

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

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

JOSÉ GONZÁLEZ V.¹
YARKO NIÑO C.²
LUIS ZAMORANO R.³

RESUMEN

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. Este artículo presenta un análisis del balance de sedimentos entre el gasto sólido que aporta el río Elqui y el sedimento que se pierde por transporte eólico en la playa, entre 1970 y 2019. Se han identificado tres factores en el río Elqui que podrían reducir la cantidad de sedimento que llega a la playa: el embalse Puclaro, las extracciones de áridos de su lecho y la megasequía y un factor, que podría contribuir al sedimento transportado, que son los aportes ocasionales desde las quebradas adyacentes al río Elqui. Por otro lado, se identifica las variaciones anuales de la velocidad del viento como un aspecto que podría explicar el retroceso de la playa por parte del transporte eólico de sedimento. Se concluye que, la causa del retroceso de la playa de La Serena es multifactorial y que depende de la década. En la década de 1970, el balance da un retroceso de la playa debido a bajas tasas de gasto sólido anual proveniente del río Elqui. En la década de los ochenta y de los noventa, se concluye que ha habido retroceso y éste ha sido a causa de las elevadas tasas de transporte eólico. En la primera década del Siglo XXI, el retroceso se le atribuye a las extracciones de áridos y la segunda década a la megasequía.

¹ Consultor de hidrología, Amphos 21

² Prof. Titular, Depto. de Ing. Civil, AMTC, Universidad de Chile

³ Jefe de Investigación, Innovación y Desarrollo, INH

email: joseignaciog305@gmail.com

email: ynino@uchile.cl

email: luiszamorano@inh.cl

INTRODUCCIÓN

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 hasta el presente. De hecho, esta tasa para el periodo 2000-2020 ha sido de más de un 1 m/año. Se proyecta que, bajo un escenario conservador la playa retrocederá aproximadamente entre 30 m y 110 m para mediados y finales del siglo (INH, 2021).

Por otro lado, se ha determinado que la playa de La Serena se encuentra en un equilibrio dinámico⁴ (INH, 2021) y que se puede constituir como una celda litoral⁵ (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, considerando la playa en su extensión como volumen de control.

Aguas Spa (2020) e INH (2021), en el contexto de un estudio asociado al retroceso de la playa de La Serena, aseguran que la principal fuente de sedimentos de la playa es el río Elqui. Además, sugieren una disminución del gasto sólido de este río a causa de un factor climático (como la megasequía), el embalse Puclaro y las extracciones de áridos. Aguas Spa (2020), también señala al consumo de agua para actividades agrícolas como otro de los posibles factores que merman el gasto sólido del río. Gonzalez (2022), al revisar imágenes satelitales, identificó a los eventos aluvionales de las quebradas aguas abajo del embalse Puclaro como otro factor a considerar en el gasto sólido anual que llega a la playa por parte del río Elqui.

Además, Aguas Spa (2020), estima que el transporte eólico sería un sumidero importante en el balance de la playa. El problema de esta estimación por parte de Aguas Spa (2020), es que se realiza en un periodo acotado (2012-2018). Por lo tanto, no es posible establecer si la aceleración en el retroceso de la playa que se ha observado desde comienzos de los 2000 se debe a esta razón.

Es en este sentido que el presente trabajo tiene como objetivo 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. Para esto, se analizará el efecto del embalse Puclaro, las quebradas Santa Gracia y Marquesa, las extracciones de áridos en el río Elqui y la megasequía sobre la cantidad de sedimento que llega a la desembocadura del río Elqui. Además, se estimará la cantidad de arena que sale de la playa de La Serena a causa del transporte eólico. Finalmente, se realizará un balance sedimentológico en base al gasto sólido anual del río Elqui y el transporte eólico.

ZONA DE ESTUDIO

La zona sobre la cual se realiza el balance sedimentológico es la playa de La Serena, ubicada en la conurbación de La Serena y Coquimbo. Esta es una playa que se encuentra en equilibrio dinámico y que se puede constituir como celda litoral. Tiene una longitud de aproximadamente 19 km y

⁴ Playa en equilibrio dinámico: playa cuya posición de la línea de la costa depende del balance entre aportes y sumideros en el tiempo.

⁵ Celda litoral: segmento de una zona costera que se puede considerar independiente de las adyacentes.

posee arenas cuyos diámetros d_{50} promedio son de $0,30 \pm 0,01$ mm. Además, en esta playa desemboca la quebrada Chacay, el estero Culebrón y el río Elqui, su principal fuente de sedimentos (Aguas Spa, 2020; INH, 2021).

