



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE FACTORES QUE EXPLICARÍAN EL RETROCESO DE LA PLAYA  
DE LA SERENA, CHILE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**JOSÉ IGNACIO GONZÁLEZ VALDERRAMA**

PROFESOR GUÍA:  
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER  
LUIS ZAMORANO RIQUELME

SANTIAGO DE CHILE  
2022

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO  
DE: MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO  
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO  
CIVIL**

**POR:** José Ignacio González Valderrama

**FECHA:** 2022

**PROFESOR GUÍA:** Yarko Niño Campos

**EVALUACIÓN DE FACTORES QUE EXPLICARÍAN EL RETROCESO DE LA PLAYA  
DE LA SERENA, CHILE**

La playa de La Serena ha presentado un retroceso de su línea de la costa, en promedio, de 0,3 m/año en el periodo 1980-2019 y de más de 1 m/año en el periodo 2000-2020. Debido a que la playa de La Serena se encuentra en un equilibrio dinámico y que se puede constituir como una celda litoral, es que es posible estudiar la dinámica de su línea de costa y la importancia de sus aportes y sumideros a partir de un balance de sedimentos. En este trabajo se realiza un balance de sedimentos en la playa de La Serena entre los aportes del río Elqui y el transporte eólico entre 1970 y 2019, porque estos factores podrían explicar el retroceso de la playa. En el río Elqui, se han identificado tres factores que podrían mermar la cantidad de sedimento que llega a la playa: el embalse Puclaro, las extracciones de áridos de su lecho y la megasequía y, uno que podría contribuir al sedimento transportado, que son los aportes ocasionales desde las quebradas adyacentes. Es en ese sentido que, se calcula con las ecuaciones de Meyer-Peter & Müller y de Wilcock & Crowe el aporte de sedimentos del río Elqui a la playa evaluando de manera separada y en su conjunto el efecto del embalse Puclaro, de las extracciones de áridos, la megasequía y de las quebradas. Por otro lado, para cuantificar el transporte eólico, se ocupan las ecuaciones de Bagnold, Kawamura, Zingg y Durán et al. y Kok et al. . Se concluye que, la causa del retroceso de la playa de La Serena es multifactorial y que depende de la década, donde las principales causas son: el transporte eólico, las extracciones de áridos y la megasequía. En una segunda línea se ubica el embalse Puclaro, pero solamente porque la megasequía no ha permitido que haya una mayor influencia de este. En particular, en la década de 1970, el balance da un retroceso de la playa debido a que los caudales medios del río son comparables a los de la megasequía, en instancia que el transporte eólico presenta valores promedios. En la década de 1980 y de 1990, se concluye que, si ha habido retroceso ha sido a causa de las elevadas tasas de transporte eólico. A pesar de que en la década del 2000 y del 2010 las tasas de transporte eólico hayan sido las menores del periodo de estudio, aun así, se advierte que, en términos generales, estas décadas presentan balances negativos, especialmente la del 2010. La razón principal de la década del 2000 recae en las extracciones de áridos y en la década del 2010 a la megasequía.

# Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mis padres por su apoyo incondicional en las diversas dificultades que he tenido que pasar durante mi estadía en la universidad. También les quería agradecer por los valores que me han inculcado y por su ejemplo.

Además, me gustaría agradecer a mis amigos, especialmente, a aquellos en que el tiempo solo ha hecho fortalecer el lazo de amistad. Sin dudas, gran parte de lo que soy y de mi felicidad se debe a ellos. También quería hacer una mención especial a aquellos que me ayudaron directamente en el desarrollo de esta tesis ya sea con un comentario de mi trabajo, prestándome sus computadores para realizar simulaciones o simplemente preguntándome sobre mi avance.

Por otro lado, agradecer a mi profesor guía Yarko Niño por la paciencia y el apoyo constante durante el desarrollo de esta tesis con reuniones a última hora los viernes cuando ya las energías escaseaban.

Finalmente, agradecer a todas las experiencias, tanto las buenas como las malas, en las que confío que de aquí al futuro me ayudarán para desarrollarme como mejor persona y profesional.

# Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. MOTIVACIÓN .....	1
1.2. HIPÓTESIS .....	2
1.3. OBJETIVOS .....	2
1.3.1. Objetivo general .....	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	3
2. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1. BALANCE DE SEDIMENTO EN PLAYAS .....	4
2.2. TRANSPORTE EÓLICO.....	5
2.3. TRANSPORTE HIDRÁULICO.....	7
2.4. RETROCESO DE LA PLAYA DE LA SERENA .....	10
3. TRANSPORTE EÓLICO .....	14
3.1. ANTECEDENTES .....	14
3.1.1. Datos de viento.....	14
3.1.1.1. Caracterización y selección de las fuentes de datos de viento .....	14
3.1.1.2. Análisis espaciotemporal.....	16
3.1.2. Granulometría de la playa .....	21
3.2. METODOLOGÍA .....	22
3.2.1. Velocidad del viento en la playa .....	22
3.2.2. Aplicación de la velocidad a volúmenes de control .....	23
3.2.3. Velocidad límite para el inicio del movimiento de la arena .....	23
3.2.4. Flujos de masa .....	24
3.2.5. Corrección por datos faltantes.....	25
3.2.6. Volumen que sale de la playa .....	26
3.2.7. Efecto de la precipitación .....	26
3.2.8. Análisis de sensibilidad .....	27
3.3. RESULTADOS .....	27
3.3.1. Velocidad friccional.....	27
3.3.2. Volumen que sale de la playa .....	28
3.3.3. Efecto de la precipitación .....	30
3.3.4. Análisis de sensibilidad .....	31
4. GASTO SÓLIDO DEL RÍO ELQUI .....	33
4.1. ANTECEDENTES .....	33
4.1.1. Hidrología .....	34
4.1.1.1. Embalse Puclaro .....	34
4.1.1.2. Fenómeno de El Niño.....	36
4.1.1.3. Megasequía.....	37

4.1.2. Aportes y perdidas de sedimento en el río Elqui .....	38
4.1.2.1. Quebradas.....	39
4.1.2.2. Embalse Puclaro .....	42
4.1.2.3. Extracciones de áridos .....	42
4.2. METODOLOGÍA .....	43
4.2.1. Sectorización del río .....	43
4.2.2. Parámetros hidráulicos.....	46
4.2.3. Transporte potencial de sedimentos.....	48
4.2.3.1. Meyer-Peter & Müller (1948) .....	49
4.2.3.2. Wilcock & Crowe (2003).....	50
4.2.4. Sedimento que llega a la playa .....	51
4.2.5. Evaluación de casos.....	53
4.2.5.1. Quebradas.....	54
4.2.5.2. Embalse .....	55
4.2.5.3. Extracción de áridos.....	56
4.3. RESULTADOS .....	57
4.3.1. Caso base .....	57
4.3.2. Quebradas.....	59
4.3.3. Embalse Puclaro .....	59
4.3.4. Extracción de áridos .....	60
4.3.5. Evaluación general .....	61
5. BALANCE DE SEDIMENTO .....	63
5.1. ANTECEDENTES .....	63
5.2. METODOLOGÍA .....	64
5.3. RESULTADOS .....	65
6. CONCLUSIONES .....	69
7. BIBLIOGRAFÍA .....	72
ANEXOS .....	77
ANEXO A ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DEL VIENTO.....	77
ANEXO B GRANULOMETRÍA .....	85
ANEXO C VOLÚMENES DE CONTROL DE LA PLAYA.....	86
ANEXO D ÍNDICE OCEÁNICO DE EL NIÑO (ONI) .....	89
ANEXO E NÚMERO DE MANNING.....	91
ANEXO F EXTRACCIÓN ILEGAL DE ÁRIDOS .....	93
ANEXO G BOCATOMAS EN EL RÍO ELQUI ENTRE EL EMBALSE PUCLARO Y SU DESEMBOCADURA	

# Índice de figuras

Figura 2-1: Esquema de balance de sedimentos (fuente: INH (2021), adaptado de Rosati & Kraus (1999)).....	5
Figura 2-2: Cambios de la línea de la costa asociado a distintos factores para mediados y fines de siglo. (a) Línea de la costa actual en rojo. (b) Retroceso de la línea de la costa por efecto del incremento del nivel del mar y parámetros del oleaje. (c) Pivoteo de la línea de la playa en sentido antihorario producto del giro de la dirección del oleaje al sur. (d) Retroceso de la línea de la costa por efecto de la reducción del aporte sedimentario a la bahía (fuente: INH (2021)).....	11
Figura 2-3: Factores que influyen en el balance de sedimento. Abajo del nombre de la categoría está el periodo a partir del cual se obtuvo la tasa (fuente: elaboración propia a partir de datos de INH, 2021). ....	12
Figura 2-4: Sólidos suspendidos en la bahía de La Serena y Coquimbo (fuente: elaboración propia a partir de satélite Landsat 7). ....	13
Figura 3-1: Estaciones de viento en la zona de estudio. ....	14
Figura 3-2: Serie mensual de promedio y desviación estándar del viento en estación de La Florida. ....	16
Figura 3-3: Velocidad del viento promedio en 2010 a 10 m de altura (fuente: Explorador Eólico del Ministerio de Energía de Chile).....	18
Figura 3-4: Serie anual de puntos cardinales para la estación de La Florida. ....	19
Figura 3-5: Distribución del viento en la zona sur de la playa de La Serena para el año 2010 a 10 m de altura (fuente: explorador eólico del Ministerio de Energía de Chile).....	20
Figura 3-6: Análisis espacial del viento en La Serena. ....	20
Figura 3-7: Puntos de muestreo de arenas en la playa de La Serena. ....	21
Figura 3-8: Velocidad friccional de inicio de movimiento por volumen de control.....	27
Figura 3-9: Volumen anual que sale de la playa calculada con el registro de datos de la estación de La Florida. ....	29
Figura 3-10: Transporte eólico en función de la velocidad friccional. ....	30
Figura 3-11: Efecto de las precipitaciones en el transporte eólico. ....	31
Figura 4-1: Ubicación de las estaciones fluviométricas en la zona de estudio. ....	33
Figura 4-2: Curva de variación estacional para las estaciones río Elqui en Algarrobal, río Elqui en Almendral y río Elqui en La Serena para una probabilidad de excedencia del 10% (fuente: Arrau ingeniería Spa (2018)).....	34
Figura 4-3: Curva de variación estacional para las estaciones río Elqui en Algarrobal, río Elqui en Almendral y río Elqui en La Serena para una probabilidad de excedencia del 50% (fuente: Arrau ingeniería Spa (2018)).....	35
Figura 4-4: Impacto del embalse Puclaro en años de crecidas. ....	36
Figura 4-5: Relación del caudal medio mensual del río Elqui con el ONI. ....	37
Figura 4-6: Análisis de frecuencia de la variación a nivel de década de los caudales de río Elqui en Algarrobal del embalse Puclaro. ....	38

Figura 4-7: Ubicación de los principales factores que incidirían en el sedimento que llega a la playa. ....	39
Figura 4-8: Playa de La Serena antes y después de los aluviones del 24 y 25 de marzo de 2015. ....	40
Figura 4-9: Río Elqui antes y después de los aluviones del 24 y 25 de marzo de 2015. ....	40
Figura 4-10: Aluviones, remociones de masa y deslizamientos de tierra reportados por SERNAGEOMIN (s.f.). ....	41
Figura 4-11: Caudales de quebradas Santa Gracia y Marquesa (fuente: elaboración propia a partir de Balance Hídrico Nacional (2017)). ....	42
Figura 4-12: Sectorización del río Elqui y ubicación desde dónde se realiza la toma de muestras para la granulometría. ....	45
Figura 4-13: Curvas granulométricas elegidas. ....	46
Figura 4-14: Diámetro medio de las curvas granulométricas elegidas en cada tramo (distancia medida desde la desembocadura del río). ....	46
Figura 4-15: Ejemplo de metodología de transporte de sedimento adoptada para caso en que el embalse no retiene sedimentos. ....	52
Figura 4-16: Esquema de representación del río Elqui en el tramo de estudio. ....	53
Figura 4-17: Curvas granulométricas para incorporar efecto del acorazamiento aguas abajo del embalse en la evaluación del embalse Puclaro 2000 y en 2019. ....	56
Figura 4-18: Transporte potencial de sedimento por tramo calculado con la ecuación de MPM para el caso base. ....	57
Figura 4-19: Transporte potencial de sedimento por tramo calculado con la ecuación de WC para el caso base. ....	58
Figura 4-20: Sedimento que llega a la desembocadura del río Elqui para el caso base calculado con la ecuación de MPM y de WC. ....	58
Figura 4-21: Evaluación del efecto de las quebradas sobre el sedimento que llega a la desembocadura del río Elqui a nivel de década. ....	59
Figura 4-22: Evaluación del embalse Puclaro sobre el sedimento que llega a la desembocadura del río Elqui a nivel de década. ....	60
Figura 4-23: Evaluación de las extracciones de áridos sobre el sedimento que llega a la desembocadura del río Elqui a nivel de década. ....	61
Figura 4-24: Evaluación del caso base con el caso Embalse+ Extracciones de áridos + Quebradas de la cantidad de sedimento que llega a la playa a nivel de década. ....	62
Figura 5-1: Transectos estudiados por INH (2021) (fuente: INH (2021)). ....	63
Figura 5-2: Regresión lineal de imágenes satelitales para cada transecto (fuente: INH (2021)). Nota: la distancia de los transectos se referencia con respecto al muro que separa la playa y la calzada. ....	64
Figura 5-3: Balance de sedimento promedio anual a nivel de década entre el promedio de las cuatro ecuaciones de transporte eólico y los resultados de MPM. ....	65
Figura 5-4: Balance de sedimento promedio anual a nivel de década entre el promedio de las cuatro ecuaciones de transporte eólico y los resultados de WC. ....	66

Figura 5-5: Balance de sedimento promedio anual a nivel de década para el caso base, embalse y extracciones de árido. Nota: línea morada indica balance en que se corrige el transporte eólico y línea azul indica balance en que no se corrige el transporte eólico.....	68
Figura 1: Serie anual de promedio y desviación estándar de viento en la estación de La Florida.....	77
Figura 2: Serie mensual de promedio y desviación estándar para la estación de La Serena.....	78
Figura 3: Serie mensual de promedio y desviación estándar para la estación de Cerro Grande.....	78
Figura 4: Promedio mensual de velocidad para todas las estaciones.....	79
Figura 5: Serie mensual de puntos cardinales para la estación de La Florida.....	79
Figura 6: Puntos cardinales por mes de la estación de La Florida.....	80
Figura 7: Serie mensual de puntos cardinales para la estación de Cerro Grande.....	80
Figura 8: Serie anual de puntos cardinales para la estación Cerro Grande.....	81
Figura 9: Puntos cardinales por mes para la estación Cerro Grande.....	81
Figura 10: Serie mensual de puntos cardinales para la estación de La Serena.....	82
Figura 11: Serie anual de puntos cardinales para la estación de La Serena.....	82
Figura 12: Puntos cardinales por mes para la estación de La Serena.....	83
Figura 13: Distribución de direcciones del viento y velocidades para la estación de Cerro Grande a escala horaria.....	84
Figura 14: Distribución de direcciones del viento y velocidades para la estación de La Serena a escala horaria.....	84
Figura 15: Curvas granulométricas en las que se basa la Figura 4-13.....	85
Figura 16: Esquema de cálculo trigonométrico de transporte eólico.....	87
Figura 17: Ubicación de la región 3.4 para el cálculo del ONI (fuente: Lindsey (2009)).	89
Figura 18: Relación del caudal medio mensual de los ríos afluentes al río Elqui con el ONI.....	90
Figura 19: Ubicación de infracciones por obras no autorizadas en cauces y extracción de áridos no autorizadas (fuente: elaboración propia a partir de Dirección General de Aguas-Coquimbo (2021)).	93
Figura 20: Bocatomas en el río Elqui entre el embalse Puclaro y su desembocadura (fuente: elaboración propia a partir de ESIIR (s.f.)).	94



# Índice de tablas

Tabla 2-1: Características de algunas fórmulas para el transporte eólico. ....	6
Tabla 2-2: Ejemplos de mediciones de volúmenes de sedimentos retenidos por embalses en la IV región (fuente: Lecaros (2011), Fuentes (2018) e INH (2021)). ...	8
Tabla 2-3: Ecuaciones de transporte de sedimentos no cohesivos utilizadas en algunos programas de simulación de transporte fluvial de sedimento en 1-D (fuente: DHI (2017), Dahl et al. (2019) y Greinmann & Huang (2018).Nota: el signo más (+) en el apartado de “Ecuaciones por partes” indica que el cálculo se realiza por tramos de diámetro de sedimento. ....	9
Tabla 3-1: Características de las estaciones de viento en la zona de estudio. ....	15
Tabla 3-2: Selección de estaciones de viento. ....	15
Tabla 3-3: Distribución por percentil de la velocidad friccional en m/s de los datos de la estación La Florida. Se hace la distinción entre todos los datos y aquellas velocidades que superan el umbral de movimiento de 0,25 m/s. ....	28
Tabla 3-4: Análisis de sensibilidad para el transporte eólico anual de la estación La Florida variando el diámetro del sedimento. ....	31
Tabla 3-5: Análisis de sensibilidad para el transporte eólico anual de la estación La Florida variando la velocidad friccional límite de inicio de movimiento. ....	31
Tabla 4-1: Recopilación de eventos aluvionales reportados entre 1969 y 2019 (fuente: SERNAGOMIN (s.f.), Diario El Día (2017), Griem (2021), Vergara Dal Pont et al. (2018), Aguas Spa (2020), Mardones (2019)). ....	40
Tabla 4-2: Extracciones de áridos autorizados por la Ilustre Municipalidad de La Serena entre 2009 y 2020 (fuente: Aguas Spa (2020)). ....	42
Tabla 4-3: Influencia directa de factores que inciden en la llegada de sedimento a la playa y granulometría utilizada por tramo. ....	44
Tabla 4-4: Casos a evaluar en el transporte de sedimento del río Elqui. ....	54
Tabla 4-5: Caudales líquidos y sólidos que entran al sistema en el caso en que se evalúan las quebradas. ....	55
Tabla 4-6: Diámetro medio del sedimento para incorporar el efecto del acorazamiento aguas abajo del embalse en 2000 y en 2019. ....	56
Tabla 5-1: Tasas de retroceso de la playa de La Serena según distintos estudios. ....	63
Tabla 5-2: Balance de sedimento promedio anual para la década de 2010 entre la ecuación de Bagnold y las de MPM y WC. ....	66
Tabla 1: D50 por volumen de control en la playa de La Serena. ....	85
Tabla 2: Dimensiones de los volúmenes de control ocupados para el transporte eólico. ....	88
Tabla 3: Valores de parámetros presentes en el método de Cowan para obtener el número de manning. ....	91
Tabla 4: Parámetros de la ecuación de Cowan utilizados por tramos de río. ....	91
Tabla 5: Número de manning. ....	92

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

Bowen & Iman (1966) definieron el término balance sedimentario como el balance entre los cambios en el volumen de control de los sedimentos almacenados en el sistema y la suma de los volúmenes de sedimento que entran y salen del sistema. El sedimento que entra al volumen de control son los llamados aportes mientras que los que salen son los sumideros. En una playa, por ejemplo, los ríos, los acantilados y el mar podrían ser ejemplos de fuentes mientras que, el transporte eólico o los cañones submarinos serían sumideros (US Army Corps of Engineers, 1984).

La utilidad de estos balances de sedimentos es que permiten analizar qué procesos son los más relevantes en un área de estudio. De esta forma, al realizar un balance de sedimento en una playa, permitiría entender la dinámica del avance o retroceso de la línea litoral (US Army Corps of Engineers, 1984).

Estudios recientes (INH, 2021; Winckler et al., 2019) han determinado que la playa ubicada en la conurbación La Serena-Coquimbo (en adelante, playa de La Serena) ha retrocedido a una tasa de 0,3 m/año entre 1980 y 2019 y que esta tasa se ha ido incrementando. De hecho, esta tasa para el periodo 2000-2020 ha sido de más de un 1 m/año. Es en ese sentido que se estima que bajo un escenario conservador para mediados de siglo habrá un retroceso de la playa de aproximadamente 30 m y para fines de siglo de 110 m (INH, 2021). A largo plazo, esta situación podría afectar, ya sea directa o indirectamente, la vida de los habitantes de Coquimbo y La Serena, cuya población se estima en alrededor de 449 000 personas<sup>1</sup> (INE, 2018).

Se ha determinado que la playa de La Serena se encuentra en un equilibrio dinámico<sup>2</sup> (INH, 2021) y que se puede constituir como una celda litoral<sup>3</sup> (Aguas Spa, 2020). Gracias a esto, entender la dinámica costera de la playa y la importancia de sus aportes se reduce a realizar un balance de sedimentos en toda su playa. Esto, permitiría entender de mejor forma las causas de este retroceso y tomar medidas al respecto.

El río Elqui, es la principal fuente de sedimentos de la playa de La Serena (INH, 2021). Sin embargo, sus aportes de sedimentos estarían siendo mermados por los áridos que se extraen de éste para uso comercial, por el embalse Puclaro y por la megasequía. De esta forma, a la merma en los caudales que ha causado la megasequía en el régimen hidrológico del río Elqui y que afectaría al transporte de sedimentos, se le suman el embalse Puclaro que retiene los sedimentos que provienen desde la zona alta de la cuenca del río Elqui, cambia el régimen de caudales aguas abajo y acoraza la zona aguas abajo del embalse, y las extracciones de áridos que estarían dejando el río sin sedimento disponible a ser transportado. A pesar de esto, el potencial aluvional de las

---

<sup>1</sup> Cantidad de personas que viven en las provincias de Coquimbo y La Serena.

<sup>2</sup> Playa en equilibrio dinámico: playa cuya posición de la línea de la costa depende del balance entre aportes y sumideros en el tiempo.

<sup>3</sup> Celda litoral: segmento de una zona costera que se puede considerar independiente de las adyacentes.

quebradas adyacentes al río, especialmente las quebradas Marquesa y Santa Gracia, podrían aportar tal cantidad de sedimento a la playa que la operación del embalse y las extracciones de áridos se podrían sostener en el tiempo sin que se produzca un retroceso de la playa.

Se ha estimado que el transporte eólico de arenas podría ser un sumidero importante en la playa de La Serena, con tasas de transporte anuales de entre 17 000 y 55 000 m<sup>3</sup>/año (Aguas Spa, 2020). Sin embargo, debido a que estas estimaciones solo se han realizado en un periodo acotado de años (2012-2018), no es posible establecer si esta aceleración del retroceso de la playa que se ha visto en las últimas dos décadas se debe a este sumidero. Además, dado que el cálculo tampoco considera factores climáticos como la humedad o la precipitación, no es posible saber si la aceleración en el retroceso de la playa del periodo 2000-2020 se debe a que las condiciones ambientales hayan cambiado favoreciendo así al transporte eólico.

Por lo expuesto anteriormente, se propone realizar un balance sedimentológico en la playa de La Serena, para poder explicar a qué se debe el retroceso de su línea de costa, considerando el transporte eólico y el aporte de sedimento del río Elqui. De esta forma, se evaluará el efecto de las extracciones de áridos, el embalse Puclaro, los aluviones desde las quebradas Marquesa y Santa Gracia y la megasequía.

## **1.2. Hipótesis**

El principal déficit en el balance de sedimentos en la playa de La Serena proviene del río Elqui dado que los sedimentos transportados por este, por un lado, se ven reducidos por el embalse Puclaro, que los atrapa, y por otro, por las extracciones de áridos que deja al río sin sedimento que transportar. El déficit de precipitaciones también podría incidir en el sedimento transportado por el río Elqui considerando el contexto de la megasequía (Méndez-Freire et al., 2022). El transporte eólico de arenas de la playa de La Serena también debiera presentar un déficit en el balance debido a que hay una tendencia a la reducción de las precipitaciones en los últimos 55 años y a una concentración de esta en periodos más cortos (Arrau ingeniería Spa, 2018), esto causaría que la arena de la playa esté menos tiempo húmeda y, por lo tanto, más susceptible a moverse.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Estudiar el aporte de sedimentos por parte del río Elqui y el transporte eólico de arenas en la playa de La Serena, en el periodo comprendido entre 1970 y 2019, como posibles factores que expliquen el retroceso de la playa de La Serena.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Analizar el efecto del embalse Puclaro, el transporte de sedimento en las quebradas Santa Gracia y Marquesa, las extracciones de áridos en el río Elqui y

su ribera y la megasequía sobre la cantidad de sedimentos que llega a su desembocadura.

- Estimar la cantidad de arena que sale de la playa de La Serena debido al transporte eólico.
- Realizar un balance de sedimentos en la playa de La Serena.

## 1.4. Estructura de la tesis

- **Revisión bibliográfica:** Se tocan temas relacionados a la línea de la costa, el balance de sedimentos, las ecuaciones que cuantifican el transporte eólico, el efecto de embalses y las extracciones de áridos sobre el transporte de sedimentos en ríos y las ecuaciones presentes en diversos modelos de transporte de sedimentos en ríos.
- **Transporte eólico:** Se describe el comportamiento espacial y temporal del viento para luego proceder a calcular el transporte eólico de arenas de la playa de La Serena, analizar el efecto que podría haber tenido la precipitación en el transporte eólico y realizar un análisis de sensibilidad del diámetro del sedimento y de la velocidad friccional de inicio de movimiento.
- **Gasto sólido del río Elqui:** Se entregan antecedentes de los factores que podrían influenciar en la cantidad de sedimento que llega a la playa gracias al río Elqui. Luego, a partir de parámetros hidráulicos obtenidos de simulaciones hechas en el programa computacional HEC-RAS 5.0 y de las ecuaciones de transporte de sedimento de Meyer-Peter & Müller (1948) y de Wilcock & Crowe (2003) se evalúa el efecto de las quebradas, el embalse Puclaro, las extracciones de áridos y la megasequía sobre la cantidad de sedimento que llega a la playa gracias al río Elqui.
- **Balance de sedimento:** A partir de los resultados de los capítulos Transporte eólico y Gasto sólido del río Elqui, se realiza un balance de sedimentos y se evalúan las causas del retroceso de la playa de La Serena.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Balance de sedimento en playas

La importancia del estudio de las playas no proviene solamente del estímulo que estas le puedan dar a la economía local a través del turismo, sino que también deriva del rol que juegan en la defensa de la costa. Gracias a que están constituidas por arena, es posible que las playas cambien su forma dependiendo de la época del año, por lo tanto, ante distintos patrones de oleaje y nivel del mar, constituyen un mecanismo eficiente de protección costera (Winckler et al., 2019). Es en este sentido que un retroceso de la línea de la costa podría traducirse en el reasentamiento de la población establecida en los bordes costeros, huyendo de las consecuencias de posibles maremotos o grandes marejadas. Otras opciones serían que la ciudad rediseñara su infraestructura para poder convivir con el mar, tal como lo han hecho, por ejemplo, Venecia y los Países Bajos.

El retroceso de la línea de la costa en Chile es de especial relevancia, dado que no son pocos los centros urbanos que se ubican próximos a ésta. Es en este sentido que Winckler et al. (2019) estudió 35 playas a lo largo de Chile continental con técnicas de percepción remota, en periodos que van de los 3 a los 39 años, determinándose que el 91,43% de esas playas presentan erosión. En el caso de la playa de La Serena, a partir de un análisis de 39 años, se determina que hay una tasa de cambio promedio de 0,3 m/año. Es más, se ha determinado que esta playa, en las últimas dos décadas ha retrocedido aproximadamente en un 1 m/año y se proyecta que para mediados y fines del Siglo XXI, ya haya retrocedido 30 m y 110 m respectivamente en un escenario conservador (INH, 2021).

Un enfoque que permite analizar estas tendencias de las playas es el del balance sedimentológico. Esta es una técnica que se basa en la cuantificación de fuentes, sumideros y tasas de transporte (Figura 2-1). En el caso de las playas, la mayor parte del sedimento que constituye la costa proviene de ríos que conectan con el mar seguido de volúmenes menores producidos por erosión directa del oleaje y el transporte eólico (Morales et al., 2020). De hecho, Warrick & Farnsworth (2009), encontraron que en el sur de California (Estados Unidos) el 80% del sedimento que llegaba a la playa provenía de ríos y que de ese 80%, había un río que aportaba el 35% a pesar de que su cuenca solo cubría el 13% del total del área de estudio. Este estudio recalca la importancia que tienen los ríos en el suministro de sedimento a las playas y en especial de ciertos ríos que aportan mayor cantidad que otros.

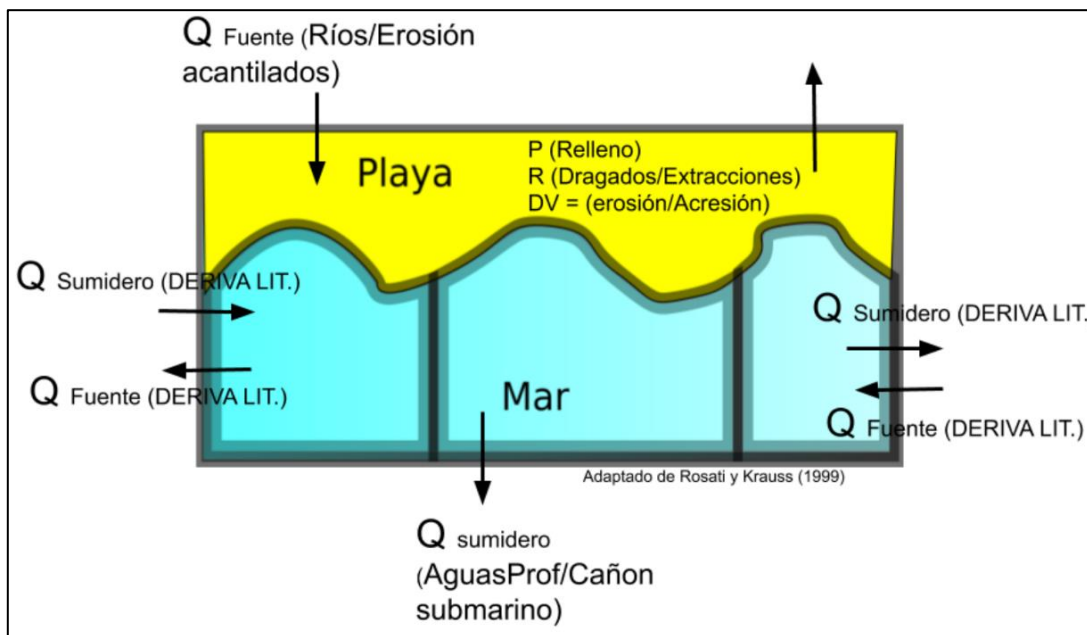


Figura 2-1: Esquema de balance de sedimentos (fuente: INH (2021), adaptado de Rosati & Kraus (1999)).

El transporte de sedimento a lo largo de la costa generalmente ocurre en celdas litorales que son sistemas individuales y cerrados en los cuales idealmente se puede desarrollar un ciclo sedimentario completo, lo cual incluye fuentes, sumideros y direcciones de movimiento del sedimento. Un supuesto importante de las celdas litorales es que entre estas prácticamente no hay transporte de sedimentos. Por lo tanto, se puede definir una bahía entera como una celda litoral si es que cumple con el supuesto mencionado anteriormente, dado que esta, dependiendo de sus características, podría incluir fuentes y sumideros asociados a sistemas fluviales, dunas, acantilados marinos, transporte por viento, aumento del nivel del mar, entre otros. La importancia de definir una celda litoral se debe a que sobre estas se puede realizar un balance sedimentológico y, por lo tanto, es posible estudiar la tendencia de una playa a la erosión o acreción (Rosati, 2005).

## 2.2. Transporte eólico

Desde un punto de vista ingenieril, el transporte de arena por viento es una componente importante para el balance de sedimento en las zonas costeras. Una de sus razones es que induce a la redistribución de la arena en la zona litoral (U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Por lo tanto, determinar la cantidad de arena que es transportada en determinadas direcciones, permite cuantificar cuanta de ésta sale de la playa a causa del viento. Además, si se integra este análisis al sedimento que entra en la celda litoral por cursos fluviales a través de un balance sedimentológico, podría ayudar a entender mejor la dinámica de la línea de la costa a través del tiempo y el espacio.

La emisión, transporte y deposición de arena y polvo impulsada por el viento son parte de los denominados procesos eólicos. Para que estos procesos ocurran, primero debe haber un material granular que transportar y luego, el viento debe ser de tal magnitud de poder mover este material. Los sistemas naturales en que el viento es capaz de mover este material granular son, por ejemplo, los desiertos, las playas o las superficies

secas de lagos (Kok et al., 2012). En particular, el transporte de arenas en playas puede llevar a la remoción o a la redistribución de estas dentro de la playa lo cual puede derivar en, por ejemplo, la formación de dunas (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) o en un retroceso de la línea de la costa por un déficit de sedimento en la playa (INH, 2021).

Dado que el transporte eólico tiene aplicaciones en campos que van desde la ingeniería (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) hasta la meteorología (Kok et al., 2012), es que se han desarrollado una variedad de expresiones que tienen por objetivo cuantificar el transporte eólico, las cuales se caracterizan por intentar encontrar un flujo de masa  $Q$ , el cual debido a un flujo de momentum horizontal producido por el viento  $\tau_p$  aceleran los granos de arenas. Este factor  $\tau_p$  se multiplica por la masa de flujo generada  $q$  por unidad de momentum del flujo  $p$  (Kok et al., 2012). Luego, reemplazando los parámetros recién descritos queda la Ecuación 2-1<sup>4</sup>, donde  $u_*$  es la velocidad friccional del viento,  $u_{*t}$  la velocidad friccional de inicio de movimiento de la partícula,  $\rho_a$  la densidad del aire,  $L$  la longitud de salto de la partícula y  $\delta v$  la diferencia entre la velocidad de impacto y la velocidad con que comienza el movimiento (Duarte-Campos et al., 2018).

$$Q = \tau_p \frac{q}{p} = \rho_a (u_*^2 - u_{*t}^2) \frac{L}{\delta v}$$

*Ecuación 2-1*

A partir de distintos supuestos hechos en base a la Ecuación 2-1, estudios efectuados en laboratorios y mediciones en terreno es que se desarrollan varias teorías que intentan cuantificar el transporte eólico (Tabla 2-1). En estos desarrollos matemáticos, hay autores que desprecian  $u_{*t}$  frente a  $u_*$  o que dicen que  $\frac{L}{\delta v}$  escala con  $u_*$ .

Tabla 2-1: Características de algunas fórmulas para el transporte eólico.

Autor	¿Depende del sedimento?	$\zeta u_* \gg u_{*t}$ ?	$\zeta \frac{L}{\Delta v} \sim u_*$ ?
<b>Bagnold (1936)</b>	Sí, del diámetro y de la forma de la curva granulométrica.	Sí	Sí
<b>Kawamura (1951)</b>	No	Sí	Sí
<b>Zingg (1953)</b>	Sí, del diámetro del sedimento.	Sí	Sí
<b>Hsu (1971)</b>	Sí, del diámetro del sedimento.	Sí	Sí
<b>Duran et al (2011) - Kok et al. (2012)</b>	No	No	No

Con respecto a la validez de estas ecuaciones que escalan con  $u_*^3$ , Horikawa et al. (1986) a través de una revisión bibliográfica encontraron que los mejores modelos predictivos para calcular el transporte eólico de arenas secas eran aquellos que tenían una dependencia cúbica en la velocidad de corte o seguían una ley de potencia similar. Además, encontraron que las ecuaciones propuestas por Bagnold (1936) y Kawamura

<sup>4</sup> Fórmula válida a partir de velocidades de corte del viento que superan el umbral de movimiento, es decir, cuando  $u_* > u_{*t}$ , en caso contrario  $Q = 0$ . Además, es importante mencionar que la fórmula está en unidades de caudal por metro.

(1951) eran las mejores para ser aplicadas a arenas bien graduadas. Por otro lado, de los modelos anteriormente mencionados, Sherman & Li (2012) encuentran que los que mejor predicen el transporte eólico son los de Bagnold (1936) y Hsu (1971) principalmente, sin embargo, se admite que hay incertidumbre, entre otras cosas, porque los modelos no son calibrados para la zona de estudio. Otro estudio que analiza la capacidad de predicción de los modelos es el de Chapman (1990) en el cual, se dice que el mejor es el de Hsu (1971) y que el de Bagnold (1936) es el peor de los siete modelos estudiados (U.S. Army Corps of Engineers, 2002).

### **2.3. Transporte hidráulico**

El sedimento que transportan los ríos está entre otras cosas, condicionado por el clima y su caudal (Bussi et al., 2014; Warrick & Farnsworth, 2009). Es así como fuertes eventos de El Niño en el sur de California producen que un río acarree el 90% del total de sedimentos en un periodo de 72 años, sin embargo, esto no significa que las crecidas asociadas a eventos de El Niño necesariamente van a ser los más extremos (Warrick & Farnsworth, 2009). Tampoco se puede decir que mientras más caudal circule por un cauce o mientras más llueva, más sedimento acarreará el río. Sin embargo, Bussi et al. (2014), afirman que las crecidas extremas y las grandes tormentas son los factores que dominan el transporte de sedimento al analizar las razones de porqué, poniéndose en dos escenarios de emisiones de gases asociados al cambio climático, uno tiene como resultado que aumenta el transporte de sedimento y el otro que disminuye. Es por esta compleja relación entre el clima, el caudal y el sedimento que, para un adecuado entendimiento de la dinámica del aporte de sedimento de un río a la playa, hay que estudiar las crecidas anuales de los ríos (especialmente de los ríos que transportan más sedimento) y su relación con el clima a lo largo de un periodo prolongado.

Se ha estudiado que el efecto de las extracciones de áridos podría traer como consecuencia cambios en la morfología del río (Costea, 2018), generando zonas de acumulación de agua y cambiando parámetros morfológicos como la sinuosidad y el coeficiente de trenzamiento. Esto podría producir cambios en la hidráulica del río y afectar el régimen de sedimentos de este, tal como sucede en el río Tordera en España (Rovira et al., 2005). En ese río, la extracción de áridos produjo que en años secos el río no conectara con el mar, acumulándose así los sedimentos para depositarlos en la playa en los años húmedos.

Una presa, también puede afectar el régimen de sedimentos de un río. En Chile, por ejemplo, en el río Biobío, en el cual se ubican las centrales hidroeléctricas Ralco, Pangue y Angostura (nombradas desde aguas arriba hacia aguas abajo), se ha estudiado periódicamente el efecto que tienen estas centrales sobre la cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) y sobre la granulometría del río (Centro de Ecología Aplicada, 2017; M & W Ambientales, 2019). Al respecto, se dice que los diámetros de los sedimentos medidos aguas arriba de la central hidroeléctrica Pangue, presentan un comportamiento relativamente constante para los sedimentos más gruesos y que, para aguas abajo del embalse, el comportamiento de la fracción gruesa es variable mientras que para la fracción fina es uniforme (salvo en ocasiones excepcionales) (M & W Ambientales, 2019).



