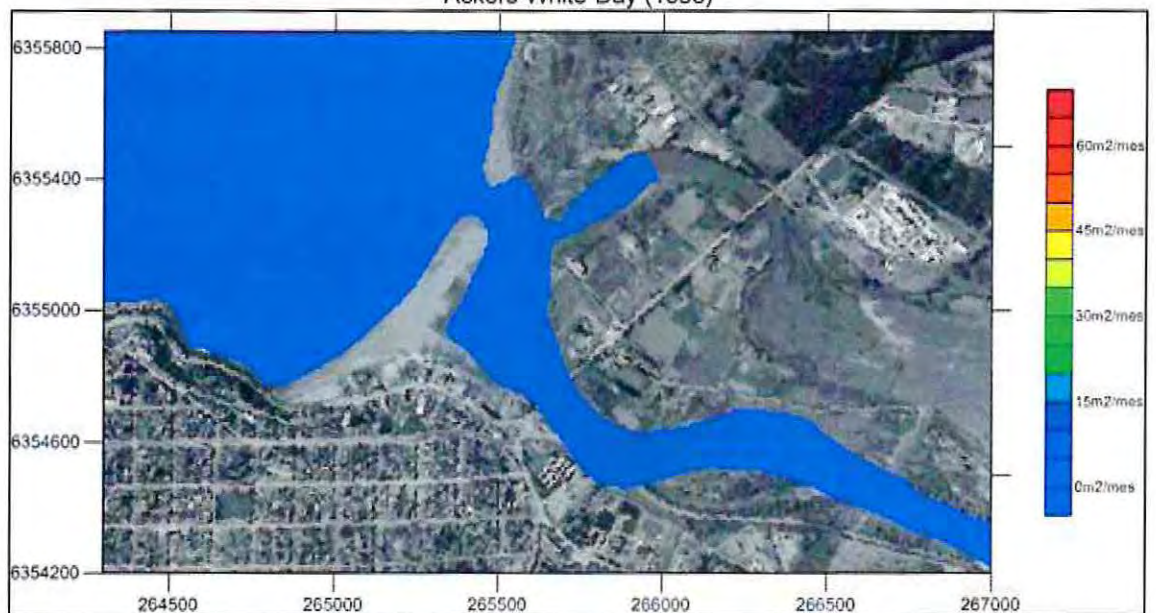
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-6: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Febrero según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

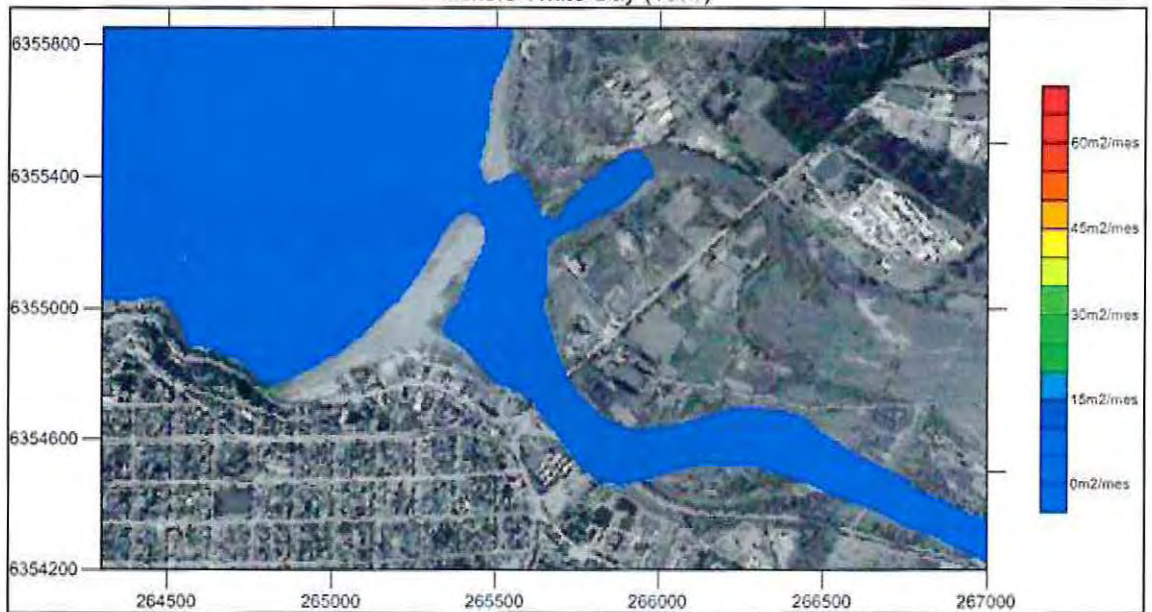
Figura 5.3-7: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Marzo según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

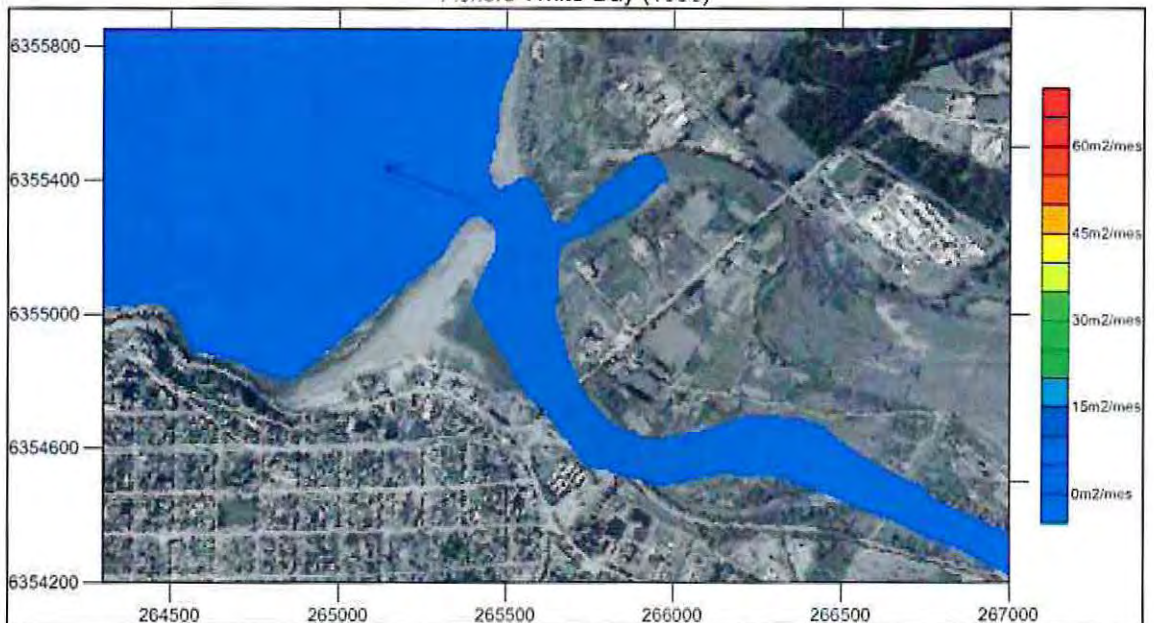
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-8: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Abril según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

