



Universidad de Chile
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

Caracterización geomorfológica y factores de cambio en la zona media y distal del estuario del río Maule, entre los años 2009 y 2023.

Memoria para optar al Título de Geógrafa

DAPHNE VALENTINA MAGAÑA HENRÍQUEZ

Profesora guía: Joselyn Arriagada González

Santiago, Chile

2023

*A Urano, mi compañero de vida,
quien está conmigo hace ocho años.
Eternamente agradecida de tu compañía
y de tus miradas,
las que entiendo sin necesidad de palabras.
Espero seguir escuchándote correr todas las noches de mi vida.*

*A las dos mariposas que últimamente me visitan,
gratitud por su eterna enseñanza.*

AGRADECIMIENTOS

A mis abuelos, Lidia y Gastón, quienes no solo fueron mis compañeros en terreno, sino que fueron mi principal inspiración para concretar el presente trabajo. Les agradezco el cariño y el sentimiento de pertenencia a esta hermosa ciudad, la que visito desde que aún no daba mis primeros pasos. Gracias Pochi por darme crianza, por llevarme contigo cada una de las vacaciones a Constitución, por cada ida al bosque a recoger pinos para la chimenea, por cada subida al pozón, por cada caminata a la laguna y, principalmente, por cada pescado frito preparado por ti. Gracias tata por llevarme a la playa después del almuerzo, por los días en el río, por cada churro con manjar, por cada frutilla con chocolate, por cada abrazo y beso en la frente.

A mis papás, Pablo y Cecilia, quienes nunca han puesto un peso sobre mis hombros ni expectativas por cumplir. Toda mi vida he podido tomar mis propias decisiones y mi interés por la geografía no fue la excepción. A mis hermanas y hermano, Martina, Vicente y Adara, para quienes deseo de todo corazón tengan la misma libertad de decisión que he gozado yo y disfruten cada nuevo conocimiento que entrega el estudio. A Lucas (mi hermano, como dice mi papá), a quien iba a molestar cada vez que sentía un poco de estrés, y que saturé tanto que ahora se escapa cada vez que me ve.

A mi abuela Wilma y a mi tía Wilma (tocayas), las que más allá de estar presente físicamente, sé que están presentes en cada decisión y ayuda que requiero. A pesar de verlas pocas veces al año, nunca faltó el interés en saber cómo estaba mi situación académica. Gracias por darme un hobby que disfruto tanto, gracias por enseñarme a disfrutar la lectura de temas poco comunes.

A Bastián, quien se unió a mi camino hace un par de años y quien nunca ha dudado de mi inteligencia a pesar de todas mis frustraciones. Gracias por cada comida, por cada ida al cine, por cada palabra de ánimo, no sería lo mismo sin tu compañía.

Gracias a cada amistad que se preocupó por el avance de mi trabajo o simplemente me dio una palabra de ánimo. Sin saberlo hicieron más ameno este proceso.

Por último, infinitas gracias a la profesora Joselyn por la revisión de este trabajo y quien es la principal responsable de mi gran gusto por la geomorfología.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 ÁREA DE ESTUDIO	4
1.3.1 Antecedentes hidrológicos.....	4
1.3.2 Antecedentes climatológicos	5
1.3.3 Antecedentes geológicos	6
1.3.4 Antecedentes geomorfológicos	8
1.3.5 Antecedentes oceanográficos	10
1.4 OBJETIVOS.....	11
1.4.1 Objetivo general.....	11
1.4.2 Objetivos específicos.....	11

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMA DE DESEMBOCADURA	12
2.1.1 Estuario	12
2.1.2 Tipos de desembocaduras.....	12
2.1.3 Zonificación de un estuario	13
2.1.4 Elementos morfológicos presentes en un estuario	14
2.1.5 Clasificación de los estuarios.....	15
2.1.6 Tendencia evolutiva de sistemas estuariales	19
2.2 INTERACCIÓN PLAYA - OLEAJE	20
2.2.1 Tipos de Zonas de Rompientes (TZR)	20
2.3 FACTORES DE CAMBIO	22
2.3.1 Precipitaciones	22
2.3.2 Caudales.....	22

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 PRODECIMIENTOS.....	23
-------------------------	----

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 ESTADO GEOMORFOLÓGICO ACTUAL.....	28
4.1.1 Descripción geomorfológica.....	28
4.1.2 Zonificación del estuario	30
4.2 CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN LA PARTE MEDIA Y DISTAL DEL ESTUARIO DEL RÍO MAULE, ENTRE LOS AÑOS 2009 Y 2023	33
4.2.1 Años 2009 - 2010 - 2011	33
4.2.2 Años 2013 - 2014 - 2016	37
4.2.3 Años 2018 - 2019 - 2020	41
4.2.4 Años 2021 - 2022	46
4.2.5 Año 2023.....	49
4.3 Factores de cambio	60
4.3.1 Mareas	60
4.3.2 Precipitación	62
4.3.3 Caudal	66

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1 DISCUSIÓN	70
5.1.1 Clasificación del estuario.....	70
5.1.2 Zonificación del estuario	71
5.1.3 Geomorfología de la zona media y distal del estuario del río Maule	72
5.1.4 Tendencia evolutiva	73
5.2 CONCLUSIONES.....	74
REFERENCIAS	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.	4
Figura 2. Extracción carta geológica de Chile, zona de Constitución.....	7
Figura 3. Zona costera de Constitución, unidad Punta Curaumilla.....	8
Figura 4. Carta náutica del Puerto de Constitución y desembocadura del río Maule, año 1933.....	9
Figura 5. Carta náutica del Puerto de Constitución y desembocadura del río Maule, año 1945.....	9
Figura 6. Carta náutica del Puerto de Constitución y desembocadura del río Maule, año 1957.....	10
Figura 7. A. Procesos físicos que ocurren en un estuario y su distribución. B. Zonificación tripartita de facies en un estuario.....	14
Figura 8. Morfología del estuario del Maule y campo dunar de Putú-Quivolgo.	15

Figura 9. Estuarios dominados por olas. A. Perfil y distribución de la energía. B. Individuos morfológicos presentes en un estuario dominado por olas. C. Perfil de facies sedimentarias en un estuario dominado por olas.	16
Figura 10. Estuarios dominados por mareas. A. Perfil y distribución de la energía. B. Individuos morfológicos presentes en un estuario dominado por mareas. C. Perfil de facies sedimentarias en un estuario dominado por mareas.....	17
Figura 11. Clasificación según la respuesta al swell. A- Delta estuarial paralelo. B- Delta estuarial transversal (perpendicular). C- Delta estuarial oblicuo.....	19
Figura 12. Sistemas costeros y sus fases de relleno.	19
Figura 13. Tendencia evolutiva de los sistemas costeros.....	20
Figura 14. Tipos de playas dominadas por olas (Wright & Short, 1984) adaptadas por Araya - Vergara (1996).	21
Figura 15. Identificación de geoformas en el estuario del Maule.	29
Figura 16. Perfil de elevación para delimitación de terraza fluvio-marina, comuna de Constitución. .	29
Figura 17. Evolución de la vegetación en banco de meandro, río Maule.....	31
Figura 18. Zonificación estuario del río Maule.	32
Figura 19. Vegetación y espigón de Isla Orrego, años 2009 y 2010.	34
Figura 20. Vegetación en Isla del Perro, años 2009 y 2010.	34
Figura 21. Estados morfológicos de la zona media y distal del río Maule en los años 2009, 2010 y 2011.....	36
Figura 22. Litoral cercano al río Maule en los años 2009, 2010 y 2011.....	37
Figura 23. Estados morfológicos de la zona media y distal del río Maule en los años 2013, 2014 y 2016.....	38
Figura 24. Litoral cercano al río Maule en los años 2013, 2014 y 2016.....	41
Figura 25. Estados morfológicos de la zona media y distal del río Maule en los años 2018, 2019 y 2020.....	42
Figura 26. Barras y surcos en el litoral cercano al río Maule, ribera norte, año 2018.	44
Figura 27. Barras y surcos en el litoral cercano al río Maule, ribera norte, año 2019.	45
Figura 28. Litoral cercano al río Maule en 2020.....	45
Figura 29. Estados morfológicos de la zona media y distal del río Maule en los años 2021 y 2022. ...	46
Figura 30. TZR para el año 2021.....	48
Figura 31. TZR para el año 2022.....	49
Figura 32. Estados morfológicos de la zona media y distal del estuario del río Maule, año 2023.....	50
Figura 33. Cordón de playa en la ribera norte del río Maule, octubre de 2023.	51
Figura 34. Desembocadura río Maule, ribera norte.	52
Figura 35. Terraza fluvio-marina de Constitución.	53
Figura 36. Valle que alberga al río Maule, viste este.....	53
Figura 37. A- Ganancia de masa Isla Orrego. B- Ganancia de masa Isla del Perro.....	54
Figura 38. Octubre de 2023, Isla Orrego.	54
Figura 39. Nuevos bancos medios, ribera norte.	55
Figura 40. Nuevo banco medio, ribera sur.	55
Figura 41. Unión Isla del Perro.	56
Figura 42. A- Acreción lateral Isla del Perro. B- Acreción proximal Isla del Perro.	56
Figura 43. Árboles arrancados de raíz y depositados en Isla del Perro.	57
Figura 44. Vista poniente desde el puente.....	57

Figura 45. Ganancia de masa en banco lateral oriente El Edén.	58
Figura 46. Acreción lateral en banco El Edén.	58
Figura 47. Litoral cercano post temporal, octubre de 2023.	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Informe pluviométrico, estación Talca.	22
Tabla 2. Imágenes satelitales utilizadas para el análisis morfológico entre 2009 y 2022.	24
Tabla 3. Imágenes satelitales utilizadas para el análisis morfológico del año 2023.	25

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Mareograma enero, 2023.	60
Gráfico 2. Mareograma febrero, 2023.	61
Gráfico 3. Mareograma marzo, 2023.	61
Gráfico 4. Precipitación mensual acumulada, estación Constitución, años 2009 - 2010 - 2011.	63
Gráfico 5. Precipitación mensual acumulada, estación Constitución, años 2012 - 2013 - 2014.	63
Gráfico 6. Precipitación mensual acumulada, estación Constitución, años 2015 - 2016 - 2017.	64
Gráfico 7. Precipitación mensual acumulada, estación Constitución, años 2018 - 2019 - 2020.	65
Gráfico 8. Precipitación mensual acumulada, estación Constitución, años 2021 - 2022 - 2023.	65
Gráfico 9. Caudales medios mensuales, estación río Maule en Forel, años 2009, 2010 y 2011.	67
Gráfico 10. Caudales medios mensuales, estación río Maule en Forel, años 2012, 2013 y 2014.	67
Gráfico 11. Caudales medios mensuales, estación río Maule en Forel, años 2015, 2016 y 2017.	68
Gráfico 12. Caudales medios mensuales, estación río Maule en Forel, años 2019, 2019 y 2020.	68
Gráfico 13. Caudales medios mensuales, estación río Maule en Forel, años 2021, 2022 y 2023.	69

RESUMEN

Se realizó un estudio geomorfológico del estuario del río Maule entre los años 2009 – 2023, con el propósito de determinar las variaciones morfológicas que este sufrió y el nivel influencia de los factores de cambio. El año 2023 experimentó importantes eventos para el área de estudio, mientras que en verano se registró el avance excepcional de la flecha litoral sur (nunca registrado), en invierno la región del Maule atravesó por eventos climáticos extremos y donde fue afectada por dos grandes temporales en menos de dos meses. Se procedió con la revisión y fotointerpretación de imágenes satelitales, además de análisis factores de cambio como mareas, pluviometría y caudales. Los resultados dan cuenta de que la relación entre estos factores y el crecimiento de la flecha litoral sur es baja. Mejor dicho, la influencia de los factores de cambio en las geoformas del estuario del río Maule es estacional y esporádica, no generando una variación importante. Por último, en el análisis del litoral cercano se comprobó que la flecha litoral sur estuvo presente en la mayoría de los años analizados, solo que esta se desarrolla de manera sub-acuática y, en casos específicos, de manera superficial.

Palabras clave: estuario, flecha litoral, geoformas, factores de cambio, litoral cercano.

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Los estuarios son ecosistemas claves para el desarrollo humano dado que cumplen funciones naturales, económicas y de bienestar. De la interacción río - océano surge la posibilidad de desarrollar pesca artesanal, recolección de orilla y turismo, actividades que sostienen económicamente a las áreas pobladas colindantes. Así también, son zonas que reducen la exposición a amenazas como tsunamis y marejadas (Martínez, 2023).

Los estuarios también consideran beneficios que no incluyen directamente a los humanos. La descarga del río en el mar no significa pérdida de agua, al contrario, esto trae consigo sedimentos y nutrientes esenciales para el bienestar de las comunidades y ecosistemas que se desarrollan en la zona (Martínez, 2023).

Cada estuario tiene sus particularidades, sin embargo, autores como Dalrymple *et al* (1992) y Araya - Vergara (1971, 1976, 1981, 1982 y 1996) han formulado teoría para la clasificación, zonificación y tendencia evolutiva de los estuarios, permitiendo contar con una base sólida para su actual estudio. En ese sentido, se sabe que según sea el tipo de estuario, este puede desarrollar ciertas geoformas que a su vez son ideales para inferir su comportamiento.

No obstante, todo esto puede verse fracturado por acción del Cambio Climático (CC). El CC tiene impactos a nivel global, donde sus consecuencias naturales tienen relación con altas temperaturas, sequías e incendios forestales, inundaciones, disponibilidad de agua dulce, subida del mar en zonas costeras, entre otros (Comisión Europea, s.f.).

Estas consecuencias también se han hecho presente en Chile, donde se han registrado problemas relacionados a la escasez y disponibilidad de agua, aumento de sequías y baja en las precipitaciones, marejadas y aumento del nivel del mar (Istúriz, 2018). Especialmente en la zona de Chile Central se ha registrado la llamada megasequía, donde desde 2010 se registra un nivel de precipitaciones por debajo de lo normal, promediando entre el 20 y 45%. Como consecuencia directa está la disminución de caudales de los ríos, lo que arrastraría menos nutrientes y problemas en los ecosistemas (Llorente, 2020).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los estuarios, conceptualizados principalmente por ser áreas de transición entre el entorno marino y el entorno fluvial, son sistemas de agua de gran importancia económica en las distintas partes del mundo, en donde históricamente se han desarrollado ciudades en sus alrededores (Piccolo y Perillo, 1997).

Los estuarios son especialmente vulnerables al calentamiento global, siendo afectados por tres tipos de forzamientos (Piccolo, 2013):

- Cantidad y calidad del escurrimiento de agua dulce.
- Procesos de interacción aire-agua de CO₂, intercambios de calor, evaporación, precipitación, forzamiento del viento, entre otros.
- Fluctuaciones en el nivel del mar y en las propiedades del agua del mar

Los sistemas fluviales son impactados enormemente por los efectos del CC. Un estudio realizado por la Universidad de Sidney analizó ríos de 160 países, donde los resultados coincidían en el descenso de los caudales (Fundación Aquae, 2021). Por su parte, el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2015) en su informe sobre la megasequía en Chile, en el período 2010 - 2015 el déficit promedio de caudales en ríos entre las regiones de Coquimbo y Valparaíso llegaba al 70%, valor que iba disminuyendo hacia el sur hasta llegar al 25%. Este déficit es similar al de las precipitaciones en sectores precordilleranos; sin embargo, los impactos pueden ser aún superiores en las desembocaduras de algunos ríos, esto como consecuencia del mayor consumo de los recursos hídricos.

Al hablar de la diversidad ecosistémica existente en Chile, también es lógico hablar de su alta vulnerabilidad al impacto del Cambio Climático. El Cambio Climático (CC) corresponde a variaciones a largo plazo de los patrones climáticos y las temperaturas, cambios que pueden tener origen natural. No obstante, desde el siglo XIX que la actividad antrópica ha sido el principal impulsor del CC, como una consecuencia de la quema de combustibles fósiles. Los efectos más importantes experimentados hasta el momento tienen relación con sequías intensas, escasez de agua, aumento del nivel del mar, inundaciones, pérdida de biodiversidad, entre otros (Organización de las Naciones Unidas [ONU], s.f.).

Vivanco (2019) señala que dada la Convención Marco de Naciones Unidas por el Cambio Climático (CMNUCC) en su artículo 4, número 8 (y que es Ley de la República desde el año 1995) Chile posee condiciones que lo hacen susceptible al impacto del Cambio Climático. Estas características son:

- Áreas de borde costero de baja altura
- Zonas áridas, semiáridas
- Zonas con cobertura forestal y zonas expuestas al deterioro forestal
- País propenso a desastres naturales
- Zonas propensas a la sequía y desertificación
- Zonas urbanas con problemas de contaminación atmosférica
- Zonas de ecosistemas frágiles, incluidos los sistemas montañosos

En abril del 2023 se comenzó a registrar el inminente cierre de la desembocadura del río Maule en la comuna de Constitución, suceso que históricamente nunca había ocurrido. Inclusive, a finales del siglo XIX, Constitución era conocida como puerto mayor, permitiendo la navegación de embarcaciones menores hasta 61 kilómetros arriba de la desembocadura (Pomar, 1962 en Venegas, 2014). Ante la posibilidad del cierre definitivo de la boca, se conformó una mesa de trabajo entre distintas autoridades comunales y regionales. La urgencia del accionar de las autoridades radica en las consecuencias que puede tener el cierre de la conexión río - mar, la comunidad se vería afectada en gran medida por problemas ambientales, sanitarios y económicos (Cámara de Diputadas y Diputados, 2023).

El caso del río Maule no es el único donde se han documentado cambios morfológicos. En un suceso aún más extremo, en enero del 2023 se registró el cierre total de la desembocadura del río Maipo, en el límite de las comunas de San Antonio y Santo Domingo, acontecimiento que no había ocurrido desde que se dispone de imágenes satelitales. Si bien un equipo de científicos estudia el episodio, preliminarmente las causas del cierre se atribuyen a un banco de arena formado por marejadas, donde sumado al contexto de sequía e intervención antrópica de caudales en el río, no hubo suficiente fuerza para romperlo (Instituto Milenio en Socio - Ecología Costera [SECOS], 2023).

Cabello (en Beltrán, 2023) indica que el río Maule arrastra grandes cantidades de sedimentos que posteriormente embarcan en la desembocadura, mientras que también las mareas arrastran arena hacia la boca. Igualmente destaca la influencia del terremoto del 2010, en donde se produjo aún más movimiento de sedimentos, así como la extracción de áridos y, como indica Venegas (2014) la construcción del espigón de Isla Orrego que desvía el caudal del río.

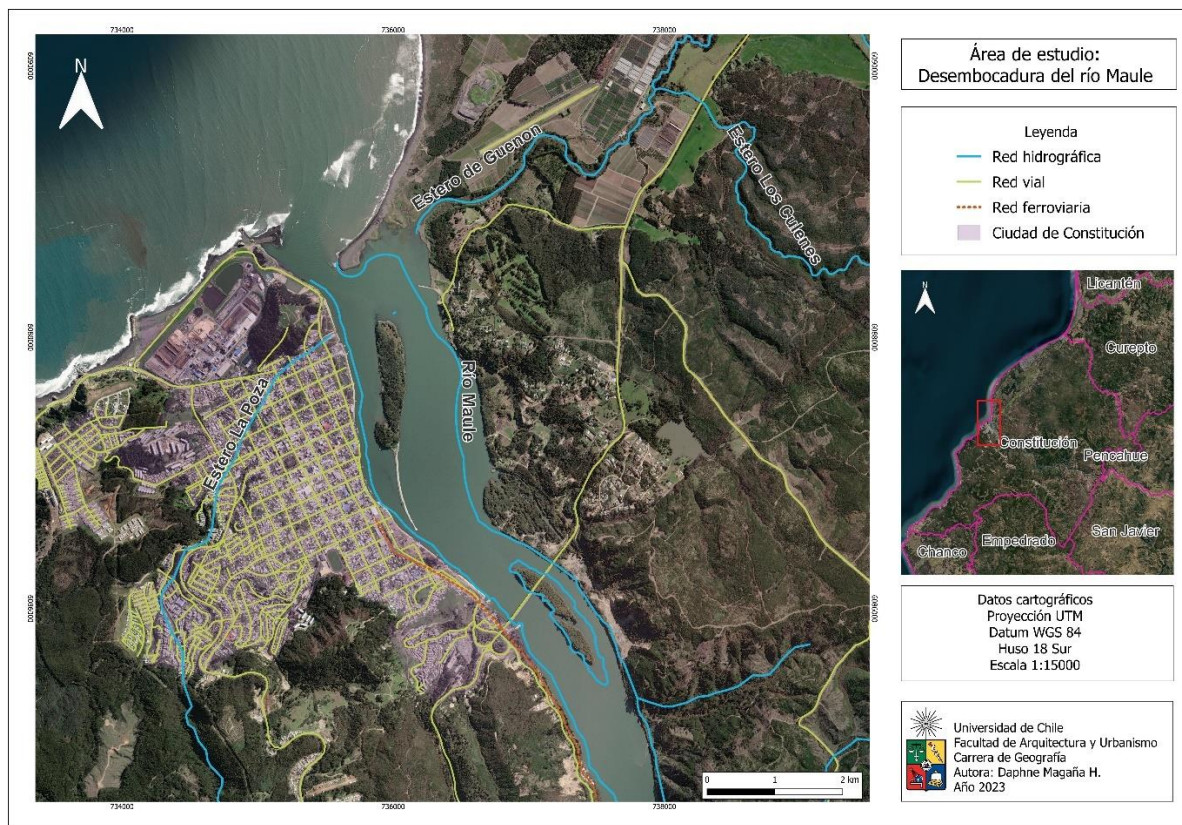
Los cambios morfológicos en la desembocadura del río Maule no sólo son responsabilidad de lo que ocurre de manera local en la comuna de Constitución, sino que en el contexto actual de Cambio Climático también se hace necesario estudiar lo que ocurre a un nivel general. Dentro de los conflictos socioterritoriales identificados por Pincheira (2021) en la cuenca media y alta del Maule, los principales problemas están relacionados con el agua: disponibilidad para el riego, sequía, pérdida de biodiversidad, incendios forestales, interrupción de caudal y conflictos por el agua.