Con respecto a los SST y la tasa de transporte de sedimento, se puede decir que, las tres centrales presentes en el río han retenido una cantidad importante de sedimentos (Centro de Ecología Aplicada, 2017; M & W Ambientales, 2019), de hecho, los SST de transportados habrían disminuidos en casi un 56 % por efecto de la central hidroeléctrica Pangué. Es por este efecto de retención de los sedimentos que tienen los embalses, es que es de especial interés saber cuánto volumen de sedimento quedan atrapados en ciertos embalses. En la Tabla 2-2, se muestran algunas estimaciones de volúmenes de sedimentos retenidos por embalses en Chile en la cuarta región, que es la zona de estudio.

Tabla 2-2: Ejemplos de mediciones de volúmenes de sedimentos retenidos por embalses en la IV región (fuente: Lecaros (2011), Fuentes (2018) e INH (2021)).

<b>Embalse</b>	<b>Volumen retenido [hm<sup>3</sup>]</b>
<b>La Paloma</b>	9,5
<b>Cogotí</b>	23
<b>Rapel</b>	159
<b>Puclaro</b>	0,8

A pesar de esta retención de sedimentos por parte de los embalses, no siempre se presentaría una evidente merma en los sedimentos transportados. En Chile, por ejemplo, en el río Lluta, se ha modelado lo que podría pasar ante la eventual entrada en operación de un embalse en el régimen de sedimentos aguas abajo de éste (AC Ingenieros Consultores LTDA., 2016). Los resultados de esta modelación muestran la poca influencia que tendría la construcción de un embalse en el régimen de sedimentos del río aguas abajo de este, particularmente en su tramo final, en el humedal Las Machas. Esto se debería a que las fuentes naturales de sedimento como aportes de quebradas y laderas, que aportan flujos hiperconcentrados, se aprecian como inagotables.

Eso sí, los resultados de las simulaciones unidimensionales de transporte de sedimentos en ríos hay que tomarlos con precaución porque si bien se ha demostrado que pueden modelar sistemas complicados como la parte baja de la cuenca del río Misisipi (Estados Unidos) con resultados aceptables de concentración y depositación (Dahl et al., 2019), no siempre sus resultados son satisfactorios, pero al menos ayudan a evaluar tendencias (Weise, 2018) . Es en este sentido que la elección de la ecuación de transporte y la manera en que interactúan los sedimentos con el lecho del río son determinantes porque una mala elección de estos puede llevar a errores en la simulación. Es este el porqué de que los modelos de transporte de sedimento ofrecen más de una ecuación de transporte de sedimento para ser simuladas y la razón de porqué estos mismos modelos ofrecen varias versiones de la misma ecuación (Tabla 2-3).

Tabla 2-3: Ecuaciones de transporte de sedimentos no cohesivos utilizadas en algunos programas de simulación de transporte fluvial de sedimento en 1-D (fuente: DHI (2017), Dahl et al. (2019) y Greinmann & Huang (2018). Nota: el signo más (+) en el apartado de “Ecuaciones por partes” indica que el cálculo se realiza por tramos de diámetro de sedimento.

<b>Ecuación base</b>	<b>Hec Ras 6.0</b>	<b>Mike 11</b>	<b>Basement 2.8</b>	<b>SRH-1D 4.0</b>	<b>CCHE1D</b>
<b>Ackers &amp; White (1973)</b>	Ackers & White (1973)	Ackers & White (1973)		Ackers & White (1973) HR Wallingford (1990)	Proffit & Sutherland (1983)
<b>Ashida &amp; Michiue (1971)</b>		Ashida & Michiue (1971)	Ashida & Michiue (1971)		
<b>Ashida et al. (1978)</b>		Ashida et al. (1978)			
<b>Brownlie (1981)</b>				Brownlie (1981)	
<b>Engelund &amp; Fredsoe (1976)</b>		Engelund & Fredsoe (1976)			
<b>Engelund &amp; Hansen (1967)</b>	Engelund & Hansen (1967)	Engelund & Hansen (1967)	Engelund & Hansen (1967)	Engelund & Hansen (1967)	Wu et al. (2000)
<b>Laursen (1958)</b>	Copeland (1993)			Laursen (1958) Madden (1993)	
<b>Meyer-Peter &amp; Müller (1948)</b>	Vanoni (1975) Wong & Parker (2006)	Meyer-Peter & Müller (1948)	Meyer-Peter & Müller (1948) Hunziker (1995) Ashida & Michiue (1971)	Wong & Parker (2006)	
<b>Parker (2006)</b>			Parker (2006)	Parker (2006)	
<b>Ley de potencia</b>			Ley de potencia		
<b>Rickermann (1991)</b>			Rickermann (1991)		
<b>Sato et al. (1958)</b>		Sato et al. (1958)			
<b>Wu et al. (2004)</b>					Wu et al. (2004)
<b>Smart &amp; Jaeggi (1983)</b>		Smart & Jaeggi (1983)	Smart & Jaeggi (1983) Ashida & Michiue (1971)		
<b>Toffaletti (1968)</b>	Toffaletti (1968)				
<b>Van Rijn (1984)</b>		Van Rijn (1984)	Van Rijn (1984)		
<b>Wilcock &amp; Crowe (2003)</b>	Wilcock & Crowe (2003)		Wilcock & Crowe (2003)	Wilcock & Crowe (2003)	
<b>Wu et al. (2000)</b>			Wu et al. (2000)	Wu et al. (2000)	Wu et al. (2000)
<b>Yang et al. (1996)</b>				Yang et al. (1996)	
<b>Ecuaciones por partes</b>	Toffaletti (1968) + Meyer-Peter & Müller (1948) Yang (1973) + Yang (1984)			Yang (1973) + Yang (1984) Yang (1979) + Yang (1984)	

## 2.4. Retroceso de la playa de La Serena

El Instituto Nacional de Hidráulica (2021) realizó un análisis de la variación histórica de la línea de la costa de la playa de La Serena, incorporando una proyección de su posición hacia el futuro incluyendo escenarios de cambio climático. Para estas proyecciones, se realizó modelaciones numéricas para mediados de siglo (2026-2045) y para fines de siglo (2081-2100) a partir de 6 modelos climáticos globales.

El análisis histórico de la línea de la costa incorporó técnicas de percepción remota que permiten, a partir de una clasificación supervisada de imágenes satelitales, obtener la ubicación de la línea de la costa con una precisión de 10 m. Gracias a esto, es posible estudiar los movimientos periódicos que se producen en la línea de la costa producidos por estaciones del año y marejadas, entre otros. También, incluye un análisis de la forma que debería tener la playa, tanto en planta como transversalmente, si es que esta estuviese en equilibrio. Para el estudio en planta, se asumió un modelo parabólico que está en función de parámetros que se obtienen a partir de un punto de difracción y de la dirección del oleaje. En cambio, para el estudio de los perfiles transversales de equilibrio, se hizo una comparación entre perfiles transversales teóricos y perfiles transversales levantados a partir de una campaña de terreno y de una carta náutica de 1938 publicada por la Marina de Chile.

La proyección del cambio de la línea de la playa se hizo bajo un supuesto de ortogonalidad entre los movimientos transversales y longitudinales de ésta. Esto permite analizar la playa en su forma longitudinal y en su forma transversal de manera separada. Se realizan dos metodologías, una que permite proyectar el cambio de la posición de la línea de la costa para mediados de siglo y fines de siglo y otra que lo calcula a corto plazo (Figura 2-2). La proyección para mediados y fines de siglo, se hace suponiendo que la posición de la línea de la costa depende de la suma de los valores medios de un término que representa a la variación de la línea de la costa por concepto de nivel del mar, altura significativa<sup>5</sup> y periodo (Figura 2-2.b), otro que representa la variación de la línea de la costa por el cambio en la dirección del flujo medio de la energía del oleaje que se traduce en un pivoteo de la posición de la playa (Figura 2-2.c) y, finalmente por uno que simboliza la variación de la línea de la costa por la variación del aporte sedimentario a la playa (Figura 2-2.d).

---

<sup>5</sup> Altura significativa: altura de ola promedio que se calcula con el tercio de olas más grandes en un estado de mar.

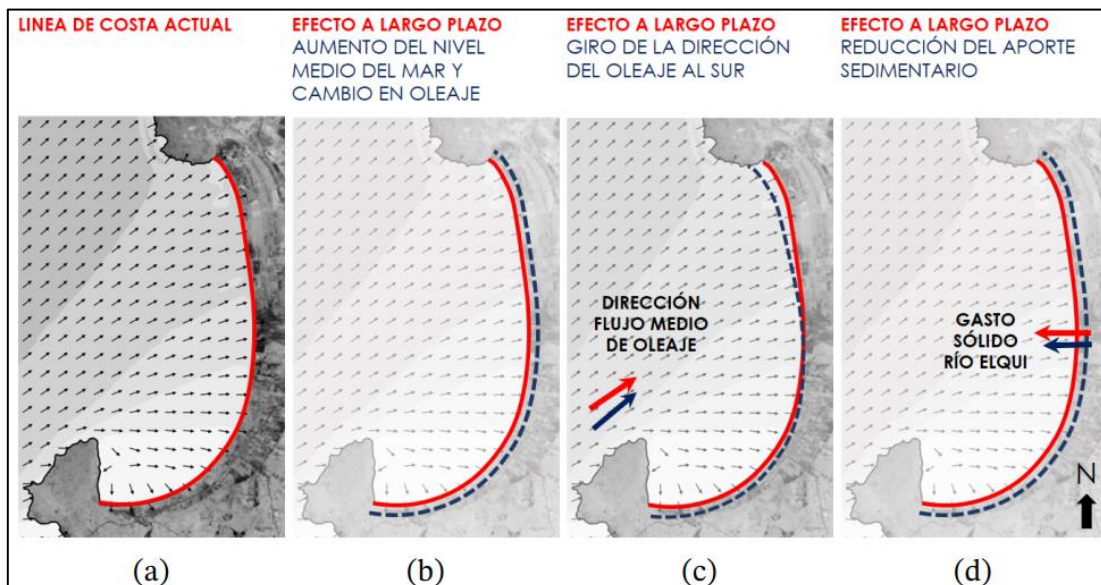


Figura 2-2: Cambios de la línea de la costa asociado a distintos factores para mediados y fines de siglo. (a) Línea de la costa actual en rojo. (b) Retroceso de la línea de la costa por efecto del incremento del nivel del mar y parámetros del oleaje. (c) Pivoteo de la línea de la playa en sentido antihorario producto del giro de la dirección del oleaje al sur. (d) Retroceso de la línea de la costa por efecto de la reducción del aporte sedimentario a la bahía (fuente: INH (2021)).

Una vez calculada la proyección de la línea de la costa para mediados y fines de Siglo, se ocupan esos resultados para calcular la posición a corto plazo de la línea de la costa mediante un modelo integrado que concatena un modelo de oleaje, un modelo hidrodinámico, un modelo de transporte de sedimentos y otro de evolución morfodinámica. Este modelo integrado, trabaja bajo el supuesto de que a corto plazo no hay cambios en el gasto sólido y que el oleaje incide en forma ortogonal a la playa. Con ello, el modelo se fuerza a partir de la altura significativa, periodo medio y nivel de la marejada. Es importante mencionar además que, en el modelo se considera un lecho móvil y un elemento rígido que representa el muro del perímetro de la Avenida del Mar que está sujeto a ser socavado.

Del análisis histórico de la línea de la costa, se obtienen resultados que, evidencian un retroceso en el periodo 2000-2020 que va entre los 1,23 m/año y los 2,21 m/año, sumando un retroceso total para la zona norte, centro y sur de la playa de 24,6 m, 32,2 m y 44,2 m respectivamente. Además, se observa que, tras las marejadas del 8 de agosto de 2015, la posición de la línea de la costa se ubica en una posición más cercana a la ciudad, pero que, al año siguiente vuelve a posicionarse dentro de los rangos habituales. Por otro lado, gracias al análisis de los perfiles transversales y la forma en planta de la playa, se pudo establecer que la playa estudiada está en equilibrio dinámico<sup>6</sup> y que se puede estudiar como una celda litoral.

<sup>6</sup> Playa en equilibrio dinámico: playa que la posición de su línea de costa depende de un balance de sedimentos.

Los cambios producidos producto del cambio del nivel medio del mar arrojan que para mediados de siglo habrá un retroceso de entre 2,2 m y 11,0 m, con un promedio de 8,15 m, en cambio, para fines de siglo, habrá un retroceso que varía entre los 8,7 m y los 43,9 m, con un promedio de 32,6 m. Se concluye que, solamente gracias a los efectos erosivos producidos por el cambio del nivel medio del mar, se va a reducir el ancho de la playa en un 40%. Por otro lado, al evaluar el cambio proyectado producto de la variación del flujo de energía, se obtienen resultados disimiles entre los distintos escenarios de cambio climático, por lo tanto, se establece que no hay evidencia contundente para un cambio significativo de la orientación de la playa. Además, se afirma que el cambio en planta predicho para fines de siglo para los distintos modelos climáticos presentan diferencias de hasta 220 m. Por último, se establece que, ante el posible retroceso de la playa causada por eventos extremos, no hay grandes diferencias entre lo que podría pasar en la actualidad y lo que podría pasar a mediados y a fines de siglo.

Además, debido a que la playa está en un equilibrio dinámico, es que se realizan estimaciones de los posibles aportes y perdidas de sedimento en la playa. En la Figura 2-3, se presentan las tasas anuales estimadas de transporte de sedimento por parte del río Elqui, por efecto del viento, las extracciones de áridos autorizadas en la ribera del río Elqui y la tasa de retención del embalse Puclaro, todos factores que inciden en el balance de masa de la playa.

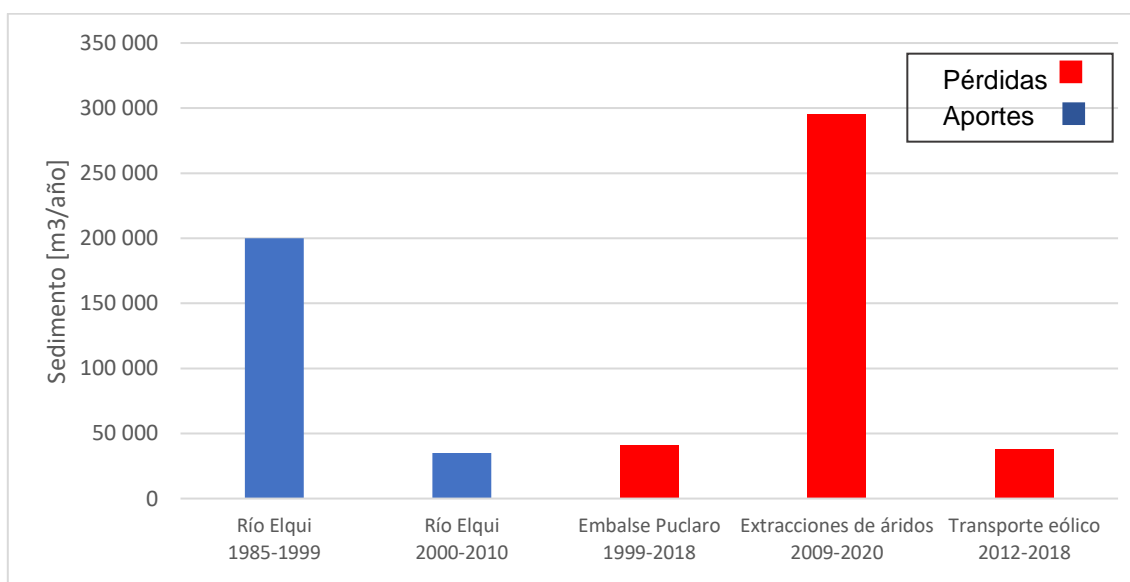


Figura 2-3: Factores que influyen en el balance de sedimento. Abajo del nombre de la categoría está el periodo a partir del cual se obtuvo la tasa (fuente: elaboración propia a partir de datos de INH, 2021).

En la Figura 2-3, se pudo notar que el río Elqui estaría aportando menos sedimento a la playa de La Serena. Una forma de corroborar esto es a través de imágenes satelitales. En la Figura 2-4 por ejemplo, es posible apreciar en la bahía de La Serena que, en junio del 2000 hay una mayor concentración de sólidos suspendidos totales que en junio del 2018 a pesar de que, en junio del 2000 los caudales del río Elqui variaron entre los 1 m<sup>3</sup>/s y los 5 m<sup>3</sup>/s y en junio del 2018 entre los 2 m<sup>3</sup>/s y los 10 m<sup>3</sup>/s<sup>7</sup>.

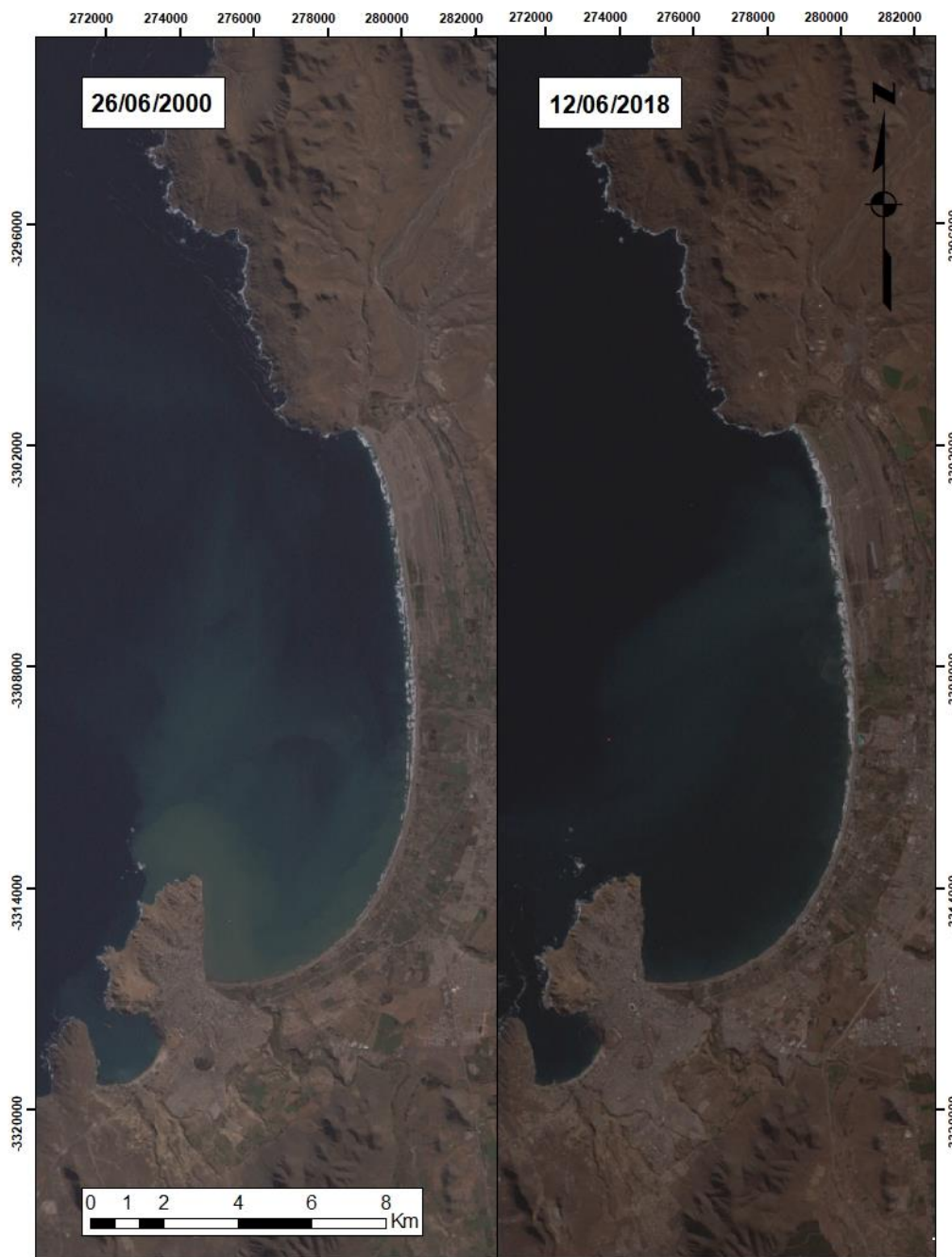


Figura 2-4: Sólidos suspendidos en la bahía de La Serena y Coquimbo (fuente: elaboración propia a partir de satélite Landsat 7).

<sup>7</sup> Caudales medidos en la estación río Elqui en Almendral.

## 3. Transporte eólico

### 3.1. Antecedentes

#### 3.1.1. Datos de viento

##### 3.1.1.1. Caracterización y selección de las fuentes de datos de viento

El cálculo del transporte eólico de arenas de la playa de La Serena y la caracterización espaciotemporal del viento de la zona se hace a través de datos de viento provistos por la red de estaciones meteorológicas del Centro de Estudios Avanzados de Zonas Áridas (CEAZA) y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) que están a escala horaria y del explorador eólico del Ministerio de Energía de Chile. En la Figura 3-1, se muestra la ubicación de las estaciones disponibles, mientras que en la Tabla 3-1, es posible observar la institución a la que pertenece, la altura a la que mide el viento, la altura a la que está ubicada la estación y una breve descripción del entorno de la estación. En la Tabla 3-1, la altura de medición es donde está localizado el instrumento, por lo tanto, la altura sobre el nivel del mar del punto de medición es la suma entre la altura de estación y la altura de medición.



Figura 3-1: Estaciones de viento en la zona de estudio.

Tabla 3-1: Características de las estaciones de viento en la zona de estudio.

Institución	Estación	Altura de estación [m.s.n.m.]	Altura de medición [m]	Entorno
CEAZA	La Serena	90	10	Campus Andrés Bello de la Universidad de La Serena. Se encuentra por encima del nivel de la ciudad.
	Cerro Grande	513	5-10	Cima de Cerro Grande.
DMC	La Florida	137	10	Aeropuerto de La Florida.
	Faro Punta Tortuga	24	10	Roqueríos a 40 m de la orilla del mar.
Fuerza Aérea de Chile	Oficina meteorológica	32	10	Ciudad de La Serena.

Se analizan los registros de las estaciones de la Tabla 3-1 con el fin de seleccionar para el análisis espaciotemporal y el cálculo del transporte eólico de arenas las fuentes de datos de mayor credibilidad. En la Tabla 3-2, es posible ver qué estaciones se ocupan.

Tabla 3-2: Selección de estaciones de viento.

Estación	Análisis espaciotemporal	Transporte eólico
La Serena	Se ocupa por su adecuada frecuencia de adquisición de datos.	Descartada por estar ubicada en una zona en que las edificaciones circundantes puedan distorsionar su registro.
Cerro Grande	Se ocupa por su adecuada frecuencia de adquisición de datos.	Descartada porque a la altura a la que mide no se pueden ocupar los supuestos de capa límite.
La Florida	Se ocupa porque su extenso registro permite hacer un análisis a nivel decadal.	Se ocupa porque su extenso registro permite hacer un análisis a nivel decadal.
Faro Punta Tortuga	Se descarta por escasez de datos.	Se descarta por escasez de datos.
Oficina meteorológica	Se descarta por la antigüedad de sus datos.	Se descarta por la antigüedad de sus datos.

El análisis espaciotemporal para las estaciones de Cerro Grande y La Serena se realiza en detalle en el Anexo A debido a que el objetivo final del capítulo es el cálculo del transporte eólico y este se hará con la estación La Florida.

En la Figura 3-1, se puede observar la ubicación de las estaciones seleccionadas. Se ve que las tres están aproximadamente en la zona media de la playa. La estación de La Serena se encuentra a 3,2 km de la playa, La Florida a 6,5 km y Cerro Grande a 5,5 km.



La estación de Cerro Grande y de La Serena, son las con los registros más completos, aunque más acotados (inicio de mediciones en 2016 y 2015 respectivamente). Por su parte La Florida, dada la antigüedad de sus registros, su estadística es más incompleta sin embargo ha tenido mediciones desde hace más de 50 años.

### 3.1.1.2. Análisis espaciotemporal

En esta parte del documento, se analiza el comportamiento de la estadística de viento de las estaciones escogidas por separado, en complemento con información del explorador eólico del Ministerio de Energía de Chile. La información de esta plataforma se simula con un modelo WRF para el 2010.

#### 3.1.1.2.1. Velocidad

Se presenta la Figura 3-2, donde se puede ver el promedio mensual y la desviación estándar del viento en la estación La Florida. Se puede ver que tanto el promedio como la desviación estándar tienen patrones de comportamientos a escala anual. Lo cual, se debe a que las velocidades más bajas, las cuales se presentan en invierno, tienen mayor relación con menores variaciones del viento, pasa lo contrario en los meses de invierno. Se observa que, desde finales de los noventa, la velocidad del viento comienza a disminuir pero que, del 2006 en adelante, la magnitud del viento tiene una tendencia a aumentar su magnitud, la cual aumenta a partir del 2015.

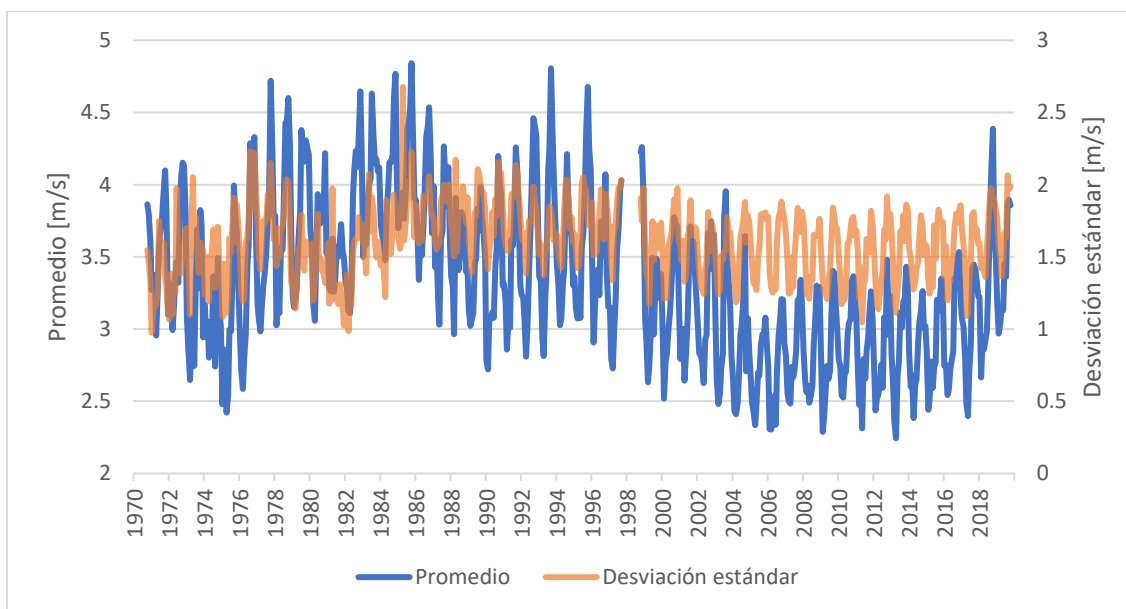


Figura 3-2: Serie mensual de promedio y desviación estándar del viento en estación de La Florida.

El comportamiento de la velocidad del viento reportado por la estación La Florida entre 1970 y mediados de la década de los 2000 es consecuente con lo reportado por

McVicar et al. (2012), quién analiza tendencias globales de velocidad del viento cercanos a la superficie en estudios que van en general desde la década de 1950 y 1960 hasta principios y mediados de los 2000. En este estudio, se reporta un descenso en la velocidad del viento de en promedio 0,014 m/s/año lo cual en 35 años (desde 1970 al 2005) se traduce en un descenso de 0,46 m/s, valor que es del mismo orden de magnitud que el descenso registrado por la estación. Es importante mencionar que no se estudia ningún lugar en el hemisferio sur, salvo por Australia, debido a una ausencia de datos, por lo que el descenso promedio anual recién mencionado podría ser o bien mayor, o bien menor.

Posterior al 2005, el ascenso de la velocidad del viento podría explicarse por una tendencia global y/o por un cambio en el instrumento de medición. La tendencia mundial del aumento de la velocidad del viento se relaciona con el calentamiento global según un estudio publicado por Zha et al. (2021). En este estudio, tras considerar periodo de calentamiento que va desde 1995 al 2004, se llega a proyecciones que relacionan de manera positiva el aumento de la temperatura del aire con la velocidad del viento cercana a la superficie. Sin embargo, esto no explicaría por sí solo el incremento de la velocidad a partir del 2016, es por esa razón que se postula a un cambio en el instrumento de medición como una posible razón del aumento de la velocidad del viento

Las estaciones de Cerro Grande y La Serena también muestran una correlación positiva entre el viento y su variabilidad, sin embargo, estas no muestran un incremento sostenido en su velocidad. En estas estaciones también es posible advertir que el máximo horario de la velocidad se da entre las 14:00 y las 15:00 (ver Anexo A).

En la Figura 3-3 se muestra el promedio de la velocidad del viento para el año 2010 a 10 m de altura. Como se puede apreciar, en las zonas urbanas el viento alcanza como máximo un valor de 1,5 m/s. En cambio, para la playa, el viento se mueve entre los 1,5 m/s y los 2,5 m/s y en el mar se superan los 2,5 m/s. Además, se puede apreciar que, en la zona central, aproximadamente en el sector en que se desarrolla el río Elqui, el gradiente de la velocidad del viento es menor. Es importante mencionar además que, la velocidad presentada en la Figura 3-2 es superior a lo que muestra el mapa.

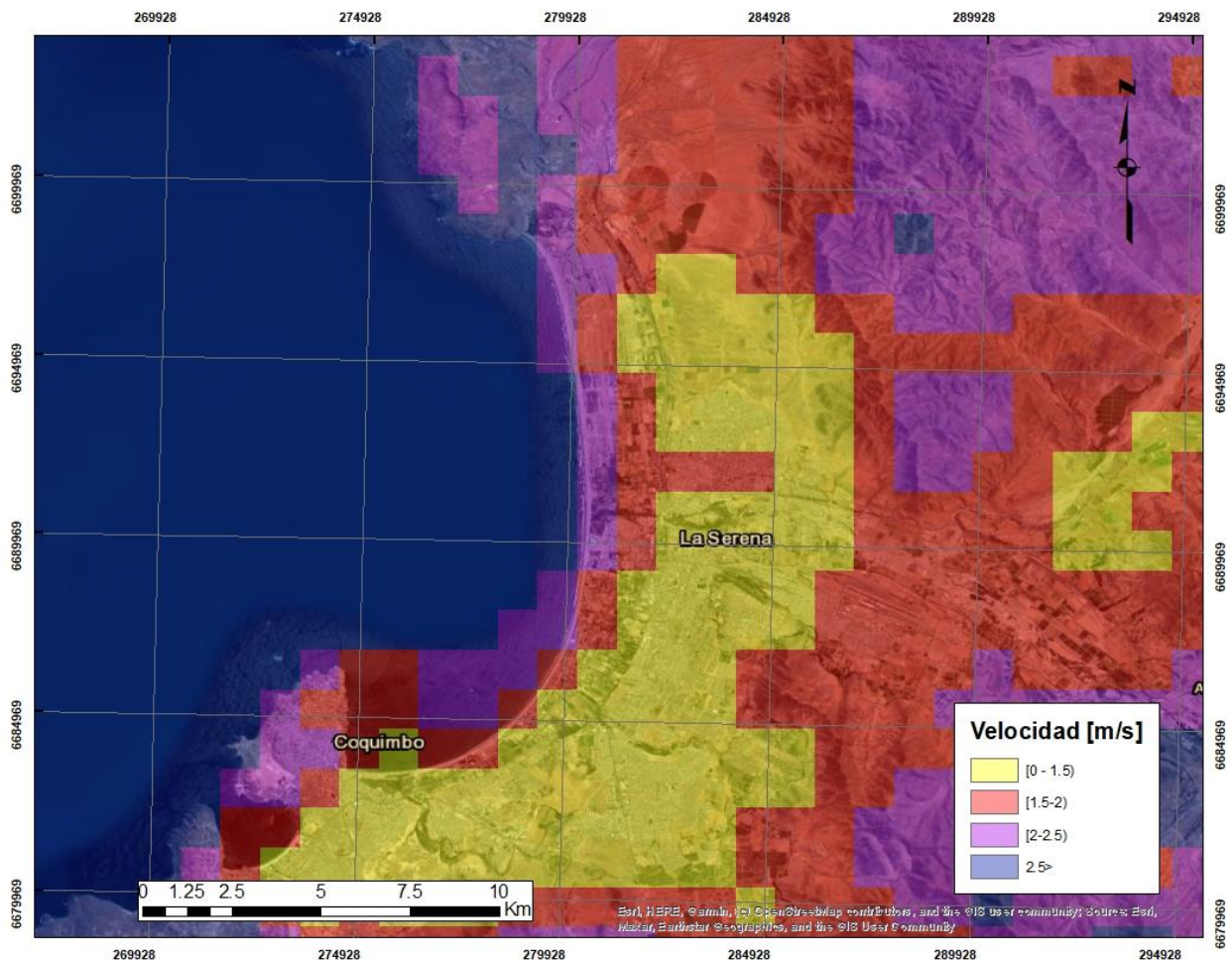


Figura 3-3: Velocidad del viento promedio en 2010 a 10 m de altura (fuente: Explorador Eólico del Ministerio de Energía de Chile).

### 3.1.1.2.2. Dirección

En esta sección, se hace un recuento de las direcciones de viento, el cual, para hacerlo más claro, se representará en porcentajes debido a que no en todo el registro existe la misma frecuencia en la adquisición de datos.

En la Figura 3-4, se muestra el porcentaje de veces que el viento apunta desde cierto punto cardinal para la estación de La Florida. Se observa que, la cantidad de datos faltantes es considerable siendo el periodo comprendido entre el 2004 y el 2007 el con más datos, seguidos del 2008 al 2019.

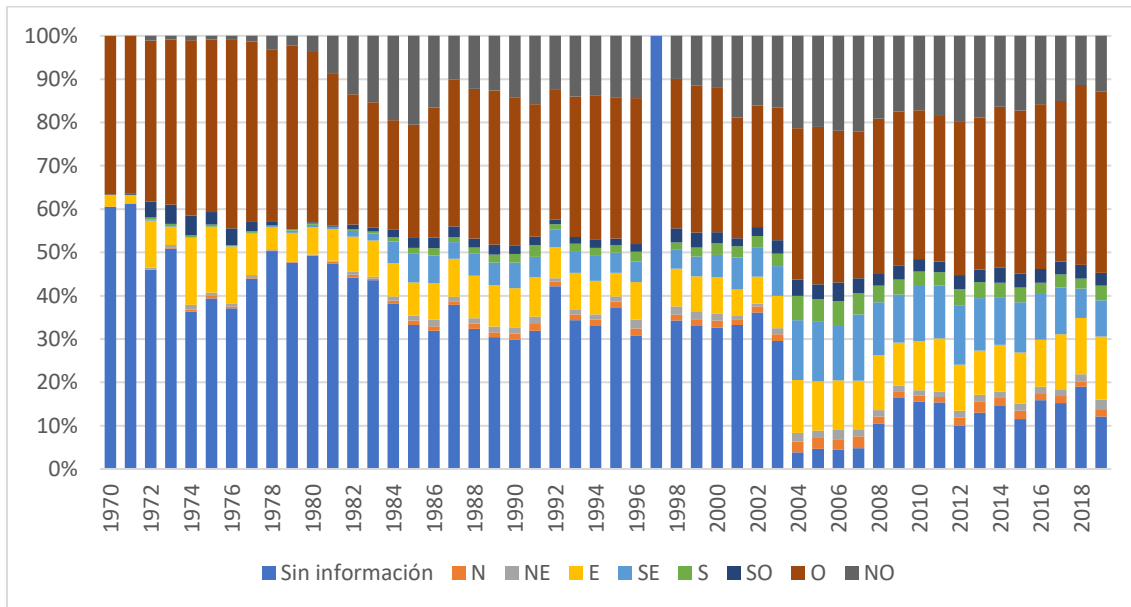


Figura 3-4: Serie anual de puntos cardinales para la estación de La Florida.

En la Figura 3-4, se aprecia un predominio del punto cardinal Oeste, seguido del Este hasta 1980 y del Noroeste desde 1981 hasta 2019 (excepto por el año 2018). El Norte, el Noreste, el Sur y el Suroeste son los puntos que tienen menor representación durante todo el registro de datos. Debido a la gran cantidad de información faltante en esta estación, no es posible aseverar si los cambios en la dirección del viento se deben a un fenómeno climático o es por otro factor.

En la Figura 3-5 se muestra la distribución de la dirección del viento por punto cardinal para la zona norte, centro y sur de la playa para el año 2010. Podemos apreciar que mientras más al norte, el viento sopla más desde el oeste y menos desde el sureste y sur. Por otro lado, se aprecia que, en el centro y el norte de la playa, el viento proviene principalmente desde el oeste, mientras que, en el sur no hay una predominancia clara de alguna dirección.

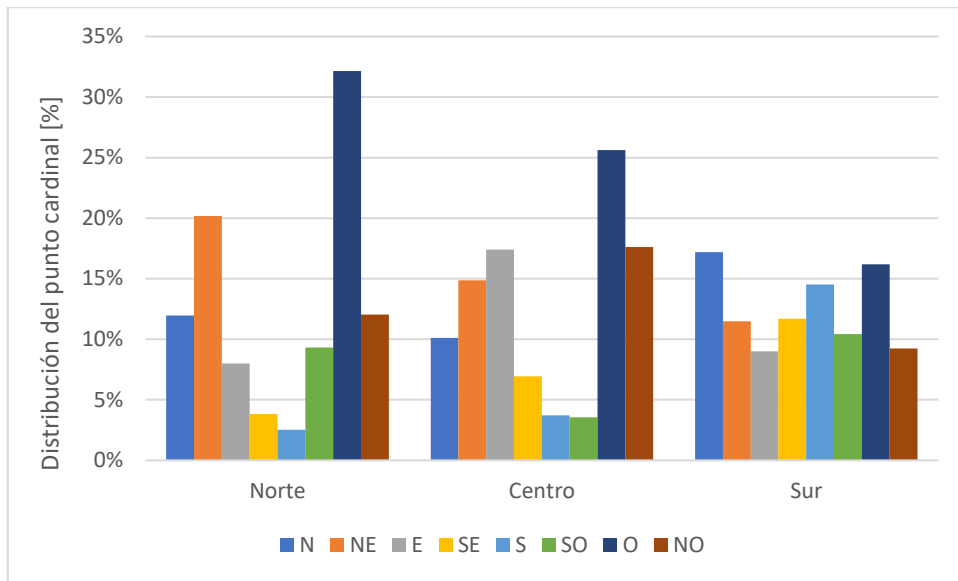


Figura 3-5: Distribución del viento en la zona sur de la playa de La Serena para el año 2010 a 10 m de altura (fuente: explorador eólico del Ministerio de Energía de Chile).

### 3.1.1.2.3. Rosa de los vientos

En la Figura 3-6, se muestran las rosas de los vientos para todo el periodo estudiado dispuestas en un mapa.

