



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**Impacto de la sequía en el aporte sedimentario de un  
afluente y sus efectos en la evolución morfológica de una  
playa del litoral central de Chile**

**Manuel Andrés Gutiérrez Córdova**

Diciembre 2021

IMPACTO DE LA SEQUÍA EN EL APORTE SEDIMENTARIO DE UN AFLUENTE  
Y SUS EFECTOS EN LA EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE UNA PLAYA DEL  
LITORAL CENTRAL DE CHILE.

Manuel Andrés Gutiérrez Córdova

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

MATÍAS QUEZADA LABRA  
Profesor guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

MARIO CÁCERES  
Revisor

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

MAURICIO MOLINA  
Revisor

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 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.

## AGRADECIMIENTOS

Ha sido un camino largo y, en ciertos tramos, me llevé más de un rasguño para llegar hasta donde estoy ahora. La verdad no ha sido fácil, y sé que para muchos también ha sido así. En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, en especial a mi madre Ivonne, mi apoyo incondicional, y a mi viejo por apañarme pese a no continuar por el camino que dejé en agosto del 2012.

Agradezco a mis amigos, amigas, compañeros y compañeras que han seguido este proyecto junto a mí, en especial a Simón Fuentes, Sebastián Villarreal, Daniela Triviños, Natalia Zunino, Alex Lara, Almendra Hermosilla, Giorgio Cossio, Alexis Lillo, y a otros tantos que me han regalado buenos momentos durante estos años y durante mi estadía universitaria.

Agradezco a los profesores de la carrera de Ingeniería Civil Oceánica e Ingeniería Civil de la Universidad de Valparaíso, al profesor Matías Quezada por su paciencia y por sus ganas de enseñar, cualidades que valoro y valoré durante el desarrollo de la presente memoria; al profesor Patricio Winckler por sus “temerosas” críticas constructivas que me ayudaron bastante durante mi estadía en Oceánica, por demostrar que es posible apasionarse por la ingeniería y por la docencia; al profesor Mauricio Reyes por los buenos momentos en Geotecnia y por darme la oportunidad de haber sido su ayudante de Hidráulica. También agradezco a la profesora Catalina Aguirre, a los profesores Felipe Casselli, Mario Herrera, Mauricio Molina; a los ex alumnos de Oceánica, José Ribba y Diego Becerra, quienes me han apoyado durante este proceso.

Finalmente, agradezco a DHI MIKE (DHI Group, 2021) por haberme dado la oportunidad de usar su programa para el desarrollo de la presente memoria.

Espero que este sea el inicio de un nuevo camino, con muchos desafíos y grandes lecciones por aprender, ya que al final, de eso se trata la vida...

*“La acción más pequeña vale más que la intención más grande”  
Jiddu Khrisnamurthi.*

## **TABLA DE CONTENIDO**

1	INTRODUCCIÓN.....	14
1.1	Contexto.....	14
1.2	Objetivos .....	16
1.2.1	Objetivo principal .....	16
1.2.2	Objetivos secundarios .....	16
2	MARCO TEÓRICO .....	17
2.1	Ciclo hidrológico .....	17
2.2	Caracterización de la geomorfología fluvial .....	18
2.2.1	Generalidades de un sistema fluvial idealizado .....	18
2.2.2	Definición de cuenca hidrográfica .....	20
2.2.3	Definición y clasificación de los ríos.....	21
2.2.4	Ciclo de vida de un río .....	21
2.2.5	Clasificación de los cauces o canales aluviales según su forma.....	22
2.2.6	Trabajo formativo de los cauces .....	23
2.2.7	Definición y caracterización de estuarios .....	24
2.3	Aspectos hidráulicos en canales aluviales .....	26
2.3.1	Velocidad de fricción sobre el fondo y relación de Keulegan .....	26
2.3.2	Aplicación del esfuerzo de Shields .....	27
2.4	Estimación del transporte de sedimentos hacia la costa.....	28
2.4.1	Mecánica del transporte de sedimentos en un cauce .....	28
2.4.2	Gasto sólido del fondo con partículas de tamaño uniforme.....	29
2.4.3	Gasto sólido de partículas en suspensión.....	32
2.4.4	Transporte de sedimentos litoral.....	33
2.5	Cambio climático y la sequía en la zona central de Chile.....	38
2.5.1	Fluctuaciones e interacciones atmosféricas en el medio .....	38
2.5.2	Efectos del cambio climático en el medio oceánico, asociados a la bahía de Valparaíso y Concón .....	40
2.5.3	Efectos del cambio climático en el río Aconcagua .....	43
3	METODOLOGÍA .....	46
3.1	Caracterización del sector de estudio .....	46
3.1.1	Ubicación.....	46
3.1.2	Disponibilidad de datos.....	47
3.1.3	Caracterización del medio oceánico (bahía de Concón) .....	48
3.1.4	Caracterización del medio fluvial (río Aconcagua) .....	50

3.2	Calibración y validación del modelo hidrodinámico.....	51
3.2.1	Configuración del modelo.....	51
3.2.2	Comparación de parámetros simulados y mediciones.....	53
3.3	Modelación numérica.....	54
3.3.1	Generalidades de la modelación en DHI MIKE 21/3.....	54
3.3.2	Generalidades del modelo en DHI MIKE 3 FM.....	55
3.3.3	Enfoques del modelo.....	55
3.3.4	Ecuaciones que gobiernan la simulación.....	56
3.4	Definición de escenarios.....	58
3.4.1	Metodología para el análisis de escenarios.....	59
4	RESULTADOS.....	60
4.1	Batimetría y grillas del modelo.....	60
4.2	Calibración y validación del modelo.....	61
4.2.1	Proceso de calibración.....	61
4.2.2	Proceso de validación.....	69
4.3	Simulación 2D en DHI MIKE 21.....	78
4.3.1	Presentación de escenarios modelados.....	78
4.3.2	Comparación de los escenarios modelados.....	110
5	DISCUSIÓN.....	120
5.1	Análisis de resultados.....	120
5.1.1	Comportamiento de los sedimentos desde el medio fluvial.....	120
5.1.2	comportamiento litoral según el azimut de equilibrio.....	122
5.1.3	Comportamiento del transporte de sedimentos desde el medio oceánico.....	123
5.1.4	Comportamiento de ambos medios en el balance sedimentológico.....	124
6	CONCLUSIÓN.....	126
7	REFERENCIAS.....	127
8	ANEXOS.....	130
8.1	Ecuación de Navier – Stokes (RANS).....	130

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema explicativo del Ciclo Hidrológico, considerando un balance hídrico anual relativo (Hidrología Aplicada, Ven Te Chow, 1994). .....	18
Figura 2: Adaptación de esquema explicativo de las zonas que componen un sistema fluvial idealizado, visualizándose 3 zonas; zona de aguas arriba (C), zona de transferencia (B) y zona de aguas abajo (A). La dirección del arrastre de sedimentos está alineada en la dirección del flujo, es decir, desde C a A (Niño, 2005). .....	19
Figura 3: Caracterización de una Cuenca Hidrográfica como un Sistema (Ven Te Chow, 1996). .....	20
Figura 4: Procesos geomorfológicos que permiten explicar el Ciclo de Vida de un río (Marrero, 1980). .....	22
Figura 5: Caracterización de los cauces aluviales por su forma (Niño, 2005). .....	23
Figura 6: Adaptación de esquema explicativo que describe un caudal dominante ( $Q_1$ ) y un caudal desbordante ( $Q_2$ ) para un cierto periodo de tiempo (T) (Fuente: <a href="https://transportesedimentos.tripod.com/">https://transportesedimentos.tripod.com/</a> ). .....	24
Figura 7: Esquema general que explica cada uno de los sectores o tramos que conforman un estuario típico (Ibañez et.al., 2009). .....	25
Figura 8: Mecanismos de transporte de sedimentos descritas en un medio líquido (Fuente: <a href="https://rodanasciencias.blogspot.com/">https://rodanasciencias.blogspot.com/</a> ). .....	28
Figura 9: Descripción del transporte longitudinal y transversal de sedimentos que se manifiesta en el medio oceánico, considerando la acción de un oleaje incidente (Curso Ingeniería de Costas. Quezada, 2020). .....	33
Figura 10: Esquema que describe el balance sedimentológico en la costa, considerando distintas fuentes o entradas (flechas negras) y salidas (flechas blancas) de sedimentos y que condicionan su transporte en el medio oceánico (De la Peña, 2007). .....	34
Figura 11: Esquema que describe el perfil de playa ante la acción de una tormenta (evento de clima extremo). El resultado es comparado con un perfil de playa en condiciones normales de oleaje (Fuente: <a href="https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/">https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/</a> ). ....	35
Figura 12: Índice de precipitación regional vs índice PDO (fases frías y cálidas), contextualizado para eventos de multi - inviernos en la zona central del país (Garreaud, et.al., 2019). .....	38
Figura 13: Esquema que describe una tendencia positiva del SAM, donde las áreas azules señalan las presiones que están por debajo del promedio y las áreas rojas lo contrario (Renwick y Thompson, 2006). .....	39
Figura 14: Esquema que proyecta un aumento progresivo del nivel del mar en las costas de Valparaíso hasta el año 2100, tomando en cuenta 21 modelos climatológicos globales (Winckler et.al. 2019). .....	41
Figura 15: Esquema que señala el número de eventos extremos anuales de oleaje, considerando estadísticas de oleaje entre el año 1958 hasta el 2015 frente a las costas de Valparaíso (Martínez, et.al., 2018). .....	42

Figura 16: Cambios morfodinámicos que presenta la Playa de Concón, basado en el estudio del perfil de playa entre 1980 hasta 2018 (Winckler et.al., 2019).....	43
Figura 17: Curva de tendencia para los caudales medios anuales de la cuenca del río Aconcagua, donde los rombos muestran las estaciones con déficit y los asteriscos las estaciones que presentan un leve superávit (Martínez, et.al., 2012).....	45
Figura 18: Diagrama de flujo en el que se describen los elementos que forman parte de la metodología (Elaboración Propia).....	46
Figura 19: Vista aérea del río Aconcagua, desde el Sector 3 hasta su desembocadura en la Bahía de Concón (Elaboración Propia, Google Earth, 2021).....	47
Figura 20: Información levantada para el proyecto CNE, por la empresa ECOTECNOS S.A. (SEIA, 2015). ....	49
Figura 21: Caracterización textural de los sedimentos presentes en el estuario del río Aconcagua (Martínez y Cortez, 2007).....	50
Figura 22: Punto ADCP ( $t_1$ ) seleccionado en la bahía de Concón (en UTM) para obtener las funciones de transferencia del oleaje hacia aguas someras (Elaboración Propia, DHI MIKE 21). ....	52
Figura 23: Componentes del Ciclo Morfológico (Elaboración Propia según DHI Webinar, 2019). ....	54
Figura 24: Diagrama de flujo que indica las etapas para la modelación hidrodinámica y el transporte de sedimentos (Elaboración Propia según Niemann et.al., 2006). ....	56
Figura 25: Descripción batimétrica del sector de estudio (Elaboración Propia a través de MIKE 21).....	60
Figura 26: Comparación de las mareas observadas y simuladas para una serie de tiempo definida en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB). ....	62
Figura 27: Comparación percentil entre las mareas observadas y simuladas para una serie de tiempo definida en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB). ....	63
Figura 28: Diagrama de Taylor para la comparación entre mareas observadas y simuladas en otoño 2015 (Elaboración Propia).....	63
Figura 29: Comparación del oleaje observado y simulado para una serie de tiempo definida en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB). ....	64
Figura 30: Comparación percentil para un oleaje observado y simulado, considerando una serie de tiempo definida en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB). ....	65
Figura 31: Diagrama de Taylor para la comparación entre el oleaje observado y simulado en otoño 2015 (Elaboración Propia).....	66
Figura 32: Comparación de velocidades entre las corrientes superficiales observadas y simuladas en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB).....	67
Figura 33: Comparación percentil entre las corrientes superficiales observadas y simuladas en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB).....	68
Figura 34: Diagrama de Taylor para la comparación entre las corrientes superficiales observadas y simuladas en otoño 2015 (Elaboración Propia).....	69
Figura 35: Comparación de las mareas observadas y simuladas para una serie de tiempo definida en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB). ....	70

Figura 36: Comparación percentil entre las mareas observadas y simuladas en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB). .....	71
Figura 37: Diagrama de Taylor para la comparación entre mareas observadas y simuladas en verano 2016 (Elaboración Propia).....	71
Figura 38: Comparación del oleaje observado y simulado para una serie de tiempo definida en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB). .....	72
Figura 39: Comparación percentil para un oleaje observado y simulado en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB). .....	73
Figura 40: Diagrama de Taylor para la comparación entre un oleaje observado y simulado en verano 2016 (Elaboración Propia).....	74
Figura 41: Comparación de velocidades entre las corrientes superficiales observadas y simuladas en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB).....	75
Figura 42: Comparación percentil para una corriente superficial observada y simulada en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB). .....	76
Figura 43: Diagrama de Taylor para la comparación entre la corriente superficial observada y simulada en verano 2016 (Elaboración Propia). .....	77
Figura 44: Vista aérea del sector de estudio, señalando los 3 puntos elegidos en la bahía de Concón (Elaboración Propia, Google Earth, 2021).....	79
Figura 45: Vista aérea del sector de estudio, señalando los 2 puntos elegidos dentro del estuario del río Aconcagua (Elaboración Propia, Google Earth, 2021).....	82
Figura 46: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de verano, año 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM). .....	83
Figura 47: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de invierno, año 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM). .....	84
Figura 48: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición “sin sequía” para un día de verano, 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST). .....	85
Figura 49: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición “sin sequía” para un día de invierno, 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST). .....	86
Figura 50: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición “sin sequía” para un día de verano, 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST). .....	86
Figura 51: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición “sin sequía” para un día de invierno, 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST). .....	87
Figura 52: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 1 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición “normal” o “sin sequía” durante el año 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).....	88

Figura 53: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 2 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición “normal” o “sin sequía” durante el año 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).....	90
Figura 54: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de verano, año 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM). .....	93
Figura 55: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de invierno, año 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM). .....	93
Figura 56: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición “de sequía” para un día de verano, 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST). .....	94
Figura 57: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición “de sequía” para un día de invierno, 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST). .....	95
Figura 58: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición “de sequía” para un día de verano, 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST). .....	95
Figura 59: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición “de sequía” para un día de invierno, 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST). .....	96
Figura 60: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 1 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).....	97
Figura 61: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 2 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).....	99
Figura 62: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de verano, año 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM). .....	102
Figura 63: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de invierno, año 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM). .....	103
Figura 64: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición “proyectada de sequía” para un día de verano, 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).....	104
Figura 65: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición “proyectada de sequía” para un día de invierno, 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).....	104
Figura 66: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición “proyectada de sequía” para un día de verano, 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).....	105

Figura 67: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición “proyectada de sequía” para un día de invierno, 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).....	105
Figura 68: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 1 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).....	107
Figura 69: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 2 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).....	109
Figura 70: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (CERC) con distintos valores de azimut para el Punto 1 (Elaboración Propia). .....	111
Figura 71: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (Queens) con distintos valores de azimut para el Punto 1 (Elaboración Propia). .....	111
Figura 72: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (CERC) con distintos valores de azimut para el Punto 2 (Elaboración Propia). .....	113
Figura 73: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (Queens) con distintos valores de azimut para el Punto 2 (Elaboración Propia). .....	113
Figura 74: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (CERC) con distintos valores de azimut para el Punto 3 (Elaboración Propia). .....	115
Figura 75: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (Queens) con distintos valores de azimut para el Punto 3 (Elaboración Propia). .....	115
Figura 76: Comparación de los promedios mensuales de Qst [m <sup>3</sup> /yr/m] para los años 1988, 2015 y 2030, obtenidos mediante la Forma 1 para el Punto río 1 (Elaboración Propia).....	117
Figura 77: Comparación de los promedios mensuales de Qst [m <sup>3</sup> /yr/m] para los años 1988, 2015 y 2030, obtenidos mediante la Forma 2 para el Punto río 1 (Elaboración Propia).....	117
Figura 78: Comparación de los promedios mensuales de Qst [m <sup>3</sup> /yr/m] para los años 1988, 2015 y 2030, obtenidos mediante la Forma 1 para el Punto río 2 (Elaboración Propia).....	118
Figura 79: Comparación de los promedios mensuales de Qst [m <sup>3</sup> /yr/m] para los años 1988, 2015 y 2030, obtenidos mediante la Forma 2 para el Punto río 2 (Elaboración Propia).....	118
Figura 80: Relación entre el caudal medio anual y el transporte medio anual para el Punto río 1, aplicando la Forma 1 (Elaboración Propia). .....	121

Figura 81: Relación entre el caudal medio anual y el transporte medio anual para el Punto río 1, aplicando la Forma 2 (Elaboración Propia). ..... 121

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Información disponible para la caracterización del sector de estudio (Elaboración Propia). .....	48
Tabla 2: Muestreo y clasificación de los sedimentos por tamaños (Elaboración Propia según base de datos Proyecto CNE, SEIA 2015). .....	49
Tabla 3: Información sobre las mediciones en terreno efectuadas para el proyecto “Central Nueva Era” (Adaptación según estudios de la empresa ECOTECNOS S.A., 2015)..	53
Tabla 4: Información a utilizar para la validación del modelo, considerando registro de datos del instrumento ADCP (Adaptación según estudios de la empresa ECOTECNOS S.A., 2016). .....	53
Tabla 5: Escenarios para cada una de las condiciones propuestas (Elaboración Propia).59	
Tabla 6: Análisis granulométrico, donde se ha seleccionado el tamaño del grano de sedimento considerando cada una campaña de muestras “in situ” (Elaboración Propia). .....	79
Tabla 7: Estimación y clasificación de la Curtosis (K) a través de Folk and Ward (1957). 80	
Tabla 8: Estimación del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) en los puntos 1, 2 y 3 (año 1988), mediante la aplicación de 2 formulaciones para conocer la posición de equilibrio (Elaboración Propia). .....	81
Tabla 9: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 1, en condición “normal” o “sin sequía” durante el año 1988 (Elaboración Propia). .....	87
Tabla 10: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 2, en condición “normal” o “sin sequía” durante el año 1988 (Elaboración Propia). .....	88
Tabla 11: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 1, en condición “normal” o “sin sequía” durante el año 1988 (Elaboración Propia). .....	89
Tabla 12: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 2, en condición “normal” o “sin sequía” durante el año 1988 (Elaboración Propia). .....	89
Tabla 13: Estimación del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) en los puntos 1, 2 y 3 (año 2015), mediante la aplicación de 2 formulaciones para conocer la posición de equilibrio (Elaboración Propia). .....	91
Tabla 14: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 1, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia). .....	96
Tabla 15: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 2, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia). .....	97

Tabla 16: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 1, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia). .....	98
Tabla 17: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 2, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia). .....	98
Tabla 18: Estimación del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) en los puntos 1, 2 y 3 (año 2030), mediante la aplicación de 2 formulaciones para conocer la posición de equilibrio (Elaboración Propia). .....	101
Tabla 19: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 1, en una condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia). .....	106
Tabla 20: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 2, en una condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia). .....	106
Tabla 21: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 1, en una condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia). .....	108
Tabla 22: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 2, en una condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia). .....	108
Tabla 23: Azimuts de equilibrio [°] para los puntos ubicados en la bahía de Concón cuando el QL Neto resultante se aproxima a cero (Elaboración Propia). .....	122

# **1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 CONTEXTO**

La sequía es una característica natural e inherente del clima y ocurre en casi todas las regiones del mundo, variando de acuerdo a su severidad, frecuencia y duración. También puede ser considerada como una amenaza y un desastre al mismo tiempo; según su grado de impredecibilidad (que puede explicarse a medida que actúan simultáneamente ciertos fenómenos naturales en un periodo de tiempo) y en razón a los impactos sociales, económicos y ambientales que condicionan el desarrollo de las actividades humanas en el medio (i.e. abastecimiento de agua potable, la agricultura y la generación eléctrica, entre otras).

En el caso de Chile, en su zona central (30° - 40°S) se ha considerado como un evento de larga duración, llegando a ser el periodo más seco de la historia del país con una notable disminución de las precipitaciones del 20 al 40% desde el 2010 (Garreaud et. al., 2019), en comparación con otras sequías como la de 1950. Esta condición se ha intensificado debido a razones que van desde la ocurrencia de ciertos fenómenos naturales que se han prolongado últimamente y que eventualmente han cambiado las condiciones climáticas mediterráneas que se conocían hasta la fecha (i.e. estación estival seca prolongada), hasta razones más antropogénicas inherentes de la actividad humana (e.g. el aumento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero – GEI) y a la deficiente gestión del recurso hídrico. De hecho, el 97% de los estudios científicos señalan que existe una evidente responsabilidad humana en relación a los efectos del cambio climático que se han manifestado en este último tiempo (John Cook et.al., 2013).

Desde un punto de vista hidrológico, la disminución de las precipitaciones durante la “mega sequía” ha generado que las descargas de los principales ríos de la zona central del país se vean afectadas, incidiendo en el transporte de sedimentos hacia la costa y en la morfología de la playa adenaña. Por ejemplo, dentro de los años 2013 y 2014, los caudales de los ríos Choapa, Aconcagua, Maipo y Maule han disminuido entre un 20% a un 50% en comparación con el caudal promedio en dichos periodos, estimándose que un 25% de esta reducción de precipitaciones se debe a razones antropogénicas observadas desde el año 2010.<sup>1</sup>

Por otro lado, similar a lo que ocurre en estos afluentes, las costas de Chile han sufrido significativamente los efectos del cambio climático debido al incremento en la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos (i.e. marejadas de alta energía). Esto explica la tendencia

---

<sup>1</sup> De acuerdo a lo señalado en la publicación de González (2016), del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Santiago de Chile.

a la erosión o al retroceso moderado y alto (entre los -0,5 a -1,5 [m/año] y sobre los -1,5 [m/año], respectivamente) de casi el 80% de las playas a nivel nacional.<sup>2</sup>

No obstante, esta erosión fue atribuida solamente a los efectos generados en la costa debidos a variaciones del oleaje incidente vinculados al cambio climático, sin considerar los efectos de la “mega sequía” y su eventual disminución en el aporte de sedimentos al sistema litoral. Sabiendo que las playas se pueden nutrir de los sedimentos transportados por algún río aledaño proveniente de un sistema cuenca - desembocadura, es posible definir el rol que posee dicho río con la evolución morfológica de la costa.

Tal es el caso a lo ocurrido con la evolución morfológica de la playa La Boca (desembocadura del río Aconcagua) donde se ha evidenciado un alto retroceso de la línea de costa tendiente a sobrepasar los -1,5 [m/año] en algunos puntos observados (Winckler et. al., 2019), sin considerar explícitamente los efectos de la sequía en el sector de estudio. Por lo tanto, se infiere que dicha erosión de la playa pudo deberse también a la disminución de la disponibilidad del recurso hídrico en el río Aconcagua, dado que la capacidad de transporte o de arrastre de sedimentos hacia la costa puede verse afectada por la disminución de las precipitaciones y de su caudal.

Es por lo anterior que surge la necesidad de estimar cuanto es el impacto provocado por la sequía en relación a la evolución morfodinámica de la playa La Boca (Bahía de Concón), complementándose con los efectos costeros del cambio climático en el transporte de sedimentos (longitudinal) que ocurren en el medio oceánico para dicho sector. La presente investigación entrega una evaluación de los aportes sedimentarios que se visualizan en el borde costero, vinculando aspectos hidrodinámicos e hidrológicos que resultan de la interacción de ambos medios estudiados. Adicionalmente, esta investigación pretende ser de utilidad para la comunidad local en cuanto al conocimiento de los procesos que se encuentran involucrados para un mejor aprovechamiento del servicio ecosistémico disponible en el sector (i.e. turismo, recreacional).

---

<sup>2</sup> Según lo señalado por Morales, Winckler y Herrera, autores del libro Costas de Chile (2020). Valparaíso. Chile.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL**

Estimar los efectos de la “mega sequía” en la evolución morfológica de la playa de Concón, respecto al transporte de sedimentos producido desde el río Aconcagua hacia la costa y su incorporación al transporte generado en el litoral.

### **1.2.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS**

- Realizar comparaciones de la evolución morfológica de la playa del litoral central, tomando en cuenta periodos bajo una condición “normal” de precipitaciones (condición previa al año 2010), un periodo temporal “de sequía” y un periodo proyectado “de sequía”.
- Modelar condiciones para distintos caudales del afluente seleccionado y forzantes que se encuentran estrechamente vinculados al transporte de sedimentos hacia la costa.
- Estimar el Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) hacia la costa estudiada.
- Estimar el aporte sedimentario del afluente (concentración) que se encuentra condicionado por distintos caudales dentro de un canal aluvial.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 CICLO HIDROLÓGICO**

El ciclo hidrológico es un fenómeno donde confluyen los estados sólido, líquido y gaseoso en la naturaleza y participan directamente en el ciclo del agua. Este se caracteriza por ser un fenómeno complejo y dinámico, encontrándose dentro de él procesos que se relacionan entre sí y otorgan cierto equilibrio al sistema hidrológico. Por lo tanto, estos procesos pueden verse influenciados por distintas variables ambientales (i.e. temperatura, presión atmosférica, densidad), territoriales (i.e. geología, topografía, vegetación) y antropogénicas (i.e. agricultura, uso industrial, minería), los cuales condicionan el comportamiento del ciclo en su conjunto. Ante esto, cada una de las etapas del ciclo permiten la circulación o tránsito del agua por la litósfera, manteniendo un balance entre las salidas y entradas en el sistema. No obstante, su distribución no es homogénea, por lo que la disponibilidad de agua en los territorios a nivel global cambia constantemente.

El proceso comienza por la evaporación, la cual puede ser tanto desde los océanos como de la superficie terrestre, donde el agua cambia su estado debido a un incremento de temperatura y se incorpora a la atmósfera como vapor de agua. Posteriormente, el vapor de agua se desplaza en forma de nubes a través de la litósfera y por los océanos hasta que, debido a variaciones de temperatura y presiones atmosféricas, se condensa para finalmente precipitar.

En la superficie terrestre, el agua que es precipitada puede generar distintos procesos como la infiltración en el suelo, cuya percolación hacia sectores más profundos puede recargar las napas subterráneas. Además, el agua puede escurrir a través del subsuelo como flujo subsuperficial o como flujo subterráneo, y escurrir sobre el suelo como flujo superficial hasta descargar en los ríos o ser absorbida por la vegetación. Cabe señalar que, mientras continua el proceso hidrológico hacia el océano, el agua superficial que se encuentra en movimiento puede nuevamente evaporarse, volver a la atmósfera, condensarse y precipitar.

De acuerdo al concepto de balance hidrológico (Figura 1), ciertas cantidades volumétricas de agua son evaporadas desde la superficie terrestre como del medio oceánico, las cuales deberán ser relativamente iguales al agua aportada al sistema debido a las precipitaciones que ocurren sobre dichas superficies. Las cantidades relativas de agua que no llegan al mar, podrán formar parte de las aguas que han sido infiltradas hacia las napas subterráneas, permaneciendo en ese lugar como un reservorio de almacenamiento natural (acuífero).

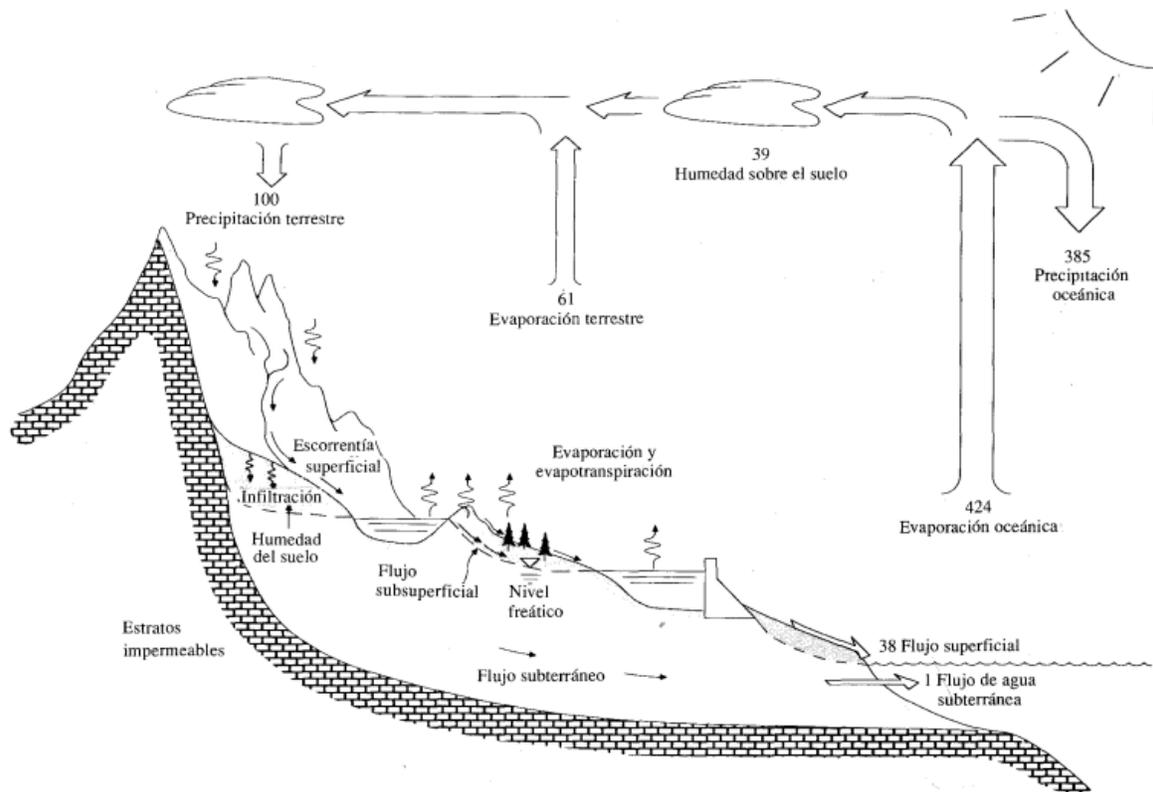


Figura 1: Esquema explicativo del Ciclo Hidrológico, considerando un balance hídrico anual relativo (Hidrología Aplicada, Ven Te Chow, 1994).

## 2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL

### 2.2.1 GENERALIDADES DE UN SISTEMA FLUVIAL IDEALIZADO

Un sistema fluvial idealizado corresponde a un sistema hidrológico que está compuesto principalmente por 3 zonas, las cuales se encuentran orientadas desde aguas arriba hacia aguas abajo, es decir, que desde sectores de mayor elevación hasta llegar a áreas de menor elevación (zonas costeras) (Figura 2).

De acuerdo a lo anterior, estas zonas pueden ser caracterizadas de la siguiente forma (Niño, 2005):

- **Zona A o de Aguas Abajo:** se identifican los procesos de arrastre de los sedimentos desde aguas arriba hasta zonas más bajas (a nivel del mar), debido a la acción de las corrientes presentes en un afluente. Es en esta zona donde se depositan los sedimentos (i.e. desembocaduras, deltas), llegando a ser transportados hacia aguas someras o profundas por la acción combinada de forzantes generados en el medio oceánico.

- Zona B o de Transición: conocida como la zona intermedia o de transferencia, siendo dominante el transporte de sedimentos desde aguas arriba. Es en esta zona donde se produce un balance de sedimentos, por lo que, si se presenta el supuesto de que se está trabajando con un canal estable (sin cuantificar pérdidas o alteraciones), la tasa de entrada de sedimentos (desde una zona de aguas arriba) se iguala a la tasa de salida (llegando a una zona de aguas abajo).
- Zona C o de Aguas Arriba: corresponde a la cuenca hidrográfica o al sector donde se drena el agua y se producen los sedimentos. Cabe señalar que en esta zona el almacenamiento de sedimentos es despreciable, por lo tanto, aporta agua y sedimentos al sistema.

Debido a la acción de las precipitaciones, corrientes y otros forzantes, los procesos erosivos en los terrenos se manifiestan en periodos relativamente breves, permitiendo que los sedimentos resultantes sean transportados por todo el sistema fluvial hasta llegar a su destino aguas abajo (deposición). Es preciso notar que, para las distintas zonas, el almacenamiento de sedimentos difiere entre sí, variando sus cantidades, dependiendo del dinamismo y complejidad morfológica inherente de los sistemas fluviales en cuanto a las externalidades que podrían influir en él.

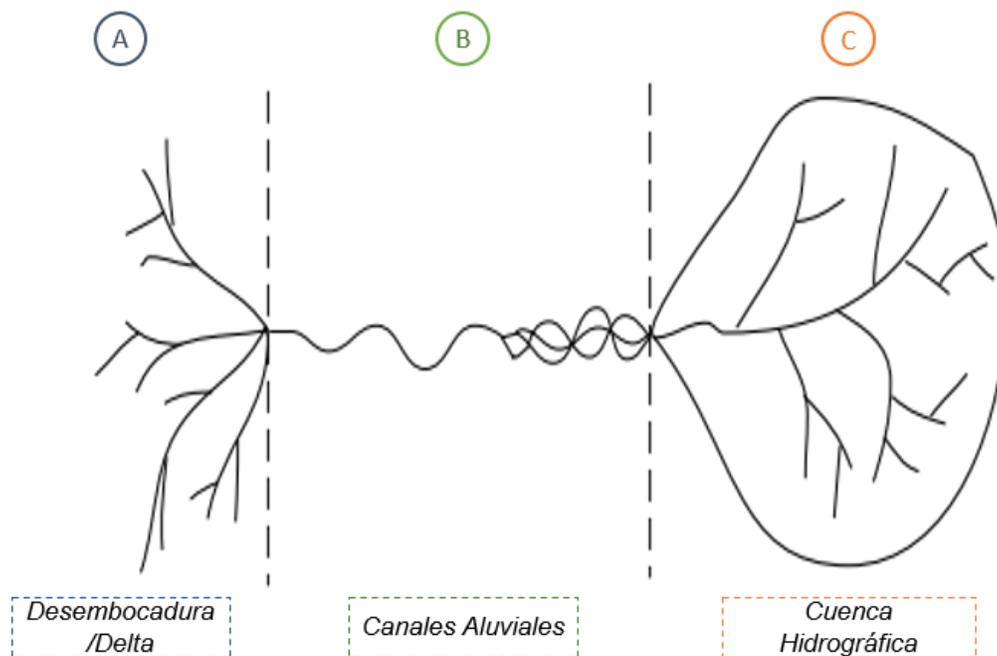


Figura 2: Adaptación de esquema explicativo de las zonas que componen un sistema fluvial idealizado, visualizándose 3 zonas; zona de aguas arriba (C), zona de transferencia (B) y zona de aguas abajo (A). La dirección del arrastre de sedimentos está alineada en la dirección del flujo, es decir, desde C a A (Niño, 2005).

### 2.2.2 DEFINICIÓN DE CUENCA HIDROGRÁFICA

Una cuenca hidrográfica puede definirse como “una superficie de tierra que drena hacia una corriente en un lugar dado” (Ver Te Chow, 1996). También puede entenderse como “una zona geográfica drenada por una corriente de agua” (FAO, 2021).

Ante la ocurrencia de una precipitación, es posible representar una cuenca como un sistema hidrológico, cuyo espacio volumétrico considerado puede describir una frontera física continua. En esta frontera, luego de precipitar, permite el ingreso de una cierta cantidad de agua que tiende a distribuirse por la cuenca y fluir sobre y bajo su superficie. Posteriormente, sale del sistema con un cierto caudal ( $Q$ ) hacia aguas abajo o producto de la evaporación (Figura 3).

Dado lo anterior, es posible considerar ciertos componentes que caracterizan una cuenca hidrográfica como un volumen de control:

- Línea divisoria de aguas: que separa la superficie de tierra de la cuenca.
- Frontera del sistema cuenca: permite establecer los límites del volumen de control, vertical y horizontal de la superficie de la cuenca.
- Superficie de la cuenca: donde se drena y escurre el agua. Esta ingresa al sistema por la parte superior del volumen de control debido a las precipitaciones.

Cabe señalar que, cuando se producen precipitaciones fuertes o tormentas, la pérdida de agua debido a la evaporación es baja. Por lo tanto, se infiere que este componente influye significativamente en el comportamiento de la cuenca y en la disponibilidad del recurso hídrico en las zonas más bajas.

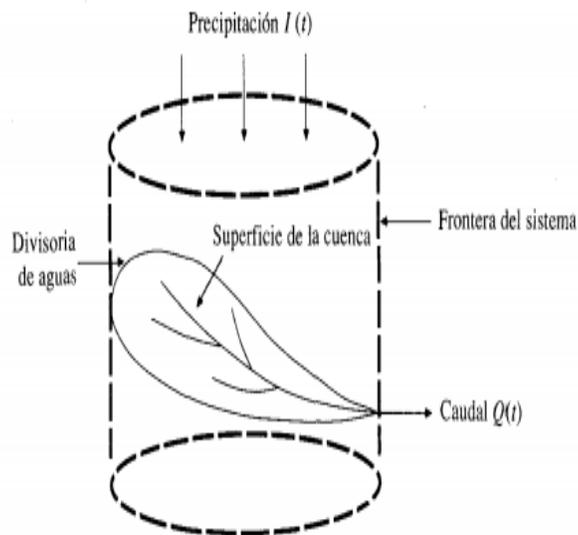


Figura 3: Caracterización de una Cuenca Hidrográfica como un Sistema (Ven Te Chow, 1996).

### 2.2.3 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS RÍOS

Los ríos o cauces pueden ser definidos como “*líneas de drenaje natural de una región o como corrientes constantes de agua*” (La Tierra y sus Recursos. Marrero, 1980), cumpliendo un rol esencial para el desarrollo de la vida en torno a él, tanto para los seres humanos como para otras especies bióticas.

Estos pueden clasificarse principalmente en 2 tipos, dependiendo del grado de libertad que tienen para ajustar, modificar o alterar su cauce (Niño, 2005);

- Canales Aluviales: se caracterizan por tener completa libertad para modificar su cauce y su pendiente tras la acción de forzantes hidráulicos (i.e. corrientes superficiales) bajo condiciones actuales de flujo. Estos canales también pueden ser afectados producto de la actividad humana.
- Canales de lecho rocoso: corresponden a los canales cuyo material se encuentra encerrado o confinado por rocas. Estas pueden aflorar o sobresalir a la superficie del río, influyendo en la morfología del río.

### 2.2.4 CICLO DE VIDA DE UN RÍO

De acuerdo a lo anterior, los ríos pueden configurar la superficie terrestre por donde transita o atraviesa, modificando su composición y características. Es por esta razón, tomando en cuenta su periodo de formación, se distinguen 3 procesos geomorfológicos que componen su ciclo de vida (Figura 4);

- Juventud del río: esta etapa se caracteriza por ser verticalmente erosiva, donde los perfiles transversales son muy irregulares, angostos y de pendiente alta. El material sedimentario que domina en el fondo es grueso, siendo poco abrasivo desde esta posición. Además, los afluentes son pocos y no están plenamente desarrollados.
- Madurez del río: esta etapa predomina el transporte dentro de un afluente, el cual se encuentra plenamente desarrollado y no son pocos. Además, se caracteriza por poseer perfiles transversales son más amplios, alcanzando su equilibrio (i.e. valles). También las pendientes son más bajas que en el caso anterior, las riberas están más propensas a ser erosionadas y el material sedimentario que se encuentra en el fondo son de granulometría graduada.
- Vejez del río: esta etapa se caracteriza por ser de depositación, en la que el río mantiene su condición de equilibrio (perfil) y los meandros, formados en su madurez, son más marcados. Adicionalmente, las pendientes son bajas, los perfiles transversales son mucho más amplios y llanos que en los otros casos.

Cada una de estas etapas son variables, por lo que, es posible que el río tenga un periodo de juventud muy largo y que después madure o envejezca muy rápido (Marrero, 1980).

Cabe señalar además que un cambio de pendiente condiciona la capacidad de transporte de sedimentos por un determinado afluente.

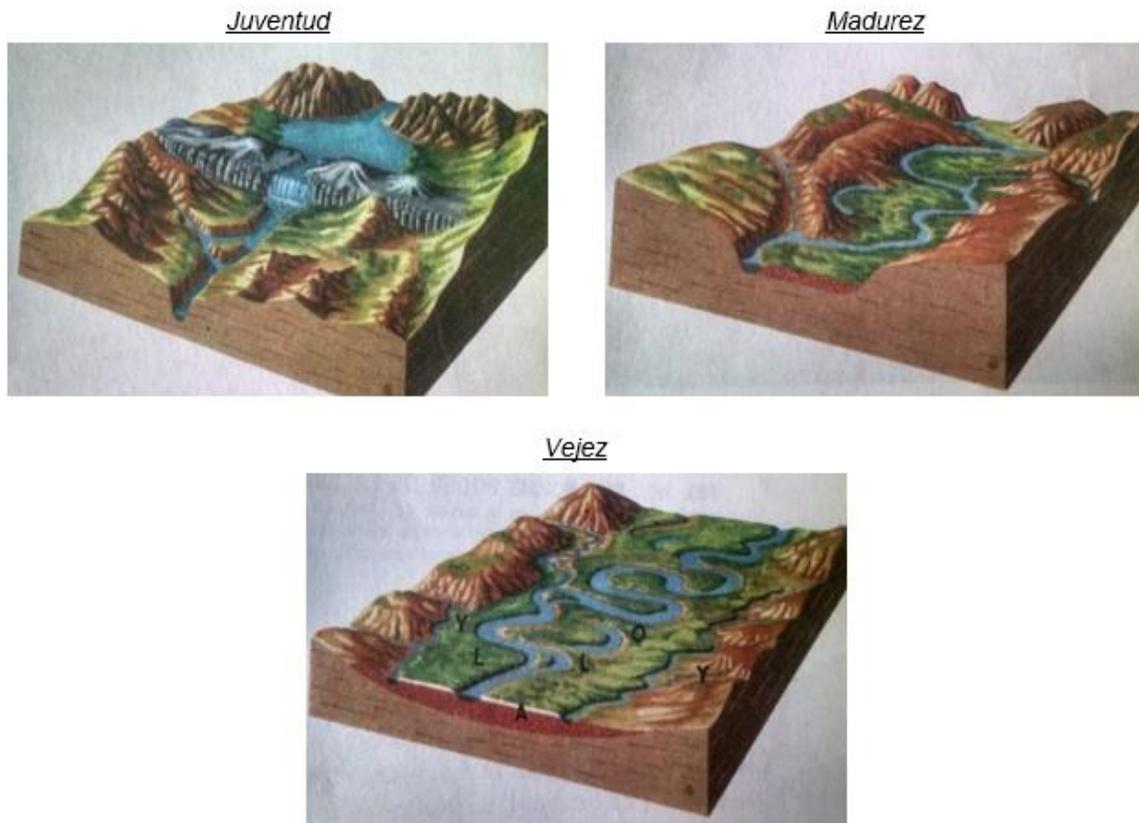


Figura 4: Procesos geomorfológicos que permiten explicar el Ciclo de Vida de un río (Marrero, 1980).

### 2.2.5 CLASIFICACIÓN DE LOS CAUCES O CANALES ALUVIALES SEGÚN SU FORMA

Sabiendo que los canales aluviales tienen plena libertad para modificar su cauce bajo la acción de ciertos forzantes, estos pueden clasificarse o diferenciarse por su forma en canales rectos, meandrosos y trezados (Figura 5);

- Canales de tramo recto: se distinguen por tener una pendiente muy baja y una sinuosidad baja en sus barras (riberas), cuya sección entre estas tiende a ser rectangular. Es preciso mencionar que las corrientes, al encontrar un obstáculo (i.e. rocas), puede condicionar el río, dando paso a la formación de curvas en él, perdiendo levemente su estabilidad en el tiempo. Generalmente este tipo de canal se encuentra aguas arriba del sistema fluvial.
- Canales meandrosos: se caracterizan por la formación de curvas sucesivas que se extienden a lo largo de un cauce. La formación de estos meandros depende de la intensidad del flujo (capacidad erosiva) y de las características que posee el terreno donde fluye el canal. Por lo tanto, si los meandros son muy exagerados, es decir,

cuando las curvas son muy pronunciadas, puede que el río busque acortar su cauce cuando ocurran crecidas, formando espacios donde no exista flujo de agua.

- **Canales trenzados:** son cauces relativamente anchos o transversalmente extensos, que pueden tener riberas inestables, erosionables, mal definidas o incluso con muchas divisiones, en la que el agua transita o fluye a través de pequeñas islas formadas por rocas o por sedimentos que han sido arrastrados y posteriormente depositados hasta ese punto. Además, otra cualidad importante que poseen estos canales es que son propensos a cambiar de posición en el tiempo dependiendo de variaciones en su caudal.

Para el caso del Valle Central de Chile, debido a que tiene por lo general pendientes altas, evita que se formen cauces meandrosos completamente desarrollados, dando paso a ríos parcialmente trenzados (Niño, 2005).

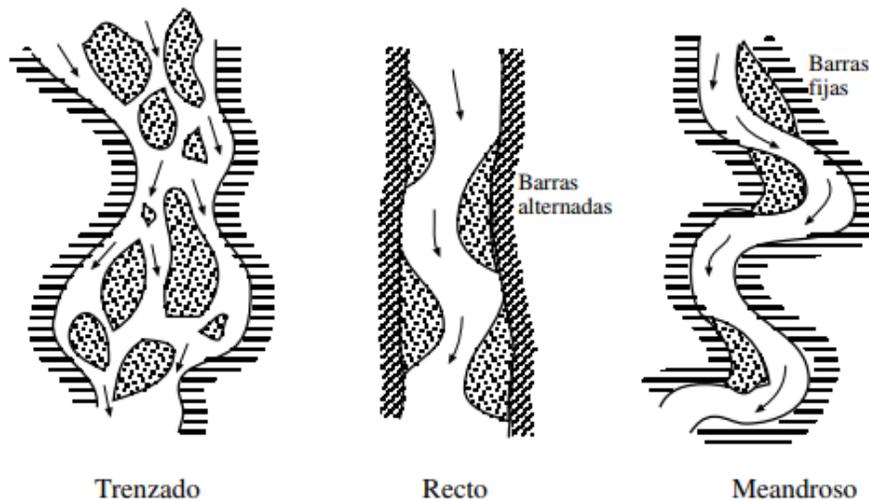


Figura 5: Caracterización de los cauces aluviales por su forma (Niño, 2005).