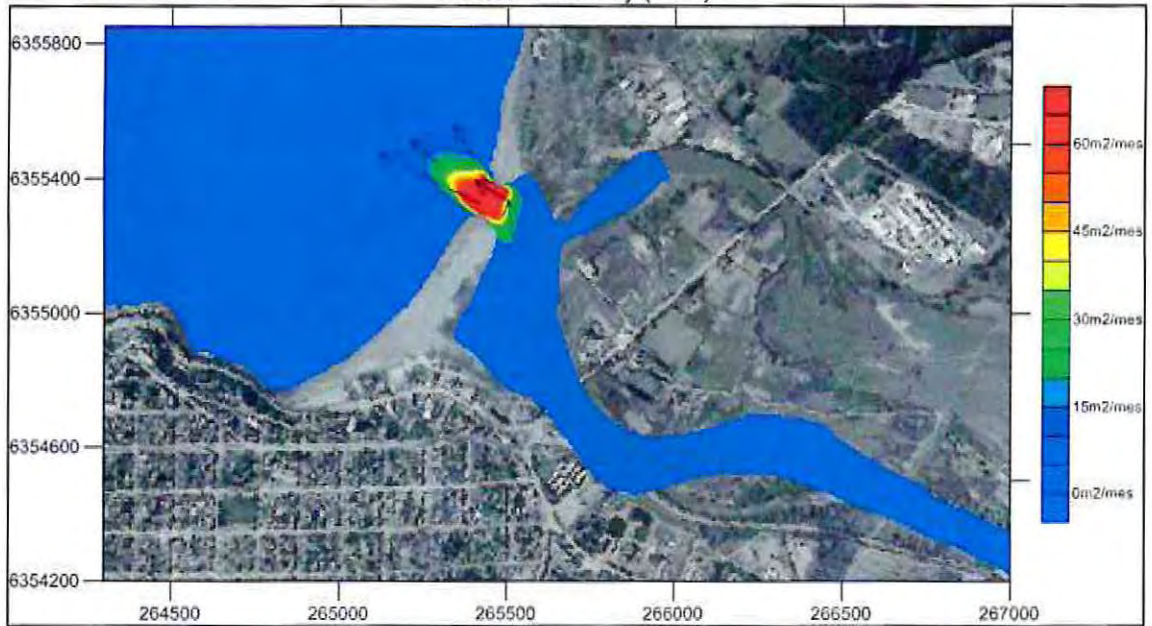
Figura 5.3-9: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Mayo según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-10: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Junio según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

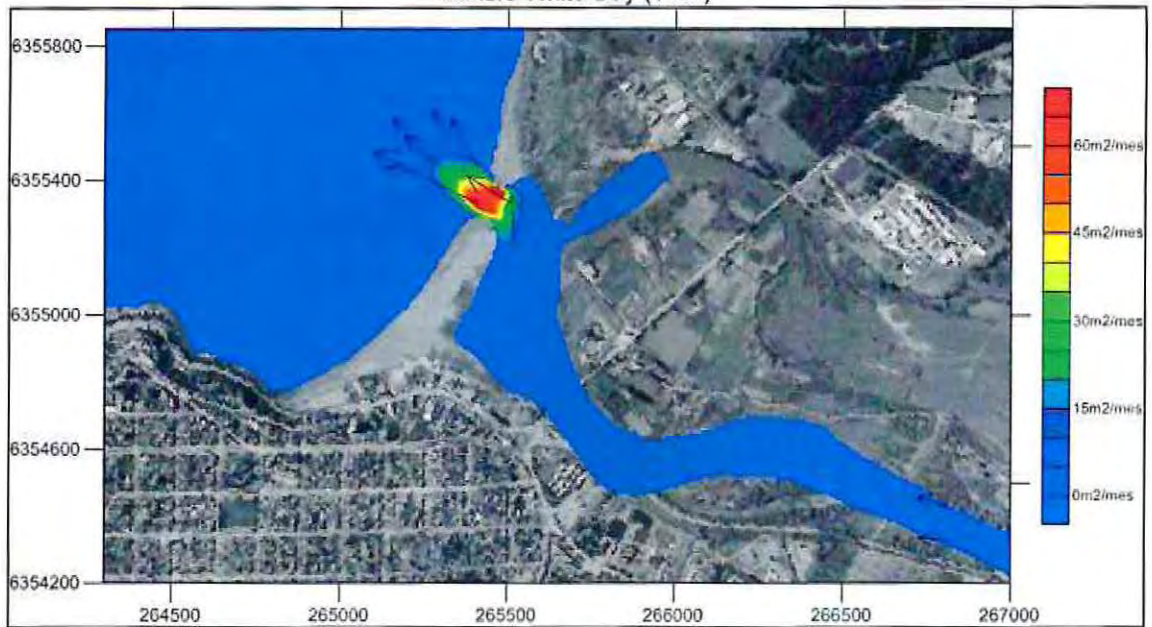
Figura 5.3-11: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Junio según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

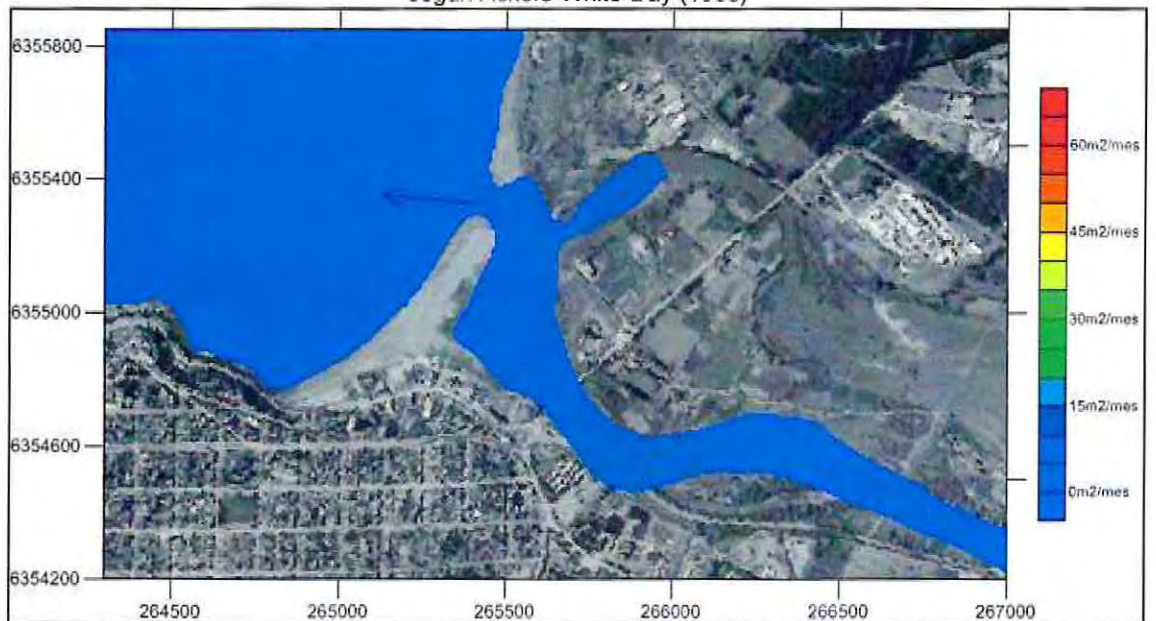
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-12: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Julio según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

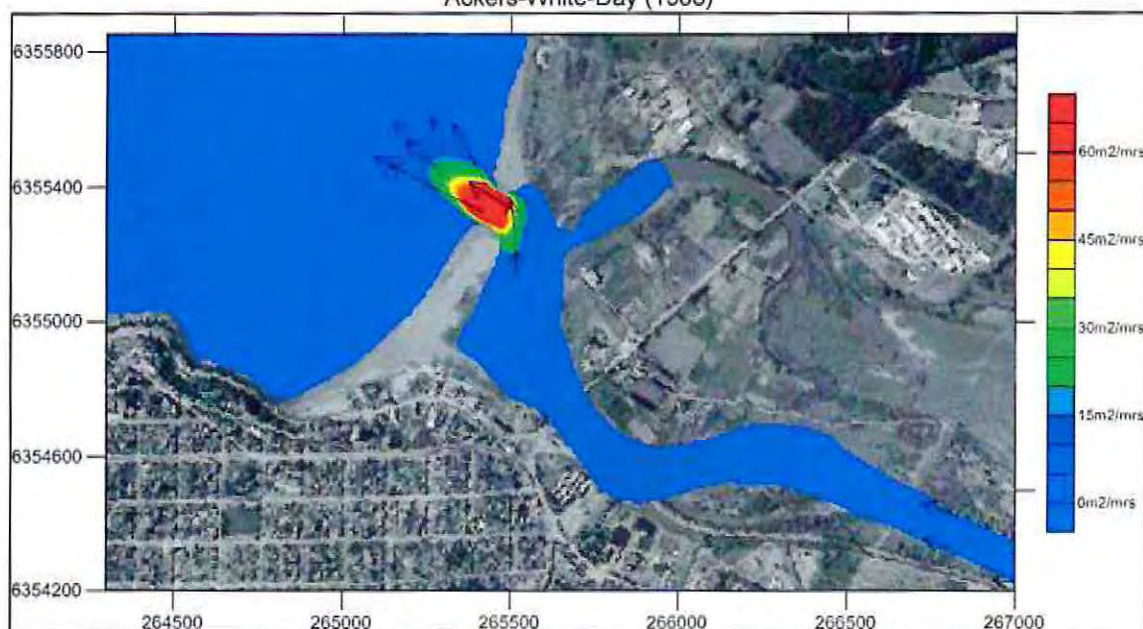
Figura 5.3-13: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Julio según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-14: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Agosto según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