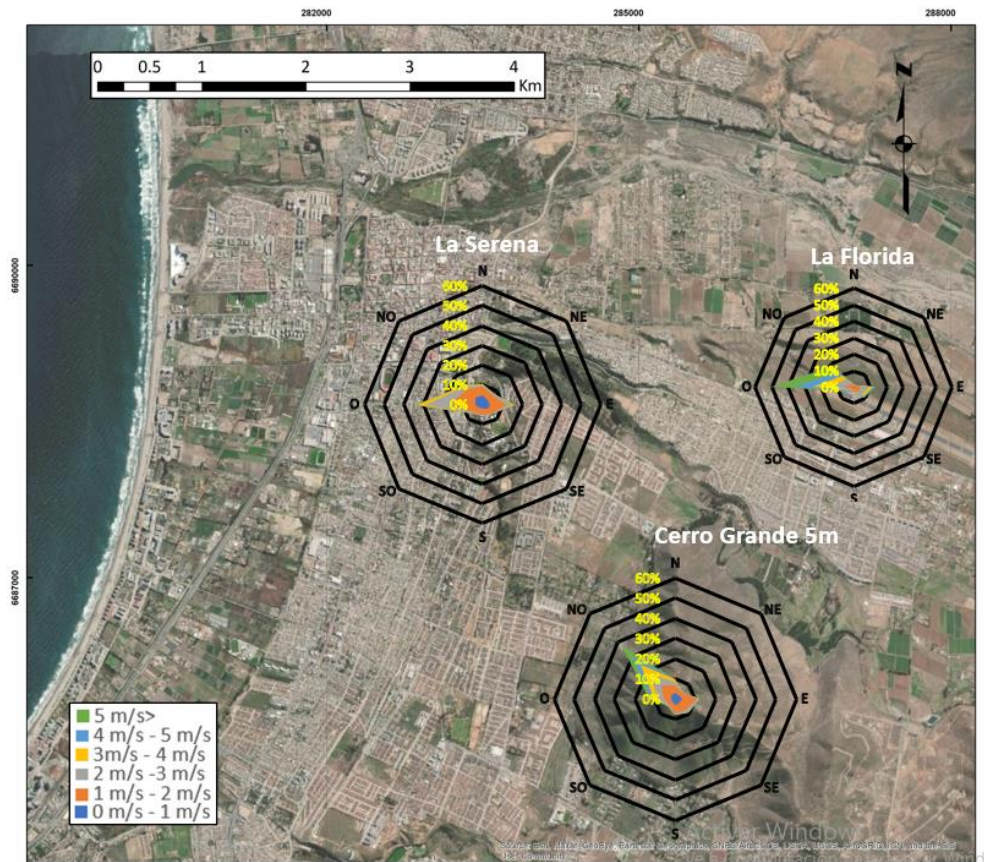


Figura 3-6: Análisis espacial del viento en La Serena.

Se logra apreciar de la Figura 3-6 el efecto que tiene el Valle del Elqui en la dirección del viento, debido a que se genera una corriente de viento que va en dirección Este-Oeste, predominando los vientos que vienen desde el Oeste, misma dirección en que se desarrolla este valle. Este fenómeno se advierte en la estación de La Florida y La Serena, no así en Cerro Grande, debido a que esta estación está ubicada a 513 m.s.n.m., teniendo una predominancia de los vientos desde el Noroeste.

### 3.1.2. Granulometría de la playa

El 19 de octubre de 2019, se tomaron muestras de sedimento en la playa de La Serena en veintiún sectores para un estudio realizado por Aguas Spa (2020), a partir de las cuales el laboratorio TecnoLab se encargó de analizar. La ubicación de estos puntos de muestreo y el d50 de cada muestra, se pueden ver en la Figura 3-7.

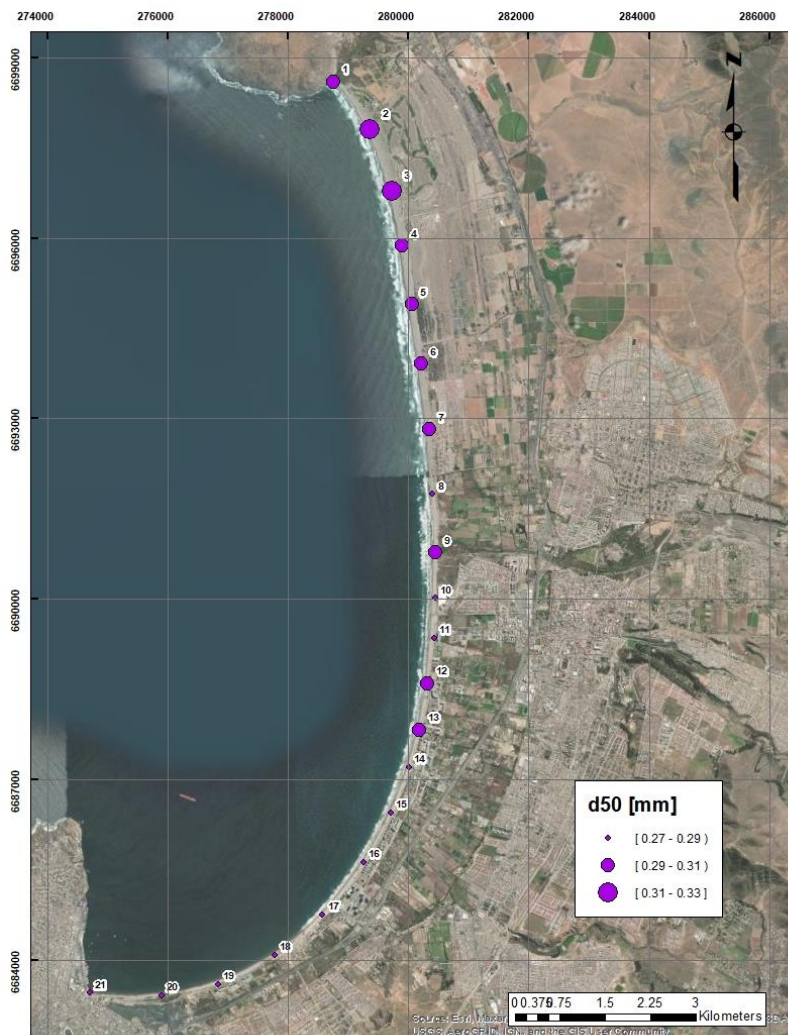


Figura 3-7: Puntos de muestreo de arenas en la playa de La Serena.

Se observa que, en general, la zona norte de la playa presenta una granulometría más gruesa que en la zona sur. Además, que en el punto 9 hay un aumento en el d50 con

respecto a sus puntos adyacentes, lo cual se debe a que esta zona es la que está más influenciada por los sedimentos que transporta el río Elqui.

## 3.2. Metodología

En esta sección, se presenta la manera en que se procede para realizar el cálculo del transporte eólico de arenas de la playa de La Serena. A continuación, se presenta el paso a paso con que se procede a realizar el cálculo.

1. **Cálculo de velocidades de viento en la playa:** El objetivo de esta sección es transformar la velocidad del viento medida por la estación La Florida a velocidad friccional.
2. **Aplicación de la velocidad del viento a volúmenes de control:** Se discretiza la superficie de la playa en función de los diferentes diámetros de la arena presente en la playa.
3. **Cálculo de la velocidad friccional límite de inicio de movimiento.**
4. **Flujos de masa:** Se calcula según cuatro ecuaciones la tasa de transporte de masa por unidad de ancho y se proyecta en un eje de referencia ortogonal según la orientación de los volúmenes de control.
5. **Corrección por cantidades de datos faltantes:** Se corrigen los resultados del transporte eólico en función de los datos no registrados por la estación de monitoreo.
6. **Masa anual que sale del sistema:** El objetivo es obtener la cantidad de arena que sale de la playa.
7. **Efecto de la precipitación:** Se incorpora el efecto de la lluvia en el cálculo de la velocidad límite, este tiene un efecto directo en el cálculo del flujo de masa.
8. **Análisis de sensibilidad:** Se realiza un análisis de sensibilidad al D50 y a la velocidad crítica de inicio de movimiento.

Los puntos anteriores se detallan a continuación.

### 3.2.1. Velocidad del viento en la playa

En la presente sección, se corrigen los datos brutos de velocidades medidos por las estaciones de viento para poder evaluarlos en la zona costera y ocuparlas en las ecuaciones de transporte eólico, dado que, como ya se mostró en la Figura 3-3 las velocidades son distintas en la costa. Para lograr este objetivo se va a considerar que la estación de viento está por debajo de la capa límite y que, por lo tanto, el perfil de velocidades del viento sigue una ley logarítmica.

La ley logarítmica del viento es la Ecuación 3-1. El parámetro  $z_0$  de rugosidad de la superficie se hace tender a 0 quedando la Ecuación 3-2. Posteriormente, dado que las estaciones se ubican en tierra, las velocidades subestiman a las de la playa, por lo tanto, se aplica la Ecuación 3-3 (Hsu, 1985) para traspasar la velocidad al mar. Finalmente, la velocidad friccional  $u_*$  con que operan las ecuaciones de transporte eólico se obtiene con la Ecuación 3-4, que es una fórmula propuesta por Hsu (1977).

$$U_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z_0 + z}{z_0} \right)$$

Ecuación 3-1

$$U_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right)$$

Ecuación 3-2

$$U_{z-mar} = 1,62 + 1,17U_z$$

Ecuación 3-3

$$u_* = 0,044U_{2-mar}$$

Ecuación 3-4

Donde:

$U_z$ : velocidad medida por la estación a una altura  $z$ .

$U_{z-mar}$ : velocidad en el mar a una altura  $z$ .

$U_{2-mar}$ : velocidad en el mar a 2 m de altura.

$z$ : altura de la velocidad.

$z_0$ : rugosidad de la superficie del suelo.

$\kappa$ : constante de Von Kármán que es igual a 0,4.

$u_*$ : velocidad friccional.

### 3.2.2. Aplicación de la velocidad a volúmenes de control

La playa se dividió en veintidós volúmenes de control, de tal manera de poder asignarle a cada uno un punto de muestreo de la Figura 3-7. Los volúmenes de control de ambos extremos de la playa miden aproximadamente 500 m, mientras que el resto aproximadamente 1000 m.

Dada la variabilidad que tiene el ancho de la playa en el tiempo a causa de las olas, se opta por tomar un valor promedio de los anchos trazados en los volúmenes de control igual a 52,4 m<sup>8</sup>.

Las medidas de los volúmenes de control se encuentran en el Anexo C.

### 3.2.3. Velocidad límite para el inicio del movimiento de la arena

Una vez ya hecho el cálculo para todos los registros en todas las zonas de la playa, se procede a calcular la velocidad límite para el inicio del movimiento de la arena en la playa. Este es un valor que depende del diámetro del sedimento, por lo que se utilizará los valores del D50. La ecuación con que se calcula la velocidad friccional de inicio de movimiento  $u_{*t}$  es la ecuación propuesta por Bagnold (1936) que se presenta como Ecuación 3-5.

$$u_{*t} = A \sqrt{gd \left( \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \right)}$$

Ecuación 3-5

<sup>8</sup> El ancho de la playa se obtuvo haciendo mediciones perpendiculares a la Avenida del Mar en Google Earth, por lo tanto, puede considerarse como un valor aproximado.



Donde:

$u_{*t}$ : velocidad friccional de inicio de movimiento.

$A$ : constante empírica que normalmente toma el valor de 0,118 al comienzo del movimiento y después, cuando la partícula se mueve por saltación llega a 0,085. En este caso se ocupa 0,118.

$g$ : aceleración de gravedad.

$d$ : diámetro del sedimento.

$\rho_a$ : densidad del aire.

$\rho_s$ : densidad de la arena.

### 3.2.4. Flujos de masa

Una vez que la velocidad del viento a nivel de suelo sobrepasa la velocidad límite de inicio de movimiento, la arena se mueve a distintas tasas, que dependen del valor de la velocidad de corte  $u_*$ . Dada la incertidumbre del cálculo del flujo de masa, es que se ocuparán cuatro fórmulas, desarrolladas por distintos investigadores. A continuación, se presentan las ecuaciones escogidas para el cálculo de la tasa de transporte de masa.

- Bagnold (1936)

$$q = C_b \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho_a}{g} u_*^3$$

*Ecuación 3-6*

Donde:

$q$ : tasa de transporte de masa por unidad de ancho.

$C_b$ : coeficiente igual a 1,8.

$d$ : diámetro del sedimento.

$\rho_a$ : densidad del aire.

$g$ : aceleración de gravedad.

$D$ : constante que representa un diámetro de arena estándar de 0,25 mm (Bagnold, 1936) o 0,24 mm (Bagnold, 1937). Se toma el valor de 0,25 mm.

$u_*$ : velocidad de corte.

- Kawamura (1951)

$$q = C_{kw} \frac{\rho_a}{g} (u_* - u_{*t})(u_* + u_{*t})^2$$

*Ecuación 3-7*

Donde:

$q$ : tasa de transporte de masa por unidad de ancho.

$C_{kw}$ : constante empírica. Kawamura (1951) indica que su valor es 2,78, sin embargo, Horikawa et al. (1983) basado en mediciones de terreno dice que la constante es cercana a 1 (Sherman & Li, 2012). En este caso se toma el valor original de 2,78.

$\rho_a$ : densidad del aire.

$g$ : aceleración de gravedad.

$u_{*t}$ : velocidad friccional de inicio de movimiento

$u_*$ : velocidad friccional.

- Zingg (1953)

$$q = C_z \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{3}{4}} \frac{\rho_a}{g} u_*^3$$

*Ecuación 3-8*

Donde:

$q$ : tasa de transporte de masa por unidad de ancho.

$C_z$ : coeficiente empírico igual a 0,83.

$d$ : diámetro del sedimento.

$D$ : constante que representa un diámetro de arena estándar de 0,25 mm (Bagnold, 1936) o 0,24 mm (Bagnold, 1937) . Se toma el valor de 0,25 mm.

$\rho_a$ : densidad del aire.

$g$ : aceleración de gravedad.

$u_*$ : velocidad de corte.

- Durán et al. (2011) - Kok et al. (2012)

$$q = C_{DK} \frac{\rho_a}{g} u_{*t} u_*^2 \left(1 - \frac{u_{*t}^2}{u_*^2}\right)$$

*Ecuación 3-9*

Donde:

$q$ : tasa de transporte de masa por unidad de ancho.

$C_{DK}$  : constante cercana a 5.

$g$ : aceleración de gravedad.

$u_*$ : velocidad friccional.

$u_{*t}$ : velocidad friccional de inicio de movimiento.

Estas ecuaciones se proyectan según el volumen de control y se pasan a volumen considerando que la porosidad para la arena es de 0,4. El detalle del cálculo se encuentra en el Anexo C.

### 3.2.5. Corrección por datos faltantes

Dado que todos estos cálculos se basan en información horaria, es natural que falten muchos datos. Es por eso que, si es que no se les hace una corrección a los datos, se estaría subestimando el transporte eólico. Es en ese sentido que, se propone la Ecuación 3-10 para corregir el transporte eólico, la cual corrige el transporte eólico de manera proporcional a la cantidad de datos de viento disponible.

$$V_{año,i}^c = \frac{n_t}{n} V_{año,i}$$

*Ecuación 3-10*

Donde:

$V_{año,i}^c$ : volumen corregido que entra o sale de una determinada dirección en cierto año.

$V_{año,i}$ : volumen que entra o sale en una determinada dirección en cierto año.

$n_t$ : cantidad de horas en un determinado año.

$n$ : cantidad de datos horarios no nulos en un determinado año.

Esta corrección dado que no considera la velocidad friccional de inicio de movimiento, sobrestimaría el transporte eólico. Por lo tanto, se podría considerar como una cota superior.<sup>9</sup>

### 3.2.6. Volumen que sale de la playa

La cantidad de masa que sale de la playa es la suma anual de la cantidad de arena que sale para todos los volúmenes de control, ya sea hacia el mar o hacia tierra adentro. Esta se calcula a través de la Ecuación 3-11 para cada fórmula de tasa de transporte de masa.

$$V_{sale} = \sum_{i=1}^{21} V_{tierra}^i + V_{mar}^i$$

Ecuación 3-11

Donde:

$V_{sale}$ : volumen de arena que sale de la playa.

$V_{mar}^i$ : volumen de arena que sale de la playa en dirección al mar del volumen de control  $i$ .

$V_{tierra}^i$ : volumen de arena que sale de la playa en dirección tierra adentro del volumen de control  $i$ .

### 3.2.7. Efecto de la precipitación

La precipitación hace que aumente la velocidad límite de inicio de movimiento de los sedimentos. Si bien hay autores que proponen relaciones que modifican  $u_{*t}$  (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) en función de la humedad, en este trabajo se decide realizar un cálculo más grueso. Este consiste en imponer en que, si llueve en el día, no hay transporte eólico. La ventaja de este enfoque es que nos pone en la situación más restrictiva en cuanto al movimiento de arena. Esto a la larga va a permitir argumentar que, si es que dentro del balance las diferencias son despreciables del caso con y sin precipitación, se puede eliminar del análisis el efecto de la precipitación.

Es importante mencionar que se restringe el efecto de la precipitación a un día ya que según un estudio en terreno desarrollado por Davidson-Arnott et al. (2008) en una playa canadiense se vio que el valor de la humedad de la arena puede cambiar rápidamente en un periodo de minutos u horas gracias a la infiltración, el viento y/o el sol (Van Rijn & Strypsteen, 2019). Notemos que este supuesto es acorde con el enfoque mencionado en el párrafo anterior que apunta a restringir lo más posible el transporte eólico.

---

<sup>9</sup> Se intenta rellenar a partir de promedios horarios mensuales, sin embargo, ninguno de estos promedios alcanzan el umbral para iniciar el movimiento de la arena.

### 3.2.8. Análisis de sensibilidad

Se realizan dos análisis de sensibilidad uno para evaluar  $u_{*t}$  y el otro para evaluar el diámetro del sedimento. El análisis de sensibilidad para  $u_{*t}$  se hace porque como se verá posteriormente, la mayoría del tiempo  $u_*$  no supera a  $u_{*t}$ , por lo tanto, este sería un parámetro sensible. Por otro lado, el análisis de sensibilidad al diámetro del sedimento se hace porque las mallas del estudio de granulometría de la playa de La Serena no poseen el tamaño adecuado para caracterizar debidamente la arena de la playa.

## 3.3. Resultados

### 3.3.1. Velocidad friccional

La velocidad friccional de inicio de movimiento por volumen de control se puede ver en la Figura 3-8, mientras que, en la Tabla 3-3 se puede apreciar el valor de la velocidad friccional para ciertos percentiles de los datos de la estación La Florida. En esta tabla, se hace la distinción para la velocidad friccional de toda la muestra y para la velocidad friccional una vez iniciado el movimiento en 0,25 m/s, que es el promedio de los datos de la Figura 3-8.

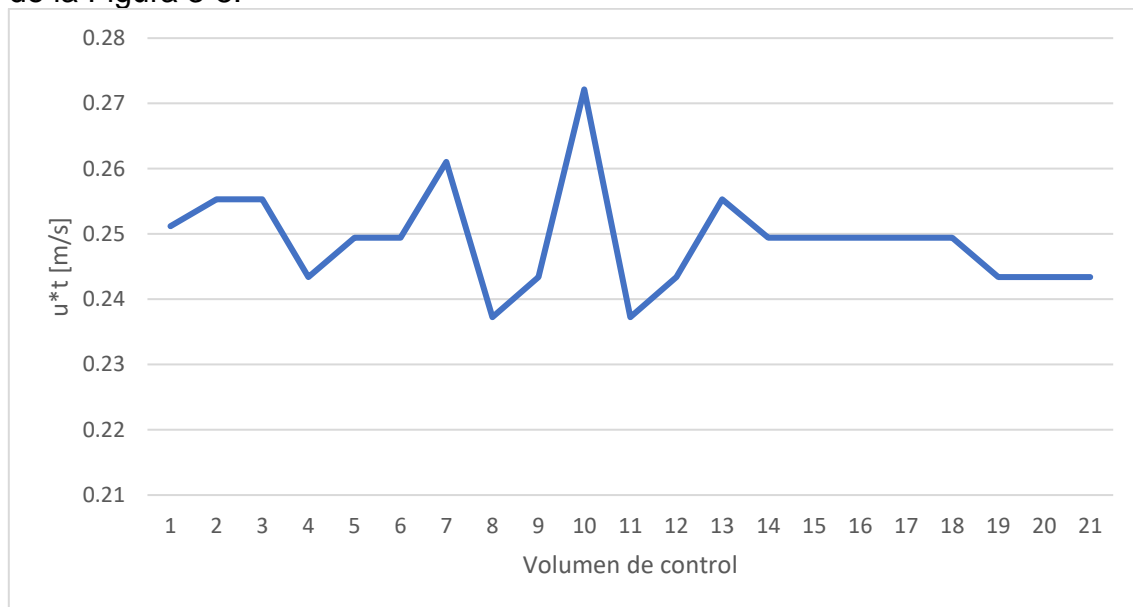


Figura 3-8: Velocidad friccional de inicio de movimiento por volumen de control.

Tabla 3-3: Distribución por percentil de la velocidad friccional en m/s de los datos de la estación La Florida. Se hace la distinción entre todos los datos y aquellas velocidades que superan el umbral de movimiento de 0,25 m/s.

Percentil	$u_*$	$u_* > u_{*t} = 0,25 \text{ m/s}^{10}$
20	0,13	0,25
40	0,16	0,25
60	0,20	0,27
80	0,23	0,29

De estos resultados, se puede inferir que, en menos del 20% del tiempo hay transporte de arena y que, si es que hay, está asociada a velocidades friccionales que, la mayoría del tiempo oscilan entre los 0,25 m/s y los 0,29 m/s.

### 3.3.2. Volumen que sale de la playa

A continuación, en la Figura 3-9, se muestra la cantidad de masa que sale de la playa calculadas con las cuatro fórmulas de transporte eólico sin considerar la precipitación. Cada una de las barras del gráfico tiene dos zonas una sin transparencia y la otra con transparencia. La parte sin transparencia indica el transporte eólico calculado con el dato bruto de la estación de viento, mientras que, la parte con transparencia es el transporte eólico corregido según la metodología expuesta en la sección Corrección por datos faltantes.

---

<sup>10</sup> Los percentiles se obtienen del conjunto de datos de velocidades friccionales mayor a 0,25 m/s.

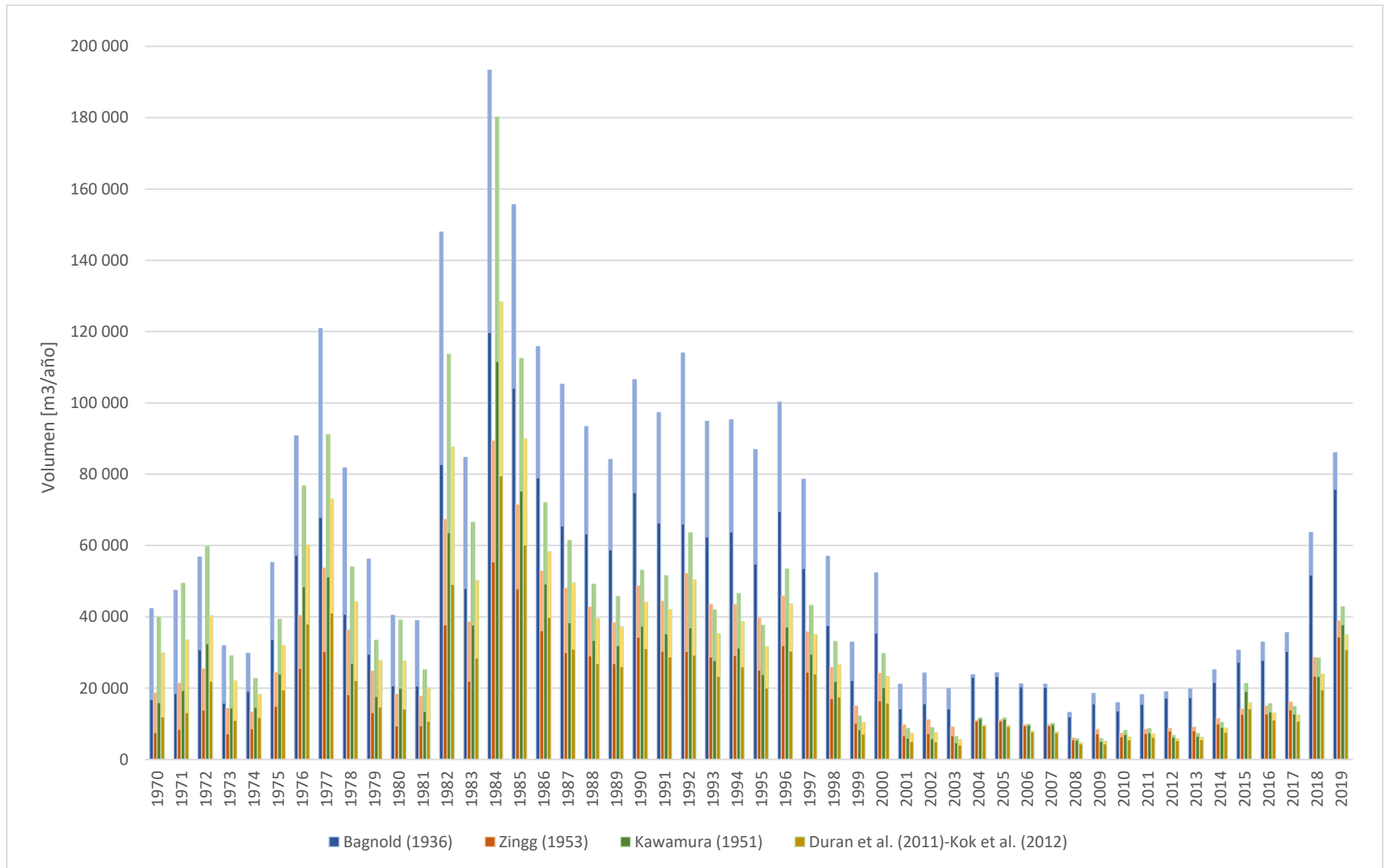


Figura 3-9: Volumen anual que sale de la playa calculada con el registro de datos de la estación de La Florida.

De la Figura 3-9, se ve que, en la década de 1970 y 1980 hay oscilaciones anuales en el transporte eólico alcanzando un máximo a mediados de los ochenta. Luego, en las dos décadas siguientes el transporte eólico presenta una tendencia a la baja. Finalmente, a inicios de la década del 2010, el transporte eólico presenta un comportamiento ascendente. Este comportamiento se explica en la variación de la velocidad del viento a lo largo de los años, dado que, como se mostró en la sección de Antecedentes, la dirección del viento no ha cambiado.

Por otro lado, podemos apreciar que en la mayoría de los años la ecuación de Bagnold predice más transporte eólico que el resto, seguido de la ecuación de Kawamura. Sin embargo, hay veces, cuando se predice menos transporte eólico como a partir del año 2000, que la segunda ecuación que más predice transporte eólico generalmente es la de Zingg.

La situación recién descrita se da porque la velocidad friccional una vez ya superado el umbral de movimiento se mueve entre los 0,25 m/s y los 0,29 m/s aproximadamente. En ese rango de velocidad friccional, como se puede ver en la Figura 3-10, la ecuación de Bagnold es la que predice más transporte eólico, seguido de Zingg para el intervalo 0,25 m/s - 0,27 m/s y Kawamura para el intervalo 0,27 m/s - 0,29 m/s.

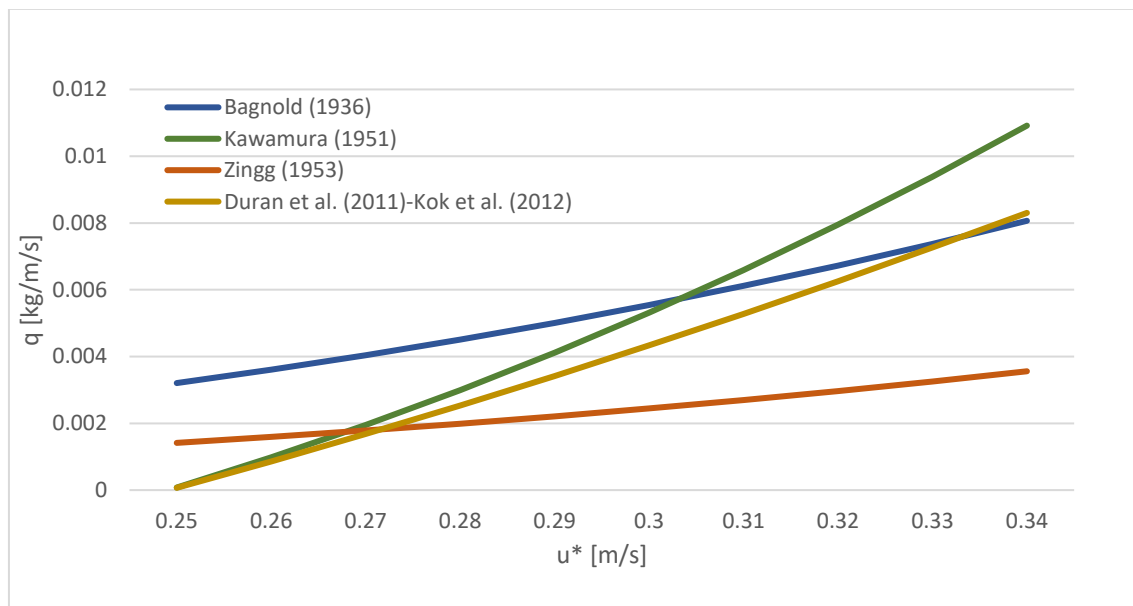


Figura 3-10: Transporte eólico en función de la velocidad friccional.  
Nota: Se considera un diámetro del sedimento promedio de la playa de 0,2 mm.

### 3.3.3. Efecto de la precipitación

A continuación, se presenta la Figura 3-11 que muestra curvas de volumen acumulado de arena que sale de la playa en el tiempo calculadas del promedio de todas las ecuaciones de transporte eólico ocupadas en este trabajo, donde el color de la curva indica si el transporte eólico fue o no corregido de acuerdo a la cantidad de datos faltantes y la línea punteada si es que se considera o no el efecto de la precipitación.

Del gráfico se desprende que el efecto de la precipitación es marginal para efectos de evaluar el comportamiento de la línea de la costa. De hecho, en el acumulado de los 50 años estudiados, la precipitación podría a lo más retener 40 000 m<sup>3</sup>, lo que significa 800 m<sup>3</sup>/año.

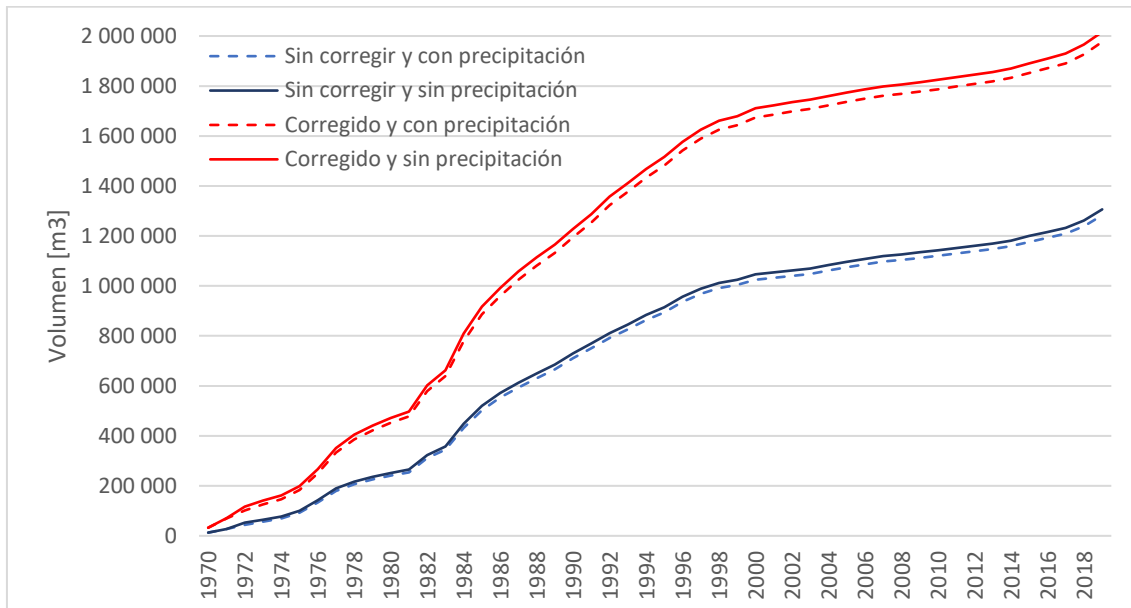


Figura 3-11: Efecto de las precipitaciones en el transporte eólico.

### 3.3.4. Análisis de sensibilidad

En la Tabla 3-4 y en la Tabla 3-5, se muestran los resultados para el análisis de sensibilidad para el diámetro del sedimento y para la velocidad friccional límite de inicio de movimiento. Estas tablas se construyen a partir de promedios anuales de las cuatro fórmulas de transporte eólico utilizadas en este trabajo. Los resultados se presentan en rangos, donde el mayor porcentaje representa al valor del transporte eólico corregido por datos faltantes, aquellas casillas en que no se presentan rangos es porque el transporte eólico corregido y sin corregir es igual.

Tabla 3-4: Análisis de sensibilidad para el transporte eólico anual de la estación La Florida variando el diámetro del sedimento.

Percentil	0.8d	0.9d	1.1d	1.2d
25	186% - 188%	145% - 147%	59% - 60%	43%
50	201% - 203%	155% - 156%	68% - 69%	54%
75	298% - 301%	182% - 183%	89% - 90%	74%

Tabla 3-5: Análisis de sensibilidad para el transporte eólico anual de la estación La Florida variando la velocidad friccional límite de inicio de movimiento.

Percentil	0.8u <sub>t</sub> *	0.9u <sub>t</sub> *	1.1u <sub>t</sub> *	1.2u <sub>t</sub> *
25	314% - 317%	196% - 198%	40%	11%
50	368% - 372%	212% - 214%	50%	19%
75	630% - 637%	316% - 319%	69% - 70%	29%



Como se puede ver, el transporte eólico anual aumenta tanto ante disminuciones del diámetro y como ante disminuciones de  $u_{*t}$ . Podemos ver además que, disminuir el diámetro del sedimento tiene menos impacto que al disminuir  $u_{*t}$ .

Del análisis de sensibilidad se puede concluir que, para realizar una adecuada estimación del transporte eólico anual de la playa, se necesitan muestreos granulométricos adecuados porque si no, las subestimaciones o sobrestimaciones podrían invalidar el resultado.

## 4. Gasto sólido del río Elqui

### 4.1. Antecedentes

El río Elqui es un río ubicado en la IV región de Coquimbo, este se forma a partir de la confluencia del río Turbio y el río Claro. En la zona media del curso del río Elqui, se ubica el embalse Puclaro, esto es a 28 km de su formación y a 48 km de su desembocadura en la ciudad de La Serena. Este se construyó entre 1996 y 1999, siendo el 15 de octubre de 1999 la fecha en que comienza su llenado (Aguas Spa, 2020).

En la Figura 4-1, se muestran las estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) utilizadas en el presente trabajo. De estas hay tres que se ubican en el río Elqui (río Elqui en Almendral, río Elqui en Algarrobal y río Elqui en La Serena) y dos en sus principales tributarios (río Claro en Rivadavia y río Turbio en Varillar). Es importante mencionar que las mediciones de la estación río Elqui en La Serena son las menos confiables ya que la zona de medición es compleja y no existe una sección fija debido a que es una estación móvil (Arrau ingeniería Spa, 2018).

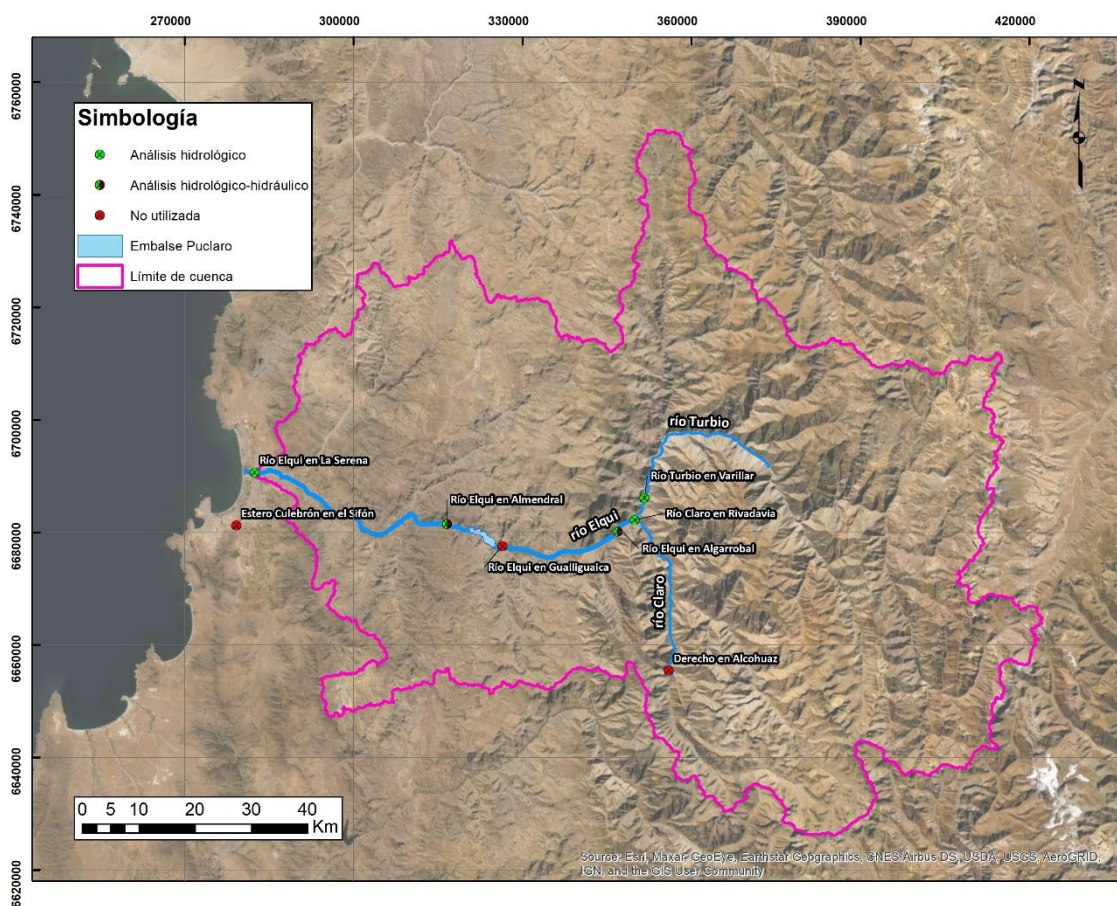


Figura 4-1: Ubicación de las estaciones fluviométricas en la zona de estudio.

### 4.1.1. Hidrología

En esta subsección, se analizará el régimen hidrológico del río Elqui poniendo especial atención al efecto del embalse, el fenómeno de El Niño (ENOS) y la megasequía en los caudales medios y superiores porque el transporte de sedimento de los ríos se asocian a los mayores caudales.

#### 4.1.1.1. Embalse Puclaro

##### 4.1.1.1.1. Curvas de variación estacional

A continuación, se presentan curvas de variación estacional. Estas curvas van a servir para caracterizar el régimen hidrológico de la cuenca. Se presentan gráficos para las probabilidades de excedencia del 10% (Figura 4-2) y del 50% (Figura 4-3), salvo en el caso de río Elqui en Algarrobal, el resto de las curvas se dividen en dos períodos, uno previo y otro posterior a la entrada en operación del embalse Puclaro.