En la zona central de Chile, la intensificación del Cambio Climático se ha evidenciado a través de eventos climáticos extremos cada vez más frecuentes, la megasequía, la influencia del cambio en los estados del oleaje y la intervención antrópica de los cursos de agua. Frente a esto, es interesante estudiar las variaciones morfológicas que el estuario del Maule ha tenido en los últimos 14 años, tanto como una actualización al trabajo realizado por Venegas (2014), como para determinar la tendencia evolutiva de la desembocadura del río en el escenario actual de Cambio Climático.

1.3 ÁREA DE ESTUDIO

Las zonas media y distal del estuario del río Maule se encuentran en la comuna de Constitución, región del Maule (Fig. 1). Las zonas más pobladas de la comuna son los sectores de Santa Olga, Los Pellines y el centro urbano, Constitución, este último emplazado en la ribera sur del río.

Figura 1. Área de estudio.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

1.3.1 Antecedentes hidrológicos

La cuenca del Maule posee una superficie de 21.054 km² (Dirección General de Aguas [DGA], 2020), la que a su vez está conformada por 11 subcuencas (Escenarios Hídricos 2030 [EH2030], 2022), las cuales se dividen en 64 subsubcuencas. La desembocadura a estudiar está dentro de la cuenca Maule Bajo, la que tiene una superficie de 1.317 km² (DGA, 2020).

El régimen hidrológico es de tipo nivo - pluvial. El río Maule, en su zona alta y media, es de régimen nival, aumentando su caudal en los meses de primavera debido a los deshielos cordilleranos. En su zona baja, el río Maule es de régimen pluvial, presentando crecidas directamente relacionadas a precipitaciones (DGA, 2005)

El río Maule nace en el extremo norponiente de la laguna del Maule, recorre al norte por 6 km para luego avanzar en dirección noroeste a través de un lecho angosto y encajo en las altas montañas. A

31 km de su nacimiento se une al río Puelche, desde donde toma un rumbo absoluto al norponiente. A 90 km de su origen, expande su cauce para recorrer 80 km de llanura aluvial central e internarse a través de la cordillera de la costa, en donde se suma desde el norte el río Claro (de sus tributarios más importantes). En este junte, recorre envuelto por cerros de la cadena costera, donde solo en sus 10 últimos km se ensancha hasta alcanzar 900 m de ancho en su boca. Toda la travesía que recorre el río alcanza los 240 km desde su nacimiento hasta desembocar en la comuna de Constitución (DGA, 2005).

En todo su recorrido, el río recibe algunos afluentes que solo llevan agua en época de precipitación, siendo el estero Los Puercos uno de los principales. Sin embargo, también tiene grandes tributarios en la zona andina, ejemplo de estos son el nombrado río Puelche, río Cipreses y río Melado (DGA, 2005).

El área de estudio, dentro de la comuna de Constitución, es parte de una subcuenca junto con las comunas de Péncahue, San Rafael, Río Claro, Pelarco, Molina, Talca, Maule, San Javier y San Clemente (EH2030, 2022).

1.3.2 Antecedentes climatológicos

En base a la clasificación de Köppen, la comuna de Constitución posee dos tipos climáticos, la franja costera está inserta en un clima templado cálido con lluvias invernales y gran humedad atmosférica (Csbn's), mientras que hacia el interior de la comuna es posible encontrar clima templado cálido con lluvias invernales (Csb) (Centro de Información de Recursos Naturales [CIREN], 2015).

La comuna de Constitución, perteneciente al seco costero, posee un clima de tipo mediterráneo. Hay existencia de periodos fríos y húmedos en invierno, donde se concentra la mayor precipitación anual (850 - 900 mm). En verano hay periodos calurosos y secos, donde la baja precipitación se concentra entre los meses de diciembre y febrero (Del Pozo y Del Canto, 1999). También se caracteriza con un clima marítimo mesotermal, donde factores asociados al relieve, anticiclón del Pacífico, latitud, presencia estacional del frente polar e influencia marítima definen las condiciones climáticas (Montero *et al*, 2007 en Fuentes, 2009).

No obstante, Montero *et al*, al año 2007 indican que la pluviosidad del área es de 760,6 mm anuales, donde la estación más lluviosa es invierno con un 83,3% de la precipitación total (Fuentes, 2009).

En un estudio realizado por Ramírez (2014) se analizó la distribución espacial de las precipitaciones en la región del Maule y concluyó una clara tendencia a la disminución en las cantidades anuales, siendo además menor a través de los años. El autor asocia esta tendencia como una consecuencia del proceso de Cambio Climático en la región, donde además señala que a futuro las tendencias muestran una prolongación de la sequía. Tal como indica la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), el déficit de precipitaciones acumulado entre Coquimbo y el Maule es mayor al 60% (Montes, 2022).

Así, a nivel regional (que por consecuencia afecta al área de estudio), la falta y disminución de precipitaciones tiene directa relación con la baja cantidad de sistemas frontales que atraviesen la zona central del país, consecuencia directa de una anormal presencia de altas presiones en sectores subtropicales del Pacífico Sur Oriental (frente a las costas del país) y bajas presiones sobre la periferia

Antártica. La combinación de estas altas y bajas presiones están ocasionando la megasequía en la zona central del país (Garreaud, 2019).

Sin embargo, contrario a lo anterior, también se han registrado eventos de precipitación concentrada en la región y en el área de estudio, donde caen grandes cantidades de agua en un corto periodo de tiempo y los que están siendo cada vez más recurrentes. Entre los pasados 21 y 24 de junio de 2023, y debido a un conjunto de factores climatológicos, se dio lugar a lluvias intensas en la zona centro y sur del país (sobre todo en sectores precordilleranos y cordilleranos), lo que se reflejó en un aumento excesivo de los caudales de los ríos. Una de las regiones más afectadas fue la del Maule, en donde la estación fluviométrica Río Claro en San Carlos (550 m de altitud) registró valores de lluvia acumulada cercanos a los 540 mm en 72 horas (Urbina, 2023).

El último y más intenso evento registrado ocurrió de la mano del sistema frontal acontecido entre el 18 y 23 de agosto de 2023. Un sistema frontal con características cálidas en conjunto con un río atmosférico de categoría 3-4 en la zona centro sur de Chile (con una isoterma 0 más alta de lo normal) generó intensas lluvias en cordillera y precordillera, aumentando los caudales de los ríos e inundando localidades cercanas (Henríquez, 2023). La estación fluviométrica Río Claro en San Carlos (550 m de altitud) acumuló 785.1 mm en los cinco días, bajando con gran caudal por los cursos de agua. Más cercanas al área de estudio, las estaciones fluviométricas Río Maule en Forel (30 m de altitud) y Constitución (10 m de altitud), registraron 230.2 mm y 206.3 mm respectivamente (Explorador.cr2, 2023).

1.3.3 Antecedentes geológicos

En cuanto a la geología, el sector costero-litoral de Constitución se compone mayoritariamente por rocas graníticas, así también, depósitos cuaternarios fluviales relacionados con el río Maule y depósitos cuaternarios marinos relacionados a las playas (Godoy, 1970, en Venegas, 2014).

Según el Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2003), Constitución está compuesto por (Fig. 2):

- Hacia el norte de la desembocadura del río Maule: Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa, también fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados en menor proporción. Por otro lado, se encuentran depósitos eólicos compuestos por arenas finas a medias (dunas de Quivolgo). Ambos depósitos datan del Pleistoceno - Holoceno.
- Hacia el sur de la desembocadura del río Maule: Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas. Datán del Jurásico Inferior (202-178 Ma).

Figura 2. Extracción carta geológica de Chile, zona de Constitución.



Fuente: SERNAGEOMIN, 2003.

Araya - Vergara (1981) señala que las abundantes arenas oscuras y piedra pómez, especialmente características de las cuencas del Maule y el Itata, tienen origen volcánico, donde la “tefra” es aportada por sucesivos procesos eruptivos.

En Isla Orrego, banco medio del delta en ría del Maule, un muestreo demostró que las andesitas y los basaltos presentan predominio de gravas, no así con las graníticas, de las que se poseen ripios finos. Esto induce a pensar que las andesitas y los basaltos provienen de la Cordillera de los Andes, demostrando así la influencia volcánica de un paleoclima (Araya - Vergara, 1981).

Tsunamis en Constitución

El año 1835 ocurrió un terremoto bautizado como “La Ruina”, donde se registraron seis ondas de tsunami en Constitución que alcanzaron alturas de hasta 24 metros (Aránguiz y Catalán, 2022)

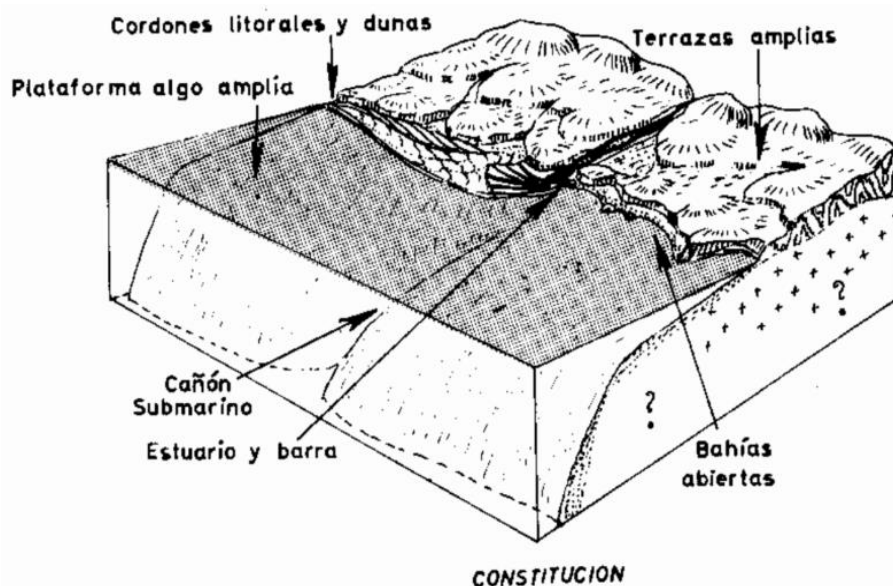
Casi un siglo después, hay registros del terremoto de Talca, con una magnitud estimada menor a 8 (Astroza *et al*, 2002 en Aránguiz y Catalán, 2022). Los principales daños fueron en las ciudades de Talca y Constitución, donde además se evidenció un alzamiento cosísmico en la zona de Putú. Las ondas de tsunami fueron de efecto local y alcanzaron aproximadamente 1.5 metros sobre la línea de alta marea en Constitución (Soloviev y Go, 1975 en Aránguiz y Catalán, 2022).

El evento del que se tiene mayor registro de datos es el del 27 de febrero de 2010. Tuvo una magnitud reportada de Mw 8.8 y un epicentro localizado al oeste de Cobquecura. La zona de ruptura se extendió desde Pichilemu (~34°S) hasta la península de Arauco (~38°S). Las regiones del Maule y Bío Bío fueron las que sufrieron los mayores efectos del tsunami, registrando una cota de inundación extrema de hasta 29 metros en Constitución (Aránguiz y Catalán, 2022).

1.3.4 Antecedentes geomorfológicos

En base a la taxonomía de costas hecha por Araya - Vergara (1976), la zona costera de Constitución (Fig. 3) constituye el individuo regional más representativo de la unidad regional Punta Curaumilla (33° Latitud Sur) - Dichato (36,5° Latitud Sur). En esta unidad se alternan costas arenosas con extensas playas y campos de dunas, y sectores de acantilados en la roca dura. Así también, señala que la costa arenosa de Quivolgo es representativa para lo que ocurre al norte de desembocaduras de grandes ríos dentro de la unidad nombrada, donde cordones litorales son cubiertos por dunas.

Figura 3. Zona costera de Constitución, unidad Punta Curaumilla.



Fuente: Araya - Vergara, 1976

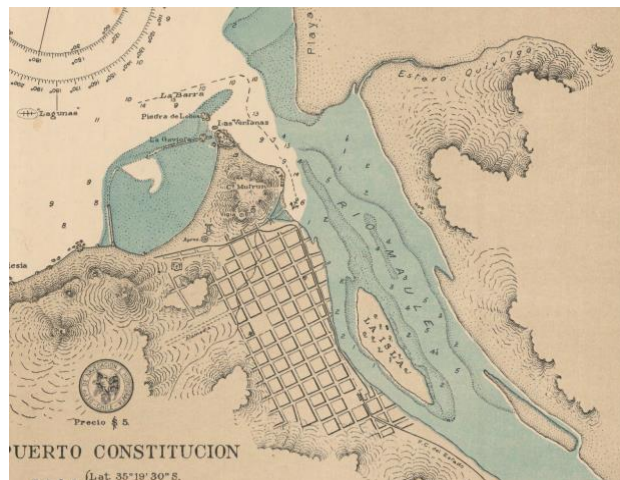
Sobre el papel abrasivo de las olas, Araya - Vergara (1971) destaca los arcos rocosos y pirámides presentes en Constitución (Piedra de la Iglesia, Piedra de las Ventanas, Arco de los Enamorados, Piedra del Elefante, entre otros). El autor señala que su génesis está en plataformas de abrasión en un nivel del mar mucho más alto que el actual.

El trabajo realizado por Venegas (2014) consta de una reconstrucción de la morfología de la desembocadura del río Maule, donde se obtienen planos históricos del área desde el año 1876. Para complementar el análisis realizado, se interpretan cartas náuticas del año 1933, 1945 y 1957 obtenidas desde el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA).

La Fig. 4 deja ver una flecha litoral (Punta de Quivolgo) presente en la ribera norte del río, la que posee poco crecimiento. También es posible visualizar una pequeña flecha en la ribera oeste del estero de Guenon (anteriormente estero Quivolgo). A su vez, se encuentra un pequeño banco lateral (El Edén) con autonomía respecto de la ribera norte del río Maule. También destaca la presencia del banco medio la isla (Isla Orrego).

Respecto a la ribera sur de la desembocadura del río, se visualiza la construcción de dos molones en el sector Las Ventanas, colindante al Cerro Mutrún.

Figura 4. Carta náutica del Puerto de Constitución y desembocadura del río Maule, año 1933.

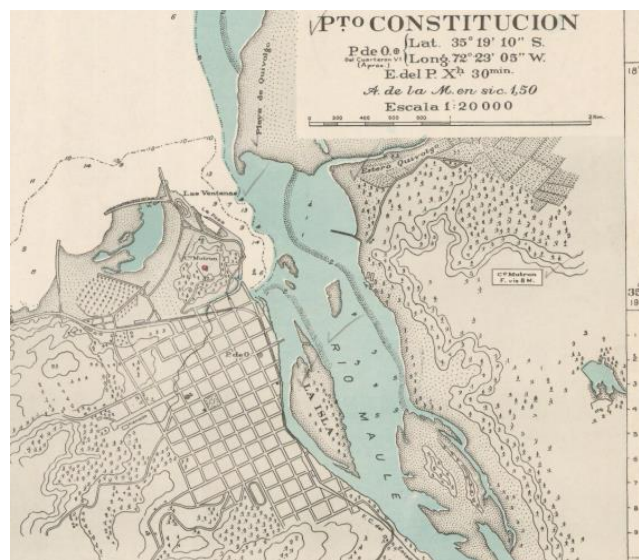


Fuente: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), 1933.

Para el año 1945 (Fig. 5) se dan cuenta de grandes cambios morfológicos en el estuario. A diferencia del año 1933, la flecha litoral Punta de Quivolgo posee menor tamaño y una pequeña punta recurvada en su sector oeste, que posteriormente Araya - Vergara (1981) señala en su descripción morfológica. Sobre el banco lateral El Edén se visualiza una importante ganancia de materia, manteniendo gran independencia respecto de la ribera norte del río, sin embargo, en su parte proximal se nota una pequeña unión a la misma. En cuanto al banco medio Isla Orrego, se muestra una ganancia de materia en su parte distal y hacia la ribera sur del río. También es posible reconocer, como señala Venegas (2014) tres bancos medios con forma irregular. Donde uno de ellos, frente a la desembocadura del estero La Poza (antiguamente estero El Carbón), tiene composición de ripio.

En cuanto al sector sur de la desembocadura del río, se muestran gran progradación de su línea litoral, además de presencia de una laguna litoral.

Figura 5. Carta náutica del Puerto de Constitución y desembocadura del río Maule, año 1945.



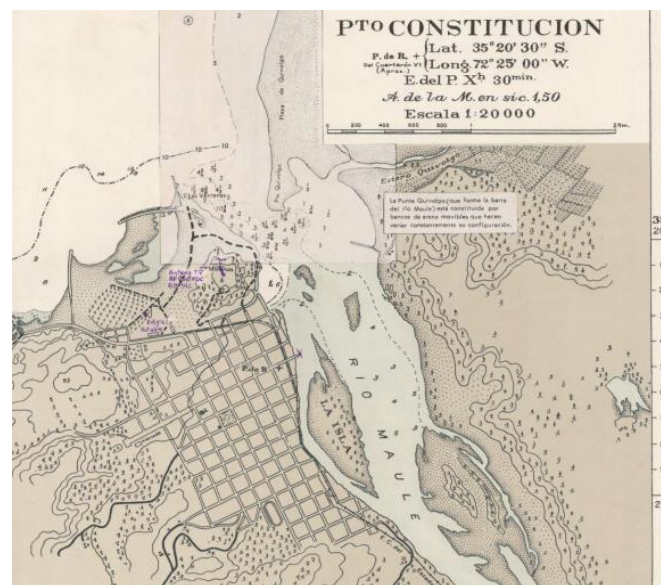
Fuente: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), 1945.

El principal cambio en el año 1957 (Fig. 6) es en la flecha litoral Punta de Quivolgo, la que, en comparación con los años anteriores, tiene mayor crecimiento hacia la ribera sur del río. Además, en la parte del estero de Guenon (estero Quivolgo en la imagen) se visualiza una entrante en dirección al mar.

Sobre el banco lateral El Edén y el banco medio Isla Orrego, ambos dan cuenta de estabilidad en su forma, sin mayores cambios morfológicos. También se mantienen los tres bancos de forma irregular presentes en el año 1945.

Respecto al sector sur de la desembocadura del río, de igual forma se mantuvo la progradación de la línea litoral y se visualizan dos lagunas litorales.

Figura 6. Carta náutica del Puerto de Constitución y desembocadura del río Maule, año 1957.



Fuente: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), 1957.

Según los resultados presentados por Venegas (2014), la desembocadura del río Maule corresponde a una desembocadura en transición (basado en el esquema evolutivo de Dalrymple, 1992), sin embargo, insinúa que está inclinándose a un estuario.

1.3.5 Antecedentes oceanográficos

Araya - Vergara (1981 - 1982) nombra el poco conocimiento que existe sobre las características del oleaje en Chile Central. Sin embargo, se deduce que la costa de Chile Central es principalmente atacada por mar de leva ("swell"), con dirección suroeste (SW) del viento predominante, donde las olas atacan con más frecuencia una estrecha banda litoral. En ese sentido, la costa oeste en ambiente de swell experimenta oleaje de energía alta a media, donde la altura de las olas significativas varía entre 0.76 y 2.2 metros durante más del 40% de la observación.

Aproximaciones hechas por Araya - Vergara (1981) indican que la penetración media de la marea a partir del nivel de bajamar, para el caso del estuario del Maule, alcanza los 3,720 kms. También nombra trabajos realizados por la Dirección de Obras Portuarias, donde se demuestra que la marea penetra hasta una distancia de 16 kilómetros.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Analizar las variaciones morfológicas y los factores de cambio en la zona media y distal del estuario del río Maule, entre los años 2009 y 2023.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar el estado geomorfológico actual del estuario del río Maule y su zonificación.
2. Identificar los cambios morfológicos en la zona media y distal del estuario del Maule, incluyendo el litoral cercano, entre los años 2009 al 2023.
3. Determinar la influencia de los factores de cambio en las variaciones morfológicas de la zona media y distal del Maule.

CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL

2.1 SISTEMA DE DESEMBOCADURA

2.1.1 Estuario

Una de las principales definiciones del concepto es dada por Pritchard (1967 en Bird, 2008), quien basándose en la salinidad señala que *“un estuario es una masa de agua semicerrada que tiene una conexión libre con el mar abierto y dentro del cual el agua de mar se diluye de forma mensurable con agua dulce derivada del drenaje terrestre”* (p. 299). Para Bird (2008), esta definición no abarca mareas ni morfología, proponiendo así que un estuario es el área que da al mar de un sistema de valles sumergidos, que está sujeto a fluctuaciones de mareas y a la mezcla de agua dulce de río y salada de mar, además de recibir sedimentos desde su cuenca y por fuentes marinas. Añade que los canales formados por el flujo del río se ensanchan aguas abajo, y que la morfología de un estuario se debe a un ajuste entre la capacidad de sus canales y el volumen de agua que entra y sale.

Para Caspers (1967 en Araya - Vergara, 1970), la condición de marea es el principal factor que debe tener un estuario, por lo que cualquier desembocadura que no sea afectada por mareas debe ser excluida del concepto.

Desde un punto de vista geológico, Dalrymple *et al.* (1992) definen estuario como *“la porción hacia el mar de un sistema de valle sumergido que recibe sedimentos de fuentes tanto fluviales como marinas y que contiene facies influenciadas por mareas, olas y procesos fluviales”* (p. 3). Sobre la extensión del estuario, consideran que es desde las facies de marea en su cabecera hasta el límite hacia el mar de las facies costeras en su desembocadura. Por último, está implícito el hecho de que los estuarios solo pueden formarse por la presencia de una transgresión.

Por su parte, Perillo (1995 en Piccolo y Perillo, 1997) indica que *“un estuario es un cuerpo de agua costero semicerrado que se extiende hasta el límite efectivo de la influencia de la marea, dentro del cual el agua salada que ingresa por una o más conexiones libres con el mar abierto, o cualquier otro cuerpo de agua salino, es diluida significativamente con agua dulce derivada del drenaje terrestre y puede sustentar especies biológicas eurihalinas ya sea por una parte o la totalidad de su ciclo de vida”*. En ese sentido, el autor incluye aspectos geomorfológicos, físicos, químicos y biológicos, enriqueciendo la definición del concepto estuario.

2.1.2 Tipos de desembocaduras

Araya - Vergara (1982) reconoce ambientes de desembocadura en función de su influencia morfoclimática.

- a. **Zona de deltas distales:** Formas pequeñas de no más de dos kilómetros de línea litoral. Se encuentran desde el extremo norte de Chile hasta el delta de Chañaral (26°20’).

- b. **Zona de rías progradadas:** Formas reconocibles desde el río Copiapó (27°20') hasta el Maipo (33°47').
- c. **Zona de deltas en ría:** Localizadas en Chile Central desde la boca del río Rapel (34°) y la del río Bío - Bío (37°). La energía fluvial es suficiente para formar canales amplios en el curso inferior y aportar sustancia deltaica, pero la energía marítima también tiene la capacidad de impedir el progreso de la progradación hacia el mar. Esta zona es de especial importancia para el presente trabajo debido a que el área de estudio se encuentra dentro de ella.
- d. **Zona de rías:** Localizadas en las rías del Imperial (38°5') y del Maullín (47°7'). Su turbidez es inferior en comparación a la de la zona anterior, es por esto que no se dispone de suficiente materia para la formación de deltas en rías.
- e. **Zona de deltas de cabecera de fiordo:** Son exclusivos para las costas de fiordo presentes en la Patagonia. Su existencia se ve favorecida por ríos proglaciales son aportes importantes y la condición de aguas tranquilas característica en el seno de los fiordos.

2.1.3 Zonificación de un estuario

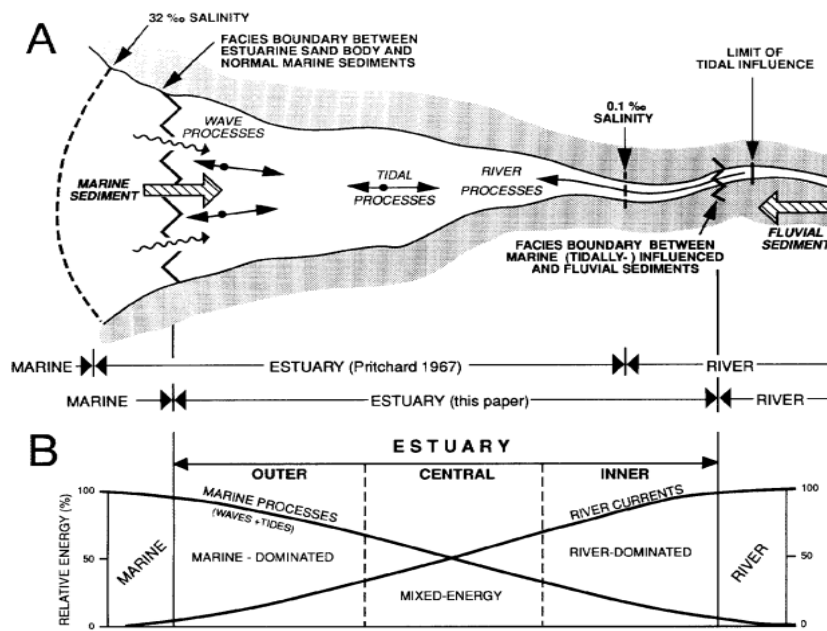
Araya - Vergara (1981) en su análisis del concepto de delta en ría, estudió la morfología de los ríos Maipo, Rapel, Mataquito, Maule e Itata presentes en Chile Central. Metodología aplicada por Arriagada (2005, 2009) para los ríos Maipo, Copiapó y Choapa. Así, basándose en la similitud de las formas que presentan realiza una zonificación. Para el autor, la extensión de los deltas en ría es desde que comienzan los meandros estuariales (la entrada de materia y energía fluvial funcionan como input) y finaliza en la flecha marina que delimita la laguna estuarial (siendo la salida de materia y energía fluvial el out put). Sin embargo, este último no solo es la salida, sino que la entrada de energía marina. En base a esto, el autor reconoce tres zonas:

- a. **Zona proximal o fluvial:** Su principal característica es la presencia de meandros estuariales.
- b. **Zona media o deltaica interior:** Con presencia de bancos medios y distributarios.
- c. **Zona distal o lagunar:** Contiene laguna estuarial y flecha marina. Según sea el caso, será posible encontrar un delta distal atrofiado, bloqueado o aún transmutado (el Maule es un ejemplo de este último).

Los dos tipos de estuarios que Dalrymple *et al.* (1992) reconocen (dominados por olas y dominados por mareas) son divididos en tres zonas (Fig. 7a y 7b):

- a. **Zona exterior:** Dominada por procesos marinos (corrientes de marea y/o olas). El sedimento grueso se mueve hacia la zona de cabecera por acción de los procesos marinos.
- b. **Zona central:** De baja energía, la energía marina (generalmente corrientes de marea) están equilibradas a largo plazo por las corrientes fluviales.
- c. **Zona interior:** Dominada por los ríos. El transporte a largo plazo de la carga del lecho es hacia el mar.

Figura 7. A. Procesos físicos que ocurren en un estuario y su distribución. B. Zonificación tripartita de facies en un estuario.



Fuente: Dalrymple *et al.* (1992).

2.1.4 Elementos morfológicos presentes en un estuario

En la Fig. 8 se destaca el trabajo realizado por Araya - Vergara (1981), quien describe los elementos morfológicos presentes en el estuario del río Maule:

- **Meandros estuariales:** Presenta meandros unificados, aunque sin los cuernos típicos. Sin embargo, poseen una punta en la curvatura que separa una parte cóncava y otra convexa en la orilla de resbalamiento.
- **Delta en ría:** Los bancos de desarrollo deltaíco están bien constituidos y con disposición simple y clara. Su forma es alargada y más o menos romboidal como consecuencia de la acreción. Estos bancos alcanzan alturas de hasta 6 metros y con gran estabilidad, donde incluso se aprecia el desarrollo de suelo y vegetación de bosque artificial o matorral natural.

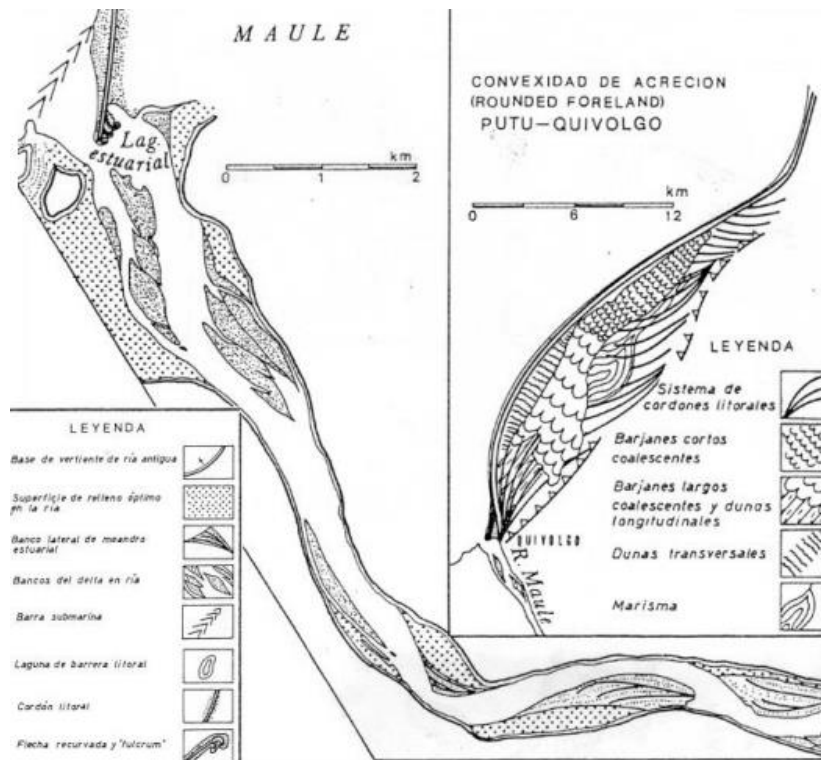
A su vez, la isla de Constitución (actualmente isla Orrego) tuvo una velocidad de crecimiento en su parte distal de aproximadamente 25 m/año entre 1935 y 1955. También se evidenció una pérdida de materia a velocidad similar en el sector proximal del entonces conocido banco (lateral) del Edén. El autor infiere, a través de la comparación de cartas topográficas y fotografías aéreas, que hubo transferencia de materia entre bancos desde la parte distal a la proximal.

También indica que los bancos arenosos con orillas convexas tienen una tendencia deposicional, mientras que los de orillas cóncavas y rectilíneas están afectados por la erosión.

- **Laguna estuarial distal:** De forma casi redonda, con riberas comúnmente cóncavas como consecuencia de la interacción combinada de la marea y la corriente fluvial.

- **Flecha litoral:** La flecha se encuentra en la ribera norte del río, la concavidad hacia el mar que la caracteriza es paralela a las crestas del mar de leva del S.W, por lo que su alineamiento es consecuencia en su mayoría por el vaivén. El extremo de la flecha tiene recurvamiento en su punta debido a la alta energía del oleaje. En momentos de alta energía fluvial, la parte proximal de la flecha tiende a ser cortada.
- **Barra submarina:** Existe una proyección en barra submarina entre la laguna y el mar, donde su proyección por deriva desde el sur ha sido alterada como consecuencia de la construcción de un espigón.
- **Convexidad de acreción:** Refiere a un sistema de cordones litorales que convergen hacia la boca del Maule, dejando en evidencia que los sedimentos los abastece el río y siendo alineados por la deriva litoral en la parte proximal convexa, además de curvados por vaivén hacia la parte media y recurvados cóncavos hacia la parte distal. Araya - Vergara (1977 en Araya - Vergara, 1981) señala que estos cordones se depositaron por acreción debido a que el nivel del mar bajó desde aproximadamente 10 m hasta su nivel actual.

Figura 8. Morfología del estuario del Maule y campo dunar de Putú-Quivolgo.



Fuente: Araya - Vergara (1981), en Venegas (2014).

2.1.5 Clasificación de los estuarios

En base a la distribución de facies en el estuario, Dalrymple *et al.* (1992) reconocen dos tipos. Relaciona esta distribución con aspectos como la descarga del río, el oleaje y corrientes de marea.

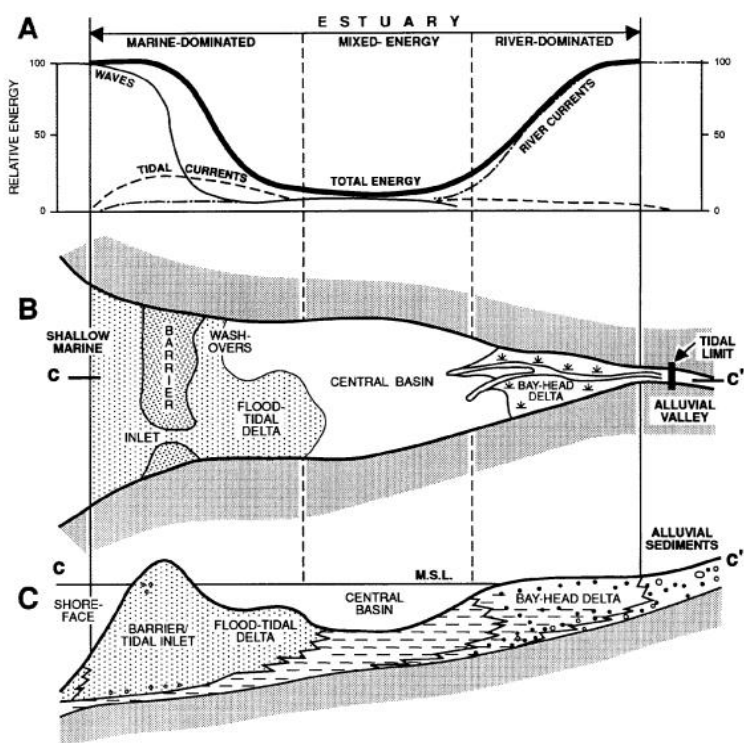
- Estuarios dominados por olas:** Son estuarios donde la boca del sistema experimenta gran energía por acción del oleaje y donde la influencia de las corrientes marinas es baja.

La energía del oleaje, en conjunto con las corrientes marinas, mueven el sedimento por la costa en la zona de la boca del estuario, desarrollando una barra subaérea o sumergida. Si el sistema posee un rango de marea bajo, las corrientes pueden tener dificultades para mantener abiertas las bocas generadas por mareas de tormenta y/o crecidas de los ríos, las que por consecuencia cerrarán y darán paso a un estuario ciego o lago costero.

En estos estuarios, gran parte de la energía de las mareas es disipada cuando ingresa al estuario debido a la fricción que este genera en su entrada. La energía fluvial, por otro lado, disminuye en dirección al mar debido a la baja en el gradiente hidráulico. La Fig. 9a representa el perfil de energía de los estuarios dominados por olas. Así, es posible encontrar dos máximos de energía, uno en la desembocadura (por energía de las olas) y otro en la cabecera (por corrientes fluviales), los que están separados por un marcado mínimo de energía presente en la zona central del estuario. En consecuencia, es posible identificar una distribución tripartita de las litofacies (grueso - fino - gruesa).

Sobre su morfología (Fig. 9b) es posible identificar barreras, barras, flechas, abanicos de lavado (washover fans) y deltas de flujo mareal (flood-tidal delta). También se distingue un delta de fondo o cabeza de bahía (bay-head delta), el que se forma por depósitos de arena y/o grava en la cabecera del estuario.

Figura 9. Estuarios dominados por olas. A. Perfil y distribución de la energía. B. Individuos morfológicos presentes en un estuario dominado por olas. C. Perfil de facies sedimentarias en un estuario dominado por olas.



Fuente: Dalrymple *et al.* (1992).

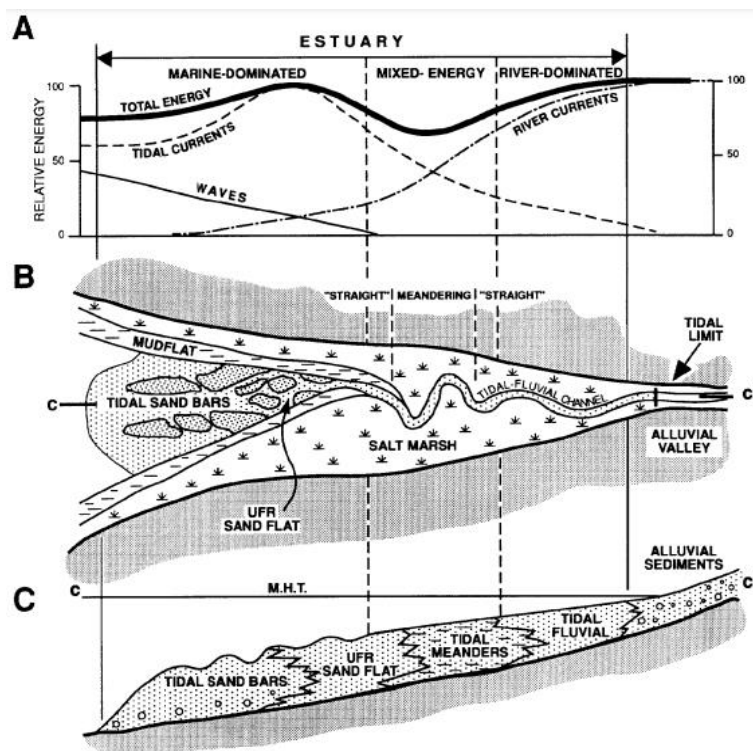
- b. **Estuarios dominados por mareas:** Si bien gran parte de los ejemplos conocidos son de dominio macromareal, también existe la posibilidad de encontrarlos en presencia de rangos de marea bajos (si la acción del oleaje fuese limitada o el prisma mareal es grande). La energía de las corrientes de marea es superior al oleaje, además, es típico identificar una barra de arena alargada (la que a su vez disipa la energía del oleaje).

Debido a la geometría en forma de embudo característica de estos estuarios, la entrada del flujo mareal se comprime y la velocidad se incrementa una vez dentro del estuario; la que posteriormente disminuye con la distancia hasta alcanzar 0 en el límite de marea de la cabecera. Al igual que en los estuarios dominados por olas, la energía fluvial disminuye en dirección al mar.

La Fig. 10a ilustra el perfil de energía de los estuarios dominados por mareas, en donde se reconocen dos máximos de energía. En la zona de cabecera del estuario se encuentra en máximo de energía fluvial, mientras que el máximo de energía mareal se encuentra desplazado aguas arriba respecto al extremo de la boca, por consecuencia, el punto de balance (y menor) energía se encuentra desplazado hacia el interior del estuario.

A diferencia de los estuarios dominados por olas, la distribución tripartita de facies no es tan marcada. En el área de mínimo de energía se encuentran más arenas más finas, además, el sedimento fangoso se acumula principalmente en llanuras mareas o marismas a lo largo de los lados del estuario.

Figura 10. Estuarios dominados por mareas. A. Perfil y distribución de la energía. B. Individuos morfológicos presentes en un estuario dominado por mareas. C. Perfil de facies sedimentarias en un estuario dominado por mareas.



Fuente: Dalrymple *et al.* (1992).

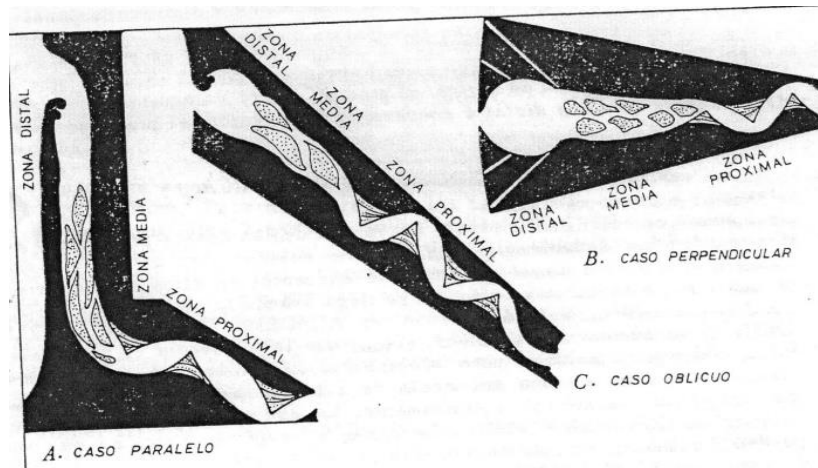
Dalrymple *et al.* (1992) indica que no existen los estuarios dominados por ríos, sin embargo, para Cooper (1993, en Zúñiga, 2021) estos estuarios sí existen. Esto lo concluyó estudiando el estuario Mgeni en Sudáfrica.

- a. **Estuarios dominados por ríos:** Asociados a alto suministro de sedimentos fluvial, además que condiciones desfavorables para la progradación en la costa por acción de la energía del oleaje. Para el estuario Mgeni no se identifica división tripartita de facies, tampoco se identifican bancos de arena alargados como se presentan en los estuarios dominados por mareas. La energía fluvial alcanza la boca del estuario debido a las inundaciones periódicas y la deposición por acción de mareas de inundación es esporádica, en tanto, se identifica una división bipartita de facies. A diferencia de los estuarios dominados por olas, los estuarios dominados por ríos no presentan cambios por condiciones estables del nivel del mar, además de mantener un equilibrio morfológico. Los procesos sedimentarios siguen un camino cíclico producto de impactos inmediatos por inundaciones y el acomodamiento a largo plazo.