### 2.2.6 TRABAJO FORMATIVO DE LOS CAUCES

Dentro del trabajo formativo, los ríos pueden erosionar sus respectivas riberas o lechos de acuerdo a la frecuencia en que ocurren ciertos fenómenos condicionantes (i.e. crecidas, déficit de caudal). Por lo tanto, existirán periodos en que se tenga una mayor o menor cantidad de sedimentos disponibles para ser transportados, desde los sectores erosionados hasta la desembocadura del cauce aguas abajo. Además, se sabe que cuando se está bajo una condición de crecidas, los cambios morfológicos que se generan en el cauce pueden ser significativos, a diferencia de lo que ocurre cuando se está en una condición de bajo caudal, en la que existen pocos cambios geomorfológicos. Por ende, las variaciones del caudal influyen en el tirante del cauce y a su vez en el transporte de sedimentos.

Ante esto, la estimación del trabajo formativo de los cauces puede realizarse considerando el producto entre el volumen del sedimento transportado y la frecuencia cuando ocurren

eventos de crecidas. En el caso de que una determinada crecida dé como resultado un trabajo formativo máximo en los cauces, es posible asociarla con un caudal máximo permisible que posibilita dicha acción (caudal o gasto formativo). Sin embargo, en ocasiones poco usuales o puntuales, se podrá tener un caudal que sobrepase el máximo permisible haciendo que las riberas de los ríos se desborden, provocando erosión y socavación en ciertos sectores del cauce e inundaciones en sectores aledaños a este. Por ende, no se trataría de un caudal formativo, sino más bien de un caudal desbordante o extremo (Figura 6).

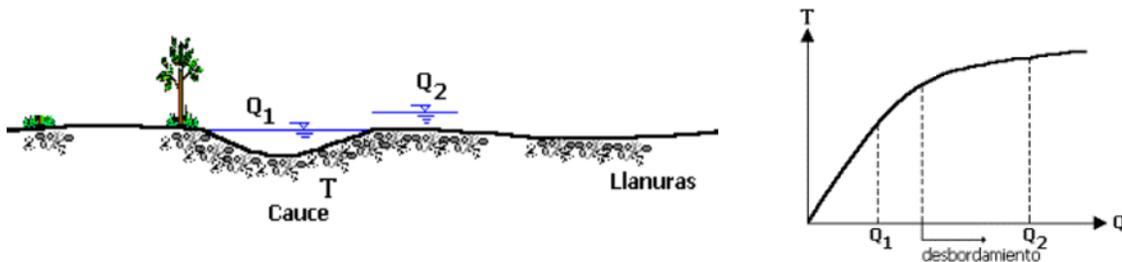


Figura 6: Adaptación de esquema explicativo que describe un caudal dominante ( $Q_1$ ) y un caudal desbordante ( $Q_2$ ) para un cierto periodo de tiempo ( $T$ ) (Fuente: <https://transportesedimentos.tripod.com/>).

Cabe señalar que, cuando se está en presencia de un gasto formativo o dominante, los sedimentos pueden ser transportados de forma constante considerando un mismo volumen para un cierto periodo de tiempo, el que por lo general es de un año (Maza y García, 1996).

### 2.2.7 DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESTUARIOS

Tomando en cuenta una de las definiciones más aceptadas desde un punto de vista científico, es posible entender los estuarios como “*cuerpos de agua semicerrados en donde el agua de mar es mensurablemente diluida por agua fluvial que proviene del drenaje terrestre*” (Cameron y Pritchard, 1963).

Esta definición considera ciertas similitudes con la versión entregada por Perillo y Piccolo (1997), quienes definen un estuario como “*un cuerpo semicerrado de agua costera que se extiende hasta el límite efectivo de la influencia de mareas, dentro del cual el agua de 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*”.

Considerando ambas definiciones, se infiere que dentro de estuario pueden confluir distintas disciplinas, las cuales no solo analizan su comportamiento desde un punto de vista físico o geomorfológico, sino que además incluyen aspectos químicos y biológicos (Martínez y Cortez, 2007).

### 2.2.7.1 Tramos que conforman un estuario típico

Dependiendo del grado de influencia que ejerce el medio marino sobre el afluente, es posible distinguir los siguientes tramos o secciones que forman parte de un estuario típico (Figura 7):

- Tramo externo o estuario bajo: en este tramo existe una mayor influencia del medio marino ya que las grandes masas de agua salada sobrepasan a las aguas proveniente de un determinado afluente. Ante esto, la influencia del agua salada será mayor que la dulce, sin que existan procesos de mezcla entre ambos fluidos.
- Tramo central o estuario medio: corresponde a la parte central del estuario en el que se equilibra la influencia de ambos fluidos (marino y fluvial).
- Tramo interno o estuario alto: en este tramo existe una mayor influencia del afluente que del medio marino. Por lo tanto, las corrientes provenientes del río cuentan con una mayor energía, logrando que disponibilidad de agua dulce sea mayor que la salada. Además, es preciso señalar que, tal como en el tramo externo, no existe una mezcla con el agua marina.

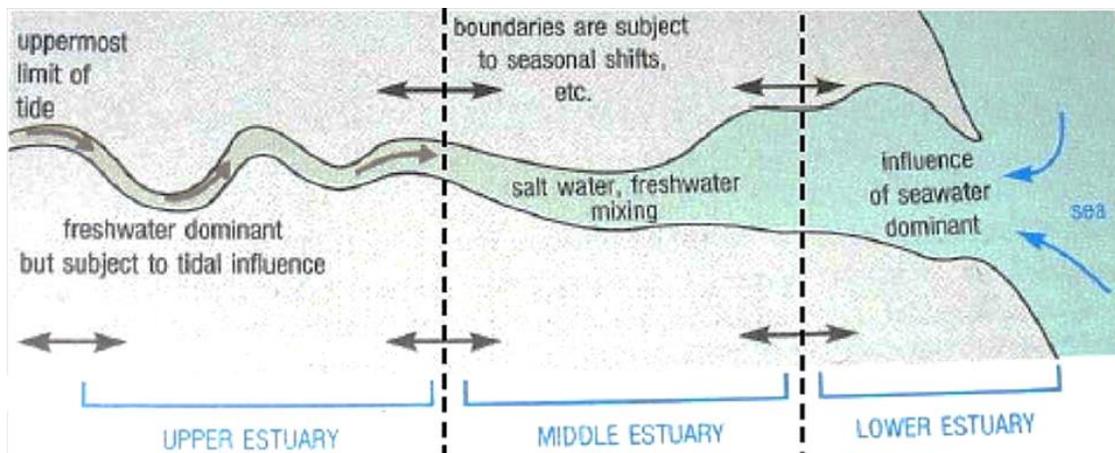


Figura 7: Esquema general que explica cada uno de los sectores o tramos que conforman un estuario típico (Ibañez et.al., 2009).

Dado que en los estuarios (estuario medio) confluyen 2 masas de agua de distintas características (i.e. densidades diferentes), es posible que se generen procesos de mezcla que busquen mantener un cierto equilibrio entre ambos fluidos. Por ende, es preciso notar que, a medida que el flujo de agua dulce en el estuario se acerca más al océano, la influencia del agua de mar comenzará a ser dominante y viceversa.

## 2.3 ASPECTOS HIDRÁULICOS EN CANALES ALUVIALES

Dentro de los aspectos hidráulicos considerados para explicar la interacción del flujo de un canal aluvial sobre el fondo, se encuentra la aplicación del concepto de velocidad media del flujo y su relación con el esfuerzo de corte sobre el fondo, es decir:

$$\tau_o = C_{fr} * \rho * U^2$$

Donde,

$\tau_o$ ; corresponde al esfuerzo cortante que ejerce el flujo de agua sobre el fondo [ $N/m^2$ ].

$C_{fr}$ ; es el factor o coeficiente de fricción adimensional.

$U$ ; es la velocidad media del flujo en [ $m/s$ ].

### 2.3.1 VELOCIDAD DE FRICCIÓN SOBRE EL FONDO Y RELACIÓN DE KEULEGAN

La acción del esfuerzo de corte sobre el fondo permite definir la velocidad friccional o de corte ( $u_{fr}$ ), es decir:

$$u_{fr} = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}}$$

Siendo,

$u_{fr}$ ; la velocidad de corte que actúa en el fondo o sobre el lecho del canal en [ $m/s$ ].

$\rho$ ; la densidad del agua en [ $kg/m^3$ ].

Dependiendo de las dimensiones o forma que pueda representarse el canal aluvial (i.e. sección trapezoidal), se podrá conocer su área hidráulica, perímetro mojado y radio hidráulico para una serie variable de caudales (flujo no uniforme).

Ante esto, Keulegan (1938) propuso relacionar la velocidad media del flujo y la velocidad friccional sobre el fondo aplicándola a un canal aluvial mediante la expresión:

$$\frac{U}{u_{fr}} = \frac{1}{\kappa} * \ln\left(12 * \frac{R_h}{k_s}\right)$$

Donde,

$\kappa$ ; es el número o constante adimensional de Von Karman, cuyo valor es de 0,4 (para la concentración local en un flujo).

$k_s$ ; es la rugosidad equivalente del sedimento en [ $m$ ], siendo  $k_s = 3 * D_s$ .

$D_s$ ; es el diámetro característico que representa el tamaño de las partículas más gruesas del lecho ( $D_s = D_{90}$ ) en [ $mm$ ].

$U$ ; es la velocidad media del flujo en  $[m/s]$ .

El coeficiente de fricción puede obtenerse en función del coeficiente de Manning ( $n$ ) y del radio hidráulico ( $R_h$ ), a través de la expresión:

$$C_{fr} = \left( \frac{\sqrt{g} * n}{R_h^{1/6}} \right)^2$$

Siendo,

$n$ ; el Coeficiente de Manning.

$R_h$ ; el Radio Hidráulico de la sección definida en  $[m]$ .

Cabe notar que, para este caso, el coeficiente de Manning no es adimensional y puede depender tanto del tamaño de las partículas más gruesas presentes en el lecho como del número de Strickler ( $S_t$ ) (adimensional). Por lo tanto, dicho parámetro adimensional está dado por:

$$S_t = \frac{\sqrt{g} * n}{(d_s)^{1/6}}$$

Se debe notar que, para determinar el valor del parámetro de Strickler, dependerá de la relación entre el radio hidráulico ( $R_h$ ) y el tamaño representativo de las partículas gruesas ( $D_s$ ). Por lo tanto, si dicha relación se encuentra dentro del rango  $10 < \frac{R_h}{D_s} < 200$ , el valor del parámetro adimensional será  $S_t = 0,12$ . En caso contrario, si está dentro del rango  $200 < \frac{R_h}{D_s} < 10000$ , el número de Strickler será  $S_t = 0,15$  (Niño, 2005).

### 2.3.2 APLICACIÓN DEL ESFUERZO DE SHIELDS

El esfuerzo de Shields corresponde al esfuerzo de corte adimensional que es capaz de mover los sedimentos, donde se encuentra determinado por los parámetros del flujo (i.e. aceleración de gravedad), del fluido (i.e. densidad del agua) y del sedimento (i.e. densidad de la partícula sólida, diámetro característico). Este esfuerzo puede definirse como:

$$\tau_* = \frac{(u_{fr})^2}{(g * R * D_s)} = \frac{\tau_o}{(g * (\rho_s - \rho) * D_s)}$$

Donde,

$\rho_s$ : es la densidad de la partícula sólida o del sedimento ( $\rho_s = 2650 [kg/m^3]$ ).

$R$ ; es la densidad específica sumergida del sedimento [*adim.*]. Cuyo valor está dado por

$$R = \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho}$$

## 2.4 ESTIMACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS HACIA LA COSTA

### 2.4.1 MECÁNICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN UN CAUCE

Los diferentes mecanismos de transporte de sedimentos han sido representados en la Figura 8, identificándose principalmente 3 tipos:

- **Deslizamiento:** la partícula se desplaza sin rotar, incidiendo en menor frecuencia en el transporte de sedimentos.
- **Rotación (o rodadura):** la partícula se desplaza con rotación, teniendo una mayor frecuencia de incidencia en el transporte de sedimentos que en el caso anterior.
- **Saltación:** es el principal mecanismo de transporte de fondo, siendo más frecuente que la rotación. Posee bajos esfuerzos de corte, caracterizándose por la visualización de rebotes o colisiones sucesivas entre las partículas de sedimento con el lecho.

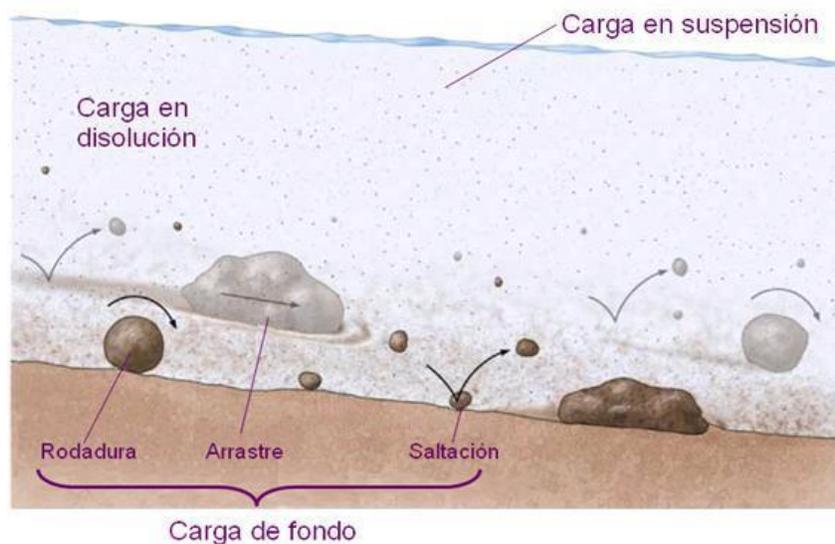


Figura 8: Mecanismos de transporte de sedimentos descritas en un medio líquido (Fuente: <https://rodanasciencias.blogspot.com/>).

Como bien se mencionó, la saltación considera el desplazamiento o transporte por el fondo de partículas sólidas donde las partículas dan rebotes o saltos sobre un lecho granular, cuya colisión entre estos sedimentos en movimiento con el fondo provoca un movimiento vertical o ascendente según la dirección del flujo. Esto se produce principalmente por la acción de fuerzas hidrodinámicas que actúan en las partículas de sedimentos y les transfieren momentum lineal en la dirección del flujo (horizontal). No obstante, debido a la gravedad, estos granos se atraen y, eventualmente, chocan con el fondo, transfiriendo su momentum horizontal a uno vertical. Este cambio de momentum implica que las partículas

suban y bajen de manera sucesiva (saltos). Por lo tanto, la colisión con el lecho es importante para la mantención de la saltación (Niño, 2005).

#### 2.4.2 GASTO SÓLIDO DEL FONDO CON PARTÍCULAS DE TAMAÑO UNIFORME

Para determinar el gasto sólido del fondo considerando un lecho de sedimento de tamaño uniforme, Niño y García (1998) formularon una relación analítica según ideas de Bagnold (1956). Ambos presentaron un modelo en la cual se estimó el gasto sólido para un fondo en equilibrio inducido por un flujo permanente, asumiendo que el transporte de sedimentos en el lecho ocurre en un sector o capa adyacente a él (capa de arrastre de fondo).

Por lo tanto, la ecuación que expresa el transporte de sedimentos en la capa mencionada, está dada por:

$$i_b = W_b * u_b$$

Siendo,

$i_b$ : El peso sumergido del sedimento por unidad de ancho y tiempo (tasa de transporte de sedimentos).

$W_b$ : El peso sumergido de la capa de arrastre de fondo por unidad de área del lecho.

$u_b$ : La velocidad media de los granos de sedimentos que se generan durante el arrastre en el fondo.

Luego, el peso sumergido de la capa de arrastre de fondo puede definirse como:

$$W_b = \frac{\tau_g}{\mu_d}$$

Donde,

$\tau_g$ : Es el esfuerzo de corte transmitido al lecho por los granos de sedimentos que se encuentran en saltación.

$\mu_d$ : Es el coeficiente de fricción dinámica producido por los granos de sedimentos.

Es posible determinar el valor de  $\tau_g$  realizando un balance de fuerzas en la capa de arrastre de fondo, a través de:

$$\tau_t + W_b * \text{Sen}(\alpha) = \tau_{res} * \tau_g$$

Sobre esta capa el fluido ejerce un esfuerzo de corte  $\tau_t$ . De la misma forma, producto del contacto con las partículas del lecho, dicha capa recibe el esfuerzo de corte  $\tau_g$  y el esfuerzo residual  $\tau_{res}$  en la base.

## Capítulo 2: Marco Teórico

---

Ahora, considerando definiciones previas y suponiendo que, si los sedimentos son de diámetro pequeño el espesor de la capa de arrastre también será pequeño, es decir:

$$\tau_t \approx \tau_o \text{ (esfuerzo cortante sobre el fondo)}$$

Según Bagnold (1956), bajo condiciones de equilibrio para el transporte de fondo (i.e. la cantidad concentrada de partículas en el fondo de mantienen constantes), el esfuerzo residual pasa a ser igual al esfuerzo de corte para el umbral de arrastre (o crítico) donde la concentración de sedimento dentro de la capa de arrastre alcanza un cierto máximo, o sea cuando:

$$\tau_{res} = \tau_{cr}$$

Esta condición dependerá de la concentración de los granos de sedimentos en saltación ubicadas en la capa de arrastre, de la cantidad de partículas que se encuentren en el fondo o lecho y de la transmisión de los esfuerzos de corte del fluido que actúan en cada una de las capas (la disminución del esfuerzo de corte aumenta a medida que se tenga una mayor concentración de partículas de sedimento en la capa de arrastre).

$$\tau_g = \tau_o - \tau_{cr}$$

*(Asumiendo que el canal tiene una pendiente pequeña)*

Siendo,

$\tau_{cr}$ : Corresponde al esfuerzo cortante para el umbral de arrastre o crítico.

Luego, utilizando expresiones anteriores,

$$i_b = \frac{\tau_g}{\mu_d} * u_b$$

Reemplazando,

$$i_b = \frac{(\tau_o - \tau_{cr})}{\mu_d} * u_b$$

Ante esto, y dentro de las alternativas, es posible estimar el gasto sólido de fondo adimensional  $q_{ad.bl}$  (adimensional bed load transport) a través de las siguientes formulaciones empíricas:

a) Uso de la ecuación propuesta por Engelund y Fredsøe (1975):

$$q_{ad.bl} = 18,74 * (\tau_* - \tau_{ad.cr}) * (\tau_*^{1/2} - 0,7 * \tau_{ad.cr}^{1/2})$$

Donde,

$\tau_{ad.cr}$ : Corresponde al esfuerzo de corte adimensional crítico, asignándose un valor estimado de 0,05 en la ecuación de Engelund y Fredsøe (Niño, 2005).

$\tau_*$ : Corresponde al esfuerzo de corte adimensional de fondo que resulta tras aplicar la formulación de Shields.

Es preciso notar que, sabiendo que se está determinando el gasto sólido de fondo adimensional, este valor deberá transformarse en unidades volumétricas por unidad de ancho [ $m^3/s/m$ ] para indicar su transporte en una sección definida dentro del dominio fluvial. Por lo tanto, bajo el enfoque tipo Bagnold, se presenta la expresión:

$$q_{ad.bl} = \frac{q_{bl}}{\sqrt{g * R * (Ds)^3}}$$

Siendo,

$q_{bl}$ ; el gasto sólido volumétrico de fondo por unidad de ancho en [ $m^3/s/m$ ].

En el caso de que se tengan valores de  $\tau_*$  cercanos a  $\tau_{ad.cr}$ , da a lugar a que exista una alta imprecisión e incertidumbre en la estimación del gasto sólido de fondo en cauces naturales (Niño y García, 1998). Tras obtener el gasto sólido volumétrico de fondo por unidad de ancho ( $q_{bl}$ ), este se deberá multiplicar por la densidad del sedimento ( $\rho_s$ ) para que las unidades de transporte queden expresadas en [ $kg/s$ ].

b) Uso de la ecuación propuesta por Engelund y Hansen (1967):

Otra alternativa para determinar el gasto volumétrico de fondo en [ $m^3/s/m$ ] es a través de la formulación de Engelund – Hansen. Esto es:

$$q_{bl} = 0,05 * (U)^2 * (\tau_*)^{3/2} * \sqrt{\frac{Ds}{g * (s - 1)}}$$

Donde,

$q_{bl}$ ; es el gasto sólido volumétrico de fondo por unidad de ancho en [ $m^3/s/m$ ].

$U$ ; es la velocidad media del flujo en [ $m/s$ ].

$s$ ; es la relación de gravedad específica [*adim.*], cuyo valor esta dado por  $s = \frac{\rho_s}{\rho}$ .

Se debe notar que esta ecuación es aplicable sólo si el tamaño de los sedimentos encontrados en el fondo sobrepasa los 0,15 [ $mm$ ] de diámetro característico (hasta los 0,93 [ $mm$ ]). Luego de obtener el gasto sólido volumétrico de fondo por unidad de ancho ( $q_{bl}$ ), este se deberá multiplicar por la densidad del sedimento ( $\rho_s$ ) para que las unidades de transporte queden expresadas en [ $kg/s$ ].

### 2.4.3 GASTO SÓLIDO DE PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

Existen distintas formulaciones para estimar el gasto sólido de las partículas que se encuentran en suspensión a lo largo de un canal aluvial (i.e. Engelund y Hansen). No obstante, por conveniencia, se ha elegido el uso de la formulación de Van Rijn (1984) para determinar la concentración del gasto sólido en suspensión ( $q_{sl}$ , suspended load) e incorporar el gasto sólido de fondo ( $q_{bl}$ , bed load) para obtener finalmente la magnitud del gasto sólido total ( $q_{st} = q_{bl} + q_{sl}$ ).

- Uso de la ecuación propuesta por Van Rijn (1984):

De acuerdo a lo anterior, se propone la expresión:

$$q_{sl} = f * C_{ref} * U * h$$

Requiriendo de las siguientes formulaciones:

$$C_{ref} = \frac{0,015 * (D_{so}) * (T)^{1,5}}{Z_{ref} * (D_*)^{0,3}}$$

$$D_* = d_{50} * \left[ \frac{(s-1) * g}{(v)^2} \right]^{1/3}$$

$$T = \frac{(u_{**})^2 - (u_{*cr})^2}{(u_{*cr})^2}$$

$$u_{**} = \frac{(g)^{0,5}}{(18 * \log(12 * \frac{R_h}{(3 * d_{90})}))}$$

$$u_{*cr} = \frac{4 * ws}{D_*}$$

Siendo,

$q_{sl}$ ; es el gasto sólido volumétrico en suspensión por unidad de ancho en [ $m^3/s/m$ ].

$f$ ; el factor de corrección para el gasto sólido en suspensión basado en el gasto sólido de fondo [*adim.*].

$h$ ; la altura de escurrimiento o tirante del cauce aluvial en [ $m$ ].

$D_{so}$ ; el tamaño característico de la partícula sólida en suspensión [ $m$ ] ( $D_{so} = d_{50}$ ).

$D_s$ ; el tamaño característico de la partícula sólida en el fondo [ $m$ ] ( $D_s = d_{90}$ ).

$T$ ; el parámetro de la fase de transporte [*adim.*].

$C_{ref}$ ; la concentración volumétrica referencial [*adim.*].

$Z_{ref}$ ; la altura o nivel de referencia sobre el lecho en [ $m$ ], considerando que  $Z_{ref} = 0,5 * k_s$  (usando el  $d_{90}$ ).

$D_*$ ; el parámetro de la partícula [*adim.*].

$u_{**}$ ; la velocidad de fricción o de corte efectiva en [*m/s*].

$u_{*cr}$ ; la velocidad de fricción o de corte crítica en [*m/s*], de acuerdo a Delft Hydraulics Laboratory (1982).

$w_s$ ; la velocidad de caída de los sedimentos en suspensión en [*m/s*].

Al igual que en los otros casos, luego de obtener el gasto sólido volumétrico en suspensión por unidad de ancho ( $q_{sl}$ ), este valor se deberá multiplicar por la densidad del sedimento ( $\rho_s$ ) para que las unidades de transporte queden expresadas en [*kg/s*].

### 2.4.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS LITORAL

Al igual que en el caso anterior, existen distintos mecanismos de transporte los cuales se manifiestan en el medio oceánico. Estos son:

- Saltación.
- Rotación o rodadura.
- Desplazamiento en suspensión.

De lo anterior, pueden caracterizarse principalmente 2 tipos de transporte que ocurren en la costa y que dependen tanto de la dirección del oleaje incidente como de las escalas temporales de acción, tal como se puede ver en la Figura 9.

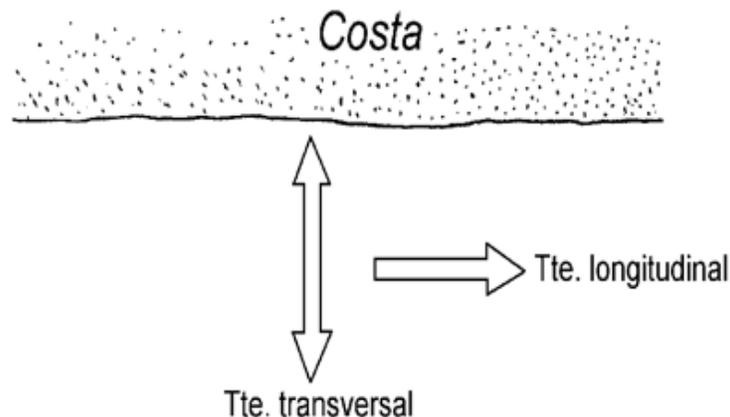


Figura 9: Descripción del transporte longitudinal y transversal de sedimentos que se manifiesta en el medio oceánico, considerando la acción de un oleaje incidente (Curso Ingeniería de Costas. Quezada, 2020).

En esta figura se describe un Transporte Transversal de Sedimentos (TTS), actuando perpendicularmente a la línea de costa y donde predomina la acción de ciertos forzantes, tales como el oleaje y las corrientes costeras, manifestándose a corto plazo ante la ocurrencia de fenómenos de clima extremo (i.e. marejadas).

Así mismo, se presenta un Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS), actuando de forma paralela a la línea de costa, predominando la acción de una condición “normal” u operacional de oleaje, cuyo comportamiento es analizado y visualizado a largo plazo (i.e. años).

Luego, considerando ambos transportes, junto con el transporte eólico, es posible realizar un balance sedimentológico (Figura 10), identificando las fuentes (i.e. aporte fluvial, transporte eólico desde las dunas) y las pérdidas (i.e. transporte transversal hacia mar adentro) que permiten explicar los cambios morfodinámicos que se generan en la costa ante la acción de ciertos forzantes o agentes climáticos.

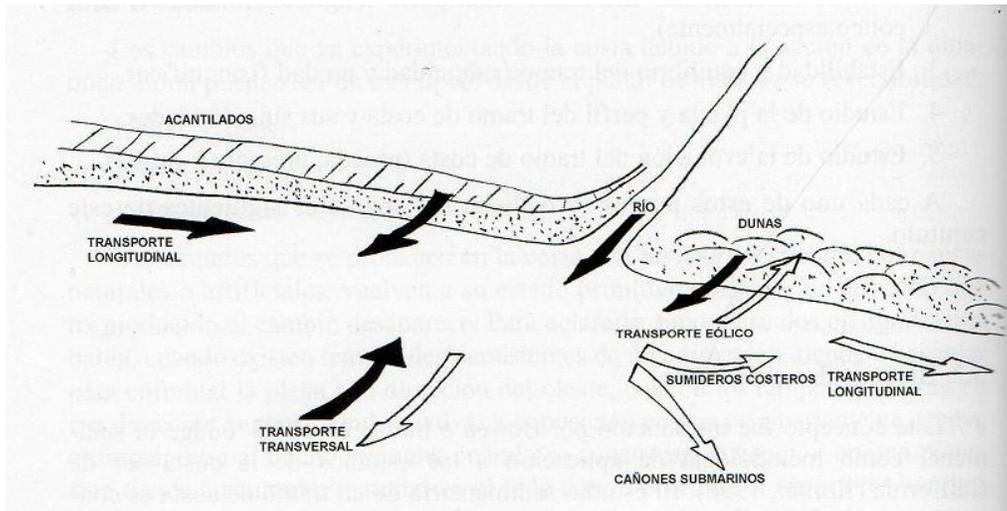


Figura 10: Esquema que describe el balance sedimentológico en la costa, considerando distintas fuentes o entradas (flechas negras) y salidas (flechas blancas) de sedimentos y que condicionan su transporte en el medio oceánico (De la Peña, 2007).

### 2.4.4.1 Transporte Transversal de Sedimentos (TTS)

Es posible entender el TTS como aquel transporte que resulta mediante la acción de forzantes bajo una condición de clima extremo, donde existe un flujo altamente turbulento que provoca alteraciones o cambios significativos al perfil de playa. Esta transmisión de energía ocurre en la rompiente, en el que los sedimentos suspendidos son arrastrados o advectados del fondo hacia o desde la costa. Sabiendo que los eventos de clima extremo pueden modificar temporalmente el perfil de la playa, el impacto que tiene en un sector costero dependerá de ciertos parámetros físicos, tales como, de la pendiente de la playa, tamaño de los granos de sedimentos que pueden ser transportados y de las condiciones del fondo marino (Winckler et.al., 2019).

Ante esto, es posible comparar esquemáticamente los perfiles de playa cuando se tiene una condición de clima extremo (o de tormentas) con respecto a condiciones de oleaje normal u operacional (Figura 11).

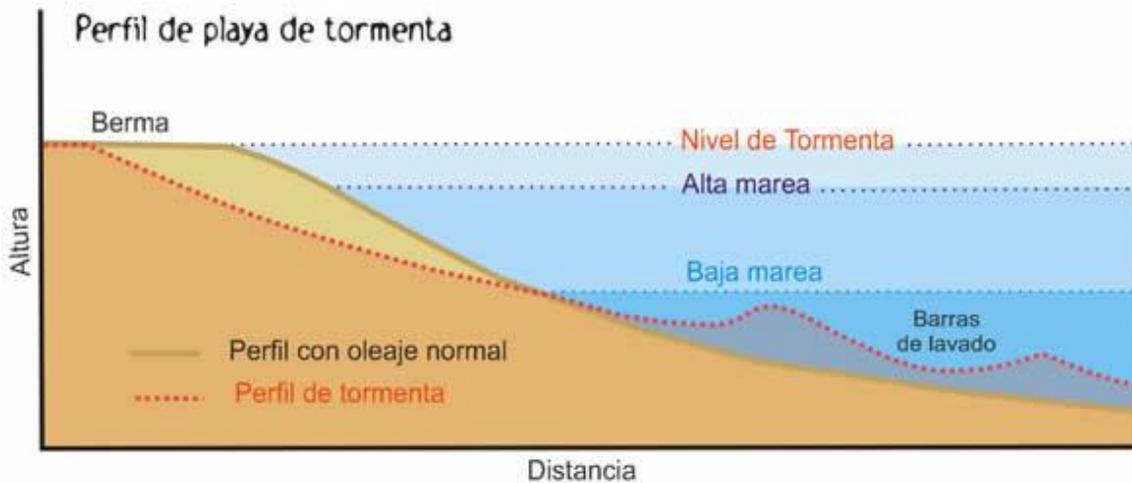


Figura 11: Esquema que describe el perfil de playa ante la acción de una tormenta (evento de clima extremo). El resultado es comparado con un perfil de playa en condiciones normales de oleaje (Fuente: <https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/>).

Generalmente, se pueden utilizar distintos métodos para medir o monitorear los cambios morfodinámicos que presenta el perfil de playa producto de una tormenta o marejada, comprendiendo la relevancia que tiene el Transporte Transversal de Sedimentos (TTS) en ella. Por lo tanto, existe un método “en terreno” el que, a través de varillas clavadas en la arena, permite levantar información de los perfiles transversales de una playa, estimando la cantidad de arena transportada o movilizada en ella hacia otros sectores. Este método es conocido como el Método de Emery (1961).

#### 2.4.4.2 Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS)

Para entender cómo se transportan los sedimentos longitudinalmente, se deben considerar ciertos elementos que son esenciales para definir el comportamiento dinámico que posee una determinada playa. Por ende, se presentarán 2 métodos o formas comúnmente utilizadas para estimar la capacidad de transporte de sedimentos en un sitio de interés.

##### 2.4.4.2.1 Formulación del Coastal Engineering Research Center (CERC)

Para estimar la capacidad de transporte longitudinal de sedimentos (potencial), se utilizará la fórmula de CERC (1984). Para este caso, se asume que la profundidad de rotura, así como la altura de la rompiente están bajo el criterio de McCowan. Ante esto, se propone la siguiente expresión:

$$Q_L = \frac{K}{(\rho_s - \rho_w) * (1 - po)} * \frac{1}{8} * \rho_w * (H_b)^2 * \sqrt{g * \frac{H_b}{\gamma} * \cos(\alpha_r) * \sin(\alpha_r)}$$

Siendo,

$Q_L$ : La tasa de transporte longitudinal del sedimento [ $\frac{m^3}{s}$ ].

$H_b$ : La altura de la ola en la rompiente [ $m$ ].

$\rho_w$ : La densidad del agua de mar, la cual corresponde a 1025 [ $\frac{kg}{m^3}$ ].

$\rho_s$ : La densidad volumétrica de los granos de sedimento, correspondiente e a 2650 [ $\frac{kg}{m^3}$ ].

$K$ : La constante de proporcionalidad para una altura significativa en rompiente, cuyo valor, de acuerdo a SPM (1984) es de 0,39.

$po$ : La porosidad del sedimento. Se asume un valor de 0,4.

$\alpha_r$ : El ángulo de incidencia de la ola en la rompiente [ $^\circ$ ].

$\gamma$ : Corresponde al índice de rotura, cuyo valor, para este caso, está dado por el criterio de McCowan (1894) y Munk (1949), siendo de 0,78.

Cabe señalar que la formulación del CERC no considera el periodo del oleaje ni las características del tipo de sedimento que se está transportando (i.e. tamaño o diámetro del sedimento). Por lo tanto, algunas veces la formulación de CERC sobreestima o subestima las predicciones de la tasa de transporte de sedimentos cuando ocurren eventos extremos (i.e. marejadas, tormentas), por lo que el valor de la constante K puede llegar a ser mayor a lo recomendado por el SPM 1984 ( $K > 0,39$ ) (Smith et.al., 2009).

Luego, para obtener el valor del ángulo de incidencia del oleaje ( $\alpha_r$ ), se deberá considerar que:

$$\text{sen}(\alpha_r) = \sqrt{g * \frac{H_b}{\gamma} * \frac{\text{sen}(\alpha_0)}{C_0}}$$

Donde,

$\alpha_r$ : Corresponde al ángulo de incidencia de la ola en la rompiente [ $^\circ$ ].

$H_b$ : Corresponde a la altura de la ola en la rompiente [ $m$ ].

$C_0$ : Corresponde a la celeridad de la onda (o de fase) en aguas profundas [ $m/s$ ].

$\alpha_0$ : Corresponde al ángulo de incidencia de la ola en aguas profundas [ $^\circ$ ].

De la misma forma, para determinar la altura significativa de la ola que se manifiesta en la rompiente, a través de CERC, se utiliza la siguiente formulación:

$$H_b = (H_0)^{4/5} * (C_g * \cos(\alpha_0))^{2/5} * \left[ \frac{g}{\gamma} - \frac{H_b * g^2 * \text{sen}^2(\alpha_0)}{\gamma^2 * C_0^2} \right]^{1/5}$$

Siendo,

$H_0$ : La altura de la ola en aguas profundas [ $m$ ].

$C_g$ : La celeridad local de grupo del tren de olas [ $m/s$ ].

$\alpha_0$ : El ángulo de incidencia de la ola en aguas profundas [ $^\circ$ ].

$C_0$ : La celeridad de la onda (o de fase) en aguas profundas [ $m/s$ ].

#### 2.4.4.2.2 Formulación de Queens (1991)

Esta ecuación propone una variante a la formulación de CERC, incluyendo en su formulación aspectos como la pendiente de la playa, los efectos de las olas o el diámetro de los granos tendientes a ser transportados hacia la costa.

$$Q_s = K * \left(\frac{H_{sb}}{L_{op}}\right)^a * m^b * \left(\frac{H_{sb}}{d_{50}}\right)^c * \text{sen}^d(2\alpha_r) * (\rho * \left(\frac{H_{sb}}{Tp}\right)^3)$$

Donde,

$Q_s$ : Corresponde al transporte longitudinal de sedimentos en [kg/s].

$Tp$ : Corresponde al periodo peak del oleaje [s].

$K$ : Constante adimensional, cuyo valor para este caso es de  $1,3 * 10^{-3}$ .

$L_{op}$ : Corresponde a la longitud de onda en aguas profundas (offshore) [m].

$d_{50}$ : Corresponde al diámetro medio de los sedimentos [mm].

$\alpha_r$ : Corresponde al ángulo de incidencia de la ola en la rompiente [°].

$a$ : Es un coeficiente de calibración, cuyo valor es de -1,25.

$b$ : Es un coeficiente de calibración, cuyo valor es de 0,75.

$c$ : Es un coeficiente de calibración, cuyo valor es de 0,25.

$d$ : Es un coeficiente de calibración, cuyo valor es de 0,6.

$m$ : Corresponde a la pendiente media del perfil de playa, por lo que  $m = \tan(\theta)$ .

De acuerdo a lo anterior, para obtener el transporte de sedimentos en  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$  se presenta la siguiente ecuación:

$$Ts = \frac{Q_s}{(1 - p_o) * \rho_s}$$

Por lo que,

$Q_s$ : Corresponde al transporte longitudinal de sedimentos en  $\left[\frac{kg}{s}\right]$ .

$\rho_s$ : La densidad de los granos de sedimento, asumiendo un valor de  $2650 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .

$Ts$ : Corresponde al transporte longitudinal de sedimentos en la costa en  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ .

## 2.5 CAMBIO CLIMÁTICO Y LA SEQUÍA EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

### 2.5.1 FLUCTUACIONES E INTERACCIONES ATMOSFÉRICAS EN EL MEDIO

Existen anomalías atmosféricas que emanan del pacífico sudoccidental subtropical, los cuales, en base a indicadores y observaciones temporales, pueden explicar la sequía presente en la zona central del país. Además, estos fenómenos atmosféricos permiten comprender las razones por las cuales se evidencia una reducción de las precipitaciones en la zona y, a su vez, una disminución en la disponibilidad del recurso hídrico, temporal y espacialmente.

Dentro de estas anomalías se encuentra la variabilidad del ENSO (El Niño Southern Oscillation), evento que está fuertemente ligado a la precipitación invernal (estacional) que se manifiesta en la zona central del país, donde pueden presentarse 2 fases; una fase fría y una fase cálida. Por ejemplo, bajo una fase fría, hay una disminución de la evaporación, reduciendo las precipitaciones medias anuales. Esta fase es conocida como “La Niña”. Por otro lado, bajo una fase cálida, hay un aumento de la evaporación, incrementándose las precipitaciones medias anuales. Es posible nombrar a esta fase como “El Niño”.

De la misma forma, existen anomalías o fluctuaciones decadales en la temperatura de la superficie del mar (PDO), las cuales influyen parcialmente en el régimen de precipitación de la zona por un intervalo de 20 a 30 años. La PDO (Pacific Decadal Oscillation) ocurre en una cierta región del Pacífico (20°N hacia el Polo Norte), cuyas fases fría y cálida describen la cantidad de precipitaciones que ocurren en la zona central del país (Figura 12), siguiendo una distribución temporal en cada uno de los inviernos (Garreaud, et.al., 2019).

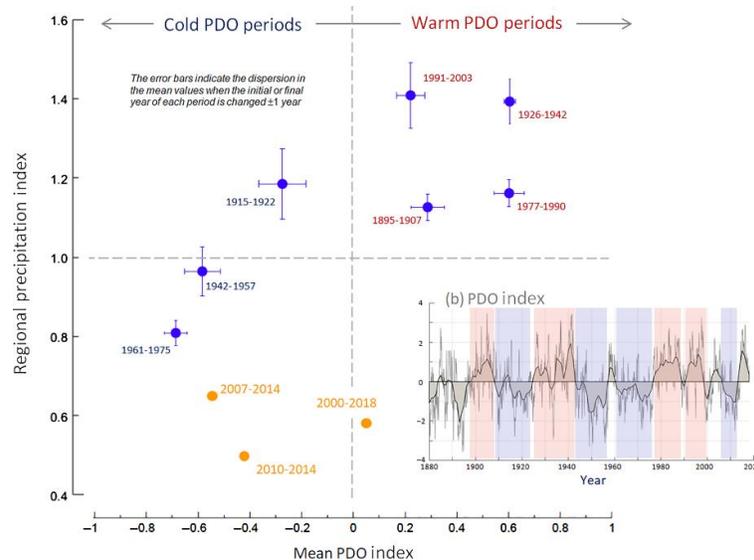


Figura 12: Índice de precipitación regional vs índice PDO (fases frías y cálidas), contextualizado para eventos de multi - inviernos en la zona central del país (Garreaud, et.al., 2019).

## Capítulo 2: Marco Teórico

---

Por ende, una PDO fría junto con una fase fría del ENSO (“La Niña”), pueden estar asociadas a la prevalencia de la condición de sequía en la zona central del país (González, 2016).

Similar a la PDO y al ENSO, otro forzante climático que puede influir en la reducción de las precipitaciones, el debilitamiento del transporte de humedad desde el Pacífico y la extenuada duración de la sequía (Mega Sequía) en estos últimos años, tiene relación con la Oscilación Antártica o Southern Annular Mode (AAO o SAM). Este forzante atmosférico juega un papel importante en los cambios de presión a nivel del mar entre las latitudes medias y altas (~ 60 °S), actuando en la variabilidad interanual de las precipitaciones entre abril a septiembre (otoño e invierno) y en la migración de las precipitaciones de los sistemas frontales desde latitudes altas hacia latitudes medias. Si bien, este proceso por lo general ocurre en estas fechas, no obstante, se ha visto reducida su intensidad a causa de la prolongación de una tendencia positiva del SAM y también porque se han mantenido neutrales las condiciones del ENSO en dichas latitudes, a excepción de los eventos ocurridos en los inviernos del 2010 (“La Niña”) y del 2015 (“El Niño Fuerte”) (Garreaud, et.al., 2019).

Cabe señalar que, cuando se tiene un SAM positivo, hay una contracción de la banda de vientos del oeste (westerly winds) hacia la Antártica, por lo que las altas presiones ubicadas más al norte bajan, generando zonas secas en dichas latitudes (influencia del Anticiclón del Pacífico) (Figura 13).

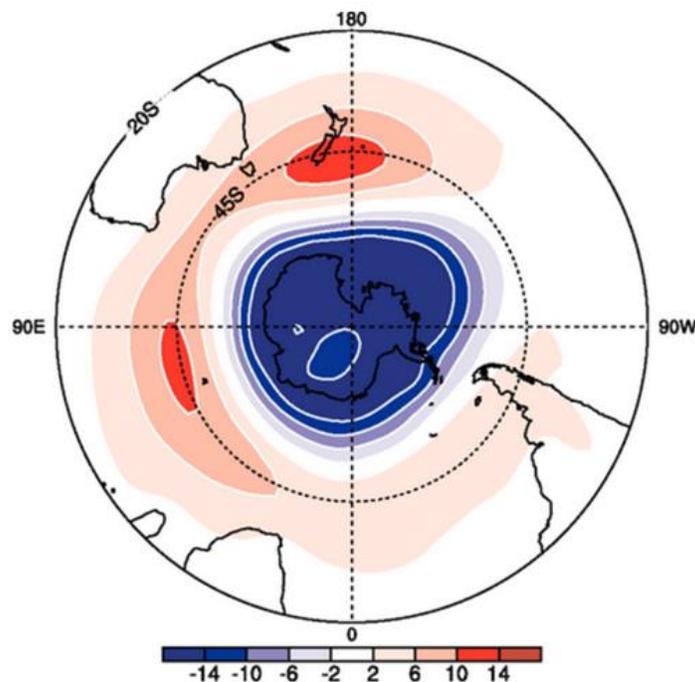


Figura 13: Esquema que describe una tendencia positiva del SAM, donde las áreas azules señalan las presiones que están por debajo del promedio y las áreas rojas lo contrario (Renwick y Thompson, 2006).

Por otro lado, cuando se tiene un SAM negativo, existe una expansión de la banda de vientos del oeste hacia el Ecuador, por lo que las altas presiones ubicadas más al norte suben, generando zonas lluviosas en latitudes ubicadas al sur de dicho centro de presión (influencia de los centros de baja presión en estas latitudes) (Renwick y Thompson, 2006).

Dado lo anterior, en la última década ha existido un marcado calentamiento en la superficie del mar y en la atmósfera, tendiendo a intensificar la prevalencia de los centros de alta y baja presión en ciertas latitudes, extendiendo temporalmente una condición de sequía en zonas de menor latitud (zona central del país).

### 2.5.2 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MEDIO OCEÁNICO, ASOCIADOS A LA BAHÍA DE VALPARAÍSO Y CONCÓN

Tomando en cuenta que existen diferentes forzantes atmosféricos que interactúan entre sí y que permiten explicar las razones detrás de la sequía, también es posible atribuir esta problemática a razones antropogénicas. De hecho, el 97% de los estudios científicos señalan que existe una evidente responsabilidad humana en relación a los efectos del cambio climático que se han manifestado en este último tiempo (John Cook et.al., 2013).

Aun así, entre los efectos o consecuencias que trae consigo el cambio climático en el medio oceánico implica considerar múltiples casos, tales como, el aumento progresivo del nivel del mar (NMM), recrudecimiento de las condiciones de oleaje, el aumento en la frecuencia de ocurrencia de eventos de clima extremo (i.e. marejadas, tormentas), alta erosión en las costas aledañas, daño en la infraestructura costera o marítima, acidificación de los océanos, entre otros. Por ejemplo, en el caso del aumento del nivel del mar, es posible asociar este incremento al derretimiento de los hielos debido al aumento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI's) a nivel mundial, principalmente de CO<sub>2</sub> (Rockström et.al., 2009). Esto se puede ver en el informe del IPCC (2013), el cual señala que efectivamente existe un aumento entre 10 [cm] y 25 [cm] en los últimos 120 años a escala mundial, condicionado por factores antropogénicos (Morales et.al., 2020).

Para el caso de Chile, si se relacionan los valores del IPCC con lo que ocurre en la bahía de Valparaíso, es posible inferir que estos son consecuentes, estimándose que para los años 2030 y 2050 existirá un aumento de 0,1 [m] y de 0,2 [m] respectivamente (Figura 14).