El río Elqui es un río que se forma de la confluencia del río Turbio y el río Claro. En su zona media, a 48 km de su desembocadura, se ubica el embalse Puclaro. Este comienza su llenado en 1999 y atraparía $43\,000\text{ m}^3/\text{año}$ de acuerdo con las estimaciones hechas por González (2022) en base a un estudio batimétrico del embalse. Ya aguas abajo hay tres zonas en que se extraen áridos, y varias quebradas que aportan caudales al río de forma intermitente, dentro de las que se destacan la quebrada Marquesa y la quebrada Santa Gracia por su comportamiento aluvional (Arrau Ingeniería Spa, 2018). Todos estos elementos afectan a la granulometría del lecho del río. En la Figura 1, se presenta una conceptualización de la zona del río estudiada.

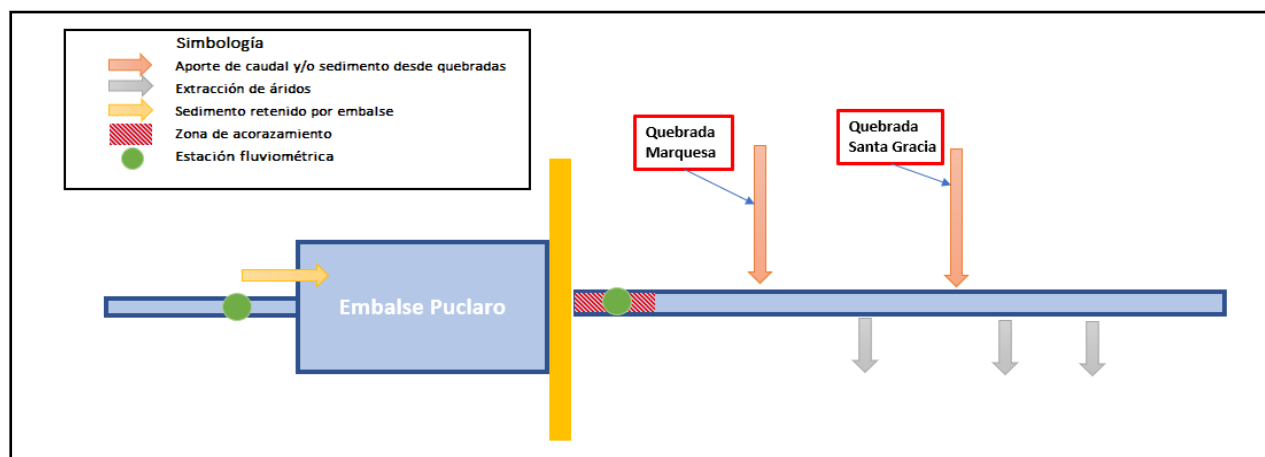


Figura 1: Esquema de representación del río Elqui en el tramo de estudio. Fuente: González (2022).

Los vientos de la ciudad de La Serena se caracterizan por provenir principalmente del Oeste, especialmente en la zona norte y centro de la playa (González, 2022). Las velocidades del viento en la zona urbanizada alcanzan máximos de $1,5\text{ m/s}$, mientras que, en la playa, los máximos se mueven entre los $1,5\text{ m/s}$ y los $2,5\text{ m/s}$ ⁶. De acuerdo con los registros de la estación Florida, los promedios anuales de velocidad del viento entre 1970 y 2019 alcanzaron su peak en la década de 1980, sobrepasando incluso los 4 m/s , luego, la velocidad fue disminuyendo hasta alcanzar sus valores mínimos a mediados de la década de los 2000, con un promedio anual de $2,7\text{ m/s}$, posteriormente, la velocidad volvió a aumentar, con un crecimiento mas acelerado a partir de mediados de la década del 2010.

METODOLOGÍA

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:

- La playa se constituye como una celda litoral.

⁶ Análisis hecho por González (2022), en base a velocidades provenientes del Explorador Eólico del Ministerio de Energía de Chile. Estas son velocidades del viento promedio en 2010 a 10 m de altura.

- Se desprecia el intercambio de sedimento entre la zona más profunda en el mar y la playa (adoptado en base a modelaciones morfodinámicas de la costa e imágenes satelitales).
- No hay flujos entrantes por el norte ni salientes por el sur.
- No hay cañones sumergidos.
- El río Elqui como el único aporte de sedimento fluvial, por ser comparativamente mayor al resto.

Por lo tanto, la ecuación de balance de sedimento (1) queda como se muestra a continuación:

$$\Delta V_{playa} = V_{Elqui} - V_{Eólico} \quad (1)$$

Donde:

ΔV_{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

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

El cálculo del transporte eólico se hace para veintiún sectores equiespaciados a lo largo de la playa, cada uno caracterizado por un d_{50} (INH,2021) y con dimensiones constantes en el tiempo. Para esto, se ocupan los datos horarios de velocidad y dirección del viento provistos por la estación meteorológica Florida ubicada en el aeropuerto La Florida que está a aproximadamente 7 km de la costa y contiguo al río Elqui.