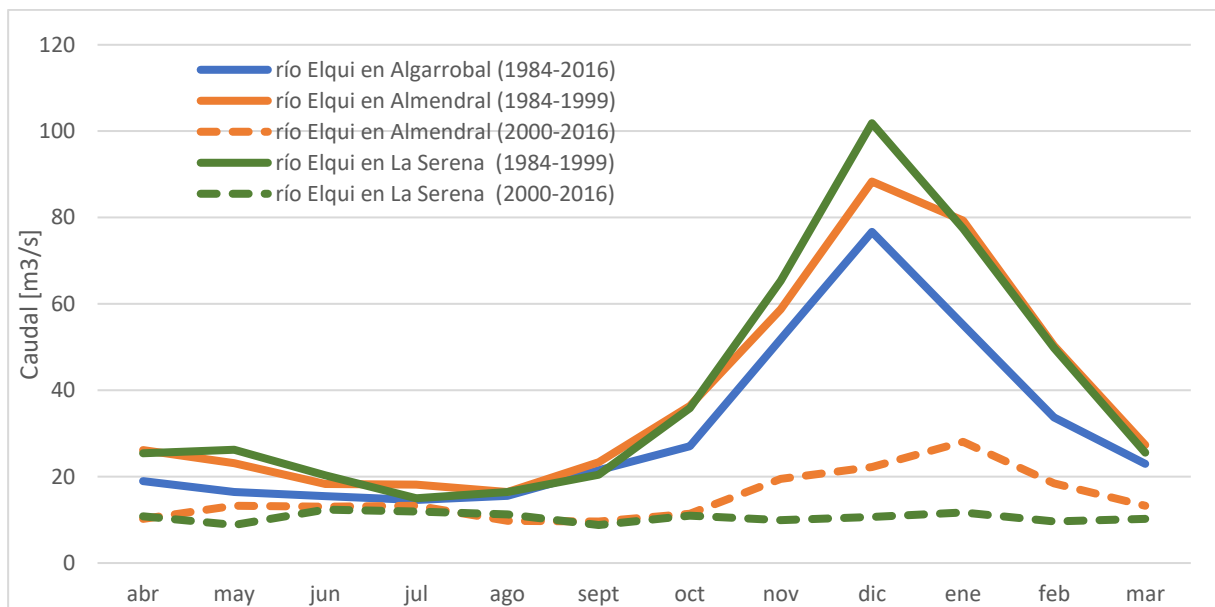


Figura 4-2: Curva de variación estacional para las estaciones río Elqui en Algarrobal, río Elqui en Almendral y río Elqui en La Serena para una probabilidad de excedencia del 10% (fuente: Arrau ingeniería Spa (2018)).

Es posible apreciar que previo a la construcción del embalse, el río Elqui posee un régimen nival para los caudales asociados a una probabilidad de excedencia del 10%. Además, para esta misma probabilidad de excedencia, podemos ver que, en verano, hay diferencias entre estaciones de aproximadamente 10 m<sup>3</sup>/s, lo cual se explicaría por aportes desde quebradas intermedias. Se descarta el aporte nival como explicación de la diferencia entre río Elqui en La Serena y río Elqui en Almendral en diciembre porque la altura de línea de nieves es superior que la altura de las montañas entre ambas estaciones (Arrau ingeniería Spa, 2018).

Por otro lado, en la Figura 4-2 se observa una clara disminución de los caudales posterior a la entrada en operación del embalse, lo cual está influenciado por la

megasequía. Vemos además que, los caudales de la estación río Elqui en Almendral posterior a la entrada en operación del embalse, tienen un régimen nivo-pluvial.

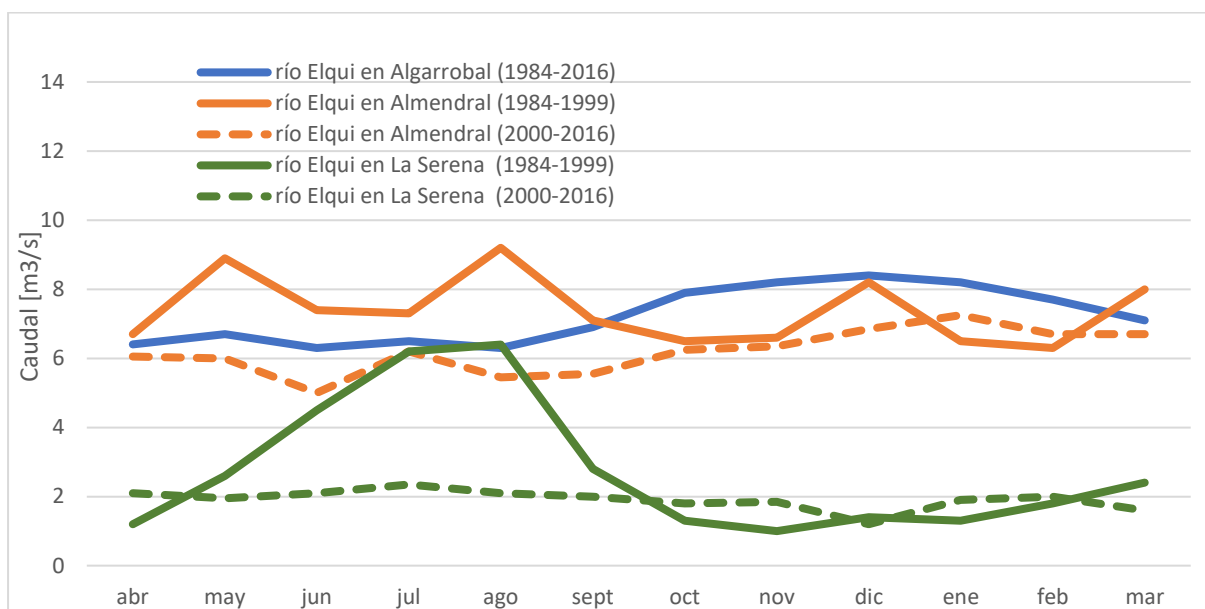


Figura 4-3: Curva de variación estacional para las estaciones río Elqui en Algarrobal, río Elqui en Almendral y río Elqui en La Serena para una probabilidad de excedencia del 50% (fuente: Arrau ingeniería Spa (2018)).

Se observa de la Figura 4-3 que, los caudales son menores en la desembocadura del río que aguas arriba lo cual se asocia a las demandas de riego y agua potable de la zona entre el embalse Puclaro y la desembocadura (UTP Hídrica-ERIDANUS, 2020)<sup>11</sup>. Además, que a diferencia del gráfico para probabilidades de excedencia del 10%, los de 50% tienen una mayor influencia pluvial. Además, es posible apreciar que la entrada en operación del embalse repercute en una menor variación de los caudales a lo largo del año, acumulando agua en invierno.

#### 4.1.1.1.2. Crecidas

Después de realizar una inspección visual de los caudales medios diarios del río Elqui en Almendral y río Elqui en Algarrobal, se identifica que los mayores impactos del embalse sobre el régimen hidrológico son para los años de crecidas. Estos años corresponden al 2002, 2005, 2008 y 2016. Notemos que tres de estos años pertenecen a la década del 2000 y están separados cada 3 años, en cambio, el 2016 es el único perteneciente a la década del 2010. Esta situación da cuenta de la megasequía por la que atraviesa la zona (ver sección Megasequía). A continuación, en la Figura 4-4, se grafican los caudales medios diarios de estos años en las estaciones río Elqui en Almendral y río Elqui en Algarrobal.

<sup>11</sup> En el Anexo G se muestra la ubicación de las bocatomas en el río Elqui entre el embalse Puclaro y su desembocadura.

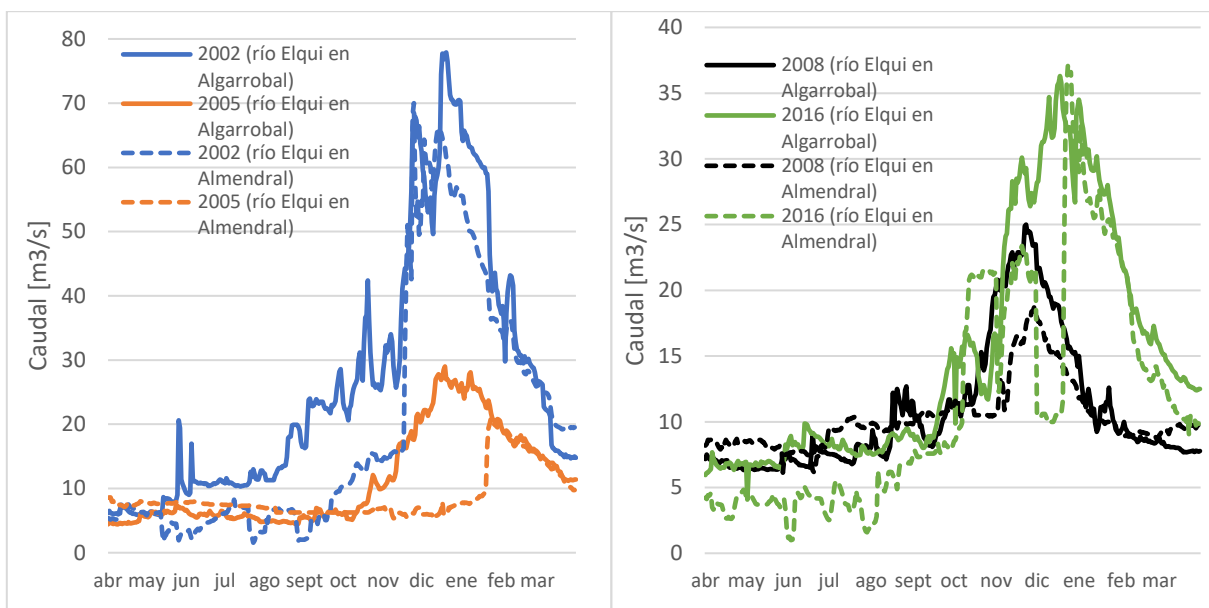


Figura 4-4: Impacto del embalse Puclaro en años de crecidas.

Se puede ver como en las series del 2002, 2005 y 2008, las crecidas aguas abajo del embalse empiezan con una alta pendiente meses después de la crecida de aguas arriba. Esto se debe posiblemente a que, el embalse aprovecha de acumular agua hasta su llenado y una vez lleno ocupa su infraestructura para descargar toda el agua que no le es posible acumular. Además, se ve que, para estos mismos años, las series de caudales aguas abajo son menos fluctuantes que las de aguas arriba y que los peaks lo alcanzan las series de caudales ubicados aguas arriba del embalse.

De este modo, el efecto del embalse sobre del río Elqui es mayor en años en que el río lleva más agua. En este sentido, en ausencia de megasequía, el impacto del embalse sería más frecuente. El impacto directo sobre el régimen de caudales es que el embalse va a tender a aplazar, acotar la liberación de agua hasta que esté lleno y va a reducir el peak de la crecida. También, genera un incremento súbito de los caudales aguas abajo, sin embargo, este incremento la mayoría de las veces es menor al peak de la crecida registrado aguas arriba.

#### 4.1.1.2. Fenómeno de El Niño

La Figura 4-5 da cuenta de la relación entre el caudal medio mensual y el Índice Oceánico de El Niño (en adelante, ONI)<sup>12</sup>, el cual es un índice que permite cuantificar la intensidad del fenómeno de El Niño (en adelante, ENOS). Este gráfico tiene dos ejes, el eje principal (izquierda) que hace referencia al caudal y el secundario (derecha) que indica el ONI. Para este último eje, se identifican gráficos de barras que pueden ser tanto de color azul, como naranja o gris haciendo referencia a que si el periodo se identifica como un periodo de El Niño, La Niña o neutro respectivamente. Además, se muestra con una línea vertical negra la fecha en que entra a operar el embalse.

<sup>12</sup> En los Anexos se describe qué significa este índice y como se obtiene.

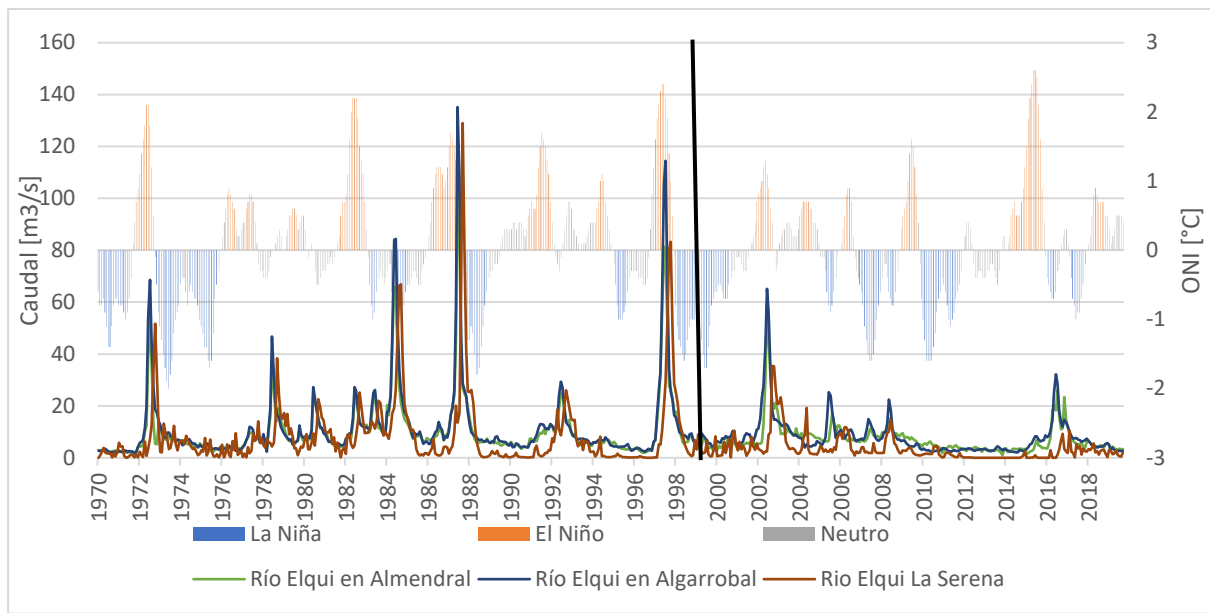


Figura 4-5: Relación del caudal medio mensual del río Elqui con el ONI.

En la Figura 4-5 es posible apreciar que las mayores crecidas a nivel de década se relacionan con fenómenos ENOS salvo para la década del 2010. Estas crecidas, son la de 1973 para la década de 1970, la de 1987-1988 para la década de 1980, la de 1997-1998 para la década de 1990 y la de 2002 para la década del 2000. Sin embargo, en la década del 2010 no se observa esta correspondencia. Por lo tanto, se pueden sacar las siguientes dos conclusiones:

- si bien las mayores crecidas ocurren en épocas donde existe el fenómeno ENOS, un fenómeno ENOS no implica una crecida. Esta misma conclusión se puede obtener de los ríos afluentes al río Elqui (ver Anexo D).
- el efecto de la megasequía en la década del 2010 es más fuerte que la de un fenómeno ENOS.

#### 4.1.1.3. Megasequía

Se presenta la Figura 4-6 que da cuenta de un análisis de frecuencia que muestra el impacto de la década de la megasequía (2010) con respecto a los caudales de otras décadas. En este gráfico, el eje vertical corresponde a la cantidad de días promedio al año en que el caudal entra en determinado rango.

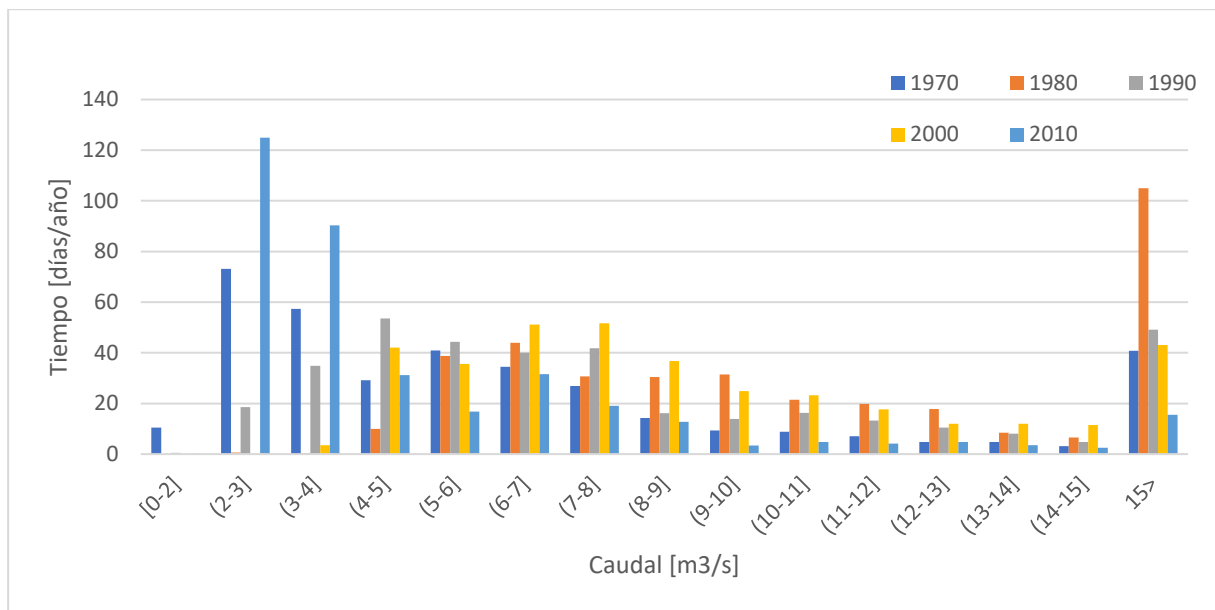


Figura 4-6: Análisis de frecuencia de la variación a nivel de década de los caudales de río Elqui en Algarrobal del embalse Puclaro.

Podemos apreciar que los caudales más bajos se dan en las décadas de 1970 y 2010, sin embargo, la gran diferencia entre ambas décadas se da en que la primera de estas, la variabilidad del caudal es mayor. De hecho, mientras prácticamente no hay valores para la década del 2010 que sean iguales o inferiores a los 2 m<sup>3</sup>/s, si los hay para la década de 1970 y mientras hay poco más de 100 días/año para la década de 1970 para los caudales mayores a 15 m<sup>3</sup>/s, este valor se reduce a más de la mitad para la década del 2010. Por lo tanto, podemos establecer que el efecto de la megasequía sobre los caudales queda más de manifiesto en las crecidas que en los caudales medios del río, porque, de hecho, esta última década tiene sus caudales medios superiores a los de la década de 1970.

Las décadas de 1990 y 2000 se relacionan de la misma forma que la de las dos décadas que se habló anteriormente, esto es en 1990 en general los caudales son de menor magnitud que la década del 2000, pero presenta mayor cantidad caudales mayores a los 15 m<sup>3</sup>/s. La década de 1980 es la que presenta caudales de magnitudes superiores, de hecho, la cantidad de días por año para caudales superiores a los 15 m<sup>3</sup>/s es más del doble que para la década de 1990, que es la que le sigue.

#### 4.1.2. Aportes y pérdidas de sedimento en el río Elqui

Los eventos aluvionales desde ciertas quebradas (quebrada Marquesa y Santa Gracia), el embalse Puclaro y las extracciones de áridos, se postulan como los principales factores no hidrológicos que incidirían en el sedimento que llega a la playa. En la Figura 4-7, se puede ver la ubicación de las quebradas que más aportarían sedimento, las zonas desde donde se extraen áridos y el embalse Puclaro.

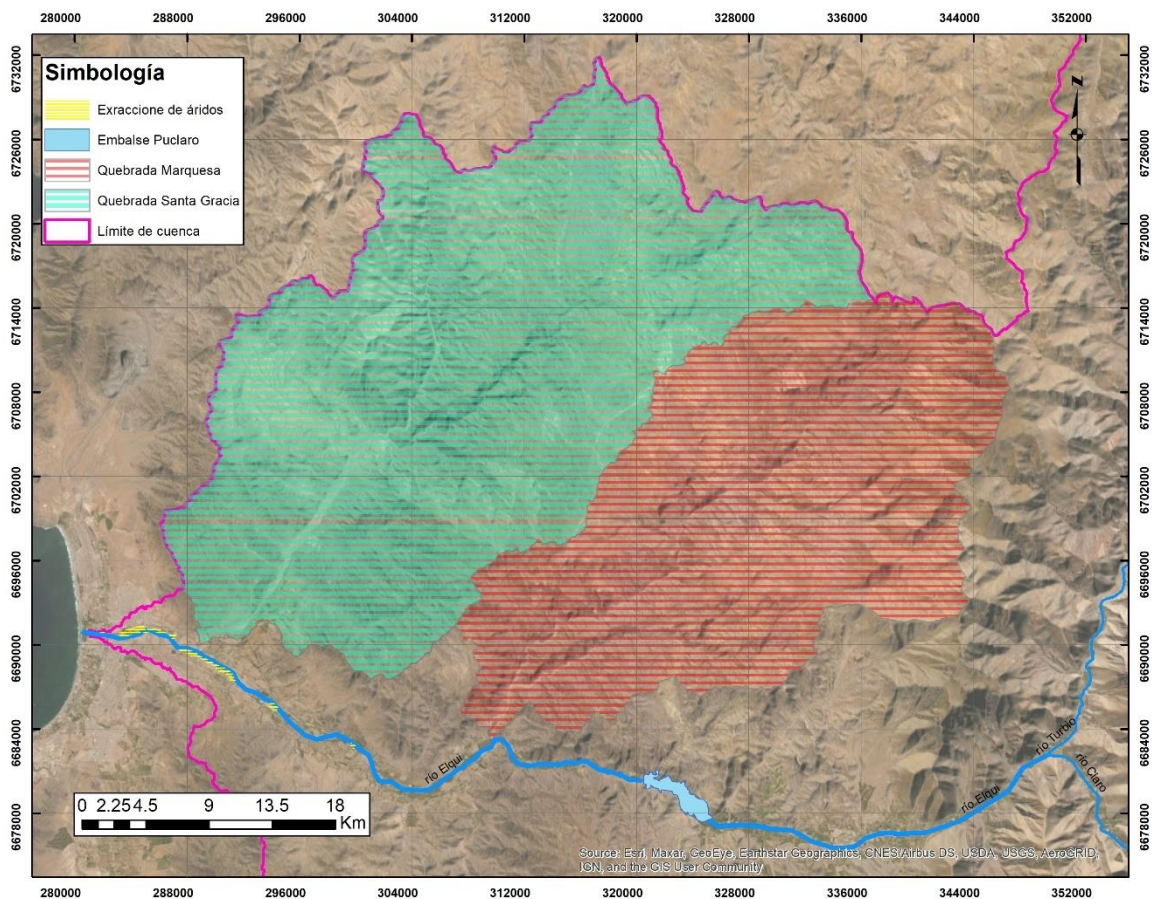


Figura 4-7: Ubicación de los principales factores que incidirían en el sedimento que llega a la playa.

A continuación, se entra en el detalle de porqué estos factores incidirían en los sedimentos que llegan a la playa de La Serena.

#### 4.1.2.1. Quebradas

A partir de una inspección visual de imágenes satelitales, es posible ver que los aluviones producidos en las quebradas adyacentes al río Elqui, serían una fuente importante de sedimento. En la Figura 4-8, se puede ver este fenómeno tanto antes como después de los eventos aluvionales del 24 y 25 de marzo de 2015. Además, se puede apreciar como este evento aluvional deja sedimento en el cauce en la Figura 4-9.



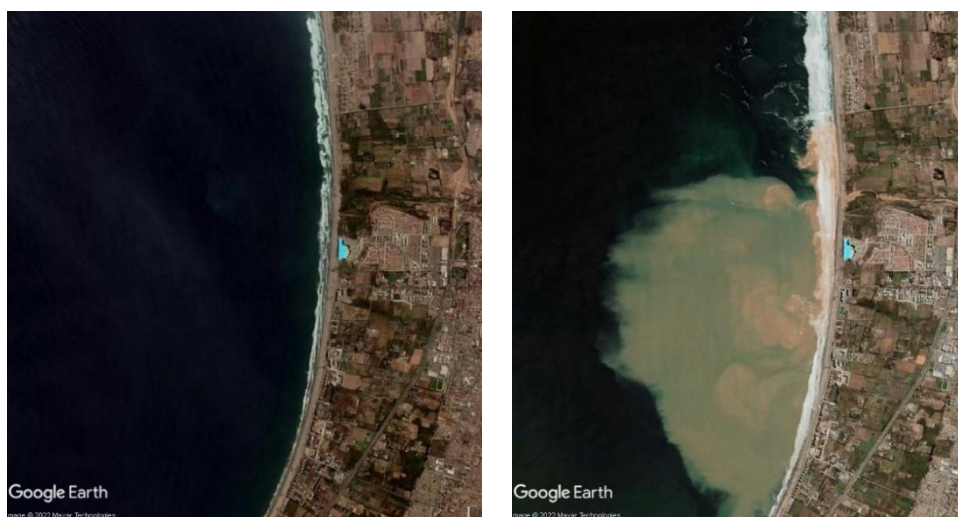


Figura 4-8: Playa de La Serena antes y después de los aluviones del 24 y 25 de marzo de 2015.



Figura 4-9: Río Elqui antes y después de los aluviones del 24 y 25 de marzo de 2015.

Eventos aluvionales, remociones de masa y deslizamientos de tierra, serían eventos frecuentes en la cuenca, de hecho, varios autores han intentado recopilar estos eventos (SERNAGEOMIN, s.f.; Diario El Día, 2017; Griem, 2021; Vergara Dal Pont et al., 2018; Aguas Spa, 2020; Mardones, 2019). En la Tabla 4-1, se hace una recopilación de los aluviones reportados en el área de estudio entre 1970 y 2019. Además, en la Figura 4-10, se muestra la ubicación espacial, hecho por (SERNAGEOMIN, s.f.), de eventos aluvionales, remociones de masa y deslizamientos de tierra.

Tabla 4-1: Recopilación de eventos aluvionales reportados entre 1969 y 2019 (fuente: SERNAGOMIN (s.f.), Diario El Día (2017), Griem (2021), Vergara Dal Pont et al. (2018), Aguas Spa (2020), Mardones (2019)).

Década de 1980	Década de 1990	Década del 2000	Década del 2010
1 de julio de 1984	8 – 11 de junio de 1997	2000	2011
10 de julio de 1984	Agosto de 1997	2004	2013
14 de julio de 87		2005	24-25 marzo 2015
		15 de febrero de 2006	11-13 de mayo de 2017 26 de junio de 2017

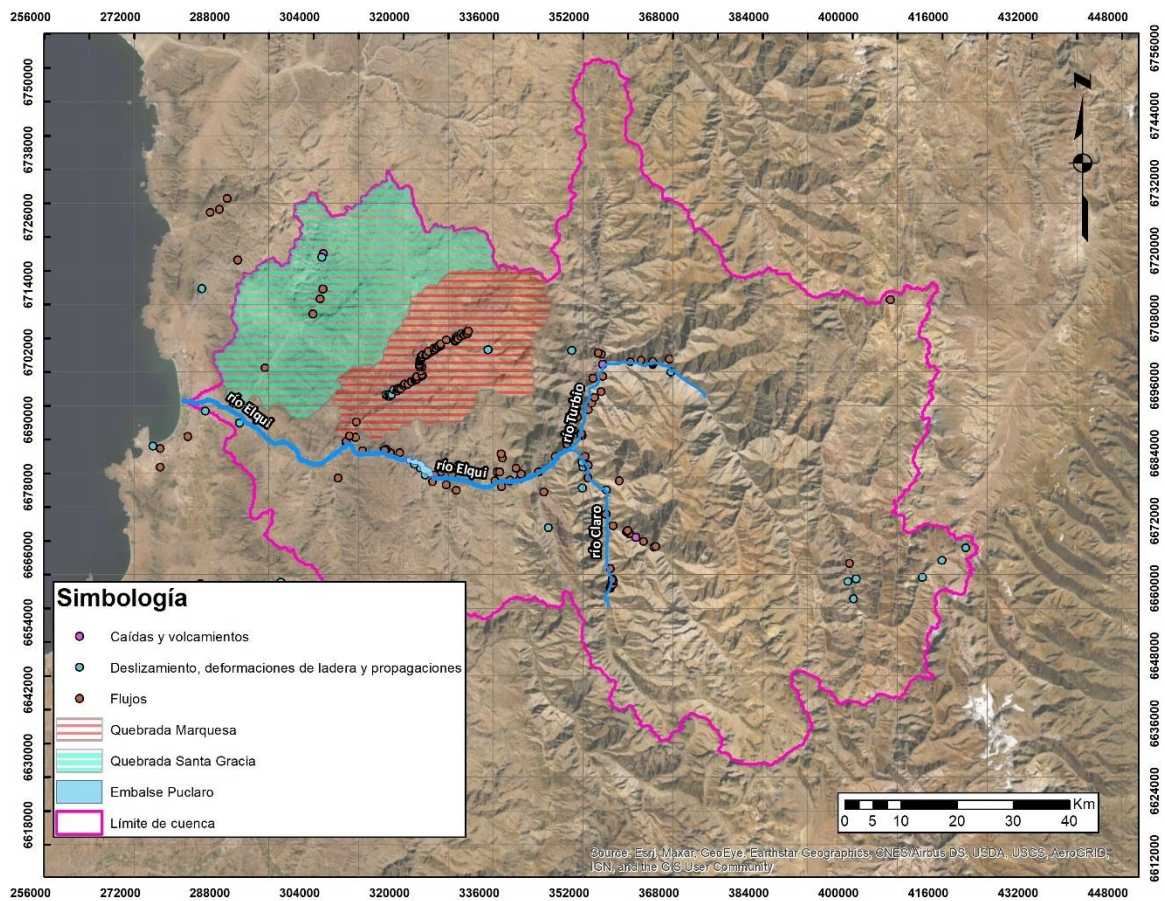


Figura 4-10: Aluviones, remociones de masa y deslizamientos de tierra reportados por SERNAGEOMIN (s.f.).

Entre las quebradas que tienen más influencia en la cantidad de sedimento que llega a la playa se destacan las de Santa Gracia y Marquesa dado que están aguas abajo del embalse y pueden presentar un comportamiento aluvional (Arrau ingeniería Spa, 2018).

En base a los resultados del Balance Hídrico Nacional (2017), se puede deducir que estas quebradas presentan caudales efímeros con peaks coincidentes, pero de distinta magnitud. Esto se aprecia en la Figura 4-11.

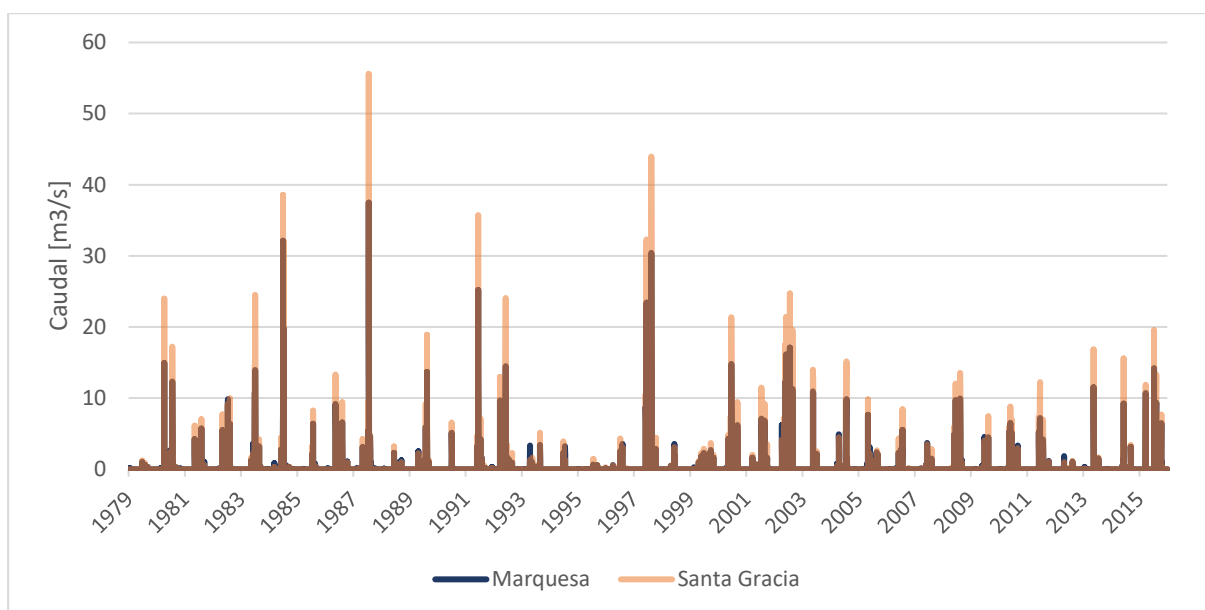


Figura 4-11: Caudales de quebradas Santa Gracia y Marquesa (fuente: elaboración propia a partir de Balance Hídrico Nacional (2017)).

#### 4.1.2.2. Embalse Puclaro

El embalse Puclaro, ubicado en la zona media de la cuenca, a unos 48 km de la desembocadura del río, se presenta como un elemento que, por un lado, afecta los caudales que llegan a la desembocadura (ver sección Hidrología) y, por otro lado, como un elemento que retiene sedimentos, lo que produce un acorazamiento en el tramo ubicado inmediatamente aguas abajo del embalse y una menor disponibilidad de sedimentos a transportar.

A partir de un estudio batimétrico realizado por Prommra (2018) de la Universidad de La Serena, se ha determinado que el embalse ha perdido un 0,37% de su capacidad (Junta de vigilancia del río Elqui y sus afluentes, 2018). Esto significa que el sedimento retenido por el embalse alcanzaría los 773 771 m<sup>3</sup>. De esta forma, se puede estimar que la tasa de retención anual del embalse ronda los 43 000 m<sup>3</sup>.

#### 4.1.2.3. Extracciones de áridos

Esta actividad se encuentra ubicada principalmente en el río Elqui entre los puentes Zorrilla y Altovalsol ubicados a 3,8 km y 16 km aguas arriba de la desembocadura del río Elqui (Aguas Spa, 2020). En la Tabla 4-2, se presenta información relacionada al volumen autorizado de extracción de áridos por la Ilustre Municipalidad de La Serena entre 2019 y 2020, mientras que, en la Figura 4-7, es posible apreciar las zonas donde se identifica que hay extracciones de áridos.

Tabla 4-2: Extracciones de áridos autorizados por la Ilustre Municipalidad de La Serena entre 2009 y 2020 (fuente: Aguas Spa (2020)).

Periodo	Volumen autorizado [m <sup>3</sup> /año]	Comentario
2009-2020	295 500	Promedio
2016	484 000	Máximo autorizado entre 2009 y 2020
2011/2012	47 300	Mínimo autorizado entre 2009 y 2020

Si bien, el 21 de marzo de 2013, la Ilustre Municipalidad de La Serena dictaminó el Decreto 1064/13, que “aprueba la ordenanza que regula la extracción de áridos desde un bien nacional de uso público (especialmente el cauce del río Elqui) o desde pozos lastreros ubicados en inmuebles de propiedad particular, en la comuna de La Serena”, la extracción de áridos en el río Elqui dataría de la década de 1990 dado que, se tienen antecedentes de que existen empresas que se constituyeron en esa década. Además, la extracción efectiva sería mayor dada la cantidad de infracciones cometidas asociadas a obras no autorizadas en cauces y extracciones de áridos no autorizadas (ver Anexo F).

Los proyectos relacionados a la extracción de áridos tienen un impacto directo sobre la morfología del río y, por ende, de las características hidráulicas del cauce (Arrau ingeniería Spa, 2018). Además, estas, al sacar sedimento del río, merman la cantidad de sedimento disponible a ser transportado.

## 4.2. Metodología

La cantidad de sedimento que entra a la celda litoral por el río Elqui y el análisis de los factores que incidirían en el gasto sólido del río se hacen en base al software HEC-RAS 5.0 en su forma unidimensional y la ecuación de transporte de sedimento de Meyer-Peter & Müller (en adelante, MPM) en complemento con la de Wilcock & Crowe (en adelante, WC).

Para poder analizar los factores que se nombran anteriormente, se procede de la siguiente manera:

1. **Sectorización del río:** Se divide el tramo del río Elqui que va entre la zona inmediatamente aguas abajo del embalse Puclaro y su desembocadura en el mar en sectores.
2. **Parámetros hidráulicos:** Se hacen simulaciones en HEC RAS 5.0, a cuyos resultados se les promedia espacialmente para obtener así parámetros hidráulicos representativos de tramos de río.
3. **Transporte potencial de sedimentos:** Se aplican las ecuaciones de MPM y WC para así obtener resultados de transporte potencial de sedimento por tramo del río Elqui.
4. **Sedimento que llega a la playa:** A partir de los resultados de transporte potencial de sedimento, se aplica una metodología que hace un seguimiento a escala anual, por tramo de río, del sedimento que va siendo transportado por el río Elqui.
5. **Evaluación de casos:** Se evalúan distintos casos para analizar la importancia que tiene cada factor que influiría en la cantidad de sedimento que llevaría el río Elqui hasta la playa.

### 4.2.1. Sectorización del río

Como ya se mencionó, los principales elementos que influyen en la dinámica de transporte de sedimento serían los aluviones provenientes de las quebradas Marquesa

y Santa Gracia, la extracción de áridos desde el lecho del río y el embalse Puclaro. Es en ese sentido que, se decide dividir el tramo que va entre la cortina del embalse Puclaro y la desembocadura del río en el mar en sectores de igual morfología fluvial, procurando separar el efecto de estos factores en distintos tramos. En la Figura 4-12, es posible apreciar la división realizada, mientras que en la Tabla 4-3 se realiza un resumen de qué factor podría incidir en el transporte de sedimento de cada tramo, donde las influencias directas son aquellas en que el factor evaluado se ubica o actúa directamente en el tramo.

Dado que para utilizar las ecuaciones de transporte de sedimento se necesita información de la granulometría del lecho, se opta por asignarles a cada tramo una única curva granulométrica representativa. La elección de estas curvas granulométricas se realiza a partir de una serie de muestreos realizados en el río Elqui por Tecnolab en noviembre de 2017. La ubicación de los puntos de muestreo, así como la elección de estas curvas es posible observarla en la Figura 4-12 y en la Tabla 4-3. Notemos que en algunos sectores se opta por realizar un promedio.

Tabla 4-3: Influencia directa de factores que inciden en la llegada de sedimento a la playa y granulometría utilizada por tramo.

<b>Tramo</b>	<b>Largo [km]</b>	<b>Influencia directa</b>	<b>Granulometría<sup>13</sup></b>
<b>Humedal</b>	1		1
<b>Transición humedal</b>	2		2
<b>Ciudad</b>	2	Extracciones de áridos	2/3
<b>El Olivar</b>	5	Extracciones de áridos Quebrada Santa Gracia	3/4/5
<b>Islón</b>	8	Extracciones de áridos	6/7/8
<b>Altovalsol</b>	10		9
<b>Pelicana</b>	9	Quebrada Marquesa	10
<b>Bajo embalse</b>	12	Embalse	11

<sup>13</sup> El símbolo “/” significa que se realiza un promedio entre varias curvas granulométricas.