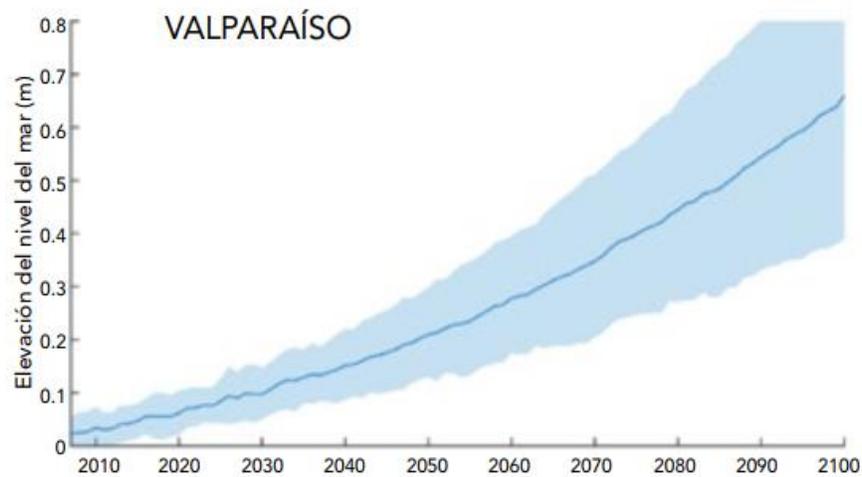


Figura 14: Esquema que proyecta un aumento progresivo del nivel del mar en las costas de Valparaíso hasta el año 2100, tomando en cuenta 21 modelos climatológicos globales (Winckler et.al. 2019).

Por otro lado, en cuanto al aumento en la frecuencia de ocurrencia de eventos de clima extremo debido al cambio climático, es preciso señalar que, según los estudios realizados por Martínez et. al. (2018) en la zona central del país, señalan que desde el año 1958 hasta el 2015 se observaron 20 eventos anuales de clima extremo frente a las costas de Valparaíso (Figura 15), infiriendo que la frecuencia de ocurrencia de estos eventos podría deberse al cambio climático.

Así mismo, Winckler et.al. (2019) presentaron un estudio en el que concluyen que las marejadas serán más intensas y que ocurrirán con una mayor frecuencia, proyectadas para un periodo entre 2026 – 2045. Esto tendrá un impacto directo en las estructuras que ya se encuentran emplazadas en la costa, así como en la capacidad de arrastre de sedimentos hacia la playa.

Por lo tanto, ambos estudios concuerdan en que existe una marcada tendencia en relación al aumento en la frecuencia de ocurrencia de eventos de clima extremo o de alta energía.

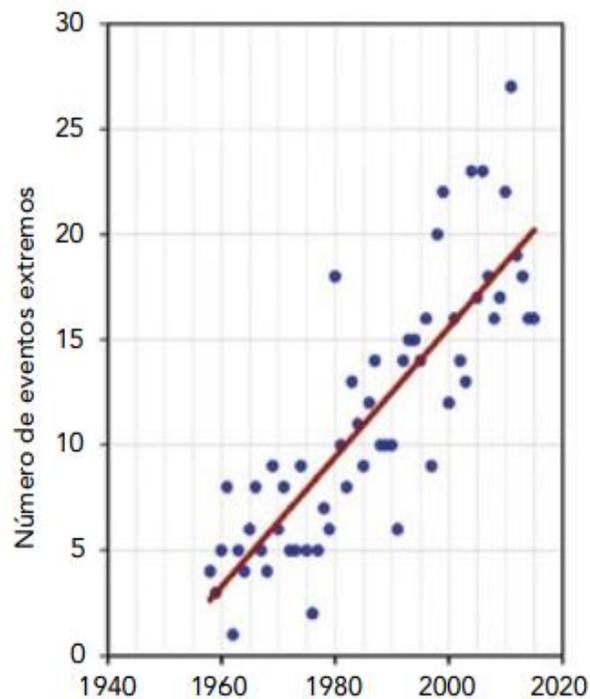


Figura 15: Esquema que señala el número de eventos extremos anuales de oleaje, considerando estadísticas de oleaje entre el año 1958 hasta el 2015 frente a las costas de Valparaíso (Martínez, et.al., 2018).

Ahora, uno de los impactos que podría generar estos eventos por el cambio climático, se encuentra la erosión costera. Estos condicionan la disponibilidad de sedimentos que son transportados hacia la costa y que permiten recargar las playas.

No obstante, Winckler et.al. (2019) consideran que los eventos de alta energía provocan un notorio desgaste de las playas, acentuada aún más cuando se rigidiza el borde costero con distintas obras civiles (i.e. Avenida Perú, Playa Miramar en Viña del Mar). Por lo tanto, esto genera un riesgo potencial en el desarrollo de las actividades humanas en las zonas costeras, ya que se ha inhibido la recarga de las playas.

De hecho, también realizaron un estudio donde señalan que casi el 80% de las playas a nivel nacional (desde la Región de Antofagasta a la Región del Bío Bío) presentan una erosión moderada y alta (entre los  $-0,5$  a  $-1,5$  [m/año] y sobre los  $-1,5$  [m/año], respectivamente), considerando un espectro temporal de 30 años.

Dentro de este estudio, se visualiza la evolución morfodinámica de la playa Concón (desembocadura del río Aconcagua), donde se ha evidenciado que existe un alto retroceso de la línea de costa tendiente a sobrepasar los  $-1,5$  [m/año] en algunos puntos señalados (Figura 16).

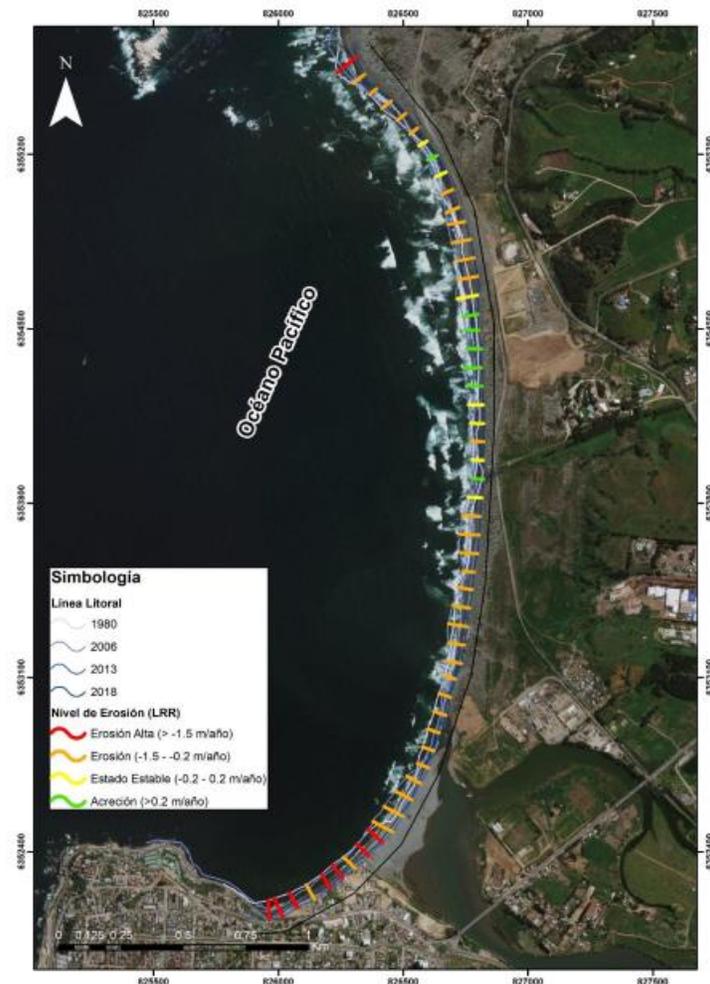


Figura 16: Cambios morfológicos que presenta la Playa de Concón, basado en el estudio del perfil de playa entre 1980 hasta 2018 (Winckler et.al., 2019).

Sin embargo, este estudio atribuye que dicha erosión se debe principalmente a los efectos generados en la costa ante variaciones del oleaje incidente vinculados al cambio climático, sin considerar los posibles aportes fluviales de sedimentos. Por lo tanto, en base al balance sedimentológico presentado anteriormente (Figura 10), se deberá tener en cuenta, dentro de las entradas, la estimación del aporte sedimentario del río Aconcagua bajo una condición de sequía, y así poder desagregar los efectos climáticos sobre la erosión costera.

### 2.5.3 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RÍO ACONCAGUA

Como bien se mencionó, debido a la ocurrencia de ciertos fenómenos atmosféricos como también por razones antropogénicas, puede explicarse la disminución de las precipitaciones y la extensión de la sequía en la zona central del país.

Según lo que explica González (2016), dentro de los años 2013 y 2014, los caudales de los ríos Choapa, Aconcagua, Maipo y Maule han disminuido entre un 20% a un 50% en comparación con el caudal promedio en dichos periodos, estimándose que un 25% de esta reducción de precipitaciones se debe a razones antropogénicas observadas desde el año 2010. De hecho, Garreaud, et.al. (2019) coinciden con González (2016) señalando que en la zona central del país existe una disminución del 20 al 40% desde el 2010, en comparación con otras sequías desde 1950.

De la misma forma, Martínez, et.al. (2012), realizan un estudio en el que analizan los caudales de distintas estaciones fluviométricas que forman parte de la cuenca del río Aconcagua, estableciendo una relación entre los eventos del ENSO con la variabilidad de caudales entre los años 1950 y 2000. Además, se toma en cuenta que el régimen de escurrimiento del río Aconcagua es de régimen mixto (nivo - pluvial), por lo que, en la parte alta o aguas arriba del río, sus aportes provienen principalmente del deshielo durante los periodos estivales (i.e. entre los meses de septiembre a enero) y, en sectores medios del río, el régimen dominante es nivo – pluvial. No obstante, para el caso de la parte baja (aguas abajo), el régimen es principalmente pluvial. También, se considera que su escorrentía se encuentra condicionada por fuertes pendientes y marcadas diferencias altimétricas hasta desembocar en la playa de Concón.

Dentro de los resultados que entrega dicho estudio concluyen que entre los años 1981 y 1990 se registró el mayor caudal en la cuenca del Aconcagua. Por otro lado, entre los años 1961 – 1970 se registró el menor caudal, en la que los valores obtenidos fueron menores al promedio anual histórico. Adicionalmente, el estudio destaca que el 50% de las estaciones fluviométricas analizadas (8 en total) presentaron un déficit hídrico y el 50% restante un leve superávit (Figura 17). Sin embargo, dentro de las estaciones con déficit y de acuerdo a su promedio histórico, se evidencia que existe un mayor déficit en las estaciones de río Blanco y río Colorado, presentando un 11,3% y 6% respectivamente.

Estos resultados pueden relacionarse con la influencia del ENSO en la cuenca del Aconcagua, obteniéndose, por ejemplo, caudales mínimos mensuales asociados a la fase fría del ENSO (“La Niña”) y caudales máximos mensuales asociados a la fase cálida del ENSO (“El Niño”). Por lo tanto, es posible inferir que dicha cuenca es altamente sensible cuando se presentan eventos tipo ENSO (Martínez, et.al., 2012), por lo que, la falta de precipitaciones condiciona la disponibilidad del recurso hídrico en el río, principalmente en sectores donde domina un régimen pluvial.

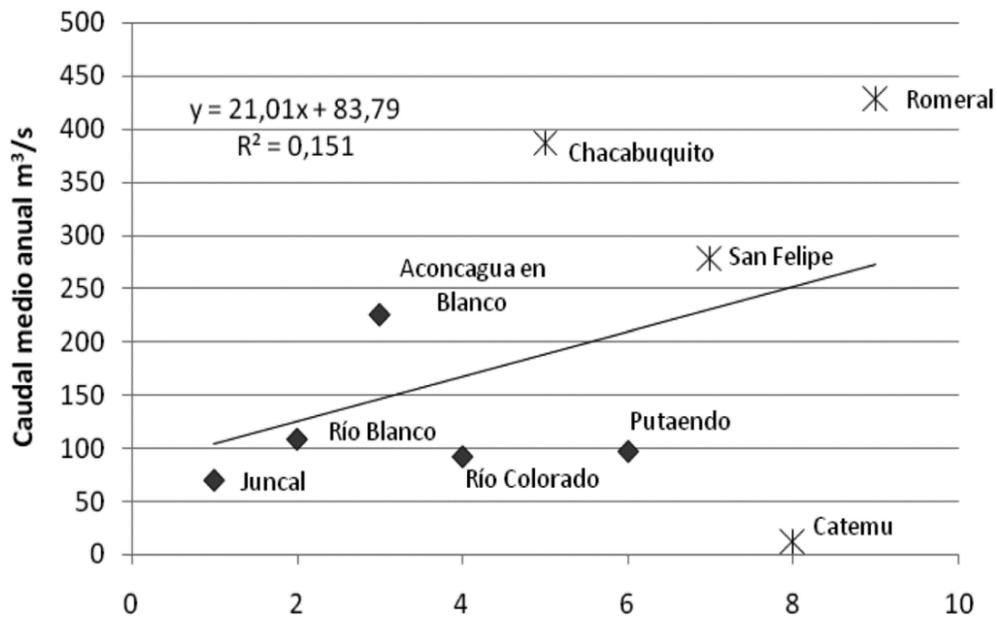


Figura 17: Curva de tendencia para los caudales medios anuales de la cuenca del río Aconcagua, donde los rombos muestran las estaciones con déficit y los asteriscos las estaciones que presentan un leve superávit (Martínez, et.al., 2012).

Ahora bien, relacionando la falta de precipitaciones en la cuenca con lo indicado en la Figura 10 (Balance Sedimentológico), las playas se pueden nutrir de los sedimentos transportados por algún río aledaño proveniente de un sistema cuenca - desembocadura, por lo que el aporte fluvial puede condicionar y participar en la evolución morfológica de la costa. Esta afirmación está relacionada con los resultados del estudio de Morales, et.al. (2020) y de Martínez y Cortez (2007), puesto que, en cada uno de los casos analizados (playa y estuario respectivamente), identifican que los sedimentos presentes en la playa y ante playa se distribuyen en rangos texturales entre arenas muy finas y medias. Además, Morales, et.al. (2020) mencionan que las playas con tamaños de sedimentos finos pueden experimentar mayores retrocesos de su línea de costa o erosión, tal como se ve en la Figura 16.

Por lo tanto, de acuerdo a lo anterior y en base al estudio elaborado por Winckler et.al. (2019), se infiere que la erosión de la playa pudo deberse también a la disminución de la disponibilidad del recurso hídrico en el río Aconcagua.

### 3 METODOLOGÍA

Dentro de los elementos que conforman la metodología y que son necesarios para cumplir los objetivos planteados, se encuentran; la recopilación y análisis de antecedentes, calibración y validación del modelo, definición de escenarios (periodo “húmedo”, “en sequía” y en “sequía proyectada”) y la modelación numérica de cada uno de los casos planteados (Figura 18). Ante esto, se han asignado tareas específicas a cada uno ellos, orientadas a obtener resultados que permitan entender la hidrodinámica del sector de estudio y asociarla con aspectos morfológicos de la playa ante eventos “de sequía” y “sin sequía”.

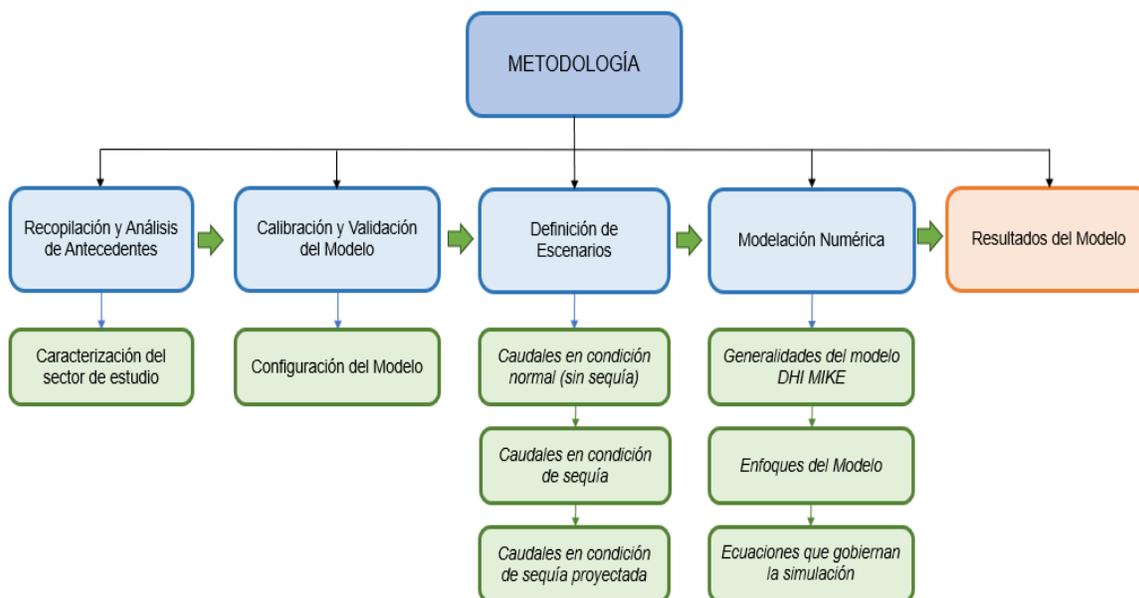


Figura 18: Diagrama de flujo en el que se describen los elementos que forman parte de la metodología (Elaboración Propia).

### 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SECTOR DE ESTUDIO

#### 3.1.1 UBICACIÓN

El lugar de estudio se encuentra ubicado en la Región de Valparaíso (~33°S) y forma parte de la cuenca hidrográfica del Aconcagua. El río Aconcagua nace en la Cordillera de los Andes, en la cual confluyen distintos afluentes que condicionan su red de drenaje (i.e. ríos Blanco y Juncal) y definen su recorrido de ~190 [km] hasta llegar a la desembocadura en la bahía de Concón (32°55' S). Además, dentro de sus cualidades, el río presenta un régimen de escurrimiento mixto (nivo – pluvial), siendo principalmente pluvial en zonas de aguas abajo y nival en zonas aguas arriba de la cuenca hidrográfica (Martínez, et.al., 2012).

Es posible distinguir y caracterizar 3 sectores del río Aconcagua, definiendo de esta forma los sectores que eventualmente serán estudiados (Figura 19):

- Sector 1 (medio oceánico): Corresponde al sector aledaño a la desembocadura del río Aconcagua, es decir, al espacio marítimo que limita con la playa de Concón y que se encuentra representada por la Bahía de Concón.
- Sector 2 (aguas abajo): Comprende al estuario formado en la desembocadura del río Aconcagua, hasta llegar a un tramo donde cambia de dirección del río (~ 45°).
- Sector 3 (aguas arriba): Corresponde a la sección del río que continua desde el cambio de dirección de aguas abajo (Sector 2). En estas aguas, colindan distintos canales aluviales provenientes de la cuenca hidrográfica del Aconcagua.



Figura 19: Vista aérea del río Aconcagua, desde el Sector 3 hasta su desembocadura en la Bahía de Concón (Elaboración Propia, Google Earth, 2021).

### 3.1.2 DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos que se utilizarán para efectuar la representación física del sector de estudio están dados en la Tabla 1. Cabe señalar que, dentro de cada forzante, se seleccionará una serie temporal anual en común para cumplir con los objetivos de la presente memoria.

Estos datos serán utilizados dentro de la modelación numérica bidimensional para estudiar el comportamiento de los sedimentos en el estuario del río Aconcagua y la influencia que podría ejercer en la playa de Concón, en el contexto de balance sedimentológico.

## Capítulo 3: Metodología

Inputs	Periodo	Fuente
Oleaje	1 de enero del 1979 al 31 de diciembre del 2017	Atlas de Oleaje UV (reconstrucción histórica)/Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) - WCRP (proyección ECOWAVES)
	1 de enero del 2026 al 31 de diciembre del 2045	
Vientos	1 de enero del 1979 al 31 de diciembre del 2017	Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) - WCRP (proyección ECOWAVES)
	1 de enero del 2026 al 31 de diciembre del 2045	
Mareas	8 de marzo al 20 de mayo del 2016	Instrumento ADCP (Proyecto CNE - ECOTECNOS S.A., SEIA)
Caudales	1 de enero del 1979 al 31 de diciembre del 2015	Balance Hídrico Nacional - DGA (reconstrucción histórica Modelo VIC)/Proyecciones climáticas históricas GCM's (Global Climate Models)
	1 de enero del 1979 al 31 de diciembre del 2060	

Tabla 1: Información disponible para la caracterización del sector de estudio (Elaboración Propia).

### 3.1.3 CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO OCEÁNICO (BAHÍA DE CONCÓN)

Se caracterizará el sector de estudio (Sector 1) considerando para ello los siguientes aspectos:

- Información del oleaje:** según lo señalado en la Tabla 1, se utilizarán las reconstrucciones históricas (hindcast) simuladas dentro de la base de datos del Atlas de Oleaje UV (ERA 5, modelo WAVEWATCH 3). Esta simulación entregará datos históricos de oleaje (parámetros de resumen) y vientos a contar del 1 de enero del 1979 hasta el 31 de diciembre del 2017. Por otro lado, las proyecciones de oleaje para el año 2026 hasta el año 2045 serán obtenidas tras la simulación de un escenario de cambio climático desfavorable según RCP 8.5 (IPCC, 2013) en el CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) del WCRP (Word Climate Research Programme). Por lo tanto, se obtendrán condiciones proyectadas de oleaje y vientos en base a un GCM definido (Global Climate Model).<sup>3</sup>
- Información de los sedimentos:** el año 2015 se realizó una caracterización de los sedimentos que se encuentran en la bahía de Concón, los cuales fueron extraídos durante la campaña de otoño de ese año. Este muestreo de sedimentos fue efectuado por la empresa ECOTECNOS S.A. para el proyecto Central Nueva Era (CNE) de ENAP (SEIA, 2015). Según la Figura 20, se visualizan cada una de las campañas en la bahía de Concón, las cuales van desde M1 a M10.

<sup>3</sup> Cabe señalar que esta simulación será realizada por ECOTECNOS S.A. de acuerdo al desarrollo de su base de datos denominada ECOWAVES.



Figura 20: Información levantada para el proyecto CNE, por la empresa ECOTECNOS S.A. (SEIA, 2015).

Cada una de las muestras fueron clasificadas por la empresa para distintos tamices (Tabla 2).

Muestra	Tamiz (mm)/Phi							
	4	8	16	30	50	100	200	>200
M1	0,00	0,15	0,50	0,80	1,00	16,79	63,66	17,10
M2	0,00	0,03	0,45	0,79	1,09	20,20	0,35	77,09
M3	0,00	0,08	0,49	0,75	0,96	12,10	1,21	84,41
M4	0,00	0,18	0,52	0,74	0,96	14,03	12,10	71,47
M5	0,00	0,07	0,75	0,88	1,03	28,41	53,78	15,08
M6	0,00	0,16	0,39	0,61	1,03	24,92	11,51	61,38
M7	0,00	0,20	0,62	0,81	1,10	35,80	37,20	24,27
M8	0,00	0,28	0,48	0,84	1,48	32,27	2,90	61,75
M9	0,00	0,04	0,74	1,12	1,28	39,83	56,71	0,28
M10	0,00	0,44	0,72	0,77	0,84	19,46	10,41	67,36

Tabla 2: Muestreo y clasificación de los sedimentos por tamaños (Elaboración Propia según base de datos Proyecto CNE, SEIA 2015).

Por lo tanto, con esta información, se espera obtener un diámetro característico del medio oceánico (a través de un Análisis Granulométrico) y usarlo para la estimación

de la capacidad potencial de sedimentos transportados longitudinalmente en la costa (TLS, formulación de Queens).

### 3.1.4 CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FLUVIAL (RÍO ACONCAGUA)

Dentro de los sectores identificados para la caracterización (Sectores 2 y 3) es posible señalar:

- **Información de caudales:** tal como se menciona en la Tabla 1, la fuente de los datos de los caudales corresponde a los proporcionados por la DGA (Dirección General de Aguas) mediante el Balance Hídrico Nacional, desarrollados por la Universidad de Chile.

Dentro de este balance hídrico se efectuará una reconstrucción histórica de los caudales a contar del año 1979 al 2015 usando un modelo hidrológico VIC. De manera similar, se hará una proyección histórica y futura a contar del año 1979 al 2060, usando proyecciones climáticas globales o GCM's (Global Climate Models). Es preciso señalar que ambas estimaciones de caudales consideran la influencia del cambio climático en la zona central del país.

- **Información de los sedimentos:** los sedimentos del río corresponden a arenas de limo arcillosa, limo arcilloso, arena limosa y limo arenoso (Figura 21). Se estima que estos varían dependiendo de los efectos de la corriente sobre el río, es decir, a una mayor profundidad las corrientes son más bajas, por lo que arenas de mayor peso permanecen en el fondo (i.e. arena limosa, arenas de limo arcillosa). En cuanto a los sedimentos presentes en la playa, tomando en cuenta el estudio de Martínez y Cortez (2007), se observa que los rangos texturales de los sedimentos encontrados entre la zona de rompiente y anteplaya del estuario van de arenas muy finas a arenas medias, considerando tamaños que oscilan desde los 0,178 [m] y 0,218 [mm] respectivamente.

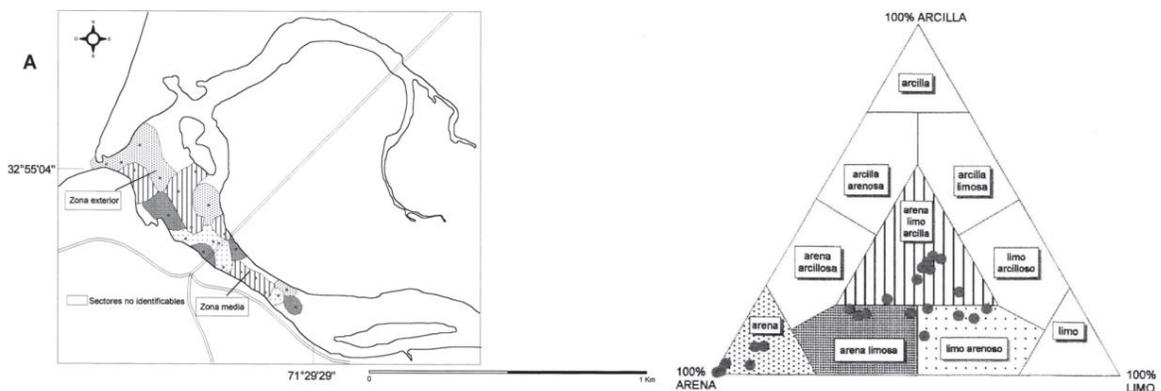


Figura 21: Caracterización textural de los sedimentos presentes en el estuario del río Aconcagua (Martínez y Cortez, 2007).

Cabe mencionar que, según la Figura 21, la información será usada para definir el diámetro característico dominante encontrado en el estuario del río Aconcagua. Este diámetro se considerará para estimación del transporte de sedimentos desde el medio fluvial hacia la costa, tomando en cuenta la clasificación de suelos basada en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS, sigla en inglés).

## **3.2 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO**

### **3.2.1 CONFIGURACIÓN DEL MODELO**

Para llevar a cabo la calibración y validación del modelo, la modelación generada por el programa deberá ser representativa con las mediciones instrumentales (ADCP), de manera que el comportamiento hidrodinámico de la zona de estudio se vea reflejado en los resultados numéricos. Por lo tanto, se deberá configurar el modelo en MIKE 21/3 para cumplir los objetivos deseados.

#### **3.2.1.1 Construcción del dominio numérico (grilla)**

Para realizar la configuración del modelo, en primer lugar, se definirá el dominio del sector de estudio, tomando en cuenta las cartas náuticas digitales del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). Adicionalmente, se utilizarán las batimetrías del estuario del río Aconcagua, a modo de considerar las condiciones de borde asociadas al dominio definido y a las salidas (outputs) que entrega el modelo numérico. Estas últimas batimetrías forman parte de la base de datos usadas para el proyecto CNE (SEIA, 2015).

#### **3.2.1.2 Obtención de las funciones de transferencia**

A través de DHI MIKE 21 SW (Spectral Wave) será posible obtener los espectros de frecuencia y direcciones, los cuales servirán para determinar las funciones de transferencia hacia el punto donde se encuentra ubicado el dispositivo ADCP (proyecto CNE, SEIA, 2015), tal como se muestra en la Figura 22:

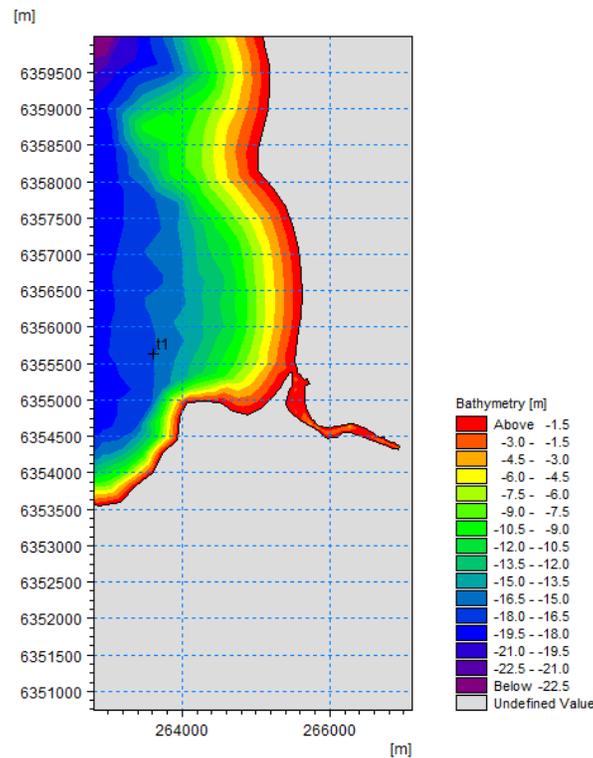


Figura 22: Punto ADCP ( $t_1$ ) seleccionado en la bahía de Concón (en UTM) para obtener las funciones de transferencia del oleaje hacia aguas someras (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).

Con la función de transferencia al punto ADCP (E: 263615 m. E., N: 6355625 m. S.), se obtendrá una data temporal de 38 años (a contar del año 1979) del Atlas de Oleaje de la Universidad de Valparaíso. Esta información (parámetros de resumen) serán comparadas con los parámetros obtenidos de las mediciones en terreno (dispositivo ADCP) para los periodos definidos en la calibración y validación.

Por ende, se construirán curvas de series de tiempo donde se comparen los parámetros de resumen respectivos (altura significativa  $H_s$  [m], periodo peak  $T_p$  [s] y dirección peak de oleaje [°]) para analizar y saber si los resultados del modelo (SW – Atlas de Oleaje UV) se ajustan a las mediciones.

Si el resultado de la comparación para cada periodo es la adecuada, es decir, cuando se obtenga una buena correlación entre los datos, se usará esta información de oleaje como parámetro de entrada o input para la modelación hidrodinámica en MIKE 21/3 FM.

### 3.2.2 COMPARACIÓN DE PARÁMETROS SIMULADOS Y MEDICIONES

#### 3.2.2.1 Información requerida para calibración del modelo

Para este caso, se utilizarán los resultados de las mediciones registradas “in situ” por un instrumento ADCP de la empresa ECOTECNOS S.A. Los datos extraídos fueron utilizados para el proyecto CNE (SEIA, 2015). La información necesaria para efectuar la calibración del modelo se encuentra en la Tabla 3.

Tipo de Medición	Periodo de Medición (Otoño)	Ubicación (WGS 84)
Oleaje	14 de mayo al 24 de junio del 2015	Estación ADCP 263615 E - 6355625 N
Vientos	13 de mayo al 25 de junio del 2015	Estación Meteorológica
Mareas	14 de mayo al 24 de junio del 2015	Estación ADCP 263615 E - 6355625 N
Corrientes	14 de mayo al 24 de junio del 2015	Estación ADCP 263615 E - 6355625 N

Tabla 3: Información sobre las mediciones en terreno efectuadas para el proyecto “Central Nueva Era” (Adaptación según estudios de la empresa ECOTECNOS S.A., 2015).

Al considerar estos forzantes o inputs de entrada, junto con los tensores de radicación del oleaje bidimensional, será posible comparar las salidas del programa (outputs). La calibración se llevará a cabo comparando 3 forzantes: la altura significativa del oleaje o  $H_s$  [m], la elevación o altura superficial de la marea [m] y la magnitud de la velocidad de la corriente oceánica [m/s].

#### 3.2.2.2 Información requerida para validación del modelo

Tras realizar la calibración del modelo, se efectuará su validación considerando una data más amplia. Por ende, luego de su procesamiento, se compararán los mismos 3 forzantes usados en la calibración. La información necesaria para efectuar la calibración del modelo se encuentra en la Tabla 4.

Tipo de Medición	Periodo de Medición (Verano)	Ubicación (WGS 84)
Oleaje	8 de marzo al 20 de mayo del 2016	Estación ADCP 263615 E - 6355625 N
Vientos	1 de marzo al 31 de mayo del 2016	Estación Meteorológica
Mareas	8 de marzo al 20 de mayo del 2016	Estación ADCP 263615 E - 6355625 N
Corrientes	8 de marzo al 20 de mayo del 2016	Estación ADCP 263615 E - 6355625 N

Tabla 4: Información a utilizar para la validación del modelo, considerando registro de datos del instrumento ADCP (Adaptación según estudios de la empresa ECOTECNOS S.A., 2016).

Para la calibración y la validación del modelo se utilizará la ubicación donde fue instalado el dispositivo ADCP para el proyecto CNE del año 2015 (estación ADCP).

### 3.3 MODELACIÓN NUMÉRICA

#### 3.3.1 GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN EN DHI MIKE 21/3

El software DHI MIKE 21/3, elaborado por la Danish Hydraulic Institute (DHI) en Dinamarca, permite simular en 2D y 3D la hidrodinámica de las zonas costeras, océanos, ríos y estuarios. Sus alcances son amplios y cubren temas como, la hidráulica costera, hidráulica ambiental, oceanografía, dinámica de ondas, ríos, procesos de sedimentación y puertos (Warren y Bach, 1992). Por lo tanto, los aspectos hidrodinámicos obtenidos del modelo podrán representar los cambios morfológicos que se producen en la costa, cuyo resultado estará condicionado por la calidad de los parámetros o inputs que se incorporen al modelo (forzantes).

Ante esto, el modelo permite simular 3 componentes para un determinado sitio de interés (Figura 23):

- Aspectos hidrodinámicos (i.e. grilla – dominio, flujo helicoidal, calidad del agua, nivel del mar, oleaje, estructuras hidráulicas, inundación y sequía, evaporación).
- Transporte de sedimentos (i.e. cargas suspendidas, de fondo y cohesivas, advección – difusión).
- Batimetría (i.e. erosión y depositación, erosión de las riberas).

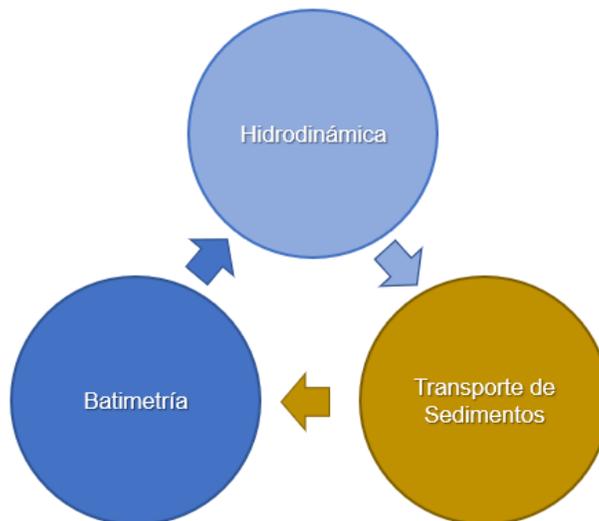


Figura 23: Componentes del Ciclo Morfológico (Elaboración Propia según DHI Webinar, 2019).

Cada uno de estos componentes son evaluados usando distintos módulos del sistema. Por ejemplo, para entender el comportamiento de los sedimentos a largo de un río, puede utilizarse el módulo MIKE 21 Sediment Transport (ST) para efectuar representaciones en 2D. De la misma forma, para representar aspectos hidrodinámicos del río, tomando en cuenta la influencia de ciertos forzantes, se utiliza MIKE 21 Flow Model (FM). Cabe señalar

que ambos módulos son complementarios entre sí, por lo que el módulo ST está directamente relacionado con la representación hidrodinámica que se efectúa en el sector.

### 3.3.2 GENERALIDADES DEL MODELO EN DHI MIKE 3 FM

El modelo MIKE 3 Flow Model (FM) puede representar el comportamiento hidrodinámico y morfológico tridimensional de un sector, obteniéndose resultados más realistas ante procesos físicos más complejos. Dentro de sus áreas de aplicación se encuentran: la oceanografía, hidrodinámica de zonas costeras y marinas; caracterizándose por utilizar mallas no estructuradas (flexible mesh).

Este modelo está compuesto por los siguientes módulos (DHI MIKE, 2021):

- Módulo para el transporte de sedimentos.
- Módulo hidrodinámico.
- Módulo de transporte.
- Módulo de seguimiento de partículas.
- Módulo para el transporte de lodos.
- Módulo ecológico, asociado a los derrames de petróleo.

El módulo hidrodinámico es la base para el funcionamiento de los otros módulos. Por ejemplo, en el caso de que se requiera simular el comportamiento de un flujo que circula por un estuario o río, el modelo permitiría calcular los cambios que ocurren en el nivel del lecho y realizar estimaciones o predicciones de procesos erosivos o de sedimentación.

El modelo está basado en la solución numérica de las ecuaciones de Navier – Stokes (RANS) para flujos incompresibles, en coordenadas cartesianas o esféricas dentro de su dominio horizontal.

También, la discretización espacial en el plano horizontal se efectúa mediante una malla no estructurada y, para el dominio vertical, se realiza mediante una discretización estructurada (DHI MIKE, 2021).

### 3.3.3 ENFOQUES DEL MODELO

El modelo está orientado en representar tanto aspectos hidrodinámicos y morfodinámicos del sector de estudio, considerando para ello los módulos 2D y 3D del programa DHI MIKE 21/3 para cada caso (Spectral Waves – SW, Flow Model – FM y Sediment Transport - ST). Los parámetros de entrada utilizados en la modelación son:

- Batimetría (cartas náuticas digitales SHOA).
- Series de tiempo (inputs: vientos, oleaje, mareas y caudales).
- Condiciones de borde (dominio definido, grilla).

Para la calibración y validación del modelo se obtendrá el campo vectorial de corrientes junto con la hidrodinámica (2D/3D) para comparar resultados simulados y referenciales

(mediciones). Posteriormente, se efectuarán simulaciones bidimensionales enfocadas a estimar el transporte de sedimentos en la playa de Concón, considerando el transporte generado en el río Aconcagua como en el medio oceánico, los cuales condicionarán los cambios morfológicos en dicho sector (Figura 24).

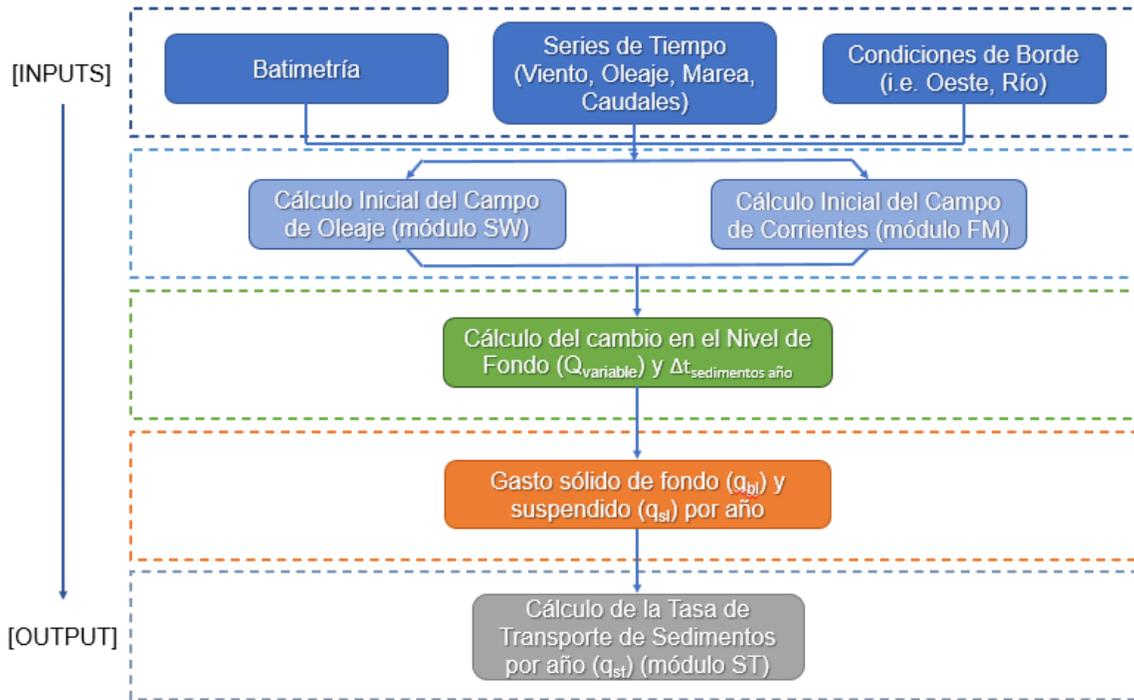


Figura 24: Diagrama de flujo que indica las etapas para la modelación hidrodinámica y el transporte de sedimentos (Elaboración Propia según Niemann et.al., 2006).

### 3.3.4 ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA SIMULACIÓN

Dentro de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento o movimiento de un fluido incompresible, aplicando la segunda ley de Newton sobre un volumen infinitesimal, se encuentra la Ecuación de Navier – Stokes (Anexo). También se proponen ecuaciones que son utilizadas para la modelación numérica.

#### 3.3.4.1 Ecuación de Exner

La ecuación de continuidad definida en el modelo MIKE 21 (módulo ST), aplicada al gasto sólido de fondo y de sedimento uniforme, está dada por la expresión bidimensional (Niño, 2005):

$$\frac{\partial z}{\partial t}(1 - n) + \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} = 0$$

Siendo,

$n$ : Porosidad del lecho (se asume una porosidad de 0,4, es decir, del 40%).

$z$ : Nivel del lecho en  $[m]$ .

$q_{bx}$ : Carga del lecho en la dirección  $x$ , en  $[m^2/s]$ .

$q_{by}$ : Carga del lecho en la dirección  $y$ , en  $[m^2/s]$ .

$\frac{\partial z}{\partial t}$ : Diferencial que entrega información sobre el estado de erosión o depositación en el lecho. Si  $\frac{\partial z}{\partial t} > 0$ , indica que el lecho se encuentra en depositación, no obstante, si  $\frac{\partial z}{\partial t} < 0$ , indica que está en erosión.

Cabe señalar que la ecuación de continuidad de Exner logra estimar la tasa de cambio o evolución del nivel del lecho, de manera que el módulo ST permite representar aspectos morfodinámicos del sector (Zavattero et.al., 2016).

### 3.3.4.2 Ecuaciones de Saint - Venant

Dentro de las ecuaciones que incorpora el modelo MIKE 21 FM se encuentra la formulación de Saint – Venant, la cual permite describir las variaciones en el flujo (caudal) y nivel de agua, representando la hidrodinámica del sector de estudio. Ante esto, según Zavattero et. al. (2016), esta formulación puede expresarse como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = w$$

*(Ecuación de Continuidad)*

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) + gp \left( \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \right) - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] + \frac{h}{\rho_w} \left( \frac{\partial p_{atm}}{\partial x} \right) = 0$$

*(Ecuación de Conservación de la Masa y Momento, componente horizontal)*

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right) + gp \left( \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \right) - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \frac{h}{\rho_w} \left( \frac{\partial p_{atm}}{\partial y} \right) = 0$$

*(Ecuación de Conservación de la Masa y Momento, componente vertical)*

Siendo,

$h$ : Profundidad del agua en  $[m]$ .

$w$ : Caudal o flujo neto de entrada en  $[m^3/s]$ .

$z$ : Elevación superficial en  $[m]$ .

$p$ : Densidad de flujo en dirección  $x$  en  $[m^2/s]$ .

$q$ : Densidad de flujo en dirección  $y$  en  $[m^2/s]$ .

$C$ : Parámetro de resistencia de Chezy  $[m^{1/2}/s]$ .

$p_{atm}$ : Presión atmosférica en  $[Pa]$ .

$\rho_w$ : Densidad del agua en  $[kg/m^3]$ .

$\tau_{xx}$ ,  $\tau_{yy}$  y  $\tau_{xy}$ : Componentes del esfuerzo de corte efectivo de fondo.

### 3.4 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

Se proponen distintos supuestos que permitirán describir y estudiar la hidrodinámica del sector de estudio, tanto del medio oceánico como del medio fluvial (río Aconcagua). Por lo tanto, para cada medio, se presentarán 3 condiciones base:

- a) Se propone una condición “normal” de oleaje, junto con una condición “normal” o “año húmedo” de río, definiéndose de esta forma por estar en un periodo previo al año 2010, cuya fecha representa el inicio de la mega sequía (Garreaud, et.al., 2019; González, 2016). Cabe señalar que, para este caso, el transporte de sedimentos hacia la costa desarrollado por el medio fluvial se encuentra condicionado por un caudal histórico que aún no ha sido afectado significativamente por el cambio climático (i.e. por la disminución de las precipitaciones en la zona central del país en estos últimos años). De la misma forma, para el caso del medio oceánico, se considera que los eventos de clima extremo no superan los 15 por año (Martínez, et.al., 2018), por lo tanto, se espera que los resultados relacionados al transporte de sedimentos puedan influir en la evolución de la línea de costa.
- b) Se propone una condición “de sequía”, en el que se han contextualizado los forzantes (i.e. vientos, mareas) dentro del periodo posterior al año 2010, es decir, condiciones inherentes de la mega sequía. Por lo tanto, bajo este punto, se utilizarán ciertas características del río (i.e. caudales) y del océano para obtener simulaciones hidrodinámicas y sedimentológicas del sector de estudio.
- c) Se proyecta la condición “de sequía” señalada en el punto b) hasta el año 2030, bajo un contexto desfavorable de precipitaciones, donde el aumento de las emisiones de gases GEI (Gases de Efecto Invernadero), debido a la acción antropogénica, incidirán en el aumento de la temperatura global del planeta y en el cambio climático, describiendo un escenario de emisiones crítico (RCP 8.5, según Quinto Informe del IPCC, 2013).