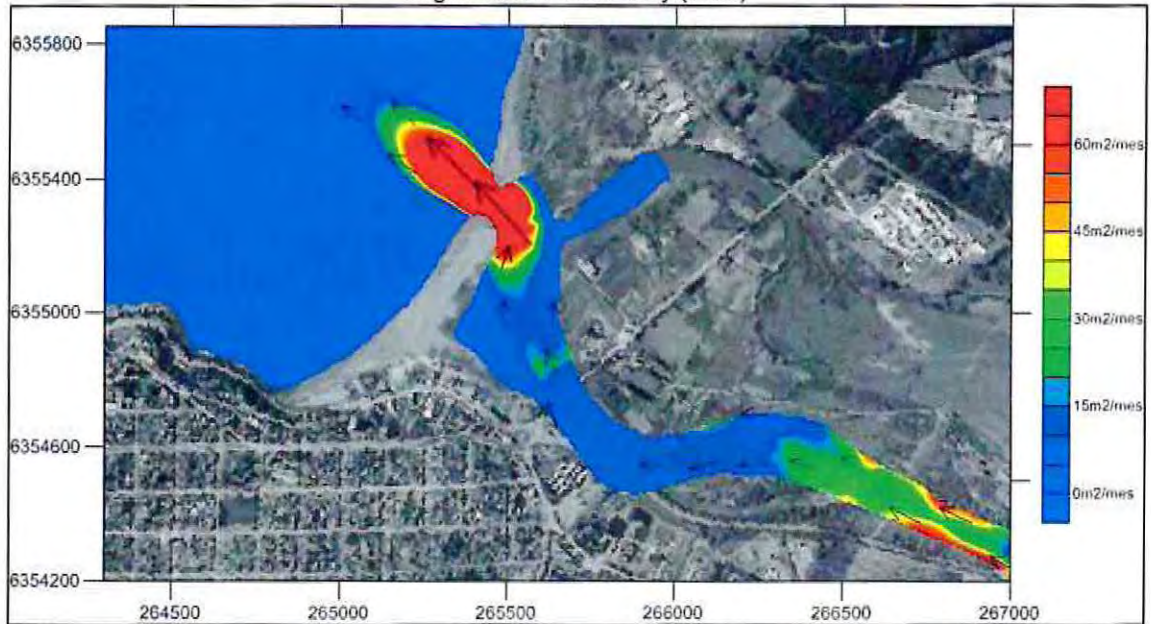
Figura 5.3-15: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Agosto según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

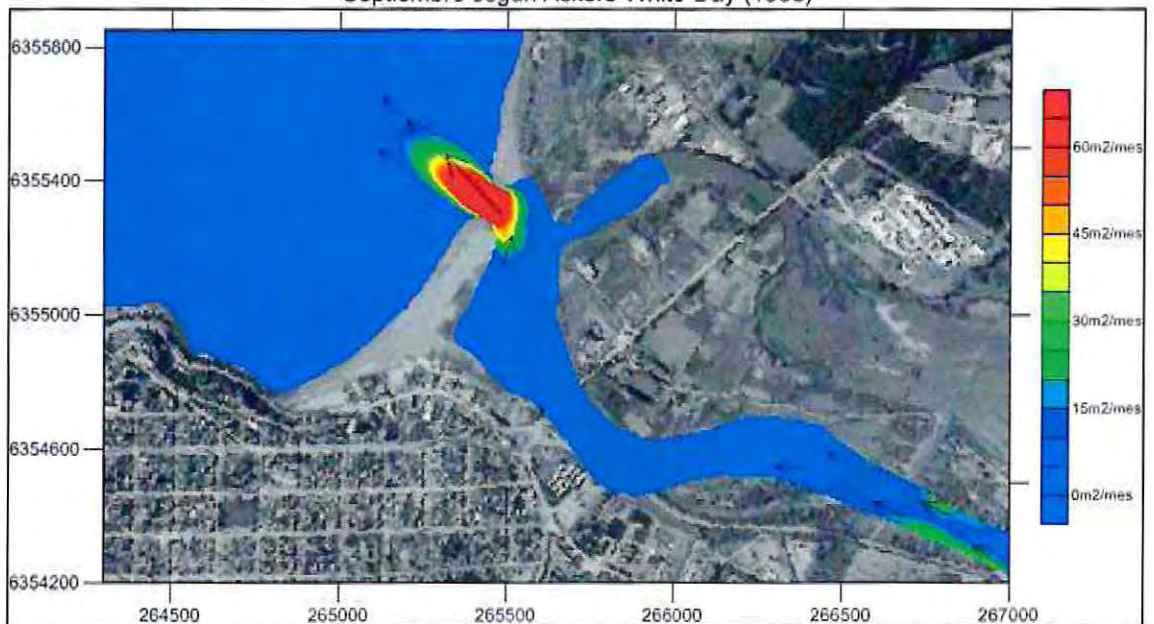
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-16: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Septiembre según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3-17: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Septiembre según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

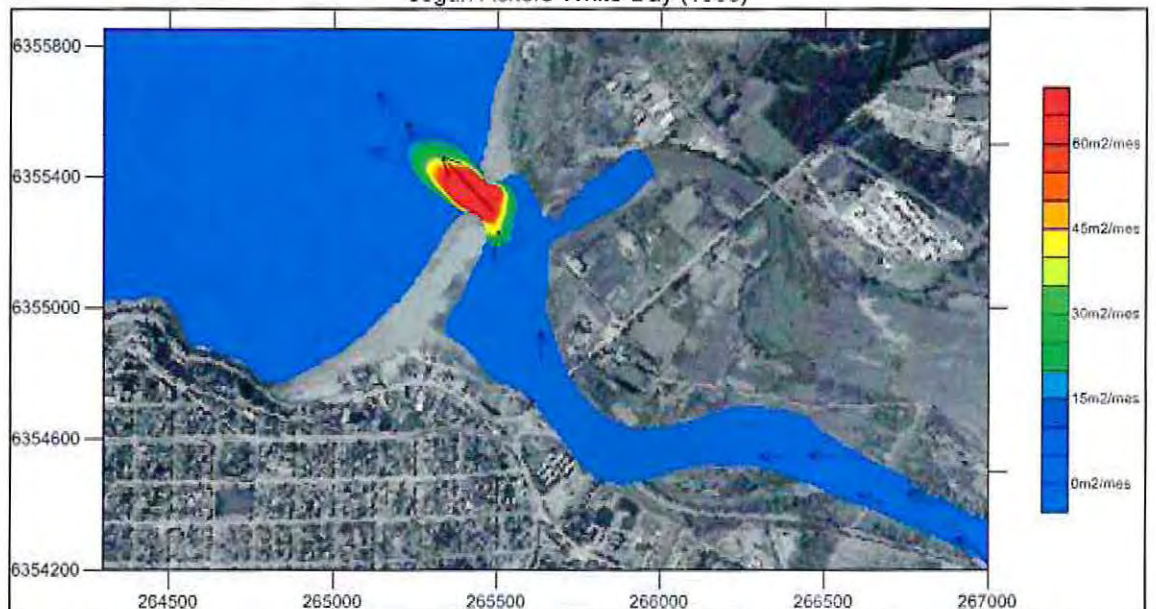
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-18: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Octubre según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3-19: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Noviembre según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