En base a lo propuesto por Araya - Vergara (1985 en Venegas, 2014), un delta cautivo dentro de una ría debe sus características morfológicas a la orientación de la misma y su respuesta frente a la alta energía del oleaje. Así, según la respuesta ante la acción del swell se distinguen tres tipos de deltas en ría.

- a. **Delta estuarial paralelo:** Está caracterizado por poseer un lecho de río recto desviado por una barrera o flecha, a un curso paralelo a la costa, sin seguir la dirección del río. La Fig. 11a ilustra una flecha que indica transporte de sedimentos a través de la costa, dejando en evidencia la influencia del suministro de arena desde el sur por responsabilidad de la deriva litoral (en Chile tiene sentido Sur a Norte).
- b. **Delta estuarial transversal:** Referido a rías que están en ángulo recto respecto de la línea de costa, con un importante flujo fluvial (Fig. 11b). Tiene bancos estuariales más cortos en comparación a los estuarios paralelos, los que están acompañados por formas cuspidadas que indican interacciones de la energía del oleaje y las mareas en el régimen estuarial.
- c. **Delta estuarial oblicuo:** Constituye a las rías con disposición oblicua a la línea de costa (Fig. 11c). A diferencia del estuario transversal, desarrolla brazos más largos debido a que la energía del oleaje en el ambiente estuarino es más débil. La flecha recurvada en la boca corresponde al impedimento de la correcta descarga del río por acción de la deriva.

Figura 11. Clasificación según la respuesta al swell. A- Delta estuarial paralelo. B- Delta estuarial transversal (perpendicular). C- Delta estuarial oblicuo.



Fuente: Araya - Vergara (1981).

2.1.6 Tendencia evolutiva de sistemas estuariales

Dalrymple *et al.* (1992) indican que, a diferencia de otros sistemas costeros, los estuarios son geológicamente efímeros. Si el suministro en relación al tamaño del valle es suficiente, los estuarios se llenan y dejan de existir cuando el aumento del mar disminuye. Para ese entonces, el estuario pasa a convertirse en un delta.

La importancia relativa de la descarga del río, las olas y corrientes de marea son representadas en la Fig 12. Los deltas están en el vértice superior del triángulo debido a que la fuente dominante del sedimento es fluvial. En cambio, en la zona inferior del triángulo se encuentran las olas y mareas, las que son relacionadas con costas progradadas no deltaicas donde se encuentran playas llanas (*strand plains*) y planicies mareales (*tidal flats*) respectivamente; en estas el sedimento es transportado hacia la costa por acción de procesos marinos.

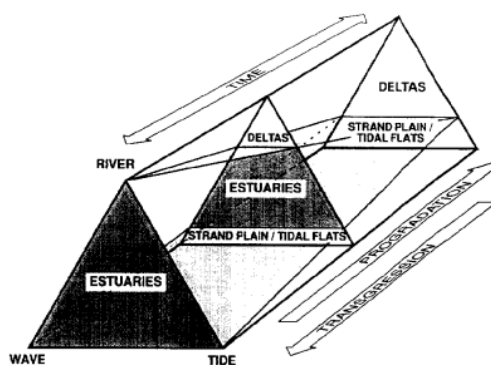
Figura 12. Sistemas costeros y sus fases de relleno.



Fuente: Dalrymple *et al.* (1992).

A la Fig. 13 se le suma el aspecto evolutivo, siendo representado al agregar una tercera dimensión (el tiempo relativo). Este puede expresarse en términos de transgresión y progradación. Por tanto, el triángulo de la figura anterior pasa a transformarse en un prisma triangular. Los cambios que ocurren en progradación (evolución de estuario a delta o progradación de planicies) son graficadas por el movimiento hacia la parte posterior del prisma, donde los estuarios desaparecen. Al contrario, los cambios asociados a transgresión (inundación de valles fluviales) están graficados en la cara frontal del prisma, donde se convierten en estuarios.

Figura 13. Tendencia evolutiva de los sistemas costeros.



Fuente: Dalrymple *et al.* (1992).

2.2 INTERACCIÓN PLAYA - OLEAJE

2.2.1 Tipos de Zonas de Rompientes (TZR)

En base a la interacción playa - oleaje, Short (1999 en Soto y Arriagada, 2007) propone el concepto de **playas dominadas por olas**. Este término hace referencia a los tipos de rompientes de una playa basándose en la topografía submarina (reflejada como barras y surcos) y las corrientes locales (Soto y Arriagada, 2007).

Frente a lo anterior, es que Wright & Short (1984 en Benavente, 2015) proponen el modelo morfodinámico tridimensional de tipos de playas dominadas por olas. Este modelo se desarrolló durante seis años en playas australianas, y tiene relación con la variación morfológica de la zona de rompiente en función de la energía incidente (Sánchez *et al*, 1994, en Benavente, 2015). De mayor a menor energía, las playas dominadas por olas se clasifican en seis:

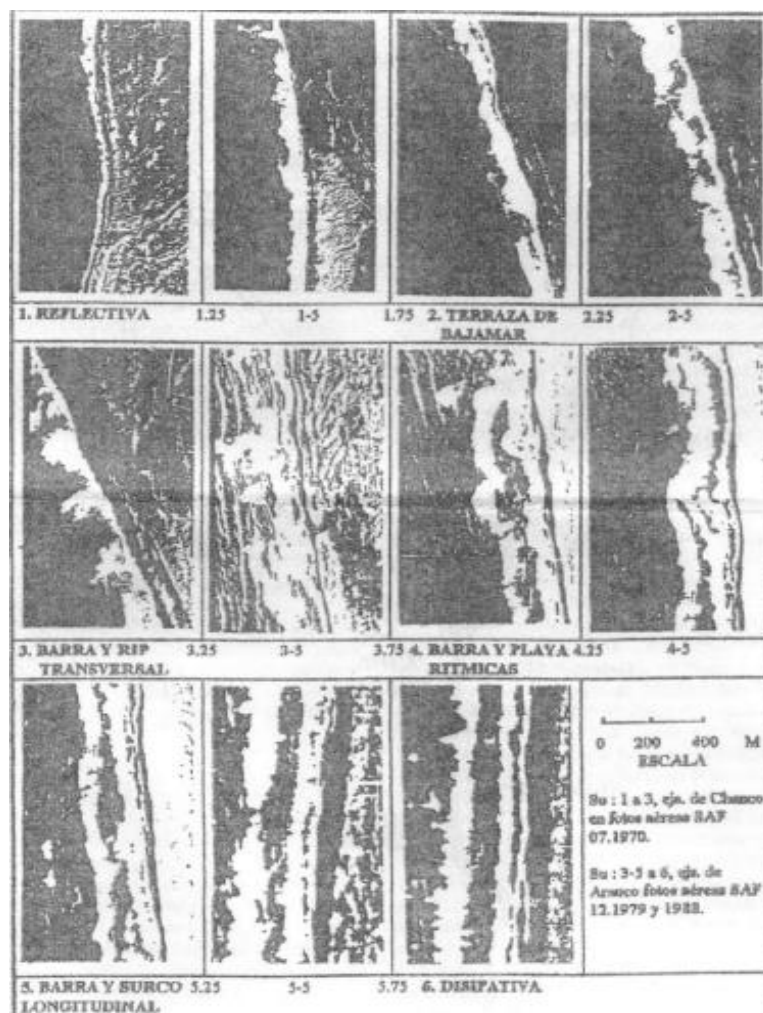
- a. **Disipativas (D):** Con una zona de surf muy ancha, poseen baja gradiente donde las olas rompen y disipan la energía (Benavente, 2015). Además de múltiples barras, lo que se identifica en la presencia de al menos tres líneas rompientes. Tiene condiciones de alta energía y su exposición al swell es directa (Lagos, 2013).
- b. **Intermedias:** Son las más frecuentes. Representan morfológicamente inestabilidad con constantes cambios en sus barras y *rip currents* (Lagos, 2013). Se clasifican en cuatro:

- Barra y surco longitudinal (LBT)
- Playa y barra rítmica (LBB)
- Barra y rip transversal (TBR)
- Terraza de bajamar (LTT)

c. **Reflectivas (R):** Poseen una playa y zona de saca y resaca (swash) estrecha, sin barras y escarpadas. Están asociadas a sectores con protección frente al oleaje directo (Benavente, 2015). Representan condiciones de baja energía, desarrollando *beach cups* de manera común (Lagos, 2013).

Para su utilización en fotografías aéreas, Araya - Vergara (1996) adaptó la clasificación de Wright & Short (1984, en Araya - Vergara, 1996) debido a que su aplicación en las costas de Chanco y Arauco superó las seis categorías originales. En base a las seis categorías base y su interpolación, la adaptación de Araya - Vergara (1996) consta de once categorías (Fig. 14).

Figura 14. Tipos de playas dominadas por olas (Wright & Short, 1984) adaptadas por Araya - Vergara (1996).



Fuente: Araya - Vergara (1996).

2.3 FACTORES DE CAMBIO

Dentro de las consecuencias del Cambio Climático es posible dar cuenta de problemas relacionados con el agua, específicamente asociados con fenómenos meteorológicos extremos como inundaciones y sequías (Organización de las Naciones Unidas, s.f.).

2.3.1 Precipitaciones

Desde el año 2010, entre las regiones de Coquimbo y Araucanía se ha registrado un déficit de precipitaciones cercano al 30%. La falta de lluvias se ha producido de forma ininterrumpida, ocurriendo además en la década más cálida de los últimos 100 años (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015).

La Dirección General de Aguas (2019) en su informe sobre información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y agua subterránea, realiza una comparación de datos pluviométricos hasta el 30 de junio de 2019. Así, debido a la cercanía con el área de estudio, se tomarán los datos entregados para la estación Talca.

Tabla 1. Informe pluviométrico, estación Talca.

Estación	Julio (mm)	2019 (mm)	2018 (mm)	Promedio 1981 - 2010 (mm)	Exceso o déficit (%)
Talca	92	213	187.9	331.9	-36

Fuente: Elaboración propia en base a Informe Pluviométrico Nacional, 2019.

2.3.2 Caudales

En consecuencia, del déficit de precipitaciones recién mencionado es que la cantidad de agua que fluye a través de los ríos ha visto su disminución, afectando evidentemente a lagos, embalses, nieves y aguas subterráneas (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015).

Así también, se ha evidenciado la elevación de la altura en la línea de nieve durante primavera y verano en la cordillera de la zona central de Chile, por tanto, se presenta reducción del área nival y con esto disminuyen los caudales máximos provenientes del deshielo (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 PRODECIMIENTOS

El objetivo general de la presente memoria consiste en un análisis de las variaciones morfológicas en el estuario del río Maule, teniendo como temporalidad el periodo de años 2009 - 2023, como una continuación al trabajo realizado por Venegas (2014). Además, se incluye el análisis de factores que podrían influir o no en la morfología del estuario.

Objetivo 1.

La realización del objetivo se logró siguiendo los trabajos de Araya - Vergara (1981) y Venegas (2014), los que son aplicados al área de estudio. También se utilizaron trabajos aplicados en otras áreas como los realizados por Arriagada (2005) para el estuario del Maipo, Arriagada (2009) para los ríos Copiapó y Choapa, y Zúñiga (2021) para los estuarios Mantagua y río Aconcagua. Así, para completar el objetivo se realizaron los siguientes procedimientos:

a. Descripción geomorfológica del estuario del río Maule

Para realizar la descripción geomorfológica del estuario se utilizó el mapa base de ESRI Satellite que se encuentra disponible en el software Qgis Desktop 3.28.8 (con temporalidad de enero de 2023), esto debido a la alta calidad del material, que permite identificar de mejor manera los componentes del estuario.

De este modo, al análisis geomorfológico hecho por Araya - Vergara (1981) para el estuario del río Maule se utilizó como principal herramienta para determinar cuáles eran los individuos geomorfológicos que debían ser identificados. Así también, se revisó el trabajo de Arriagada (2005) para el estuario del río Maipo y Venegas (2014) para el estuario del río Maule.

Varias de las formas identificadas por los autores recién mencionados difieren en nombre, por tanto, se realizó una correlación entre los trabajos revisados y se determinó el nombramiento de los individuos geomorfológicos.

Por tanto, en la descripción geomorfológica del estuario del río Maule se identificaron los siguientes elementos:

- Flecha litoral sur (en algunos casos)
- Flecha litoral norte (permanece la mayor parte del tiempo)
- Cordón de playa
- Terraza fluvio-marina
- Banco medio estuarial
- Banco lateral estuarial
- Banco lateral de meandro
- Vegetado reciente menor a 20 años (en algunos bancos laterales de meandro).

Se hace la distinción entre banco lateral estuarial y banco lateral de meandro netamente por la acción que les da forma. En el caso del banco lateral estuarial, estos son modelados por acción fluvial y por acción marina, donde además se encuentran en la boca del estuario (forma de embudo). En cuanto a los bancos laterales de meandro, estos son modelados únicamente por acción fluvial, además de estar emplazados en el canal meándrico.

En cuanto a la identificación de la terraza fluvio-marina, se utilizó el software Google Earth Pro, donde se realizaron perfiles de elevación para identificar la terraza joven, el escarpe, y la terraza más antigua.

b. Zonificación del estuario del río Maule

Posterior a la identificación geomorfológica del estuario, se realizó la zonificación del mismo. Como base teórica se utilizó el trabajo de Araya - Vergara (1981), mientras que como base teórica se utilizaron los trabajos de Arriagada (2005) y Venegas (2014), quienes también zonificaron cada uno de sus respectivos estuarios trabajados.

Por lo tanto, el estuario fue dividido en zonas distal (con laguna estuarial y flecha), zona media (con bancos medios) y zona proximal (con meandros).

Los resultados obtenidos tanto como de la descripción geomorfológica como de la zonificación del estuario del río Maule fueron digitalizados en el software Qgis Desktop 3.28.8, para dar paso a la creación de una cartografía geomorfológica.

Objetivo 2

Dado que parte importante de la problemática del presente trabajo es el avance excepcional de la flecha litoral sur del estuario que casi generó el confinamiento del mismo, es que el análisis está centrado en las zonas media y distal, las que presentan mayor dinamismo respecto de la zona proximal.

Para el primer análisis se hizo uso de 11 imágenes satelitales obtenidas desde Google Earth Pro, las que detallan fechas y estacionalidad en la tabla 2, debido a la buena resolución que el software ofrece. Sin embargo, hubo algunos años en donde no se pudieron obtener imágenes lo suficientemente claras para su procesamiento, como lo fueron los años 2012, 2015 y 2017.

Tabla 2. Imágenes satelitales utilizadas para el análisis morfológico entre 2009 y 2022.

Fuente	Fecha	Estación
Google Earth Pro	22 julio, 2009	Invierno
Google Earth Pro	03 marzo, 2010	Verano
Google Earth Pro	20 noviembre, 2011	Primavera
Google Earth Pro	02 octubre, 2013	Primavera

Google Earth Pro	12 noviembre, 2014	Primavera
Google Earth Pro	07 octubre, 2016	Primavera
Google Earth Pro	19 abril, 2018	Verano
Google Earth Pro	12 mayo, 2019	Otoño
Google Earth Pro	28 julio, 2020	Invierno
Google Earth Pro	4 diciembre, 2021	Primavera
Google Earth Pro	27 agosto, 2022	Invierno

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar el año 2023 se utilizaron 4 imágenes satelitales, también obtenidas desde Google Earth Pro, debido a que fue un año con grandes cambios en el estuario, tanto por el crecimiento excepcional de la flecha litoral sur como por dos eventos pluviométricos extremos. Para entender mejor la elección de las imágenes, en la tabla 3 se detalla un contexto general que acompaña la fecha y la estacionalidad de cada imagen utilizada.

Tabla 3. Imágenes satelitales utilizadas para el análisis morfológico del año 2023.

Fuente	Fecha	Estación	Contexto general
Sentinel Hub EO Browser (Satélite Sentinel 2)	03 enero 2023	Verano	Estado de la flecha litoral sur: pequeño avance.
Google Earth Pro	17 marzo 2023	Verano	Estado de la flecha litoral sur: avance excepcional, inminente cierre.
Sentinel Hub EO Browser (Satélite Sentinel 2)	31 agosto 2023	Invierno	Post temporal ocurrido 18 - 23 agosto.
Sentinel Hub EO Browser (Satélite Sentinel 2)	10 de octubre 2023	Primavera	Comparación a la imagen post temporal.

Fuente: Elaboración propia.

Las imágenes descargadas fueron procesadas en el software QGIS Desktop, donde se georreferenciaron para la futura creación de mapas. En cada una de las imágenes se identificó y registraron cambios para los individuos morfológicos de bancos medios, bancos laterales, flecha litoral norte, flecha litoral sur (en algunos casos) y cordón de playa. De esta manera, se registraron los principales cambios que tuvieron cada una de estas formas.

Finalmente, en cada caso se caracterizó el litoral cercano correspondiente a la ribera norte del río Maule. Se realizó un análisis fotográfico de las mismas imágenes satélites. Una vez se identificaron las principales características ligadas a zona de rompiente y su morfología, se utilizó la clasificación de tipos de zona de rompiente (TZR) propuesta por Araya - Vergara (1996, adaptada de Wright & Short, 1984), donde en algunos casos se identificaron dos TZR juntas. También se identificó, en algunos casos, la presencia de lagunas litorales.

Además, el día 26 de octubre de 2023 se realizó una visita a terreno en la ciudad de Constitución, en donde se recorrió el puente Raúl Silva Henríquez, encargado de unir ambas riberas del río Maule (construido a aproximadamente 3 km de la desembocadura). Además, también se llegó a la cumbre del cerro Mutrún, desde donde se tiene una vista privilegiada de Constitución y del río Maule.

En ambas paradas se hicieron registros fotográficos, los que posteriormente fueron comparados con el análisis de imagen satelital más reciente, que corresponde al día 10 de octubre de 2023, por tanto, la diferencia entre ambos solo es de dos semanas.

Objetivo 3

El propósito del objetivo específico es analizar 3 factores de cambio relacionados con el agua, los que son mareas, precipitaciones y caudales, para así identificar si existe alguna relación entre estos factores y los cambios morfológicos desarrollados anteriormente. Estos factores, como se desarrolló en el marco conceptual, han sufrido alteraciones por consecuencia de la megasequía que ha atravesado la zona central de Chile. Así, se trabajará con mareogramas, gráficos de precipitación y gráficos de caudales.

Para la creación de mareogramas, se trabajó con la tabla de predicciones de marea del SHOA (2023). Las predicciones de marea están compuestas por horas y alturas de pleamares y bajamares para cada día del mes, información que fue traspasada al programa Excel para ordenarlo y con esto crear el mareograma. Se utilizaron solo los meses de enero, febrero y marzo, debido a que son los meses donde se registró el excepcional crecimiento de la flecha litoral sur del río Maule, y con el propósito de identificar alguna relación entre ellos.

Para precipitaciones y caudales se recurrió al sitio web sobre Información Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en línea, perteneciente al Ministerio de Obras Públicas, donde toda persona puede buscar y descargar reportes relacionados con las estaciones de monitoreo de la Dirección General de Aguas, ubicados en distintos puntos del país.

En el caso de la pluviometría, la información descargada pertenece a la estación de monitoreo Constitución, ubicada a menos de 1 km de la desembocadura (en la ribera sur del río) y con una altura de 10 m.s.n.m. Dado que el rango de tiempo que permite descargar información solo es de 10 años, se generaron dos reportes, el primero entre el 1/1/2009 - 31/12/2013 y el segundo entre 1/1/2014 y 31/10/2023.

Debido a que especialmente el 2021 se encontraba con inexistencia de datos en algunos meses, es que se consultó el Explorador Climático perteneciente al Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, donde fue posible obtener la información faltante para algunos casos.

Estos datos, exportados en formato csv, fueron ordenados en el programa Microsoft Excel para la creación de gráficos de línea. Así, se obtuvieron cinco gráficos donde cada uno agrupa tres años para facilitar el análisis de estos.

En cuanto a los caudales medios mensuales, el proceso fue idéntico. Sin embargo, a pesar de que en los reportes obtenidos desde la DGA faltaban datos en algunos meses, estos no pudieron ser complementados por el Explorador Climático debido a que los datos disponibles solo eran hasta el año 2020.

Los reportes también fueron ordenados en el programa Microsoft Excel, donde se crearon cinco gráficos, cada uno agrupando tres años.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 ESTADO GEOMORFOLÓGICO ACTUAL

4.1.1 Descripción geomorfológica

Basado en la descripción geomorfológica de Araya - Vergara (1981) y Venegas (2014) para el estuario del río Maule, se identificaron cuatro principales geoformas.