Es preciso señalar que se pretende estudiar el comportamiento hidrodinámico y sedimentológico de ambos medios para entender el balance de sedimentos que se desarrollará en el sector y que, eventualmente, se espera que condicione la playa aledaña estudiada según lo señalado por De la Peña (2007).

### 3.4.1 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Luego de haber definido los escenarios, se utilizarán los forzantes indicados en la Tabla 1, los cuales participarán en la modelación numérica en ambos medios o sectores de estudio (i.e. oleaje - océano, caudales – zona fluvial). Por lo tanto, para representar aspectos hidrodinámicos y sedimentológicos de ambos medios, se presenta la Tabla 5.

		Condiciones Anuales		
		A. Normal	A. Sequía	A. Sequía Proyectada
Sector de Estudio	Transporte de Sedimentos			
	Medio Oceánico (O)	$O_1$	$O_2$	$O_3$
	Medio Fluvial (R)	$R_1$	$R_2$	$R_3$
	Combinación Sedimentológica (C)	$C_1 = O_1 + R_1$	$C_2 = O_2 + R_2$	$C_3 = O_3 + R_3$

Tabla 5: Escenarios para cada una de las condiciones propuestas (Elaboración Propia).

Se desprende de ella ciertas las siguientes relaciones y combinaciones:

- $O_1, O_2, O_3$ : Transporte de sedimentos desarrollado en el medio oceánico (O), en condición de año “normal”, “húmedo” o “sin sequía” ( $O_1$ ), en condición de año “seco” o “de sequía” ( $O_2$ ) y en condición “proyectada de sequía” según RCP 8.5, IPCC ( $O_3$ ).
- $R_1, R_2, R_3$ : Transporte de sedimentos generado en el medio fluvial (R), en condición de año “normal”, “húmedo” o “sin sequía” ( $R_1$ ), en condición de año “seco” o “de sequía” ( $R_2$ ) y en condición “proyectada de sequía” según RCP 8.5, IPCC ( $R_3$ ).
- $C_1, C_2, C_3$ : Considera la combinación individual (anual) para cada condición (1, 2 y 3 respectivamente). Esto permitirá entender y explicar, mediante comparaciones, el transporte de sedimentos para cada caso, considerando ambos medios en el balance sedimentológico.

Luego de establecer dichas relaciones, se pretende realizar simulaciones bidimensionales en el programa DHI MIKE 21 para las combinaciones  $C_1, C_2$  y  $C_3$ , usando el módulo FM (Flow Model) y ST (Sediment Transport), incorporando series de tiempo anuales asociadas a los parámetros de resumen del oleaje junto con otros parámetros de entrada o inputs señalados en la Tabla 1 (i.e. vientos).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 BATIMETRÍA Y GRILLAS DEL MODELO

Según lo propuesto en el Capítulo 3 (Metodología), en la Figura 25 se muestra la batimetría y dominio numérico del sector de estudio que considera profundidades tanto del medio oceánico como del medio fluvial. Por lo tanto, se ha empleado para su representación el software DHI MIKE 21/3 (DHI MIKE, 2021) y distintos procedimientos (módulos) para estuarios y zonas costeras (Warren y Bach, 1992).

La grilla seleccionada permite identificar el dominio asociado al punto donde fue instalado el dispositivo ADCP (N: 6355625 m S, E: 263615 m E), la cual está frente a la desembocadura del río Aconcagua, en la bahía de Concón, y representar de manera adecuada la aproximación del oleaje hacia la costa, desde los distintos componentes direccionales que actúan típicamente en la costa chilena. Del dominio definido se puede visualizar el grado de precisión de la grilla, de manera que los elementos que se encuentran más cercanos a la costa se curvan en torno al borde costero (Land Boundary) y disminuyen su tamaño para representar con mayor densidad el comportamiento espacial de las variables simuladas, contando con una mejor interpolación de las profundidades hasta llegar al límite Oeste, identificando elementos de mayor tamaño. Por ende, la grilla numérica de la Figura 25 puede ser definida adecuadamente dependiendo de la cantidad total de nodos y elementos considerados, por lo que, para este caso, se han conformado 2430 nodos y 4325 elementos dentro del dominio.

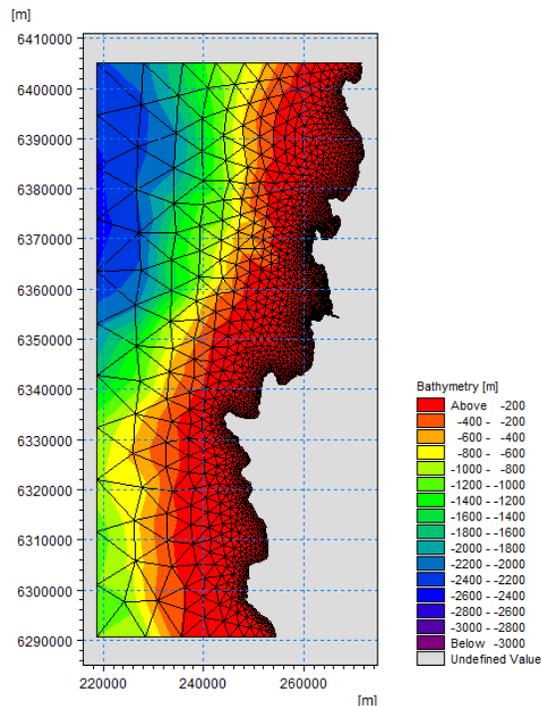


Figura 25: Descripción batimétrica del sector de estudio (Elaboración Propia a través de MIKE 21).

## 4.2 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la ejecución de ambos procesos (calibración y validación), se han definido y utilizado 3 forzantes característicos del sector de estudio, provenientes desde el Sector 1 o del medio oceánico (Capítulo 3):

- a) Mareas (Surface Elevation, [m]).
- b) Oleaje (Altura Significativa, Hs [m])
- c) Corrientes (Velocidad de las corrientes, [m/s])

Para el caso de las corrientes oceánicas, se ha utilizado una modelación en 3D (MIKE 3) en elementos flexibles (Flexible Mesh) para efectuar ambos procesos. Sin embargo, para la representación de los resultados, se empleará una simulación 2D de las corrientes (MIKE 21), presentando una integración del eje z, la cual resolverá los objetivos de la presente memoria.

### 4.2.1 PROCESO DE CALIBRACIÓN

Para el desarrollo del proceso de calibración, se han utilizado los datos registrados desde una estación ubicada frente a la playa de Concón a través de un instrumento hidroacústico ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Esta información corresponde a una serie temporal de datos definida para otoño del año 2015.

#### 4.2.1.1 Comparaciones en series de tiempo

Para cada una de las forzantes descritas, se han efectuado comparaciones entre los registros observados y simulados, por lo que se utilizarán distintos esquemas para cada uno de los casos. En ellos se describe una serie de tiempo que comienza desde el 14 de mayo hasta el 24 de junio del año 2015.

##### a) Mareas:

En la Figura 26, se presentan comparaciones mareales (elevaciones superficiales) en una serie de tiempo definida donde se tienen registros observados (medición instrumental, ADCP) y una data simulada como resultado de una modelación bidimensional usando el módulo MIKE 21 FM (Flow Model).

Cabe señalar que las mareas comparadas fueron corregidas a nivel NRS (Nivel de Reducción de Sonda), siendo incluida posteriormente en la modelación.

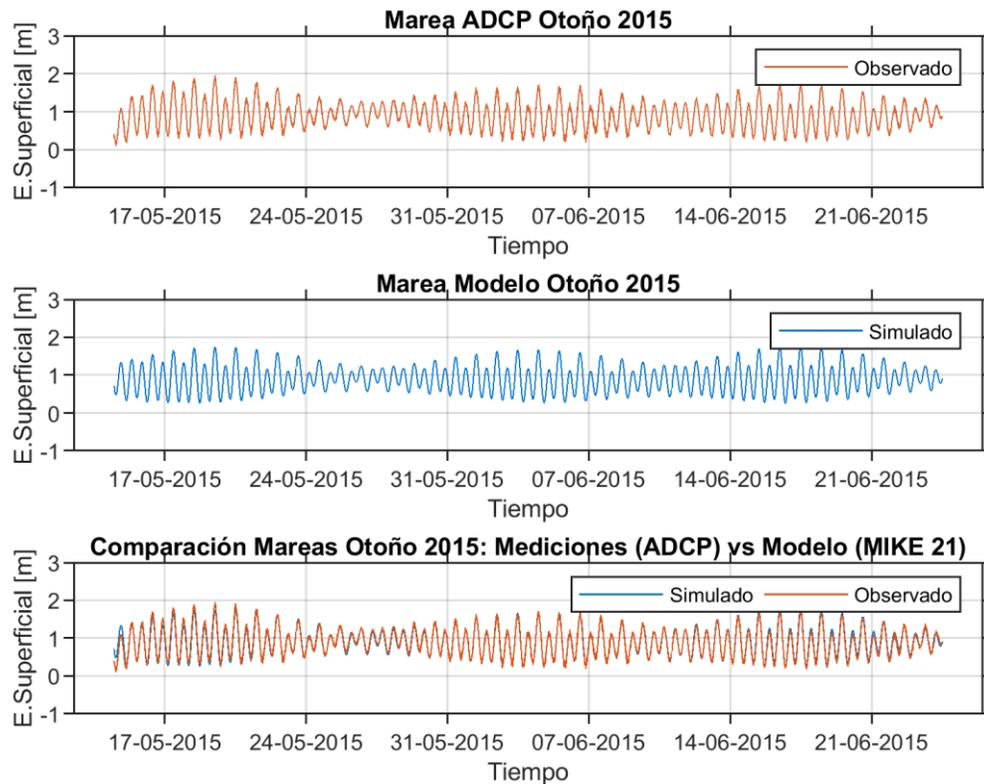


Figura 26: Comparación de las mareas observadas y simuladas para una serie de tiempo definida en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB).

Tras la comparación mareal visualizada en la Figura 26, se incluye un esquema percentil o cuantil (Figura 27) junto con la aplicación de un diagrama de Taylor (Figura 28) para contrastar los parámetros estadísticos obtenidos de la data observada (o medida) y simulada respectivamente.

Por lo tanto, de acuerdo a la comparación percentil (Figura 27), es posible apreciar que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) junto con el RMSE (Centered Root Mean Square Error) de la simulación entregan un buen ajuste, siendo de 0,99 y de 0,0745 respectivamente. De la misma forma, según el diagrama de Taylor (Figura 28), la marea modelada representa de manera adecuada a la marea medida (referencial), tomando en cuenta que la desviación estándar simulada y referencial son 0,354 y 0,361 respectivamente, y que la comparación “dato a dato” entrega un coeficiente de correlación (R) de 0,979.

Entonces, se infiere que el modelo es capaz de entregar una buena simulación de la marea, presentando una alta similitud con la marea observada.

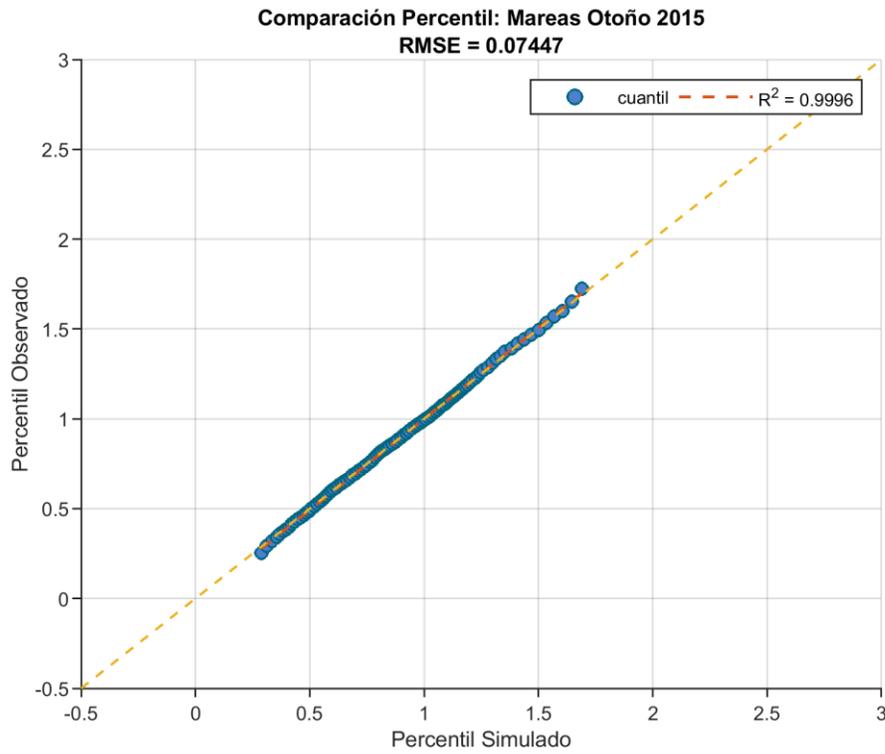


Figura 27: Comparación percentil entre las mareas observadas y simuladas para una serie de tiempo definida en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB).

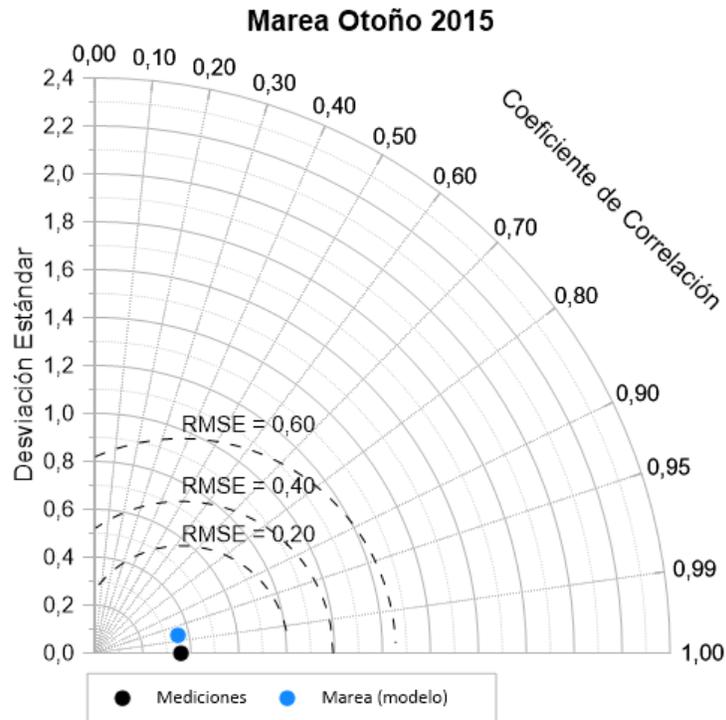


Figura 28: Diagrama de Taylor para la comparación entre mareas observadas y simuladas en otoño 2015 (Elaboración Propia).

b) Oleaje:

En la Figura 29, similar al caso mareal, se presentan comparaciones de las alturas significativas del oleaje incidente ( $H_s$  [m]). Para ello, se ha empleado el módulo MIKE 21 SW (Spectral Wave) para obtener las funciones de transferencia y su propagación al punto definido en el Capítulo 3 (Metodología), calibrando el modelo empleando una desviación estándar direccional de 30 ( $dn = 30$ ). Posteriormente, se ha obtenido los parámetros de resumen respectivos (i.e.  $H_s$  [m]) desde el Atlas de Oleaje de la Universidad de Valparaíso. Tras lo anterior, se presenta una serie de tiempo definida, comparando los registros observados (medición instrumental, ADCP) con una data simulada (Atlas de Oleaje UV) tras una modelación bidimensional usando el módulo MIKE 21 SW.

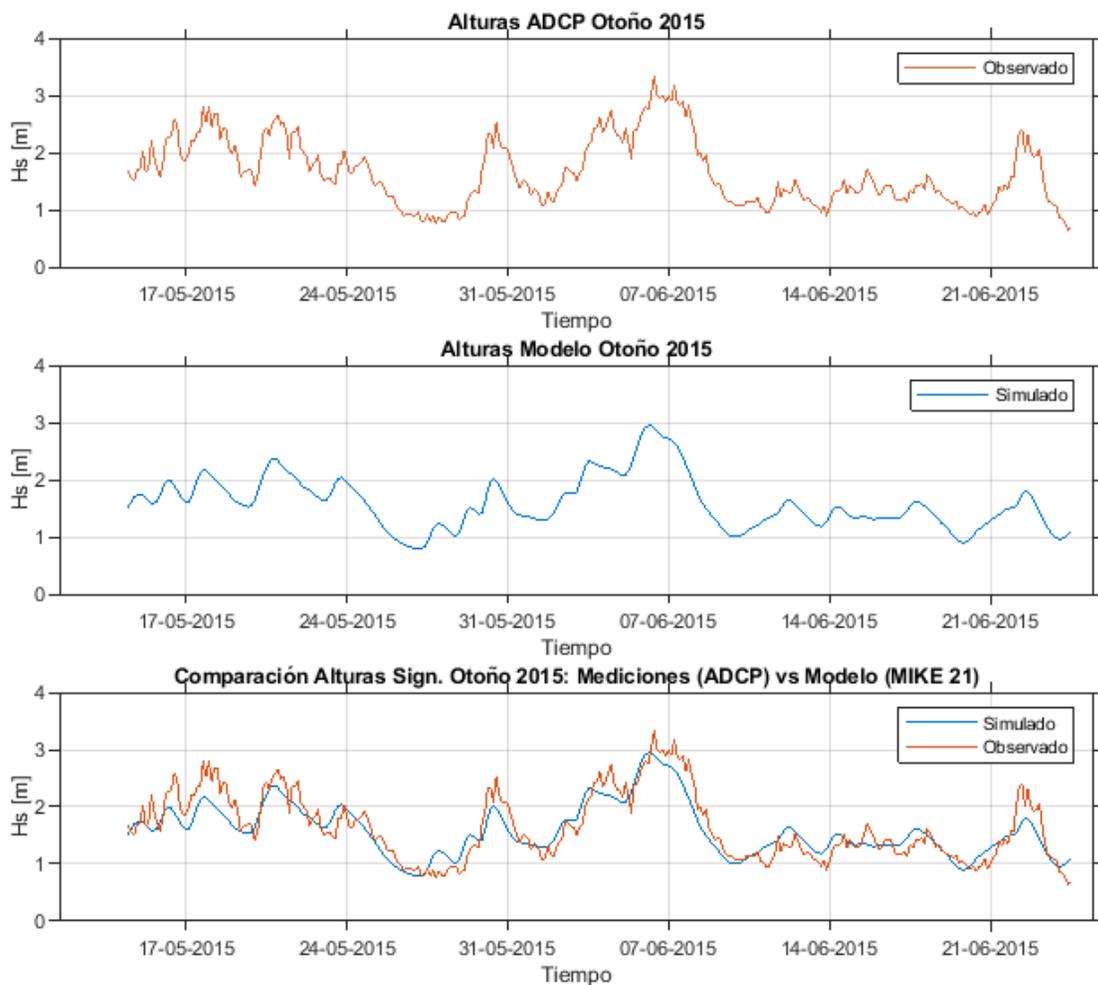


Figura 29: Comparación del oleaje observado y simulado para una serie de tiempo definida en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB).

## Capítulo 4: Resultados

De lo anterior, se incluye un esquema percentil o cuantil (Figura 30) junto con la aplicación de un diagrama de Taylor (Figura 31) para contrastar los parámetros estadísticos obtenidos de la data observada (o medida) y simulada respectivamente.

Por lo tanto, de acuerdo a la comparación percentil (Figura 30), es posible apreciar que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) junto con el RMSE (Centered Root Mean Square Error) de la simulación entregan un buen ajuste, siendo de 0,984 y de 0,2614 respectivamente. Según el diagrama de Taylor (Figura 31), el oleaje modelado se acerca al oleaje medido (referencial), tomando en cuenta que la desviación estándar simulada y referencial son 0,458 y 0,585 respectivamente, y que la comparación “dato a dato” entrega un coeficiente de correlación ( $R$ ) de 0,91.

Entonces, pese a tener un mayor RMSE y un menor coeficiente de correlación que en el caso de la marea, aun así, se infiere que el modelo es capaz de entregar una buena simulación del oleaje, presentando una similitud con el oleaje medido.

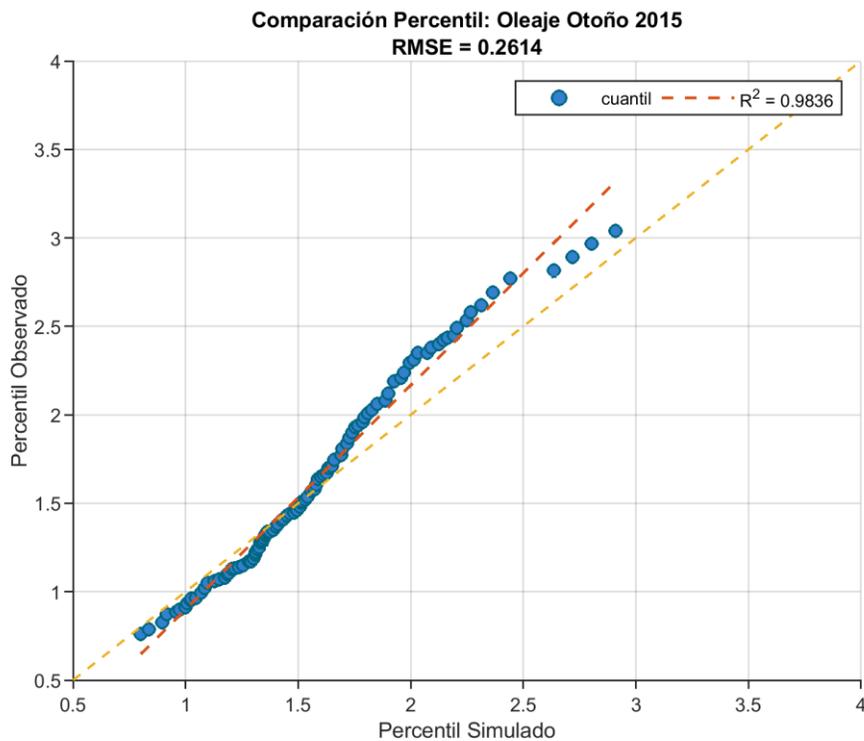


Figura 30: Comparación percentil para un oleaje observado y simulado, considerando una serie de tiempo definida en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB).

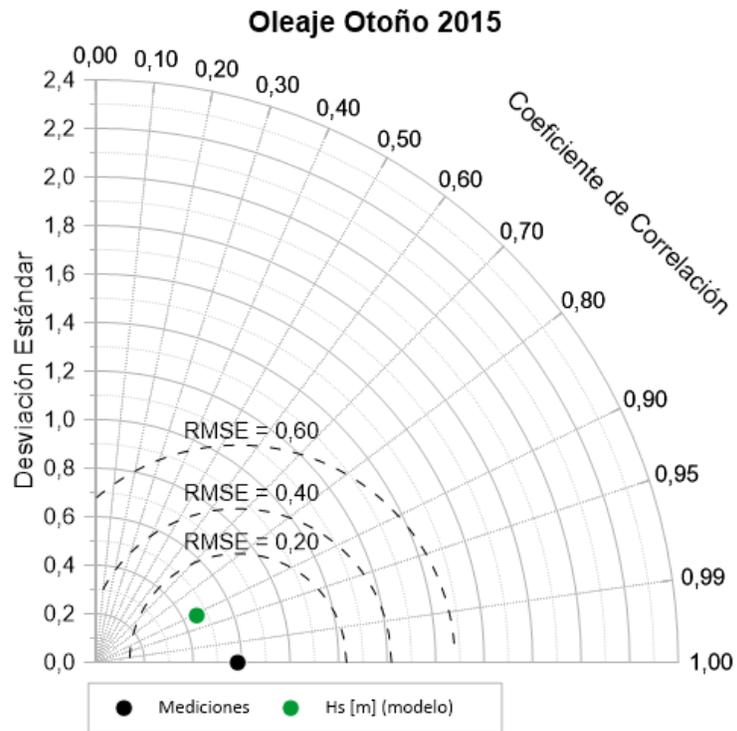


Figura 31: Diagrama de Taylor para la comparación entre el oleaje observado y simulado en otoño 2015 (Elaboración Propia).

c) Corrientes:

En la Figura 32, se presentan comparaciones entre las velocidades de las corrientes observadas y modeladas que se manifiestan en la capa más cercana a la superficie (capa superficial), es decir, aproximadamente a 20 [cm] bajo la superficie del mar.

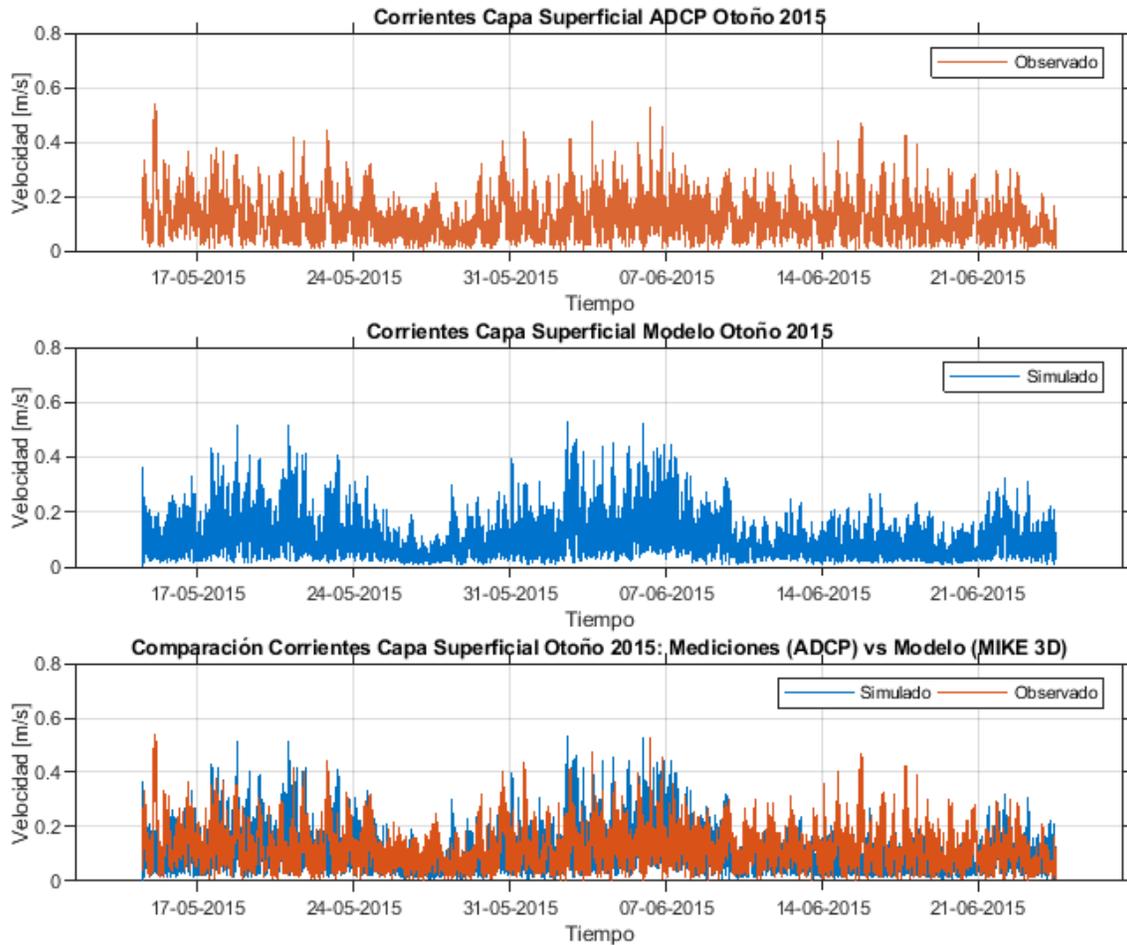


Figura 32: Comparación de velocidades entre las corrientes superficiales observadas y simuladas en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB).

Adicionalmente, se incluye un esquema percentil o cuantil (Figura 33) junto con la aplicación de un diagrama de Taylor (Figura 34) para contrastar los parámetros estadísticos obtenidos de la data observada (o medida) y simulada respectivamente.

De acuerdo a la comparación percentil (Figura 33), es posible apreciar que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) junto con el RMSE (Centered Root Mean Square Error) de la simulación entregan un buen ajuste, siendo de 0,992 y de 0,103 respectivamente. En relación al diagrama de Taylor (Figura 34), la velocidad de la corriente modelada se aproxima a la velocidad de la corriente medida (referencial), tomando en cuenta que la

## Capítulo 4: Resultados

desviación estándar simulada y referencial son 0,04 y 0,07 respectivamente, y que la comparación “dato a dato” entrega un coeficiente de correlación (R) de 0,183.

Pese a que el coeficiente de correlación es bajo (dato a dato), aun así, considerando el diagrama percentil y el de Taylor, se infiere que el modelo es capaz de representar el comportamiento estadístico de los datos observados (corrientes superficiales).

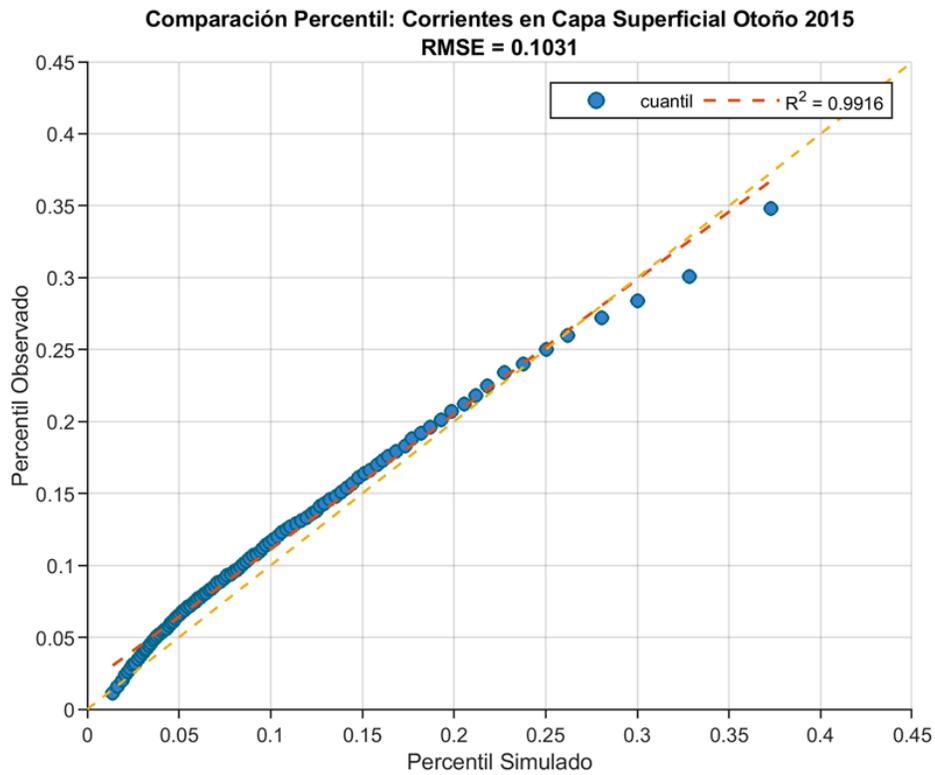


Figura 33: Comparación percentil entre las corrientes superficiales observadas y simuladas en otoño 2015 (Elaboración Propia, MATLAB).

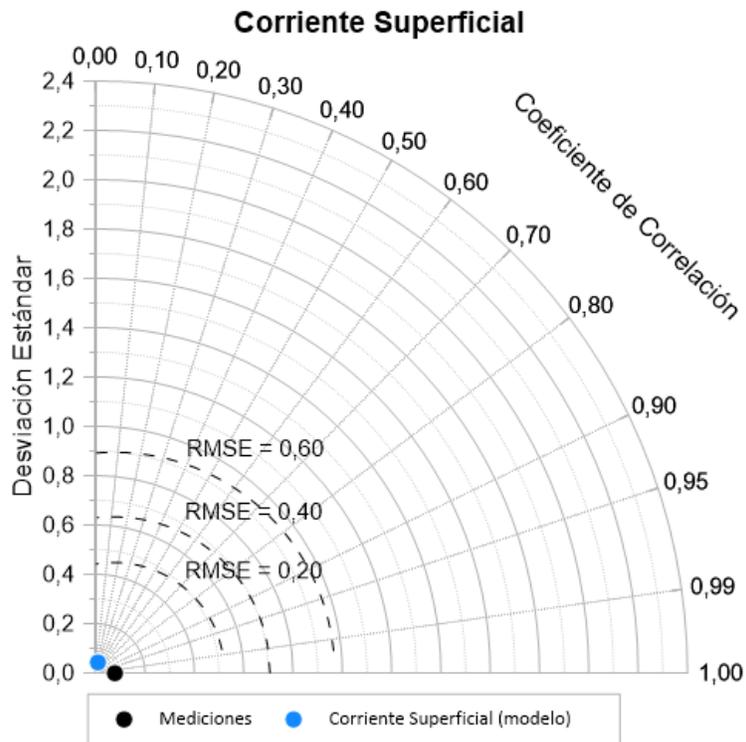


Figura 34: Diagrama de Taylor para la comparación entre las corrientes superficiales observadas y simuladas en otoño 2015 (Elaboración Propia).

#### 4.2.2 PROCESO DE VALIDACIÓN

Al igual que para el proceso de calibración, se ha seleccionado una serie temporal con una mayor cantidad de datos, cuyo desfase temporal supera los 8 meses con respecto a la data empleada para la calibración. Ante esto, la información utilizada para la validación corresponde a una serie temporal de datos definida en la estación de verano del año 2016.

##### 4.2.2.1 Comparaciones en series de tiempo

De acuerdo a lo anterior, la data utilizada para la validación y posterior comparación de los datos observados y simulados, cuenta con un registro que va desde el 8 de marzo hasta el 20 de mayo del 2016. Por lo tanto, al igual que para el caso de la calibración, a continuación, se visualizan comparaciones para el periodo seleccionado, junto con la exposición de diagramas de Taylor y percentiles para cada uno de los forzantes.

##### d) Mareas:

En la Figura 35, se presentan comparaciones mareales (elevaciones superficiales) como resultado de una modelación bidimensional usando el módulo MIKE 21 FM (Flow Model).

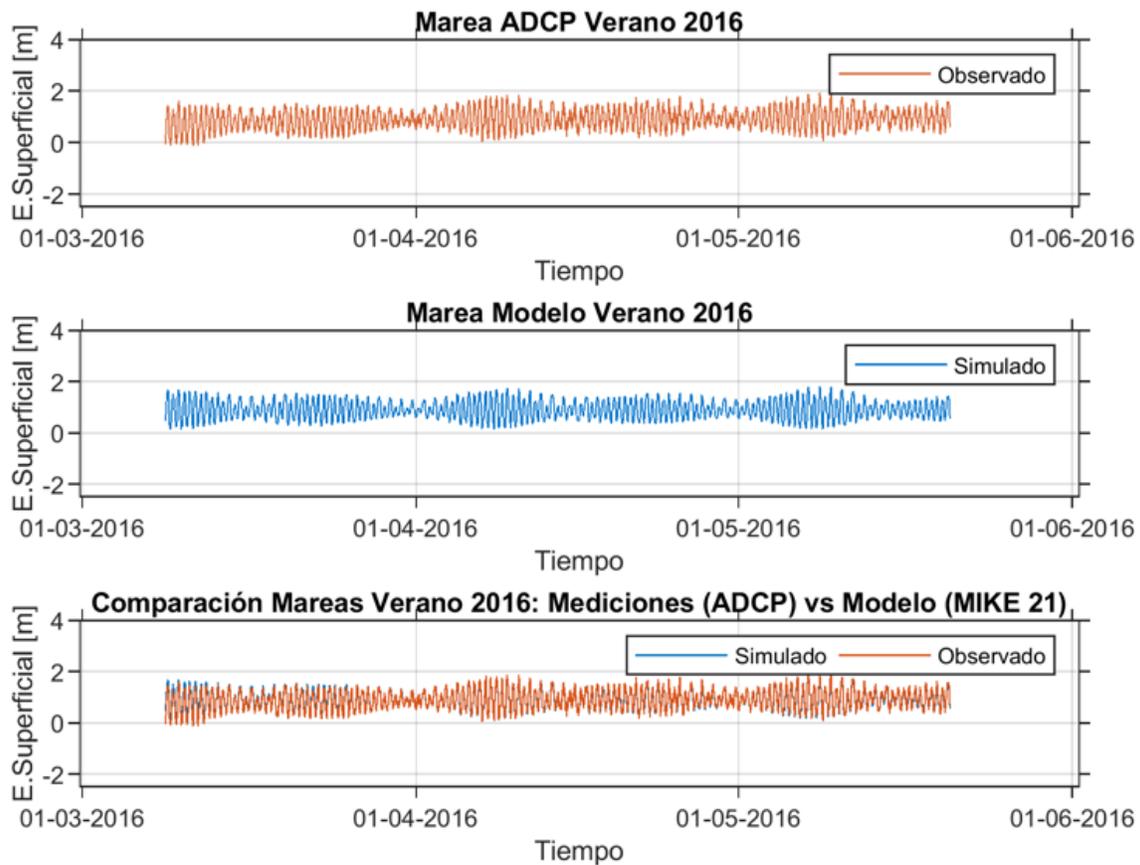


Figura 35: Comparación de las mareas observadas y simuladas para una serie de tiempo definida en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB).

Por lo tanto, de acuerdo a la comparación percentil (Figura 36), es posible apreciar que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) junto con el RMSE (Centered Root Mean Square Error) de la simulación entregan un buen ajuste, siendo de 0,998 y de 0,1078 respectivamente. De la misma forma, según el diagrama de Taylor (Figura 37), la marea modelada describe correctamente el comportamiento de la marea medida (referencial), tomando en cuenta que la desviación estándar simulada y referencial son 0,362 y 0,377 respectivamente, y que la comparación "dato a dato" entrega un coeficiente de correlación ( $R$ ) de 0,958.

Entonces, se infiere que el modelo es capaz de entregar una buena simulación de la marea, presentando una alta similitud con la marea observada.

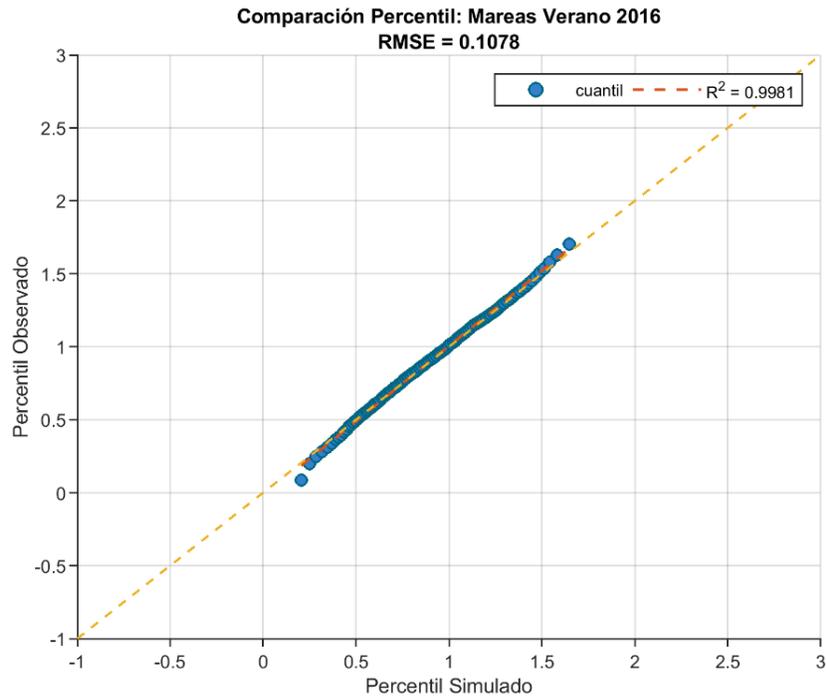


Figura 36: Comparación percentil entre las mareas observadas y simuladas en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB).

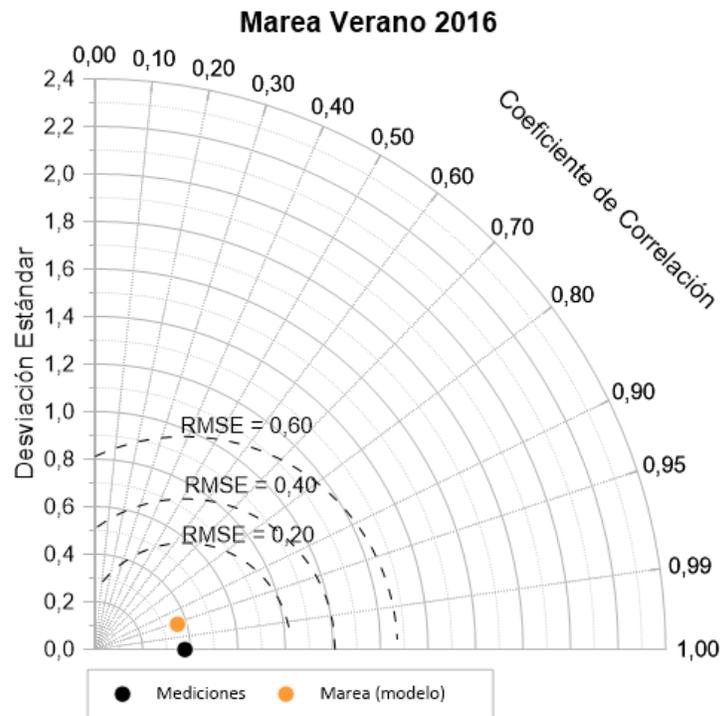


Figura 37: Diagrama de Taylor para la comparación entre mareas observadas y simuladas en verano 2016 (Elaboración Propia).

e) Oleaje:

Con respecto a la influencia hidrodinámica del oleaje en la simulación (perteneciente al Sector 1 del lugar de estudio), se presenta una comparación entre las alturas significativas del oleaje incidente (Hs [m]) observadas y simuladas (Figura 38).

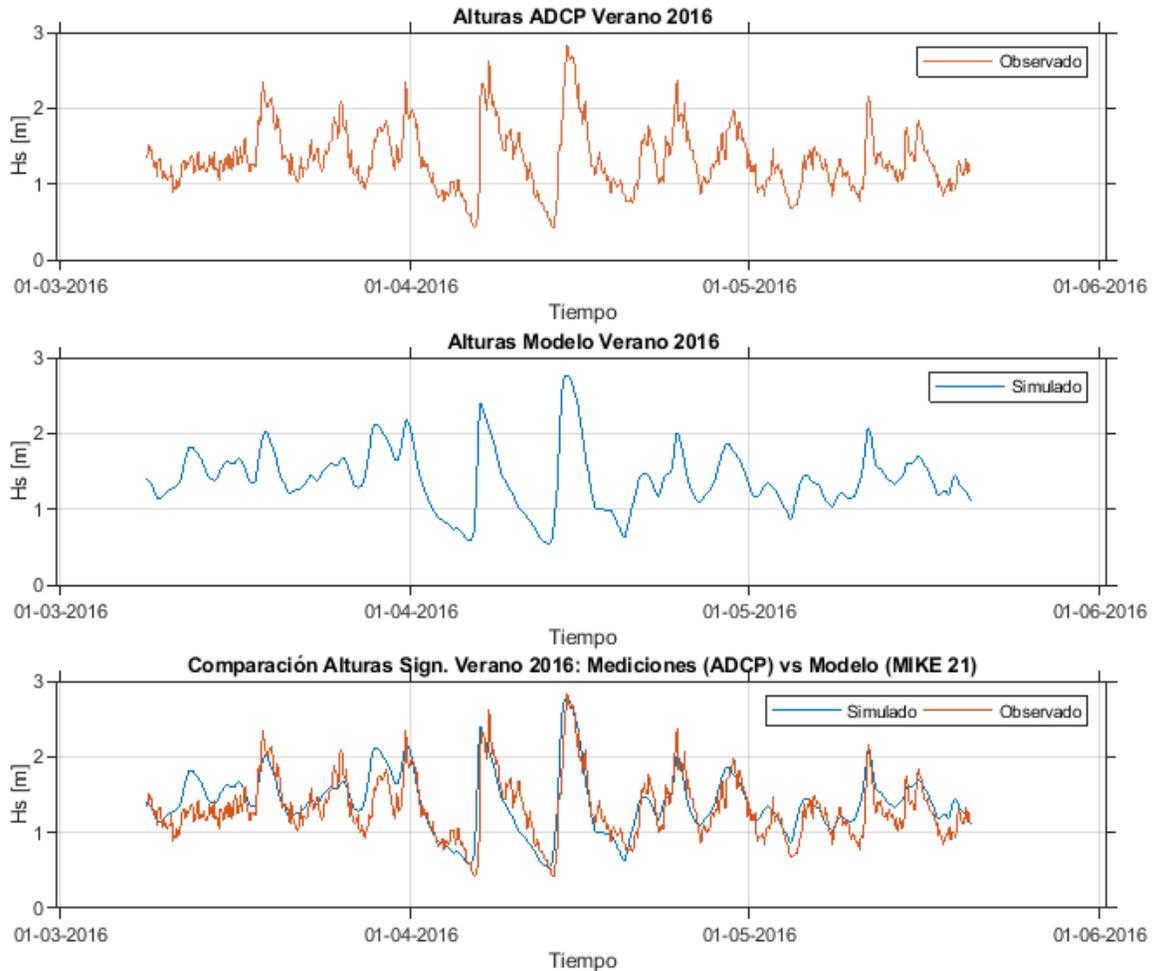


Figura 38: Comparación del oleaje observado y simulado para una serie de tiempo definida en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB).

Además, se incluye un esquema percentil o cuantil (Figura 39) junto con la aplicación de un diagrama de Taylor (Figura 40) para contrastar los parámetros estadísticos obtenidos de la data observada (o medida) y simulada respectivamente.

De acuerdo a la comparación percentil (Figura 39), es posible apreciar que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) junto con el RMSE (Centered Root Mean Square Error) de la simulación entregan un buen ajuste, siendo 0,9874 y de 0,2597 respectivamente. Según el diagrama de Taylor (Figura 40), el oleaje modelado se acerca al oleaje medido (referencial), tomando en cuenta que la desviación estándar simulada y referencial son

de 0,4 y 0,41 respectivamente, y que la comparación “dato a dato” entrega un coeficiente de correlación (R) de 0,812.

Similar a lo que ocurre con el oleaje presentado en la calibración, para este caso, considerando el RMSE y correlaciones, se infiere que el modelo es capaz de entregar una buena simulación del oleaje, presentando una similitud con el oleaje medido.