La velocidad que se ocupa en las ecuaciones de flujo de masa se obtiene de un par de correcciones a la velocidad de la estación La Florida. Estas tienen como objetivo transformar la velocidad de la estación en una velocidad representativa de la playa. Para esto, se ocupa la ley logarítmica de velocidades para corregir la diferencia de cota entre la estación y la playa para luego, aplicar las ecuaciones de Hsu (1977,1985) que traspasan velocidades en tierra a velocidades en mar.

En el presente trabajo se ocupan las ecuaciones propuestas por Bagnold (1936), Kawamura (1951), Zingg (1953), Durán et al. (2011) - Kok et al. (2012), para el cálculo del flujo de masa. Estas ecuaciones relacionan en base a distintos supuestos y aproximaciones un flujo de masa que es producido por un flujo de momentum horizontal producido por el viento que logra acelerar los granos de arena (Kok et al., 2012). Es importante mencionar que las ecuaciones de flujo de masa se aplican solo si la velocidad friccional supera cierto umbral, en este trabajo la ecuación para calcular el umbral es la propuesta por Bagnold (1936).

Además, en paralelo al cálculo anteriormente explicado, se hace una corrección al transporte eólico para lidiar con los datos faltantes. La corrección adoptada consiste en añadir volumen de transporte eólico proporcional a la cantidad de datos horarios faltantes en un año. De esta manera, dado que no se considera la velocidad umbral de inicio de movimiento, esta corrección permite obtener un rango superior para el transporte eólico.

El gasto sólido anual que el río Elqui transporta a la playa se calcula a partir de las ecuaciones de Meyer-Peter & Müller (1948) y Wilcock & Crowe (2003), las cuales en lo que sigue del documento se referenciarán como MPM y WC respectivamente, y el software HEC-RAS en su forma unidimensional. De manera más detallada se procede de la siguiente forma:

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 tal de aislar el efecto que pudieran tener las distintas morfologías del río, las extracciones de áridos, el embalse y el punto de salida de las cuencas de las quebradas Santa Gracia y Marquesa (Figura 2). A cada uno de estos tramos del río se le asocia una curva granulométrica, cuyos diámetros medios se muestra en la Figura 3.