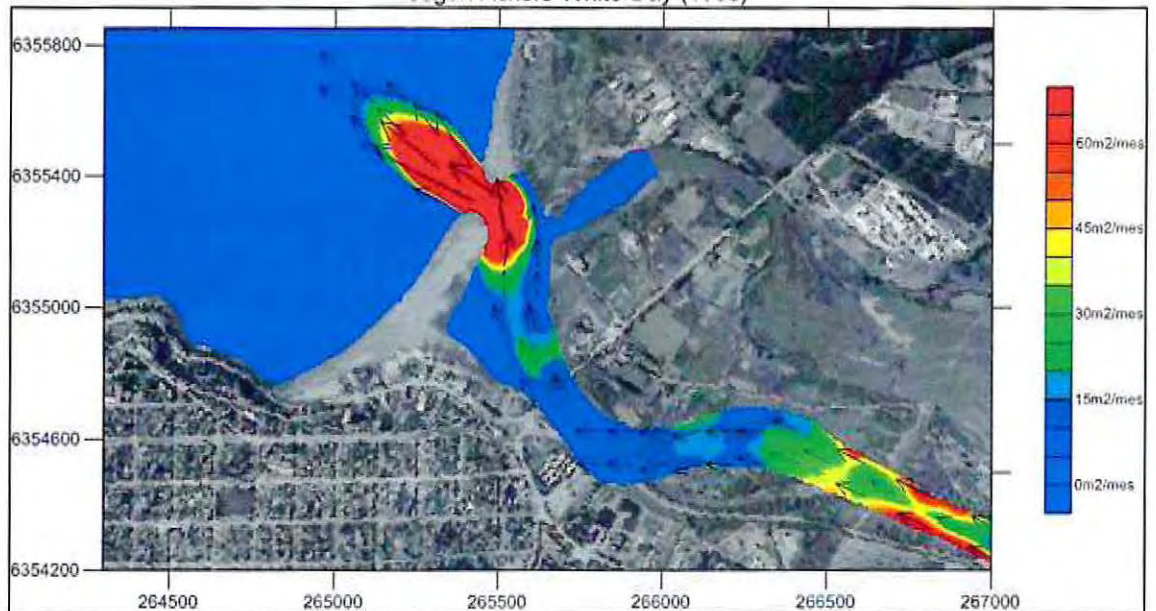
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-20: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Noviembre según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

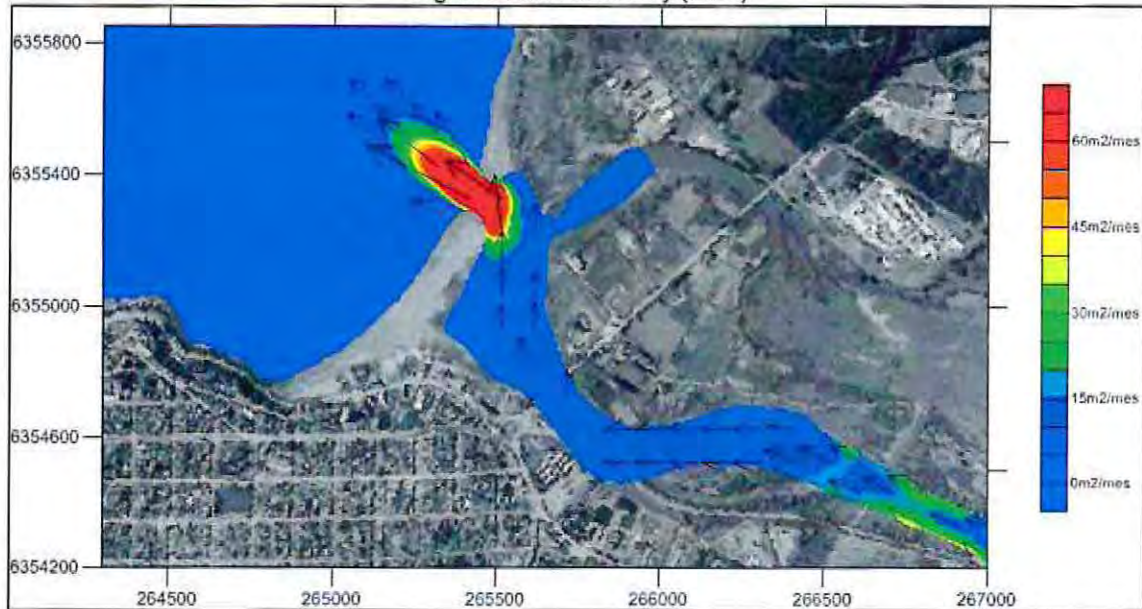
Figura 5.3-21: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Sicigia para el caudal máximo de Diciembre según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-22: Transporte de sedimento en un ciclo de marea de Cuadratura para el caudal máximo de Diciembre según Ackers-White-Day (1983)



Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2.3 Transporte de sedimento sin barra litoral.

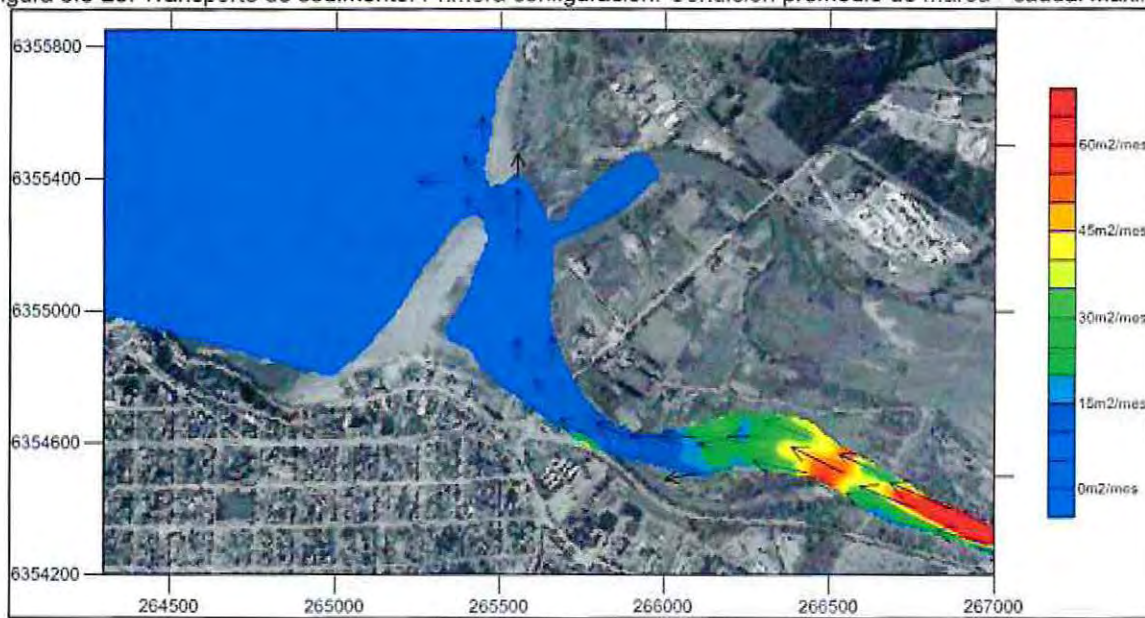
El análisis del transporte de sedimento en la condición sin barra litoral se simuló para cuatro diferentes configuraciones de línea de costa, el mismo caudal (máximo del registro) y una serie de marea de 24 horas, los resultados se muestran en las siguientes figuras.

Como se aprecia el transporte de sedimento se concentra río arriba en todos los casos con valores cercanos a los 450 m<sup>2</sup>/mes. Así también se presentan movimientos pequeños de partículas en el inicio del estuario, esto es debido al ensanchamiento de la desembocadura.

Además en la zona de la desembocadura cuando se presenta la barra "completa" se ve movimiento de partículas en la zona de la desembocadura, esto se puede deber al área reducida de la zona (Figura 5.3-23), cuando el tamaño de la barra se reduce (bajo las mismas condiciones de marea y caudal) en la parte de la desembocadura (Figura 5.3-24) se registra menor transporte de sedimento ya que el área es mayor y así mientras se reduzca el tamaño de la barra se reduce el movimiento de las partículas.