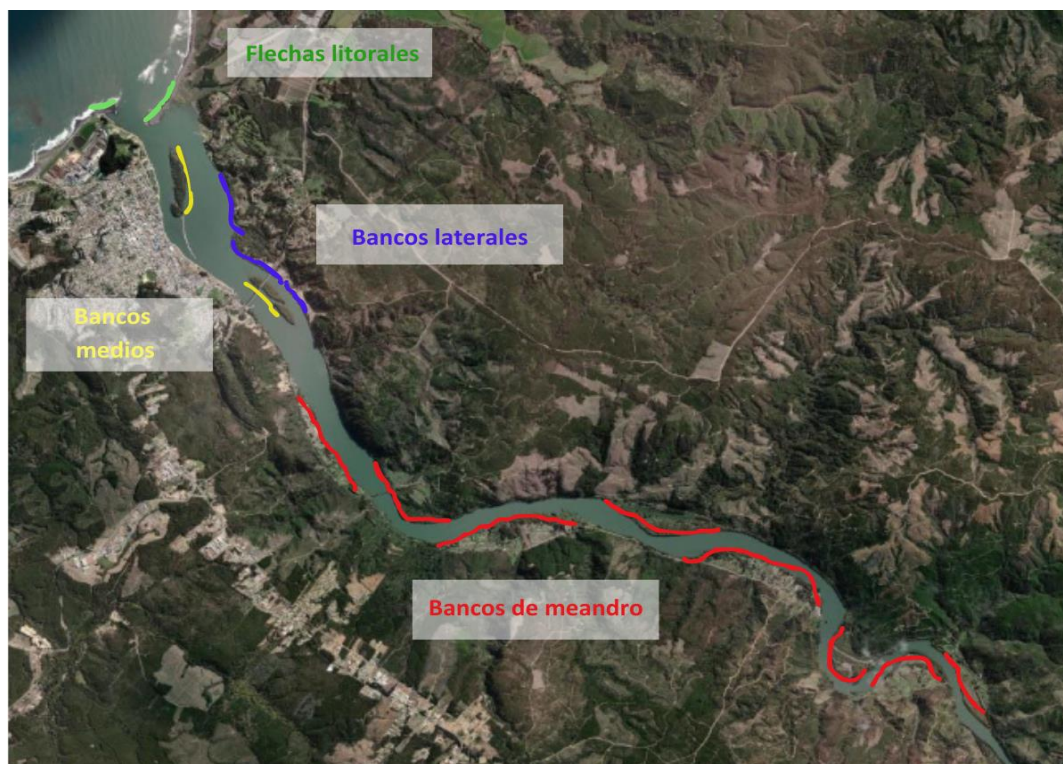
Los bancos de meandro (Fig. 15, color rojo) corresponden a bancos emplazados en el único canal meandrante que tiene el estuario. En los canales meandrantés se identifican zonas de erosión y de depositación de sedimentos, siendo esta última la responsable de la formación de bancos. Debido a la imagen satelital utilizada, también se distingue que estos bancos están vegetados, lo que da señal de que son bancos ya estabilizados. Además, en algunos bancos también es posible distinguir asentamientos humanos.

Los bancos laterales (Fig. 15, color azul) son bancos que se encuentran en la ribera norte del río Maule, de nombre bancos del Edén, están dentro de lo que ya se identifica como boca del estuario (con forma de embudo). Al igual que los bancos de meandro, en los bancos laterales se visualiza vegetación, lo que indica que son bancos estabilizados. Dado el trabajo de Venegas (2014), es posible señalar que estos bancos laterales mantienen su forma desde el año 1992, solo registrando pequeños cambios esporádicos.

Los bancos medios (Fig. 15, color amarillo) son identificados como Isla Orrego (de mayor superficie y con espigón) e Isla del Perro (más pequeño). Estos bancos, también estabilizados por vegetación, se encuentran emplazados en la boca del estuario.

Las flechas litorales (Fig. 15, color verde) son los individuos más dinámicos dentro del estuario. Aunque varía en longitud y ancho, la flecha litoral norte se encuentra siempre. La flecha litoral norte se forma contradiciendo la dirección sur - norte de la deriva litoral. En cuanto a la flecha litoral sur, la que debiera facilitar su formación por deriva litoral, no se forma fácilmente en el estuario.

Figura 15. Identificación de geformas en el estuario del Maule.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

La terraza fluvio-marina en Constitución se identifica fácilmente dado que el aterrazamiento es bastante notorio (Fig. 16). Esta terraza se encuentra emplazada en la ribera sur del río, albergando a gran parte de la población de la comuna. Contrario a esto, en la ribera norte no fue posible identificar una terraza fluvio-marina.

Figura 16. Perfil de elevación para delimitación de terraza fluvio-marina, comuna de Constitución.



Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Zonificación del estuario

El proceso de zonificación del estuario se realizó en base a consideraciones propias de la autora, además de datos aportados por Araya - Vergara (1981). El kilómetro 0 o límite distal está considerado en la zona donde se ha desarrollado la flecha litoral sur (nace en la ribera sur del río y crece en dirección norte). Se le considera como límite distal a la flecha litoral sur debido a que es el último elemento geomorfológico que posee origen fluvio-marino, donde si bien era considerada como barra submarina dado que se identificaba de manera subaérea (Venegas, 2014), en los últimos años se manifiesta y crece de manera superficial.

Por otro lado, el límite proximal del estuario alcanza aproximadamente 17 kilómetros aguas adentro. Esta consideración tiene base en el alcance de la salinidad proveniente de las mareas, la que según la Dirección de Obras Portuarias (1960, en Araya - Vergara 1981) alcanza los 16 kilómetros desde la desembocadura del río Maule. La consideración de la autora y el dato señalado por el autor difieren de 1 kilómetro únicamente dado que tiene una antigüedad de más de 60 años.

Frente a lo anterior, el estuario fue dividido en zonas distal, media y proximal, donde además se identificaron sus individuos geomorfológicos presentes al año 2023, trabajo que es detallado a continuación:

- **Zona distal:** Tiene una extensión de 1.1 kilómetros. En esta zona se encuentra la flecha litoral norte de Quivolgo y la flecha litoral sur, ambos individuos geomorfológicos son altamente dinámicos y cambian de forma en base a la estacionalidad y factores ligados a ella. Sus límites son la flecha litoral sur en la zona poniente y el extremo distal de Isla Orrego en su zona oriente.
- **Zona media:** Posee una extensión de 3.6 kilómetros. Esta zona tiene sus límites poniente en el extremo distal de Isla Orrego y oriente en el extremo distal del primer banco lateral de meandro. Dentro de esta zona se encuentran los bancos medios estuariales Isla Orrego e Isla del Perro, en el sector norte del estuario se emplaza el sector de El Edén, compuesto por dos bancos laterales estuariales separados por un pequeño canal entre ambos. Por último, dentro de esta zona es posible identificar la terraza fluvio-marina de Constitución, en donde existe gran concentración de habitantes de la comuna.
- **Zona proximal:** Corresponde a la zona más extensa del estuario, alcanzando 12.3 kilómetros. Con un canal de tipo meandrante, dentro de ella es posible encontrar bancos laterales con influencia totalmente fluvial. Adicionalmente, en los bancos laterales se encuentran destacadas zonas de vegetación reciente. Como se visualiza en la Fig. 17, esta clasificación corresponde a áreas que recientemente (menor a 20 años) se han vegetado y, por tanto, actualmente poseen mayor estabilidad.

Figura 17. Evolución de la vegetación en banco de meandro, río Maule.

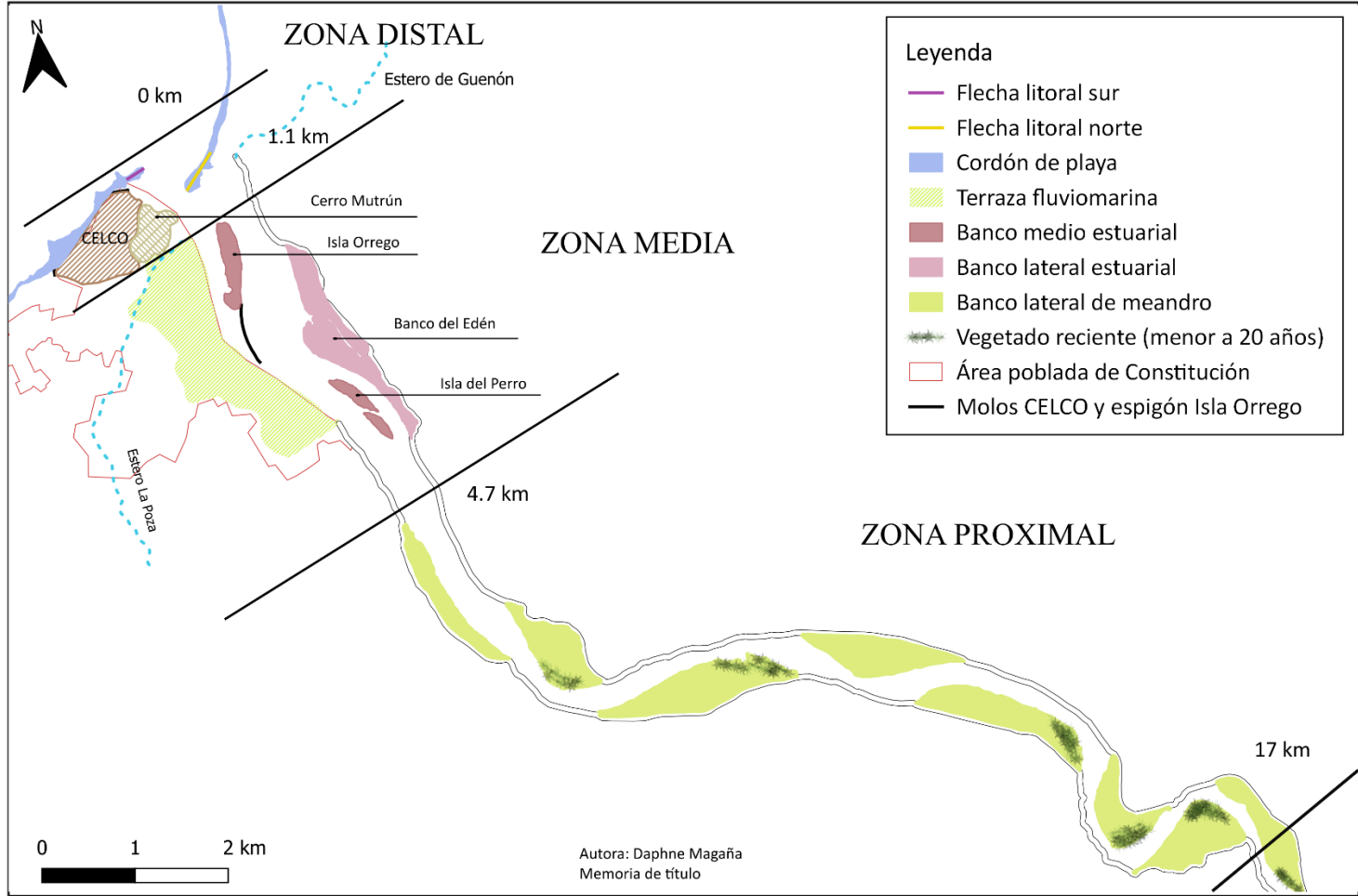


Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google Earth.

Conforme a lo anterior, se presenta la cartografía que grafica todo lo expuesto anteriormente:

Figura 18. Zonificación estuario del río Maule.

Zonificación y morfología del estuario del río Maule, comuna de Constitución



Fuente: Elaboración propia.

4.2 CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN LA PARTE MEDIA Y DISTAL DEL ESTUARIO DEL RÍO MAULE, ENTRE LOS AÑOS 2009 Y 2023

4.2.1 Años 2009 - 2010 - 2011

4.2.1.1 Estados morfológicos

Las imágenes utilizadas para los años 2009, 2010 y 2011 corresponden a las estaciones de invierno, verano y primavera, respectivamente, en base a las cuales se construyó la cartografía de estados morfológicos (Fig. 21).

En ese sentido, se aprecia lo siguiente:

Flecha litoral norte

Se aprecia que la flecha litoral del año 2009, que se desarrolla en dirección sur desde la ribera norte del río, es más bien gruesa y su extensión alcanza los 250 metros aproximadamente. En cuanto al año 2010, es importante destacar que la imagen satelital utilizada corresponde a cuatro días posterior al gran tsunami que afectó la comuna, por lo que es totalmente esperable que la flecha haya desaparecido completamente, no habiendo transcurrido tiempo suficiente para su recuperación.

Por otra parte, en el año 2011 es posible encontrar una flecha más extensa en comparación al primer año analizado, alcanzando los 470 metros aproximadamente.

Flecha litoral sur

En los tres años estudiados no se registra formación ni avance de la flecha litoral sur.

Bancos medios

El año 2009 exhibe una Isla Orrego que posee una leve acreción en su parte distal. Por el contrario, el año 2010 se visualiza una pequeña erosión de los bordes de la isla, a pesar de haber recibido directamente toda la fuerza proveniente del tsunami. A su vez, la acreción presente el año 2009 desapareció. Así también, la pequeña entrante ubicada frente a la ribera sur del río sufrió de la erosión por parte del agua, acentuándose.

Otros factores indicativos de la fuerza a la que se sometió Isla Orrego (y que a grandes rasgos aguantó de buena manera) es la vegetación y el espigón de la misma. En la Fig. 19 se exhiben los cambios en el nivel de vegetación y, además, la parte del espigón cercana a la isla que pareció perder material.

Figura 19. Vegetación y espigón de Isla Orrego, años 2009 y 2010.



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google Earth, 2023.

Al año 2011, es posible dar cuenta de una pequeña ganancia de masa en los bordes de la isla, aumentando de tamaño. Así también, la entrante ubicada frente a la ribera sur del río tuvo ganancia de masa. Se observa también que la punta distal de la isla se encuentra más redondeada en comparación a los otros años analizados.

En cuanto a la Isla del Perro, en el año 2009 se visualiza compuesta por dos bancos separados por un canal. Al año 2010, se observa, contrario a lo esperado, una pequeña acreción en la parte del canal que separa ambos bancos, por lo que estos están casi unidos. Semejante a Isla Orrego, el banco medio Isla del Perro también posee diferencias notorias en la cantidad de vegetación entre los años 2009 y 2010 (Fig. 20), rectificando la fuerza a la que fue sometida.

Figura 20. Vegetación en Isla del Perro, años 2009 y 2010.



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google Earth, 2023.

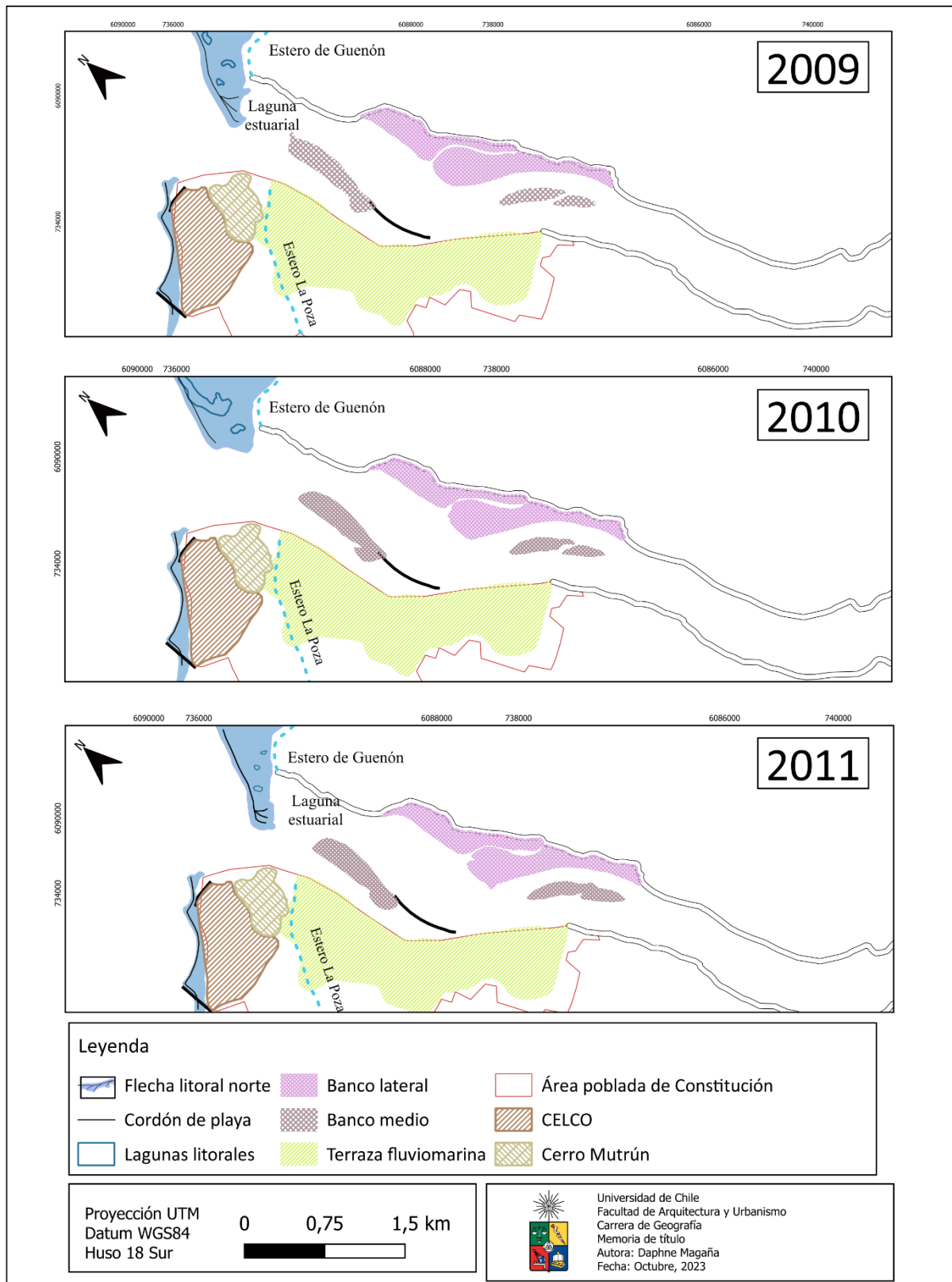
Finalmente, en el año 2011 exhibe acreción en la misma zona, donde ambos bancos quedaron unidos formando uno solo.

Bancos laterales

Los distintos años analizados tienen similar morfología, sin grandes diferencias. El año 2009, el banco El Edén está separado por un pequeño canal, el que es acentuado en año 2010 posterior al paso del tsunami.

El año 2011 puede verse un pequeño cambio en la parte lateral–distal del banco oriente, donde hay leve ganancia de masa. Así también, en la parte distal del mismo banco se logra visualizar una pequeña entrante que no se había desarrollado en los años anteriores.

Figura 21. Estados morfológicos de la zona media y distal del río Maule en los años 2009, 2010 y 2011.



Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.2 Litoral cercano

La Fig. 22 exhibe el litoral cercano de la ribera norte del río Maule. El TZR en el año 2009 corresponde principalmente a Reflectiva (R) en su parte norte, mientras que la parte más cercana a la flecha litoral se identifica con un TZR de Terraza de Baja Mar (LTT). A su vez, también se visualizan pequeñas lagunas litorales.

El año 2010 da cuenta de una gran pérdida de materia en la zona de la playa, posterior al paso del tsunami. Además de una gran laguna litoral levemente confinada. En este año, el TZR corresponde a Reflectiva (R) en su zona norte, mientras que cercano a la desembocadura se identifica un TZR de Playa y Barra Rítmica (RBB).

Por último, el año 2011 también exhibe un TZR principalmente Reflectiva (R). Así, se ve una recuperación de la playa en comparación al año anterior, donde hasta se desarrolló nuevamente la flecha litoral. Así también, se identifica la presencia de barras y surcos (color azul, Fig. 22), inferido por la existencia de zonas de rompiente alejadas de la playa. Las lagunas litorales igualmente son pequeñas, casi inexistentes.

Figura 22. Litoral cercano al río Maule en los años 2009, 2010 y 2011.