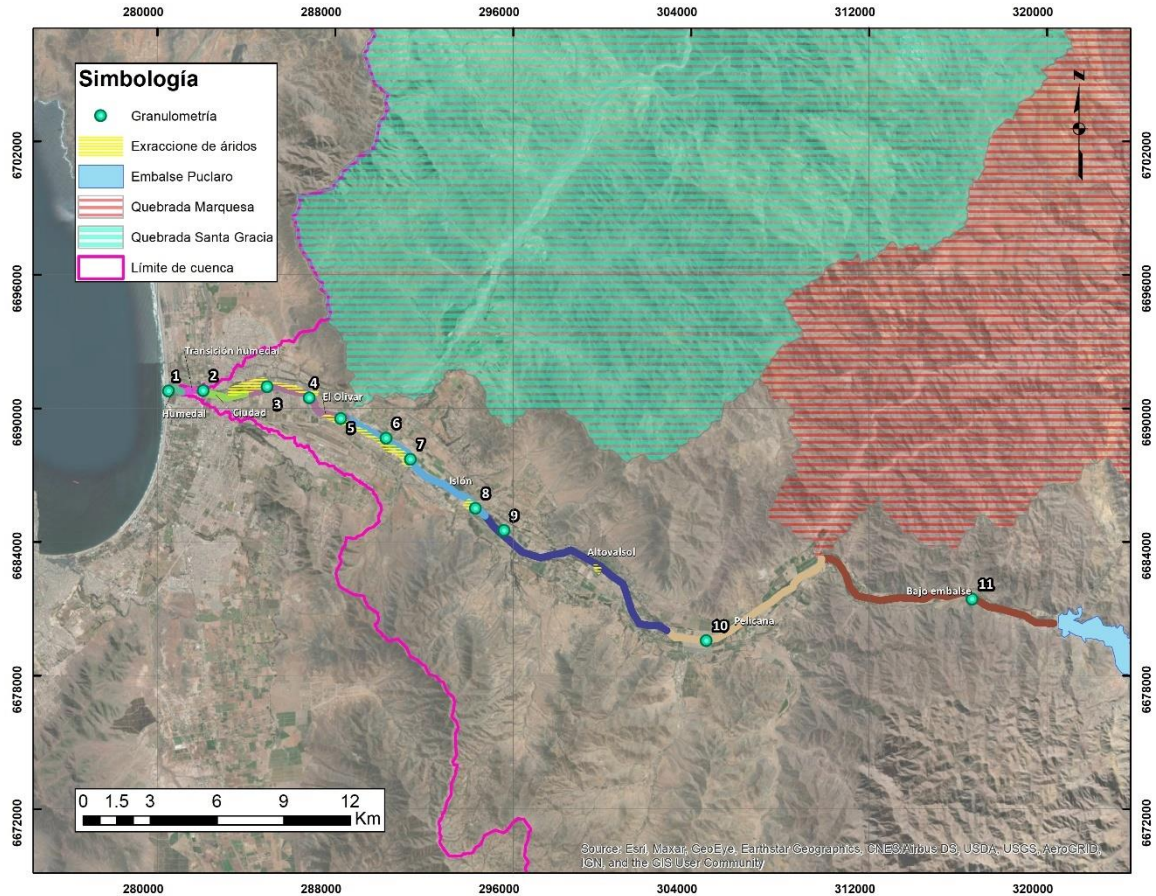


Figura 4-12: Sectorización del río Elqui y ubicación desde dónde se realiza la toma de muestras para la granulometría.

La Figura 4-13, en tanto, muestra las curvas utilizadas en este estudio y en la Figura 4-14, es posible apreciar el diámetro medio de las curvas granulométrica elegidas. Es importante mencionar que estas curvas se cortaron en su parte superior de manera que hubiera transporte de sedimentos al menos una vez en el periodo estudiado con la ecuación de MPM y con WC (ver sección Meyer-Peter & Müller (1948) y Wilcock & Crowe (2003)).

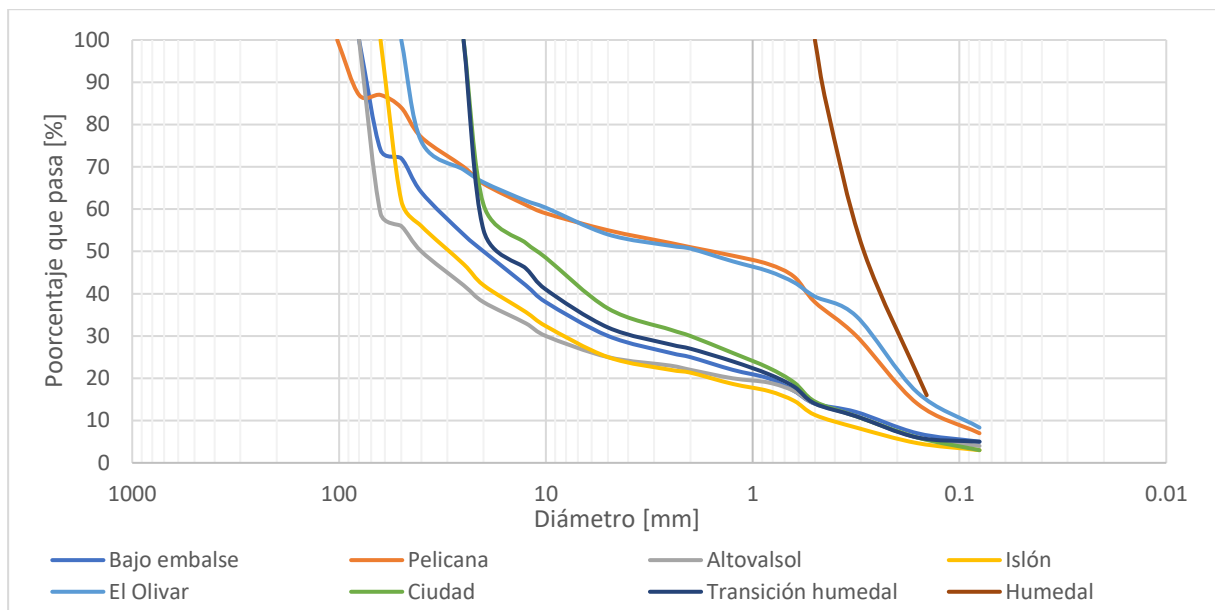


Figura 4-13: Curvas granulométricas elegidas.

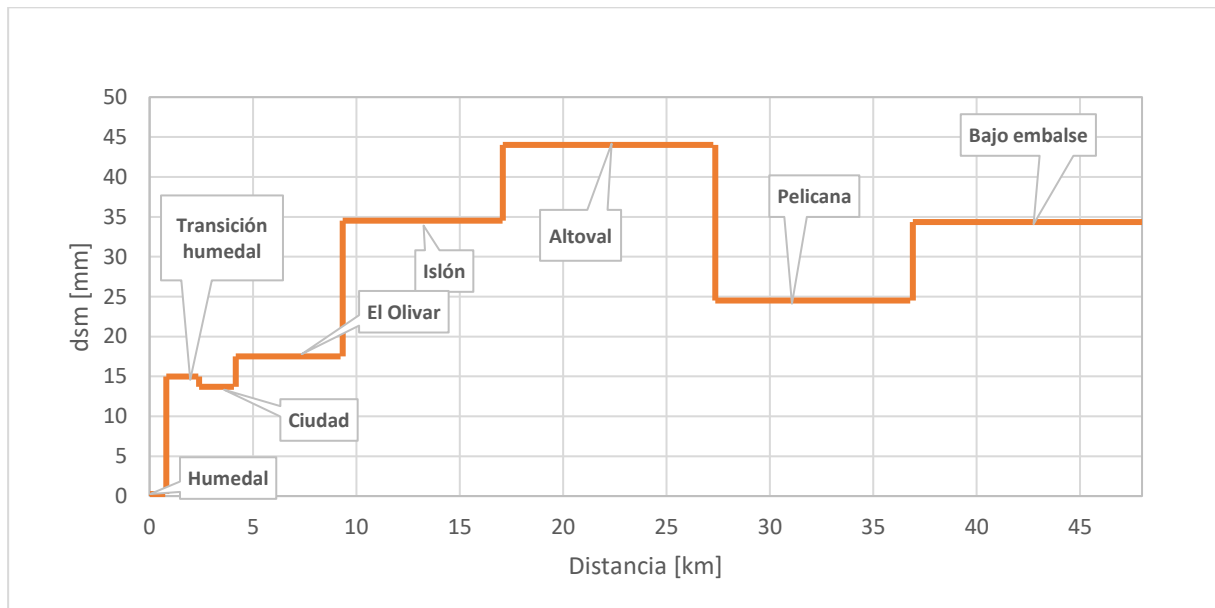


Figura 4-14: Diámetro medio de las curvas granulométricas elegidas en cada tramo (distancia medida desde la desembocadura del río).

## 4.2.2. Parámetros hidráulicos

Se utiliza el programa computacional HEC-RAS 5.0 para obtener parámetros hidráulicos del río para cada caudal simulado en cada sección del río. HEC-RAS 5.0 calcula a partir de la ecuación de la energía (Ecuación 4-1) los parámetros hidráulicos del río para cada par de perfiles transversales. En ese sentido, lo que hace es igualar la energía de dos perfiles transversales consecutivos incorporando una pérdida de carga. A continuación, se presenta la ecuación de la energía (Ecuación 4-1).

$$Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

*Ecuación 4-1*

Donde:

$Z_1$ : elevación de la superficie de agua en la sección transversal 1.

$Z_2$ : elevación de la superficie de agua en la sección transversal 2

$V_1$ : velocidad promedio del flujo en la sección transversal 1.

$V_2$ : velocidad promedio del flujo en la sección transversal 2.

$\alpha_1$ : coeficiente de Coriolis para la sección 1.

$\alpha_2$ : coeficiente de Coriolis para la sección 2.

$h_e$ : pérdida de carga

$g$ : aceleración de gravedad.

La pérdida de carga  $h_e$  entre dos secciones transversales es la suma entre un término asociado a la pérdida friccional y otro término asociado a las expansión o contracción del flujo, por lo tanto, la ecuación de la pérdida de carga (Ecuación 4-2) quedaría como se muestra a continuación.

$$h_e = LS_f + C \left( \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right)$$

*Ecuación 4-2*

Donde:

$L$ : longitud equivalente del tramo.

$C$ : coeficiente de pérdida por expansión o contracción. Se utiliza 0,1 para la contracción del flujo y 0,3 para la expansión.

$S_f$ : pendiente friccional representativa entre los dos tramos.

Por otro lado, HEC RAS 5.0 divide cada sección transversal en: el canal principal y sus dos zonas adyacentes llamadas overbanks. Para calcular el caudal que pasa por cada subsección se utiliza la Ecuación 4-3.

$$\frac{Q}{\sqrt{S_f}} = \frac{AR^{\frac{2}{3}}}{n}$$

*Ecuación 4-3*

Donde:

$Q$ : caudal.

$A$ : área de escurrimiento.

$S_f$ : pendiente friccional representativa entre dos tramos.

$R$ : radio hidráulico.

$n$ : número de Manning.

De estas ecuaciones, es posible advertir que los datos de entrada para obtener los parámetros hidráulicos del río son tres: las secciones transversales, el caudal y el número de Manning. A continuación, se procede a explicar la fuente o la manera en que se obtuvieron estos parámetros.



- **Secciones transversales:** Se obtuvieron a partir de un vuelo LIDAR realizado en enero del 2018 por Arrau ingeniería Spa (2018). Se considera solamente las secciones transversales aguas abajo del embalse Puclaro, por lo tanto, la unión de estas secciones tiene un largo aproximado de 48,7 km. El espaciamiento entre secciones es de aproximadamente 100 m.
- **Caudal:** Se utiliza el caudal medio diario registrado por las estaciones de monitoreo DGA Río Elqui en Almendral, río Elqui en Algarrobal y el caudal de las quebradas Santa Gracia y Marquesa obtenidos del Balance Hídrico Nacional.
- **Número de Manning:** Se ocupa el método de Cowan para obtener el número de Manning. La ecuación del método de Cowan consta de sumar valores a los que es posible asociarles ciertas condiciones del río que le añaden rugosidad al lecho.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$$

*Ecuación 4-4*

Donde:

$n$ : número de Manning.

$n_0$ : valor de  $n$  para un canal recto, uniforme y liso que depende del material del lecho.

$n_1$ : valor asociado a las irregularidades de la superficie.

$n_2$ : valor asociado a las variaciones de la forma y el tamaño de la sección transversal.

$n_3$ : valor asociado a las obstrucciones.

$n_4$ : valor asociado a la vegetación y condiciones del flujo.

$m_5$ : corrección por presencia de meandros.

Cada uno de estos valores se obtienen por inspección visual. Se ocupan los valores registrados por Arrau ingeniería Spa (2018) ya que realizaron una campaña en terreno para estimar cada parámetro de la Ecuación 4-4. El detalle del número de manning utilizado se encuentra en el Anexo E.

### 4.2.3. Transporte potencial de sedimentos

A partir de los resultados provenientes de la simulación en HEC RAS 5.0, se procede a calcular el esfuerzo de corte para cada sección transversal y cada caudal simulado a partir de la Ecuación 4-5. Luego, dado que lo que se quiere es obtener un valor de gasto sólido representativo de cada tramo, se procede a realizar un promedio ponderado del tramo del esfuerzo de corte para posteriormente utilizar las ecuaciones de transporte de sedimento que se presentan a continuación.

$$\tau = SR_h\rho g$$

*Ecuación 4-5*

Donde:

$\tau$ : esfuerzo de corte.

$S$ : pendiente.

$R_h$ : radio hidráulico.

$\rho$ : densidad del agua.

$g$ : aceleración de gravedad.

#### 4.2.3.1. Meyer-Peter & Müller (1948)

La ecuación de MPM, es una ecuación que se basa en un exceso en el esfuerzo de corte. Esta fue desarrollada a partir de información experimental con partículas de sedimento que iban desde las arenas a las gravas y granulometría uniforme, además de mezclas de sedimentos de distintos tamaños. A pesar de que se desarrolla a partir de granulometría uniforme, esta formulación se ha ocupado en el caso de lechos de granulometrías extendidas. Un problema de esta ecuación es que no considera el fenómeno de formación de coraza (Niño, 2019).

La Ecuación 4-6 corresponde a la ecuación de MPM, esta ocupa un parámetro  $\tau^*$  llamado número de Shields, el cual proviene de adimensionalizar el esfuerzo de corte a partir de la Ecuación 4-7. Luego, para obtener el gasto sólido volumétrico por unidad de ancho se ocupa la Ecuación 4-8. Finalmente, este valor se multiplica por el ancho de la sección mojada.

$$q_s^* = 8(\tau^* - 0,047)^{\frac{3}{2}}$$

*Ecuación 4-6*

$$\tau^* = \frac{\tau}{R\rho g d_{sm}}$$

*Ecuación 4-7*

$$q_s^* = \frac{q_s}{\sqrt{Rg d_{sm}^3}}$$

*Ecuación 4-8*

Donde:

$q^*$ : gasto sólido volumétrico por unidad de ancho.

$\tau^*$ : número de Shields.

$\tau$ : esfuerzo de corte.

$q_s$ : unidad de sedimento transportado en peso y unidad de ancho.

$R$ : densidad específica sumergida del sedimento.

$\rho$ : densidad del agua.

$g$ : aceleración de gravedad.  
 $d_{sm}$ : diámetro medio del sedimento.

El valor de  $R$  se calcula a partir de la Ecuación 4-9.

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

Ecuación 4-9

Donde:

$R$ : densidad específica sumergida del sedimento

$\rho_s$ : densidad del sedimento.

$\rho$ : densidad del agua.

#### 4.2.3.2. Wilcock & Crowe (2003)

La ecuación de WC, es una ecuación diseñada para lechos de granulometría extendida compuestos por arena y grava. Es un método de transporte de superficie que establece que el transporte de sedimento depende principalmente del material que entra en contacto directo con el flujo. De esta forma, este método considera el fenómeno de formación de una coraza que genera sobreexposición y escondimiento de los sedimentos, el cual, supone que existe una dependencia entre los distintos diámetros de sedimentos presentes en el río.

Supongamos que se tiene una curva granulométrica de la coraza, formada por  $N$  fracciones, tal que  $F_i$  represente al porcentaje retenido asociado a la fracción de tamaño  $d_{si}$ , de esta forma, el gasto sólido total por unidad de ancho corresponde a la suma del gasto sólido de cada fracción granulométrica  $q_{si}$  (ver Ecuación 4-10).

$$q_s = \sum_{i=1}^N q_{si}$$

Ecuación 4-10

Donde el valor de  $q_{si}$  se obtiene a partir de la Ecuación 4-11, considerando la velocidad friccional  $u_*$  como  $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ .

$$q_{si} = \frac{W_{si}^* u_*^3 F_i}{Rg}$$

Ecuación 4-11

Donde:

$q_{si}$ : gasto sólido por unidad de ancho para la fracción granulométrica  $i$ .

$W_{si}^*$ : gasto sólido por unidad de ancho adimensional para la fracción granulométrica  $i$ .

$F_i$ : porcentaje retenido por la fracción granulométrica asociado a la fracción de tamaño

$d_{si}$ : diámetro del sedimento asociado a la fracción  $i$ .

$u_*$ : velocidad friccional.

$R$ : densidad específica sumergida del sedimento.

$g$ : aceleración de gravedad.

El valor de  $W_{si}^*$  propuesto es tal de que si consideramos un esfuerzo de corte  $\tau$  y un esfuerzo de corte de referencia asociado a la fracción  $i$ ,  $\tau_{ri}$  que se igualan, el valor de  $W_{si}^*$  es un valor pequeño cercano a 0,002. De esta forma, la ley de gasto sólida propuesta por WC queda de la siguiente manera:

$$W_{si}^* = \begin{cases} 0,002\phi^{7,5} & \text{si } \phi < 1,35 \\ 14 \left(1 - \frac{0,894}{phi^{0,5}}\right)^{4,5} & \text{si } \phi \geq 1,35 \end{cases}$$

Ecuación 4-12

Siendo  $\phi = \frac{\tau}{\tau_{ri}}$  y el esfuerzo de corte de referencia  $\tau_{ri}$  un valor dado por la Ecuación 4-13, Ecuación 4-14 y Ecuación 4-15.

$$\frac{\tau_{ri}}{\tau_{rm}} = \left(\frac{d_i}{d_{sm}}\right)^b$$

Ecuación 4-13

$$b = \frac{0,67}{1 + \exp\left(1,5 - \frac{d_i}{d_{sm}}\right)}$$

Ecuación 4-14

$$\tau_{rm}^* = 0,021 + 0,015e^{-20FS}$$

Ecuación 4-15

Donde:

$\tau_{ri}$ : esfuerzo de corte de referencia que se calcula para cada diámetro de la curva granulométrica.

$\tau_{rm}$ : esfuerzo de corte de referencia asociado al diámetro medio del sedimento.

$d_{sm}$ : diámetro medio del sedimento.

$d_i$ : diámetro de la fracción  $i$ -ésima.

$b$ : parámetro.

$\tau_{rm}^*$ : esfuerzo de corte de referencia asociado al diámetro medio del sedimento adimensionalizado.

$FS$ : fracción de arena presente en el suelo

#### 4.2.4. Sedimento que llega a la playa

La estimación de la cantidad de sedimento que llega a la playa se realiza a través de un enfoque a escala anual que hace un seguimiento del sedimento por tramos de río considerando secciones transversales fijas<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> Este método está basado en la herramienta de HEC RAS 5.0 llamada Sediment Impact Analysis Method, la cual es una herramienta de balance de sedimento que compara la capacidad de transporte de un tramo con el aporte que le llega (Little, 2010).

En cada uno de estos tramos, la metodología aplicada considera que existen dos tipos de gasto sólido: el gasto sólido potencial ( $Q_p$ ) y el gasto sólido disponible ( $Q_d$ ).  $Q_p$  se va a definir como el gasto que se transportaría en un año si es que la cantidad disponible del río fuera ilimitada, el cual se calcula con las ecuaciones de MPM y de WC. En cambio,

$Q_d$  es el gasto sólido que está disponible a ser transportado hacia aguas abajo sujeto a las restricciones impuestas en los tramos de aguas arriba.

Consideremos  $n$  tramos, siendo el tramo 1 el de más aguas arriba y el único en equilibrio sedimentario y el  $n$ -ésimo el de más aguas abajo. Dado que no hay restricciones en cuanto a la cantidad de sedimento que el tramo 1 puede transportar, al tramo 2 va a llegar un valor  $Q_p^1$ , este valor pasaría a llamarse sedimento disponible en la sección 2,  $Q_d^2$ . Luego, para el tramo 2, se calcula el sedimento potencial  $Q_p^2$  y se compara con el sedimento disponible de la sección  $Q_d^2$ . Aquí, nos podemos encontrar con los siguientes dos casos:

- Si  $Q_d^2 < Q_p^2$  entonces, el sedimento disponible en la sección 3,  $Q_d^3$  es igual a  $Q_d^2$ .
- Si  $Q_d^2 \geq Q_p^2$  entonces, el sedimento disponible en la sección 3,  $Q_d^3$  es igual a  $Q_p^2$ .

Este procedimiento se realiza hasta el tramo  $n$ , de esta forma en cada tramo se va restringiendo la cantidad de sedimento que se va transportando hacia aguas abajo. En la Figura 4-15, se muestra un ejemplo práctico de este cálculo.

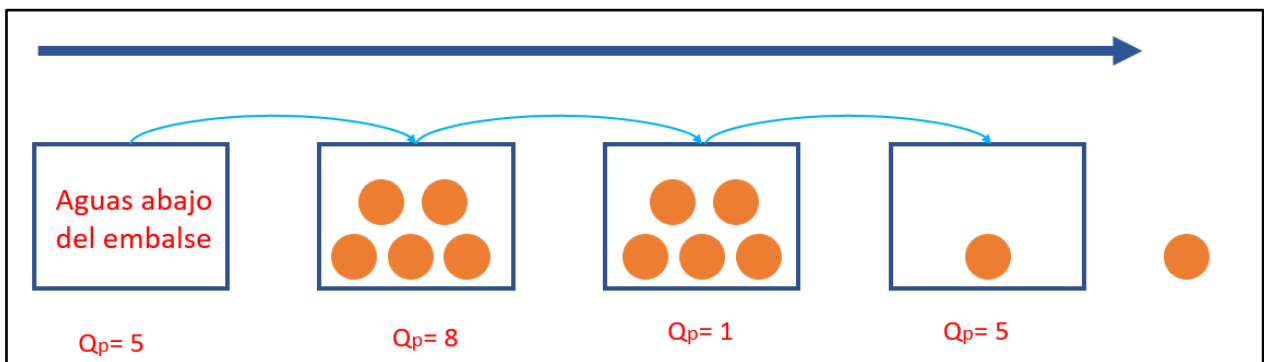


Figura 4-15: Ejemplo de metodología de transporte de sedimento adoptada para caso en que el embalse no retiene sedimentos.

Como se puede ver en este ejemplo, dado que la primera sección está en equilibrio y el  $Q_p$  5, llegan 5 unidades a la segunda sección. Posteriormente a pesar de que  $Q_p$  es igual a 8 unidades, únicamente se pueden transportar 5 unidades al siguiente tramo. A continuación, se presenta la situación contraria a la anterior, es decir  $Q_p$  es inferior a  $Q_d$ , esto implica que al último tramo llega 1 unidad de sedimento, que es equivalente al  $Q_p$  de la sección. Finalmente, siguiendo la misma lógica anterior, la cantidad de sedimento que sale del sistema es 1 unidad de sedimento.

Como se verá en la siguiente sección, se evaluarán casos en los que se considere y en los que no se considere la retención de sedimentos por parte del embalse. Para poder

representar aquellos casos, se realiza el siguiente supuesto en la sección inmediatamente aguas abajo del embalse:

- Si el embalse retiene sedimentos entonces se asume que hay una retención  $R$  de sedimentos constante para todos los años tal que,  $Q_a^1 = Q_p^1 - R$ .
- Si el embalse no retiene sedimentos entonces el tramo está en equilibrio, es decir,  $Q_a^1 = Q_p^1$ .

Es importante mencionar que se opta por un método en que la topografía no varíe como el recién descrito dado que al intentar realizar las simulaciones en HEC-RAS 5.0 con su módulo de transporte de sedimento se encontró que la simulación no representaba de manera adecuada la realidad por las siguientes razones:

- Se presentan erosiones muy grandes
- Se subestima la cantidad de sedimento extra que llegaría a la playa por efecto de los aluviones de las quebradas (argumento basado en la Figura 4-8).
- La forma en que cambiaban las secciones transversales resultó poco realista.

#### 4.2.5. Evaluación de casos

En términos generales, el sistema se puede representar como se muestra en la Figura 4-16, es decir, como un río cuyo extremo más aguas arriba está influido por un embalse el cual atrapa sedimentos, influye en los caudales que pasa a través de este y que acoraza su tramo inmediatamente aguas abajo. Este sistema, también consta de dos quebradas que le aportan al río Elqui caudales efímeros y aluviones. Además, como es posible observar, se extraen áridos del río después de la primera quebrada (desde aguas arriba hacia aguas abajo).

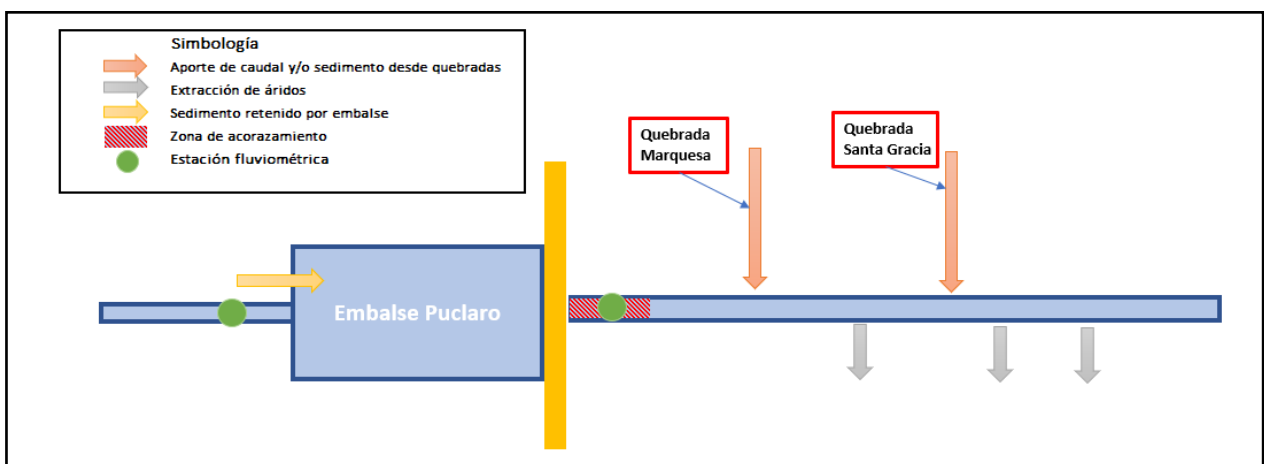


Figura 4-16: Esquema de representación del río Elqui en el tramo de estudio.

El efecto de las extracciones de áridos, el embalse Puclaro, las quebradas y la megasequía, se evalúan desde varias aristas. En la Tabla 4-4, se realiza un resumen de la manera en que se evalúa cada factor.

Tabla 4-4: Casos a evaluar en el transporte de sedimento del río Elqui.

Caso	Caudales	Granulometría	Entrada de sedimento	Extracción de sedimento (áridos)	Retención de sedimentos (embalse)
Base	Río Elqui en Almendral	Constante	0	0	0
Quebradas	Variables a lo largo del área de estudio. A la estación Río Elqui en Almendral se le van sumando caudales en fechas puntuales de quebradas.	Constante	En fechas puntuales desde quebradas según caudales y concentraciones de aluviones de quebradas.	0	0
Régimen natural	Río Elqui en Algarrobal	Constante	0	0	0
Embalse	Río Elqui en Algarrobal	Variable en el sector aguas abajo del embalse.	0	0	40 000 m <sup>3</sup> /año desde el 2000 en sector aguas abajo del embalse.
Extracción de áridos	Río Elqui en Almendral	Constante	0	Aumento de 10 000 m <sup>3</sup> /año desde 1990 en sectores de extracciones de áridos.	0
Embalse + Extracciones de áridos + Quebradas	Variables a lo largo del área de estudio. A la estación Río Elqui en Almendral se le van sumando caudales en fechas puntuales de quebradas.	Variable en el sector aguas abajo del embalse.	En fechas puntuales desde quebradas según caudales y concentraciones de aluviones de quebradas.	Aumento de 10 000 m <sup>3</sup> /año desde 1990 en sectores de extracciones de áridos.	40 000 m <sup>3</sup> /año desde 2000 en sector aguas abajo del embalse

La idea del caso base es evaluar el transporte de sedimento del río en su forma más simple. De esta forma, se puede analizar como la merma en los caudales producida por la megasequía influye en el transporte de sedimentos. A continuación, se entra en detalle de la metodología utilizada en el resto de los casos

#### 4.2.5.1. Quebradas

El efecto de las quebradas se incluye en fechas puntuales. Esto es, para aquellas fechas en que se considera que los aluviones tuvieron más influencia sobre el sedimento que llega a la playa. Es en ese sentido que, a los caudales medidos por la estación fluviométrica río Elqui en Almendral, se le suman los caudales que provienen desde las quebradas en las fechas coincidentes con los aluviones. De esta manera,

para las fechas seleccionadas el río tendrá un caudal variable en el espacio. Es así como, la capacidad de transporte de sedimento de los tramos aguas abajo de las quebradas aumentará.

Con respecto a la entrada de sedimento al sistema gracias a los aluviones, se consideran concentraciones para la quebrada Santa Gracia del 30% y para la quebrada Marquesa de 35% (Arrau ingeniería Spa, 2018) respecto a los caudales líquidos que entran al sistema. Esta metodología hace que aumente el sedimento disponible a ser transportado. Es importante mencionar que se hace el supuesto que un aluvión dura 24 horas.

Los eventos elegidos de la Tabla 4-1, en conjunto con la cruce de información de los caudales que llevaban los días de aluviones elegidos y el sedimento que habrían aportado al sistema se presentan en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Caudales líquidos y sólidos que entran al sistema en el caso en que se evalúan las quebradas.

Fecha	Caudal líquido quebrada Santa Gracia [m <sup>3</sup> /s]	Caudal líquido quebrada Marquesa [m <sup>3</sup> /s]	Caudal sólido quebrada Santa Gracia [m <sup>3</sup> /s]	Caudal sólidos quebrada Marquesa [m <sup>3</sup> /s]
1984	38,5	32,1	55,0	49,4
1987	55,6	37,5	79,4	57,7
1997	32,0	24,0	45,7	36,9
1997	30,0	44,0	42,9	67,7
2015	15,5	9,2	22,1	14,2
2017	34,3	29,4	49,0	45,2

#### 4.2.5.2. Embalse

El efecto regulador de caudales del embalse se evalúa cambiando los caudales del río. Como hay una estación fluviométricas aguas arriba y otra aguas abajo del embalse, se ocupan los caudales de la estación aguas arriba del embalse para contrastar este efecto con el caso base. El caso en que se ocupan los caudales de la estación aguas arriba del embalse es el llamado caso Régimen natural

Para evaluar el acorazamiento aguas abajo del embalse, se propone cambiar la granulometría del sector abajo embalse tal que al final del periodo de estudio, este sector se quede sin arenas ni sedimento de menor diámetro. De esta forma, se realiza una interpolación de la curva granulométrica aguas abajo del embalse desde el momento que empieza a operar hasta el 2019. En la Figura 4-17 y en la Tabla 4-6 se muestra cómo cambia la curva granulométrica y el diámetro medio a partir de este supuesto.



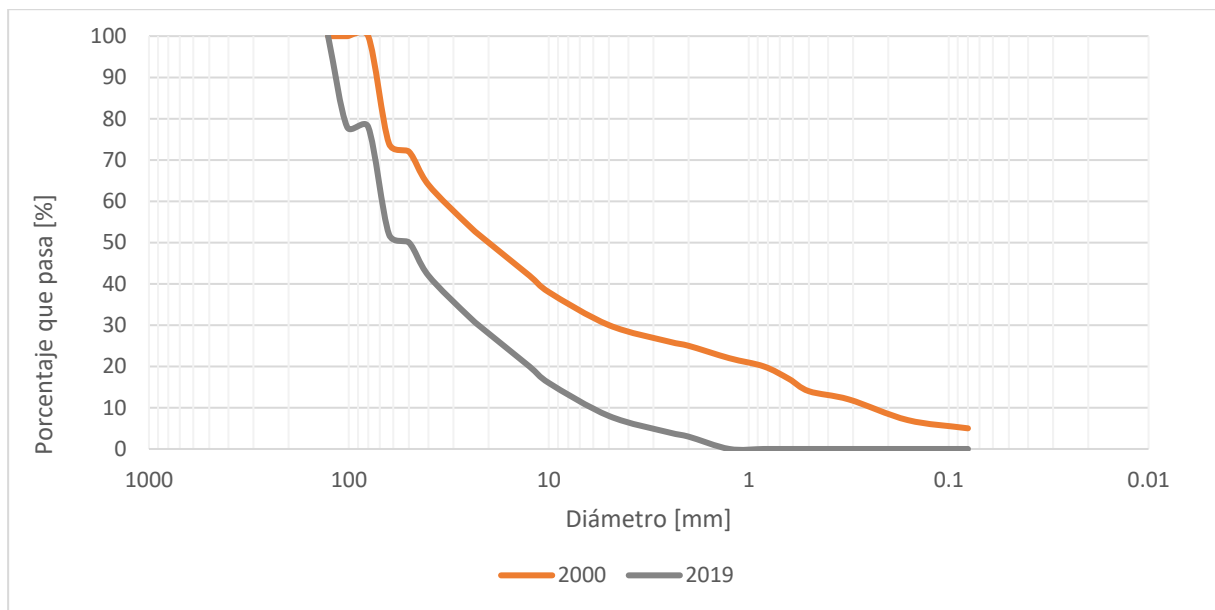


Figura 4-17: Curvas granulométricas para incorporar efecto del acorazamiento aguas abajo del embalse en la evaluación del embalse Puclaro 2000 y en 2019.

Tabla 4-6: Diámetro medio del sedimento para incorporar el efecto del acorazamiento aguas abajo del embalse en 2000 y en 2019.

Año	Diámetro medio [mm]
2000	34
2019	62

Por otro lado, dado que el embalse atrapa en promedio 40 000 m<sup>3</sup>/año, se decide restarle este valor al sedimento disponible en el sector inmediatamente aguas abajo del embalse el cual, en el resto de los casos está en equilibrio.

Tanto el acorazamiento, como la retención de sedimentos se evalúan en el caso Embalse.

#### 4.2.5.3. Extracción de áridos

Dado que el promedio anual entre 2009 y 2020 ronda los 300 000 m<sup>3</sup> y se disponen de antecedentes que en la década de los noventa ya habría extracciones desde el río Elqui, se asume que en 1990 partieron las extracciones de áridos y que, en 2019, se extraen 300 000 m<sup>3</sup>. De esta forma, además, se asume una variación lineal entre 1990 y 2019 con una tasa de aumento aproximada de extracciones de áridos de 10 000 m<sup>3</sup> por año.

Como se puede ver de la Tabla 4-3, hay tres sectores desde donde se extraen áridos. Haciendo el supuesto que la extracción anual de cada sector es la misma, al sedimento disponible a ser transportado en los tramos desde donde se extraen áridos (Ciudad, El Olivar e Islón) se le resta un tercio del total anual de extracciones de áridos.

### 4.3. Resultados

Primero, se presentan los resultados del caso base, los cuales van a servir para entender cómo se traduce la capacidad de transporte de sedimento por tramo en la cantidad de sedimento que llega a la playa. Posteriormente, se realiza un análisis a nivel de década en que se compara el efecto de las quebradas, el embalse Puclaro y las extracciones de áridos con el caso base. Finalmente, se compara el caso base con el caso real para realizar una evaluación final de como los factores mencionados anteriormente afectan al sedimento que llega a la playa por el río Elqui.

#### 4.3.1. Caso base

La Figura 4-18 y la Figura 4-19 muestran la capacidad de transporte de sedimento por tramo y año calculado con las ecuaciones de MPM y la de WC respectivamente. Se observa que los dos tramos que más tienen capacidad para transportar sedimento (Pelicana y Olivar) están influidos directamente por las quebradas. Es en este sentido que, si bien los aportes de sedimento de las quebradas son importantes, la llegada de estos aportes a la playa va a estar supeditada por el caudal líquido que le pueda aportar la quebrada al río, dado que de esta manera se aumenta la capacidad de transporte de los tramos más aguas abajo.

Además, se puede apreciar que, Islón y Ciudad, tramos desde donde se extraen áridos, tienen un potencial de transporte de sedimento bajo, en comparación con el resto de los tramos, lo cual concuerda con que en esos lugares se puedan acumular sedimentos. Olivar, el otro tramo desde donde se extraen áridos, tiene una influencia directa de la quebrada Santa Gracia, por lo tanto, el origen de estos áridos sería de esta quebrada.

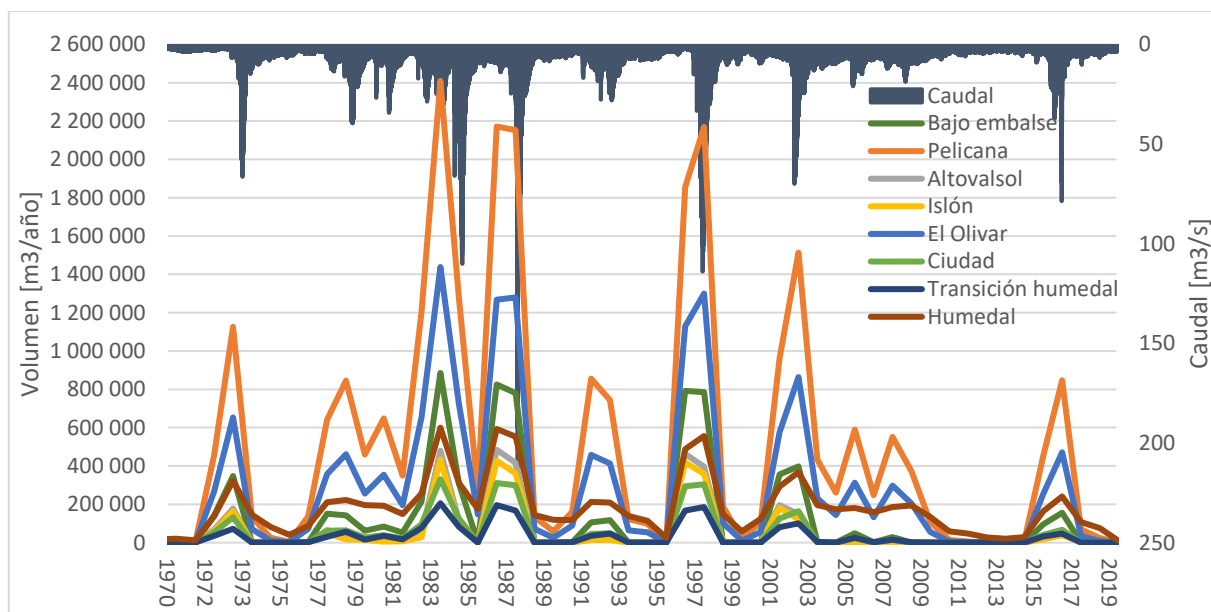


Figura 4-18: Transporte potencial de sedimento por tramo calculado con la ecuación de MPM para el caso base.