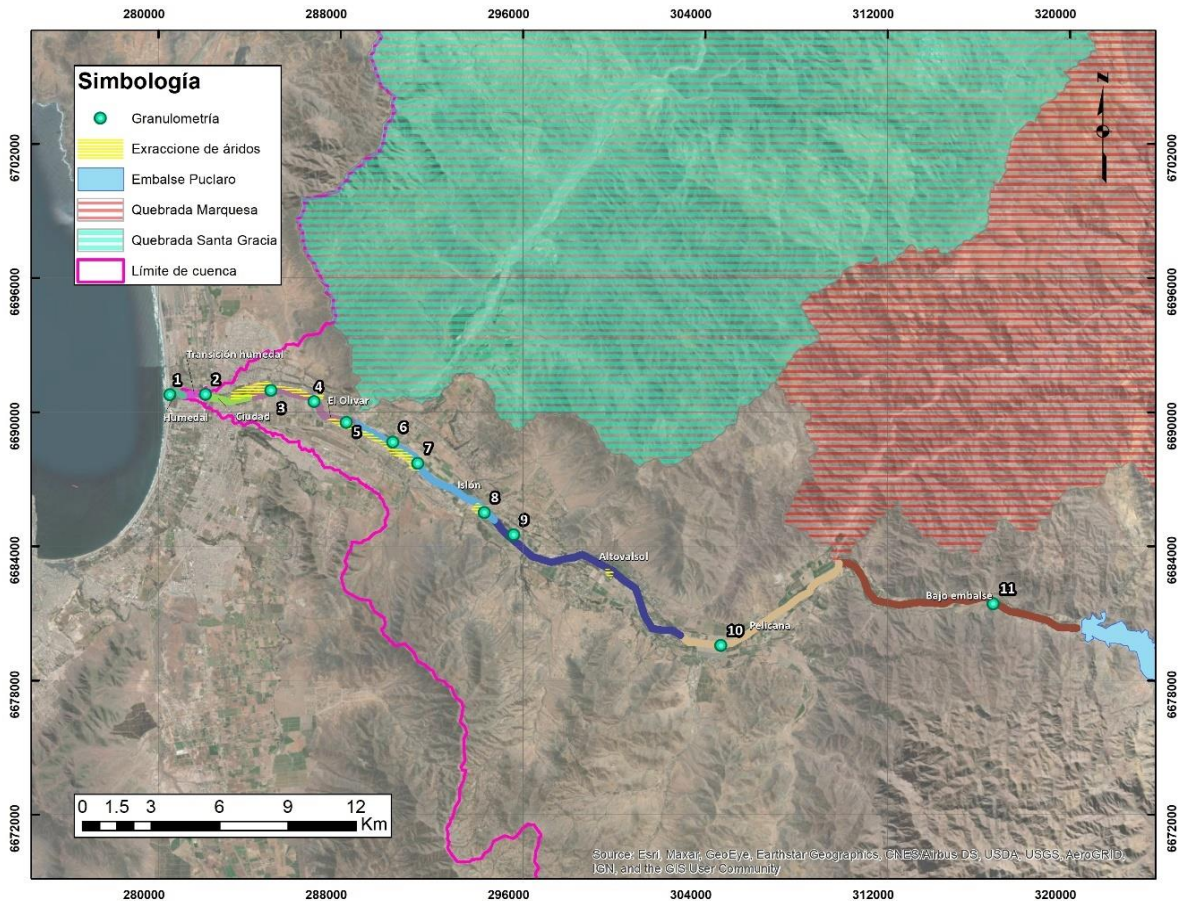


Figura 2: Sectorización del río Elqui. Nota: puntos con numeración indican zonas desde donde se obtienen las curvas granulométricas utilizadas, estas se pueden revisar en González (2022). Fuente: González (2022).

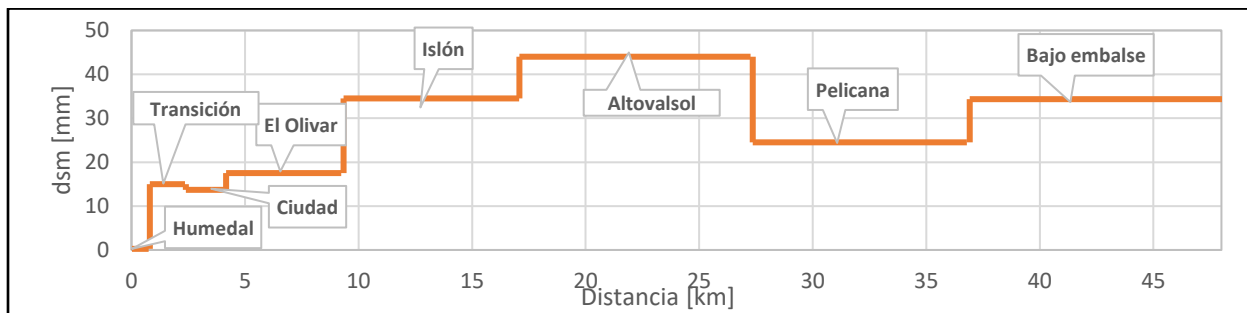


Figura 3: Diámetro medio de las curvas granulométricas elegidas en cada tramo (distancia medida desde la desembocadura del río). Fuente: González (2022).

2. **Parámetros hidráulicos:** Se hacen simulaciones en HEC-RAS, 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. De esta manera, en cada tramo de río se va comparando el sedimento disponible a ser transportado, que depende de las condiciones impuestas aguas arriba, con el transporte potencial de sedimento. Esta metodología se valida al verificar que los lugares donde se extraen áridos son aquellos en que más se acumula sedimento. Para una explicación mas detallada consultar en González (2022).
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. En la Tabla 1, se resumen las características de cada caso. En esta se muestra la columna 'Caudales', que indica la estación fluviométrica de la que se obtienen los caudales y si estos varían por tramo . La columna 'Granulometría' indica si la granulometría es constante en el tiempo en cada sector . Finalmente, las columnas Entrada de sedimentos, Extracción de sedimentos y Retención de sedimentos se relacionan con la forma en que se incorpora en el cálculo el efecto de las quebradas, las extracciones de áridos y el embalse respectivamente.

Tabla 1: Casos a evaluar en el transporte de sedimento del río Elqui. Fuente: González (2022).

Caso	Caudales	Granulometría	Entrada de sedimento	Extracción de sedimento	Retención de sedimentos
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 ³ /año desde el 2000 en sector aguas

Caso	Caudales	Granulometría	Entrada de sedimento	Extracción de sedimento	Retención de sedimentos
					abajo del embalse.
Extracción de áridos	Río Elqui en Almendral	Constante	0	Aumento de 10 000 m ³ /año desde 1990 en sectores de extracciones de áridos.	0
Embalse + Extracciones de áridos +Quebradas	Variabes a lo largo del área de estudio. A la estación Río Elqui en Almendral se le suman caudales en fechas puntuales de quebradas.	Variable en el sector aguas abajo del embalse.	En fechas puntuales desde quebradas según caudales y concentración de aluviones de quebradas.	Aumento de 10 000 m ³ /año desde 1990 en sectores de extracciones de áridos.	40 000 m ³ /año desde 2000 en sector aguas abajo del embalse.