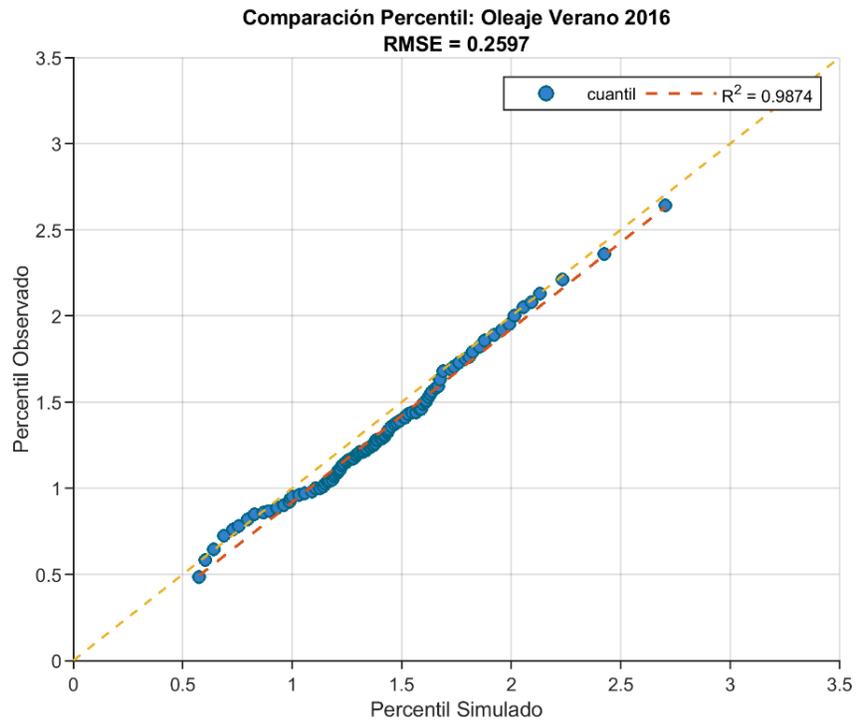


Figura 39: Comparación percentil para un oleaje observado y simulado en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB).

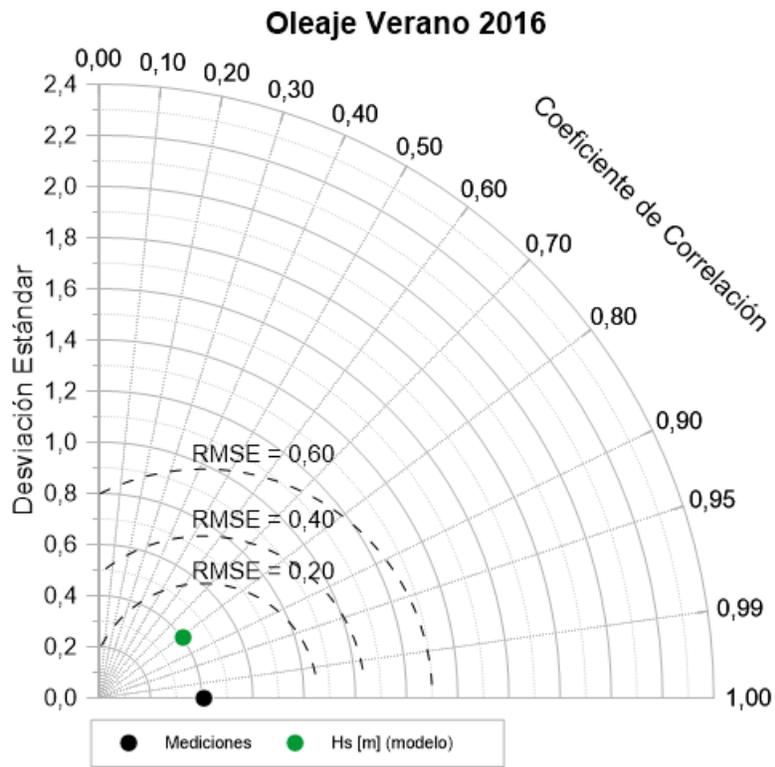


Figura 40: Diagrama de Taylor para la comparación entre un oleaje observado y simulado en verano 2016 (Elaboración Propia).

f) Corrientes:

En la Figura 41, para validar el modelo de corrientes, se presentan comparaciones entre las velocidades de las corrientes observadas y simuladas para el periodo seleccionado, tomando en cuenta la capa más cercana a la superficie (capa superficial).

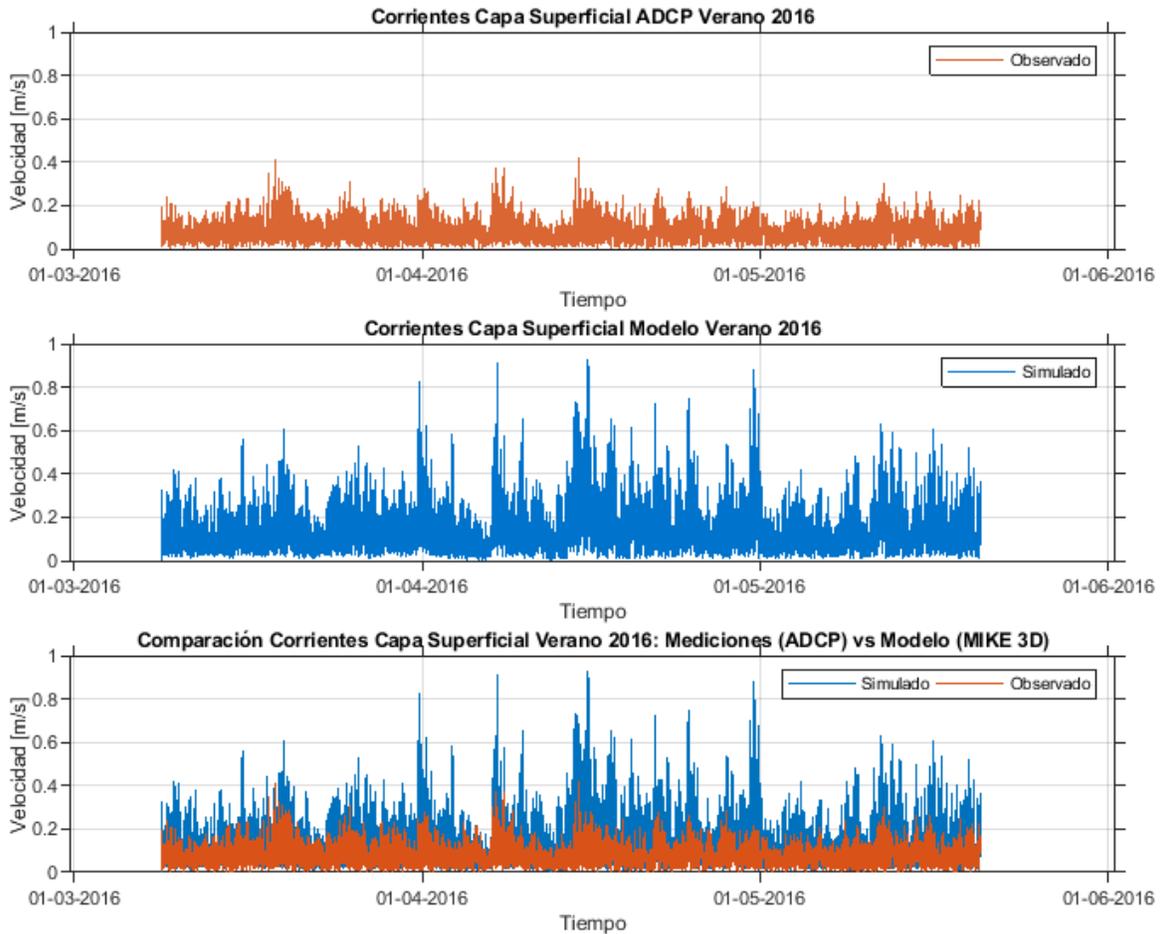


Figura 41: Comparación de velocidades entre las corrientes superficiales observadas y simuladas en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB).

Se incluye un esquema percentil o cuantil (Figura 42) junto con la aplicación de un diagrama de Taylor (Figura 43) para contrastar los parámetros estadísticos obtenidos de la data observada (o medida) y simulada respectivamente.

Según la comparación percentil (Figura 42), es posible apreciar que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) junto con el RMSE (Centered Root Mean Square Error) de la simulación entregan un buen ajuste, siendo de 0,992 y de 0,1302 respectivamente. En relación al diagrama de Taylor (Figura 43), la velocidad de la corriente modelada se aproxima a la velocidad de la corriente medida (referencial), tomando en cuenta que la desviación estándar simulada y referencial son 0,03 y 0,05 respectivamente, y que la comparación “dato a dato” entrega un coeficiente de correlación (R) de 0,187.

## Capítulo 4: Resultados

Similar al proceso de calibración de las corrientes superficiales, el coeficiente de correlación obtenido es bajo (dato a dato), aun así, considerando el diagrama percentil y el de Taylor, se infiere que el modelo es capaz de representar el comportamiento estadístico de los datos observados (de forma preliminar).

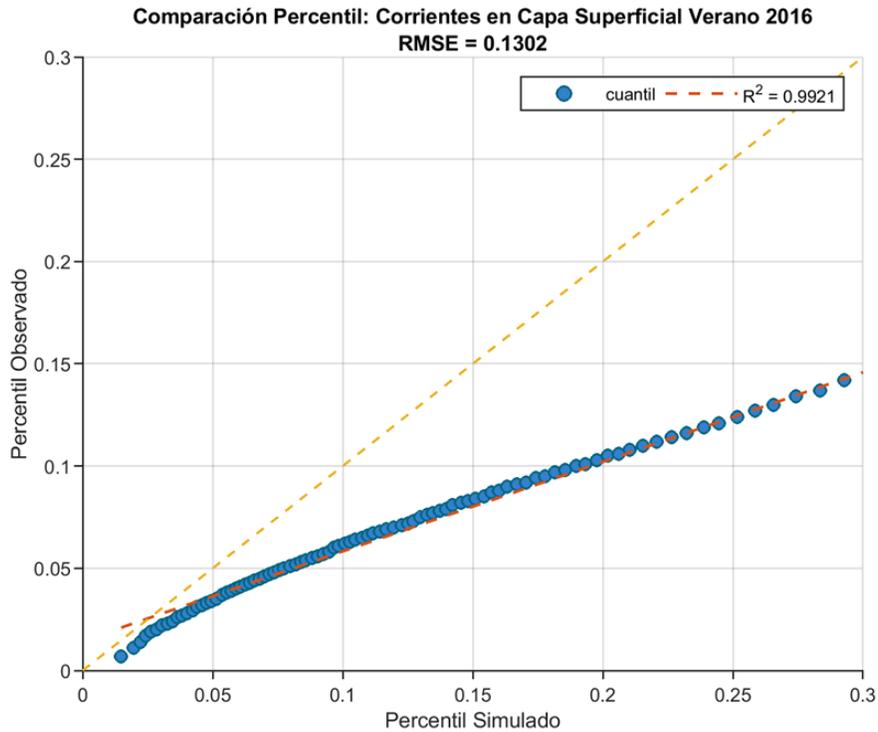


Figura 42: Comparación percentil para una corriente superficial observada y simulada en verano 2016 (Elaboración Propia, MATLAB).

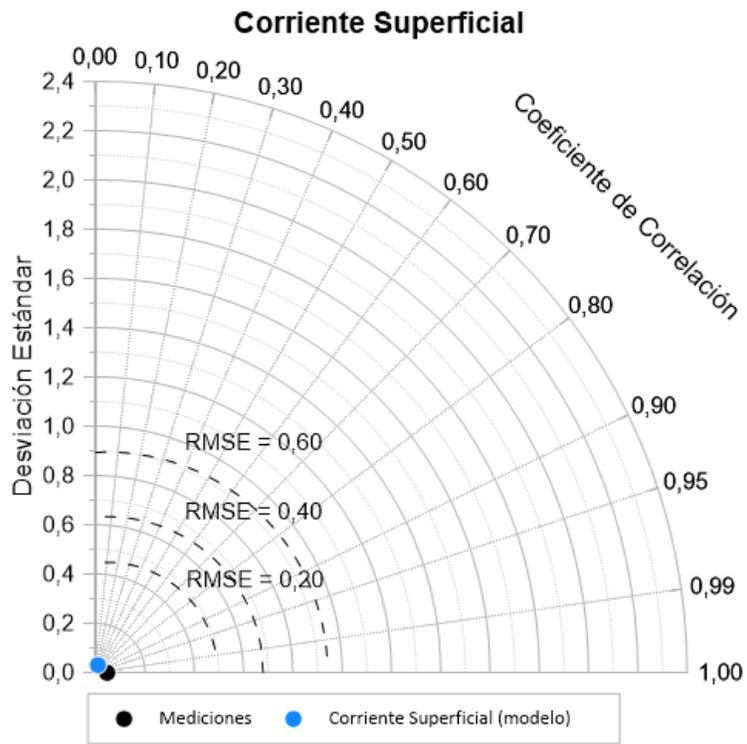


Figura 43: Diagrama de Taylor para la comparación entre la corriente superficial observada y simulada en verano 2016 (Elaboración Propia).

## 4.3 SIMULACIÓN 2D EN DHI MIKE 21

### 4.3.1 PRESENTACIÓN DE ESCENARIOS MODELADOS

Según lo indicado en el punto 3.4 de la Metodología (Capítulo 3) en relación a las 3 condiciones base, se seleccionaron los siguientes años para la simulación de escenarios:

- a) Condición “normal” o de “año húmedo”: se selecciona el año 1988 como año base para la simulación de las condiciones previas a la “megasequía”, es decir, antes del año 2010 (Garreaud, et.al., 2019; González, 2016). Por lo tanto, según la Tabla 5, se simularán escenarios en las que se estudie la combinación de ambos medios, es decir, para este caso, se entregarán resultados para la Combinación 1 (C<sub>1</sub>).
- b) Condición “de sequía”: se ha seleccionado el año 2015 como año base para la simulación de las condiciones “en sequía”, según Garreaud, et.al. (2019) y González (2016). De acuerdo a la Tabla 5, se entregarán resultados para la Combinación 2 (C<sub>2</sub>).
- c) Condición “proyectada de sequía”: se ha seleccionado el año 2030 como año base para la simulación de las condiciones proyectadas de sequía bajo un escenario climático más desfavorables, es decir, en un escenario de emisiones crítico RCP 8.5. Según la Tabla 5, se entregarán resultados simulados para la Combinación 3 (C<sub>3</sub>).

#### 4.3.1.1 Supuesto en condición “normal” o “año húmedo”

##### 4.3.1.1.1 Hidrodinámica bidimensional del medio oceánico (sin sequía)

Para caracterizar los efectos del océano bajo este caso, se ha utilizado la información del Atlas de Oleaje de la Universidad de Valparaíso para definir las condiciones de borde con el oleaje incidente desde aguas profundas. Dado que el supuesto busca generar un estado de mar previo al año 2010, se utiliza el año 1988 para obtener los tensores de oleaje simulados y los parámetros de resumen respectivos (i.e. Hs [m], Tp [s], Dirp [m]) utilizando el módulo SW (Spectral Waves) para la modelación en MIKE 21 (bidimensional).

Tras lo anterior, se han elegido 3 puntos ubicados en la bahía de Concón, donde cada uno de los parámetros de resumen respectivos indicarán cuánto ha influido el medio oceánico en el balance sedimentológico de ese año debido al Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) hacia la costa. Es importante mencionar que cada punto fue elegido considerando una profundidad mayor a 10 [m], debido a que corresponde a una zona con baja probabilidad de rompientes. Estos 3 puntos están localizados según muestra la Figura 44, cuyas coordenadas en UTM (Unidad Transversal de Mercator) son:

- Punto 1: E: 264400 m. E, N: 6355400 m. S (profundidad de ~ 11,25 [m]).
- Punto 2: E: 264600 m. E, N: 6355900 m. S (profundidad de ~ 11,54 [m]).
- Punto 3: E: 264500 m. E, N: 6356600 m. S (profundidad de ~ 12,05 [m]).



Figura 44: Vista aérea del sector de estudio, señalando los 3 puntos elegidos en la bahía de Concón (Elaboración Propia, Google Earth, 2021).

- **Caracterización de los sedimentos:**

Para la caracterización de los sedimentos presentes en la bahía de Concón, se ha efectuado un Análisis Granulométrico considerando un muestreo de sedimentos “in situ” (de M1 a M10). La razón por la cual se requiere este análisis es para obtener un diámetro característico de las muestras, cuyo valor será necesario para estimar la cantidad potencial de sedimentos transportados longitudinalmente en el medio oceánico a través de la formulación de Queens (Kamphuis 1991).

Por lo tanto, Según el Capítulo 3 (Metodología), el resultado obtenido de dicho análisis queda especificado en la Tabla 6.

		Cantidad de Muestras (oceánico o submareales)										
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	PROM
%	Tamaño	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
95	$d_{95}$	0,225	0,228	0,214	0,220	0,237	0,231	0,239	0,240	0,242	0,231	0,231
84	$d_{84}$	0,143	0,157	0,062	0,128	0,181	0,170	0,193	0,189	0,200	0,156	0,158
75	$d_{75}$	0,117	0,061	0,058	0,077	0,145	0,133	0,162	0,156	0,171	0,104	0,118
50	$d_{50}$	0,089	0,049	0,047	0,051	0,098	0,055	0,101	0,055	0,115	0,052	0,071
25	$d_{25}$	0,068	0,039	0,038	0,040	0,071	0,041	0,063	0,041	0,085	0,040	0,053
16	$d_{16}$	0,060	0,036	0,036	0,036	0,063	0,037	0,049	0,037	0,076	0,037	0,047
5	$d_5$	0,038	0,033	0,033	0,033	0,039	0,033	0,036	0,033	0,066	0,033	0,038

Tabla 6: Análisis granulométrico, donde se ha seleccionado el tamaño del grano de sedimento considerando cada una campaña de muestras “in situ” (Elaboración Propia).

## Capítulo 4: Resultados

---

De acuerdo a la tabla anterior, se ha obtenido un diámetro característico  $d_{50} = 0,071$  [mm] correspondiente a la fracción móvil que es excedido por el 50% de las muestras, es decir, un porcentaje “pasante” del 50%. Este valor resulta considerando el promedio de todos los  $d_{50}$  de las muestras. Además, tomando en cuenta el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS, sigla en inglés) y Wentworth (1922), es posible clasificar dicho diámetro como arena muy fina (0,125 [mm] a 0,062 [mm]).

Por otro lado, si se consideraran todas las muestras, el tamaño promedio obtenido varia desde arenas finas (M9) y muy finas (M1, M2, M4, M5, M6, M7, M8, M10) a limo grueso (M3), teniendo en cuenta las siguientes Curtosis (Tabla 7):

Estimaciones según Folk and Ward		
Muestra	Curtosis [K]	Clasificación
M1	1,553	Muy Leptocúrtica
M2	3,610	Extremadamente Leptocúrtica
M3	3,816	Extremadamente Leptocúrtica
M4	2,090	Muy Leptocúrtica
M5	1,090	Mesocúrtica
M6	0,891	Platicúrtica
M7	0,841	Platicúrtica
M8	0,739	Platicúrtica
M9	0,834	Platicúrtica
M10	1,278	Leptocúrtica

Tabla 7: Estimación y clasificación de la Curtosis (K) a través de Folk and Ward (1957).

- Resultados del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS):
  - Puntos 1, 2 y 3:

Tomando en cuenta las profundidades de cada uno de los puntos y ciertas características (o parámetros) del flujo, del fluido y de los sedimentos inherentes del sector (i.e. densidad del agua de mar, diámetro característico (0,071 [mm]), densidad de la partícula sólida), se presenta la Tabla 8 que señala la estimación de la capacidad potencial neta del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) en los puntos 1, 2 y 3 (QL Neto en [m<sup>3</sup>/s]) para un rango de azimuts [°], con el propósito de conocer la posición de equilibrio que debió tener la línea de costa en los puntos analizados y en el año simulado, por lo tanto, se buscará analizar e identificar los cambios de tendencia en el tiempo.

Es preciso notar que se han aplicado las 2 formulaciones descritas en el Capítulo 2 (Marco Teórico) en cada uno de los puntos.

## Capítulo 4: Resultados

Punto 1				Punto 2				Punto 3			
LST (CERC)		LTS (QUEENS, KAMPHUIS)		LST (CERC)		LTS (QUEENS, KAMPHUIS)		LST (CERC)		LTS (QUEENS, KAMPHUIS)	
Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]
11	117,25	11	19,12	11	358,28	11	44,41	11	688,84	11	75,04
10	108,36	10	18,28	10	343,27	10	43,34	10	667,98	10	73,78
9	99,31	9	17,40	9	327,79	9	42,21	9	646,22	9	72,42
8	90,14	8	16,47	8	311,87	8	41,03	8	623,59	8	70,97
7	80,84	7	15,49	7	295,53	7	39,79	7	600,12	7	69,45
6	71,43	6	14,45	6	278,79	6	38,47	6	575,84	6	67,81
5	61,93	5	13,34	5	261,67	5	37,09	5	550,78	5	66,10
4	52,34	4	12,14	4	244,21	4	35,62	4	524,98	4	64,27
3	42,68	3	10,80	3	226,41	3	34,08	3	498,48	3	62,35
2	32,96	2	9,39	2	208,30	2	32,44	2	471,30	2	60,30
1	23,19	1	7,89	1	189,92	1	30,68	1	443,49	1	58,12
0	13,40	0	6,22	0	171,28	0	28,79	0	415,08	0	55,78
-1	3,58	-1	4,19	-1	152,40	-1	26,83	-1	386,12	-1	53,36
-1,36	0,00	-2	1,71	-2	133,32	-2	24,78	-2	356,63	-2	50,82
-2	-6,24	-2,61	0,00	-3	114,06	-3	22,64	-3	326,66	-3	48,16
-3	-16,05	-3	-1,12	-4	94,65	-4	20,35	-4	296,25	-4	45,39
-4	-25,84	-4	-3,93	-5	75,10	-5	17,86	-5	265,45	-5	42,46
-5	-35,60	-5	-6,30	-6	55,46	-6	15,16	-6	234,28	-6	39,35
-6	-45,31	-6	-8,31	-7	35,73	-7	12,24	-7	202,80	-7	36,06
-7	-54,96	-7	-10,01	-8,81	0,00	-10,03	0,00	-13,30	0,00	-14,40	0,00

Tabla 8: Estimación del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) en los puntos 1, 2 y 3 (año 1988), mediante la aplicación de 2 formulaciones para conocer la posición de equilibrio (Elaboración Propia).

Según la Tabla 8, se observan distintos QL netos [m<sup>3</sup>/s] a medida que varían los azimuts [°] para los 3 puntos seleccionados dentro de la bahía de Concón. Este rango de azimuts permite determinar la tendencia de la posición de equilibrio de la línea de costa generada en un año “húmedo”.

En el Punto 1, se observa que, cuando el azimut [°] toma el valor de -1,36°, el QL neto alcanzó el valor de 0 (TLS de equilibrio en la línea de costa) utilizando la formulación de CERC. De manera similar ocurre con la formulación de Queens, ya que, para obtener ese valor neto, el azimut propuesto tuvo que ser de -2,61°. Se estima en ambos casos que la dirección del oleaje incidente propagado desde aguas profundas llegó del ~269° y del ~267° para CERC y Queens respectivamente.

En el Punto 2, es posible notar que se alcanza la condición de equilibrio (QL neto = 0) cuando se propone un azimut de -8,81° (CERC) y de -10,03° (Queens), cuyos valores son menores a los obtenidos en el Punto 1 para el mismo año. Se estima que la dirección del oleaje incidente propagado desde aguas profundas, vinculado con ambos azimuts, llegó del ~261° y del ~260° para CERC y Queens respectivamente. Además, se infiere que la capacidad potencial del transporte de sedimentos en este punto fue mayor a la capacidad obtenida en Punto 1, considerando el mismo rango de azimut.

Para el Punto 3, se observa que los azimuts de equilibrio son de -13,3° (CERC) y de -14,4° (Queens), siendo menores a los obtenidos en los puntos anteriores. Se estima que la dirección del oleaje incidente propagado desde aguas profundas al punto provino del ~257° para CERC y del ~256° para Queens. También, se muestra que la capacidad potencial transportada es “casi” el doble a los QL netos del Punto 2, tomando en cuenta que se está trabajando con los mismos azimuts.

Cabe señalar que, de acuerdo a lo señalado en el Capítulo 2 (Marco Teórico), las estimaciones realizadas por CERC tienen a sobrestimar la capacidad potencial transportada, considerando que su formulación no utiliza el diámetro caracterizó del sedimento ( $d_{50}$  [mm]) ni el periodo peak ( $T_p$  [s]) del oleaje incidente. Adicionalmente, se estima que la diferencia del azimut de equilibrio del Punto 1 con los puntos 2 y 3 puede deberse a que estuvo influenciado (en mayor medida) por los efectos de la difracción provenientes desde la Punta Concón, sumado a la refracción desarrollada desde la Punta Ángeles en Valparaíso.

### 4.3.1.1.2 Hidrodinámica bidimensional del medio fluvial (sin sequía)

Para este caso, al igual que para el medio oceánico, se han seleccionado 2 puntos ubicados dentro del estuario del río Aconcagua, es decir, en el Sector 2 (tramo “aguas abajo” del río). Estos 2 puntos están localizados según muestra la Figura 45, cuyas coordenadas en UTM (Unidad Transversal de Mercator) son:

- Punto río 1: E: 265530 m. E, N: 6355365 m. S.
- Punto río 2: E: 265800 m. E, N: 6354640 m. S.

Es preciso notar que, para representar la hidrodinámica y conocer el transporte de sedimentos proveniente desde aguas arriba hasta los respectivos puntos del estuario (aguas abajo), se utilizó el módulo FM (Flow Model) y ST (Sediment Transport) para la modelación en MIKE 21 (bidimensional) considerando un caudal histórico para el año 1988.



Figura 45: Vista aérea del sector de estudio, señalando los 2 puntos elegidos dentro del estuario del río Aconcagua (Elaboración Propia, Google Earth, 2021).

- Caracterización de los sedimentos:

Según Martínez y Cortez (2007), efectuaron una caracterización textural de los sedimentos presentes en el estuario del río Aconcagua. Ante esto, y de acuerdo al Capítulo 3 (Metodología), se utilizará el valor de 0,2 [mm] como diámetro característico ( $D_s$ ) para la simulación en MIKE 21 (módulo ST, Sediment Transport). Adicionalmente, se ha considerado como  $d_{50}$  un diámetro de 0,05 [mm] para obtener el gasto sólido en suspensión.

- Resultado de las corrientes generadas dentro del estuario:

En la Figuras 46 y 47 se presentan las corrientes [m/s] desarrolladas dentro del estuario del río Aconcagua, cuyos puntos seleccionados (1 y 2) permiten identificar donde se concentran las máximas intensidades en el tramo seleccionado (Sección 2).

De hecho, se observa que las mayores intensidades de velocidad se encuentran principalmente en el Punto río 1, tanto en un periodo estival como en invierno. Además, es posible visualizar que las intensidades en este punto fueron mayores en verano que en invierno cuyas velocidades promedio alcanzaron los ~0,71 [m/s] y de ~0,31 [m/s] respectivamente, condición que puede ser explicada por presentar un mayor caudal disponible ante el derretimiento de la capa glacial condicionando la influencia nival del río desde sectores aguas arriba de la cuenca (alta montaña).

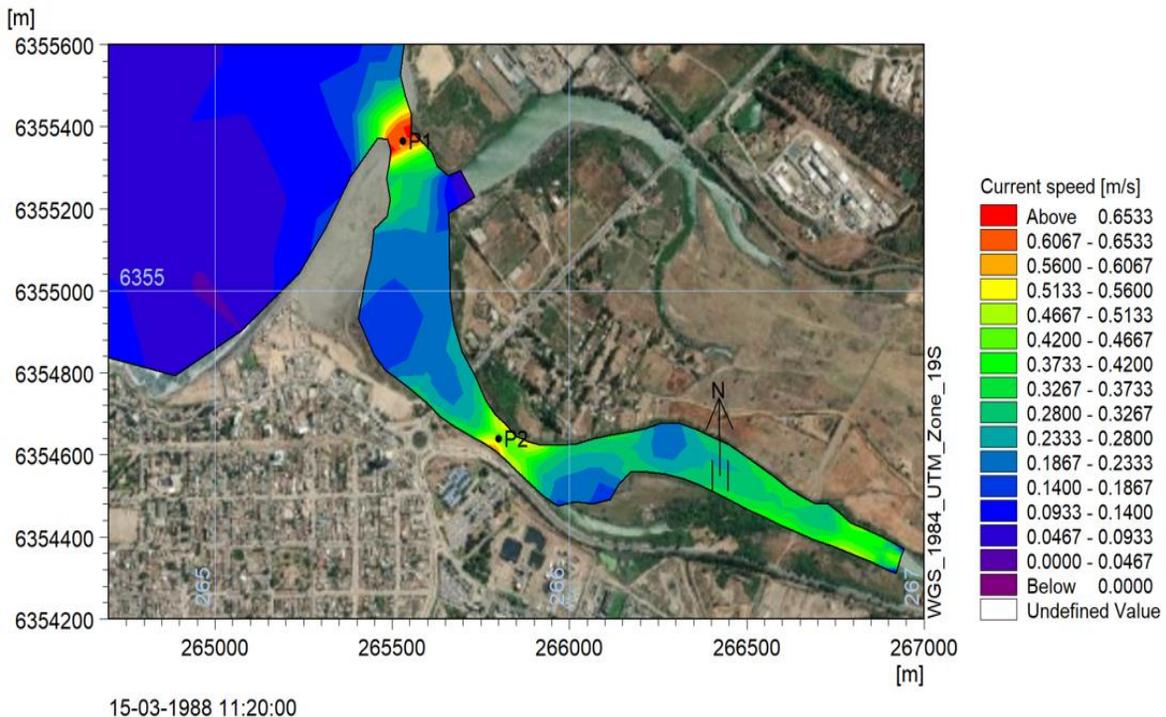


Figura 46: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de verano, año 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM).

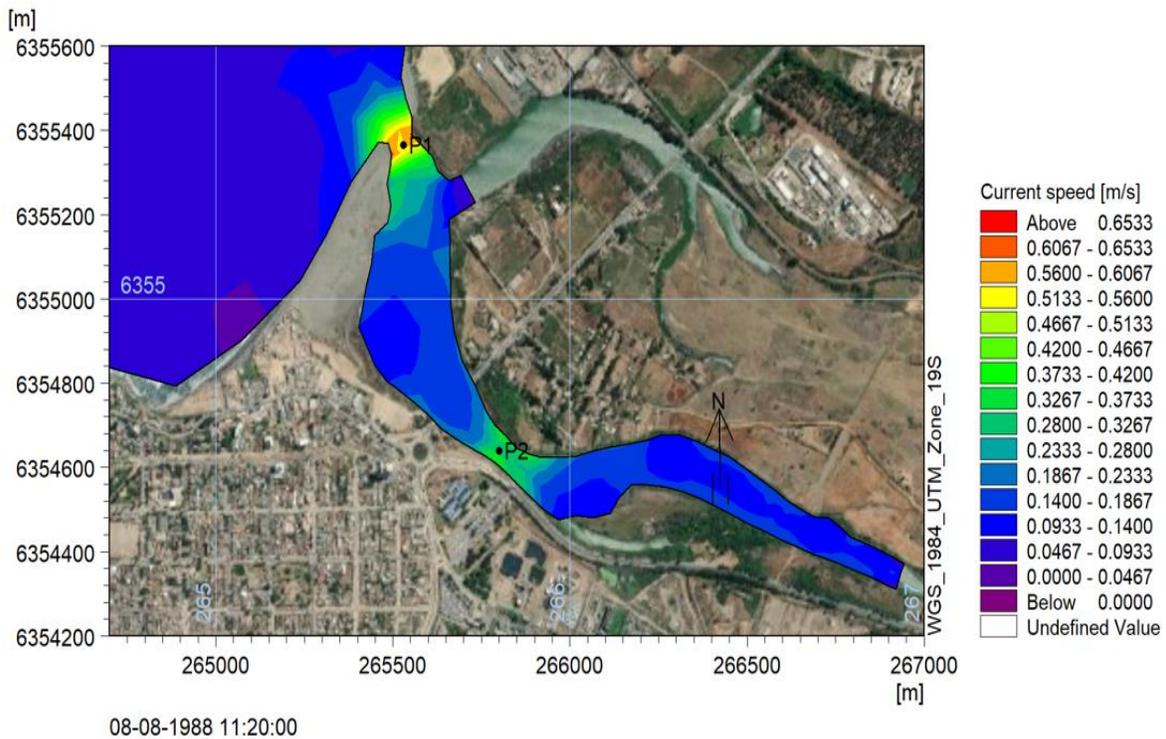


Figura 47: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de invierno, año 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM).

Considerando ambas figuras, de manera preliminar se infiere que, con los caudales registrados para este año, fueron capaces de transportar mayores concentraciones de sedimentos provenientes desde el Sector 3 y, a su vez, desde otros sectores aguas arriba. Además, se estima que, dentro del estuario del río Aconcagua, el flujo puede clasificarse como subcrítico ( $Fr \approx 0,21$ , considerando promedio anual), con promedios anuales de  $\sim 0,46$  [m/s] y de  $\sim 0,27$  [m/s] observados en el Punto río 1 y 2 respectivamente.

- Resultado del transporte de sedimentos en el medio fluvial:

De acuerdo a las condiciones que se tienen para el año 1988, se ha utilizado para la simulación en 2D un caudal histórico en [m<sup>3</sup>/s] diario (flujo variable). Esta información fue necesaria para la obtención de los escurrimientos o tirantes del canal aluvial en [m] y la concentración o gasto sólido de los sedimentos que serán transportados por las formulaciones propuestas en el Capítulo 2 (Marco Teórico). Cabe mencionar que se ha considerado como supuesto que la sección característica del río Aconcagua se asemeja a una sección trapezoidal.

A continuación, para cada una de las simulaciones de supuestos, se han utilizado las siguientes formulaciones:

## Capítulo 4: Resultados

- Forma 1: Formulación para el gasto sólido de fondo y en suspensión (Engelund y Fredsøe, Van Rijn respectivamente).
- Forma 2: Formulación para el gasto sólido de fondo y en suspensión (Engelund y Hansen, Van Rijn respectivamente).

Dado lo anterior, en las Figuras 48 y 49, se presentarán las magnitudes totales de los sedimentos que fueron transportados en  $[m^3/yr/m]$  utilizando la Forma 1, bajo una condición “sin sequía”, para un día de verano e invierno respectivamente.

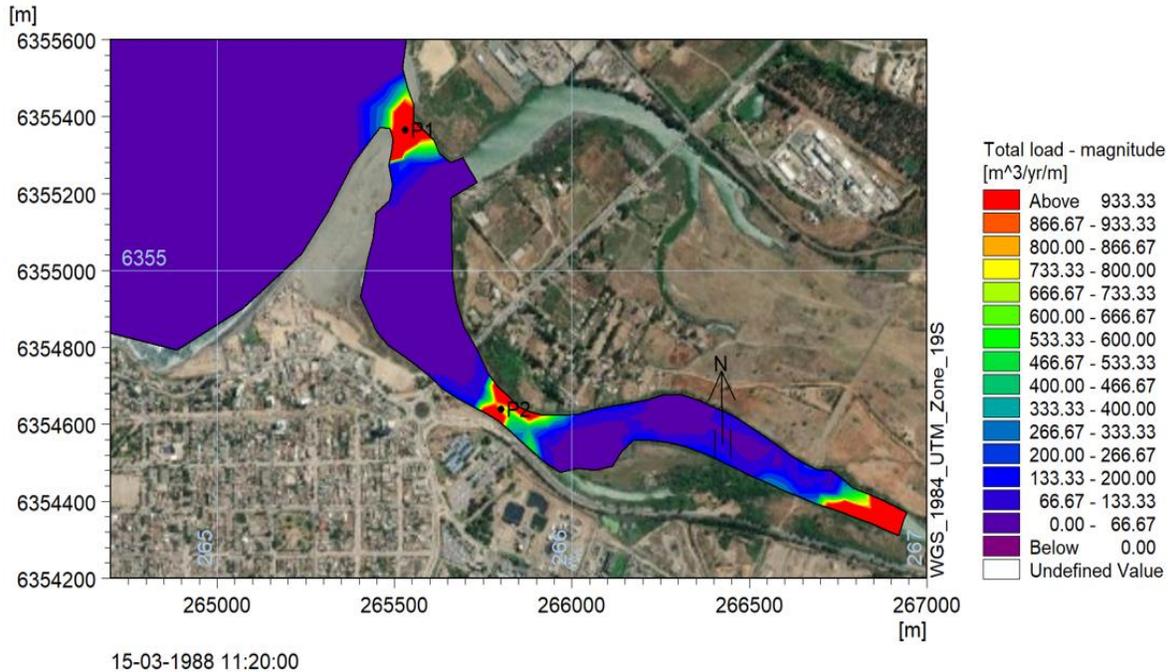


Figura 48: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición “sin sequía” para un día de verano, 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

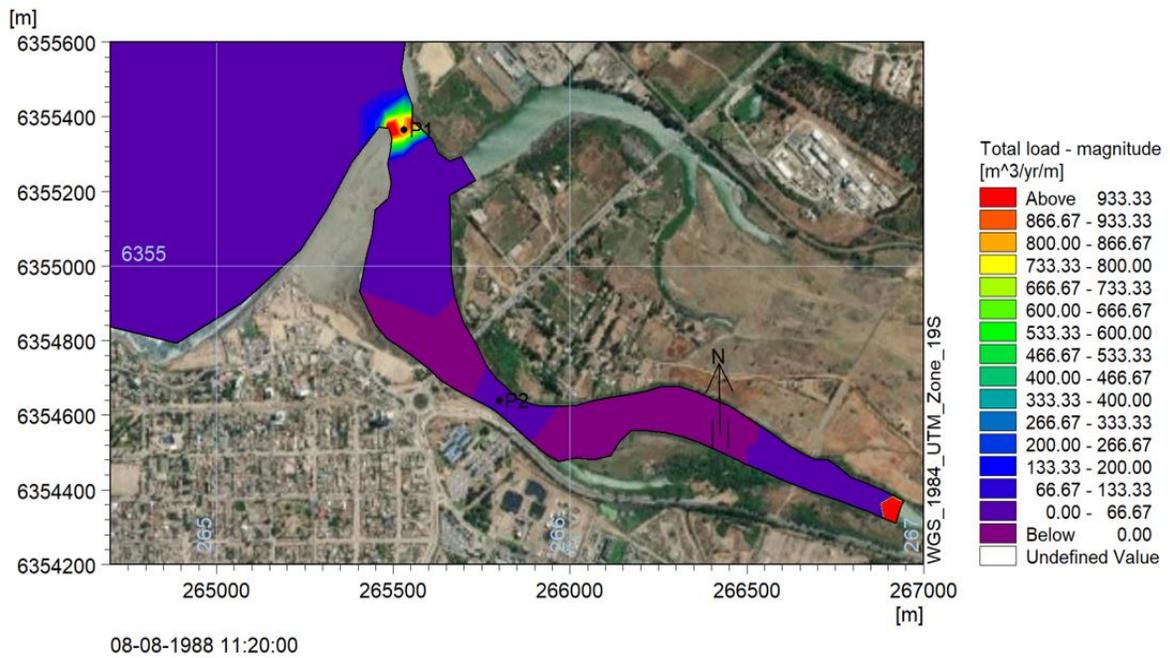


Figura 49: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición “sin sequía” para un día de invierno, 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

En las Figuras 50 y 51, se presentarán resultados en  $[m^3/yr/m]$  utilizando la Forma 2, bajo una condición “sin sequía”, para un día de verano e invierno respectivamente.

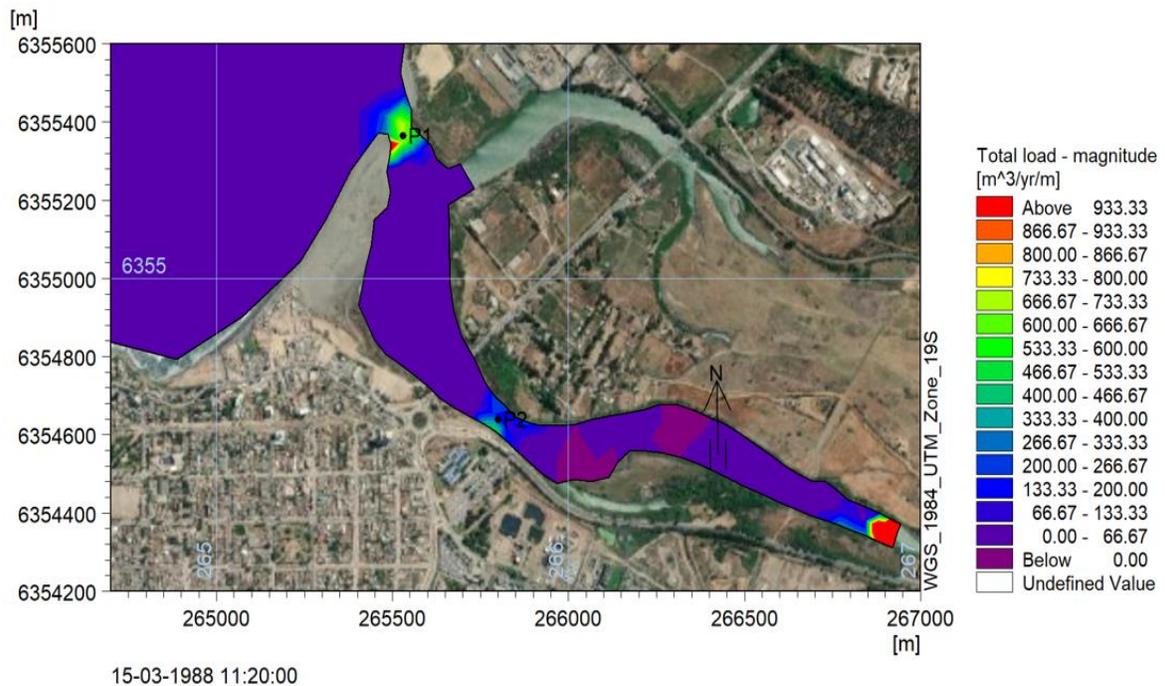


Figura 50: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición “sin sequía” para un día de verano, 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

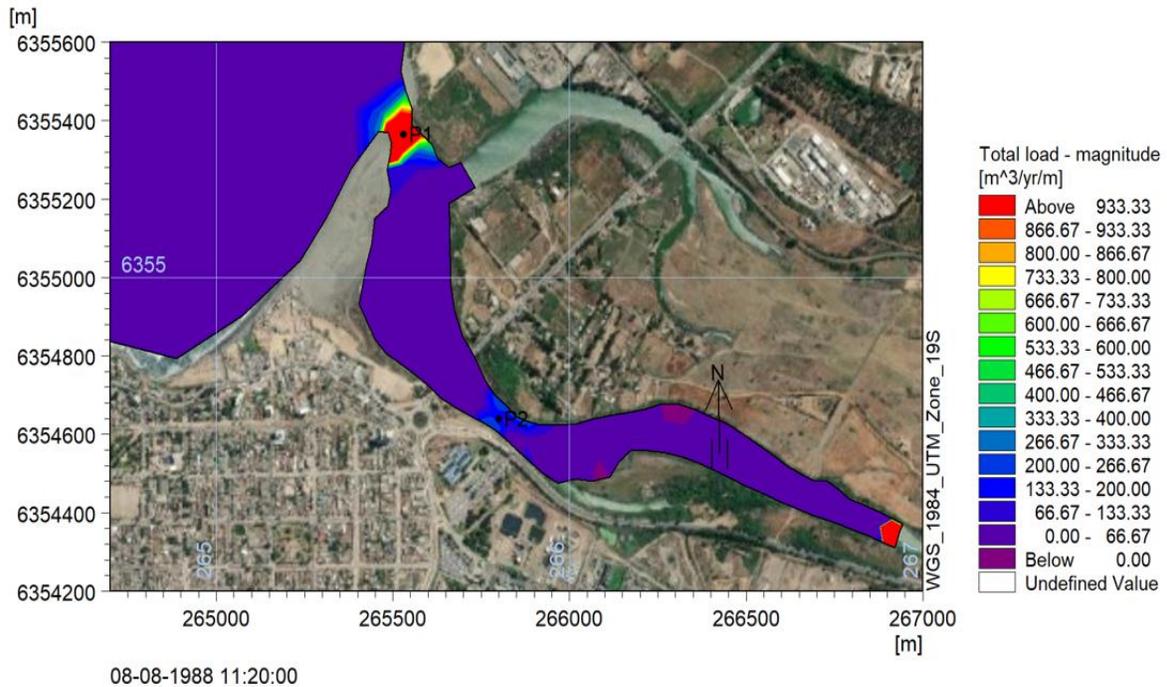


Figura 51: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición “sin sequía” para un día de invierno, 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

- Punto río 1:

Tomando en cuenta los resultados de ambas formulaciones para el año 1988, en la Tabla 9 y 10 se presentarán los promedios mensuales de los sedimentos transportados en  $[m^3/yr/m]$  en el Punto 1 para la Forma 1 y 2 respectivamente. Esta información fue obtenida luego de efectuar una simulación bidimensional en el módulo ST de MIKE 21.

Año	Mes	Promedio mensual Qst $[m^3/yr/m]$
1988	1	14557,01
1988	2	2131,64
1988	3	615,57
1988	4	270,35
1988	5	177,37
1988	6	140,28
1988	7	160,59
1988	8	173,04
1988	9	187,38
1988	10	280,06
1988	11	313,33
1988	12	324,21

Tabla 9: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 1, en condición “normal” o “sin sequía” durante el año 1988 (Elaboración Propia).

Año	Mes	Promedio mensual Qst [ $m^3/yr/m$ ]
1988	1	91642,88
1988	2	4810,19
1988	3	1373,11
1988	4	563,34
1988	5	396,46
1988	6	342,63
1988	7	381,94
1988	8	418,62
1988	9	426,92
1988	10	601,66
1988	11	654,75
1988	12	654,09

Tabla 10: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 2, en condición “normal” o “sin sequía” durante el año 1988 (Elaboración Propia).