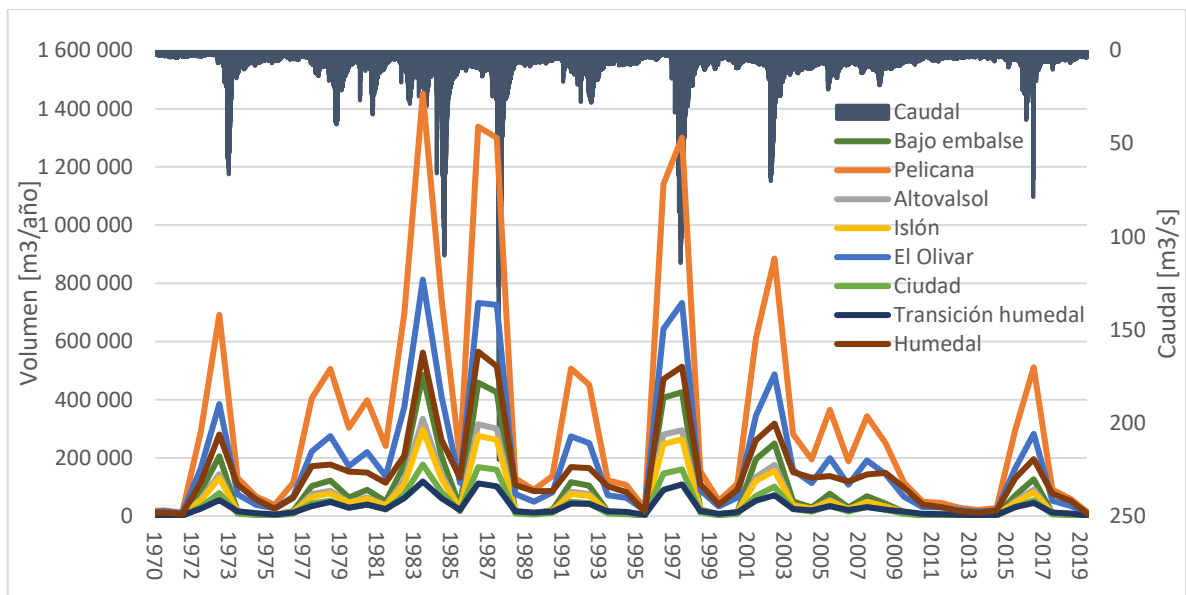


Figura 4-19: Transporte potencial de sedimento por tramo calculado con la ecuación de WC para el caso base.

En la Figura 4-20 podemos ver la cantidad de sedimento que llega a la playa por año. Comparando lo que predice MPM con lo que predice WC, se nota que, en las mayores crecidas MPM predice una mayor llegada de sedimento a la playa, sin embargo, para los caudales más bajos WC predice un mayor transporte de sedimento. Por otro lado, notemos como la megasequía ha hecho que al comienzo de la década del 2010 no haya llegado sedimento a la playa, situación comparable con el final de la década de 1970, pero en las crecidas de 1978 y 1979 se transportó más sedimento.

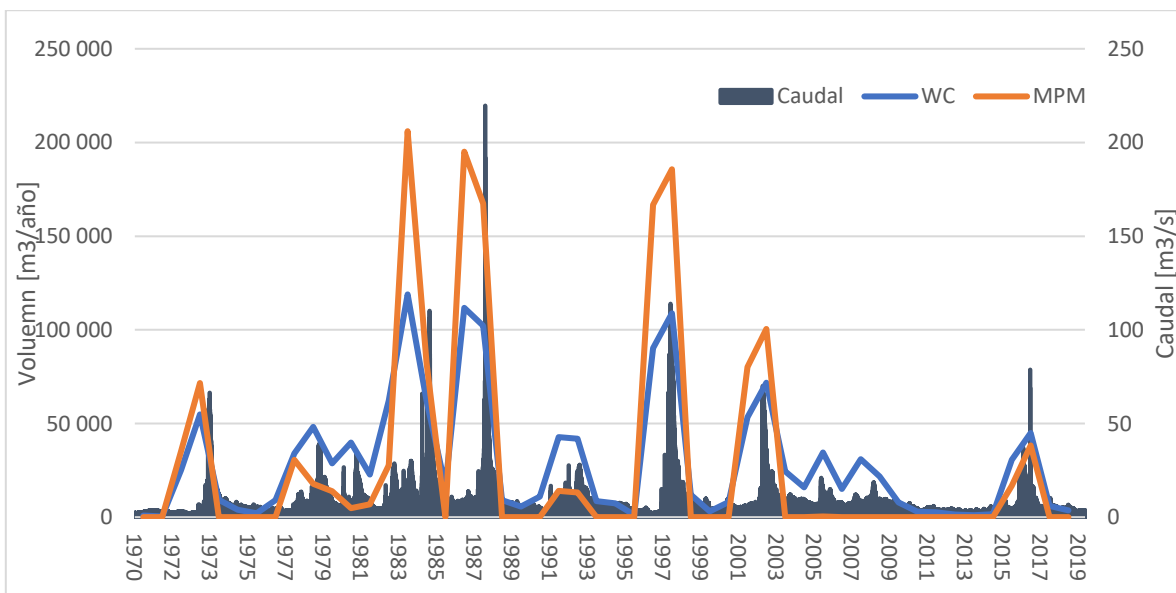


Figura 4-20: Sedimento que llega a la desembocadura del río Elqui para el caso base calculado con la ecuación de MPM y de WC.

### 4.3.2. Quebradas

La Figura 4-21 muestra el efecto de las quebradas sobre el caudal el sedimento que llega a la desembocadura a escala de década. En esta se puede observar un efecto despreciable a nivel de década a pesar de los grandes caudales sólidos que se presentan en la Tabla 4-5. Esto se debe a que el sedimento se queda atrapado en tramos con menor capacidad de transporte y al carácter episódico de los aluviones.

El sedimento aportado por la quebrada La Marquesa se queda atrapado fundamentalmente en Islón, mientras que, el aportado por la quebrada Santa Gracia se queda atrapado en el tramo Ciudad. Notemos que, tanto Islón como Ciudad son zonas de extracciones de áridos.

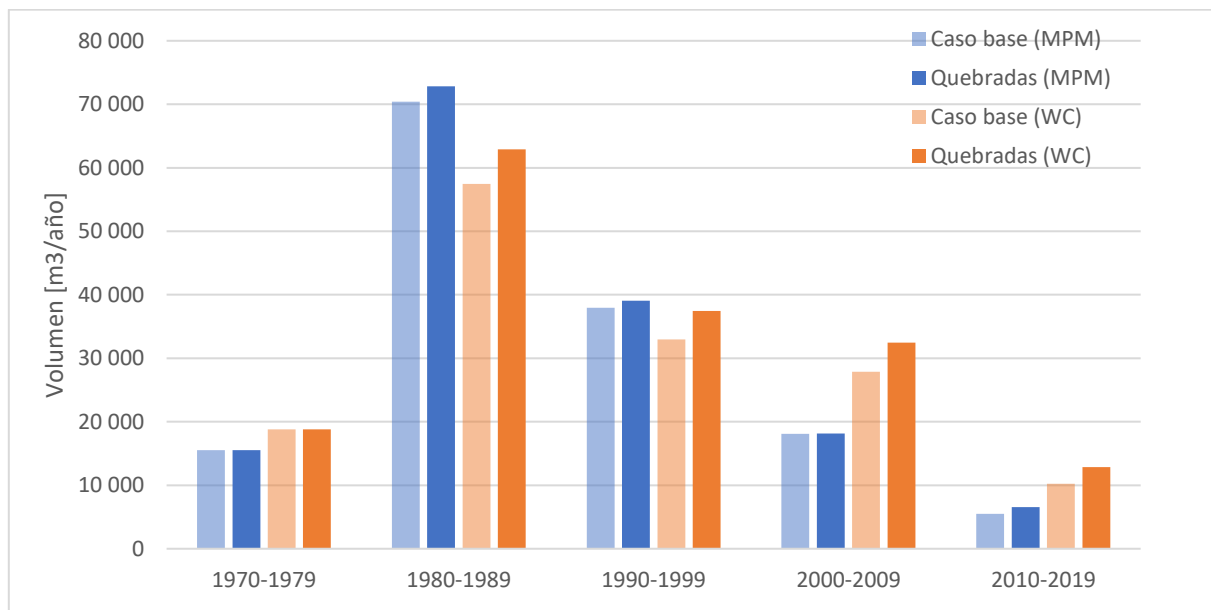


Figura 4-21: Evaluación del efecto de las quebradas sobre el sedimento que llega a la desembocadura del río Elqui a nivel de década.

### 4.3.3. Embalse Puclaro

En la Figura 4-22 se puede observar el promedio anual por década que llega a la playa del caso base, del caso régimen natural (no confundir con el caso quebradas) y del caso con embalse. Podemos ver que, la diferencia entre el caso base y el del régimen natural es más notoria en la década del 2000 que en la del 2010, esto se debe a que, como se dijo en la sección Hidrología, que el efecto regulador de caudales del embalse es mayor en las crecidas. Notemos que, las diferencias son en la década de los 2000 de aproximadamente 10 000 m³/año, mientras que en la década siguiente de a lo más 3 000 m³/año.

Con respecto al efecto que tiene el embalse sobre el sedimento que llega a la playa, se puede decir que en la década de 1990, MPM presenta diferencias marginales porque la capacidad de transporte de Islón es muy inferior con respecto al resto de los tramos de aguas arriba. Por lo tanto, gracias a que no puede pasar tanto sedimento por Islón, el embalse tendría un efecto local en la década del 2000 según MPM. Sin embargo, para

la siguiente década, dado que el lecho se va acorazando y los caudales son menores, no llega sedimento a la playa con ninguna de las dos ecuaciones ocupadas.

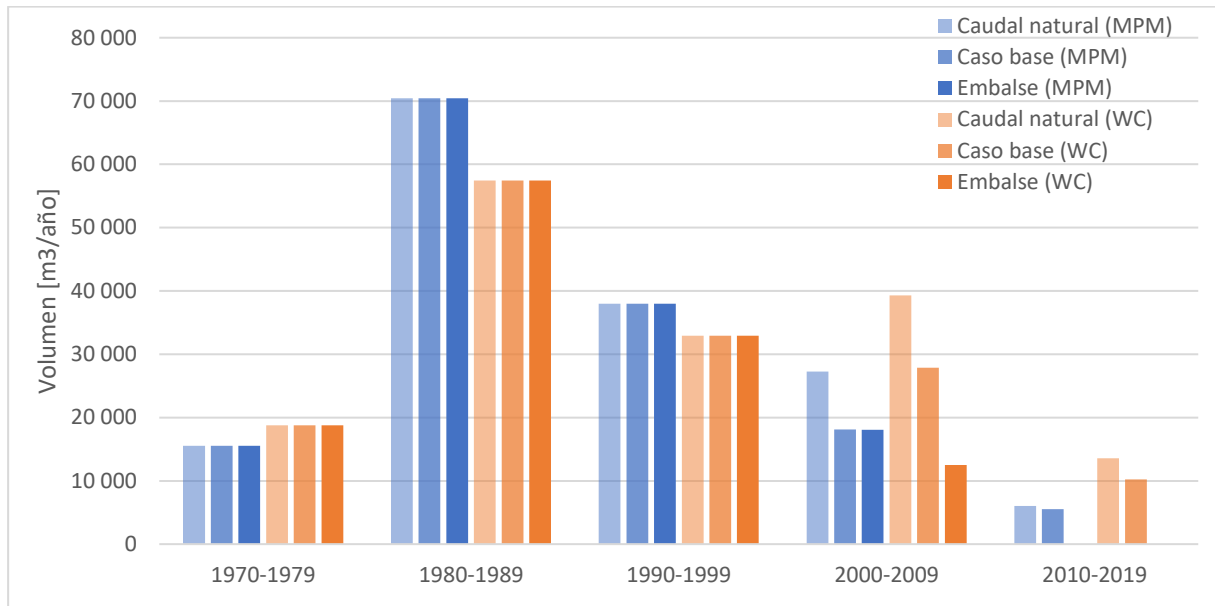


Figura 4-22: Evaluación del embalse Puclaro sobre el sedimento que llega a la desembocadura del río Elqui a nivel de década.

#### 4.3.4. Extracción de áridos

En la Figura 4-23 se presenta el efecto de las extracciones de áridos sobre el sedimento que llega a la playa. Se puede observar una merma gradual a nivel de década desde la década de 1990. Es interesante notar que, en la década del 2000, a pesar de que el caso base indique que la cantidad de sedimento que llegaría a la playa sería superior a la de la década de 1970, las extracciones de áridos dejan a la década del 2000 en una situación similar a la del caso base de la década del 2010. Esto quiere decir que, en términos sedimentarios, la merma de caudales producida por la megasequía tiene un efecto parecido que la extracción de áridos en la década del 2000.

Además, se observa que en la década del 2010 no llega sedimento a la playa. Esto se explica en que, las extracciones de áridos que en esa década van entre los 200 000 m<sup>3</sup> y los 300 000 m<sup>3</sup> por año, son superiores al máximo transportado por el caso base que es poco menos de 50 000 m<sup>3</sup>/año.

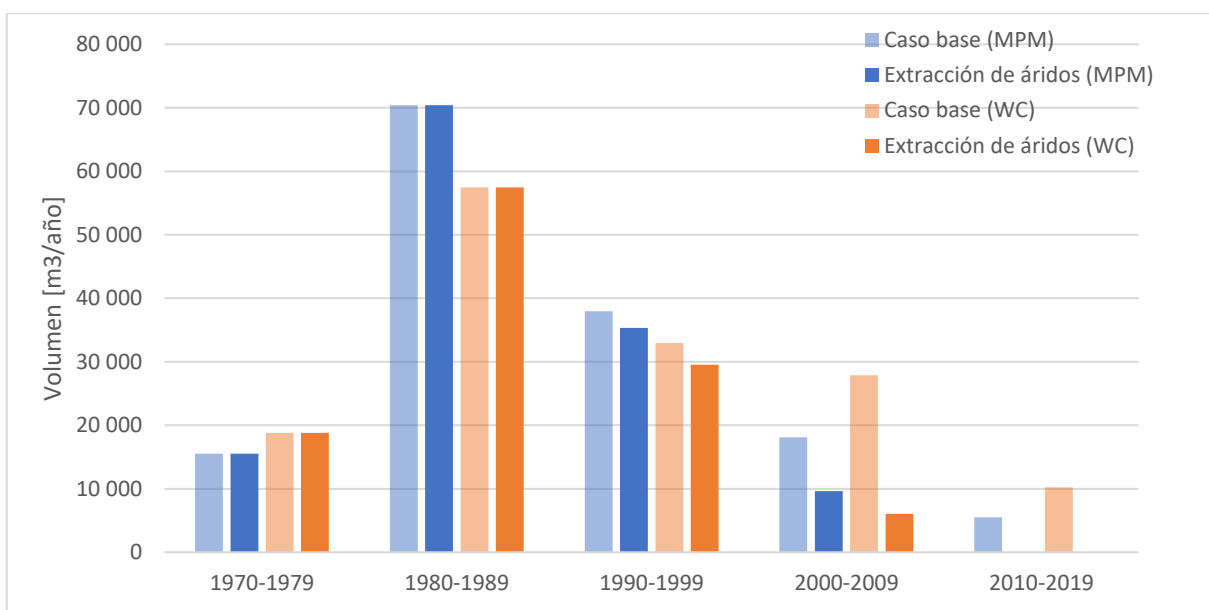


Figura 4-23: Evaluación de las extracciones de áridos sobre el sedimento que llega a la desembocadura del río Elqui a nivel de década.

### 4.3.5. Evaluación general

Finalmente, se muestra la Figura 4-24 que da cuenta de cómo las condiciones de borde del cálculo inciden en el sedimento que llega a la desembocadura del río Elqui. Notemos como en la década de 1990, los aluviones de 1999 contrarrestan las extracciones de áridos, por lo que en esa década la extracción de áridos podría haber sido una actividad sustentable en el tiempo.

Sin embargo, en la década del 2000, con la entrada en funcionamiento del embalse Puclaro y la mayor tasa de extracciones de áridos, la baja es considerable tanto para WC como para MPM, especialmente considerando que para esa década no hubo eventos aluvionales importantes. En esa década lo que más influye sobre el sedimento que llega a la playa son las extracciones de áridos seguido del efecto regulador de caudales del embalse Puclaro.

Si bien MPM había predicho que ni las extracciones de áridos ni el embalse dejaban que llegara sedimento a la playa en el periodo 2010-2019, este efecto se ve contrarrestado con las quebradas. No pasa lo mismo con WC debido a que esta ecuación predice menos transporte de sedimento que la de MPM para los mayores caudales.

Es interesante notar que, en la década del 2010, la cantidad de sedimento que lleva el río a la playa sin las extracciones de áridos ni el embalse es de tal magnitud que, no es posible evaluar cual de estos dos factores deja a la playa sin aporte sedimentario del río. Esto pasa porque en ambos casos por separados no dejan que llegue sedimento a la playa.

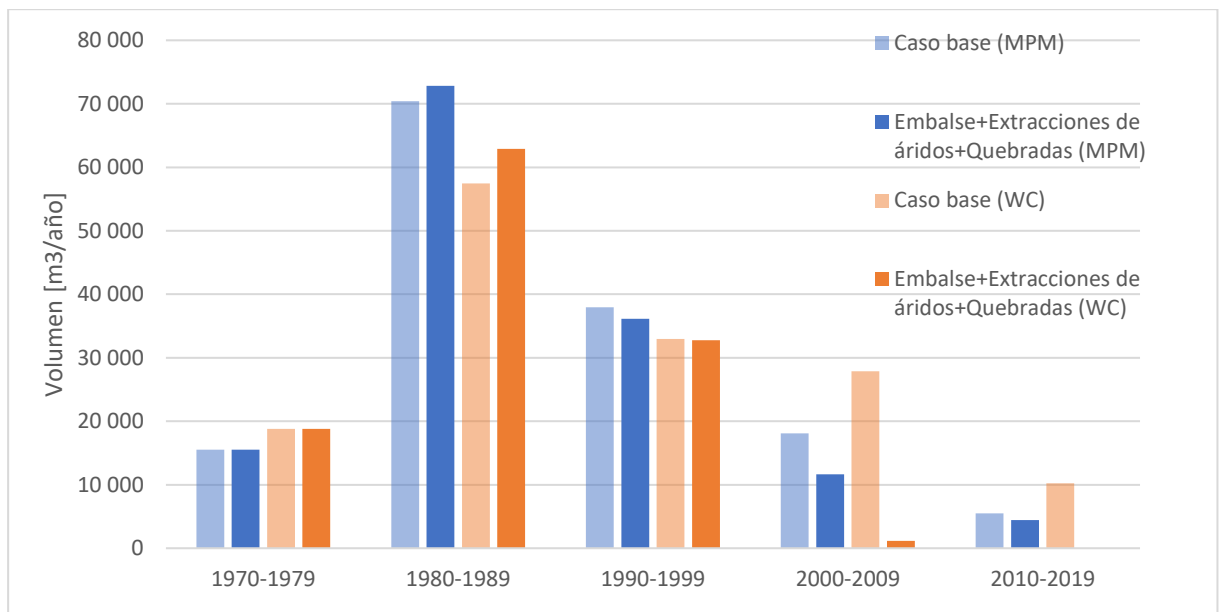


Figura 4-24: Evaluación del caso base con el caso Embalse+ Extracciones de áridos + Quebradas de la cantidad de sedimento que llega a la playa a nivel de década.

## 5. Balance de sedimento

### 5.1. Antecedentes

A continuación, en la Tabla 5-1 se presentan los resultados de dos estudios que han estimado el retroceso de la playa de La Serena en base a imágenes satelitales. Se puede inferir que, la tasa de retroceso se ha ido incrementando en los últimos 20 años.

Tabla 5-1: Tasas de retroceso de la playa de La Serena según distintos estudios.

Autor	Tasa de retroceso [m/año]	Periodo de estudio
INH (2021)	1,23-2,21	2000-2020
Winckler et al. (2019)	0,3	1978-2017

En la Figura 5-2, se presentan los resultados de la posición de la línea de la costa obtenido INH (2021) para tres transectos que se muestran en la Figura 5-1. Como se puede ver, los resultados arrojaron un retroceso progresivo de entre 1,23 m/año y 2,21 m/año. Notemos que, si bien el 2015 el ancho de la playa aumenta, esto no es un efecto que permanezca en el tiempo. Por lo tanto, se infiere que el aluvión del 2015 tuvo solo un efecto a escala anual.



Figura 5-1: Transectos estudiados por INH (2021) (fuente: INH (2021)).



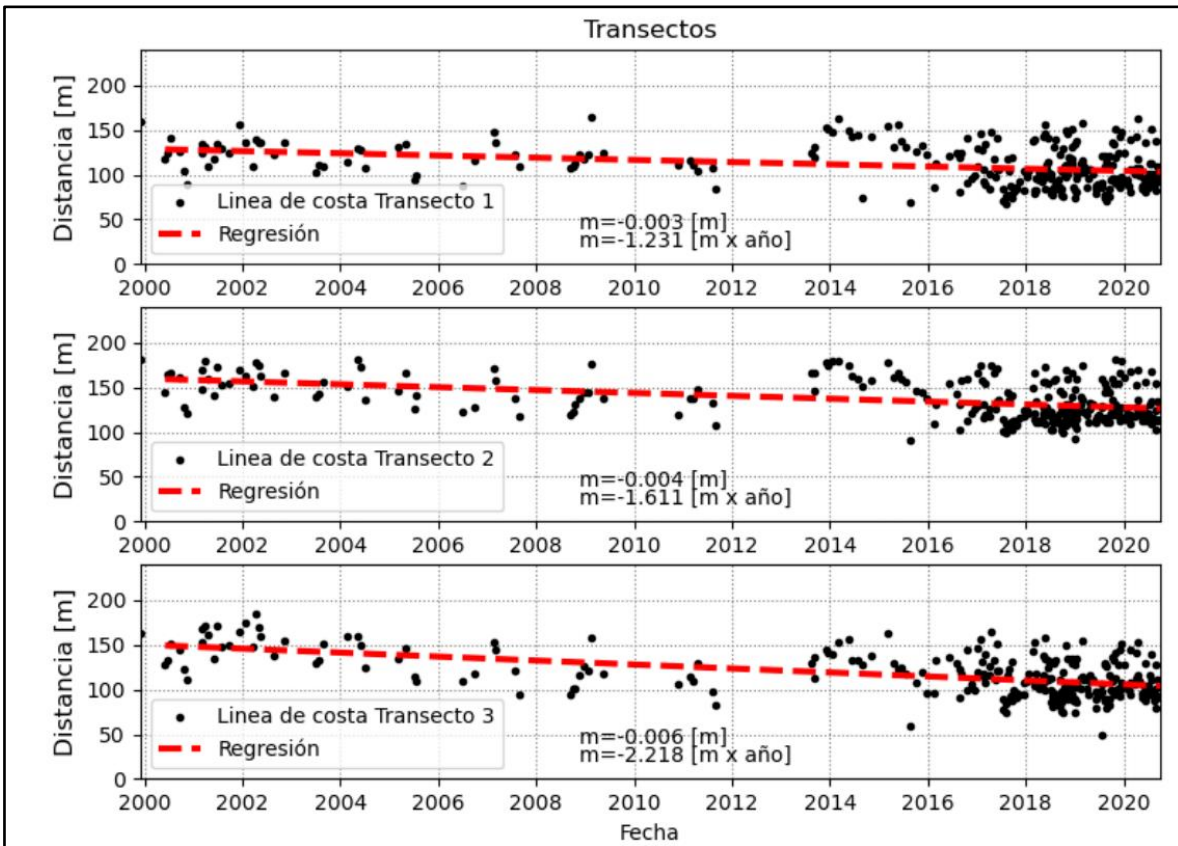


Figura 5-2: Regresión lineal de imágenes satelitales para cada transecto (fuente: INH (2021)). Nota: la distancia de los transectos se referencia con respecto al muro que separa la playa y la calzada.

Según INH (2021), un retroceso de la playa de 1-2 m estaría relacionado con una pérdida de volumen anual de la playa de entre 30 000 m<sup>3</sup> y 70 000 m<sup>3</sup> <sup>15</sup>.

## 5.2. Metodología

En términos generales, se realiza un balance de sedimento entre los aportes de sedimentos del río Elqui y las pérdidas de arena por transporte eólico. Para esto, se ocupan los mismos supuestos y simplificaciones que hace INH (2021). Estos son:

- Se considera al río Elqui como el único aporte de sedimento fluvial, por ser comparativamente mayor al resto.
- Se desprecia el intercambio de sedimento entre la zona más profunda y la playa.
- No hay flujos entrantes por el norte ni salientes por el sur.
- No hay cañones sumergidos.

Por lo tanto, la ecuación de balance de sedimento queda como se muestra a continuación:

$$\Delta V_{playa} = V_{Elqui} - V_{Eólico}$$

*Ecuación 5-1*

<sup>15</sup> Valores calculados en base a la profundidad de cierre.

Donde:

$\Delta V_{playa}$ : variación de volumen en la playa en un año.

$V_{Elqui}$ : volumen de sedimento que entra a la celda litoral por el río Elqui en un año (Capítulo 4. Gasto sólido del río Elqui).

$V_{Eólico}$ : volumen de sedimento que sale de la celda litoral por transporte eólico en un año (Capítulo 3. Transporte eólico).

### 5.3. Resultados

En la Figura 5-3 y en la Figura 5-4, se muestran los resultados del balance de sedimento anual basados en las ecuaciones de MPM y de WC considerando el caso “Embalse + Extracciones de áridos + Quebradas”. En estas, se muestra un rango posible del promedio anual por década del balance sedimentológico en que, el límite superior está dado por el transporte eólico sin corregir y el inferior corregido. En términos generales, se puede ver como el rango de resultados posibles se acota una vez ya comenzada la década del 2000, por lo que, la evaluación tanto de las extracciones de áridos como del embalse en el balance sedimentológico adquiere credibilidad.

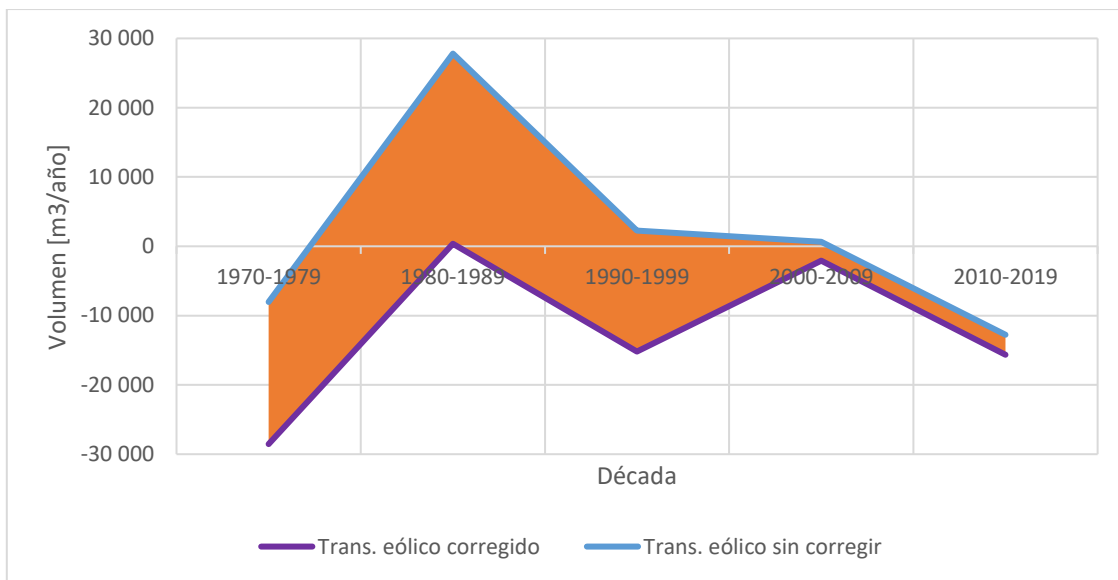


Figura 5-3: Balance de sedimento promedio anual a nivel de década entre el promedio de las cuatro ecuaciones de transporte eólico y los resultados de MPM.

El balance de sedimento basado en la ecuación de MPM muestra que, en la década de 1980 y en la década de 1990 la línea de la costa podría haber avanzado, sin embargo, en la década de 1990, es más probable que haya habido un retroceso. Entre el 2000 y el 2019 la tendencia de la playa según este balance es a retroceder, con una mayor tasa de pérdida de sedimento en la década del 2010.

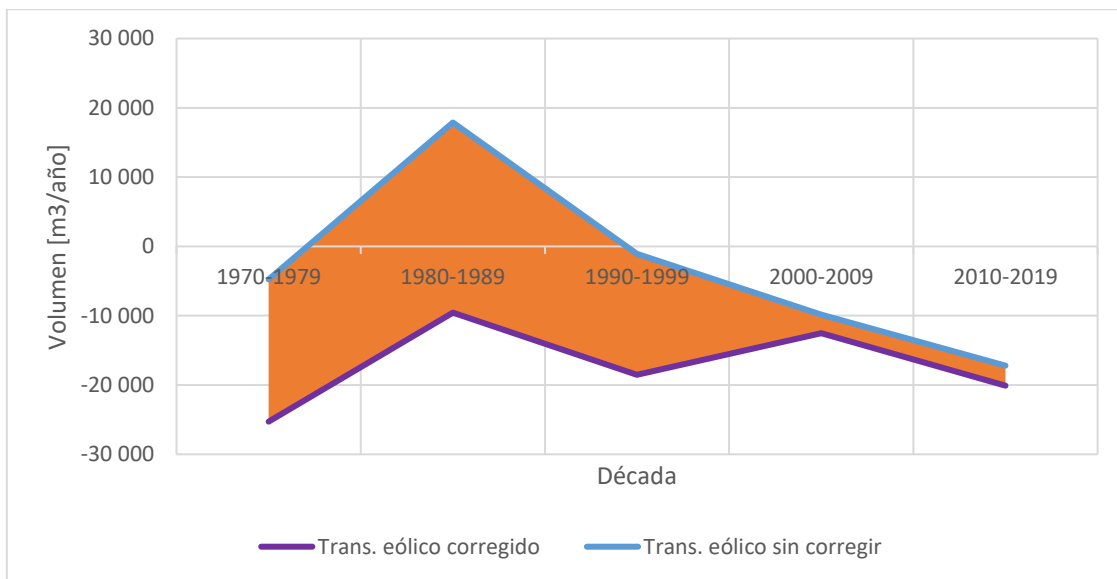


Figura 5-4: Balance de sedimento promedio anual a nivel de década entre el promedio de las cuatro ecuaciones de transporte eólico y los resultados de WC.

Por su parte, el resultado del balance sedimentológico basado en la ecuación de WC, muestra una forma más plana, dado que la ecuación de WC predice transporte de más sedimento en crecidas chicas con respecto a MPM y menos en las mayores crecidas. A diferencia de MPM, en la década de 1980 no hay seguridad de que la línea de la costa haya retrocedido. Otra diferencia es que, para la década de 1990, hay total certeza de que la playa retrocedió. Al igual que MPM, los resultados muestran tendencias al retroceso en las últimas dos décadas estudiadas con, un aumento en la tasa de pérdida anual de sedimento en la década del 2010.

En base a los antecedentes recopilados, podemos decir que los resultados se validan porque:

- Ambos balances sedimentológicos muestran en promedio una tendencia al retroceso para todo el periodo de estudio, lo cual es consistente con los resultados de Winckler et al. (2019) e INH (2021).
- Los dos resultados muestran que, en las últimas dos décadas la playa tiene una tendencia al retroceso.
- El balance hecho a partir de WC muestra que en el periodo 2010-2019, la playa estaría perdiendo aproximadamente 20 000 m<sup>3</sup> al año, lo cual es del mismo orden de magnitud que el valor estimado por INH (2021) de entre 30 000 m<sup>3</sup> y 70 000 m<sup>3</sup>. Si es que el balance se hiciera con la ecuación de Bagnold en vez del promedio de las cuatro ecuaciones de transporte eólico, se podría sobrepasar los 30 000 m<sup>3</sup> en la década del 2010 (ver Tabla 5-2).

Tabla 5-2: Balance de sedimento promedio anual para la década de 2010 entre la ecuación de Bagnold y las de MPM y WC.

Ecuaciones ocupadas en el balance	Límite superior [m <sup>3</sup> /año]	Límite superior [m <sup>3</sup> /año]
MPM-Bagnold	-34 718	-30 278
WC-Bagnold	-29 703	-25 262

En la Figura 5-5 se presenta el balance de sedimento anual basado en las ecuaciones de MPM y de WC para el caso base, embalse y de las extracciones de áridos. Si nos enfocamos en la década de 1990, se puede advertir que, aunque no se extraigan áridos, WC aun así predice un retroceso de la línea de la costa, no así MPM donde el rango anual de sedimento se encuentra en valores positivos y negativos. Por lo tanto, en la década de 1990, si es que hubo retroceso de la playa, se pudo haber explicado por las extracciones de áridos.

En la década del 2000, si es que no hubiera habido ni embalse ni extracciones de áridos la línea de la costa hubiera aumentado fundamentalmente por la baja en la velocidad del viento que se presenta en esta década. Se advierte que, las extracciones de áridos tienen un efecto mayor en el balance sedimentológico que el embalse. De hecho, el balance resulta negativo cuando se considera las extracciones de áridos, no así cuando se considera solo el embalse.

Finalmente, en la década del 2010, aunque no se considere el efecto del embalse ni el de las extracciones de áridos, la megasequía y el aumento del transporte eólico hacen que en el caso base el balance dé un resultado negativo. Vemos además que, el embalse y las extracciones de áridos tienen el mismo efecto en el balance de sedimento, dado que, ninguno deja que llegue sedimento a la playa.

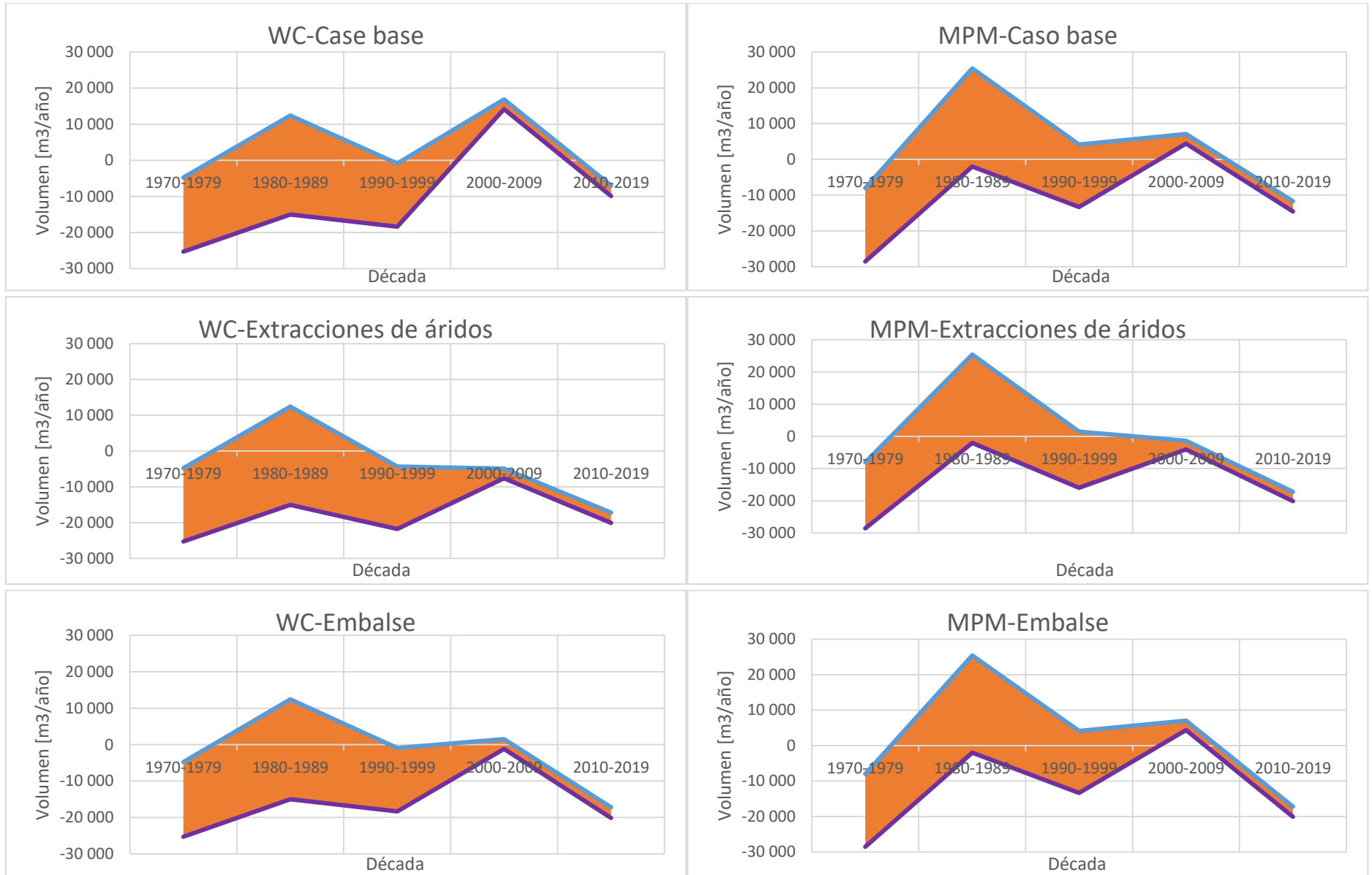


Figura 5-5: Balance de sedimento promedio anual a nivel de década para el caso base, embalse y extracciones de árido. Nota: línea morada indica balance en que se corrige el transporte eólico y línea azul indica balance en que no se corrige el transporte eólico.

## 6. Conclusiones

En el presente trabajo se realiza un balance de sedimento entre el transporte eólico y el transporte hidráulico del río Elqui en el periodo 1970-2019 para estudiar factores que podrían explicar el retroceso de la playa de La Serena. Con respecto al transporte eólico, se pudo ver que presentaba diferencias del orden de los 10 000 m<sup>3</sup>/año a escala interdecadal. La década de 1980 es la que presenta mayores valores de transporte eólico con valores entre los 45 000 m<sup>3</sup>/año y los 70 000 m<sup>3</sup>/año, en cambio, la década en que el transporte eólico fue menor fue en la del 2000 con aproximadamente 12 000 m<sup>3</sup>/año. Además, se pudo observar una tendencia al aumento sostenido en la década del 2010.

El transporte eólico estudiado muestra un comportamiento episódico, dado que, en menos del 20% del tiempo hay transporte de arena. De hecho, al realizar un análisis de sensibilidad a la velocidad friccional de inicio de movimiento se demuestra que, al variar en un -20% el parámetro, el transporte eólico anual puede ser de más de seis veces su valor original, mientras que, al variar estos en un +20% el transporte eólico puede disminuir a la décima parte.