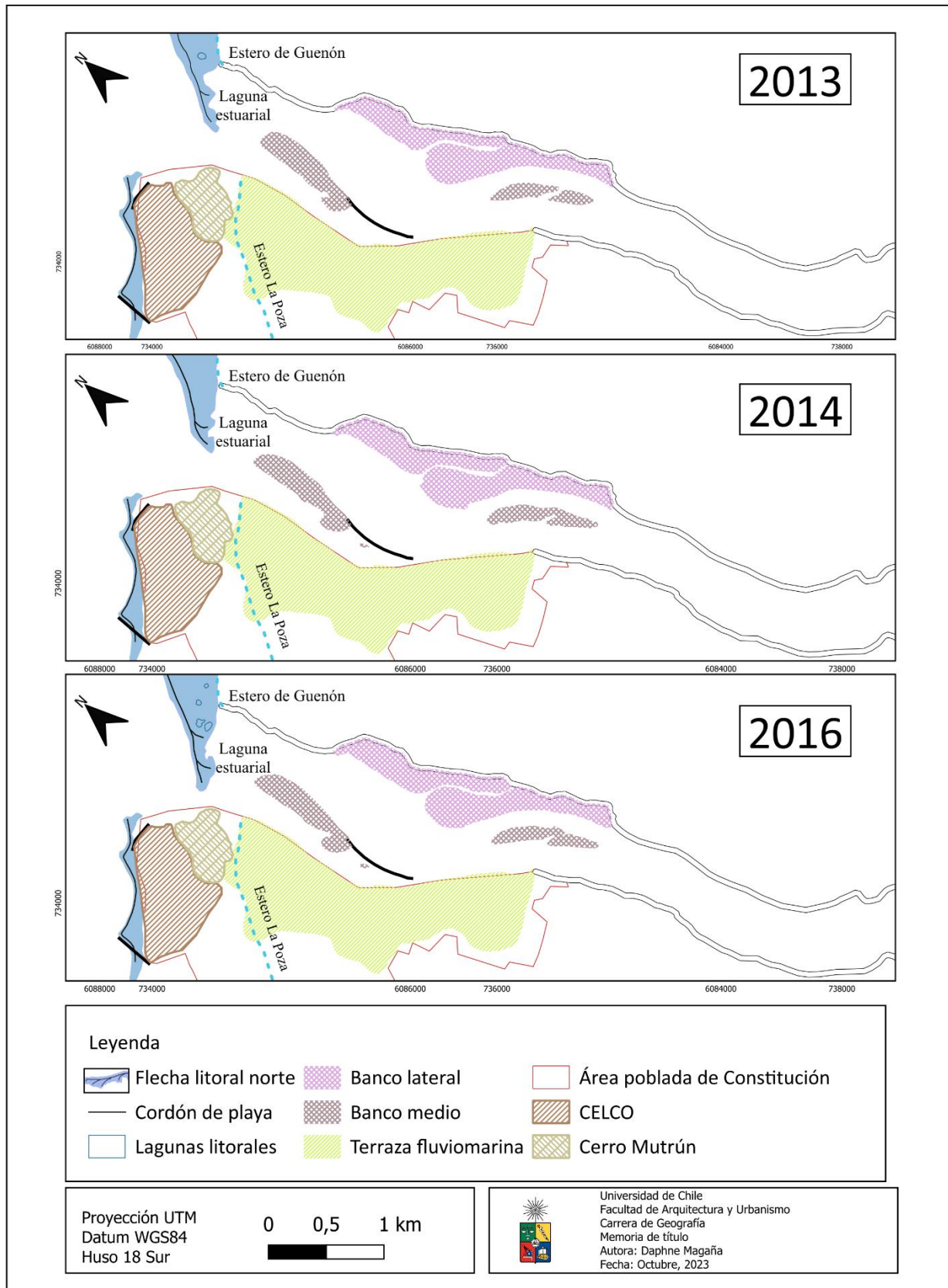
Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth, 2023.

4.2.2 Años 2013 - 2014 - 2016

4.2.2.1 Estados morfológicos

Las tres imágenes utilizadas para construir la cartografía de estados morfológicos para los años 2013, 2014 y 2016 (Fig. 23) corresponden a la estación de primavera, por lo que su análisis resulta aún más completo.

Figura 23. Estados morfológicos de la zona media y distal del río Maule en los años 2013, 2014 y 2016.



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Los principales cambios morfológicos son detallados:

Flecha litoral norte

El año 2013 exhibe una flecha litoral con gran crecimiento, alcanzando los 600 metros aproximadamente. Esta flecha es más bien delgada y posee dos entrantes, donde la más pronunciada es la que se encuentra cercana al nacimiento de la flecha.

Para el año 2014, la flecha que se visualiza es más bien robusta en comparación al año anterior, teniendo una longitud aproximada de 530 metros. A su vez, también se da cuenta que las entrantes antes mencionadas son mucho menores en cuanto a espacio.

Por último, la flecha presente en el año 2016 es la que posee mayor longitud respecto de los dos años anteriores, donde su longitud alcanza los 710 metros aproximadamente, incluso con peligro de que el estuario fuese cerrado. Así también, no posee entrantes pronunciadas en su morfología.

Flecha litoral sur

En los tres años estudiados no se registra formación ni avance de la flecha litoral sur.

Bancos medios

En cuanto al banco medio Isla Orrego, su morfología es similar en los años analizados. Al 2013, la entrante de cara a la ribera sur del río tiene una profundidad un poco más notable, además de que la zona distal del banco es más bien redondeada.

Al año 2014, la entrante nombrada se encuentra más suavizada, sin embargo, es posible notar que todo el borde colindante se encuentra levemente más erosionado. También se exhibe un pequeño banco medio creciendo en la zona del espigón de Isla Orrego, el que no se había encontrado en los años anteriores.

Al año 2016 también se visualiza una entrante levemente profunda, la que es común en todos los años analizados. Sobre su zona distal, esta tiene una forma más bien cuspidada en dirección a la ribera sur del río. De igual manera que el año 2014, en la zona del espigón se exhibe un pequeño banco medio.

En cuanto al banco medio Isla del Perro, se logran visualizar cambios más notorios. Al 2013, se compone de dos bancos separados por un canal. No así con los años posteriores.

En el año 2014, se visualiza acreción en la parte del canal que separa los dos bancos, logrando que estos sean unidos. Se exhibe acreción en la zona distal del banco poniente, el que obtiene una forma más redondeada respecto del año anterior. Así también, es posible dar cuenta de una ganancia de masa en la zona proximal del banco más oriente, logrando una forma cuspidada.

Por último, el año 2016 aún exhibe la unión de los dos bancos que componen la Isla del Perro, sin embargo, se ve una leve pérdida de masa en la zona distal del banco poniente, siendo menos robusto en comparación al del 2014.

Bancos laterales

No se visualizan grandes cambios morfológicos en ambos bancos de El Edén, sin embargo, en el banco oriente se logran apreciar algunos.

En el año 2013 se visualiza una pequeña entrante en la parte distal del banco oriente, la que también se aprecia el 2014. Así también, el año 2014 exhibe una pequeña acreción en la zona lateral - distal del banco.

Finalmente, en el año 2016 la entrante y acreción nombrada han desaparecido, dando paso a un banco totalmente redondeado.

4.2.2.2 Litoral cercano

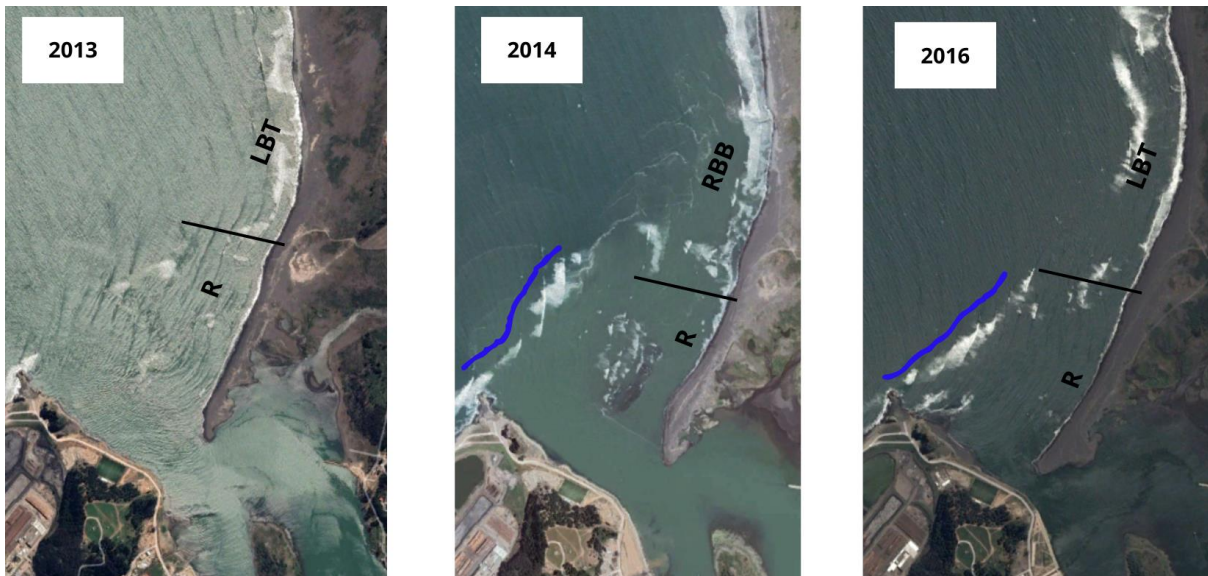
El año 2013 exhibe un TZR totalmente Reflectiva (R) en la zona cercana a la flecha, mientras que en la zona norte se identifica una segunda línea de rompiente paralela a la costa, por lo que registra una TZR de Barra y Surco Longitudinal (LBT). Además, se visualiza una pequeña laguna litoral entre la flecha y la desembocadura del estero de Guenon.

El año 2014 se logra identificar un TZR de tipo Reflectiva (R) en la zona cercana a la flecha litoral, mientras que al norte se identifica un TZR de Barra y Playa Rítmica (RBB). Al contrario de los otros años analizados, el 2014 no tiene presencia de lagunas litorales.

El año 2016 se identifica un TZR del tipo Reflectiva (R) en la zona cercana a la flecha litoral, mientras que más al norte se encuentra un TZR de Barra y Surco Longitudinal (LBT), aunque las barras y surcos no son continuas, se identifica más de una zona de rompiente. Así también, se visualizan pequeñas lagunas litorales desarrolladas cerca del canal del estero de Guenon.

Tanto en los años 2014 como 2016 (Fig. 24, color azul) se identifican zonas de rompiente bastante alejadas de la costa, lo que significa que de forma sub-acuática hay presencia de acumulación de sedimentos (barras y surcos).

Figura 24. Litoral cercano al río Maule en los años 2013, 2014 y 2016.



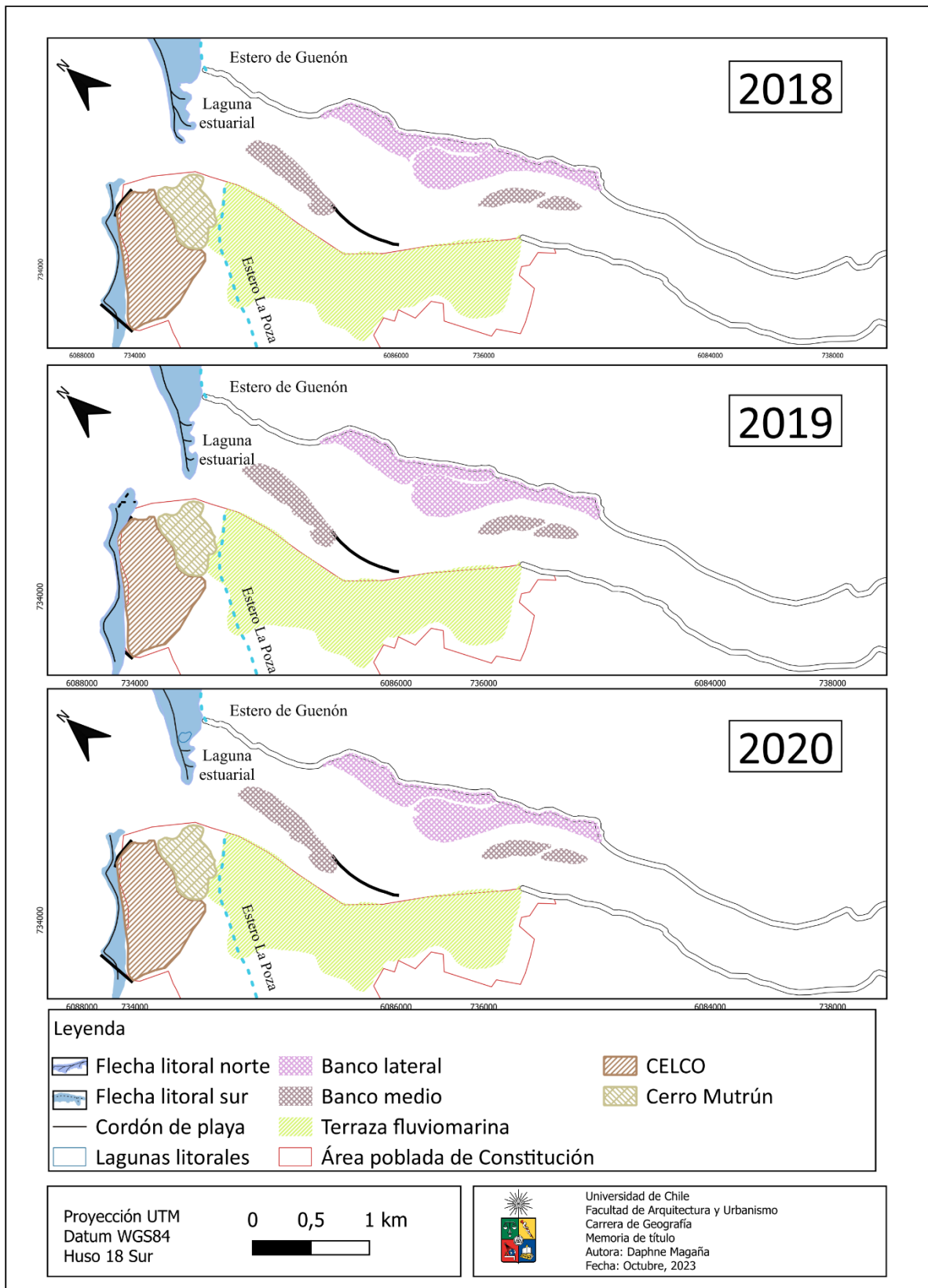
Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google Earth, 2023

4.2.3 Años 2018 - 2019 - 2020

4.2.3.1 Estados morfológicos

Las imágenes utilizadas para la elaboración del nuevo corresponden a los meses de verano, otoño e invierno, respectivamente, teniendo como resultado la siguiente cartografía (Fig. 25):

Figura 25. Estados morfológicos de la zona media y distal del río Maule en los años 2018, 2019 y 2020.



Fuente: Elaboración propia.

Flecha litoral norte

El año 2018 se divisa una flecha litoral levemente robusta, que además posee cuatro pequeñas entrantes que no significan ningún peligro de que la flecha vaya a cortarse. Su longitud supera los 500 metros desde su nacimiento.

El año 2019 se registra una flecha aún más larga, que alcanza casi los 600 metros y donde parecía que el estuario podría llegar a cerrarse. Si bien también posee entrantes, estas son de menor tamaño siendo comparadas con el año anterior.

El año 2020 exhibe una flecha más robusta que los años anteriores, sin embargo, su longitud no alcanza a superar los 400 metros. Además, posee dos pequeñas entrantes.

Dado que los tres años analizados poseen distinta cantidad de entrantes, pero teniendo como semejanza que la más grande se encuentra ubicada en el nacimiento de la flecha, se infiere que la responsabilidad de su formación es del estero de Guenon, el que propiciaría la erosión de la cara oriente de las flechas litorales.

Flecha litoral sur

Hasta el año 2019, en el análisis de los años anteriores no se había registrado formación ni crecimiento de la flecha litoral sur. En ese sentido, la flecha litoral sur que se formó el año 2019 alcanzó a tener una longitud superior a los 100 metros, siendo incluso más robusta que la flecha litoral en el mismo año.

Por otra parte, los años 2018 y 2020 no se registró formación de la flecha.

Bancos medios

En los tres años analizados, el banco medio Isla Orrego posee similar morfología, con pequeños cambios entre temporadas. El año 2018 da cuenta de una Isla Orrego bien redondeada en su zona distal, que además no exhibe bordes irregulares que den cuenta de algún tipo de acreción esporádica como en otros casos.

El año 2019 se visualiza una Isla Orrego medianamente más irregular, donde su zona distal evolucionó a una punta cuspidada con tendencia a la ribera sur del río. Además, se registra una leve acreción también en el borde que da cara a la ribera sur del río.

El año 2020 se visualiza que la Isla Orrego perdió masa en comparación al año anterior, teniendo un aspecto más delgado. Así también, a pesar de que aún se registra la acreción del borde sur de la isla, esta es menor.

A diferencia de años anteriores analizados, del 2018 al 2020 no se registra la formación de bancos medios cercanos a Isla Orrego.

Sobre el banco medio Isla del Perro, en los tres años analizados se encuentran dos bancos separados por un pequeño canal. El año 2020 se visualiza una pequeña acreción en el banco poniente, sin embargo, no parece ser tan significativa.

Bancos laterales

El año 2018 se registra una pequeña acreción en la zona media del banco poniente (cercano a la zona distal del banco oriente). La zona distal del banco oriente igualmente registra una pequeña acreción en donde años anteriores se formaba la entrante. En adición, se identifica una disminución del canal que los separa, casi cerrándose.

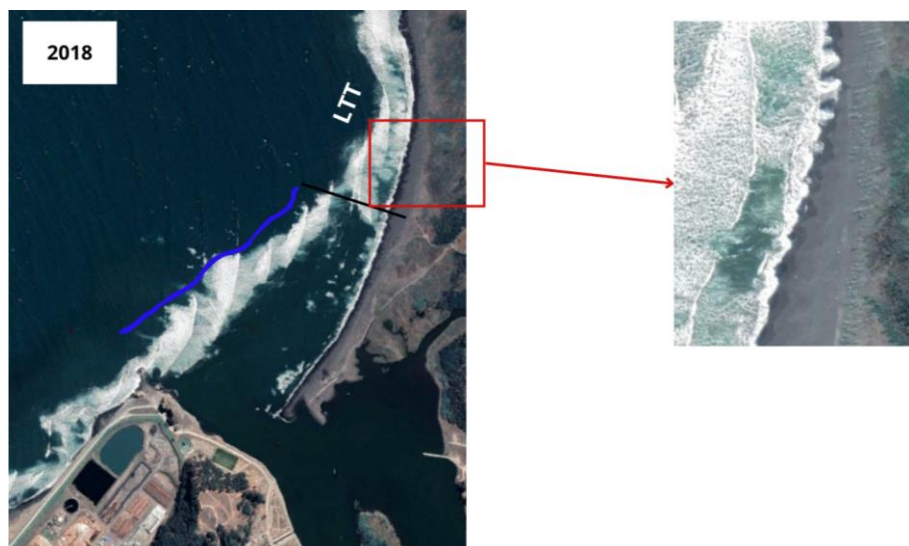
Al contrario, el año 2019 da cuenta de que el banco oriente nuevamente exhibe una entrante en su zona distal, aunque pequeña. Así también, se visualiza que la pequeña acreción del banco poniente antes nombrada, desapareció. Parte del canal también desaparece este año, donde se unen la parte distal - lateral del banco oriente con la parte media - proximal del banco poniente.

El año 2020 exhibe que el canal nuevamente se abre paso, separando así los dos bancos que conforman El Edén. También se acentúa la profundidad de la entrante ubicada en la zona distal del banco oriente, resultando más notoria a simple vista.

4.2.3.2 Litoral cercano

El año 2018 presenta, en su zona más cercana a la flecha litoral, una importante zona de rompiente paralela a la costa, la que es identificada como una gran acumulación de sedimentos (barras). Por otro lado, la zona más norte del litoral posee un TZR de Terraza de Baja Mar (LTT), donde las barras y surcos perpendiculares a la costa le dan esa forma tan característica vista desde altura (Fig. 26).

Figura 26. Barras y surcos en el litoral cercano al río Maule, ribera norte, año 2018.



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google Earth, 2023

El año 2019 también exhibe dos TZR. El litoral directo de la flecha presenta un TZR totalmente Reflectiva (R), mientras que al norte cambia a Terraza de Baja Mar (LTT), donde también se puede apreciar (aunque no tan pronunciados como el 2018) de barras y surcos a la costa que configuran la morfología de la playa (Fig. 27)

Figura 27. Barras y surcos en el litoral cercano al río Maule, ribera norte, año 2019.



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google Earth, 2023

El año 2020 (Fig. 28) presenta un TZR totalmente Reflectiva (R), donde no se registra formación de lagunas litorales. Así también, se evidencia una mínima zona de rompiente levemente curvada paralela a la flecha litoral norte.

Figura 28. Litoral cercano al río Maule en 2020.