RESULTADOS

En la Figura 4, se presenta el gasto sólido anual promedio por década que llegaría a la playa de La Serena por caso y por ecuación de gasto sólido. Se observa que, en la década de 1970, dado que no hubo aluviones importantes y el río no fue intervenido, el gasto sólido anual es igual para todos los casos. En la década de 1980, se observa un aumento en el gasto sólido anual, relacionado con caudales más altos durante ese período (que aumentaron de promedios de 7-8 m³/s en la década anterior a 14-16 m³/s en los años ochenta), además, se registra un ligero incremento debido a los aluviones. La década de 1990, presenta gastos sólidos del orden de los 35 000 m³/año y los 40 000 m³/año. En este periodo se hace un supuesto de que hay una actividad incipiente de extracción de áridos, la cual produce una merma que es del mismo orden que el aumento producido por los aluviones. Por lo tanto, es posible afirmar que, en la década de los noventa, las extracciones de áridos se podían sustentar gracias al sedimento proveniente de los aluviones.

La primera y la segunda década del Siglo XXI son aquellas décadas en que se presentan mas diferencias entre casos. En la década del 2000 se ve, al comparar el caso Base con el caso Régimen natural, que el solo hecho de que el embalse Puclaro haya regulado los caudales hacia aguas abajo habría hecho que a la playa no hayan llegado aproximadamente 10 000 m³/año de sedimentos. También, al contrastar el caso Embalse y el caso Extracciones de áridos con el caso Base, se ve que las extracciones de áridos producirían una mayor merma en el sedimento que llega a la playa, dado que esta situación produciría una merma de entre 8 000 m³/año y 22 000 m³/año con respecto al caso Base, mientras que, el caso Embalse produciría una merma de a lo más 15 000 m³/año con

respecto al caso base. En cuanto a las quebradas, habrían aumentado en un máximo de 5 000 m³/año el sedimento que llega a la playa. Finalmente, el caso Quebradas + Embalse + Áridos establece que a la playa habría llegado entre 1 000 m³/año y 12 000 m³/año, dependiendo de la ecuación evaluada.

La segunda década del Siglo XXI, no establece diferencias significativas entre el caso Base, el de Régimen natural y el de Quebradas, debido a que la disminución de los caudales por la megasequía no permite que, aun teniendo fuentes extras de caudal y sedimento, el río sea capaz de transportar a la playa más gasto sólido anual. Ni las extracciones de áridos ni el embalse deja que llegue sedimento a la playa, por lo tanto, no es posible evaluar cuál de estos dos tiene mayor influencia en el transporte de sedimento. Finalmente, el caso Quebradas + Embalse + Áridos establece que llegan entre 0 y 5 000 m³/año, los cuales provendría de aluviones.

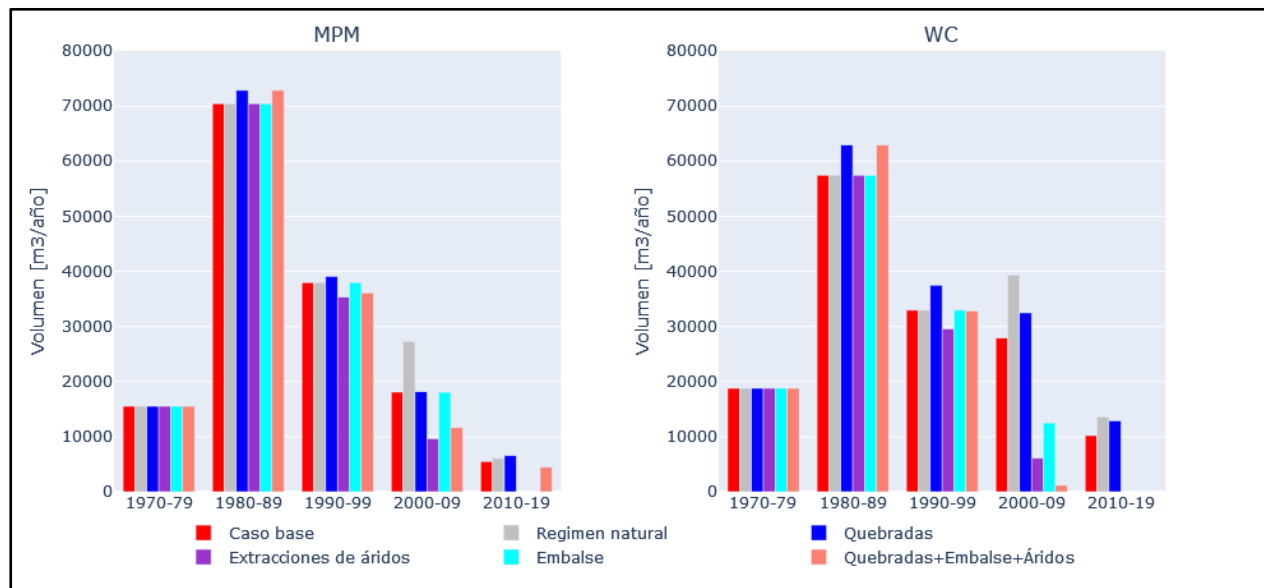


Figura 4: Evaluación de casos de gasto sólido anual que llega a la playa de La Serena por década.