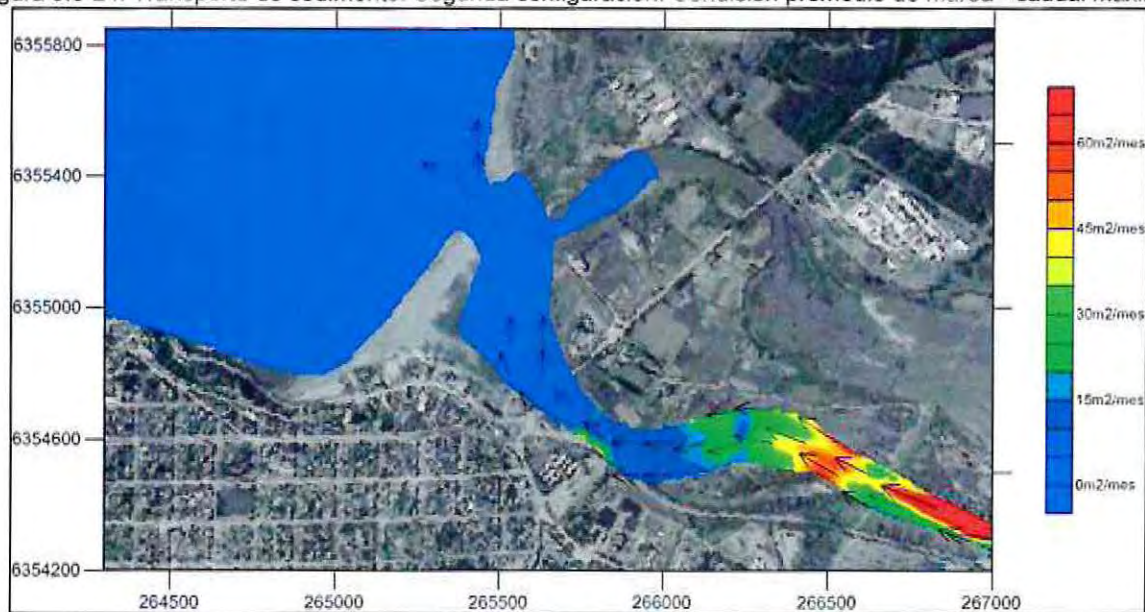
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-23: Transporte de sedimento. Primera configuración. Condición promedio de marea - caudal máximo.



Fuente: Elaboración propia

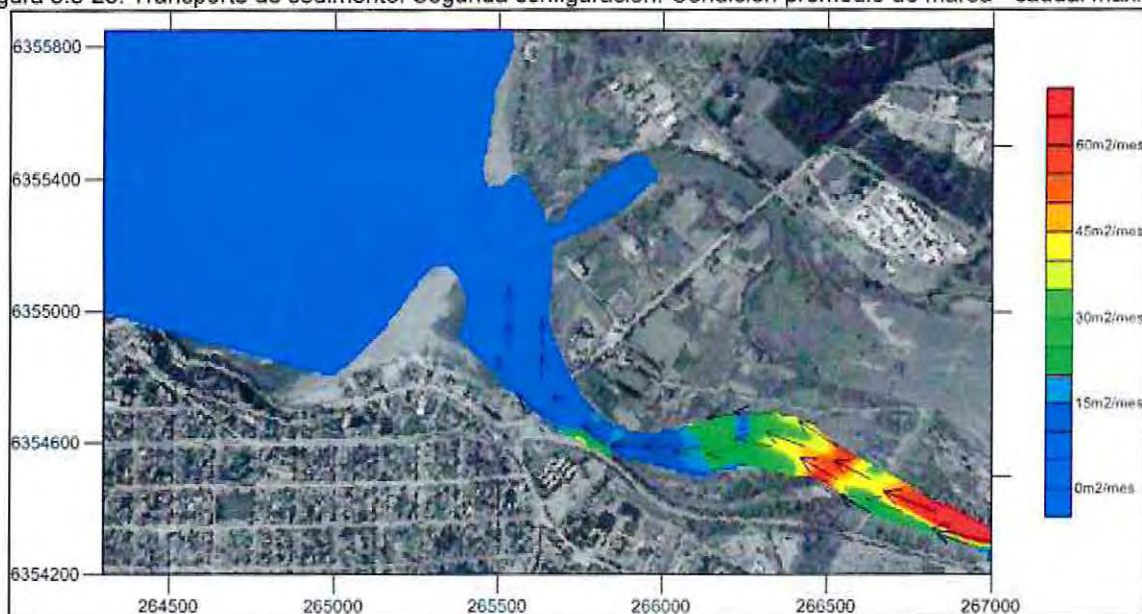
Figura 5.3-24: Transporte de sedimento. Segunda configuración. Condición promedio de marea - caudal máximo.



Fuente: Elaboración propia

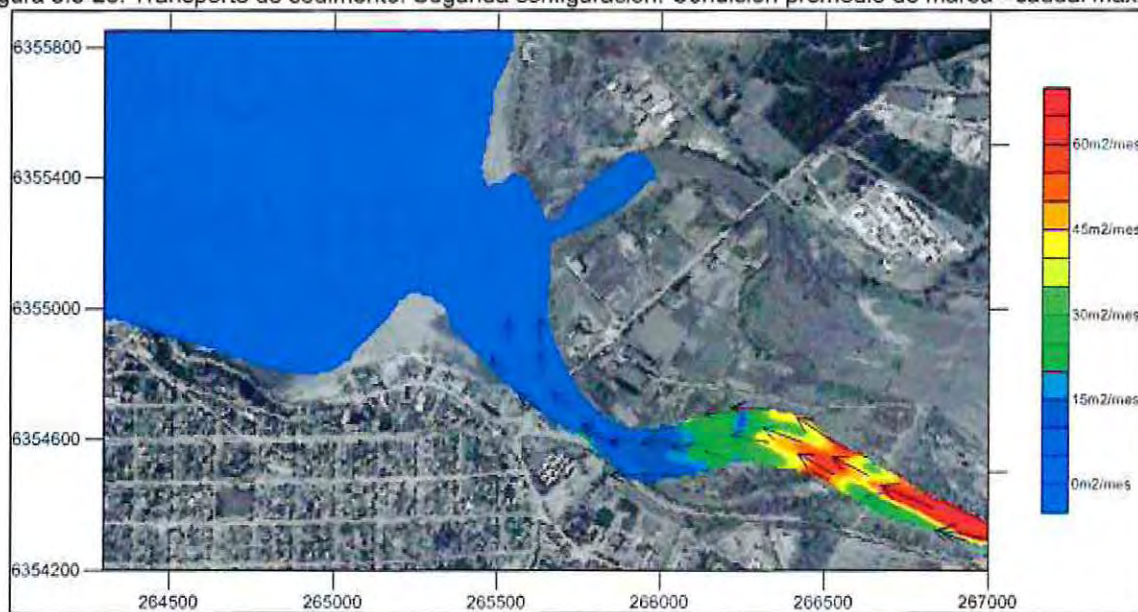
Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 5.3-25: Transporte de sedimento. Segunda configuración. Condición promedio de marea - caudal máximo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3-26: Transporte de sedimento. Segunda configuración. Condición promedio de marea - caudal máximo.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados pueden ser comprobados con las fotografías áreas analizadas, debido a que estas indican que los cambios sufridos por el estuario particularmente en las barras Norte o Sur ya sea su aparición, unión a la no existencia de una o ambas no afectan el comportamiento de la línea de costa en la playa Norte, no registrando zonas de acresiones u

erosiones a lo largo de esta, los resultados de la modelación numérica sin barra indican que los caudales máximos producen un lavado de la zona de la fecha y a medida que la barra disminuye su largo, se activa el transporte de sedimento río arriba lo que produce una reconstrucción de la misma, lo que indicaría que el estado de equilibrio en la zona de la desembocadura es con barra litoral y que la existencia o no existencia de esta no afectan las playas aledañas.

## **6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **6.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.**

- En cuanto a la cuenca del río Aconcagua

Esta alcanza una extensión de 7.340 Km<sup>2</sup> y el rumbo general es de E a W. El cauce se forma de la unión de varios ríos tales como el Juncal, Blanco y Colorado, recorriendo entre 142 a 177 Km hasta la desembocadura en la bahía de Concón.

Su comportamiento hidrológico la clasifica como una cuenca de influencia pluvo-nival, es decir, que tanto las lluvias como los deshielos son significativos en la conformación de su caudal.