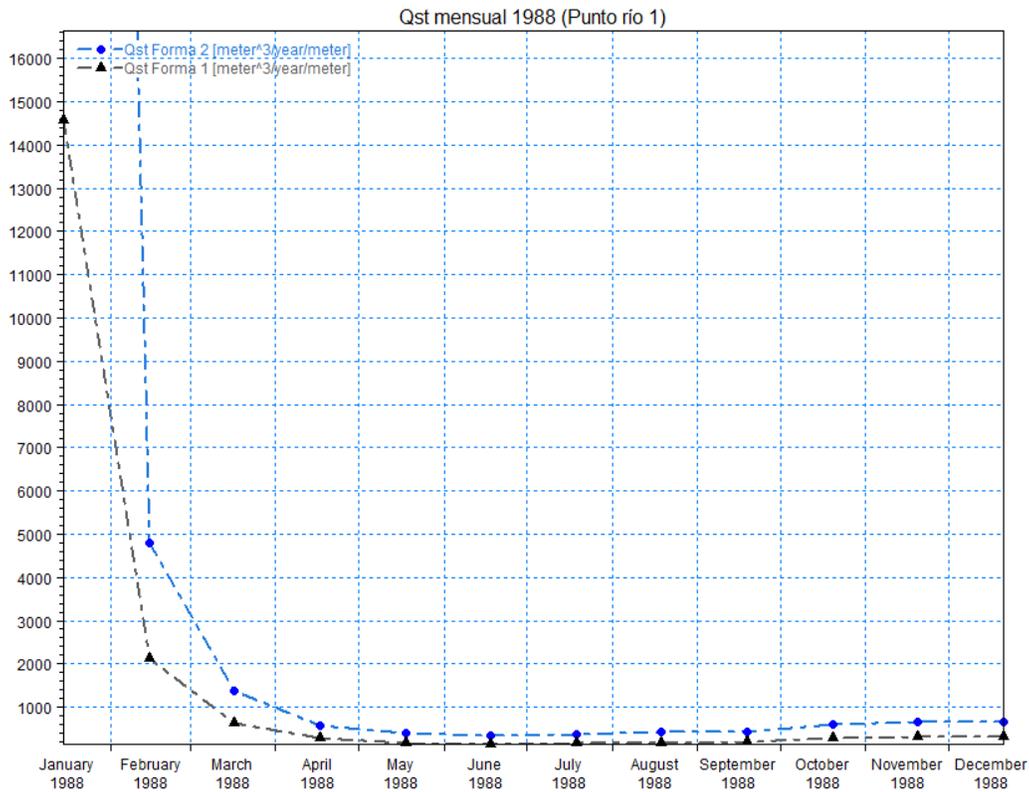


Figura 52: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 1 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición “normal” o “sin sequía” durante el año 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).

De acuerdo a la Figura 52 y usando la Forma 1, durante el periodo estival, se observa que la cantidad media transportada en el Punto río 1 fue de 17628,43 [ $m^3/yr/m$ ], contrastándose con los meses de invierno. Para este caso, las cantidades medias transportadas se reducen a 661,29 [ $m^3/yr/m$ ], es decir, disminuyen un 96,25% en los meses de invierno. De manera similar ocurre si se utiliza la Forma 2, en la que, para los meses de verano e invierno se

## Capítulo 4: Resultados

---

obtiene un valor de 98480,27 [m<sup>3</sup>/yr/m] y de 1570,11 [m<sup>3</sup>/yr/m] respectivamente, cuya disminución alcanza el 98,41%.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que se está trabajando bajo el supuesto de un año “normal” o “sin sequía”, las cantidades medias transportadas, considerando sólo los meses de verano e invierno suman 18289,72 [m<sup>3</sup>/yr/m] y 100050,38 [m<sup>3</sup>/yr/m] para la Forma 1 y 2 respectivamente.

- Punto río 2:

Al igual que en caso anterior, en la Tabla 11 y 12 se presentarán los promedios mensuales de los sedimentos transportados en [m<sup>3</sup>/yr/m] en el Punto 2 para la Forma 1 y 2 respectivamente. Es preciso notar, de manera preliminar que los resultados obtenidos mediante la Forma 2 tienden a sobreestimar el transporte de sedimentos, aunque se prevé que las tendencias sean similares.

Año	Mes	Promedio mensual Qst [m <sup>3</sup> /yr/m]
1988	1	3448,80
1988	2	346,68
1988	3	20,07
1988	4	5,09
1988	5	2,04
1988	6	1,38
1988	7	1,40
1988	8	1,81
1988	9	2,53
1988	10	4,74
1988	11	5,43
1988	12	4,94

Tabla 11: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 1, en condición “normal” o “sin sequía” durante el año 1988 (Elaboración Propia).

Año	Mes	Promedio mensual Qst [m <sup>3</sup> /yr/m]
1988	1	9475,07
1988	2	861,66
1988	3	176,17
1988	4	55,40
1988	5	21,06
1988	6	11,92
1988	7	10,27
1988	8	13,70
1988	9	21,56
1988	10	47,91
1988	11	63,94
1988	12	55,89

Tabla 12: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 2, en condición “normal” o “sin sequía” durante el año 1988 (Elaboración Propia).

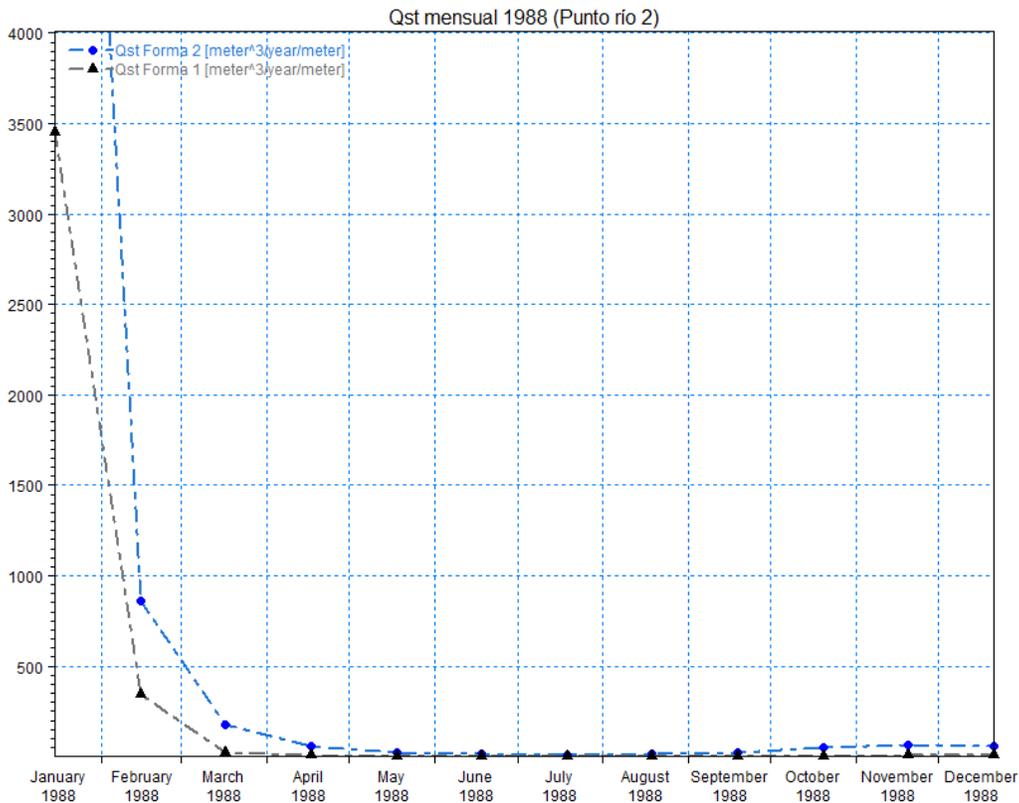


Figura 53: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 2 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición "normal" o "sin sequía" durante el año 1988 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).

Considerando las figuras y tablas previas que describen las cantidades medias transportadas de sedimentos desde el medio fluvial empleando ambas formas (Forma 1 y Forma 2), es posible identificar que las tendencias de transporte son similares en los puntos seleccionados.

Según la Figura 53 y usando la Forma 1, se observa que la cantidad media transportada en el Punto río 2 durante el periodo estival fue de 3820,5 [m³/yr/m]. Por otro lado, durante los meses de invierno, las cantidades medias transportadas se reducen a 7,12 [m³/yr/m], es decir, disminuyen significativamente en un 99%. Luego, utilizando la Forma 2 para los meses de verano e invierno, se obtiene un valor de 10568,8 [m³/yr/m] y de 57,45 [m³/yr/m] respectivamente, cuya disminución alcanza también el 99%.

Al igual que en el Punto río 1, las cantidades medias transportadas anuales, considerando sólo los meses de verano e invierno suman 3827,6 [m³/yr/m] y 10626,3 [m³/yr/m] para la Forma 1 y 2 respectivamente para el Punto río 2.

Cabe señalar que la diferencia en el transporte de sedimentos en los meses de verano con respecto a los meses de invierno posiblemente se deba a los efectos del régimen nival y

## Capítulo 4: Resultados

sus aportes al caudal del río Aconcagua, ya que, según Shaw et.al. (2021), puede estar relacionado con el albedo registrado y con la capacidad glaciaria o hielo disponible en un contexto previo a la “megasequía”.

### 4.3.1.2 Supuesto en condición “de sequía”

#### 4.3.1.2.1 Hidrodinámica bidimensional del medio oceánico (en sequía)

Utilizando los parámetros de resumen del oleaje de los puntos definidos, los cuales resultan de la simulación de los tensores de radiación en el módulo SW de la modelación en MIKE 21, se procederá a realizar la estimación del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) para el año 2015 bajo un contexto “de mega sequía”. Es preciso notar que, para este caso, los eventos de clima extremo van en aumento (teniendo en cuenta su tendencia desde los años 70’), llegando a tener más de 15 eventos extremos por año después del 2010 (Martínez, et.al., 2018).

- Resultados del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS):

- Puntos 1, 2 y 3:

Considerando el mismo tamaño del sedimento (0,071 [mm]), se presenta la Tabla 13 que señala la estimación obtenida de la capacidad potencial neta del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) en los puntos 1, 2 y 3 (QL Neto en [m<sup>3</sup>/s]), para distintos valores de azimut [°].

Punto 1				Punto 2				Punto 3			
LST (CERC)		LTS (QUEENS, KAMPHUIS)		LST (CERC)		LTS (QUEENS, KAMPHUIS)		LST (CERC)		LTS (QUEENS, KAMPHUIS)	
Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]
11	120,59	11	20,02	11	357,00	11	44,96	11	665,94	11	74,15
10	111,65	10	19,18	10	341,97	10	43,89	10	645,24	10	72,87
9	102,55	9	18,30	9	326,48	9	42,76	9	623,68	9	71,51
8	93,32	8	17,36	8	310,54	8	41,57	8	601,28	8	70,06
7	83,97	7	16,37	7	294,19	7	40,32	7	578,07	7	68,53
6	74,50	6	15,31	6	277,44	6	38,99	6	554,08	6	66,89
5	64,92	5	14,18	5	260,31	5	37,59	5	529,34	5	65,16
4	55,26	4	12,98	4	242,83	4	36,09	4	503,89	4	63,30
3	45,53	3	11,69	3	225,03	3	34,53	3	477,75	3	61,37
2	35,73	2	10,27	2	206,92	2	32,88	2	450,98	2	59,32
1	25,88	1	8,68	1	188,53	1	31,15	1	423,59	1	57,17
0	16,00	0	6,74	0	169,88	0	29,31	0	395,64	0	54,90
-1	6,10	-1	4,39	-1	151,01	-1	27,35	-1	367,15	-1	52,49
-1,62	0,00	-2	1,63	-2	131,93	-2	25,23	-2	338,16	-2	49,92
-2	-3,81	-2,53	0,00	-3	112,68	-3	22,85	-3	308,72	-3	47,13
-3	-13,72	-3	-1,39	-4	93,27	-4	20,23	-4	278,87	-4	44,07
-4	-23,61	-4	-4,17	-5	73,73	-5	17,45	-5	248,64	-5	40,82
-5	-33,47	-5	-6,62	-6	54,10	-6	14,46	-6	218,07	-6	37,47
-6	-43,28	-6	-8,65	-7	34,39	-7	11,10	-7	187,21	-7	33,94
-7	-53,03	-7	-10,39	-8,74	0,00	-9,62	0,00	-12,94	0,00	-13,85	0,00

Tabla 13: Estimación del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) en los puntos 1, 2 y 3 (año 2015), mediante la aplicación de 2 formulaciones para conocer la posición de equilibrio (Elaboración Propia).

Según la Tabla 13, se proponen distintos azimuts de [°] para obtener la condición de equilibrio en el transporte neto de sedimentos en los 3 puntos, obedeciendo a su dinámica litoral.

En el Punto 1, se obtiene un QL neto = 0 (equilibrio) para un azimut de  $-1,62^\circ$  (CERC) y de  $-2,53^\circ$  (Queens), estimando que la dirección del oleaje incidente propagado desde aguas profundas provino del  $\sim 268^\circ$  y del  $\sim 267^\circ$  para CERC y Queens respectivamente. Se estima que la diferencia entre los valores obtenidos usando cada método fue de un 56,17%, sin embargo, siguen la misma tendencia para el rango de azimut señalado (disminución).

Por otro lado, para el Punto 2, se propone un azimut de equilibrio de  $-8,74^\circ$  (CERC) y de  $-9,62^\circ$  (Queens), estimando que las direcciones del oleaje propagado desde aguas profundas para cada caso vinieron del  $\sim 261^\circ$  y del  $\sim 260^\circ$  para CERC y Queens respectivamente. Por ende, se evalúa que la diferencia entre los valores obtenidos usando cada método fue de un 10,1%

Finalmente, para el Punto 3, se observa que para que QL neto esté en equilibrio, los azimuts deberán ser de  $-12,94^\circ$  (CERC) y de  $-13,85^\circ$  (Queens). Se prevé que las direcciones del oleaje propagado desde aguas profundas vinieron del  $\sim 257^\circ$  y del  $\sim 256^\circ$  para CERC y Queens respectivamente. Ante esto, se estima que la diferencia entre los valores obtenidos usando cada método fue de un 7,03%

Al igual que en el caso de 1988 (año “húmedo”), la diferencia que existe entre los azimuts de equilibrio del Punto 1 en relación a los otros puntos posiblemente se deba a que dicho punto se encuentra influenciado, en mayor medida, por efectos propios de la difracción y también por la refracción del oleaje incidente. Por otro lado, considerando la diferencia entre los QL netos de cada punto y método, es posible comprobar que la formulación del CERC sobrestima la capacidad potencial transportada.

#### 4.3.1.2.2 Hidrodinámica bidimensional del medio fluvial (en sequía)

A través del módulo FM (Flow Model) y ST (Sediment Transport) de la modelación en MIKE 21 (bidimensional), fue posible representar la hidrodinámica y conocer el transporte de sedimentos proveniente desde aguas arriba hasta los respectivos puntos aguas abajo para el año 2015. Dado lo anterior, se tienen los siguientes resultados para una condición fluvial “en sequía”:

- Resultado de las corrientes generadas dentro del estuario:

Para conocer y entender la hidrodinámica en el medio fluvial, se ha utilizado en la simulación en 2D un caudal histórico en  $[m^3/s]$  diario (flujo variable). Por lo tanto, considerando que se está estudiando aspectos propios de un año en sequía, es de esperar que las corrientes desarrolladas en la Sección 2 del río Aconcagua puedan verse afectadas por la disminución de las precipitaciones y que tengan implicancias en la disponibilidad en el recurso hídrico en esta zona para el transporte de sedimentos hacia la costa. Por ende, en la Figura 54 y 55 se presentan las corrientes  $[m/s]$  que se han desarrollado en el estuario del río Aconcagua, en las que se identifican los puntos seleccionados (Punto río 1 y 2) para un día de verano y de invierno respectivamente.

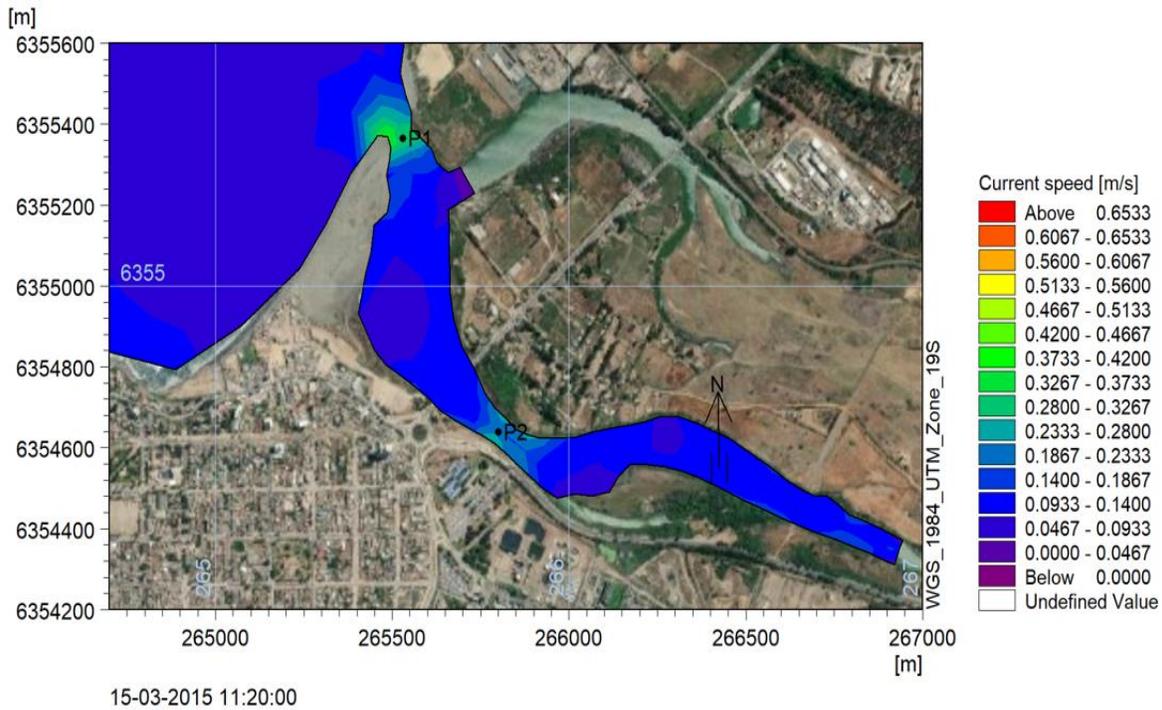


Figura 54: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de verano, año 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM).

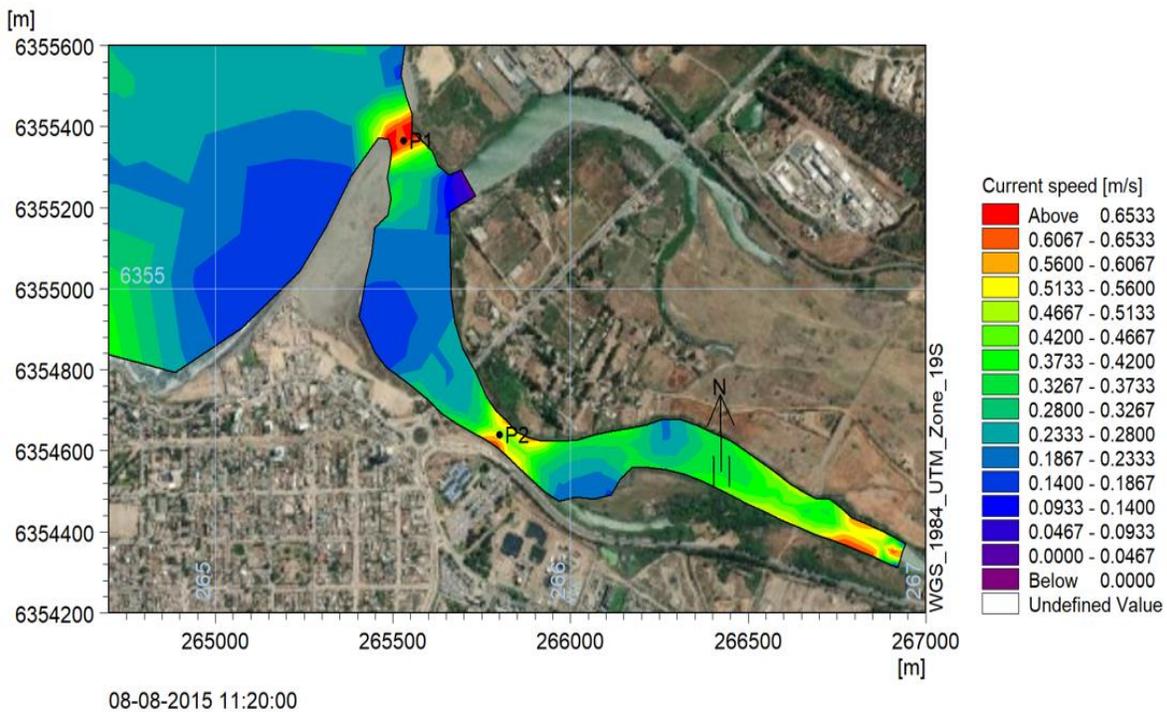


Figura 55: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de invierno, año 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM).

Es preciso notar que, para el caso de invierno, se ha seleccionado esta fecha para tener un registro de lo que sucedió el 8 de agosto del 2015 a las 11:20 am, en la que eventos de clima extremo en el océano junto a otros eventos meteorológicos (i.e. precipitaciones) influyeron en las condiciones observadas en el día. Por lo tanto, se estima que, debido a las precipitaciones, los caudales disponibles aumentaron, condicionando las velocidades dentro del estuario. Por ejemplo, para este instante, se registraron velocidades de  $\sim 0,7$  [m/s] y de  $\sim 0,43$  [m/s] en el Punto río 1 y 2 respectivamente, los cuales sobrepasan la media de invierno ( $\sim 0,36$  [m/s] y de  $\sim 0,18$  [m/s] para cada punto). Además, es posible contrastar estos resultados con el día seleccionado de verano (15 de marzo), en la que se observan que las velocidades fueron menores en cada uno de los puntos ( $\sim 0,31$  [m/s] y de  $\sim 0,17$  [m/s] para el Punto río 1 y 2 respectivamente), que puede deberse a la disminución de la influencia nival en esa fecha ante la reducción del albedo en un contexto de sequía (Shaw et.al., 2021).

Por otro lado, se estima que, dentro del estuario del río Aconcagua, el flujo de ese año puede clasificarse como subcrítico ( $Fr \approx 0,16$ , considerando promedio anual).

- Resultado del transporte de sedimentos en el medio fluvial:

Similar a lo desarrollado para el año “normal” o “húmedo”, se presentarán resultados para las 2 formulaciones descritas (Forma 1 y 2) en relación al transporte de sedimentos. Por ende, en las Figuras 56 y 57, se muestran las magnitudes totales de los sedimentos que fueron transportados en  $[m^3/yr/m]$  utilizando la Forma 1, bajo una condición “de sequía”, para un día de verano e invierno respectivamente.

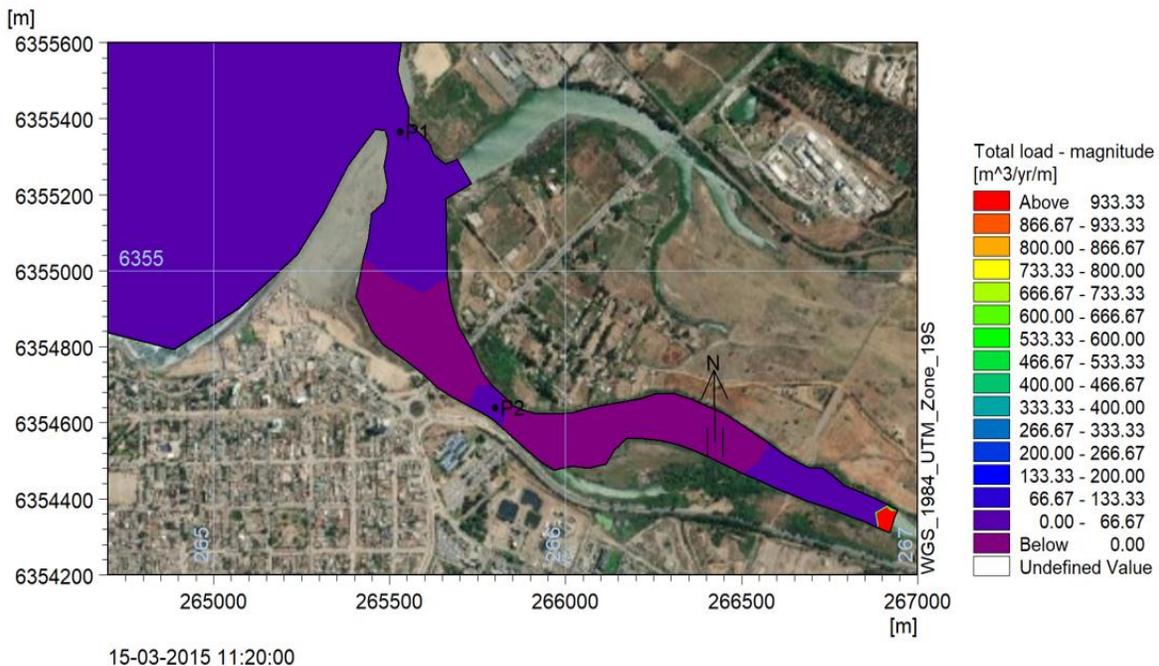


Figura 56: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición “de sequía” para un día de verano, 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

Capítulo 4: Resultados

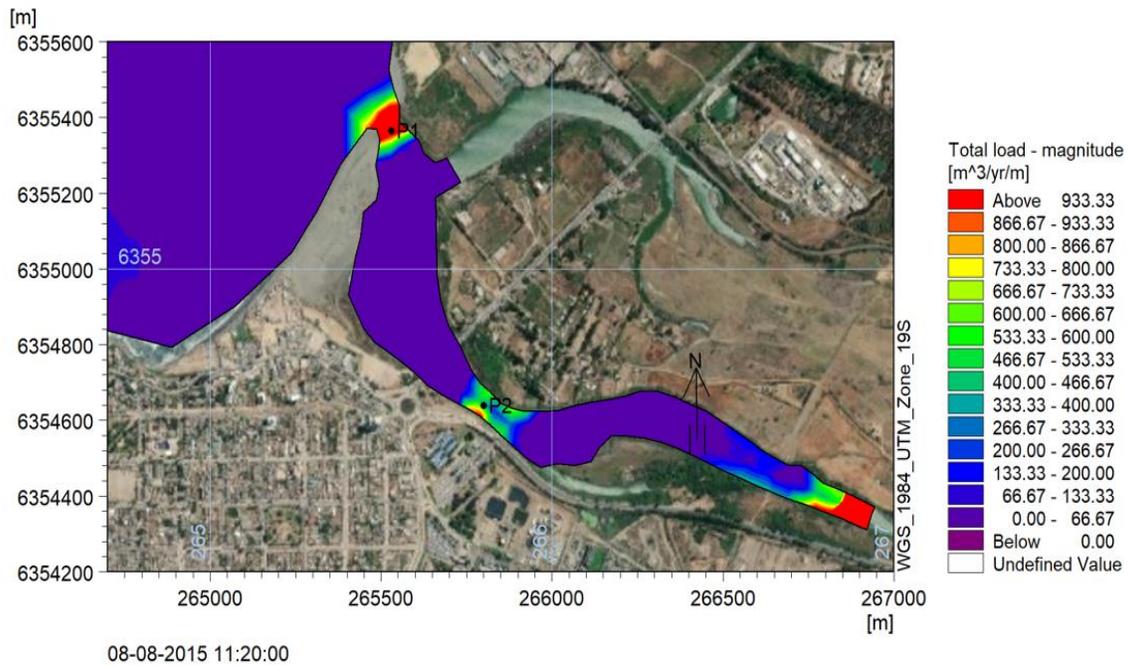


Figura 57: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición “de sequía” para un día de invierno, 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

De la misma forma, en las Figuras 58 y 59, se presentarán resultados en [m<sup>3</sup>/yr/m] utilizando la Forma 2, para un día de verano e invierno respectivamente.

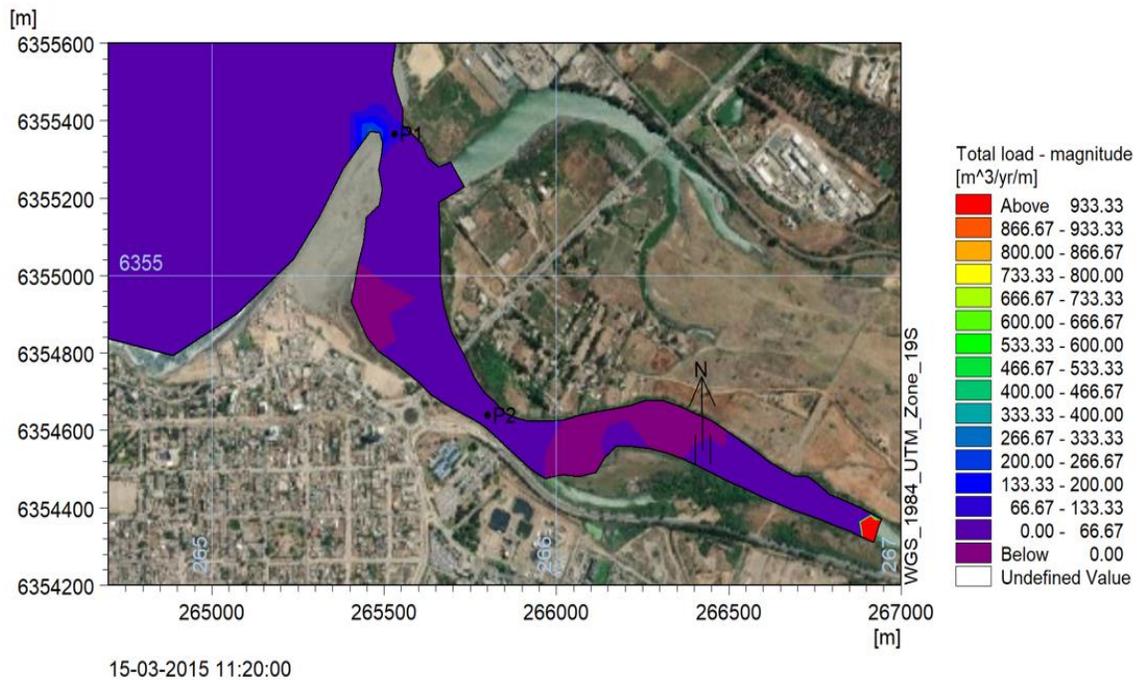


Figura 58: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición “de sequía” para un día de verano, 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

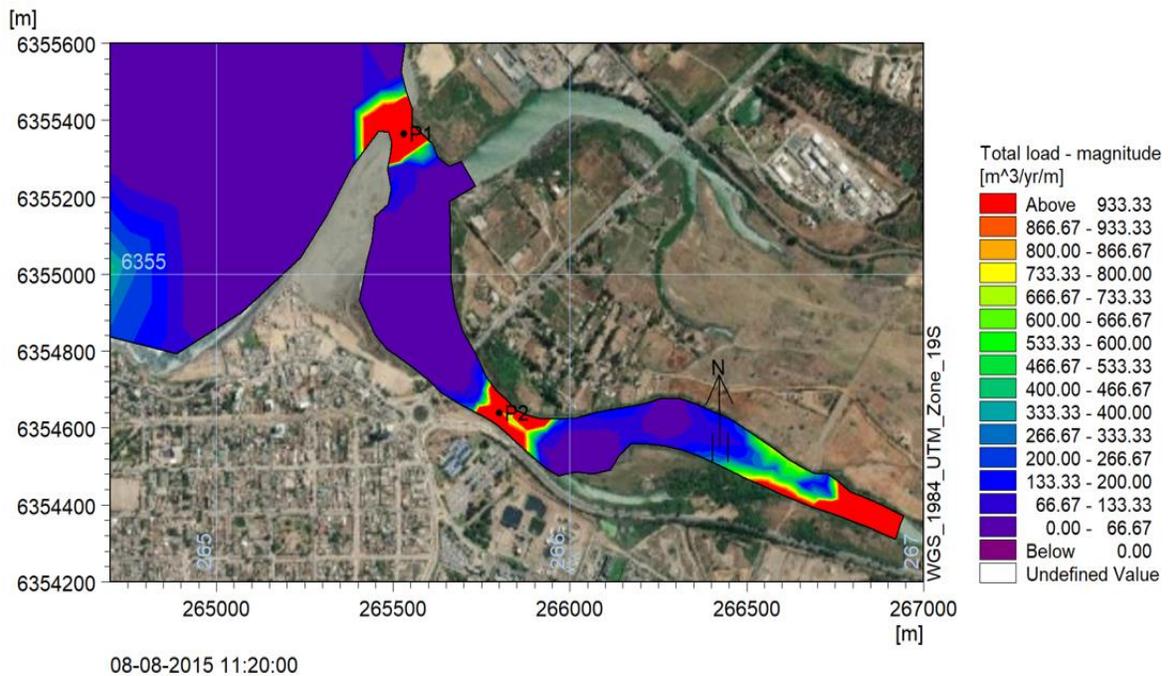


Figura 59: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición “de sequía” para un día de invierno, 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

- Punto río 1:

Según los resultados para el año 2015, en la Tabla 14 y 15 se presentarán los promedios mensuales de los sedimentos transportados en  $[m^3/yr/m]$  en el Punto 1 para la Forma 1 y 2 respectivamente.

Año	Mes	Promedio mensual Qst $[m^3/yr/m]$
2015	1	913,05
2015	2	170,56
2015	3	153,12
2015	4	151,82
2015	5	117,66
2015	6	120,75
2015	7	136,23
2015	8	463,12
2015	9	362,92
2015	10	757,45
2015	11	1340,52
2015	12	1243,18

Tabla 14: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 1, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia).

Capítulo 4: Resultados

Año	Mes	Promedio mensual Qst [m <sup>3</sup> /yr/m]
2015	1	8666,88
2015	2	452,79
2015	3	432,22
2015	4	454,38
2015	5	363,37
2015	6	381,68
2015	7	420,41
2015	8	1496,04
2015	9	1042,34
2015	10	2221,71
2015	11	4184,31
2015	12	3755,23

Tabla 15: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 2, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia).

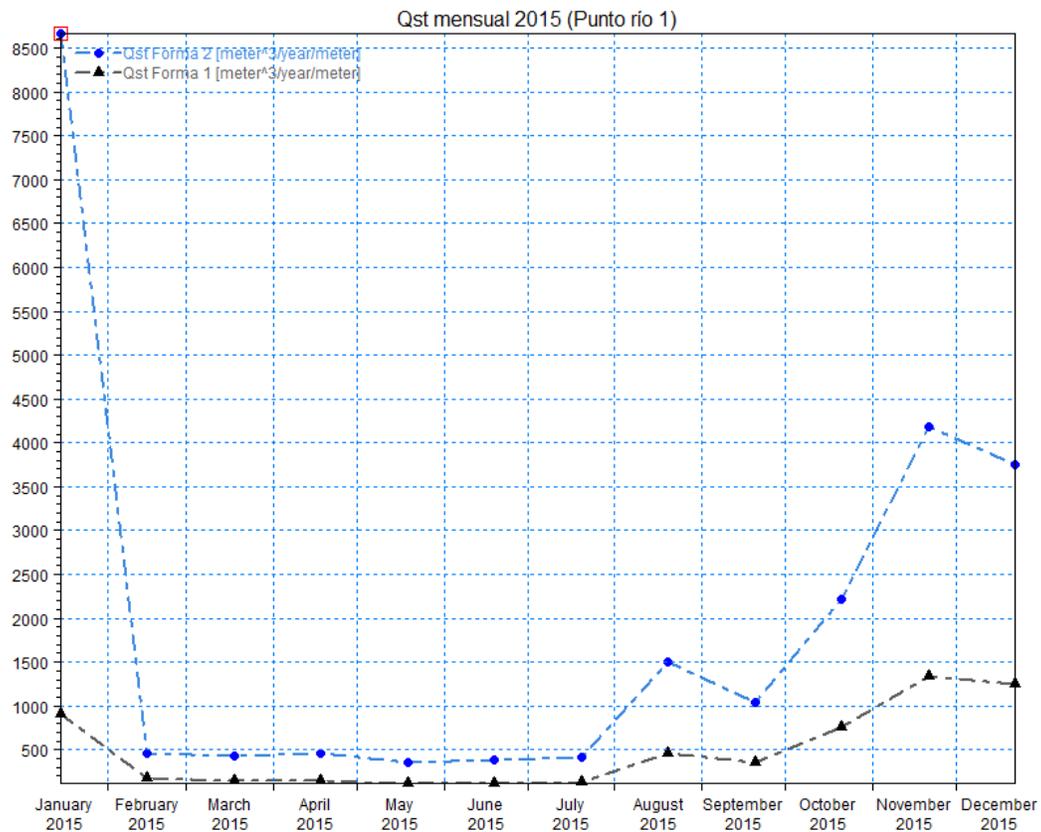


Figura 60: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 1 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).

Durante el periodo estival, se presentan variaciones importantes en el transporte de sedimentos hacia la costa en comparación a los meses de invierno. Por ejemplo, usando la Forma 1 en el Punto río 1, en verano se obtiene un Qst total medio de 2479,91 [m<sup>3</sup>/yr/m], contrastándose con el valor de 1083,02 [m<sup>3</sup>/yr/m] obtenido en los meses de invierno,

## Capítulo 4: Resultados

---

presentando una disminución de un 56,33%. De manera similar ocurre utilizando la Forma 2 en dicho punto, cuyos valores de Qst total medio en verano e invierno son de 13307,12 [m<sup>3</sup>/yr/m] y de 3340,47 [m<sup>3</sup>/yr/m] respectivamente, obteniendo una disminución del 74,9%.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que se está trabajando bajo el contexto de un año “en sequía”, las cantidades medias transportadas, considerando sólo los meses de verano e invierno suman 3562,93 [m<sup>3</sup>/yr/m] y 16647,59 [m<sup>3</sup>/yr/m] para la Forma 1 y 2 respectivamente. Ante esto, es importante señalar que existe una diferencia con respecto al año 1988, presentando una disminución en el transporte del 80,52% utilizando la Forma 1, y del 83,36% usando la Forma 2.

- Punto río 2:

En la Tabla 16 y 17 se presentarán los promedios mensuales de los sedimentos transportados en [m<sup>3</sup>/yr/m] en el Punto 2 del año en sequía, para la Forma 1 y 2 respectivamente.

Año	Mes	Promedio mensual Qst [m <sup>3</sup> /yr/m]
2015	1	79,98
2015	2	2,29
2015	3	1,61
2015	4	1,25
2015	5	0,67
2015	6	0,63
2015	7	0,75
2015	8	17,04
2015	9	13,78
2015	10	27,01
2015	11	65,60
2015	12	68,79

Tabla 16: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 1, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia).

Año	Mes	Promedio mensual Qst [m <sup>3</sup> /yr/m]
2015	1	338,04
2015	2	6,24
2015	3	4,99
2015	4	4,45
2015	5	3,27
2015	6	3,23
2015	7	3,55
2015	8	80,52
2015	9	50,02
2015	10	176,72
2015	11	430,09
2015	12	437,27

Tabla 17: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 2, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia).

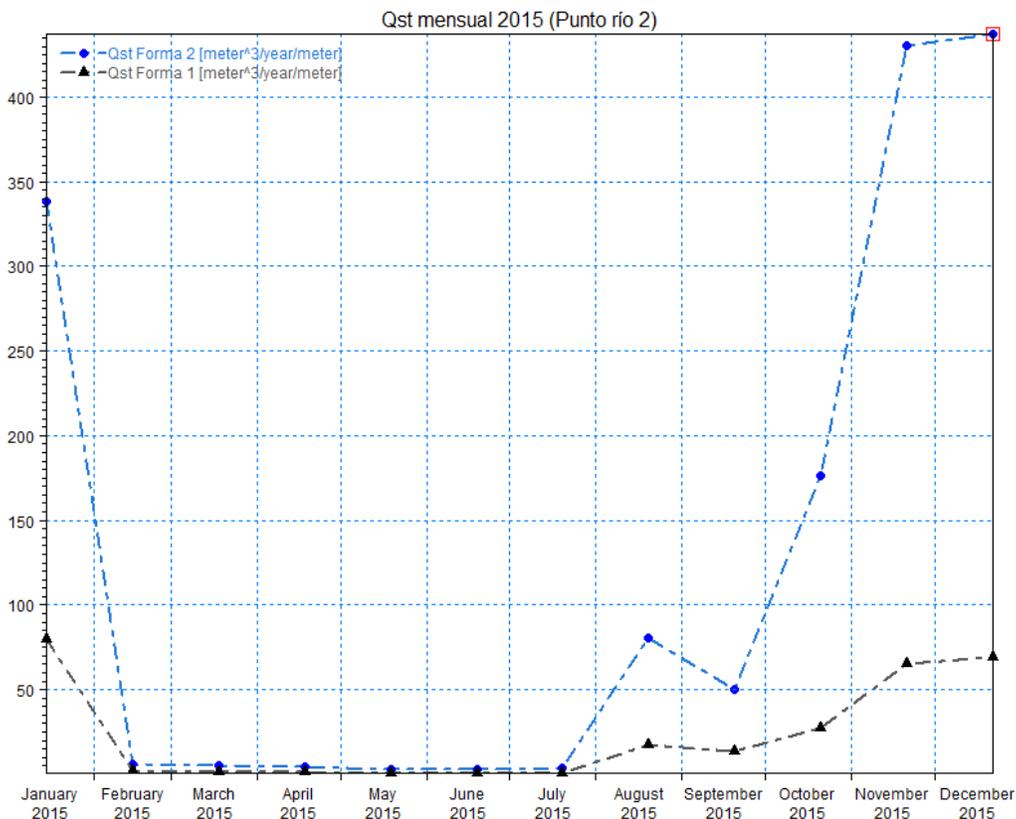


Figura 61: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 2 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición “de sequía” durante el año 2015 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).

Considerando las tablas y figuras presentadas para los puntos 1 y 2 del río, es posible encontrar algunas relaciones y tendencias entre estos para cada formulación utilizada.

Según la Figura 61, se observa que la tendencia que presentan las curvas para el Punto río 2 siguen el mismo comportamiento que en el caso del Punto río 1, es decir, en los meses de verano el transporte de sedimentos fue mayor que en los meses invernales, pese a que, durante el mes de agosto, hubo un aumento de las precipitaciones y, con ello, un mayor transporte en ciertos días.

En las Figuras 57 y 59, se observa que el 8 de agosto del 2015 (11:20 am), hubo un aumento en el transporte de sedimentos generado por el río en comparación con otros meses (1345,4 [m³/yr/m] en Punto río 1 y de ~53,88 [m³/yr/m] en Punto río 2, el cual está asociado al caudal registrado en ese día (81,02 [m³/s]). No obstante, pese a este aumento, existe una notoria diferencia en transporte entre los meses de verano e invierno para este año.

Por lo tanto, si se comparan ambas formas para el Punto río 2, se obtienen variaciones importantes en las cantidades transportadas. Sin embargo, el porcentaje de disminución entre los meses de verano e invierno son similares. Por ejemplo, usando la Forma 1, en

verano se obtiene un Qst total medio de 152,7 [m<sup>3</sup>/yr/m], cuyo valor se contrasta con 32,2 [m<sup>3</sup>/yr/m] obtenido en los meses de invierno, presentando una disminución del 78,91%. Luego, utilizando la Forma 2 en dicho punto, los valores estimados de Qst total medio en verano e invierno fueron de 786,54 [m<sup>3</sup>/yr/m] y de 137,32 [m<sup>3</sup>/yr/m] respectivamente, obteniendo una disminución del 82,54%.

Ante esto, las cantidades medias transportadas en el año, considerando sólo los meses de verano e invierno suman 184,9 [m<sup>3</sup>/yr/m] y 923,86 [m<sup>3</sup>/yr/m] para la Forma 1 y 2 respectivamente en el Punto río 2. No obstante, si se considera el año completo, es posible comparar el Punto río 2 con los resultados del año 1988. En este caso, utilizando la Forma 1, el río presentó una disminución en el transporte de sedimentos del 92,73% y del 85,77% usando la Forma 2 en el 2015. Es decir, en ambos casos, la disminución en el transporte sobrepasa el 85%.

### 4.3.1.3 Supuesto en condición “proyectada de sequía” (RCP 8.5)

#### 4.3.1.3.1 Hidrodinámica bidimensional del medio oceánico (proyección en sequía)

Con los parámetros de resumen del oleaje respectivos, los cuales son extraídos en cada uno de los puntos desde la simulación de los tensores de radiación en el módulo SW de DHI MIKE 21, se procederá a realizar la estimación del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) para el año 2030, donde se ha proyectado la condición de “megasequía” que afecta a la zona central del país, teniendo en cuenta que para ese año, bajo un escenario desfavorable, se espera que la sequía en la zona central sea más severa debido a una fuerte disminución de las precipitaciones (caudal disponible) y que los eventos de clima extremo sean más frecuentes.

- Resultados del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS):

- Punto 1, 2 y 3:

- Con un tamaño del sedimento de 0,071 [mm], se presenta la Tabla 18 que muestra la estimación de la capacidad potencial neta de los sedimentos transportados longitudinalmente (TLS) en los puntos 1, 2 y 3 (QL Neto en [m<sup>3</sup>/s]), para distintos valores de azimut [°].