A continuación, en la Figura 5, se presenta el transporte eólico promedio por año calculado con las ecuaciones de Bagnold (1936), Kawamura (1951), Zingg (1953) y Durán et al. (2011) - Kok et al. (2012). Se presenta una barra de color rojo, la cual se relaciona con el transporte eólico calculado con los datos brutos de la estación La Florida y una barra de color azul que es el transporte eólico corregido por falta de datos. Estas dos formas de calcular el transporte eólico representan rangos válidos de transporte eólico. Además, se observa el promedio anual de las velocidades del viento.

Se puede ver que el transporte eólico tiene una relación directa con la velocidad promedio anual. En las primeras dos décadas estudiadas hay oscilaciones anuales en el transporte eólico, alcanzando un máximo a mediados de la década de 1980. 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.

Es importante mencionar que en menos del 20% del tiempo hay transporte de arena ya que en el resto de las ocasiones no se supera la velocidad umbral de movimiento. Esto permite decir que el transporte eólico es un fenómeno episódico (González, 2022).

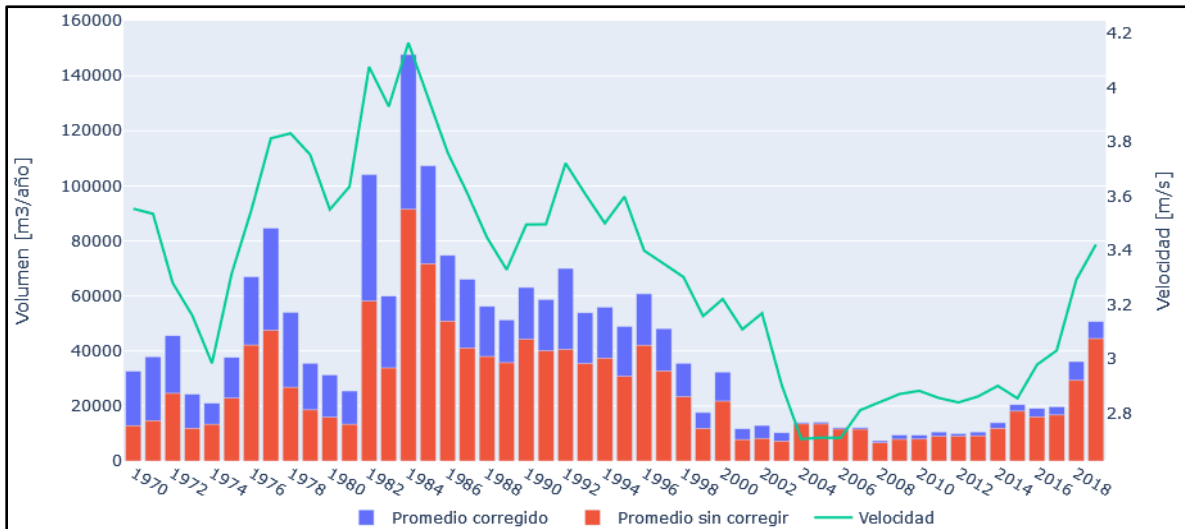


Figura 5: Transporte eólico y velocidad promedio anual.

En la Figura 6 se presenta el balance de sedimento promedio anual por década para los casos caso Base, Extracciones de áridos, Embalse y Quebradas + Embalse + Áridos, efectuados en base a las ecuaciones de MPM y de WC. Cada uno de estos balances se realiza tanto con los resultados del transporte eólico corregido como con los sin corregir, de esta manera se puede lidiar con la incertidumbre que produce la falta de datos en la estación La Florida, otorgando un rango de posibles resultados que se representan por el área sombreada. Esta es la razón de porqué el área sombreada es mayor desde la década del setenta a la del noventa, porque faltan más datos de viento que en las otras décadas.

Todos los casos muestran balances negativos para la década de 1970 y para la década del 2010. En cambio, para las décadas de 1980 y 1990 los balances dan rangos que van entre los números positivos y negativos, aunque, en la década de 1990 los resultados se muestran preferentemente en la zona negativa del gráfico. Caso aparte es lo que ocurre con la década del 2000, donde, las extracciones de áridos transforman los resultados positivos del caso Base a negativos y el embalse los transforma a resultados que son positivos o negativos según la ecuación utilizada.