- En cuanto al caudal del río Aconcagua

Se contó con datos de la estación Puente Colmo desde Enero de 1988 hasta Octubre del 2002, información que si bien no provee de series de tiempo espaciadas de manera constante, se considera como adecuada y suficiente para los alcances del presente estudio.

Los años que registraron mayores caudales (1997, 1992 y 2002) son asociados al fenómeno del niño, además estos se registran en las estaciones de Otoño – Invierno a causa de las precipitaciones y en primavera – verano debido a los deshielos en las zonas altas de la cuenca. En cuanto a los valores netos cabe destacar que son datos instantáneos diarios lo que implica que no representan de la mejor manera el comportamiento mensual del caudal.

- En cuanto al estuario del río Aconcagua.

Este tiene una orientación N y las playas aledañas a este son de arenas oscuras, las que serían principalmente aportadas por la cordillera de la costa. Se caracteriza por los elementos naturales como el humedal el cual en conjunto conforman uno de los lugares con mayor biodiversidad biológica de la Quinta Región.

Marealmente se puede clasificar como del tipo micromareal y es de esperar que su cuña salina tenga efectos medidos y de baja intensidad a lo largo del río.

- En cuanto al Oleaje.

El oleaje más frecuente que afecta la Playa La Boca está en un rango de periodos de 10 a 16 segundos, alturas de ola entre 0,5 a 1,5 metros provenientes de las direcciones W y WNW.

Es decir, el sector es bañado por oleaje tipo *swell* preferentemente con bajas presencias de *sea*, situación que es equivalente a la presentada para el mismo sector por Martínez et al (2011) y por Quezada (2007) en una localidad más al norte de la actual zona de estudio.

Las direcciones del oleaje están dominadas principalmente por procesos de refracción sin la alteración de elementos disipativos o que generen cambios abruptos en la incidencia del mismo.

El rango de alturas presentado en el nodo de análisis, permiten clasificar el ambiente con baja dispersión de energía del oleaje, es decir, las cercanías de la desembocadura del río Aconcagua tiene una mayor tendencia a la concentración de las líneas de flujo que a la separación. Esto podría deberse a la presencia de la punta Concón.

- En cuanto a la Marea.

El año de información con el que se contó, proveyó de datos en serie de tiempo y del análisis armónico y no armónicos se obtuvieron diferentes planos de mareales tales como el nivel medio de marea, el nivel de reducción de sonda (NRS), la altura media de la pleamar los que alcanzan los 0,94, 0,167 y 1,39 [m] sobre el nivel del sensor respectivamente entre otros.

Al igual que la mayoría de las costas del litoral chileno, la zona de estudio tiene un régimen mareal del tipo semidiurno mixto con desigualdad diurna, con un rango medio de mareas que lo define como micromareal según la clasificación de Hayes (1975).

- En cuanto a los Sedimentos

Se contó con datos de diferentes campañas en terreno de las cuales se puede concluir que los sedimentos de la playa (Punta Concón hasta Punta Piedra) varían desde arenas finas a

medianas. En la zona del estuario las partículas se caracterizan por ser arenas muy finas a medianas, con la presencia de fangos en sectores además de arenas muy gruesas en la zona cercana a la isla.

Aparentemente los tamaños de los sedimentos aportados por el río Aconcagua son más finos que los presenten en la playa y por lo tanto no sería ésta la fuente principal de alimentación del litoral aledaño a la desembocadura.

- En cuanto a las Corrientes.

Se puede decir que la dirección predominante en cuanto a la procedencia de estas es la NW, lo que indica que las mareas son las dominantes en la superficie (en los casos estudiados). Es importante mencionar que solo se tuvieron datos de la superficie y de corta data por lo mismo estos no son mayormente utilizados.

La información de corrientes que se dispuso no permitió caracterizar de manera adecuada el comportamiento global del estuario, sin embargo, apporto información descriptiva.

- En cuanto al viento.

El registro de viento proveniente del proyecto "El Explorador de Energía Eólica", abarcó un año de datos en el cual se registraron en su mayoría brisas leves seguidos por brisas según la escala de Beaufort originarios del segundo y cuarto cuadrante

El sector presentó una circulación atmosféricamente preferentemente dominada por los ciclos diarios de enfriamiento/calentamiento debido a la fase noche/día.

Las bajas magnitudes de viento detectadas son indicadoras de que su acción forzante podría ser poco significativa y por lo tanto su exclusión de la modelación numérica es adecuada y no se ha dejado de considerar efectos relevantes.

## **6.2 ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA.**

Se contó con fotografías aéreas desde el año 1977 al 2011 lo que permitió caracterizar los movimientos de la línea de costa a través del tiempo, siendo estos en términos generales acotados y con tendencia similar a lo largo de los años.

Uno de los mayores cambios registrados se presentó en la zona de la desembocadura y la forma del estuario, en las primeras fotografías la morfología del estuario presentó dos salientes lo que genera dos barras litorales en las playas Norte y Sur, dejando una desembocadura central en relación con el estuario. A medida que pasó el tiempo la forma de esta cambia creando una acumulación en el Norte más pronunciada (año 1994) hasta cerrar la desembocadura en algunas ocasiones.

El cambio más significativo en cuanto a morfología se presentó en el año 2004, en donde se ve una barra sur, la cual no existía hace ya 10 años, esta no cambia significativamente hasta el 2011.

En cuanto a las playas analizadas estas no presentaron mayor cambio en su forma, siendo importante destacar que se registró un retroceso de aproximadamente 0,67 metros/año (considerando el error registrado con georreferenciación de las fotografías aéreas de +/- 0,17 m) desde el año 1977. Siendo la tasa cada vez más pequeña a medida que transcurre el tiempo.

En cuanto al comportamiento estacional en verano la forma de la barra se une dejando sin desembocadura al río lo que se puede deber al oleaje o caudal del mismo si bien este se caracteriza por tener caudales altos debido a los deshielo en esta época del año, estos se presentan los meses de Noviembre y Diciembre, sin embargo, las fotografías fueron tomadas a fines de Diciembre y mediados de Febrero en donde el flujo no son altos, así también se muestra la formación de una pequeña isla aguas abajo del puente colmo que se adhiere a la ribera sur.

En otoño e invierno se aprecia solo la presencia de la barra sur, la que llega a tener un largo máximo de 450 metros aproximadamente lo que se puede deber al oleaje reinante en estas estaciones, también se ve cambios en la configuración de la parte interna de la barra, esto se puede deber a la variación del caudal.

## **6.3 SIMULACIÓN NUMÉRICA. MODELO FESWMS.**

### **6.3.1 CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ESTUARIO**

Se simularon 72 casos los que representaron los caudales mínimos, promedios y máximos mensuales registrados en la estación Puente Colmo en conjunto con series de marea en sicigia y cuadratura.

Los resultados indicaron que en la zona de la desembocadura se presentan las mayores corrientes, además que en el área media del estuario, estas son menores que en el resto de las áreas analizadas, con la excepción de la parte trasera de la barra litoral.

Determinó que para caudales bajos, las corrientes resultantes se ven mayormente afectadas por la marea los que se aprecia en la forma de la serie de tiempo, situación que no se presenta para los caudales promedio y máximos.

Los valores máximos registrados alcanzaron magnitudes hasta los 85,9 cm/s en condición de sicigia para un caudal máximo de 156 m<sup>3</sup>/s, siendo estos los mayores en todos los casos simulados en el presente estudio.

### **6.3.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTO CON BARRA LITORAL.**

En los resultados de las simulaciones numéricas se presentó el transporte de sedimento mensual que genera el caudal máximo registrado.

Estos se muestran desde la Figura 5.3-3 a la Figura 5.3-22, en estas se apreció que la zona de la desembocadura se presentó el mayor transporte de sedimento, esto es debido a las mayores corrientes presentadas en esta área.

Los meses de mayores caudales (Diciembre, Septiembre) mostraron movimiento de partículas no solo en la zona de la boca del estuario, sino también aguas arriba. En sicigia el transporte se registró a lo largo de todo el río y algunos sectores del estuario, para los meses de Marzo, Abril y Octubre en condición de sicigia (mayores corrientes para el mismo caudal).