Otras conclusiones relacionadas al transporte eólico tienen que ver con el efecto de la precipitación y la importancia de caracterizar correctamente el sedimento de la playa. Se concluye que, el efecto de la precipitación es despreciable y que, si es que no se hace un estudio granulométrico correcto del sedimento de la playa, se podrían llegar a resultados que a la larga podrían invalidar el balance sedimentológico. Con respecto a esto último, se recomienda hacer también mediciones en las dunas que se encuentran próximas a la playa pues, dado que los granos de arena de la playa están siendo constantemente transportados, los diámetros de arena de las dunas permitirían dar una mejor visión del d<sub>50</sub> transportado.

El transporte hidráulico, se evaluó poniendo énfasis en el efecto del embalse Puclaro, las extracciones de áridos, los aluviones de las quebradas Santa Gracia y Marquesa y la megasequía. Con respecto al efecto del embalse, se concluye que, su influencia sobre el sedimento que aporta el río Elqui es mayor en aquellos años en que los caudales son mayores, ya que el embalse ejerce un efecto regulador de caudales que queda más de manifiesto en las crecidas. Es en este sentido que, considerando solo aquel efecto del embalse, la influencia del embalse es mayor en la década del 2000 que en la del 2010 por efecto de la megasequía. Sin embargo, si se considera además el acorazamiento que este produce en su tramo inmediatamente aguas abajo y la retención de sedimentos, es que se observa que en la década del 2000 el embalse presenta un efecto local, no así en la década del 2010 en que, ya con un mayor acorazamiento el lecho y producto de la megasequía, no llega sedimento a la playa.

Al estudiar las extracciones de áridos sobre el río Elqui, se pudo observar que los tramos Islón y Ciudad, donde actualmente se extraen áridos poseen un bajo potencial de transporte. Esto trae como consecuencia que todo el sedimento que se pueda transportar desde aguas arriba se deposite en esos sectores. Se concluye que, para la década del 2000 las extracciones de áridos son el mayor factor de déficit de sedimento del río.

Por otro lado, se ve que los aluviones de las quebradas Santa Gracia y Marquesa tienen un efecto anual, el cual, debido a su poca frecuencia, no tendrían una gran influencia en el balance sedimentológico. A pesar de esto, los aluviones de la década del 2010 se perfilan como la única fuente de sedimento que tuvo la playa en ese periodo.

Tras haber validado los resultados de los órdenes de magnitud del balance sedimentológico con el comportamiento de la línea de la costa a través del tiempo, se puede concluir que el retroceso de la línea de la costa desde 1970 al 2019 tiene un carácter multifactorial. Cambios en la velocidad del viento a escala interdecadal, la megasequía y las extracciones de áridos son los factores que más tuvieron influencia en el balance de sedimento. El efecto del embalse Puclaro reteniendo los sedimentos provenientes de la parte alta de la cuenca, acorazando el lecho y regulando los caudales del río, es un factor que se puede considerar que cabe en una segunda categoría en su influencia sobre el sedimento que lleva el río Elqui, pero, solo porque la merma en los caudales a causa de la megasequía no permite una mayor influencia de este.

En la década de 1970, el balance da como resultado un retroceso de la línea de la costa, el cual se explica porque es una década con caudales medios comparables a los de la megasequía, en instancia que el transporte eólico presenta valores cercanos al promedio. En la siguiente década, en la década de 1980, en la que tampoco se evalúa el efecto del embalse ni el de las extracciones de áridos, a pesar de que se presentan caudales por sobre el promedio, la playa igual pudo haber experimentado un retroceso ya que, coincidió con el mayor transporte eólico del periodo de estudio. Sin embargo, en este periodo no hay total certeza de tener un retroceso de la playa en base al balance sedimentológico.

En el periodo 1990-1999, al igual que en la década anterior no hay certeza de que haya habido un retroceso, sin embargo, hay una inclinación más notoria a que así haya sido. Si bien en este periodo se empezó con las extracciones de áridos, los efectos no habrían sido tan importantes como los aportes del río y la pérdida por viento.

En las siguientes dos décadas, en las que ya entran a influir el embalse y las extracciones de áridos, el balance da negativo a pesar de que el transporte eólico presenta los menores valores del periodo. Esto se explica en la década del 2000 por las extracciones de áridos y en la del 2010 por un aumento en el transporte eólico con respecto a la década anterior y a la megasequía.

En suma, se acepta parcialmente la hipótesis dado que, si bien se establece que el principal déficit de sedimento viene de una merma en el transporte de sedimentos del río Elqui, hay que añadirle cambios en la velocidad del viento y, por lo tanto, del transporte eólico que ha presentado grandes diferencias en el periodo estudiado. Es importante mencionar que, el efecto de la precipitación que se plantea en la hipótesis sobre el transporte eólico es despreciable.

Se proyecta que la playa siga retrocediendo en el futuro debido a la tendencia ascendente del transporte eólico y a la permanencia de la megasequía en la zona. Y, a

pesar de que los caudales en el río Elqui están fuertemente influenciados históricamente por el ENOS, no se proyectan grandes aportes de sedimento del río Elqui a la playa debido a que la influencia de la megasequía en los caudales del río es mayor que el del ENOS.

Se recomienda que para realizar futuros estudios que pretendan analizar el retroceso de la playa de La Serena se incluyan proyecciones al 2050 y/o al 2100 en base a modelos de cambio climático. Además, se recomienda para calibrar y/o validar resultados realizar campañas de terreno para obtener mediciones de gasto sólido en distintos puntos del río Elqui, mediciones de d50 en la playa más detalladas a las ya disponibles y en distintos sectores y mediciones de vientos en la playa. También, con el objetivo de validar resultados, se recomienda estudiar a través de un análisis histórico de imágenes satelitales la concentración de sólidos suspendidos totales en la bahía de La Serena.



## 7. Bibliografía

- AC Ingenieros Consultores LTDA. (2016). Estudio de transporte de sedimentos en río Lluta.
- Ackers, P., & White, W. (1973). Sediment transport: new approach and analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 99, 2041-2060.
- Aguas Spa. (2020). *Diagnóstico mejoramiento playa La Serena (Estudio de hidrología)*.
- Arrau ingeniería Spa. (2018). *Estudio de vulnerabilidad y definición de un plan de manejo de cauces para cuenca río Elqui*.
- Ashida, K., & Michiue, M. (1971). An investigation over river bed degradation downstream of a dam. *Proceedings of the 14th congress of IAHR*, 3, págs. 247-256. Paris, Francia.
- Ashida, K., Takahashi, T., & Mizuyama, T. (1978). Study on bedload equations for mountain streams. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 107, 9-17.
- Bagnold, R. (1936). The movement of desert sand. *Mathematical and Physical Sciences*, 157, 594-620.
- Bagnold, R. (1937). The transport of sand by wind. *Geographical Journal*, 89, 409-438.
- Bowen, A.J., and Inman, D.L., (1966). Budget of littoral sands in the vicinity of Point Arguello, California. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Technical Memorandum No. 19, 56pp.
- Brownlie, W. (1981). Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels., *Report KH-R-43A*. W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, Pasadena, CA.
- Bussi, G., Francés, F., Horel, E., López-Tarazón, J., & Batalla, R. (2014). Modelling the impact of climate change on sediment yield in a highly erodible Mediterranean catchment. *Journal of Soils and Sediments*, 14(12), 1921-1937.
- Centro de Ecología Aplicada. (2017). *Monitoreo de material particulado regimen sedimentológico en el río Biobío. Centrales hidroeléctricas Ralco y Pangue*.
- Chapman, D. (1990). Aeolian sand transport-An optimized model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 751-760.
- Copeland, R. (1993). *Numerical Modeling of Hydraulic Sorting and Armoring in Alluvial Rivers*. Phd Tesis, Universidad de Iowa.
- Costea, M. (2018). Impact of floodplain gravel mining of landforms and processes: a study case in Orlat gravel pit (Romania). *Environmental Earth Sciences*, 77(4), 1-14.
- Dahl, T., Gibson, T., Heath, R., & Nygaard, C. (2019). *HEC-RAS unsteady flow and sediment model of the Mississippi River: Tarbert Landing to the Gulf*.
- Davidson-Arnott, R.G.D., Yang, Y., Ollerhead, J., Hesp., P.A. & Walker, I.J., 2008. The effects of surface moisture on aeolian sediment transport threshold and mass flux on a beach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 55-74.

- Decreto 1064/13 de 2013[Ilustre Municipalidad de La Serena]. Aprueba la ordenanza que regula la extracción de áridos desde un bien nacional de uso público (especialmente el cauce del río Elqui) o desde pozos lastreros ubicados en inmuebles de propiedad particular, en la comuna de La Serena.21 de marzo de 2013.
- DHI. (2017). *Mike 11 Reference Manual*.
- Diario El Día. (25 de Junio de 2017). *Así han sido las lluvias que han afectado a la región en los últimos 60 años*. Recuperado el 9 de marzo de 2022, de <https://www.diarioeldia.cl/region/2017/6/25/asi-han-sido-las-lluvias-que-han-afectado-la-region-en-los-ultimos-60-anos-41832.html>
- Dirección General de Aguas-Coquimbo. (2021). Fiscalizaciones de obras no autorizadas en cauces y extracciones de áridos no autorizados desde la creación de la Unidad de fiscalización regional en 2008 para las comunas de La Serena y Vicuña. Información obtenida a través de una solicitud de Ley de Transparencia AM001T0001374.
- Duarte-Campos, L., Wijnberg, K., & Hulscher, S. (2018). Estimating annual onshore aeolian supply from the intertidal beach using an aggregated-scale transport formula. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(4).
- Durán, O., Claudin, O., & Andreotti, B. (2011). On aeolian transport: Grain-scale interactions, dynamical mechanisms and scaling laws. *Aeolian research*, 3, 243-70.
- Engelund, F., & Fredsoe, J. (1976). A sediment transport model for straight alluvial hannels. *Nordic Hydrology*, 7(5).
- Engelund, F., & Hansen, E. (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Copenhage, Dinamarca: Teknisk Vorlag.
- ESIIR. (s.f.). *Mapa bocatomas a nivel nacional*. Recuperado el 19 de octubre de 2022 de <https://esiir.cnr.gob.cl/>
- Fernández , Ó. (2021). *Efecto del cambio climático en el transporte de sedimentos para tres ríos de la zona Centro-Sur del país*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Fuentes, A. (2018). *Evaluación de alternativas de reducción del volumen para almacenamiento de sedimentos aportantes a embalses de riego mayores. Aplicación a un caso en Chile*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Greimann, B., & Huang, J. (2018). *SRH-1D Users Manual (Sedimentation and River Hydraulics-One Dimension, Version 4.0)*.
- Griem, W. (8 de Mayo de 2021). *Museo virtual*. Obtenido de <https://www.geovirtual2.cl/region-de-coquimbo-chile/historia-coquimbo/region-coquimbo-linia-tiempo-01esp.htm>
- Horikawa, K., Hotta, S., & Katori, S. (1983). On the sand transport rate by wind on a beach. *Coastal Engineering in Japan*, 26, 101-120.

- Horikawa, K., Hotta, S., & Kraus, N. (1986). Literature review of sand transport by wind on a dry sand surface. *Coastal Engineering*, 9(6), 503-526.
- HR Wallingford. (1990). *Sediment transport, the Ackers and White theory revised*. Report SR237.
- Hsu, S. (1971). Wind stress criteria in eolian sand transport. *Journal of Geophys*, 8684-8686.
- Hsu, S. (1977). Boundary Layer Meteorological Research in the Coastal Zone. *Geoscience and Man*, 18, 99-111.
- Hsu, S. (1985). Correction of Land-Based Wind Data for Offshore Applications. *Journal of Physical Oceanography*, 16, 390-394.
- Hunziker, R. (1995). *Fraktionsweiser Geschiebetransport*. PhD Tesis, ETH Zurich.
- INE. (2018). *Síntesis de resultados CENSO 2017*.
- INH. (2021). *Estudio La Serena-Etapa III Rev. E*.
- Junta de vigilancia del río Elqui y sus afluentes. (30 de diciembre de 2018). *Concluye estudio de batimetría en embalses Puclaro y La Laguna*. Recuperado el 9 de julio de 2022, de <https://www.rioelqui.cl/concluye-estudio-de-batimetria-en-embalses-puclaro-y-la-laguna/#:~:text=Para%20el%20embalse%20La%20Laguna,puede%20acumular%2039.246.650%20m3>.
- Kawamura, R. (1951). Study on Sand Movement.
- Kok, J., Parteli, E., Michaels, T., & Karam, D. (2012). The physics of wind-blown sand and dust. *Reports on progress in physics*, 75(10).
- Laursen, E. (1958). The total sediment load of streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 84(1), 1531-1536.
- Lecaros, M. (2011). *Estudio de sedimentación en el embalse Rapel*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Lindsey, R. (30 de Agosto de 2009). *Climate Variability: Oceanic Niño Index*. (T. Di Liberto, Editor) Recuperado el 17 de Julio de 2022, de <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index>
- Little, C. (2010). Sediment Impact Analysis Methods (SIAM): Overview of model capabilities, applications, and limitations. *2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, Nevada*.
- M & W Ambientales. (2019). *Monitoreo de material particulado y régimen sedimentológico en el río Biobío (Informe anual 2019)*.
- Madden, E. (1993). *Modified Laursen Method for Estimating Bed-Material Sediment Load*. U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Mardones, P. (2019). *Análisis estadístico de precipitaciones desencadenantes de flujos de detritos en la región de Coquimbo*. Memoria para optar al título de geóloga, Universidad de Chile.

- McVicar T., Roderick, Donohue, Li J., Van Niel T., Thomas P., Grieser J., Jhajharia D., Himri Y., Mahowald N., Mescherskaya, Kruger, A. & Dinpashoh, Y. (2012). Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speed: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology*. 416–417.
- Méndez-Freire, V., Villaseñor, T., & Mellado, C. (2022). Spatial and temporal changes in suspended sediment fluxes in central Chile induced by the mega drought: The case of the Itata River Basin (36°-37°S). *Journal of South American Earth Sciences*. 118, 103930.
- Meyer-Peter, E., & Muller, R. (1948). Formulas for Bed-Load Transport. *Proc. 2nd Congress IAHR*. Estocolmo, Suecia.
- Morales, E., Winckler, P., & Herrera, M. (2020). *Costas de Chile*. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
- Niño, Y. (2019). *Apuntes curso Transporte hidráulico de sólidos*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Parker, G. (2006). Surface based bedload transport relationship for gravel rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 28(4), 417-436.
- Proffit, G., & Sutherland, A. (1983). Transport of nonuniform sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 21(1), 33-43.
- Rickenmann, D. (1991). Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep Slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(11), 1419-1439.
- Rosati, J. (2005). Concepts in sediment budgets. *Journal of Coastal Research*, 21(2), 307-322.
- Rosati, J., & Kraus, N. (1999). Formulation on Sediment Budgets at Inlets. *Coastal Engineering Technical Note IV-5*.
- Rovira, A., Batalla, R., & Sala, M. (2005). Response of a river sediment budget after historical gravel mining (the lower Tordera, NE Spain). *River Research and Applications*, 21(7), 829-847.
- Sato, S., Kikkawa, H., & Ashida, K. (1958). Research on the bed-load transportation. *Journal of Hydrology*, 40, 123-128.
- SERNAGEOMIN. (s.f.). *Portal GEOMIN*. Recuperado el 1 de marzo de 2022, de <https://portalgeominbeta.sernageomin.cl/>
- Sherman, D., & Li, B. (2012). Predicting aeolian sand transport rates: A evaluation of models. *Aeolian Research*, 3(4), 371-378.
- Smart, G., & Jaeggi, M. (1983). *Sediment Transport on Steep Slopes*. V.A.W Mitteil 64. ETH, Hidrologie und Glaziologie, Zurich, Suiza.
- Toffaletti, F. (1968). A procedure for computation of the total river sand discharge and detailed distribution, bed to surface. *Technical Report N° 5*.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2002). *Coastal engineering manual*.
- Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile. (2017). *Actualización del balance hídrico nacional*.
- UTP Hídrica-Eridanus. (2020). *Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Elqui*.

- US Army Corps of Engineers. (1984). *Shore protection manual*. Washington DC.
- Van Rijn, L. (1984). Sediment Transport, Part 1: Bed Load Transport. (10, Ed.) *Journal of Hydraulic Engineering*, 1431-1456.
- Van Rijn L.C. & Strypsteen G. (2019). A fully predictive model for aeolian sand transport. *Coastal Engineering*.
- Vanoni. (1975). *Sedimentation Engineering*. ASCE manuals and reports on engineering practice.
- Vergara Dal Pont, I., Santibañez, F., Araneo, D., Ferrando, F., & Moreiras, S. (2018). Determination of probabilities for the generation of high-discharge flows in the middle basin of Elqui River, Chile. *Springer*, 531-546.
- Warrick, J., & Farnsworth, K. (2009). Sources of sediment to the coastal waters of the Southern California Bight. *Special paper of the Geological Society of America*, 39-52.
- Weise, R. (2018). *1-Dimensional Hydraulic and Sediment Transport Modelling of an Emergency Spillway*.
- Wilcock, P., & Crowe, J. (2003). Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120-128.
- Winckler, P., Contreras-López, M., Vicuña, S., Larraguibel, C., Mora, J., Esparza, C., . . . Pica, A. (2019). *Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile*. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago de Chile.
- Wong, M., & Parker, G. (2006). Reanalysis and Correction of Bed Load Relation of Meyer-Peter and Muller Using Their Own Database. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11), 1159-1168.
- Wu, W., Vieira, D., & Yang, S. (2004). One-Dimensional Numerical Model for Nonuniform Sediment Transport under Unsteady Flows in Channel Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Wu, W., Wang, S., & Jia, Y. (2000). Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 38(6), 427-434.
- Yang, C. (1973). Incipient motion and sediment transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 38(6), 1679-1704.
- Yang, C. (1979). Unit stream power equation for total load. *Journal of Hydrology*, 40, 123-138.
- Yang, C. (1984). Unit stream power equation for gravel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(12), 1783-1797.
- Yang, C., Molinas, A., & Wu, B. (1996). Sediment transport in the Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(5), 237-244.
- Zha, J., Shen, C., Li, Z., Wu, J., Zhao, D., Wenxuan, F., Sun, M., Azorin-Molina, C. & Deng, K. (2021). Projected changes in global terrestrial near-surface wind speed in 1.5-4.0 °C global warming levels. *Environmental Research Letters*.
- Zingg, A. (1953). Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material. *Proceedings of the 5th Hydraulic Conference Bulletin*, 34, 111-135.

# Anexos

## Anexo A Análisis espaciotemporal del viento

En la Figura 1 se muestra un gráfico que muestra la velocidad del viento a escala anual para la estación de La Florida. Se puede ver cómo a partir de principio de la década del 2000, el viento adquiere su mínimo valor en 50 años. Sin embargo, luego hay una tendencia ascendente a partir del 2014.

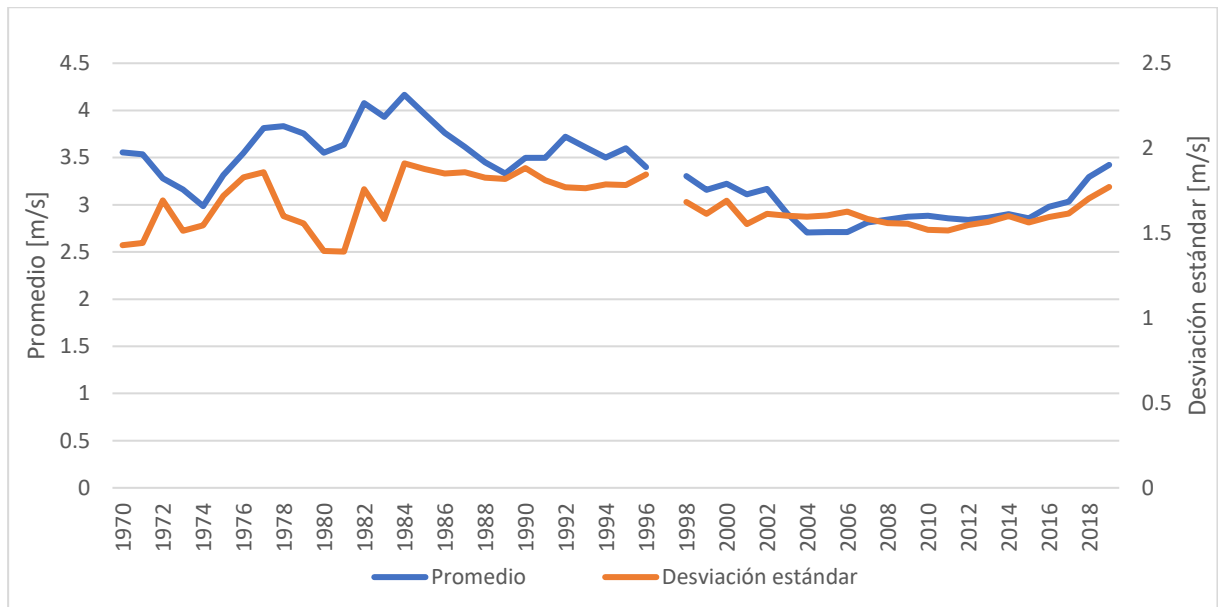


Figura 1: Serie anual de promedio y desviación estándar de viento en la estación de La Florida.

La Figura 2 y la Figura 3 muestran promedios mensuales de velocidad del viento para la estación La Serena y Cerro Grande. Las principales conclusiones de estos dos gráficos es que hay un comportamiento estacional del viento, y que se confirma que más altas velocidades se relacionan con una mayor variabilidad del viento dentro del mes.

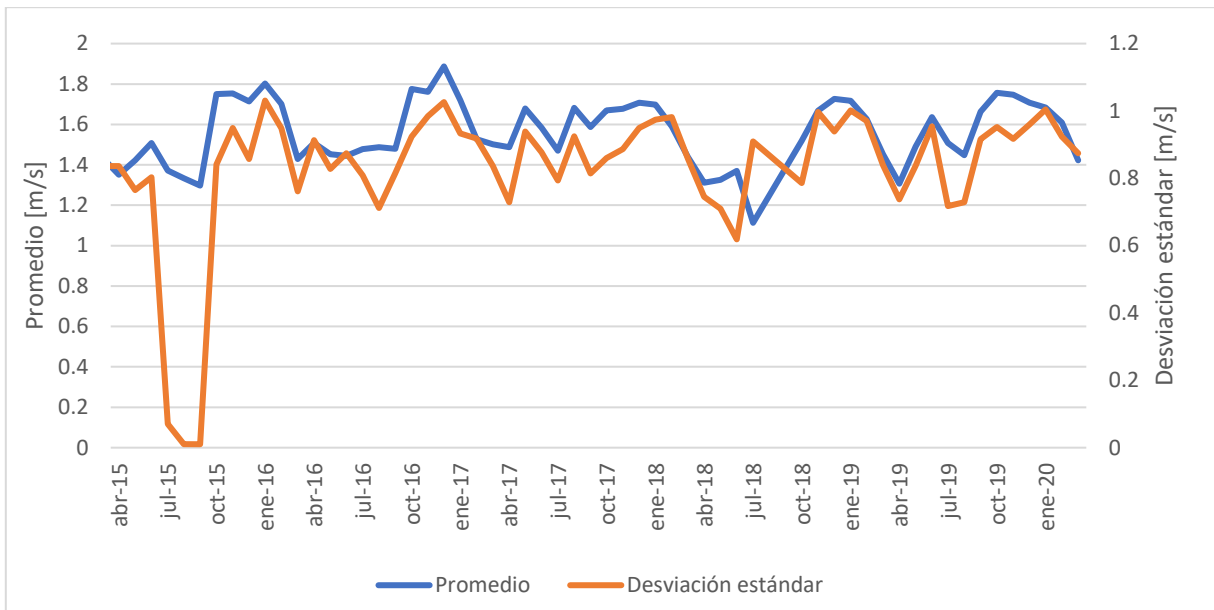


Figura 2: Serie mensual de promedio y desviación estándar para la estación de La Serena.

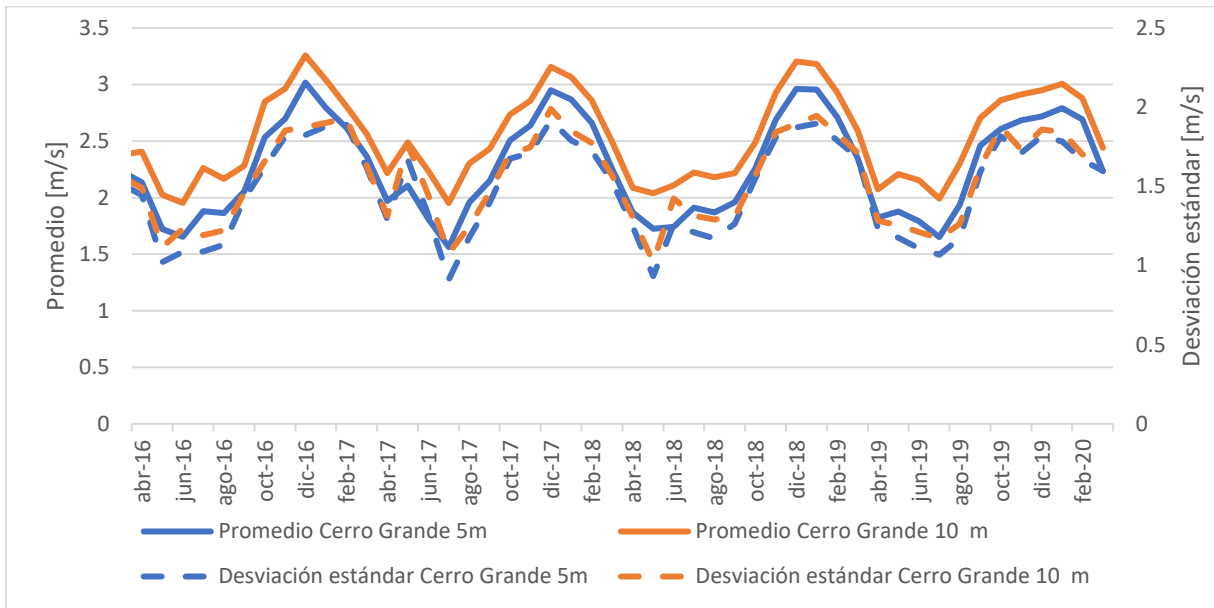


Figura 3: Serie mensual de promedio y desviación estándar para la estación de Cerro Grande.

La Figura 4 muestra el comportamiento del viento promedio para todas las estaciones en un año. Se observa que los mínimos promedios para las estaciones de La Florida y Cerro Grande se encuentran en los meses de invierno, particularmente, para La Florida y Cerro Grande 5 m en junio y para Cerro Grande 10 m en julio. En cambio, para la estación de La Serena el mínimo se encuentra en abril, no observándose una tendencia clara a lo largo del año. Esto se puede deber a la ubicación de esta, ya que es la que más puede estar influenciada por las distorsiones al flujo de viento que puedan producir las construcciones de la zona urbana.

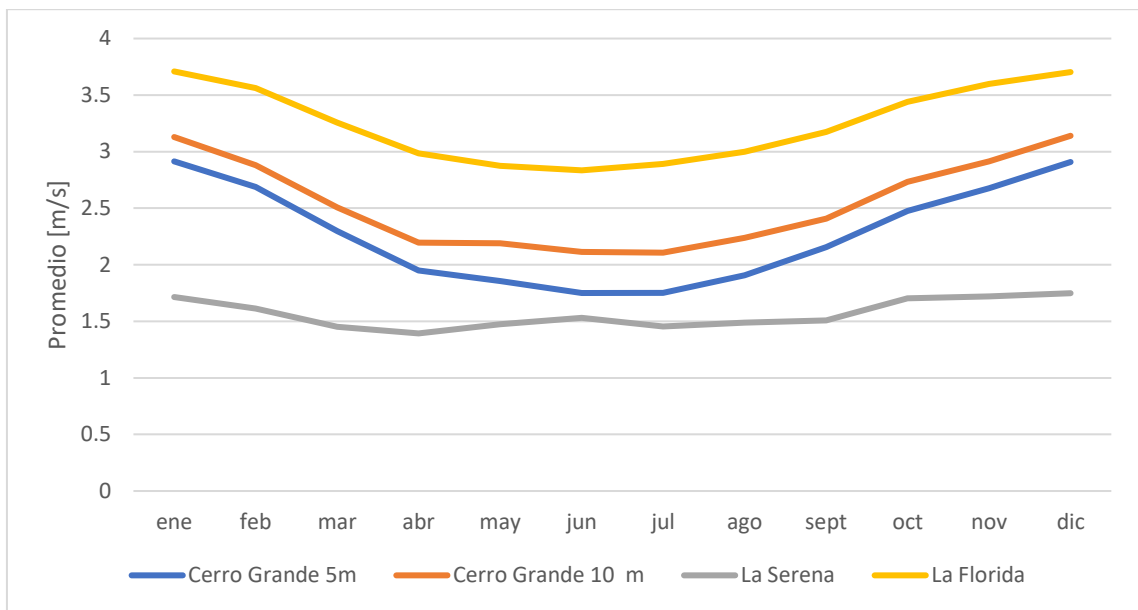


Figura 4: Promedio mensual de velocidad para todas las estaciones.

Los siguientes gráficos, muestran series mensuales de dirección del viento. En particular, la Figura 5 es un complemento del gráfico de la estación de La Florida que se muestra en el capítulo Transporte eólico.

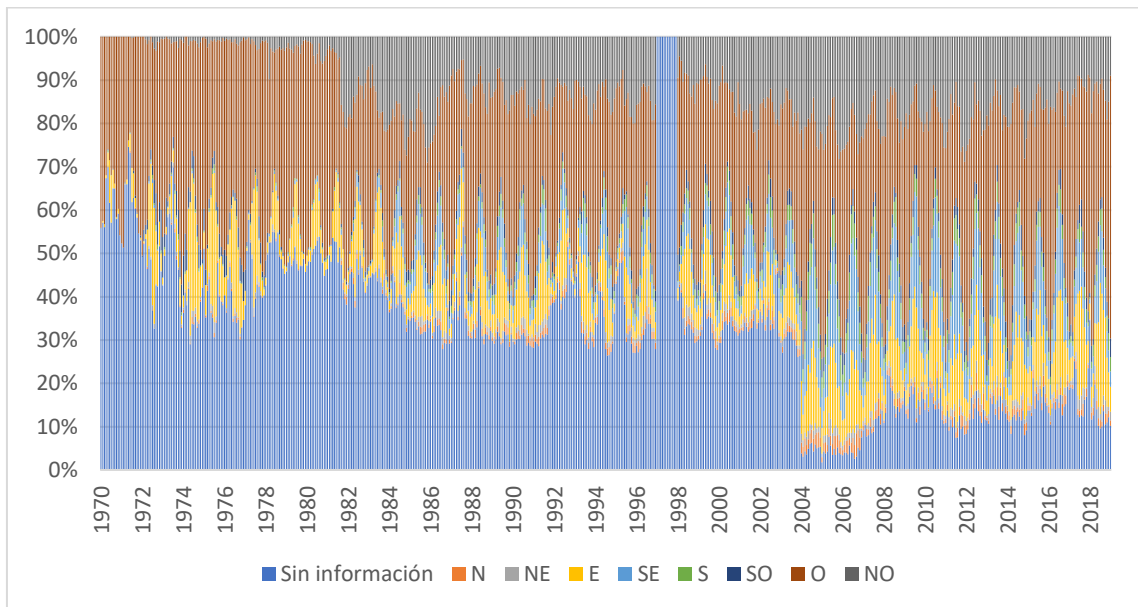


Figura 5: Serie mensual de puntos cardinales para la estación de La Florida.

El gráfico de la Figura 6, muestra la dirección en que apunta el viento en la estación de La Florida por mes. En este, es posible distinguir que a medida que se acerca el invierno, el viento viene más desde el Este y el Sureste, en desmedro del Oeste.



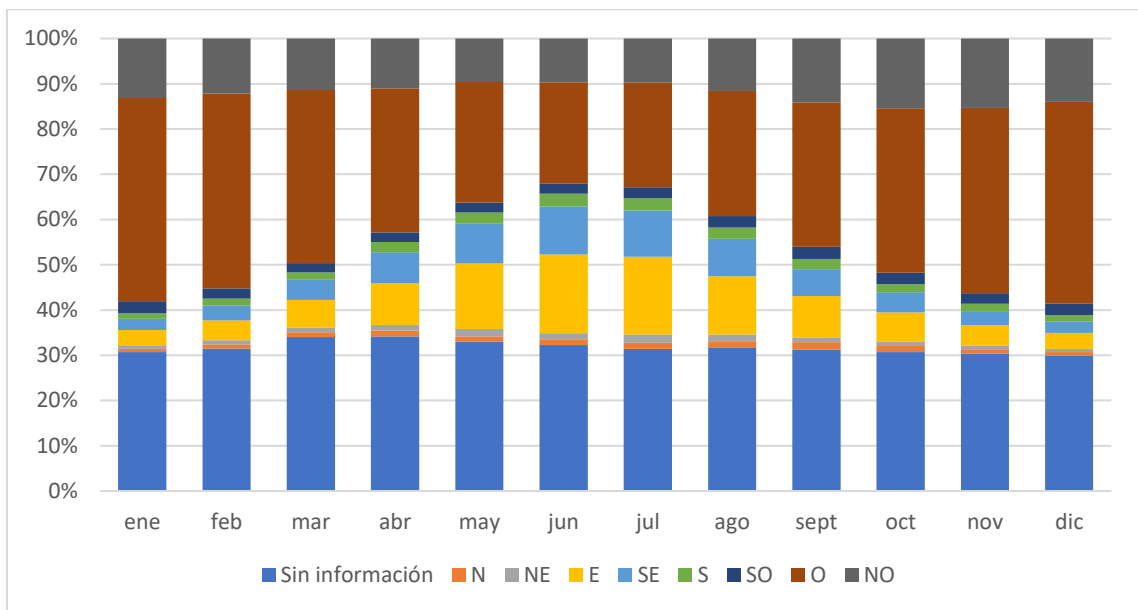


Figura 6: Puntos cardinales por mes de la estación de La Florida.

La Figura 7, Figura 8 y Figura 9 muestran el comportamiento de las direcciones para la estación de Cerro Grande. En general, para la estación Cerro Grande, se ve un predominio anual de la dirección Noroeste, seguidos por las direcciones Este, Oeste y Norte, siendo las con menor representación, el Noreste y el Suroeste. Es interesante notar de la Figura 9 que en los meses mas fríos, hay un aumento del predominio de las direcciones Este y Sureste principalmente y de las direcciones Noreste, Sur y Suroeste en menor medida, en desmedro del Noreste y del Oeste.

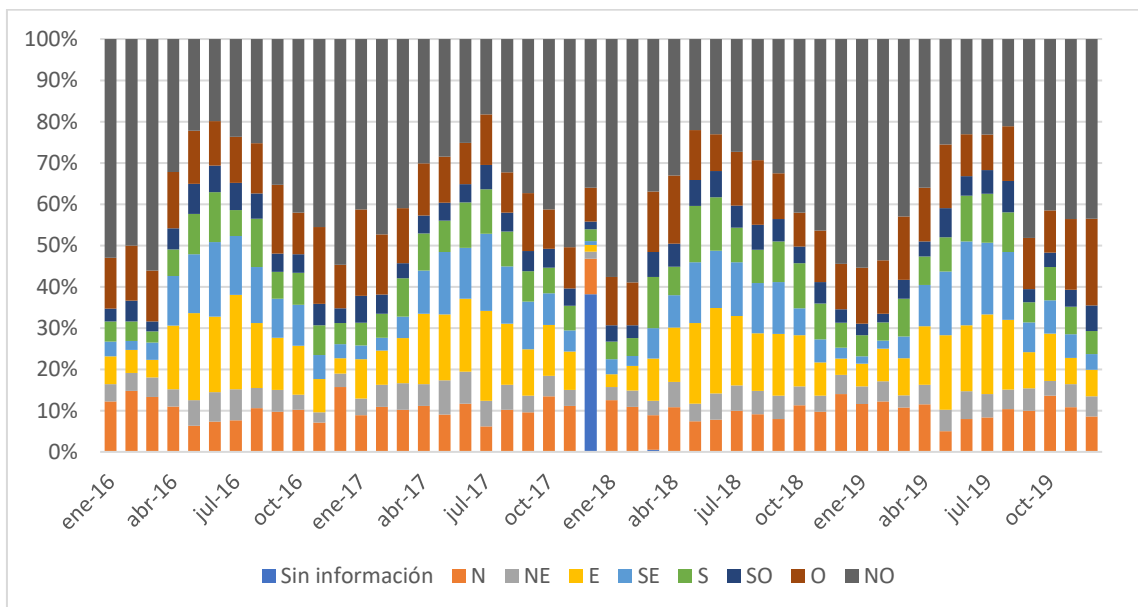


Figura 7: Serie mensual de puntos cardinales para la estación de Cerro Grande.

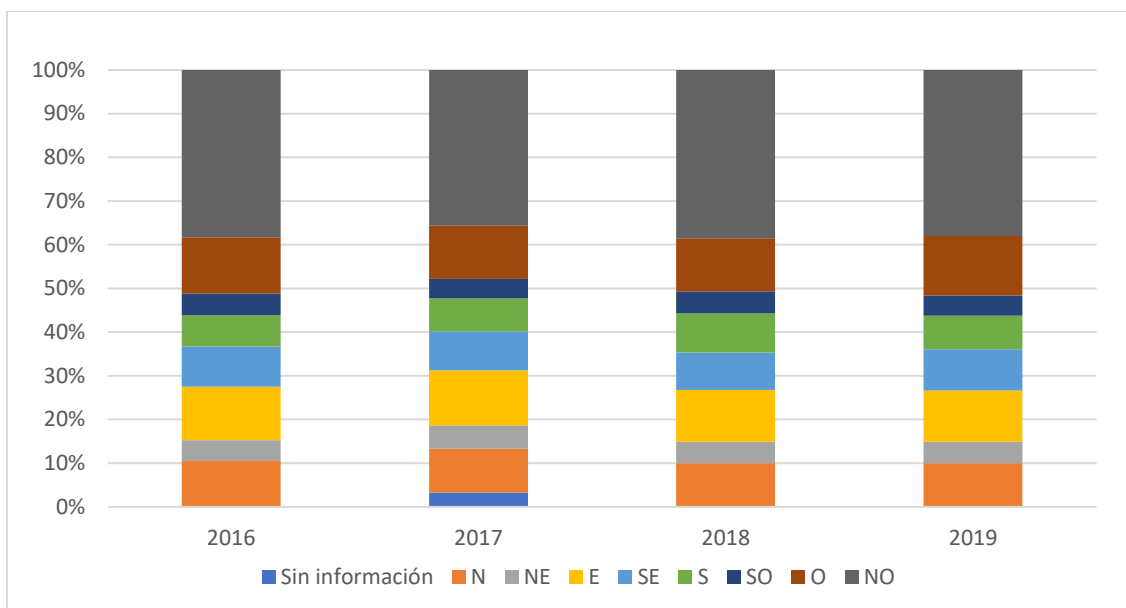


Figura 8: Serie anual de puntos cardinales para la estación Cerro Grande.