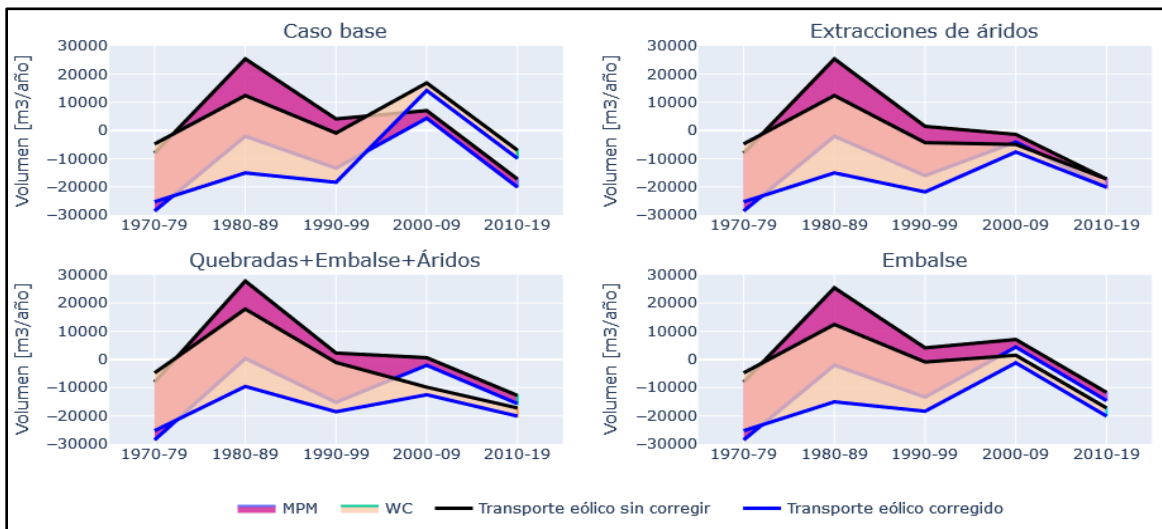


Figura 6: Balance de sedimento promedio anual a nivel de década.

DISCUSIÓN

Es posible validar los resultados del balance ya que se puede establecer una relación entre los antecedentes recopilados y los resultados del caso Quebradas + Embalse + Áridos, que corresponde a aquel caso que intenta reproducir de forma más fehaciente la realidad. Los resultados del balance se validan por las siguientes razones:

- en promedio, hay una tendencia al retroceso de la playa de La Serena para todo el periodo de estudio, lo cual es consistente con los resultados de Winckler et al. (2019) e INH (2021), que establecen tasas de retroceso promedio de 0,3 m/año (1978-2017) y 1,2-2,2 m/año (2000-2020), respectivamente.
- al igual que lo estudiado por INH (2021), el resultado del balance para las primeras dos décadas del Siglo XXI muestra que la playa retrocede.
- el balance hecho a partir de WC muestra que en el periodo 2010-2019, la playa estaría perdiendo aproximadamente 20 000 m³ al año, lo cual es del mismo orden de magnitud que el valor estimado por INH (2021) de entre 30 000 m³ y 70 000 m³ para un retroceso de la playa de La Serena de, entre 1 y 2 m. 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 m³ en la década del 2010 (González, 2022).

Al relacionar los resultados presentados en la Figura 5 y en la Figura 4 con el balance sedimentológico de la Figura 6 se puede analizar en mayor detalle los resultados del balance de sedimento.

En la década de 1970, aunque no se consideran factores que alteren artificialmente el equilibrio sedimentológico natural del río en los cálculos, el balance resultante es negativo. Esto es porque, sin incluir la década de la megasequía, el gasto sólido anual del río Elqui es comparativamente menor al resto de las décadas, lo cual se debe a que los caudales medios del río fueron menores, no así los de mayor magnitud⁷ (González, 2022). El transporte eólico por su parte presenta valores promedio.

En la década posterior el balance no es categórico al ilustrar si la playa presentó un aumento o un retroceso de la línea de la costa. Esto se debe a la gran cantidad de datos de viento faltantes, que aumenta el área sombreada. Esta década se caracterizó porque se presentaron las más altas tasas de transporte eólico y de gasto sólido anual del río Elqui. Si hubo un retroceso, este se debió a las altas tasas de transporte eólico.

El resultado del balance para el caso Base es parecido al del caso Quebradas + Embalse + Áridos en la década de 1990, ya que, el aporte sedimentario de las quebradas contrarresta a la extracción incipiente de áridos. Al igual que en la década anterior, el balance no es decisorio para determinar si es que hubo un retroceso de la playa, sin embargo, si es que lo hubo fue por las altas tasas de transporte eólico ya que los caudales del río se encuentran dentro del promedio.