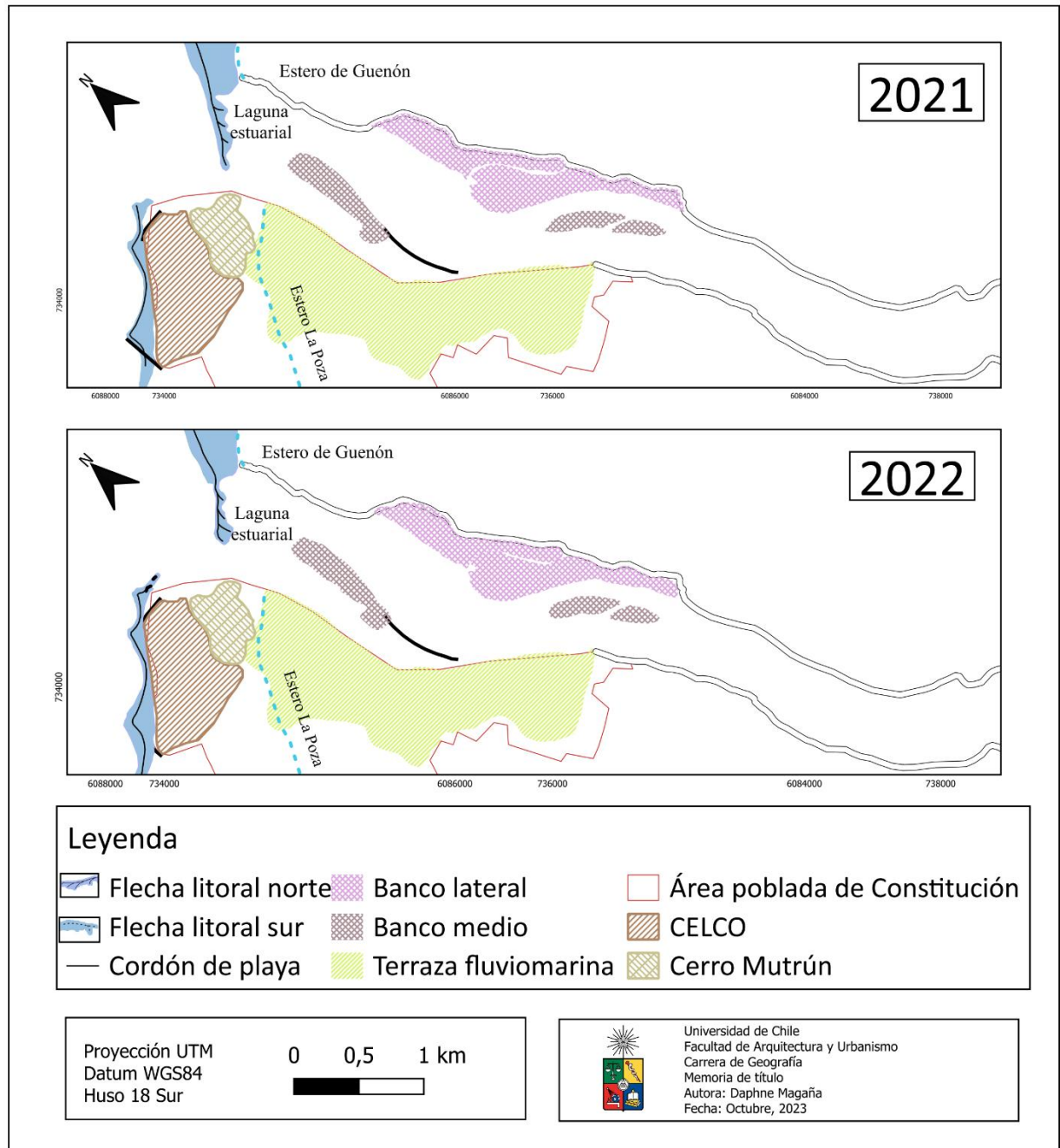
Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google Earth, 2023

4.2.4 Años 2021 - 2022

4.2.4.1 Estados morfológicos

El último esquema se hizo en base a estados morfológicos de los años 2021 y 2022, en las estaciones de primavera e invierno, respectivamente (Fig. 29).

Figura 29. Estados morfológicos de la zona media y distal del río Maule en los años 2021 y 2022.



Fuente: Elaboración propia.

Flecha litoral

En ambos años se visualiza claramente que la flecha litoral se encuentra bastante crecida. Al año 2021, la longitud de la flecha alcanzaba casi los 600 metros, teniendo pequeñas entrantes en la zona que da cara al río. Del mismo modo, la entrante más pronunciada se encuentra en la zona de nacimiento de la flecha, al costado de la desembocadura del estero de Guenon.

Por otro lado, al año 2022 se visualiza una flecha más delgada en comparación al año anterior, que no llega a los 500 metros de longitud. Así también, su entrante más pronunciada es la misma que la del año 2021, sin embargo, en este caso la erosión es aún más intensa, exhibiendo un ancho de solo 47 metros en su parte más delgada.

Flecha litoral sur

El año 2021 no se registra formación ni crecimiento de la flecha litoral sur.

Por otro lado, el año 2021 exhibe un pequeño crecimiento de la flecha litoral sur, la que alcanzó una longitud de 115 metros y 20 metros de ancho en su parte más robusta. Es una flecha litoral sur bastante más delgada en comparación a las que se han formado en los años anteriores.

Bancos medios

En el año 2021, el banco medio Isla Orrego posee bordes totalmente lisos, con una zona distal bien redondeada y sin ningún tipo de entrante lateral (solo la típica en la zona proximal de cara a la ribera sur del río).

No así con el año 2022, donde Isla Orrego exhibe bordes más irregulares que el año anterior. Se visualiza una entrante muy pequeña de cara a la ribera sur del río. Además, sufrió una pequeña erosión en su borde distal, donde dejó de ser redondeado para adquirir una forma más bien plana.

En cuanto al banco medio Isla del Perro, en ambos años se visualizan dos bancos separados por un pequeño canal. Al año 2021, la zona distal del banco poniente exhibe una forma más bien puntiaguda directamente relacionada con una pequeña acreción, mientras que el año 2022, la misma zona expone una forma redondeada (posterior a la erosión de la acreción recién nombrada).

Bancos laterales

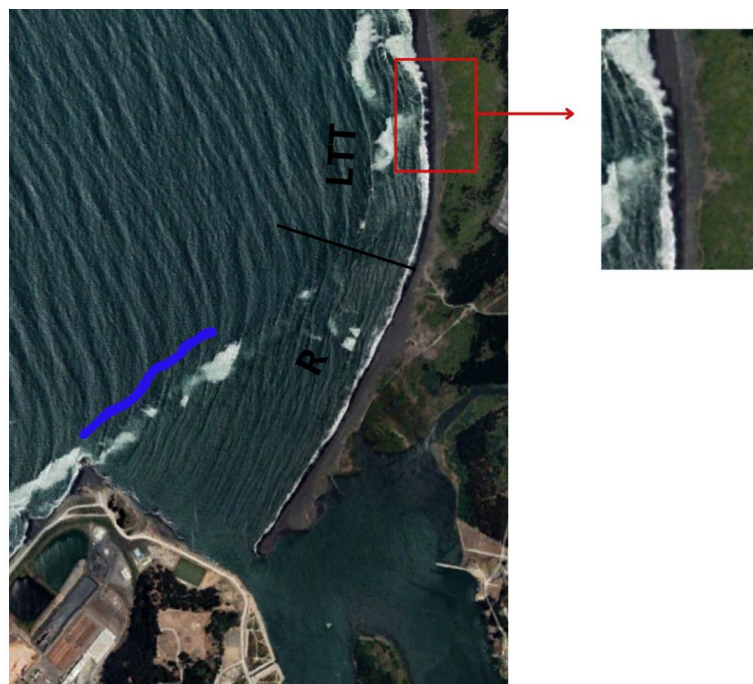
La primera observación que se exhibe del año 2021 está relacionada con el canal que separa ambos bancos, el que en esta oportunidad se encuentra cerrado en una parte. Así también, se visualiza una pequeña acreción en la zona media del banco poniente. A su vez, el extremo distal del banco oriente deja ver una pequeña erosión y formación de una entrante, que también se ha visto en años anteriores y varía su profundidad.

Por su parte, al año 2022 se vuelve a visualizar que ambos bancos están completamente separados por un canal que pasa entre ellos. Del mismo modo, se mantiene la pequeña acreción de la zona media del banco poniente, al igual que la entrante formada la zona distal del banco oriente (aunque menos pronunciada que la vez pasada).

4.2.4.2 Litoral cercano

Para el año 2021 se visualiza la existencia de dos TZR. En primer lugar, en la zona sur de la Fig. 30 (más cercana a la flecha litoral norte) se identifica el TZR Reflectiva (R), seguida por la TZR de Terraza de Baja Mar (LTT), donde se exhiben barras y surcos perpendiculares a la costa, aunque solo en una pequeña extensión. Así también, se visualiza una zona de rompiente (color azul) en el sector de formación de la flecha litoral sur, dando a entender que existe una barra sub-acuática.

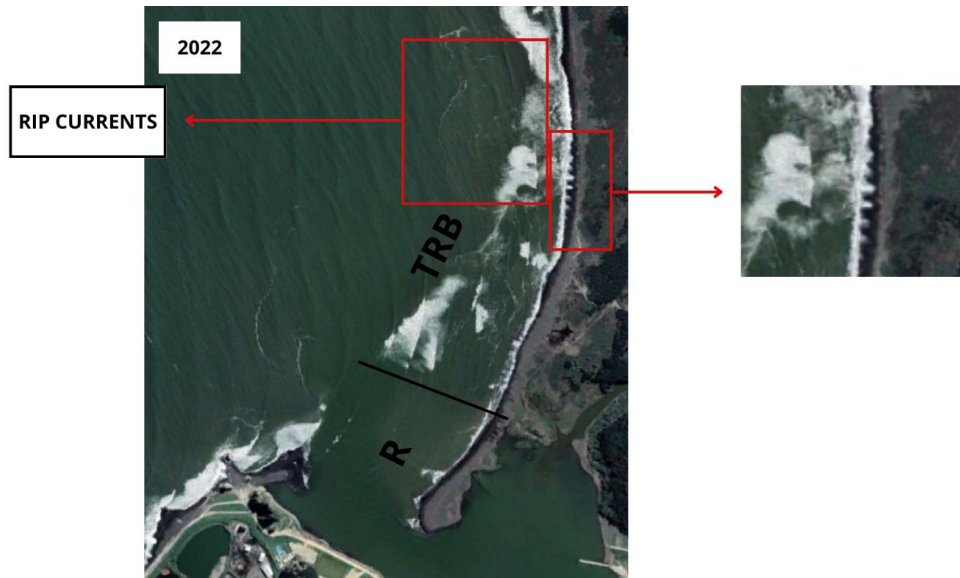
Figura 30. TZR para el año 2021.



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google Earth, 2023.

El año 2022 es posible identificar dos TZR (Fig. 31), aunque con menos precisión que para el año anterior. En la zona sur del litoral, cercano a la flecha litoral, se identifica el TZR de Reflectiva (R). Hacia el norte de la flecha litoral norte, se identifica el TZR de Barra y Rip Transversal (TBR) debido a la presencia de barras y surcos perpendiculares a la costa. Además, también se visualiza una corriente de retorno (*rip current*) en el mismo sector. Así también, se registra un leve crecimiento de la flecha litoral sur, la que también actúa como una nueva zona de rompiente.

Figura 31. TZR para el año 2022.



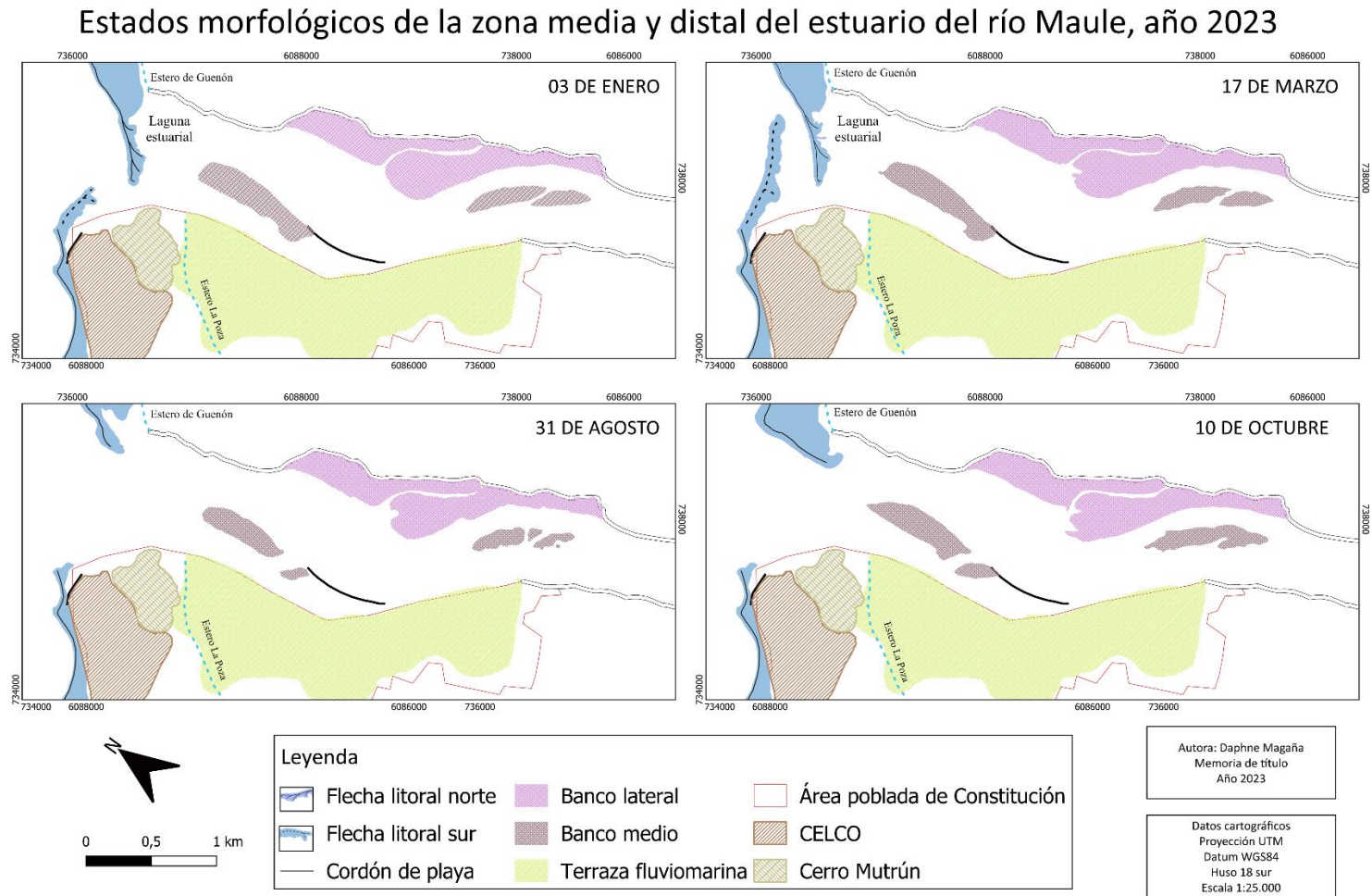
Fuente: Elaboración propia en base a imágenes de Google Earth, 2023

4.2.5 Año 2023

4.2.5.1 Estados morfológicos

La cartografía construida (Fig. 32) consta de cuatro estados morfológicos de diferentes estacionalidades del año 2023. Se eligieron cuatro fechas relevantes para tener un mejor y completo análisis de los cambios de los individuos morfológicos en las zonas media y distal del estuario.

Figura 32. Estados morfológicos de la zona media y distal del estuario del río Maule, año 2023.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen los cambios en cada individuo morfológico presente en el estuario.

Flecha litoral norte

El día 03 de enero se visualiza una flecha con gran extensión que crece en dirección sur y nace en la ribera norte del río. Hacia el 17 de marzo, se logra ver una flecha de casi igual extensión, alcanzando una longitud de casi 560 metros desde su nacimiento. La flecha es conocida como la Punta de Quivolgo y, dependiendo de la estacionalidad, es costumbre ver crecimiento en ella.

El día 31 de agosto, casi una semana posterior al temporal ocurrido entre el 18 y 23 de agosto, la flecha Punta de Quivolgo es inexistente, la que fue arrastrada producto del excepcional aumento de caudal del río Maule posterior a las lluvias caídas, por tanto, sólo es posible visualizar el cordón de playa. Además, también es posible dar cuenta que el cordón de playa estuvo a punto de ser cortado por una entrada de agua en la parte norte.

Finalmente, el día 10 de octubre, casi dos meses después del temporal antes descrito, se ve una pequeña recuperación del cordón de playa. Así también, se ve un crecimiento en la desembocadura del estero de Guenon, casi cerrándola (Fig. 33). En caso de seguir sumando sedimentos en la zona, se puede inferir que la flecha comenzaría a crecer más al interior de la desembocadura en comparación a su desarrollo anterior.

Figura 33. Cordón de playa en la ribera norte del río Maule, octubre de 2023.



Fuente: Google Earth, 2023.

El trabajo en terreno dio cuenta, al igual que se mencionó recientemente, que no existe nueva formación de flecha litoral norte. Contrario a esto, existe un desplazamiento de los sedimentos hacia el oriente, específicamente la desembocadura del estero de Guenon (Fig. 34), el que podría ser cerrado si esta tendencia continúa. También se identificó la formación de lagunas litorales, las que en esta zona son altamente dinámicas.

Figura 34. Desembocadura río Maule, ribera norte.



Fuente: Archivo propio de la autora, 26 de octubre de 2023.

Flecha litoral sur

El día 03 de enero ya es posible visualizar un crecimiento excepcional de la flecha litoral sur, la que crece en dirección norte desde su nacimiento en la ribera sur del río. En años anteriores no se había registrado un registro de tal longitud. Por su parte, el día 17 de marzo se da cuenta del mayor crecimiento de la flecha litoral sur, la que casi alcanza los 860 metros de longitud y 164 metros en su parte más ancha. Frente a eso, casi es concretado el cierre de la desembocadura.

El día 31 de agosto, posterior al temporal, la flecha litoral sur fue totalmente destruida por la fuerza del caudal. Además, a diferencia de la flecha, al día 10 de octubre no se ha registrado ninguna ganancia de sedimentos que ayuden a la formación de una nueva flecha litoral sur.

Al día de la visita a terreno, 26 de octubre del 2023, no se visualiza que una nueva flecha litoral sur esté en formación.

Terraza fluvio marina

Mediante perfiles de elevación se identificó la terraza fluvio marina de Constitución, que alberga gran parte de la población de la comuna. Esta terraza se encuentra en la ribera sur del río y es fácilmente identificable (Fig. 35), en este caso, desde el Cerro Mutrún se visualiza claramente el nivel de aterrazamiento entre la terraza joven y la antigua.

Figura 35. Terraza fluvio-marina de Constitución.



Fuente: Archivo propio de la autora, 26 de octubre de 2023.

Así también, desde el puente (vista este) se identifica el valle fluvial que alberga al río Maule. Se ve su forma de V, donde las laderas no han dejado paso a la formación de otras terrazas fluviales.

Figura 36. Valle que alberga al río Maule, viste este.



Fuente: Archivo propio de la autora, 26 de octubre de 2023

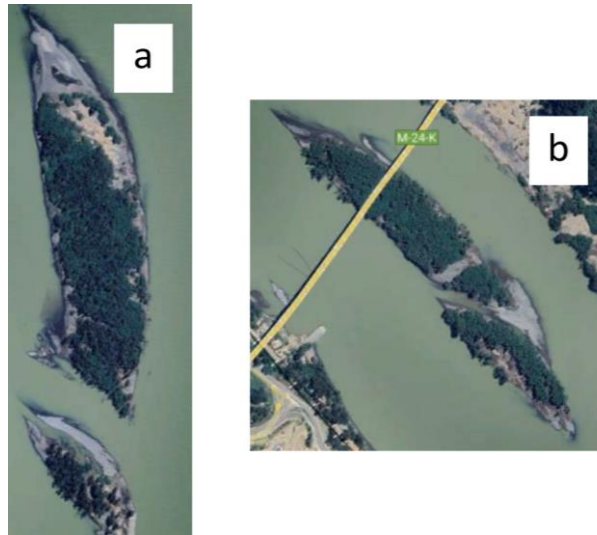
Bancos medios

El día 03 de enero se registra el banco Isla de Orrego estabilizado, donde hay desarrollo de suelo y vegetación, también es posible encontrar de la misma manera al banco Isla del Perro, la que está constituida por una isla grande en la zona poniente y una más pequeña en la zona oriente. Al día 17 de marzo, en el banco medio Isla Orrego se visualiza una pequeña ganancia de materia en su parte distal.

El día 31 de agosto se ve que ambos bancos fueron altamente afectados por las lluvias. En el caso del Isla Orrego se da cuenta de que el banco fue dividido en dos partes, constituyendo un banco grande en la zona poniente y uno más pequeño en la zona poniente. Para el caso de Isla del Perro, se logra visualizar que la superficie disminuyó, además de que la isla más grande también fue dividida en dos partes. Esta isla quedó finalmente constituida por tres bancos medios.

Al día 10 de octubre, aunque la Isla Orrego sigue dividida en dos partes, es posible ver una ganancia de masa en la parte distal de ambos bancos (Fig. 37a). Por su parte, en cuanto a la Isla del Perro se visualiza una unificación de los tres bancos anteriormente mencionados (Fig 37b). En ambos casos es posible dar cuenta de la ganancia de masa debido a las diferencias entre las zonas de vegetación estabilizada y las zonas con sedimento reciente.

Figura 37. A- Ganancia de masa Isla Orrego. B- Ganancia de masa Isla del Perro.



Fuente: Google Earth, 2023.

Lo anteriormente descrito fue comprobado en la visita a terreno. En la Fig. 38 se da cuenta de la acreción distal en la Isla Orrego, la que es diferenciada del resto de la isla debido a la vegetación. Así también, se visualiza que la división de la Isla Orrego en dos bancos aún persiste, puesto que no hay ganancia de materia en esa zona.

Figura 38. Octubre de 2023, Isla Orrego.



Fuente: Archivo personal de la autora, 26 de octubre de 2023.

Por otro lado, en la ribera norte del río es posible identificar dos nuevos bancos medios (Fig. 39)

Figura 39. Nuevos bancos medios, ribera norte.



Fuente: Archivo personal de la autora, 26 de octubre de 2023.