## Capítulo 4: Resultados

Punto 1				Punto 2				Punto 3			
LST (CERC)		LTS (QUEENS, KAMPHUIS)		LST (CERC)		LTS (QUEENS, KAMPHUIS)		LST (CERC)		LTS (QUEENS, KAMPHUIS)	
Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]	Azimut [°]	QL Neto [m <sup>3</sup> /s]
11	68,11	11	12,72	11	210,54	11	29,33	11	401,78	11	49,01
10	61,69	10	12,03	10	200,70	10	28,52	10	388,72	10	48,06
9	55,19	9	11,30	9	190,58	9	27,65	9	375,12	9	47,04
8	48,60	8	10,52	8	180,20	8	26,73	8	361,02	8	45,96
7	41,96	7	9,68	7	169,58	7	25,75	7	346,43	7	44,79
6	35,25	6	8,72	6	158,73	6	24,71	6	331,37	6	43,54
5	28,50	5	7,67	5	147,66	5	23,58	5	315,86	5	42,18
4	21,71	4	6,53	4	136,39	4	22,31	4	299,93	4	40,67
3	14,89	3	5,42	3	124,94	3	20,97	3	283,58	3	39,07
2	8,04	2	4,31	2	113,32	2	19,58	2	266,86	2	37,42
1	1,19	1	3,16	1	101,54	1	18,17	1	249,77	1	35,74
0,83	0,00	0	1,94	0	89,62	0	16,77	0	232,34	0	34,04
0	-5,66	-1	0,62	-1	77,58	-1	15,31	-1	214,60	-1	32,28
-1	-12,51	-1,42	0,00	-2	65,44	-2	13,84	-2	196,56	-2	30,48
-2	-19,34	-2	-0,91	-3	53,21	-3	12,34	-3	178,26	-3	28,65
-3	-26,15	-3	-2,57	-4	40,90	-4	10,77	-4	159,72	-4	26,75
-4	-32,92	-4	-4,30	-5	28,54	-5	9,13	-5	140,96	-5	24,79
-5	-39,65	-5	-5,92	-6	16,14	-6	7,34	-6	122,01	-6	22,75
-6	-46,32	-6	-7,45	-7	3,72	-7	5,42	-7	102,90	-7	20,59
-7	-52,93	-7	-8,78	-7,30	0,00	-9,36	0,00	-12,29	0,00	-14,06	0,00

Tabla 18: Estimación del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) en los puntos 1, 2 y 3 (año 2030), mediante la aplicación de 2 formulaciones para conocer la posición de equilibrio (Elaboración Propia).

De acuerdo con la Tabla 18, se han propuesto distintos valores de azimut [°] para cada uno de los puntos seleccionados, los cuales permiten entregar una estimación de la capacidad potencial del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) y entender el comportamiento dinámico de la playa de Concón.

En el Punto 1, se propone un azimut de 0,83° (CERC) y de -1,42° (Queens) para obtener un QL neto en condición de equilibrio dinámico. Por ende, se espera que las direcciones del oleaje propagado desde aguas profundas para el año 2030 vengan del ~271° y del ~269°, siendo evaluados para CERC y Queens respectivamente.

En el Punto 2, se selecciona un azimut de -7,3° (CERC) y de -9,36° (Queens) para alcanzar la condición de equilibrio dinámico en el litoral. Junto a estos valores, se espera que la dirección del oleaje propagado venga del ~263° y del ~261°, evaluados para CERC y Queens respectivamente.

De la misma forma, en el Punto 3, se presenta un azimut de -12,29° (CERC) y de -14,06° (Queens) para obtener un QL neto = 0. Por lo tanto, para ambos azimuts, se estima que las direcciones del oleaje propagado desde aguas profundas tendrían que venir desde el ~258° (CERC) y del ~256° (Queens) para conseguir esta condición de equilibrio dinámico.

Cabe señalar que se está proyectando el TLS, en cada uno de los puntos, bajo una condición de sequía al 2030, por lo que, se espera que la capacidad transportada de sedimentos disminuya para esa fecha, debido a la influencia del océano ante la acción de forzantes presentes en el sector (i.e. vientos).

4.3.1.3.2 Hidrodinámica bidimensional del medio fluvial (proyección de la sequía)

Bajo un escenario climático desfavorable (RCP 8.5, IPCC 2013), se han proyectado los caudales históricos para el año 2030, utilizando un modelo global o GCM (Global Climate Model), en el que se ha relacionado la disminución de las precipitaciones en el río Aconcagua (local) con el aumento de la temperatura global debido a razones antropogénicas, desarrollándose un escenario crítico de sequía para ese año.

- Resultado de las corrientes generadas dentro del estuario:

Para este caso se presentan las condiciones más desfavorables dentro del río Aconcagua (déficit de precipitaciones según escenario RCP 8.5), tomando en cuenta que, según las Figuras 62 y 63, se observan cambios importantes en las corrientes (velocidades) asociados a la disminución de los caudales disponibles “aguas abajo” del río.

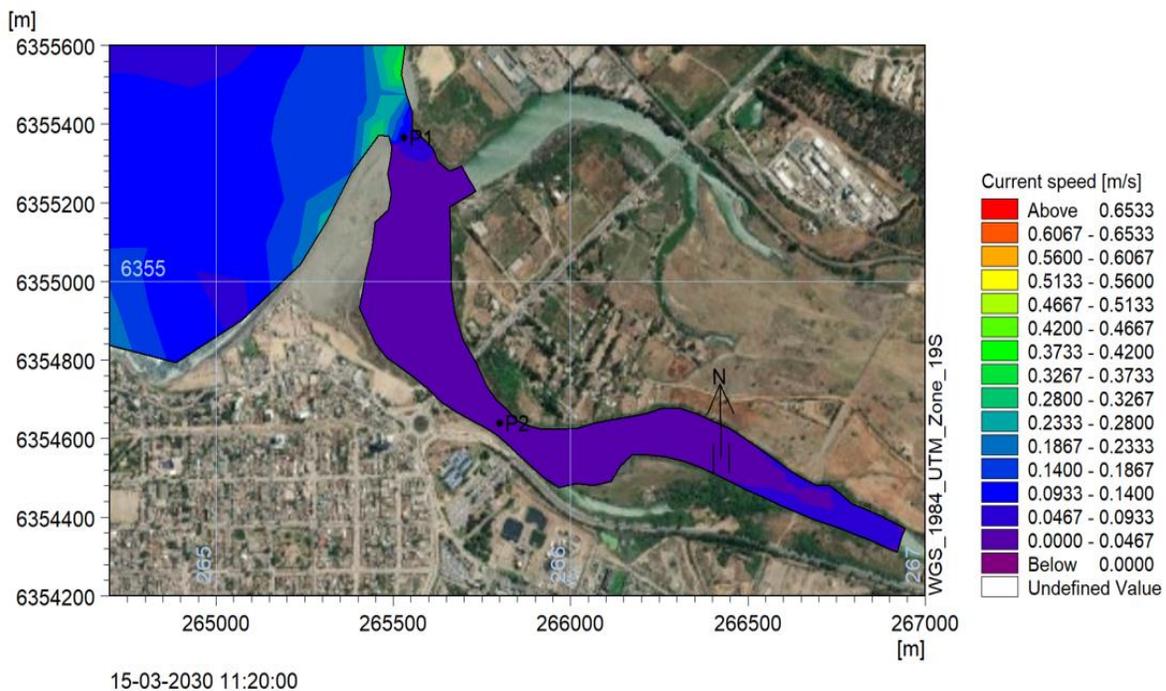


Figura 62: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de verano, año 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM).

Es posible notar en la Figura 62 que existen leves incrementos de velocidad en la zona cercana al Punto río 1. Sin embargo, dentro del estuario (Sección 2), las velocidades obtenidas son bastante bajas ( $\sim 0,11$  [m/s] y de  $\sim 0,03$  [m/s] en el Punto río 1 y 2 respectivamente), debido a la disminución de las precipitaciones en la cuenca y a la posible reducción del albedo en las zonas de alta montaña (Cordillera de los Andes), condición que se ha proyectado tomando en cuenta el aumento de la temperatura global del planeta y al mantenimiento de las condiciones de sequía en la zona central del país para ese año.

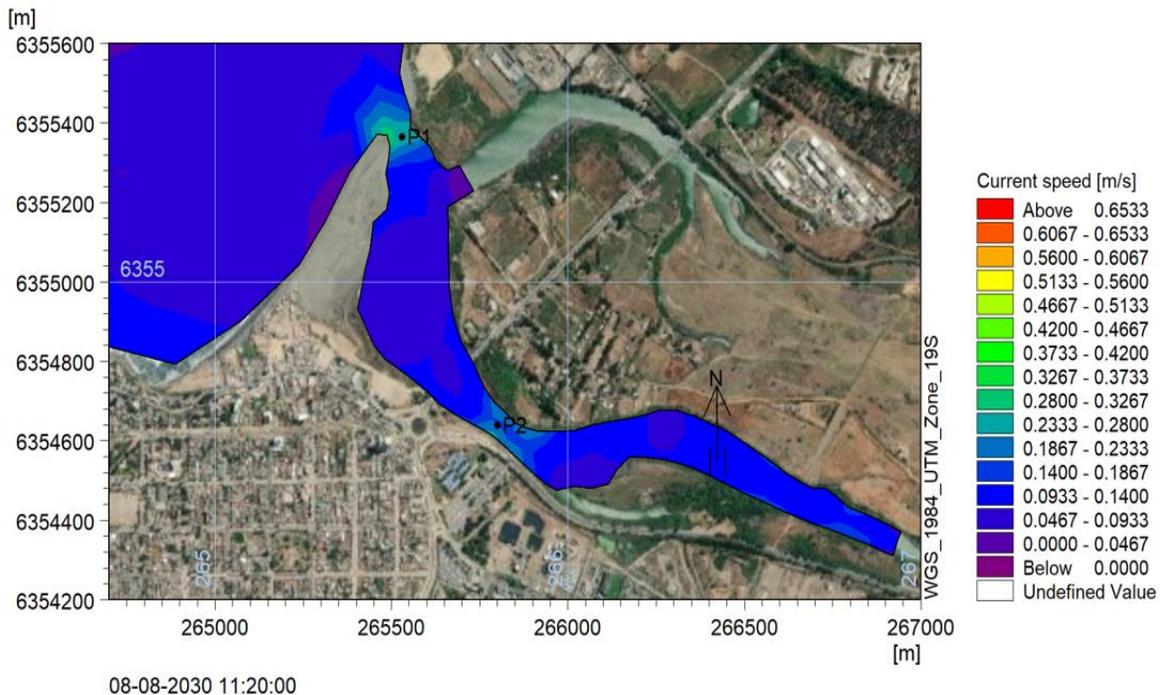


Figura 63: Intensidad de las corrientes desarrolladas en el estuario del río Aconcagua (Sección 2) en un día de invierno, año 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo FM).

En la Figura 63 se observa que se han mantenido ciertas condiciones al interior del estuario del río Aconcagua con respecto a la fecha estival seleccionada. Se presentan velocidades bajas en la mayor parte de la Sección 2 (~0,26 [m/s] y de ~0,16 [m/s] en el Punto río 1 y río 2 respectivamente), cuyas diferencias se encuentran principalmente en la zona cercana al Punto río 1 con leves aumentos de velocidad.

Por lo tanto, se estima que, dentro del estuario del río Aconcagua, el flujo para el año 2030 puede clasificarse como subcrítico ( $Fr \approx 0,08$  considerando promedio anual). Es de notar que este número de Froude es bastante bajo en comparación con los otros años, estando asociado a los caudales disponibles y a los niveles de escurrimiento observados en este sector.

- Resultado del transporte de sedimentos en el medio fluvial:

Utilizando un caudal diario proyectado GCM en [m<sup>3</sup>/s] (flujo variable) para el año 2030, se obtendrán resultados para las 2 formulaciones descritas (Forma 1 y 2).

A continuación, se presentarán las magnitudes totales de los sedimentos que fueron transportados en [m<sup>3</sup>/yr/m] utilizando la Forma 1, bajo una condición “proyectada de sequía”, para un día de verano (Figura 64) e invierno (Figura 65).

Capítulo 4: Resultados

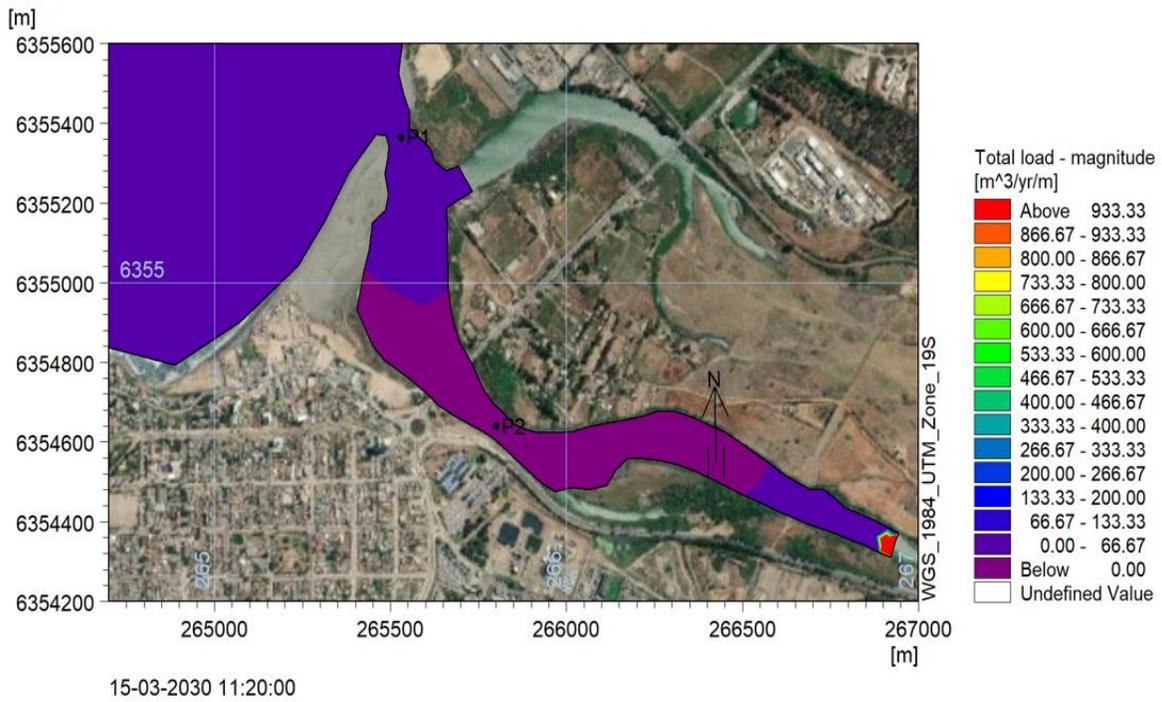


Figura 64: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición "proyectada de sequía" para un día de verano, 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

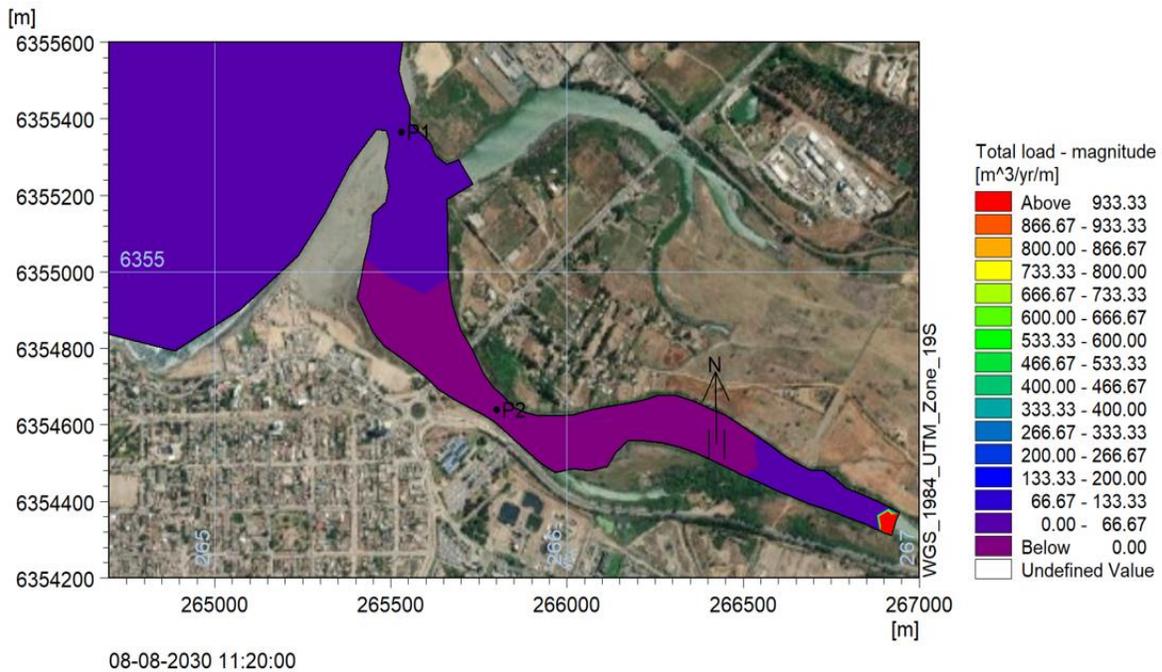


Figura 65: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 1, en condición "proyectada de sequía" para un día de invierno, 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

## Capítulo 4: Resultados

De la misma forma, en las Figuras 66 y 67, se presentarán resultados utilizando la Forma 2, para un día de verano e invierno respectivamente.

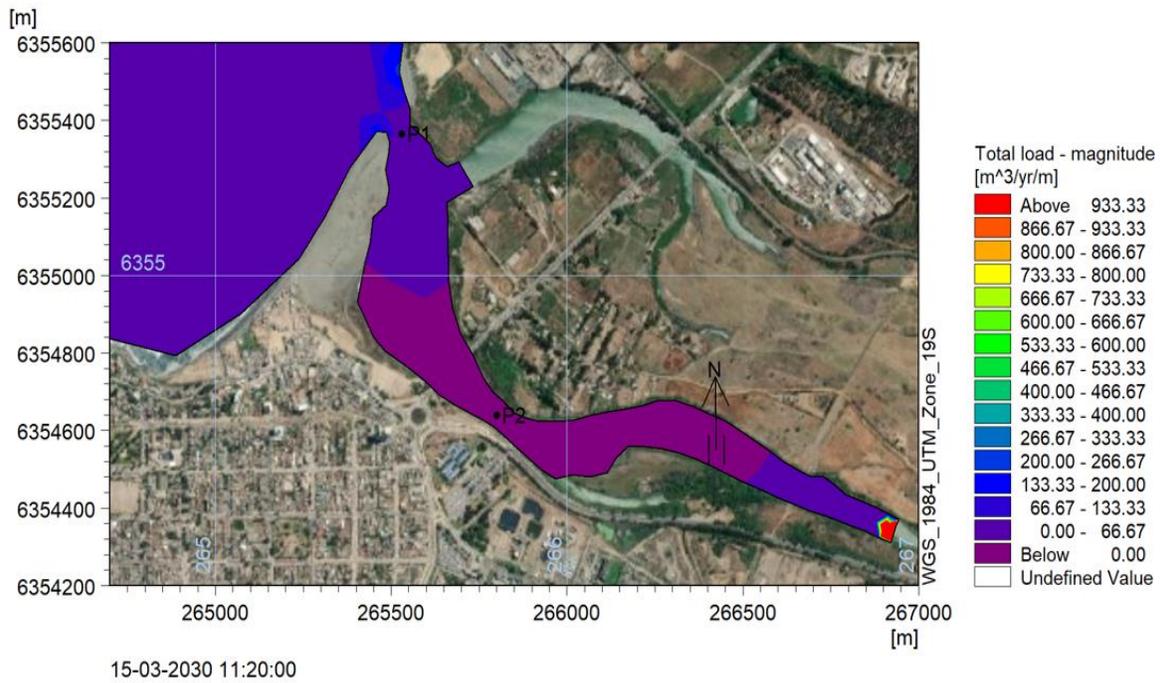


Figura 66: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición "proyectada de sequía" para un día de verano, 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

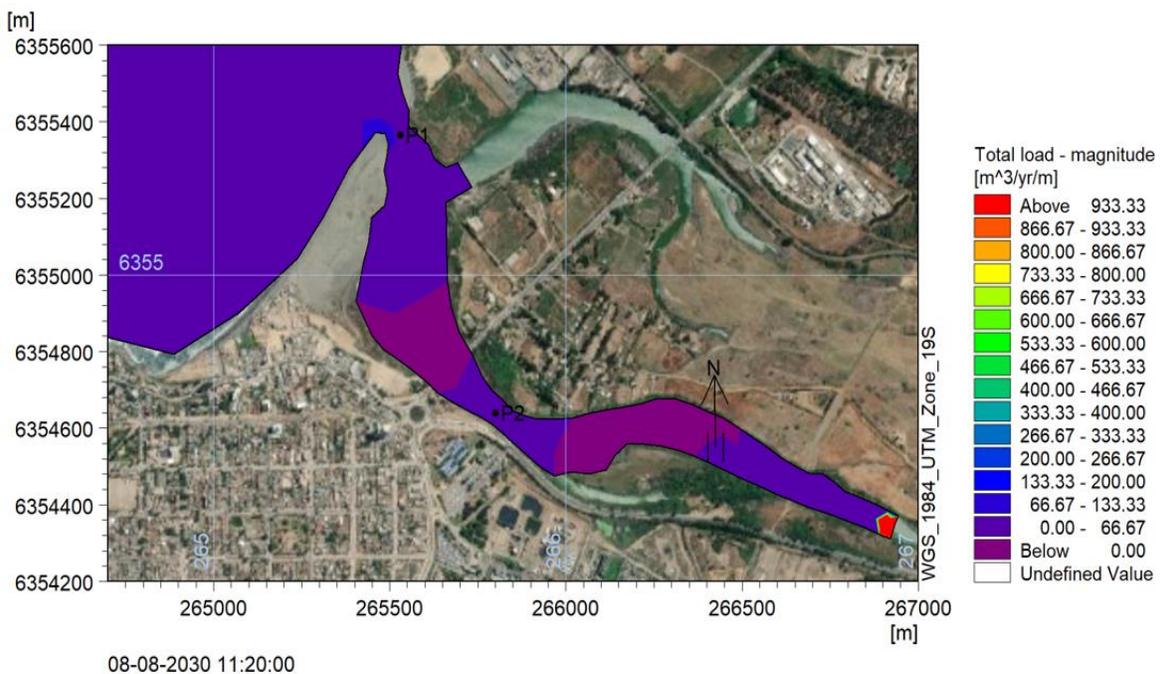


Figura 67: Transporte de sedimentos (magnitud total) desde el medio fluvial hacia la costa con Forma 2, en condición "proyectada de sequía" para un día de invierno, 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21 módulo ST).

## Capítulo 4: Resultados

---

- Punto río 1:

Según los resultados para el año 2030, en la Tabla 19 y 20 se presentarán los promedios mensuales de los sedimentos transportados en [m<sup>3</sup>/yr/m] en el Punto 1 para la Forma 1 y 2 respectivamente.

Año	Mes	Promedio mensual Qst [m <sup>3</sup> /yr/m]
2030	1	909,73
2030	2	106,15
2030	3	129,48
2030	4	120,72
2030	5	109,85
2030	6	113,67
2030	7	139,38
2030	8	135,97
2030	9	142,87
2030	10	146,34
2030	11	168,99
2030	12	162,72

Tabla 19: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 1, en una condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia).

Año	Mes	Promedio mensual Qst [m <sup>3</sup> /yr/m]
2030	1	9685,71
2030	2	307,65
2030	3	368,57
2030	4	361,90
2030	5	328,40
2030	6	325,83
2030	7	383,59
2030	8	397,95
2030	9	429,20
2030	10	456,12
2030	11	530,33
2030	12	502,18

Tabla 20: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 1 con la Forma 2, en una condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia).

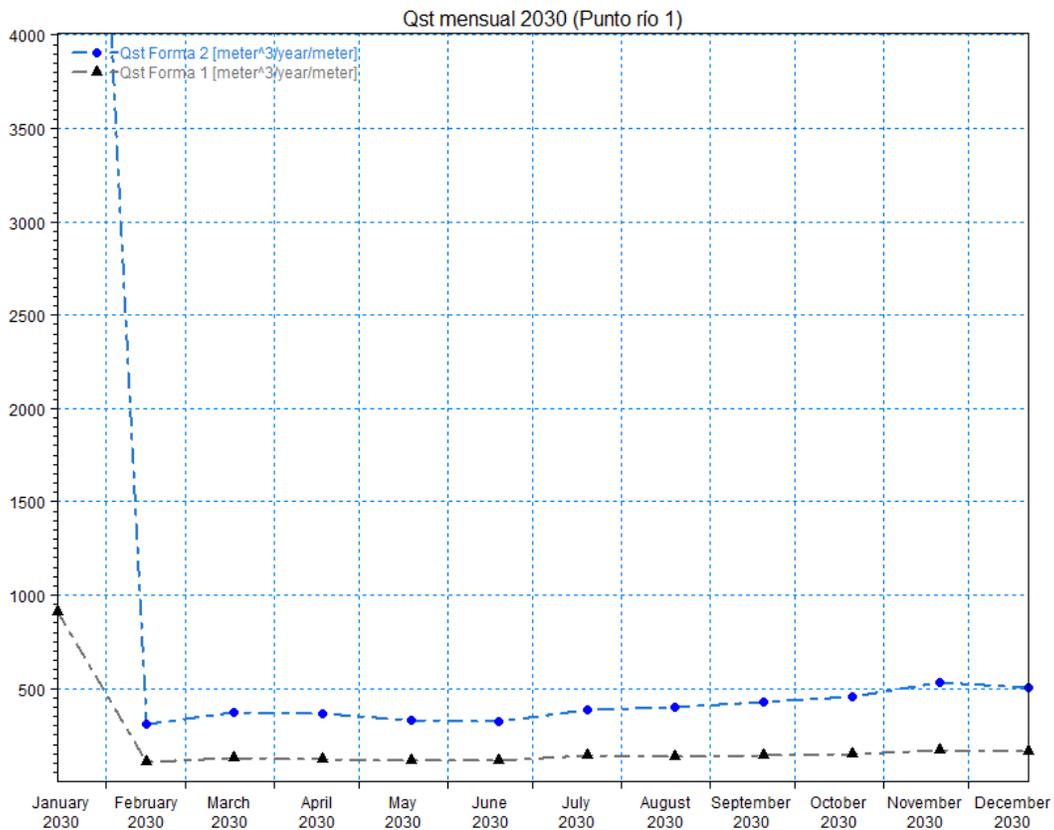


Figura 68: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 1 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).

Usando la Forma 1, el transporte de sedimentos medio total resultante para el punto 1 del río en los meses de verano e invierno es de 1308,8 [m³/yr/m] y de 531,89 [m³/yr/m] respectivamente, disminuyendo durante los meses de invierno en un ~59,34%. Luego, empleando la Forma 2 para los meses de verano e invierno, entregan un valor de 10864,11 [m³/yr/m] y 1536,57 [m³/yr/m] respectivamente, disminuyendo en los meses de invierno en un ~85,86% para el Punto río 1.

Por lo tanto, para un año en el que se proyecta la condición “de sequía”, las cantidades medias transportadas, considerando sólo los meses de verano e invierno suman 1839,97 [m³/yr/m] y 12400,68 [m³/yr/m] para la Forma 1 y 2 respectivamente. Con esta información, es importante señalar que existe una diferencia con respecto al año 2015, presentando una disminución en el transporte del ~48,36% utilizando la Forma 1, y del ~25,51% usando la Forma 2.

Luego, complementando la información anterior, se prevé que el transporte anual de sedimentos disminuirá significativamente al 2030, presentando un porcentaje de disminución del ~59,8% (Forma 1) y del ~41,03% (Forma 2) en el Punto río 1.

## Capítulo 4: Resultados

---

- Punto río 2:

Según los resultados para el año 2030, en la Tabla 21 y 22 se presentarán los promedios mensuales de los sedimentos transportados en [m<sup>3</sup>/yr/m] en el Punto 1 para la Forma 1 y 2 respectivamente.

Año	Mes	Promedio mensual Qst [m <sup>3</sup> /yr/m]
2030	1	96,70
2030	2	0,89
2030	3	1,00
2030	4	0,55
2030	5	0,49
2030	6	0,73
2030	7	1,44
2030	8	1,37
2030	9	1,92
2030	10	1,93
2030	11	2,99
2030	12	2,19

Tabla 21: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 1, en una condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia).

Año	Mes	Promedio mensual Qst [m <sup>3</sup> /yr/m]
2030	1	451,28
2030	2	2,75
2030	3	3,16
2030	4	2,58
2030	5	2,36
2030	6	2,64
2030	7	4,31
2030	8	5,03
2030	9	5,93
2030	10	6,45
2030	11	8,66
2030	12	8,23

Tabla 22: Promedios mensuales de los sedimentos transportados al Punto río 2 con la Forma 2, en una condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia).

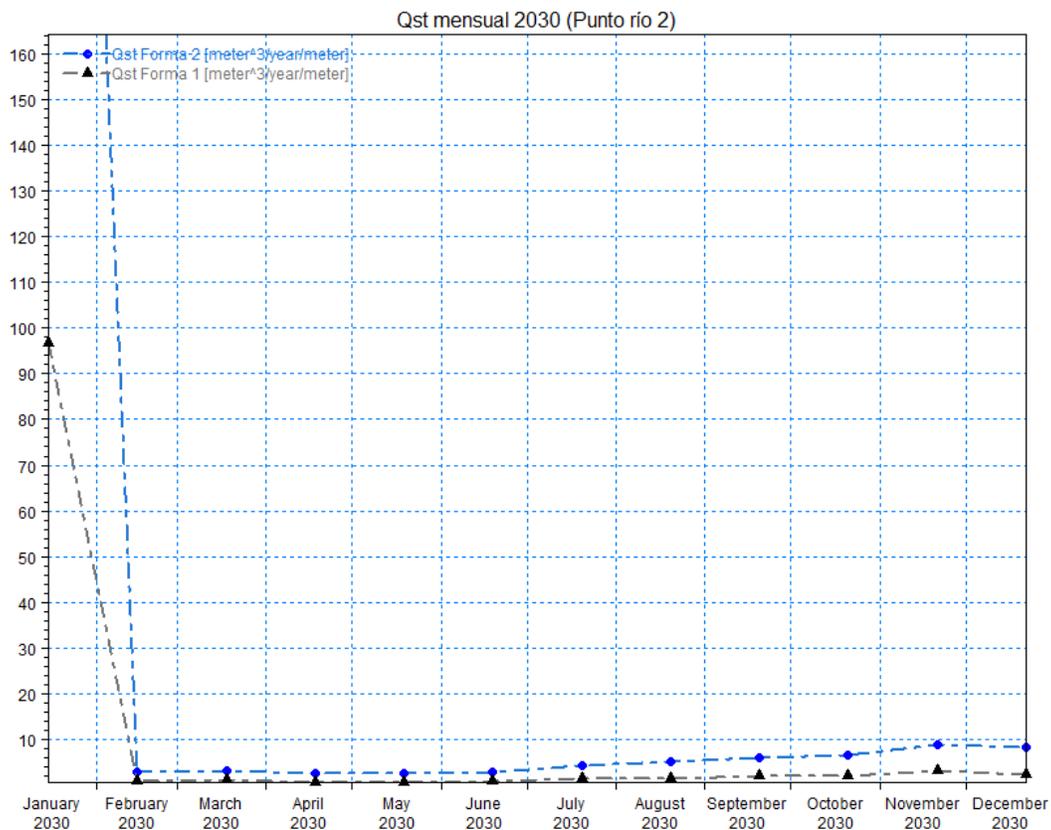


Figura 69: Comparación de los promedios mensuales transportados al Punto río 2 obtenidos para la Forma 1 y 2, en condición “proyectada de sequía” durante el año 2030 (Elaboración Propia, DHI MIKE 21).

Al igual que en los casos previos, considerando las figuras y tablas previas para cada uno de los puntos, es posible encontrar ciertas tendencias en cada formulación empleada (Forma 1 y 2), tanto para el Punto río 1 y 2.

En el Punto río 2, se observan variaciones significativas en el transporte de sedimentos en los meses de verano e invierno, mostrando una clara disminución entre ambos periodos. Por ende, para demostrar lo anterior, se determina que en el periodo estival se obtuvo un transporte de 100,8 [m³/yr/m] y en invierno de 5,46 [m³/yr/m], usando la Forma 1. De manera similar, usando la Forma 2, para los meses de verano resulta un transporte de 465,4 [m³/yr/m] y de 17,91 [m³/yr/m], para los meses de invierno.

Además, en la Figura 65 y 67 se observa que existe una significativa disminución del transporte de sedimentos proyectada al 8 de agosto del 2030. De acuerdo a lo anterior, se proyecta que el caudal será de ~15,52 [m³/s] para ese día, obteniéndose un transporte nulo en los puntos 1 y 2 del río utilizando la Forma 1, y un transporte de 19,3 [m³/yr/m] y de 2,19 [m³/yr/m] en los puntos 1 y 2 respectivamente, usando la Forma 2. En ambos casos, se obtienen resultados desfavorables para el transporte de sedimentos desde el río, relacionándose con el caudal disponible para esa fecha.

Por lo tanto, considerando el año 2015, se prevé que el transporte anual de sedimentos disminuirá significativamente al 2030, presentando un porcentaje de disminución del ~59,84% (Forma 1) y del ~67,28% (Forma 2) en el Punto río 2.

Dado lo anterior, es posible inferir y entender que, para un año proyectado de sequía, existe una evidente disminución en el transporte de sedimentos hacia la costa, que puede ser explicada por la disminución de las precipitaciones (invierno) y, posiblemente, por la disminución glaciaria y del albedo desde la alta montaña (Cordillera de los Andes) que ocurre durante los meses de verano (Shaw et.al., 2021).

### 4.3.2 COMPARACIÓN DE LOS ESCENARIOS MODELADOS

#### 4.3.2.1 Comparación de la hidrodinámica bidimensional del medio oceánico

Según la estimación del Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) hacia la costa en cada uno de los puntos, los cuales fueron obtenidos utilizando la formulación de CERC (1984) y de Kamphuis (1991). Por lo tanto, se realizará una comparación anual para los años 1988, 2015 y 2030, relacionando el QL Neto [ $m^3/s$ ] con el azimut [ $^\circ$ ] que condiciona la línea de costa en cada uno de los puntos seleccionados. Esto permitirá saber si el medio oceánico tiene una influencia directa y dominante en los cambios que actualmente presenta la playa de Concón.

- Punto 1:

Con los datos obtenidos para un año húmedo (1988), en sequía (2015) y su proyección hasta el año 2030, se presentarán en las Figuras 70 y 71 las estimaciones del TLS empleando el método de CERC y Queens (Kamphuis) respectivamente para el Punto 1.

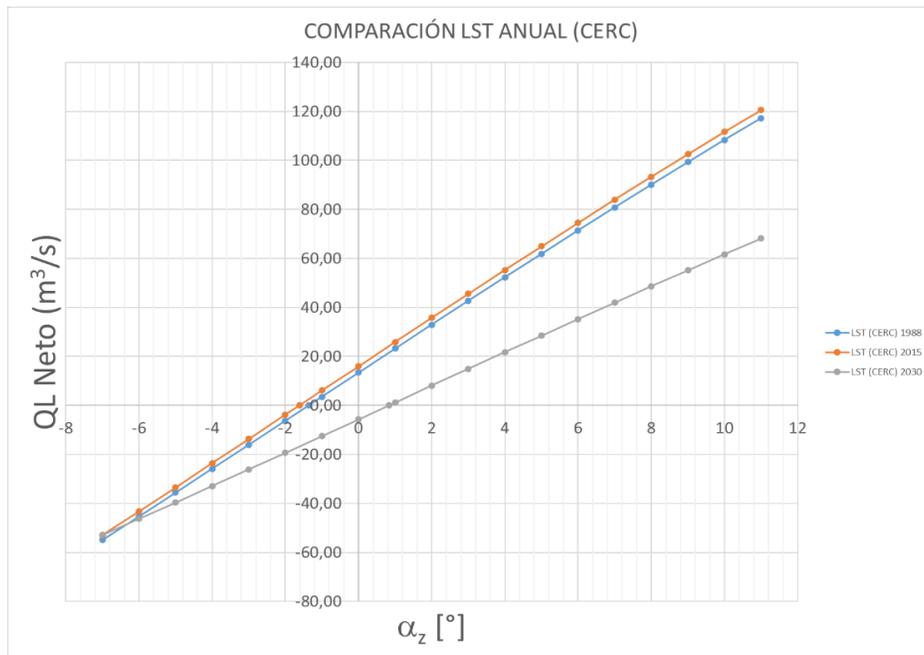


Figura 70: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (CERC) con distintos valores de azimut para el Punto 1 (Elaboración Propia).

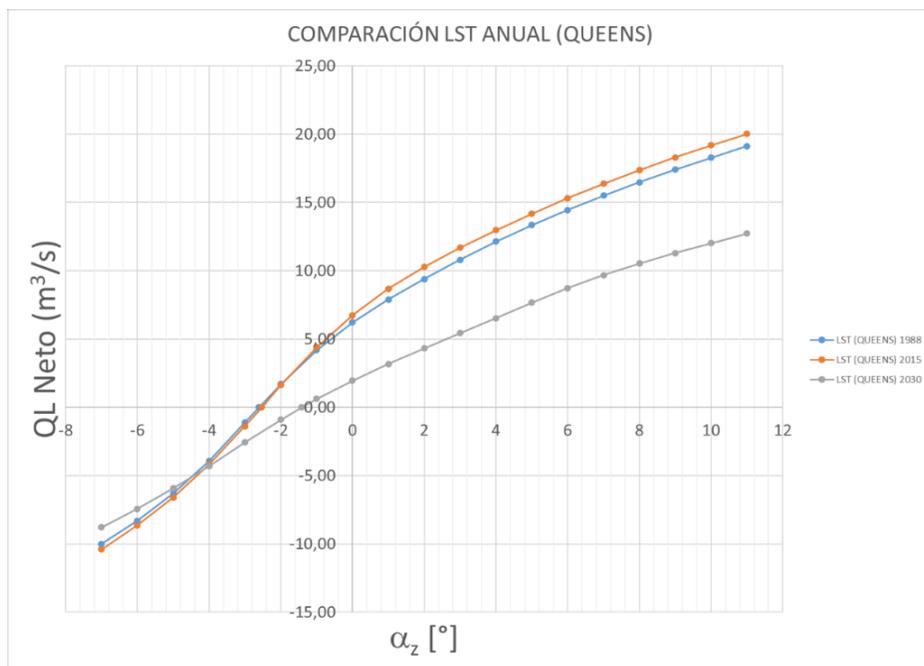


Figura 71: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (Queens) con distintos valores de azimut para el Punto 1 (Elaboración Propia).

En relación al TLS en el Punto 1, se observa en ambas figuras que las curvas presentan un comportamiento en común. Por ejemplo, para los años 1988 y 2015, la estimación de la capacidad de transporte de sedimentos (QL neto) cuando el azimut toma el valor de  $11^\circ$ , la diferencia porcentual entre ambos valores es del  $\sim 2,8\%$ . Sin embargo, para el año 2030, y para el mismo valor de azimut  $[\circ]$  existen grandes diferencias, disminuyendo su capacidad de transporte en un  $\sim 41,9\%$  (CERC) y en un  $\sim 33\%$  (Queens) con respecto al año 2015. De la misma forma, para este año (2030) se obtienen estimaciones de transporte bastante menores en comparación con las otras curvas anuales para la mayor parte de los azimuts dados. No obstante, pese a estas grandes variaciones, cuando se considera un valor de  $-4^\circ$  a  $-5^\circ$  (Queens) o cuando los azimuts se encuentran entre los  $-6^\circ$  a  $-7^\circ$  (CERC), las estimaciones del TLS tienden a “converger” disminuyendo esa diferencia.

Con respecto a la posición de equilibrio, se puede notar del Punto 1 que existe un cambio leve entre el año 1988 y 2015, que puede observarse en ambas formulaciones utilizadas. Por ejemplo, a través de la formulación del CERC, durante un año “normal” o “sin sequía”, se registró un azimut de equilibrio de  $-1,36^\circ$ , variando levemente la línea de costa ante la influencia de un oleaje propagado del SW. Luego, en el año 2015 (año “en sequía”), la posición de equilibrio no cambia significativamente, disminuyendo a  $-1,62^\circ$ . Sin embargo, para el año 2030, se proyecta que existirá un cambio importante en la posición de la línea de costa de más de  $2^\circ$  ( $\sim 2,45^\circ$ ), con un azimut de equilibrio de  $0,83^\circ$ .

Situación similar ocurre al emplear la formulación de Queens, dado que, para el año 1988 se registró un azimut de equilibrio de  $-2,61^\circ$ , presentando un leve aumento a  $-2,53^\circ$  en el año 2015. Al igual que con CERC, se proyecta al 2030 que el azimut cambiará a  $-1,42^\circ$ , por lo que la posición de equilibrio de la línea de costa se modificará significativamente en  $\sim 1,1^\circ$ , considerando la influencia de un oleaje propagado proveniente del SW.

Por otro lado, se observa que las tendencias de las curvas son parecidas en cada formulación, sin embargo, como bien se ha mencionado, existe una diferencia en la estimación de la capacidad potencial, debido a que la formulación del CERC tiende a sobrestimar el Transporte Longitudinal de Sedimentos. Por lo tanto, pese a visualizar diferencias importantes en las capacidades obtenidas, el comportamiento es similar en ambos métodos.

- Punto 2:

Similar al Punto 1, se presentarán en las Figuras 72 y 73 las estimaciones del TLS empleando el método de CERC y Queens (Kamphuis) para el Punto 2.

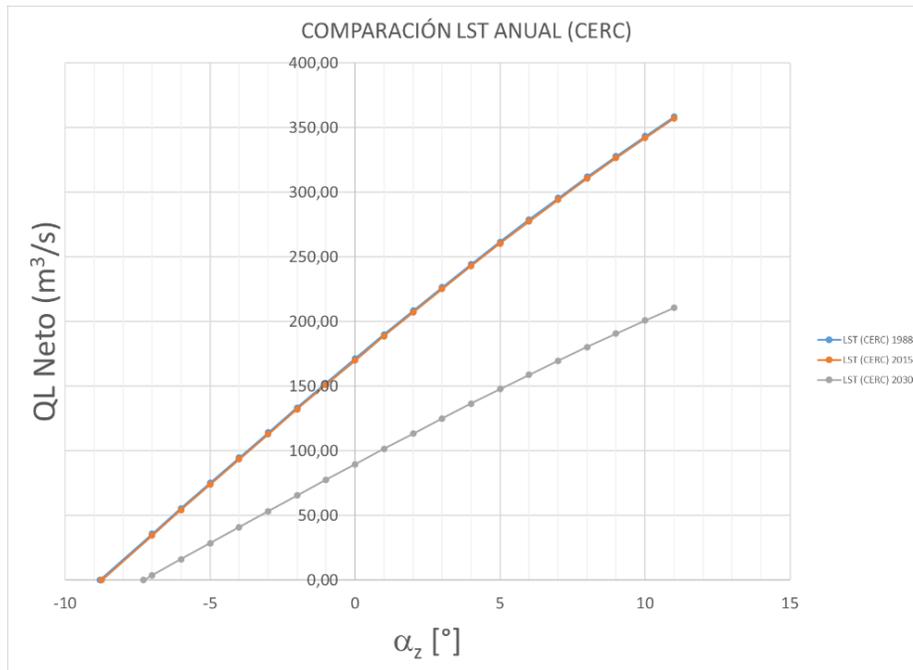


Figura 72: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (CERC) con distintos valores de azimuth para el Punto 2 (Elaboración Propia).

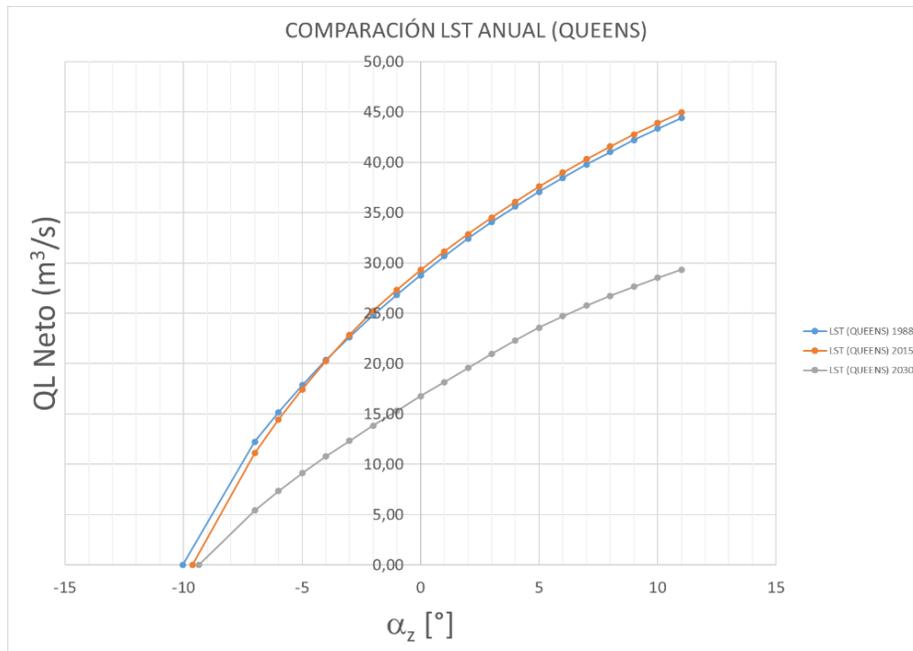


Figura 73: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (Queens) con distintos valores de azimuth para el Punto 2 (Elaboración Propia).

En relación al TLS en el Punto 2, las curvas correspondientes a los años 1988 y 2015 son casi idénticas, presentando leves diferencias menores al 1% (CERC). Sin embargo, tras aplicar la formulación del CERC, se obtienen mayores estimaciones del TLS en el año 1988 que en el 2015. Pero, al aplicar la formulación de Queens, estos resultados cambian presentando un leve aumento (~1%) en el año 2015 sobre el año 1988.

Por otro lado, para el año 2030, las diferencias son notorias en la capacidad estimada. Por ejemplo, cuando se propone un azimut de  $11^\circ$ , la capacidad estimada del TLS presenta una diferencia del ~41% (CERC) y del ~35% (Queens) con respecto al 2015, obteniendo estimaciones bastante menores para el rango de azimut definido.

Con respecto a la posición de equilibrio en el Punto 2, se presentan condiciones similares que en el Punto 1, estimando que los cambios de la línea de costa fueron mínimos en los años 1988 y 2015, siendo contrario a lo que ocurrirá en el año 2030.

En el año 1988 y 2015, usando la formulación del CERC, se registraron azimuts de equilibrio de  $-8,81^\circ$  y de  $-8,74^\circ$  respectivamente, observando entre ellos una leve variación de la línea de costa, estimando la presencia de un oleaje propagado proveniente desde el SW (tipo swell). Para el caso del año 2030, se estima que el azimut de equilibrio tenderá a aumentar significativamente en  $\sim 1^\circ$ .

Por otro lado, tras emplear la formulación de Queens, en el año 1988 y 2015 se registraron azimuts de equilibrio de  $-10,03^\circ$  y de  $-9,62^\circ$  respectivamente, presentando un aumento de  $\sim 0,4^\circ$  en el año 2015. Para el año 2030, se estima que el azimut aumentará alcanzando el valor de  $-9,36^\circ$ , visualizando que la posición de la línea de costa sufrirá cambios en comparación con el año 1988.