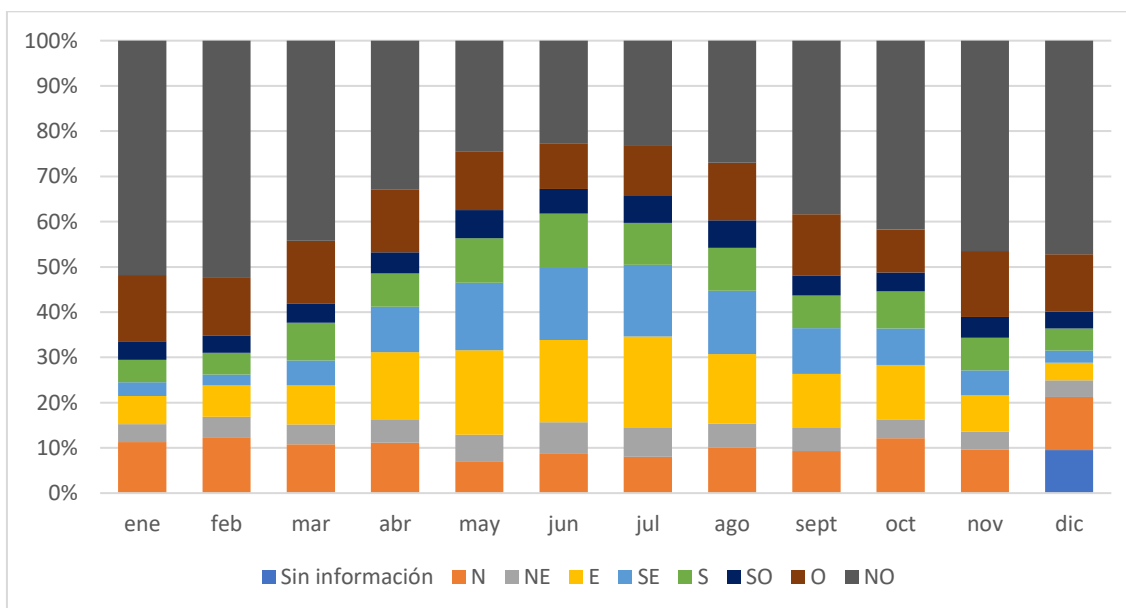


Figura 9: Puntos cardinales por mes para la estación Cerro Grande.

Los mismos tipos de gráficos que los mostrados anteriormente, se muestran ahora para la estación de La Serena en la Figura 10, la Figura 11 y la Figura 12. Cabe mencionar que estas series están influenciadas por una considerable falta de datos entre junio y octubre de 2018, lo cual impacta en las estadísticas anuales y mensuales.

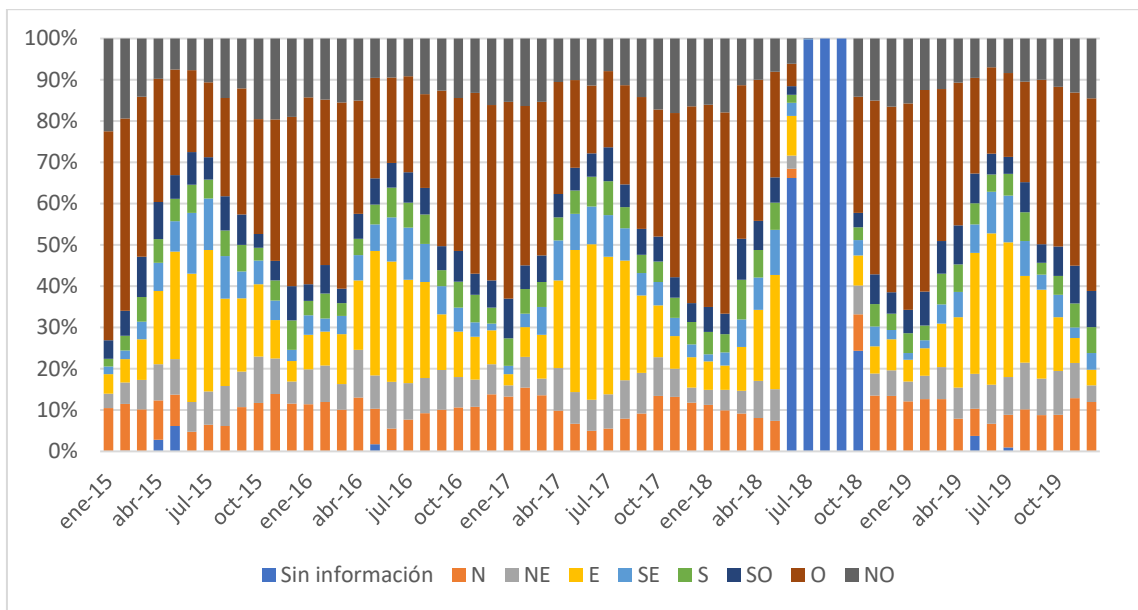


Figura 10: Serie mensual de puntos cardinales para la estación de La Serena.

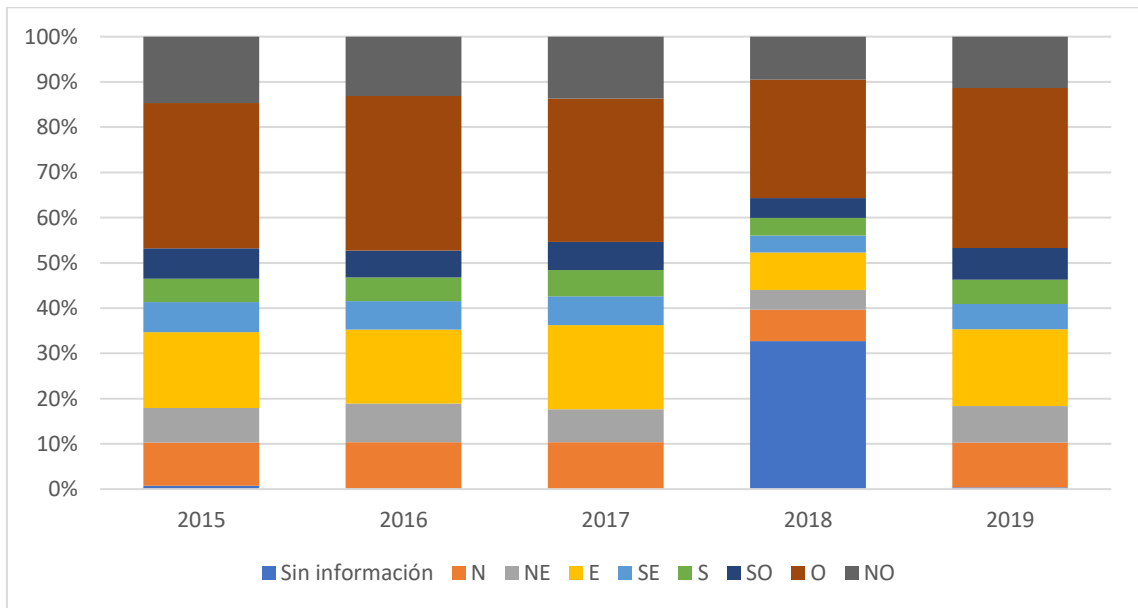


Figura 11: Serie anual de puntos cardinales para la estación de La Serena.

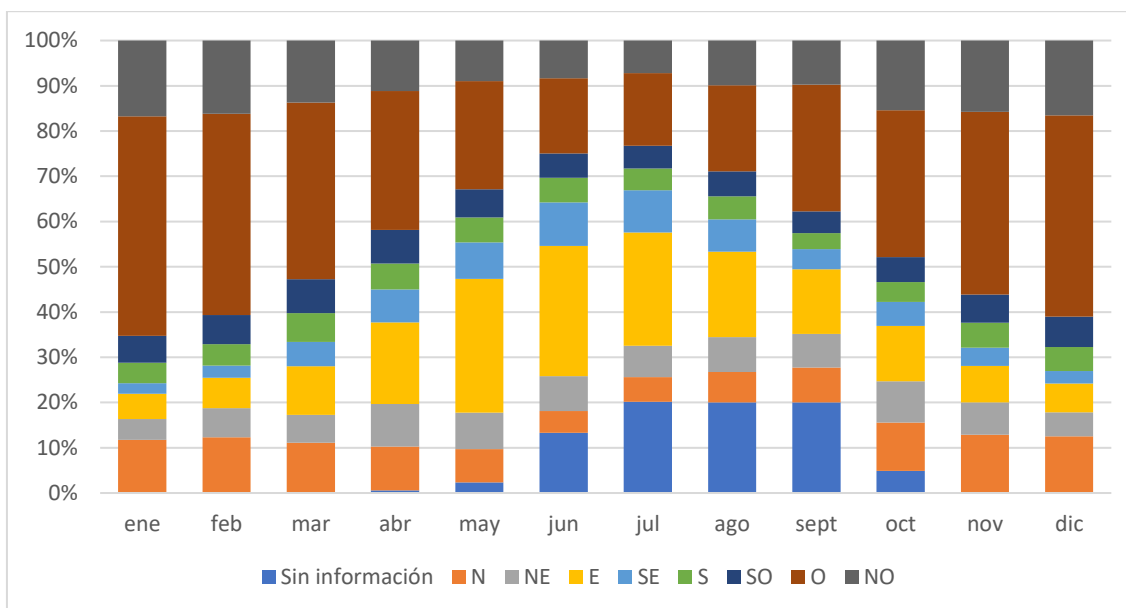


Figura 12: Puntos cardinales por mes para la estación de La Serena.

La Figura 11 y la Figura 12 muestran un predominio de la dirección Oeste, seguido por el Este, luego le siguen en cantidad similar el Norte y el Noroeste. Se observa que el viento a nivel mensual, a medida que se está más cerca del invierno, tiene una tendencia de desplazamiento hacia el Este principalmente y en menor hacia el Sureste. Por otro lado, hacia el invierno va decayendo la predominancia del Oeste.

En resumen, para todas las estaciones se observa un patrón de comportamiento anual, en que, en los meses de invierno, se presenta una distribución en que las direcciones que predominan más en verano se ven atenuadas por los vientos del Este y el Sureste. En general, se nota una predominancia para la zona de los vientos que apuntan desde el Oeste y el Noroeste.

La Figura 13 y la Figura 14 muestran la velocidad del viento y la distribución de las direcciones del viento en función de la hora para las estaciones de Cerro Grande y La Serena<sup>16</sup>. De estos gráficos es posible advertir que la velocidad máxima del viento se presenta entre las 14:00 horas y las 15:00 horas y que durante la noche la velocidad del viento es aproximadamente constante. Por otro lado, también se puede ver que el aumento de la velocidad del viento que se da durante el día está asociado a vientos que provienen desde el mar (dirección Oeste y Noroeste).

<sup>16</sup> No se muestra un gráfico asociado a la estación La Florida porque su frecuencia de adquisición de datos no es la adecuada para hacer un análisis correcto.

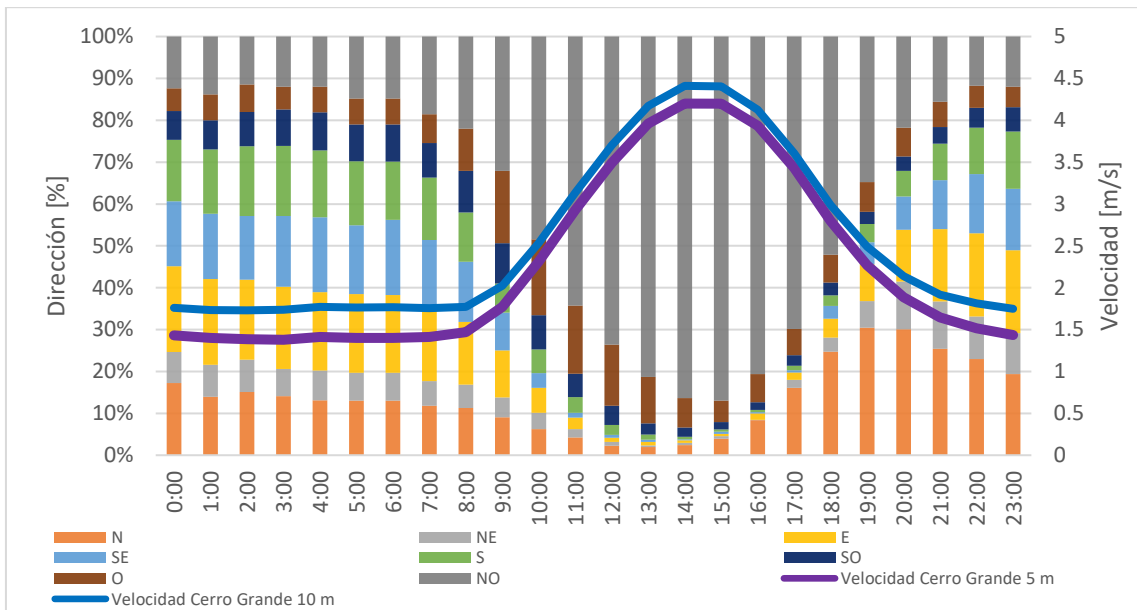


Figura 13: Distribución de direcciones del viento y velocidades para la estación de Cerro Grande a escala horaria.

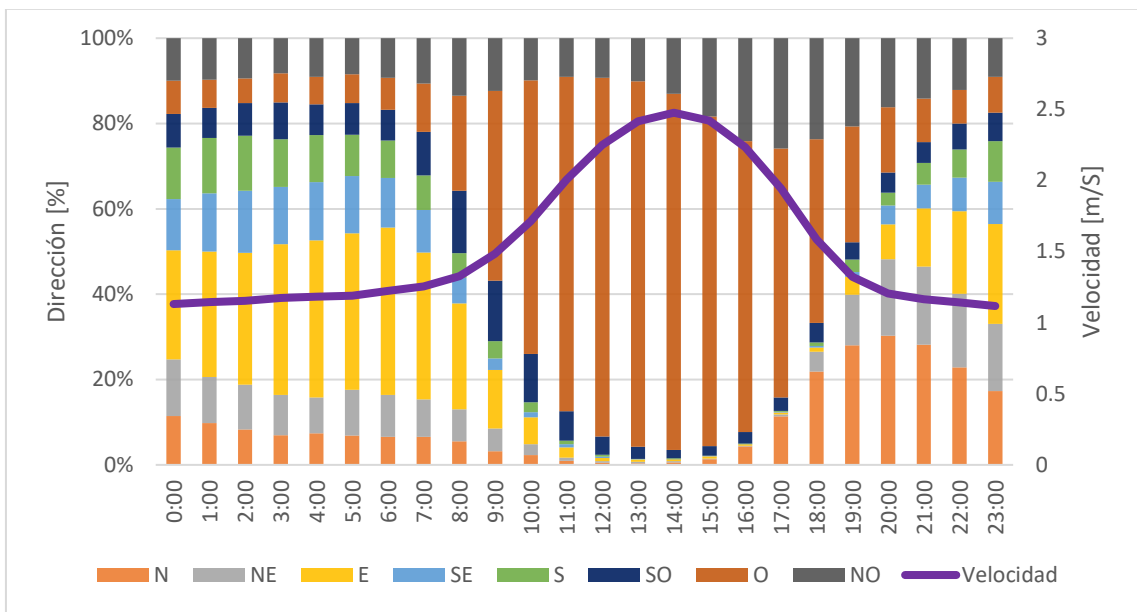


Figura 14: Distribución de direcciones del viento y velocidades para la estación de La Serena a escala horaria.

## Anexo B Granulometría

En la Tabla 1 se muestra la granulometría utilizada para el transporte eólico, en cambio, en la Figura 15 se muestra las curvas granulométricas ocupadas para el cálculo del transporte de sedimento del río Elqui.

Tabla 1: D50 por volumen de control en la playa de La Serena.

Punto	D50 [mm]
1	0,294
2	0,314
3	0,331
4	0,299
5	0,297
6	0,292
7	0,299
8	0,290
9	0,309
10	0,290
11	0,290
12	0,301
13	0,306
14	0,290
15	0,286
16	0,286
17	0,286
18	0,288
19	0,279
20	0,286
21	0,279

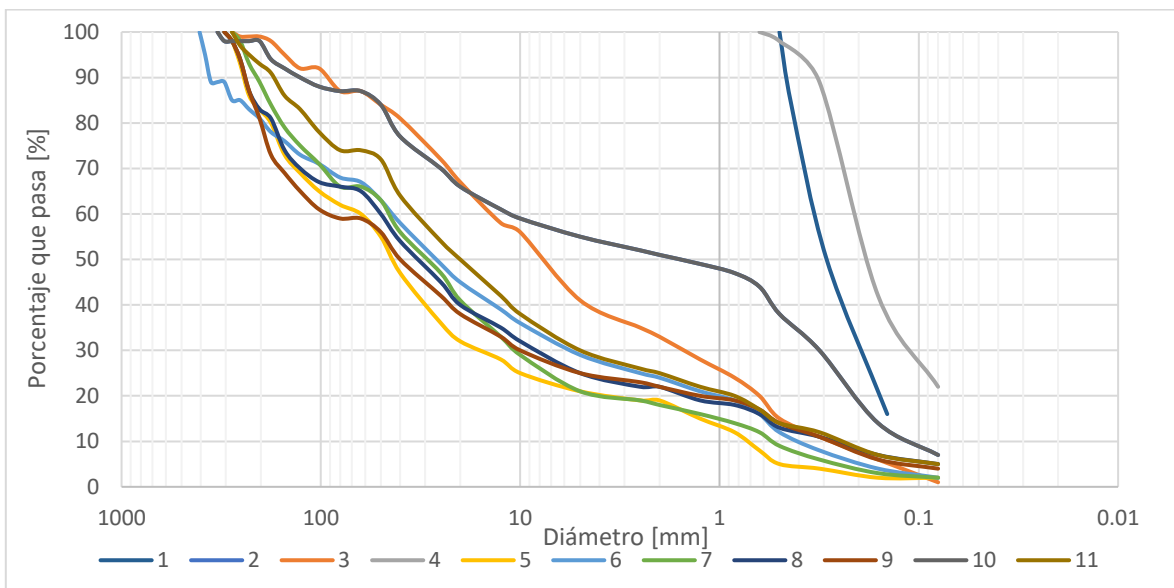


Figura 15: Curvas granulométricas en las que se basa la Figura 4-13.

## Anexo C Volúmenes de control de la playa

Las ecuaciones utilizadas para proyectar cada dato de  $q$  a cada sector de la playa, se basan en cálculos trigonométricos, que se definen sobre un eje que es paralelo a la línea de costa y otro perpendicular. La Ecuación 1 es la proyección del viento en el mismo sentido de la línea de la costa (velocidad longitudinal). En cambio, la Ecuación 2 es la proyección del viento transversal a la línea de la costa (velocidad transversal). En la Figura 16, se muestra un esquema que permite entender de mejor manera el cálculo trigonométrico.

$$q_j^{long} = q_j \cos(\beta_i - \alpha_j)$$

Ecuación 1

$$q_j^{trans} = q_j \sen(\beta_i - \alpha_j)$$

Ecuación 2

Donde:

$q_j^{long}$ : proyección longitudinal para el dato horario  $j$  de la tasa de transporte de masa por unidad de ancho  $Q_j$ .

$q_j^{trans}$ : proyección transversal para el dato horario  $j$  de la tasa de transporte de masa por unidad de ancho  $Q_j$ .

$q_j$ : dato horario  $j$  de la tasa de transporte de masa por unidad de ancho.

$\alpha_j$ : dirección del viento para el dato horario  $u_j$ .

$\beta_i$ : azimut del volumen de control  $i$ .



Figura 16: Esquema de cálculo trigonométrico de transporte eólico.

A los resultados de las Ecuación 1 y Ecuación 2 ,hay que multiplicarlos por el intervalo de tiempo que representa y la longitud transversal sobre la que actúa para poder pasarlo a flujo de masa  $M$ . De esta manera, se aplica la ecuación (14).

$$M = L Q \Delta t$$

Ecuación 3

Donde:

$M$ : flujo de masa en el intervalo de tiempo  $\Delta t$ .

$L$ : largo transversal a la dirección del viento del volumen de control

$Q$ : tasa de transporte de masa por unidad de ancho.

$\Delta t$ : intervalo de tiempo. En este caso, dado que son datos horarios este valor es el equivalente a 1 hora.

Para calcular el flujo de masa anual que se transporta basta con sumar todos los flujos de masa  $M$ .



A continuación, se transforman las unidades de los flujos de masa a volumen. Lo que se hace es ocupar la Ecuación 4 asumiendo un valor de la porosidad para la arena de 0,4.

$$V = \frac{M}{(1-\eta)\rho_s}$$

Ecuación 4

Donde:

$V$ : flujo de volumen.

$M$ : flujo de masa.

$\rho_s$ : densidad de la arena.

$\eta$ : porosidad de la arena.

Los datos asociados a cada volumen de control se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Dimensiones de los volúmenes de control ocupados para el transporte eólico.

<b>Punto</b>	<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Azimut (°)</b>
<b>1</b>	454,9	47,7	310
<b>2</b>	1039,0	33,5	292
<b>3</b>	989,5	34,5	283
<b>4</b>	952,2	46,2	277
<b>5</b>	968,0	39,5	277
<b>6</b>	1043,8	50,5	278
<b>7</b>	1074,0	39,0	274
<b>8</b>	1014,2	38,0	272
<b>9</b>	862,8	39,3	268
<b>10</b>	704,0	59,0	268
<b>11</b>	699,7	57,0	264
<b>12</b>	769,6	51,0	259
<b>13</b>	710,0	57,6	255
<b>14</b>	722,3	53,0	251
<b>15</b>	870,4	75,0	243
<b>16</b>	1012,3	48,5	263
<b>17</b>	1052,9	48,5	44
<b>18</b>	1047,8	61,0	31
<b>19</b>	998,0	56,1	19
<b>20</b>	1058,5	82,5	2
<b>21</b>	590,0	84,0	347

## Anexo D Índice oceánico de El Niño (ONI)

El ONI es un índice que se ocupa para medir patrón climático del ENOS. Este índice se calcula de un promedio a tres meses de la diferencia entre la temperatura del océano en la región 3.4 (ver Figura 17) para cada mes con un promedio de 30 años actualizado cada 5 años. En caso de que en 5 meses consecutivos haya valores del *ONI* superiores a 0,5 °C, se considera que se está frente a un fenómeno de El Niño, en cambio, si son menores a -0,5 °C, se considera que estamos frente a una fase llamada La Niña. Si no se está ni frente a un evento de El Niño ni de La Niña, vamos a decir que se está en una fase neutra. El ONI que se ocupa es obtenido de la página web de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos.

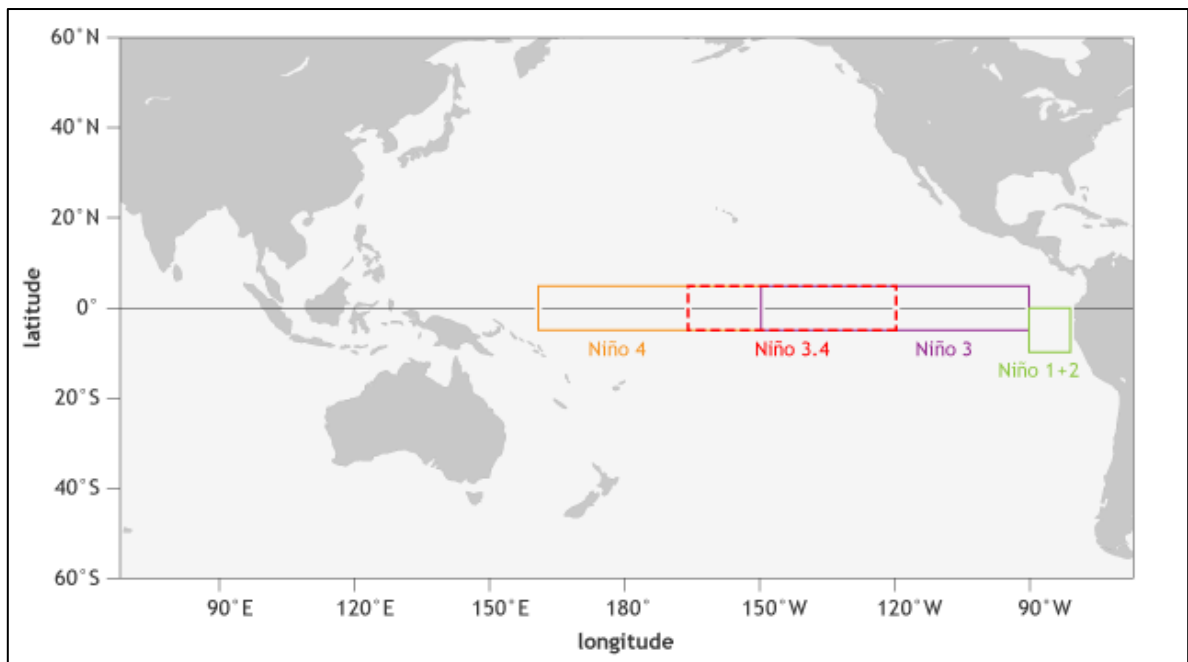


Figura 17: Ubicación de la región 3.4 para el cálculo del ONI (fuente: Lindsey (2009)).

A continuación, se muestra la Figura 18, la cual es un complemento a la Figura 4-5 y muestra la relación del ONI con los caudales de los ríos afluentes al río Elqui.

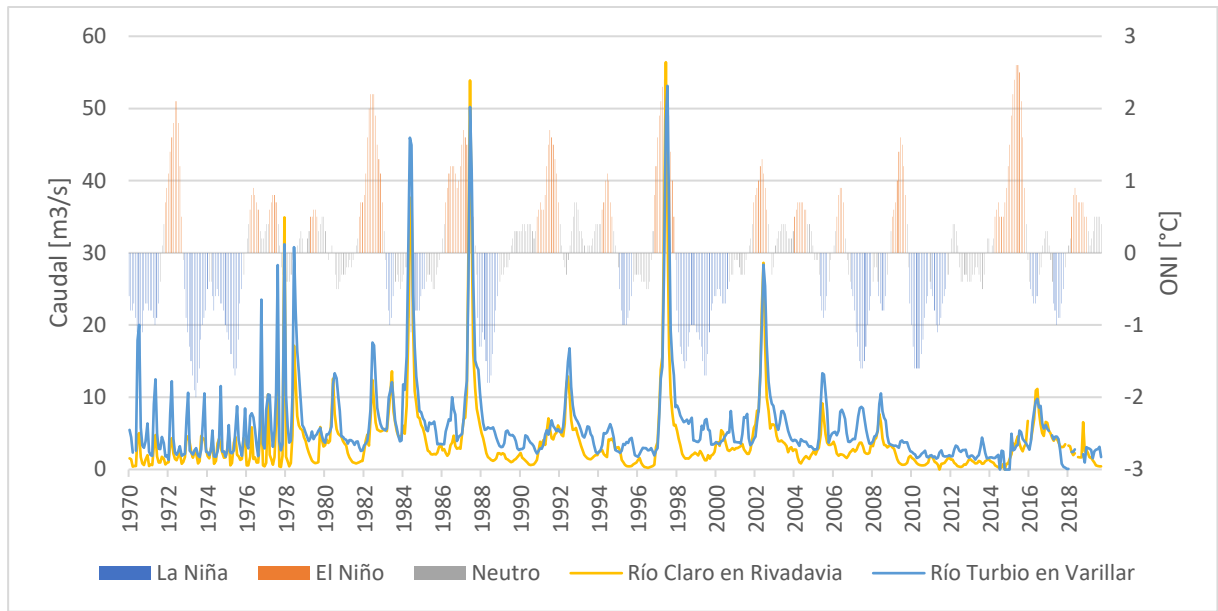


Figura 18: Relación del caudal medio mensual de los ríos afluentes al río Elqui con el ONI.

## Anexo E Número de Manning

Tabla 3: Valores de parámetros presentes en el método de Cowan para obtener el número de manning.

Condiciones del canal		Valores	
Material considerado	Tierra	n <sub>0</sub>	0,02
	Roca cortada		0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Grado de irregularidad	Liso	n <sub>1</sub>	0
	Menor		0,005
	Moderado		0,01
	Severo		0,02
Variaciones de la sección transversal del canal	Gradual	n <sub>2</sub>	0
	Ocasionalmente alternante		0,005
	Frecuentemente alternante		0,01-0,015
Efecto relativo de las obstrucciones	Despreciables	n <sub>3</sub>	0
	Menor		0,01-0,015
	Apreciable		0,02-0,03
	Severo		0,04-0,06
Vegetación	Baja	n <sub>4</sub>	0,005-0,01
	Media		0,01-0,025
	Alta		0,025-0,05
	Muy alta		0,05-0,1
Cantidad de meandros	Menor	m <sub>5</sub>	1
	Apreciable		1,15
	Severo		1,3

Tabla 4: Parámetros de la ecuación de Cowan utilizados por tramos de río.

Tramo	Coficiente	Ribera	Centro
Embalse Puclaro-El Molle	n <sub>0</sub>	0,024	0,026
	n <sub>1</sub>	0	0
	n <sub>2</sub>	0	0
	n <sub>3</sub>	0	0
	n <sub>4</sub>	0,025	0,025
	m <sub>5</sub>	1	1
El Molle-Localidad de Pelicana	n <sub>0</sub>	0,024	0,024
	n <sub>1</sub>	0,005	0,005
	n <sub>2</sub>	0,005	0,005
	n <sub>3</sub>	0	0
	n <sub>4</sub>	0	0
	m <sub>5</sub>	1	1
Localidad de Pelicana-Altovalsol	n <sub>0</sub>	0,024	0,024
	n <sub>1</sub>	0,01	0
	n <sub>2</sub>	0,005	0,005
	n <sub>3</sub>	0	0

<b>Tramo</b>	<b>Coficiente</b>	<b>Ribera</b>	<b>Centro</b>
	n <sub>4</sub>	0,005	0
	m <sub>5</sub>	1	1,15
<b>Altovalsol- Límite Plan Regulador Comunal</b>	n <sub>0</sub>	0,024	0,024
	n <sub>1</sub>	0,024	0,024
	n <sub>2</sub>	0,005	0
	n <sub>3</sub>	0	0
	n <sub>4</sub>	0	0
	m <sub>5</sub>	1	1,15
<b>Límite Plan Regulador Comunal- Puente Libertador</b>	n <sub>0</sub>	0,024	0,024
	n <sub>1</sub>	0,005	0,005
	n <sub>2</sub>	0,005	0
	n <sub>3</sub>	0	0
	n <sub>4</sub>	0,005	0
	m <sub>5</sub>	1	1,15
<b>Puente Libertador- Humedal</b>	n <sub>0</sub>	0,024	0,02
	n <sub>1</sub>	0,005	0
	n <sub>2</sub>	0,005	0
	n <sub>3</sub>	0	0
	n <sub>4</sub>	0,005	0,005
	m <sub>5</sub>	1	1
<b>Humedal-Playa</b>	n <sub>0</sub>	0,02	0,02
	n <sub>1</sub>	0	0
	n <sub>2</sub>	0,005	0,005
	n <sub>3</sub>	0	0
	n <sub>4</sub>	0,025	0,025
	m <sub>5</sub>	1	1

Tabla 5: Número de manning.

<b>Tramo</b>	<b>Ribera</b>	<b>Centro</b>
<b>Embalse Puclaro-El Molle</b>	0,049	0,026
<b>El Molle-Localidad de Pelicana</b>	0,034	0,034
<b>Localidad de Pelicana-Altovalsol</b>	0,044	0,033
<b>Altovalsol- Límite Plan Regulador Comunal</b>	0,034	0,033
<b>Límite Plan Regulador Comunal- Puente Libertador</b>	0,039	0,033
<b>Puente Libertado-Humedal</b>	0,039	0,025
<b>Humedal- Playa</b>	0,05	0,05

## Anexo F Extracción ilegal de áridos

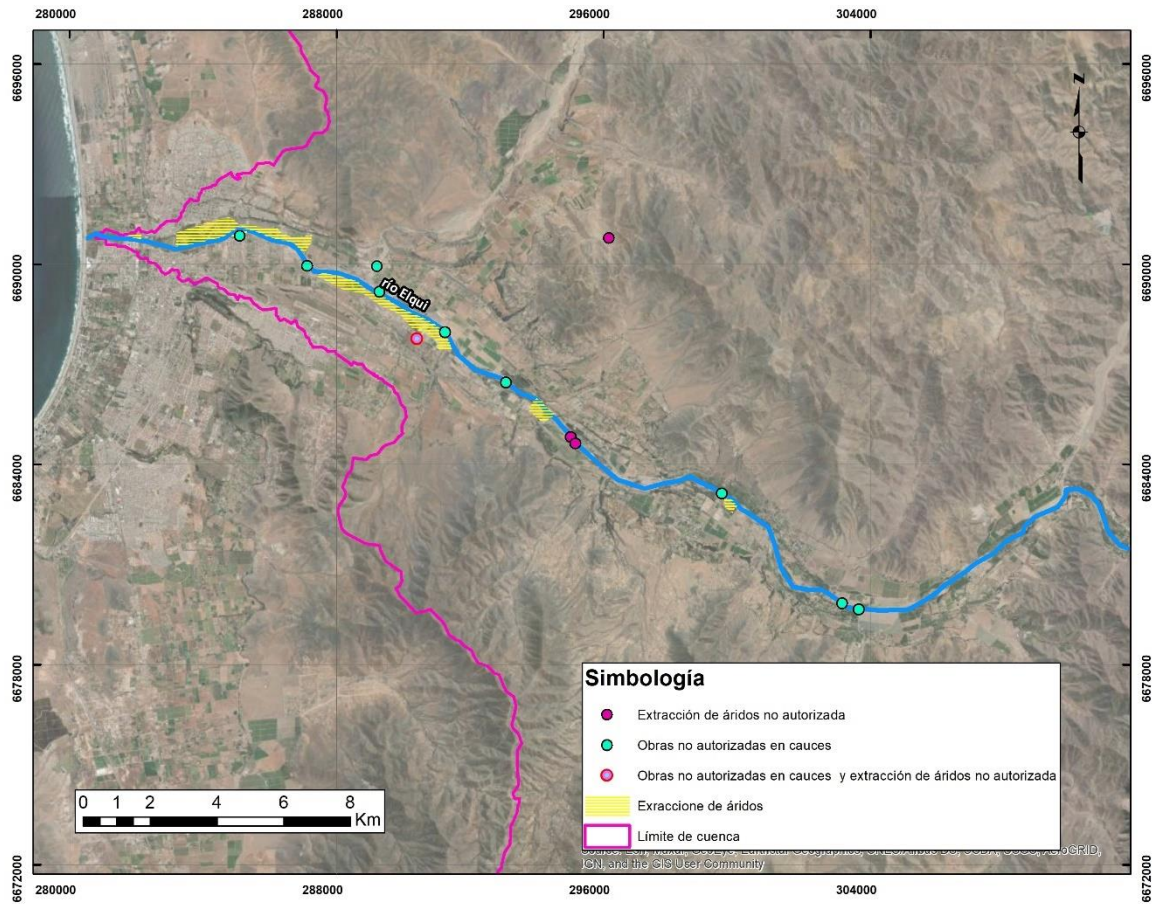


Figura 19: Ubicación de infracciones por obras no autorizadas en cauces y extracción de áridos no autorizadas (fuente: elaboración propia a partir de Dirección General de Aguas-Coquimbo (2021)).

## Anexo G Bocatomas en el río Elqui entre el embalse Puclaro y su desembocadura

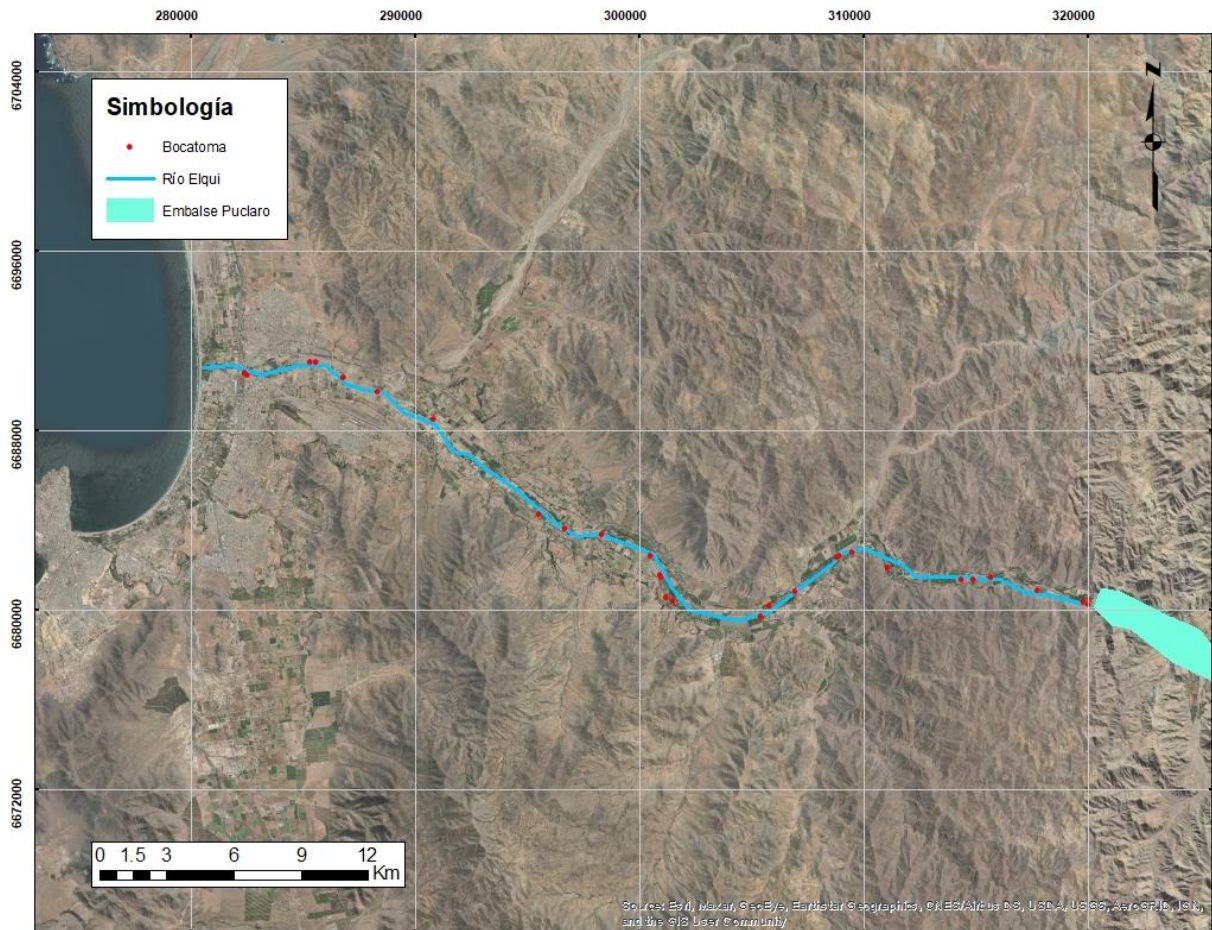


Figura 20: Bocatomas en el río Elqui entre el embalse Puclaro y su desembocadura (fuente: elaboración propia a partir de ESIIR (s.f.)).