### 6.3.2.1 Transporte de sedimento sin barra litoral.

Para analizar el comportamiento del transporte de sedimento bajo la condición de la no existencia de la barra litoral se presentaron 4 configuraciones de la línea de costa, la primera muestra una barra litoral completa que alcanza un largo de 320 metros aproximadamente (tamaño promedio de la misma, también utilizada para todas las simulaciones de transporte de sedimento), la segunda configuración alcanza los 260 metros, la tercera mide 160 metros y en la cuarta no existe barra litoral.

Analizando el resultado de estas se aprecia que en el río el transporte es similar en todas las simulaciones, no solo en magnitud sino también en la localización de los máximos, en cuanto a la zona de importancia, en la primera configuración se apreciaron los mayores transporte de sedimentos que en las otras configuraciones, a medida que el tamaño de la barra disminuye el movimiento de las partículas también, lo que esto quiere decir que el efecto de los caudales máximos en la barra es de limpiado, moviendo los sedimentos en la zona de la desembocadura hacia la zona de la playa (probablemente la zona de rompiente) y su formación de vuelta en gracias al efecto del oleaje que afecta el lugar, además de la activación del transporte río arriba lo que ayuda con el proceso de regenerado de la barra.

Los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas analizado el comportamiento de la barra completa hasta la desaparición de la misma son comprobables con las fotografías aéreas analizadas, estas muestran que cuando se presentan cambios en la zona de las fechas ya sea la unión de estas, la existencia de una sola, no afectan mayormente las playas aledañas, lo que indica que cuando la barra desaparece no se aprecian aportes en la zona de las playas, y que cuando no hay barra litoral y esta se regenera las playas no pierden sedimentos para aportar a las barras.

## 6.4 CONCLUSIONES GENERALES

Al comienzo del proceso de investigación se asumió que el Río Aconcagua era la principal fuente de alimentación de sedimentos a las playas continuas y también las dunas de Ritoque, sin embargo, los resultados obtenidos indican que la capacidad de transporte de sedimentos para los caudales promedios no es significativa y solo se aprecia en condición de máximo flujo, situación que es concordante con el estudio realizados por terceros.

El primero de estos corresponde a "Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y se relación con la disponibilidad de metales en agua de la cuenca del río Aconcagua", este estimó el gasto sólido de fondo para las condiciones de caudales máximo, medio y mínimo, con el fin de definir un rango característico para las tasas de transporte de sedimento en diferentes estaciones a lo largo de la cuenca del río Aconcagua. En los resultados obtenidos se observa la baja capacidad de transporte de fondo para eventos de bajo caudal; por el contrario para los eventos de caudales mayores la capacidad aumentó considerablemente, teniéndose un aporte total cercano a  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$  en las zonas altas de la cuenca, en tanto hacia aguas abajo la velocidad de desplazamiento disminuye haciéndose prácticamente nula en el sector bajo del río, siendo aquí solamente relevante el desplazamiento de sedimentos durante las crecidas (D.G.A. 2008).

Por otro lado Santander (2014) reconoce que las dunas de Ritoque son alimentadas de sedimentos provenientes de ellas mismas indicando que *"de acuerdo al análisis de fotografías históricas, el campo dunar en general tiene ciertos cambios en su línea límite, encontrándose en ciertos sectores avances, mientras que en otros se detectan retrocesos de esta, así como también una parte de degradación. En el sector norte de este campo, cercano a la carretera se ha encontrado un avance de este campo dunar en promedio de  $1.12 \text{ m/año}$ . Junto con esto, la duna propiamente en donde no se encuentra vegetación ha ido disminuyendo su extensión en la zona norte con mayor velocidad, lo que evidencia que existe realmente un mayor transporte de sedimentos como también no existe una alimentación de estos"*.

En cuanto al comportamiento histórico de la línea de costa se calculó un retroceso de 67 cm por año lo que se asemeja a resultados obtenidos por Martínez, Quezada y Rubio (2011) los que cuantificaron un retroceso por año de 50 cm desde 1945 al 2008.

En cuanto a los efectos de la existencia o no de la barra litoral en la hidrodinámica y el transporte de sedimento en el sector analizado, cuando no se presenta la barra litoral se aprecia un aumento en las corrientes río arriba lo que produce un aumento del transporte de sedimento en la misma zona como se aprecia en los resultados mencionados en la modelación numérica, los efectos en las playas aledañas evaluados con las fotografías aéreas indican que cuando no existe barra no hay mayores cambios a lo largo de las playas

ya sea acreción u erosión en zonas de estas que explique en donde queda el sedimento que se pierde cuando la barra se lava por efectos de caudales altos.

Entre la no existencia y existencia de la barra (regeneración) se producen corrientes más fuertes en la zona río arriba del estuario lo que puede generar transporte, ayudando a la reconstrucción de la misma. A medida que se presenta una barra con mayor longitud se aprecian mayores corrientes en la zona del estuario (esto bajo las condiciones de caudales máximos, ya que para otras condiciones de flujo, el río no tiene la capacidad de mover el sedimento del lecho).

En el proceso de regeneración de la barra las playas no se ven afectadas ya que no se aprecian erosiones que sean atribuibles a la restauración de la barra.

Lo que se plantea anteriormente genera una gran interrogante, si el río no aporta el sedimento que se encuentra en las playas aledañas, de donde proviene el mismo, esta interrogante puede ser respondida satisfactoriamente indicando que las playas mencionadas son paleoplayas las que son formadas en el último periodo Interglaciario, lo que se estudia a fondo en la tesis doctoral de Caviedes 1972, en donde se analiza el origen del valle del Aconcagua en tres zonas, Aconcagua superior, medio e inferior.

- En cuanto al modelo FESWMS

Los resultados obtenidos por el modelo fueron correctos comparados con los cambios vistos en las fotografías aéreas históricas analizadas como se ha mencionado anteriormente.

## **6.5 RECOMENDACIONES**

- En cuanto a los datos analizados

Se contó con datos de corrientes insuficiente ya que solo son instantáneos en la superficie que abarcan un par de horas, no caracterizando de buena forma el comportamiento de las corrientes en la zona. Es recomendable registrar al menos por 30 días seguidos las corrientes y niveles del río en diferentes puntos a lo largo del cauce y en su laguna estuarial, para lo cual se propone el uso de instrumentos ADV (Acoustic Doppler velocimeter) que

permitan medir escalas de turbulencia, las que están íntimamente ligadas al transporte de sedimentos.

Las fotografías áreas analizadas no detallan el horario en que se tomaron por ende el efecto de la marea en estas no es cuantificable lo que pudo generar pequeños errores en cuanto al análisis de la líneas de costa. De tal modo que es recomendable planificar una campaña de campo de levantamiento de la línea de costa, con periodicidad mensual al menos por un periodo de tiempo de 1 año, para cuantificar un ciclo climático completo.

- En cuanto al modelo FESWMS.

Se necesita una mayor cantidad de datos de corrientes en forma de serie de tiempo para el proceso de calibración y validación del modelo, ya que solo se contó con datos de marea en la zona estuarial. Es recomendable monitorear el cauce a lo largo de su canal principal.

- En general

Para confirmar los resultados se recomienda medir el transporte de sedimento en dos zonas, la primera en el centro del estuario, en la sección 3 y 4 que está ubicada en la desembocadura como se aprecian en la Figura 6.5-1, ya que se cuenta con los resultados del modelo numérico lo que simplifica la comparación y posterior validación de las magnitudes de caudal sólido determinado mediante la simulación numérica.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

Figura 6.5-1: Puntos de extracción de datos modelo FESWMS.



Los métodos utilizados para medir el transporte de sedimento pueden ser:

1. Carga de arrastre en el fondo.

El cálculo del arrastre de fondo se puede efectuar a partir de muestras recogidas por un dispositivo que está situado por debajo del lecho, durante un tiempo determinado y que luego son extraídas para pesarlas. Ésta técnica se conoce como trampas de sedimentos.