- Punto 3:

Finalmente, se presentarán en las Figuras 74 y 75 las estimaciones del TLS usando el método de CERC y Queens (Kamphuis) respectivamente para el Punto 3.

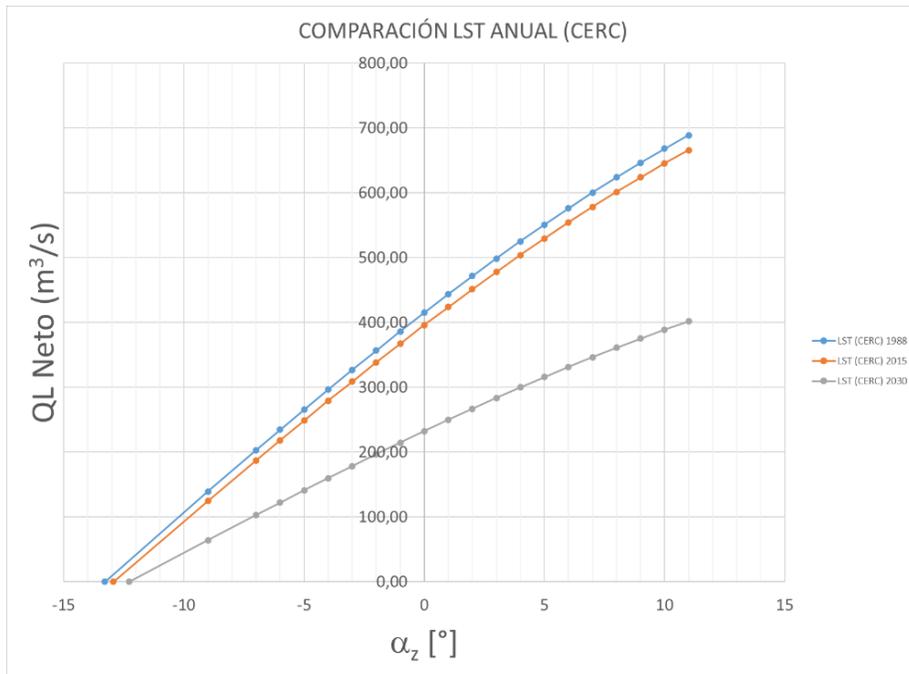


Figura 74: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (CERC) con distintos valores de azimut para el Punto 3 (Elaboración Propia).

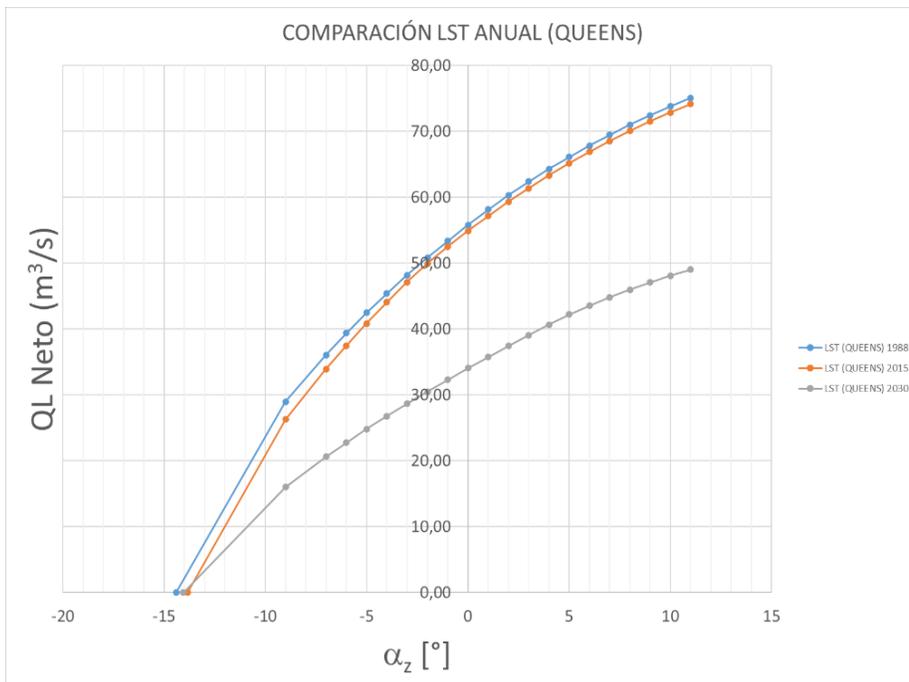


Figura 75: Comparación anual entre los años 1988, 2015 y 2030, relacionando los resultados del TLS (Queens) con distintos valores de azimut para el Punto 3 (Elaboración Propia).

En relación al TLS en el Punto 3, existe una leve tendencia en la curva asociada al año 2015, en la que las estimaciones potenciales son menores a las obtenidas en el año 1988. No obstante, la diferencia entre las estimaciones es baja. Por ejemplo, cuando se propone un valor de azimut de  $11^\circ$ , la diferencia de las estimaciones de ambos años es del  $\sim 3\%$  (CERC) y del  $\sim 1\%$  (Queens). Cabe señalar que la curva anual 1988 entrega estimaciones mayores que las otras curvas, por lo que las capacidades van disminuyendo hasta llegar al año 2030.

Sin embargo, similar a los otros puntos, existe una subestimación de las capacidades potenciales del TLS en el año 2030, cuyas diferencias son evidentes. Cuando se propone el mismo valor de azimut ( $11^\circ$ ), la diferencia con respecto al año 2015 es del  $\sim 40\%$  (CERC) y del  $\sim 34\%$  (Queens). Además, para resto de los valores de azimut dados, las estimaciones obtenidas presentan grandes variaciones en relación a otros años.

Con respecto a la posición de equilibrio en el Punto 3, se visualizan cambios similares que en el Punto 2, siendo mínimos en los años 1988 y 2015, aumentando en el año 2030.

Usando la formulación del CERC, en el año 1988 y 2015 se registraron azimuts de equilibrio de  $-13,3^\circ$  y de  $-12,94^\circ$  respectivamente, observando entre ellos una leve variación de la línea de costa de  $\sim 0,3^\circ$ . Para el año 2030, se estima que el azimut de equilibrio tenderá a aumentar en  $\sim 0,6^\circ$ .

Luego, utilizando la formulación de Queens, en el año 1988 y 2015 se registraron azimuts de equilibrio de  $-14,4^\circ$  y de  $-13,85$  respectivamente, presentando un leve aumento de  $\sim 0,5^\circ$  en el año 2015. Por otro lado, en el año 2030 la situación cambia, ya que se estima que el azimut disminuirá levemente en  $-14,06^\circ$ . Sin embargo, pese a esta disminución del azimut, se espera que los cambios en la posición de equilibrio aumenten para este año.

De forma preliminar, es posible inferir que la posición de equilibrio se está adaptando de forma “natural” de acuerdo a la dinámica litoral del sector, presentando grandes cambios al 2030 ante la influencia del medio oceánico. También se estima que la influencia de la difracción en el Punto 1 es mayor que del Punto 2 y 3 por estar más cercano a la punta Concón, pudiendo ser la razón por la que se obtienen valores de azimut de equilibrio más altos que en los otros puntos (efecto pivote).

### 4.3.2.2 Comparación de la hidrodinámica bidimensional del medio fluvial

En base a la estimación del transporte de sedimentos desarrollado en el medio fluvial, aplicando la Forma 1 (Engelund – Fredsøe, Van Rijn) y Forma 2 (Engelund – Hansen, Van Rijn), se efectuarán comparaciones para cada uno de los puntos por año (1988, 2015 y 2030) para describir y analizar si existe alguna influencia de la sequía en el transporte de sedimentos hacia la costa desde el río Aconcagua, luego de haber condicionado la simulación en el programa DHI MIKE 21 con sus respectivos forzantes (i.e. caudales).

## Capítulo 4: Resultados

- **Punto río 1:**

Con los datos obtenidos para un año húmedo (1988), en sequía (2015) y su proyección hasta el año 2030, se presentarán en las Figuras 76 y 77 (Forma 1 y 2 respectivamente) los promedios mensuales de los sedimentos transportados en  $[m^3/yr/m]$  de cada año para el Punto río 1.

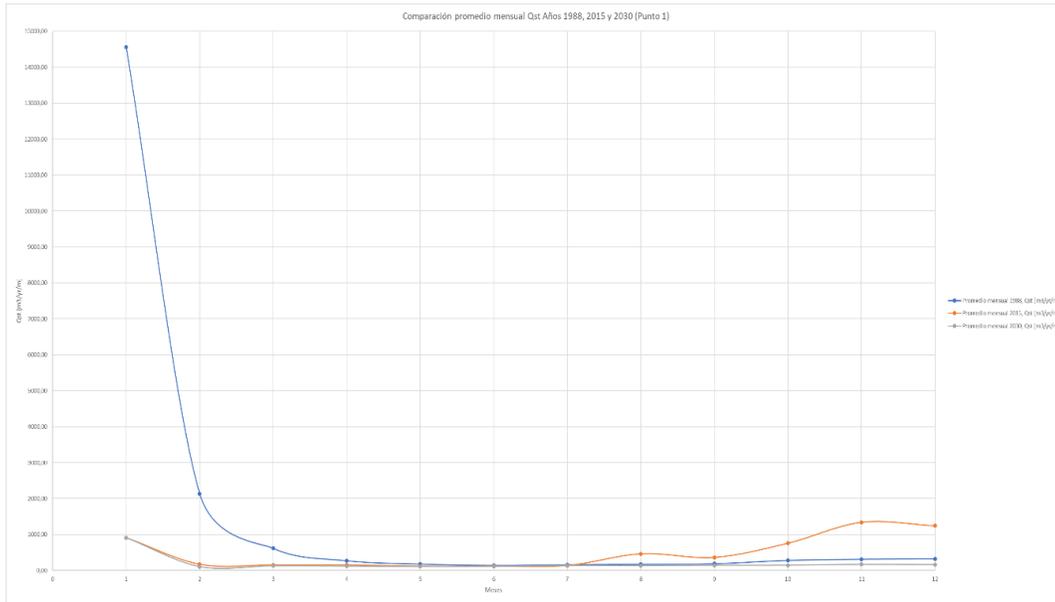


Figura 76: Comparación de los promedios mensuales de Qst  $[m^3/yr/m]$  para los años 1988, 2015 y 2030, obtenidos mediante la Forma 1 para el Punto río 1 (Elaboración Propia).

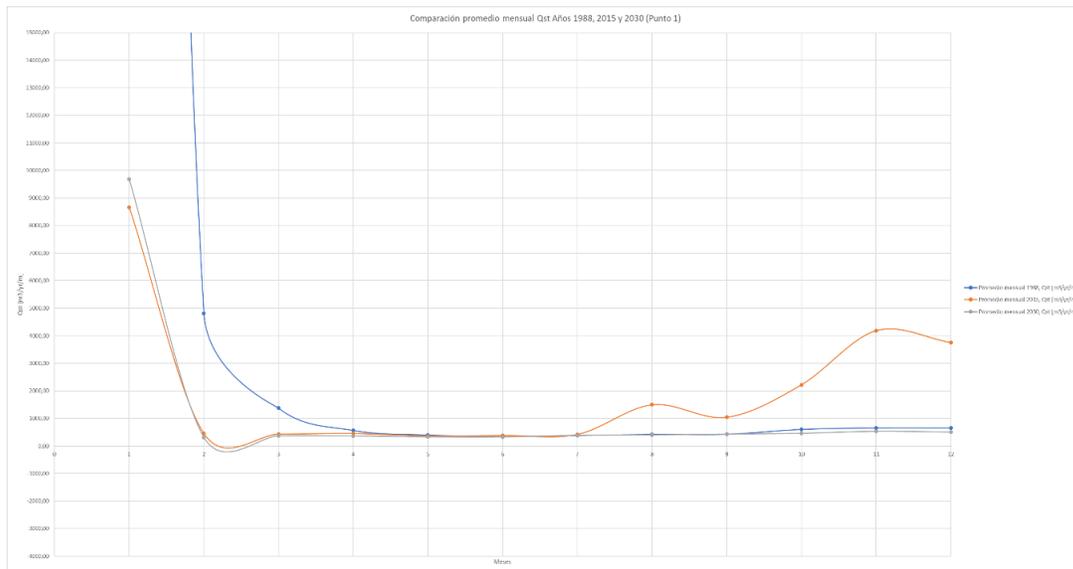


Figura 77: Comparación de los promedios mensuales de Qst  $[m^3/yr/m]$  para los años 1988, 2015 y 2030, obtenidos mediante la Forma 2 para el Punto río 1 (Elaboración Propia).

## Capítulo 4: Resultados

- **Punto río 2:**

Con los datos obtenidos para un año húmedo (1988), en sequía (2015) y su proyección hasta el año 2030, se presentarán en las Figuras 78 y 79 (Forma 1 y 2 respectivamente) los promedios mensuales de los sedimentos transportados en  $[m^3/yr/m]$  de cada año para el Punto río 2.

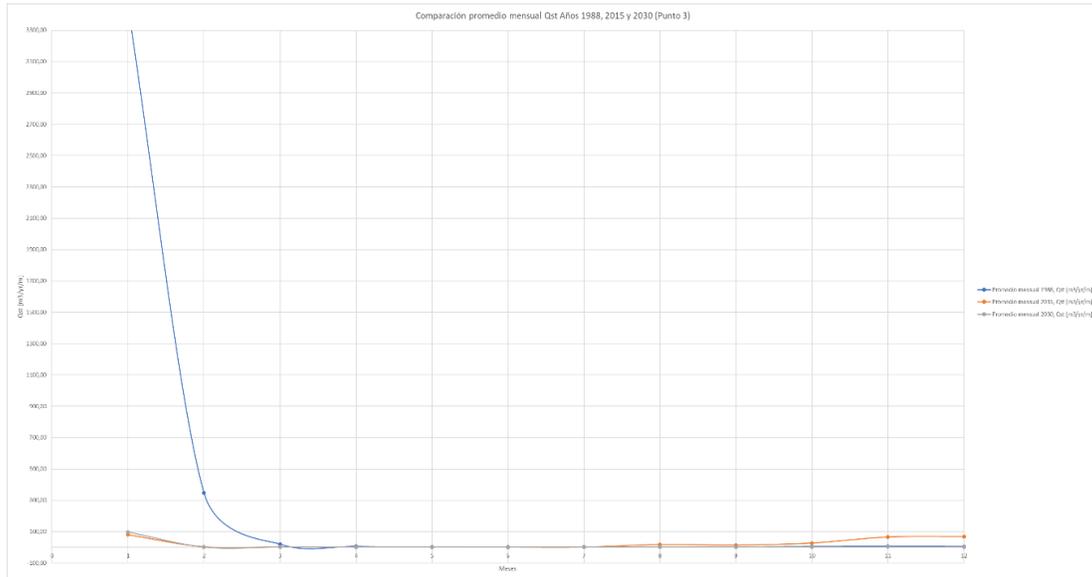


Figura 78: Comparación de los promedios mensuales de Qst  $[m^3/yr/m]$  para los años 1988, 2015 y 2030, obtenidos mediante la Forma 1 para el Punto río 2 (Elaboración Propia).

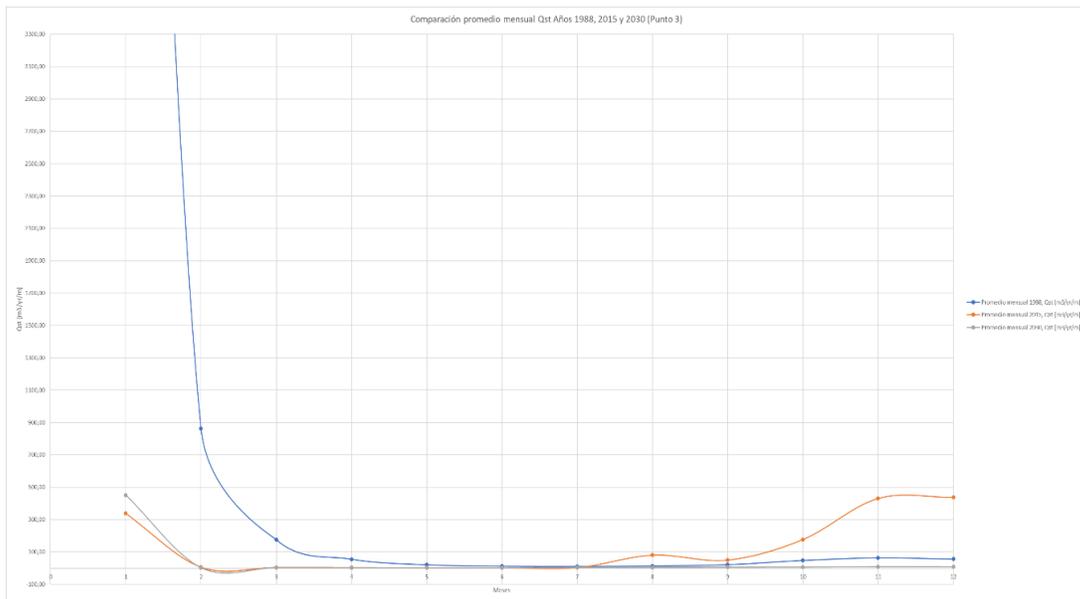


Figura 79: Comparación de los promedios mensuales de Qst  $[m^3/yr/m]$  para los años 1988, 2015 y 2030, obtenidos mediante la Forma 2 para el Punto río 2 (Elaboración Propia).

De los esquemas propuestos, se visualiza que los principales peaks de transporte de sedimentos mediante ambas formulaciones (Forma 1 y 2), se obtienen en los meses estivales, principalmente durante el mes de enero. Aun así, existe una tendencia al aumento que comienza en el mes de octubre y finaliza a mediados de otoño.

Ante esto, este comportamiento está vinculado a lo propuesto por Martínez, et.al. (2012), en la que mencionan que hay una mayor alimentación de gasto líquido en la cuenca del Aconcagua durante los periodos estivales, manifestando que existe un marcado régimen mixto (nival y pluvial) en algunos meses y que, eventualmente, condicionan la disponibilidad fluvial del río Aconcagua.

Por lo tanto, es preciso notar que los resultados obtenidos del transporte de sedimentos en el medio fluvial pueden estar relacionados entre sí con los caudales disponibles durante este periodo para cada uno de los años analizados.

## 5 DISCUSIÓN

### 5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los antecedentes en el sector de estudio, Winckler et. al. (2019) consideran que los eventos de alta energía del oleaje provocan un desgaste significativo en la playa de Concón, en la que, para ciertos tramos de la línea de costa, la erosión oscila entre los -0,5 a -1,5 [m/año] (erosión moderada) y, en otros, supera ese límite sobre los -1,5 [m/año] (erosión elevada o alta). Sin embargo, es posible complementar ese análisis considerando el Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS) hacia la costa desde el medio oceánico, junto con el transporte de sedimentos de las partículas presentes en el canal aluvial aledaño, es decir, que provienen del río Aconcagua. Por lo tanto, se busca relacionar ambos medios en base al balance sedimentológico generado en el sector de estudio, según lo señalado en el Capítulo 2.

#### 5.1.1 COMPORTAMIENTO DE LOS SEDIMENTOS DESDE EL MEDIO FLUVIAL

De los promedios mensuales obtenidos para los años 1988, 2015 y 2030 en cada uno de los puntos, es posible entender el comportamiento de los sedimentos que son transportados desde aguas arriba del río Aconcagua hacia su desembocadura.

Al analizar los resultados para cada uno de los puntos, se presenta que la cantidad de sedimentos anuales transportados [ $m^3/yr/m$ ], desde un año húmedo seleccionado (1988) hasta la proyección de un año en sequía (RCP 8.5, 2030), han disminuido significativamente. Por ejemplo, en el Punto río 1 y utilizando la formulación de Engelund – Fredsøe ( $q_{bl}$ ) y Van Rijn ( $q_{sl}$ ) para la simulación en el módulo ST de DHI MIKE 21 (Forma 1), se observa que la suma total estimada de los promedios mensuales de los sedimentos transportados para el año 1988 fueron de 19330,8 [ $m^3/yr/m$ ]. En el caso de la sequía proyectada (año 2030), en función de un escenario climático desfavorable, se tiene que la cantidad total anual media estimada será de 2385,9 [ $m^3/yr/m$ ], presentando una disminución del 87,67%.

De la misma forma, utilizando la formulación de Engelund – Hansen ( $q_{bl}$ ) y Van Rijn ( $q_{sl}$ ) (Forma 2), la cantidad media estimada para el año 1988 fueron de 102266,5 [ $m^3/yr/m$ ], mientras que para el año 2030 se estima que será de 14077,4 [ $m^3/yr/m$ ] para el Punto río 1, demostrando que existe una tendencia a la disminución de la cantidad transportada de sedimentos proveniente del río Aconcagua con un porcentaje del 86,23%. Además, es preciso notar que la tendencia anterior tiene una directa relación con la disminución de los caudales disponibles para la zona de estudio (i.e. estuario del río) debido a la escasez de precipitaciones registradas aguas arriba del río. La relación “caudal anual disponible vs sedimentos transportados” en el Punto río 1, aplicando la Forma 1, puede observarse en la Figura 80.

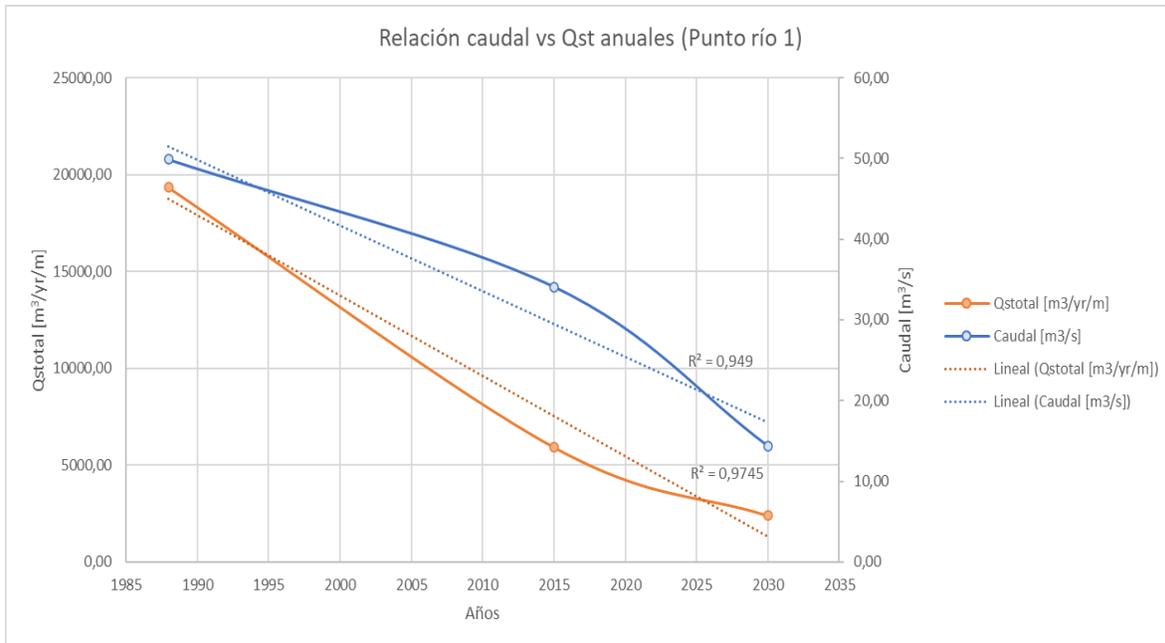


Figura 80: Relación entre el caudal medio anual y el transporte medio anual para el Punto río 1, aplicando la Forma 1 (Elaboración Propia).

Para el punto 2 del río, la tendencia que relaciona los caudales con el transporte de sedimentos concuerda con lo descrito previamente, obteniendo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,9 para la Forma 1. De manera similar, aplicando la Forma 2, se establece la relación anterior para el Punto río 1 (Figura 81).

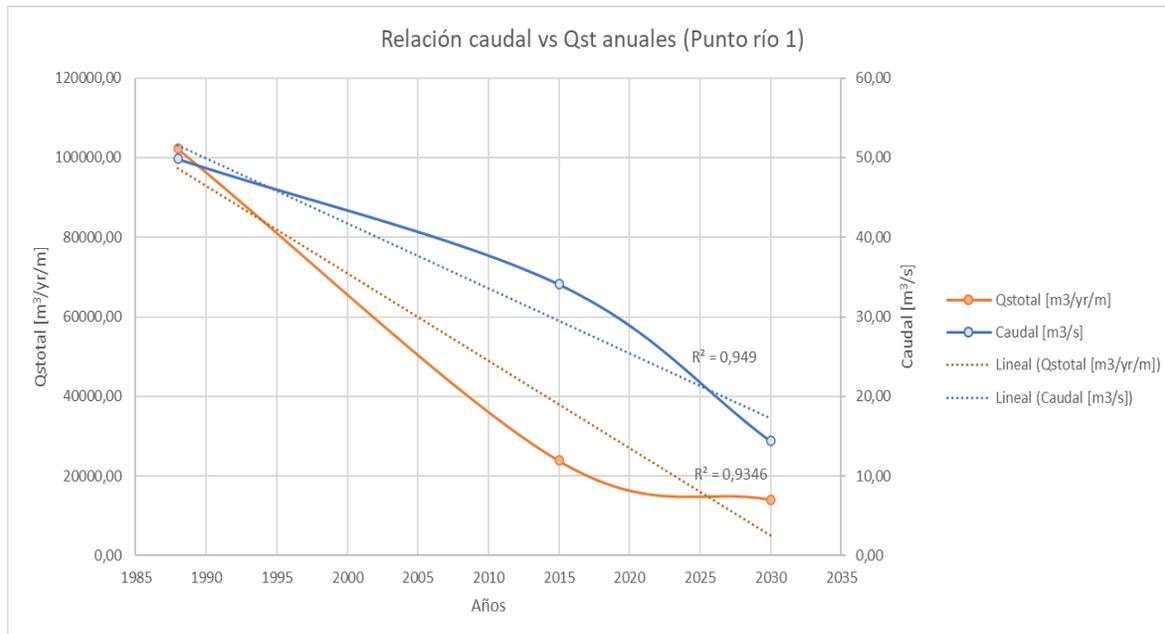


Figura 81: Relación entre el caudal medio anual y el transporte medio anual para el Punto río 1, aplicando la Forma 2 (Elaboración Propia).

De igual manera, para el punto 2 del río, la tendencia que relaciona los caudales con el transporte de sedimentos es similar a lo descrito en el Punto río 1 (Forma 2), presentando un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,93 utilizando la Forma 2.

### 5.1.2 COMPORTAMIENTO LITORAL SEGÚN EL AZIMUT DE EQUILIBRIO

Con respecto a la relación de los valores de azimut en los puntos 1, 2 y 3 usando ambas formulaciones, se obtienen representaciones que siguen una tendencia en común cuando el balance de sedimentos en los puntos (QL Neto [ $m^3/s$ ]) se aproxima a cero ( $\approx 0$ ).

En la Tabla 23 se muestran los azimuts de equilibrio [ $^\circ$ ] por año en cada uno de los puntos seleccionados en la bahía de Concón, aplicando la formulación de CERC y de Kamphuis para la estimación del TLS.

	Método TLS	Azimut [ $^\circ$ ] por Años				
		1988	2015	2030	[1988 - 2015]	[2015 - 2030]
Punto 1	CERC	-1,36	-1,62	0,83	-0,26	2,45
	QUEENS	-2,61	-2,53	-1,42	0,08	1,11
Punto 2	CERC	-8,81	-8,74	-7,3	0,07	1,44
	QUEENS	-10,03	-9,62	-9,36	0,41	0,26
Punto 3	CERC	-13,3	-12,94	-12,29	0,36	0,65
	QUEENS	-14,4	-13,85	-14,06	0,55	-0,21

Tabla 23: Azimuts de equilibrio [ $^\circ$ ] para los puntos ubicados en la bahía de Concón cuando el QL Neto resultante se aproxima a cero (Elaboración Propia).

De la tabla anterior se infiere que los azimuts de equilibrio tienden a aumentar levemente su valor desde un año húmedo (1988) hasta alcanzar un año en sequía (2015). Sin embargo, ante un escenario desfavorable (2030), los azimuts de equilibrio aumentarían notoriamente en los puntos seleccionados, principalmente en el Punto 1 (Tabla 23).

Para este caso, cuando se tiene un QL Neto cero (playa en equilibrio), la acción del oleaje incidente influye directamente en los cambios morfológicos que presenta y presentará la línea de costa hasta alcanzar su condición de equilibrio. No obstante, es preciso notar que los cambios en el azimut no son significativos entre los años 1988 y 2015, pero sí lo sería ante una condición proyectada al año 2030.

Tomando en cuenta que se prevé que los eventos de clima extremo aumenten con el tiempo debido al cambio climático (Winckler et.al., 2019), es de suponer que los cambios morfológicos que presenta la costa aledaña (en términos erosivos) y su proyección al año 2030 podrían estar directamente relacionadas a la propia adaptación de la línea de costa observada en los puntos 1, 2 y 3 (obedeciendo al dinamismo natural de la playa), por la estimación de la capacidad transportada de sedimentos desde el medio oceánico (TLS) y por la estimación de los aportes de sedimentos desde el río Aconcagua.

### 5.1.3 COMPORTAMIENTO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DESDE EL MEDIO OCEÁNICO

#### 5.1.3.1 Estimación de la capacidad potencial transportada por año (TLS)

De los esquemas se infiere que al aplicar CERC para la estimación de TLS en el Punto 1, la suma de los QL netos [m<sup>3</sup>/s] obtenidos dentro de un rango de azimut en común (desde los 11° a -7°) para el año 2030 (sequía proyectada) es de 149,63 [m<sup>3</sup>/s], siendo un valor menor en comparación con años previos (613,4 [m<sup>3</sup>/s] en el 1988 y 665,08 [m<sup>3</sup>/s] en el 2015). Para el caso de las estimaciones del TLS en el mismo punto tras aplicar Queens, la suma de los QL netos por año, obtenidos para un mismo rango de azimut, siguen la misma tendencia que las estimaciones de CERC, dado que sus valores corresponden a 137,2 [m<sup>3</sup>/s] (1988), 145,88 [m<sup>3</sup>/s] (2015) y 64,68 [m<sup>3</sup>/s] (2030). Por lo tanto, bajo una condición proyectada de sequía, desde el 2015 al 2030, se prevé que la capacidad potencial de transporte hacia la costa disminuya un 77,5% y un 55,7%, obtenidos a través de CERC y Queens respectivamente.

Para el Punto 2, se presenta una condición similar al punto anterior, ya que la suma de los QL netos anuales obtenidos, aplicando CERC y bajo el mismo rango de azimut, serían de 3878,04 [m<sup>3</sup>/s] (1988), 3852,2 [m<sup>3</sup>/s] (2015) y 2109,33 [m<sup>3</sup>/s] (2030). De igual forma, aplicando Queens, las sumas netas anuales serían de 587,81 [m<sup>3</sup>/s] (1988), 592,7 [m<sup>3</sup>/s] (2015) y 358,22 [m<sup>3</sup>/s] (2030). Ante esto, se estima que la capacidad potencial de transporte hacia la costa disminuya un 45,2% (CERC) y un 39% (Queens) en el año 2030.

Finalmente, para el Punto 3 y aplicando CERC, se tiene que las estimaciones netas transportadas por año obtenidas son 8913,96 [m<sup>3</sup>/s] (1988), 8521,06 [m<sup>3</sup>/s] (2015) y 5032,08 [m<sup>3</sup>/s] (2030), para un mismo rango de azimut [°]. De la misma forma, usando Queens, los valores obtenidos son 1140,98 [m<sup>3</sup>/s] (1988), 1117,32 [m<sup>3</sup>/s] (2015) y 709,84 [m<sup>3</sup>/s] (2030), los cuales concuerdan con la tendencia que resulta de las estimaciones por CERC. Por ende, se estima que la capacidad potencial de transporte disminuya un 40,9% y un 36,5% en el año 2030, obtenidos mediante CERC y Queens respectivamente.

#### 5.1.3.2 Estimación del transporte de sedimentos en la costa

De acuerdo a las estimaciones de la capacidad potencial de sedimentos transportados hacia la costa por año, se presenta una estimación del transporte de sedimentos en [m<sup>3</sup>/yr/m] desde el litoral.

En el medio fluvial, se observó que hubo una disminución en el transporte de sedimentos desde un año húmedo a un año seco (2010 – 2030) debido a la disminución de los caudales disponibles en el canal aluvial. Esta disminución está directamente asociada a la falta de precipitaciones y a las condiciones climáticas que se han mantenido en la actualidad.

En el medio oceánico no es la excepción, por lo que, considerando los efectos del transporte de sedimentos desde el río Aconcagua frente a la bahía de Concón, se estima que, mediante la Forma 1 (Engelund – Fredsøe, Van Rijn), entre los años 1988 – 2015 se presentó una disminución en el transporte de sedimentos en un 57,8%. De manera similar, entre los años 2015 – 2030, se proyecta que la disminución en el transporte de sedimentos será de un 83,9%.

Estos resultados se asemejan a los obtenidos a través de la Forma 2 (Engelund – Hansen, Van Rijn), dado que, entre los años 1988 – 2015, se estima que hubo una disminución en el transporte de sedimentos en un 57,2%, y entre los años 2015 – 2030, se proyecta que la disminución en el transporte de sedimentos será de un 70,7%.

Se infiere que esta disminución puede estar asociada también a la rigidización del borde costero y a la recurrente limitación que tienen ciertos forzantes en el balance sedimentológico (e.g. transporte eólico desde las dunas aledañas).

### 5.1.4 COMPORTAMIENTO DE AMBOS MEDIOS EN EL BALANCE SEDIMENTOLÓGICO

Entonces, considerando las figuras 80 y 81 y las correlaciones obtenidas en el Punto río 2, es posible atribuir que existe una relación estrecha entre el transporte de sedimentos del río con los caudales disponibles al utilizar ambas formulaciones empíricas (Engelund - Fredsøe y Engelund - Hansen, Van Rijn). Por lo tanto, ante una condición “de sequía” dada por su proyección al año 2030, se estima que existirá una disminución en el transporte de sedimentos hacia la costa, afectando la disponibilidad de sedimentos en la playa de Concón y su morfología (disminución de los aportes del río en el balance sedimentológico debido a la sequía).

Cabe señalar que este problema podría agravarse considerando que, en el último tiempo, según Fundación Chile (2019), ha existido un aumento en la extracción de áridos en la cuenca del Aconcagua afectando la morfología del río. Además, según Shaw et.al. (2021) habría una tendencia a la disminución del albedo disponible incidiendo en los deshielos desde la cordillera (i.e. Juncal), condicionando el régimen nival que caracteriza al río Aconcagua en las zonas altas de la cuenca y la disponibilidad del recurso hídrico aguas abajo.

Con respecto a los resultados en el medio oceánico, debido a que los cambios del azimut de equilibrio [°] no fueron significativos en los años 1988 y 2015, pero que en el año 2030 se prevé que aumentará significativamente, se espera que la tendencia de la posición de equilibrio de la línea de costa seguirá un proceso de ajuste natural obedeciendo a su dinámica litoral, visualizando que el Punto 1 funcionaría como un “punto pivote” con respecto a la evolución morfológica generada por los otros puntos seleccionados. De la misma forma, se visualiza que la capacidad potencial en el Transporte Longitudinal de

Sedimentos (TLS) se verá reducida al año 2030, considerando que también se prevé que existirá una disminución en el transporte de sedimentos hacia la costa en ese año. Por ende, la capacidad erosiva del océano al 2030 se vería reducida en comparación con los otros años comparados.

Por lo tanto, tomando ambos medios en cuenta, se estima que la influencia del oleaje incidente y el aumento de los eventos de clima extremo podrían explicar la erosión (media y alta) generada en la playa de Concón tal como plantea Winckler et.al. (2019). Sin embargo, se observa que esto obedecería más a un proceso de adaptación morfodinámica de la playa que a la capacidad erosiva del medio oceánico, debido a la disminución significativa del TLS al 2030. Por otro lado, se espera que los efectos erosivos en la costa pueden verse agravados debido a la sequía, condicionando la influencia del río Aconcagua en el balance sedimentológico costero. Dado lo anterior, se infiere que los bajos niveles de sedimentos aportados y su tendencia a la disminución al 2030, pueden condicionar la erosión actual y proyectada en la playa de Concón.

Ante esto, se espera que los cambios generados en la costa ante un evento de clima extremo podrían tener un mayor impacto debido a la baja alimentación de sedimentos desde el río Aconcagua y desde el océano, ajustándose un nuevo balance sedimentológico dentro de la bahía de Concón con menores aportes sedimentarios. No obstante, esto dependerá si se dispone de una mayor capacidad de transporte desde el medio oceánico que consiga aumentar su capacidad erosiva, situación que no se visualiza en los resultados presentados al 2030.

## **6 CONCLUSIÓN**

Dado el análisis previo, es posible señalar que los cambios morfológicos producidos en la playa de Concón pueden atribuirse principalmente a las condiciones propias del medio costero y su proyección al 2030, en la que el estado de la costa puede explicarse bajo el contexto de su dinámica litoral (proceso de adaptación de la línea de costa en el tiempo). Cabe señalar que esta situación puede verse influenciada por los efectos que ha generado la reducción de las precipitaciones en el río Aconcagua en estos últimos años, modificando el balance sedimentológico en el sector de estudio bajo el contexto de sequía. Esto se da luego de haber analizado los resultados hidrodinámicos simulados en los módulos FM (Flow Model) y ST (Sediment Transport) de DHI MIKE 21, señalando que la influencia del río Aconcagua es importante en el balance de sedimentos pero que no explicaría los niveles de erosión que presenta la playa de Concón según Winckler et.al. (2019).

Además, según Winckler et.al. (2019), existe una marcada tendencia a que los eventos de clima extremo aumentarán en los próximos años debido al cambio climático, influyendo en los forzantes ambientales condicionantes (i.e. temperatura, presión atmosférica). Estos eventos dificultarían los procesos de recuperación de las playas, teniendo un alto impacto sobre las estructuras costeras y en los sectores costeros que se encuentran con un elevado nivel de rigidización (i.e. obras grises en el borde costero), llegando a ser un factor determinante en la extensión de la playa de Concón en los próximos años.

Es por lo anterior que, considerando la interacción de ambos medios analizados (medio oceánico y fluvial), la presente memoria consiguió complementar los estudios realizados por Winckler et.al. (2019) explicando la influencia del río y la “megasequía” dentro del balance sedimentológico del sector y su importancia en la erosión observada.

Finalmente, se espera que la presente investigación sea de utilidad para entender el comportamiento del borde costero aledaño al río Aconcagua y que sirva de antecedente para futuras investigaciones, en la que se busque vincular y explicar la interacción del medio fluvial con el oceánico. También se ha de esperar que el presente documento entregue una visión genérica y sistemática del medio, y de las externalidades que puede provocar la sequía en un corto y a mediano plazo, sobretodo en el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos que se generan en el sector (i.e. turismo, recreación, biota).

## 7 REFERENCIAS

BEYÁ, José. ÁLVAREZ, Marco. GALLARDO, Ariel. HIDALGO, Héctor. AGUIRRE, Catalina. et.al. *Atlas de Oleaje de Chile*. Primera Edición. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. Año 2016.

COOK, John. NUCCITELLI, Dana. GREEN, Sarah. et.al. *Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature*. Environmental Research Letters. Año 2013.

DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI). *MIKE 21/3 Flow Model FM, Sediment Transport ST, Hydrodynamic Module*. User Guide. Dinamarca. Año 2021.

DE LA PEÑA, José. *Guía técnica de estudios litorales: Manual de Costas*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España. Año 2007.

FOLK, Robert. WARD, William. *Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journal Sedimentology Petrology. Año 1957.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *Gestión de Cuencas Hidrográficas*. Conjunto de Herramientas para la Gestión Forestal Sostenible. Año 2021.

FUNDACION CHILE. *Transición Hídrica: El Futuro del Agua en Chile*. Escenarios Hídricos 2030. Año 2019.

GARREAUD, René. BOISIER, Juan. MONTECINOS, Aldo. et.al. *The Central Chile Mega Drought (2010 – 2018): A climate dynamics perspective*. International Journal of Climatology. Año 2019.

GONZÁLEZ, Álvaro. *Ocurrencia de eventos de sequías en la ciudad de Santiago de Chile desde mediados del Siglo XIX*. Revista de Geografía Norte Grande. Año 2016.

GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS. *Análisis del Oleaje*. Sección Dinámicas. Universidad de Cantabria. Volumen 1. Sección 2. Año 2000.

IBAÑEZ, Carles. CAIOLA, Nuno. et.al. *Estuarios*. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino de España. Primera Edición. Año 2009.

MARRERO, Levi. *La Tierra y sus Recursos*. Cultural Venezolana S.A. Primera Edición. Capítulo 23. Año 1980.

## Capítulo 7: Referencias

---

MARTÍNEZ, Carolina. CONTRERAS - LÓPEZ, Manuel. et.al. *Coastal erosion in central Chile: A new hazard?* Ocean and Coastal Management. Año 2018.

MARTÍNEZ, Carolina. CORTEZ, Carolina. *Características hidrográficas y sedimentológicas en el estuario del río Aconcagua, Chile Central.* Revista de Geografía Norte Grande. Año 2007.

MARTÍNEZ, Carolina. FERNÁNDEZ, Alfonso. RUBIO, Patricio. *Caudales y Variabilidad Climática en una Cuenca de Latitudes Medias en Sudamérica: Río Aconcagua, Chile Central.* Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. Año 2012.

MAZA, José. GARCÍA, Manuel. GRACÍA, Jesús. *Morfología de Ríos y Estabilidad de Cauces.* Manual de Ingeniería de Ríos. Comisión Nacional del Agua de México. Capítulos 11 y 12. Año 1996.

MORALES, Esteban. WINCKLER, Patricio. HERRERA, Mario. *Costas de Chile. Medio Natural, Cambio Climático, Ingeniería Oceánica y Gestión Costera.* Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). Valparaíso. Chile. Año 2020.

NIEMANN, Sanne. JENSEN, Jacob. et.al. *Morphological Modeling of Danish Tidal Inlet.* International Conference on Coastal Engineering (ICCE). Año 2006.

NIÑO, Yarko. *Repaso Mecánica de Fluidos.* Material Curso de Hidráulica. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Año 2004.

NIÑO, Yarko. *Hidráulica Fluvial y Transporte de Sedimentos.* Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Capítulos 4,6. Año 2015

PERILLO, Gerardo. PICCOLO, María. *Geomorfología e Hidrografía de los Estuarios.* El Mar Argentino y sus Recursos Pesqueros. Año 1997.

QUEZADA, Matías. *Unidad 1: Conceptos Preliminares.* Ingeniería de Costas. Universidad de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Santiago. Año 2020.

RENWICK, Jim. THOMPSON, David. *The Southern Annular Mode and New Zealand Climate.* National Institute of Water and Atmosphere Research (NIWA). Auckland. Nueva Zelanda. Año 2006.

ROCKSTRÖM, Johan. STEFFEN, Will. et.al. *A safe operating space for humanity.* Nature Magazine. Año 2009.

## Capítulo 7: Referencias

---

SHAW, Thomas. ULLOA, Genesis. FARIAS – BARAHONA, David. et.al. *Glacier albedo reduction and drought effects in the extratropical Andes, 1986 – 2020*. Journal of Glaciology. Año 2021.

SMITH, Ernest. WANG, Ping. EBERSOLE, Bruce. ZHANG, Jun. *Dependence of total longshore sediment transport rates on incident wave parameters and breaker type*. Journal of Coastal Research. West Palm Beach, Florida. Año 2009.

VALLE – LEVINSON, Arnoldo. *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge University Press. Primera Edición. Año 2010.

VEN TE CHOW. et.al. *Hidrología Aplicada*. Editorial McGraw – Hill. Primera Edición. Capítulos 1, 2 y 3. Año 1994.

VERHAGEN, IR. *Introduction of Coastal Engineering*. Foundations of Coastal Engineering. LECTURE NOTES. IHE - DELFT. NETHERLANDS. Año 1997.

WARREN, Ross. BACH, Hanne. *MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas*. Environmental Software. Dinamarca. Año 1992.

WENTWORTH, Chester. *A scale of grade and classterms for clastic sediments*. Journal of Geology. Año 1922.

WINCKLER, Patricio. *Introducción al modelado de procesos costeros*. Primera Edición. Universidad de Valparaíso. Valparaíso, Chile. Año 2021.

WINCKLER, Patricio. MARTÍNEZ, Carolina. CONTRERAS – LÓPEZ, Manuel. et.al. *Determinación del Riesgo de los Impactos del Cambio Climático en las Costas de Chile*. Vulnerabilidad y Riesgo en Playas. Ministerio del Medio Ambiente. Volumen 4. Año 2019.

ZAVATTERO, Elodie. DU, Mingxuan. et.al. *2D Sediment Transport Modelling in High Energy River – Application to Var River, France*. International Conference on Hydroinformatics (HIC). Procedia Engineering. Año 2016.

## 8 ANEXOS

### 8.1 ECUACIÓN DE NAVIER – STOKES (RANS)

Para un fluido newtoniano, es posible expresar vectorialmente la ecuación de Navier – Stokes promediada de Reynolds (RANS, sigla en inglés), de la siguiente forma (Niño, 2004):

$$\rho \frac{D(\vec{v})}{Dt} = \rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} * \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla \hat{p} + \mu \nabla^2 \vec{v}$$

Y,

$$\hat{p} = p + (\rho * g * h)$$

Donde,

$\frac{D}{Dt}$ : Derivada total o material, expresada de forma lagrangiana, la cual puede dividirse en términos eulerianos en una aceleración local (asociada a cambios temporales de la velocidad) y una aceleración advectiva (asociada a cambios espaciales de la velocidad).

$\hat{p}$ : Término asociado a la presión.

$\vec{v}$ : Vector velocidad según dimensiones del modelo (2D o 3D).

$\rho$ : Densidad del fluido en [kg/m<sup>3</sup>].

$\mu$ : Viscosidad dinámica en [kg/m \* s] Cuando se presenta el supuesto de fluido ideal, se tiene que  $\mu = 0$ .

$h$ : Eje hidráulico o altura de escurrimiento en [m], que se define positivo en dirección contraria a la gravedad (Niño, 2004).

La ecuación vectorial, puede expresarse en coordenadas cartesianas (x, y, z), según;

- En el eje x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

- En el eje y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial p}{\partial y} \right] + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

- En el eje z:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial p}{\partial z} \right] + g + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$