La década de 2000 es la década que presenta las menores tasas de transporte eólico, sin embargo, aun así, en el caso Quebradas + Embalse + Áridos, muestra resultados neutros o negativos, según

⁷ Se refiere a los caudales medios diarios mayores a 15 m³/s.

la ecuación. En esta década, el retroceso se debe principalmente a las extracciones de áridos. Esto se evidencia en la Figura 6, donde solo al incluir este factor, el resultado del balance es negativo. En cambio, a pesar de que el caso Embalse también tiene una influencia importante, ésta no deja el balance en valores únicamente negativos.

En década del 2010, el transporte eólico tiene una tendencia ascendente la que, sin embargo, no es inferior al transporte eólico de la década de los ochenta y los noventa. Por otro lado, debido a que la región se encuentra en una megasequía y esto significa una baja en los caudales del río Elqui, el gasto sólido anual que aporta a la playa este río es nulo o mínimo. Por lo tanto, dado que el transporte eólico no es particularmente alto y el gasto sólido anual que proviene del río Elqui es de valores cercanos a cero, es que se postula a la megasequía como la causa del retroceso de la playa para la segunda década del Siglo XXI.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se realiza un balance de sedimento entre 1970 y 2019 para evaluar las causas que podrían explicar el retroceso de la playa de La Serena. Los resultados del balance se validan a partir estudios en los que se realizan análisis con imágenes satelitales de la posición de la línea de la costa.

Se llega a la conclusión que la causa del retroceso es multifactorial y depende de la década. En la década de 1970, el balance da negativo porque el gasto sólido anual que proviene del río Elqui es comparativamente menor al resto de las décadas (exceptuando la de la megasequía), en instancias que el transporte eólico presenta valores promedios. En la década de 1980 y 1990 si es que hubo retroceso, se explica por las elevadas tasas de transporte eólico. En la primera década del Siglo XXI, el retroceso se debe a las extracciones de áridos y, en la segunda década, a la megasequía.

Por lo tanto, es posible afirmar que la playa de La Serena se encuentra en un proceso de erosión constante que se demuestra tanto con estudios de imágenes satelitales (INH, 2021, Winckler et al., 2019) como con el balance sedimentológico presentado en este trabajo. Dada la permanencia de la megasequía en la zona, se proyecta que la playa siga estando en un proceso erosivo, lo cual, gracias a que la playa va a disminuir su ancho constantemente a causa de los factores evaluados, se va a traducir en que las marejadas que afecten la zona urbana van a ser cada vez mas frecuentes. De hecho, el aumento del nivel del mar debido al cambio climático podría agravar el proceso de erosión, lo que, a su vez, contribuiría al aumento en la frecuencia de las marejadas.

Se considera que el efecto del embalse y de las extracciones de áridos son importantes dentro del balance. En ese sentido, se recomienda mejorar el análisis de ambos incorporando más datos de, por ejemplo, reglas de operación del embalse y de estimación de volúmenes de extracción de áridos efectivos (tanto legales como ilegales).

Es importante mencionar que, en una primera instancia, se intentó calcular el gasto sólido anual del río Elqui con la ecuación de Exner a partir del módulo de transporte de sedimentos de HEC-RAS llegando a resultados incoherentes presumiblemente por la falta de datos para calibrar el modelo. Por lo tanto, se recomienda para futuros estudios que intenten calcular el gasto sólido anual del río Elqui realizar mediciones en terreno de gasto sólido.

Además, se sugiere realizar mediciones más precisas del sedimento en la playa utilizando técnicas que permitan caracterizar el diámetro de manera más precisa. Esto es importante porque el valor de d_{50} es un parámetro sensible en el cálculo del transporte eólico y podría invalidar los resultados del balance sedimentológico (González, 2022).

BIBLIOGRAFÍA

Agua 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.

Bagnold, R., 1936. The movement of desert sand. *Mathematical and Physical Sciences*, 157, 594-620.

Durán, O., Claudin, O., & Andreotti, B., 2011. On aeolian transport: Grain-scale interactions, dynamical mechanisms and scaling laws. *Aeolian research*, 3, 243-70.

González, J., 2022. 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 y memoria para optar el título de ingeniero civil, Universidad de Chile.

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.

Meyer-Peter, E., & Muller, R., 1948. Formulas for Bed-Load Transport. Proc. 2nd Congress IAHR. Estocolmo, Suecia.

INH, 2021. Estudio La Serena-Etapa III Rev. E.

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).

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.

Zingg, A., 1953. Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material. *Proceedings of the 5th Hydraulic Conference Bulletin*, 34, 111-135.