2. En suspensión con OBS (Optical Back Scattering)

El OBS es un sensor óptico para la medición de la turbidez y concentraciones de sólidos suspendidos mediante la detección de la luz infrarroja dispersada por la materia suspendida. Su utilización permitiría cuantificar en series de tiempo la cantidad de sedimentos que acompaña al flujo del río y posteriormente correlacionarlo con el modelo numérico empleado u otro.

## **7 REFERENCIAS**

**AUBREY D.G., GAINES A.G. 1982.** Rapid formation and degradation of barrier spits in areas with low rates of littoral drift. *Marine Geology* 49. 257 – 278.

**BIRD E. 2008.** Coastal geomorphology, an introduction. University of Melbourne, Australia. Segunda edición, Editorial John Wiley & Sons, p. 223 – 246.

**CABRERA-MURO, H. 1975.** Origen y transporte de sedimentos en estuarios. *Ciencias Marinas*, 2(1), p. 106-114.

**CAVIEDES, CÉSAR. 1972.** Geomorfología del Cuaternario del valle del Aconcagua Chile Central. Cuadernos Geograficos Friburgueses, Freiburg, Alemania.

**CORTEZ ABARZUA C. 2002.** Observaciones dinámicas y geomorfológicas en el estuario del Aconcagua, Chile Central. Memoria para optar al Título de Geógrafo, Escuela de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.

**CORTEZ ABARZUA C., MARTÍNEZ C. 2008.** Características geomorfológicas del estuario Aconcagua, Chile central, entre 1877 y 2001. *Revista Geografía. Valparaíso.* (En línea) N° 41 / 2008 ISSN 0718 – 9877, p. 14. – 26.

**DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS. 2009.** Análisis metodológico para determinar caudales de dilución en zonas estuarinas. Departamento de Ingeniería Civil - Universidad de Chile.

**DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA. FACULTAD DE CIENCIAS Y MATEMÁTICAS. UNIVERSIDAD DE CHILE.** El Explorador Eólico 2012. Descripción y manual de uso.

**D.G.A. CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. 2008.** Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en aguas cuenca del río Aconcagua.

**DGA. 2003.** Cuenca del río Aconcagua. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad.



**DGA. 2004.** Cuenca del río Aconcagua. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad.

**DGA. 2004.** Evaluación de los recursos subterráneos de la cuenca del río Aconcagua. Departamento de administración de recursos hídricos y departamento de administración de recursos hídricos quinta región

**ESCOBAR N., ZAMORANO A. 2009.** Estudio sedimentológico en las cuencas hidrográficas de las zonas centro – sur de Chile. Título de Ing. De Ejecución en Ambiente Universidad de Santiago de Chile Departamento de Ing. Geográfica.

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.** Facultad de ingeniería marítima y ciencias del mar, cátedra: procesos estuarinos. Autor: José v. Chang Gómez.

**FARRERA S. 2004.** Hidrodinámica de lagunas costeras. Centro de investigación y de educación superior de Ensenada. México.

**FIERRO CONTRERAS J.J. 2004.** Hidrodinámica mareal en el estuario del río Aconcagua. Tesis para optar al título de Magíster en Oceanografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y Universidad de Valparaíso.

**GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS. 2000.** Documentos de Referencia, Volumen I. Universidad de Cantabria, España.

**GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS. 2000.** Documentos temático, Regeneración de Playas. Universidad de Cantabria, España.

**JIMÉNEZ PUIG P. 2006.** Estudio sobre estabilidad de traviesas y lechos de escollera con transporte sólido. Universidad Politécnica de Catalunya.

**LOSADA M.A., GIMENEZ-CURTO L.A. 1979.** The joint effect of the wave height and period on the stability of rubble mound breakwaters using Iribarren's number. Coastal Engineering volumen 3, p 77 - 96

**MARTÍN VIDE J.P, LÓPEZ QUEROL S., MARTÍN MORETA P., SIMARRO GRANDE G. Y BENITO FERRÁNDEZ G. 2003.** Uso de modelos uni- y bidimensionales en llanuras de

inundación. Aplicación al caso del río tajo en talavera de la reina. Ingeniería del agua volumen 10, p 49 – 58

**MARTÍNEZ C., CORTEZ ABARZUA C. 2007.** Características hidrográficas y sedimentológicas en el estuario del río Aconcagua, Chile Central. Revista de Geografía Norte Grande, p. 63-74.

**MARTINEZ C., QUEZADA M., RUBIO P. 2011.** Historical changes in the shoreline and littoral processes on a headland bay beach in central Chile. Revista Geomorphology 135, 80 – 96.

**MORALES J.A., PENDON J.G. Y BORREGO J. 1994.** Origen y evolución de flechas litorales recientes en la desembocadura del Estuario mesomareal del Río Guadiana (Huelva, S.O. España). Revista: Soc. Geol. España 7 (1 -2), 155 – 167.

**MUNICIPALIDAD DE CONCON. 2010.** Plan de desarrollo comunal 2010 – 20114. Tomo I diagnóstico comunal.

**NICOLAU DEL ROURE F.J. 2004.** Evaluación de metodologías de transferencia de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras. Universidad de Chile, departamento de Ingeniería Civil.

**PARENTE MAIA L. 1998.** Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de fortaleza (Ne-Brasil): implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral. Tesis para optar al grado de Doctor en Geología de la Universidad de Barcelona.

**PAWLOWICZ R., BEARDSLEY B., LENTZ S. 2002** Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE", Computers and Geosciences 28, (929-937).

**PERILLO G. 1995.** Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries. Developments in Sedimentology N° 53, p. 17 – 43.

**PERILLO G. 1995.** Geomorphology and Sedimentology of Estuaries: An Introduction. Developments in Sedimentology N° 53, p. 1 – 16-

**PERILLO G., CODIGNOTTO J. 1989.** Ambiente costeros. 1er Simposio de ambientes y modelos sedimentarios. Volumen 4, p. 137 – 159.

**PICCOLO M.C., PERILLO G. 1997.** Geomorfología e hidrografía de los estuarios. El mar Argentino y sus recursos pesqueros. Tomo 1, p. 133 – 161.

**PUGH, D.T. 1987.** Tides, surges, and man sea-level. A handbook for engineers and scientists. London. Wiley.472 pp.

**QUEZADA M. 2007.** Estudio de Erosión Costera y Regeneración de espacios Litorales. Una Aplicación en Playa El Papagayo. Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil Oceánico de la Universidad de Valparaíso.

**QUEZADA M. 2012.** Mecánica del transporte de sedimento, Ingeniería de costa. [Material de clases] Universidad de Valparaíso.

**RODRÍGUEZ, A., PAGOT, M., VIONNET, C., SIERRA, J.P. Y CORRAL, M. 2005.** Actualización del clima marítimo y simulación de propagación del oleaje de diseño para el Puerto Caleta La Misión, Tierra del Fuego, Atlántico Sur, Arg. Mecánica Computacional, Volume XXIV. Number 2. Hydric Resources and Environmental Engineering, p. 193 – 206

**SANTADER C. 2014.** Análisis del comportamiento morfodinámico histórico del campo dunar de Ritoque, Quintero, Chile". Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil Oceánico de la Universidad de Valparaíso.

**SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA DE CHILE (SHOA). 2003.** Instrucciones Hidrográficas N° 5. SHOA PUB 3105. 4ª Edición, 66 pp.

**SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA DE CHILE (SHOA). 2005.** Instrucciones Oceanográficas N°1. SHOA PUB 3201. 3ª Edición, 24 pp.

**SILVA R. 2005.** Análisis y descripción estadística de oleaje. Serie de docencia SD/49, Instituto de ingeniería UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México.

**SMITH J. 2001.** STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model User's Manual for STWAVE, Version 3.0. U.S. Army Corps of Engineers. Engineer research and development center.

Determinación del efecto que tiene la existencia (o no) de la barra litoral del río Aconcagua.

**U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. 2002.** User's manual for FESWMS – FST2DH. Two-dimensional Depth-averaged. Flow and Sediment Transport Model. Federal Highway Administration Office of Research, Development, and Technology.

**VALLE – LEVINSON A. 2010.** Contemporary Issues in Estuarine Physics. University of Florida.

**VAN RIJN L. 1993.** Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Department of Physical Geography. University of Utrecht.