Así también, en la ribera sur del río Maule, en la zona del puente, también se identificó un pequeño banco medio (Fig. 40). Superficialmente, se identifica que todos los nuevos bancos medios están constituidos por material no seleccionado como arenas y rocas de distintos tamaños.

Figura 40. Nuevo banco medio, ribera sur.



Fuente: Archivo personal de la autora, 26 de octubre de 2023.

En cuanto a la Isla del Perro, en la visita a terreno se pudieron comprobar dos estados identificados mediante imágenes satelitales. En primer lugar, se identificó la unión de ambos bancos debido a la acreción de materia en la zona (Fig. 41).

Figura 41. Unión Isla del Perro.



Fuente: Archivo personal de la autora, 26 de octubre de 2023.

En segundo lugar, se identificó acreción lateral en la parte distal de la Isla del Perro (Fig. 42a), así también en la zona proximal de la misma (Fig. 42b). Al igual que los nuevos bancos nombrados anteriormente, la acreción se compone por material no seleccionado.

Figura 42. A- Acreción lateral Isla del Perro. B- Acreción proximal Isla del Perro.



Fuente: Archivo personal de la autora, 26 de octubre de 2023.

En suma, en la parte media de la Isla del Perro es posible visualizar vestigios del paso del último temporal. Se puede inferir la fuerza del agua debido a varios árboles que fueron arrancados de raíz y depositados en la isla (Fig. 43). Se desconoce si estos árboles provienen de la misma isla o si vienen de un sector más alejado.

Figura 43. Árboles arrancados de raíz y depositados en Isla del Perro.



Fuente: Archivo personal de la autora, 26 de octubre de 2023.

Por último, la vista poniente del puente permite identificar la acreción en los bancos y la división de Isla Orrego (Fig. 44).

Figura 44. Vista poniente desde el puente.



Fuente: Archivo personal de la autora, 26 de octubre de 2023.

Bancos laterales

En cuanto a los bancos laterales, estos son conocidos como El Edén y está conformado por dos bancos unidos en la ribera norte del río, que a su vez son separados por un pequeño canal que pasa entre ambos. Estos bancos, al igual que los bancos medios, tienen desarrollo de suelo y vegetación.

En el mapa del 03 de enero se visualiza que ambos bancos son redondeados y separados por el canal nombrado, sin embargo, en el 17 de marzo puede verse una pequeña pérdida de superficie en la parte distal del banco oriente.

Hacia el 31 de agosto, la imagen revela una importante pérdida de superficie en ambos bancos, quedando aún más al descubierto el canal que los separa. La entrante descrita para el banco oriente se visualiza más redondeada y levemente más profunda respecto del 17 de marzo. Dado que el espigón de Isla Orrego cumple la función de desvío de caudal ante crecidas (Venegas, 2014), podría ser un factor responsable ante la gran pérdida de materia, especialmente en el banco poniente y zona distal del banco oriente.

Al 10 de octubre ambos bancos mantienen la pérdida de superficie post temporal. No obstante, al banco oriente se suma una pequeña acreción en su parte distal - lateral, la que queda en evidencia en la Fig. 45. Al igual que en los bancos medios, la ganancia de materia puede identificarse producto de la estabilización entregada por la vegetación.

Figura 45. Ganancia de masa en banco lateral oriente El Edén.



Fuente: Google Earth, 2023.

En la visita a terreno se documentó acreción lateral en el banco oriente El Edén (Fig. 46), así también, se logró capturar la acreción de la zona distal del mismo banco (Fig. 44). Tal como se mencionó anteriormente, además de su identificación mediante imágenes satelitales, también logra identificarse debido a la diferencia entre la zona de vegetación estabilizada y zona de arenas recientes

Figura 46. Acreción lateral en banco El Edén.



Fuente: Archivo propio de la autora, 26 de octubre de 2023.

4.2.5.2 Litoral cercano

La imagen utilizada para analizar el litoral cercano corresponde al 4 de octubre del 2023 (Fig. 47), a poco más de un mes del último temporal que pasó por la región del Maule. En un primer momento, es posible distinguir fácilmente la presencia de la pluma de sedimentos que trajo el gran caudal del río, la que es encargada de hacer llegar nutrientes al mar.

El TZR que se distingue en la imagen corresponde a Barra y Playa Rítmica (RBB). Este TZR es caracterizado por no poseer orden en la zona de rompiente, lo que se identifica fácilmente en la zona norte del litoral. La zona de rompiente es heterogénea, con zonas de baja profundidad donde el oleaje rompe, así como zonas de mayor profundidad donde el oleaje rompe directamente en la cara de la playa.

Tanto la flecha litoral sur como la flecha litoral norte fueron totalmente arrasadas por el gran caudal que bajó en el temporal. Mientras que la flecha litoral sur no exhibe recuperación de sedimentos, la flecha litoral norte registra un leve crecimiento, aunque distinto a su morfología registrada anteriormente. Así, actualmente exhibe una formación estuario adentro, mucho más cercana al estero de Guenón, donde incluso se visualiza un inminente cierre del mismo.

En la zona directa de la desembocadura (Fig. 47, encerrado en un cuadrado rojo) se distinguen también barras y surcos, donde por consecuencia de su presencia se generan nuevas zonas de rompiente. Se infiere, teniendo en cuenta el contexto post temporal de la imagen, que la formación de barras y surcos es debido a la fuerza del caudal que desembocó y arrastró ambas flechas litorales. De este modo, es posible afirmar que gran parte de los sedimentos que componían a las flechas litorales, cambiaron de lugar por acción del agua.

Figura 47. Litoral cercano post temporal, octubre de 2023.



Fuente: Elaboración propia.

4.3 Factores de cambio

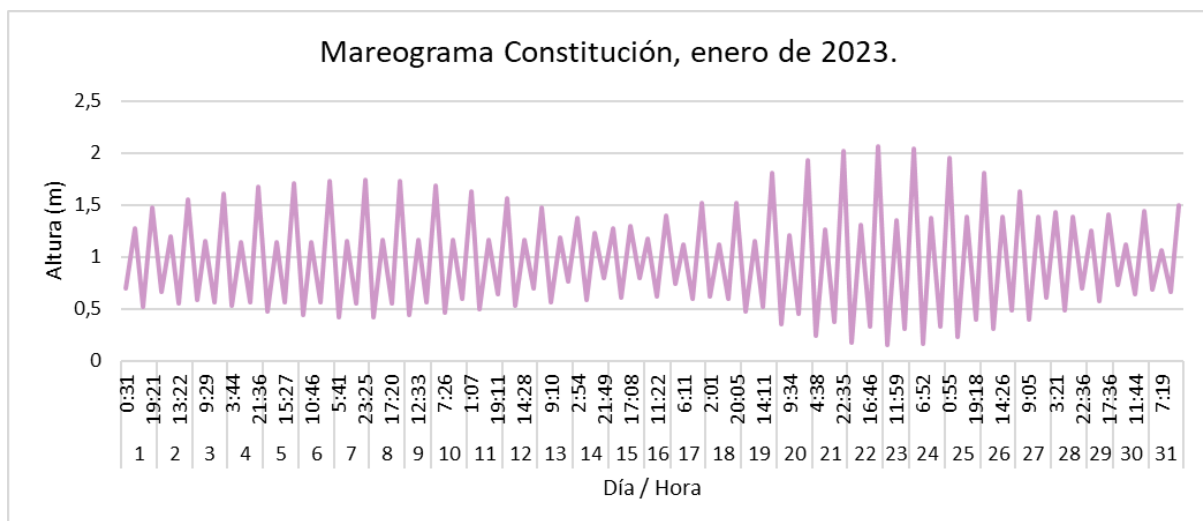
4.3.1 Mareas

Se utilizaron mareogramas correspondientes a enero, febrero y marzo del año 2023 con el propósito de buscar alguna anomalía que haya significado la formación de la flecha litoral sur.

El gráfico 1 muestra el mareograma de enero, que corresponde a un rango de marea micromareal y un régimen mixto. En la mayoría de los días se producen dos pleamares y dos bajamares, sin embargo, la altura entre estas es notoriamente desigual.

Los días 6 y 21 de enero presentaron mareas vivas, con luna nueva y llena, respectivamente. Si bien estos días corresponden a mayores diferencias entre pleas y bajas, no significan un cambio en el mareograma, manteniendo su rango y régimen. Con los días 14 y 28 de enero, estos presentan mareas muertas con luna creciente y menguante, respectivamente. A pesar de presentar la menor diferencia entre pleas y bajas, tampoco generan un cambio en el rango y régimen.

Gráfico 1. Mareograma enero, 2023.

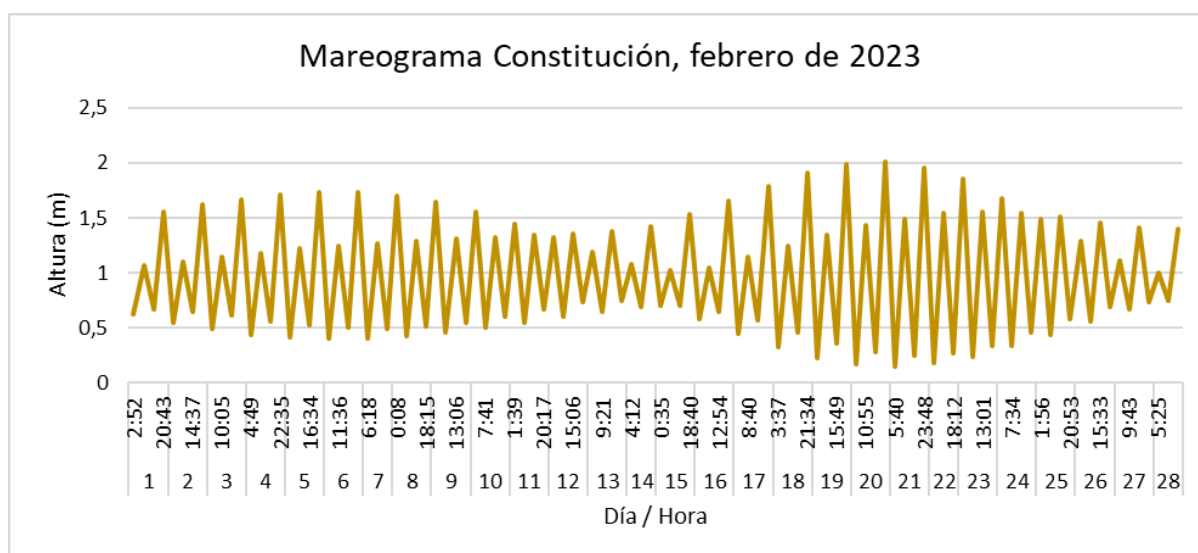


Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 2 muestra el mareograma de febrero, también presentando un rango de marea micromareal y un régimen mixto.

El caso de febrero es el mismo que ocurrió en enero. Los días 5 y 20 de febrero presentaron mareas vivas con luna nueva y llena, respectivamente. Si bien la diferencia entre pleas y bajas es aún más notoria en estos días, no generan un cambio en el rango y régimen. Mismo caso con los días 13 y 27, presentando mareas muertas de luna creciente y menguante, respectivamente. Aquí se registra la menor diferencia entre pleas y bajas, no generando ningún cambio en el rango y régimen de marea.

Gráfico 2. Mareograma febrero, 2023.

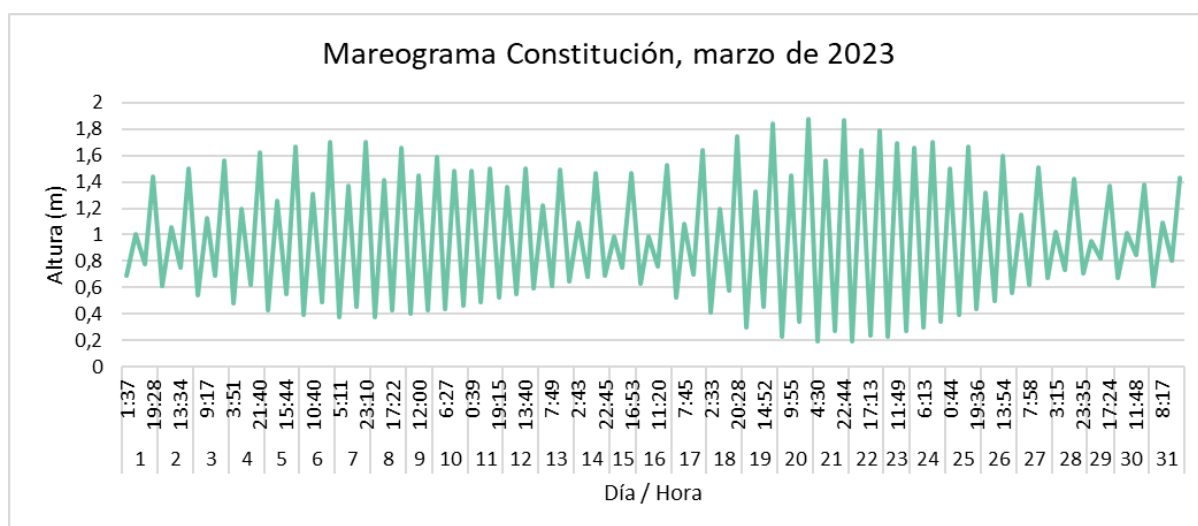


Fuente: Elaboración propia.

Por último, el gráfico 3 muestra el mareograma correspondiente al mes de marzo. En este caso, la altura entre pleas y bajas es menor que en los casos recién mencionados, sin embargo, se mantiene el rango micromareal y el régimen mixto.

Los días 7 y 21 de marzo corresponden a las mareas vivas, con luna nueva y llena respectivamente. A su vez, los días 14 y 28 se presentan las mareas muertas, con lunas creciente y menguante respectivamente. Al igual que los mareogramas recién analizados, a pesar de que en mareas vivas la diferencia entre pleas y bajas es mayor, y que en las mareas vivas esta altura alcanza su punto mínimo, ninguna genera un cambio en el rango y régimen de las mareas.

Gráfico 3. Mareograma marzo, 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Frente a este análisis, se infiere que el rango y régimen de mareas no son un factor determinante en la formación o modelado de las geoformas, específicamente de la flecha litoral sur, objetivo principal de estudio. Sin embargo, el estudio de mareogramas permite analizar la clasificación del estuario del río Maule basándose en la teoría.

4.3.2 Precipitación

Se analiza la precipitación con el propósito de encontrar relación entre la ganancia y pérdida de masa que sufrieron las geoformas en los años estudiados, de este modo, se compara la estacionalidad de las imágenes y la precipitación del mes y año correspondiente. Debido a que no todas las geoformas analizadas tienen grandes cambios, la comparación será únicamente con el banco medio isla del Perro, dado que es la geoforma que tiene más variación dentro de los años estudiados.

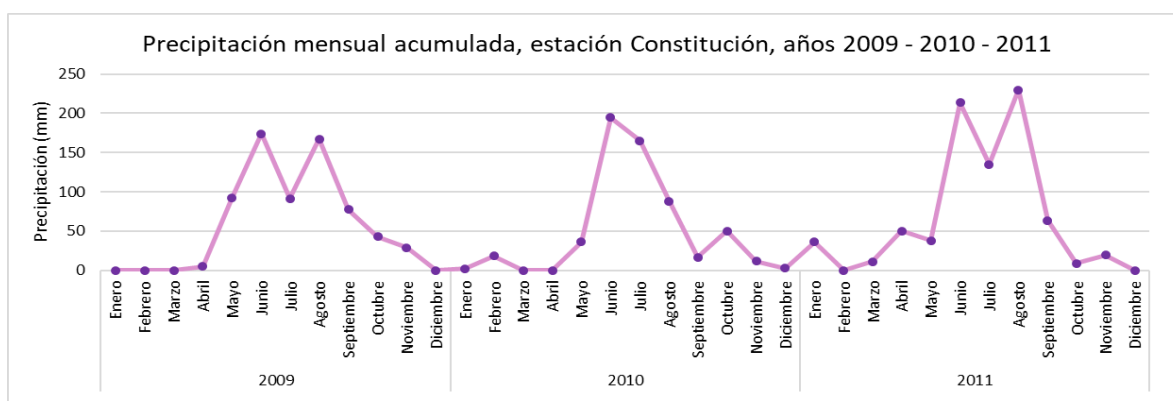
Los datos pluviométricos del área de estudio se extrajeron desde las estaciones de monitoreo de la Dirección General de Aguas, además, para complementar datos faltantes se consultó el Explorador Climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. Los datos consultados corresponden a la estación Constitución, ubicada en la ribera sur del río Maule, a menos de 1 km de su desembocadura y con una altura de 10 m.s.n.m.

El gráfico 4 exhibe la precipitación mensual acumulada en los años 2009, 2010 y 2011. En este esquema se visualiza claramente la tendencia estacional de la precipitación, la que se concentra en los meses de invierno con valores superiores a 150 mm, incluso sobrepasando los 200 mm. La temporalidad de este gráfico se sitúa justo en los años en que los expertos inician la megasequía, por lo que se transforma en un punto de partida para analizar la tendencia a la baja de precipitaciones en la zona.

Respecto a la isla del Perro en el año 2011 (Fig. 19), imagen del mes de noviembre, se visualiza una fusión de ambos bancos que habitualmente la forman. Así, el gráfico 4 da cuenta que noviembre es un mes donde las precipitaciones disminuyen abruptamente respecto del invierno, por lo que se infiere que tiene relación con la ganancia de masa en isla del Perro.

Lo anterior no se evidencia en el año 2010, dado que la imagen es del mes de marzo (Fig. 19), cinco días después del tsunami. Así tampoco se evidencia en el año 2009, lo que se infiere es debido a que la imagen utilizada es del mes de julio, uno de los meses donde se registra mayor acumulación de precipitación (Gráfico 4), por tanto, esto favorece el movimiento de los sedimentos e impide su embancamiento.

Gráfico 4. Precipitación mensual acumulada, estación Constitución, años 2009 - 2010 - 2011.



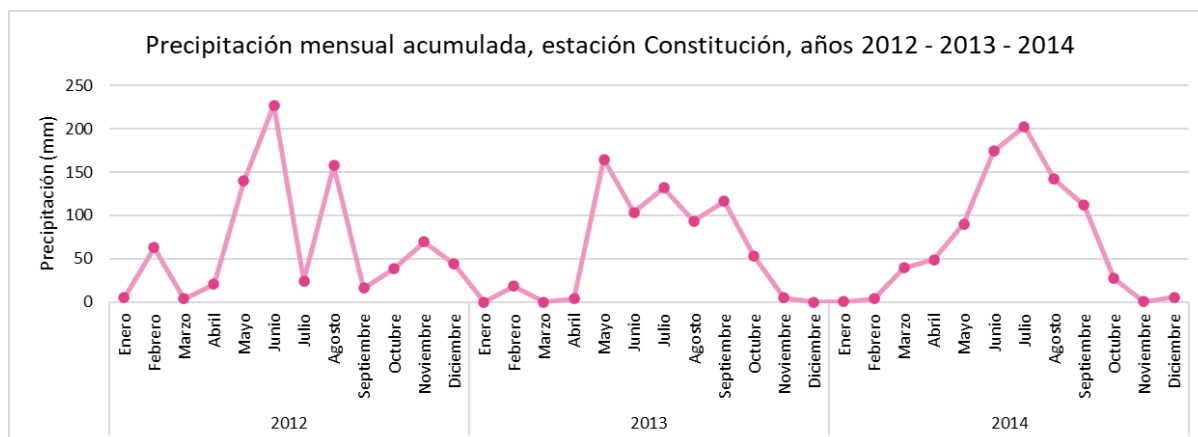
Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, el gráfico 5 exhibe la precipitación mensual acumulada para los años 2012, 2013 y 2014. En él, todavía es posible visualizar la tendencia a la concentración invernal de la precipitación, donde los valores varían entre 100 y 200 mm. A pesar de que el año 2012 no se incluyó en el análisis de los estados morfológicos, se incluyó en el gráfico 5 para dar continuidad al análisis.

Continuando con el análisis de isla del Perro, el año 2013 se visualizan ambos bancos que lo conforman (Fig. 23). Dado que la imagen pertenece al mes de octubre, podría hacerse la comparación entre la disminución abrupta de precipitaciones entre invierno y primavera. Sin embargo, en el gráfico 5 es posible dar cuenta que el invierno de 2013 no fue una estación donde se acumuló gran precipitación respecto de años anteriores. Por tanto, dado que la precipitación entre invierno y primavera no tuvo oscilaciones tan significativas, no hubo influencia suficiente para propiciar a un embancamiento de los sedimentos.

Contrario al año 2013, el 2014 si presentó fusión de ambos bancos en isla del Perro (Fig. 23). La imagen utilizada corresponde al mes de noviembre, donde como se muestra en el gráfico 5, el año 2014 si presentó mayor acumulación de precipitación invernal respecto del año anterior, por lo que se presenta una diferencia abrupta entre meses de invierno y primavera.

Gráfico 5. Precipitación mensual acumulada, estación Constitución, años 2012 - 2013 - 2014.



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 6 exhibe la precipitación mensual acumulada en los años 2015, 2016 y 2017. En él se visualiza, si bien en menor medida, que hay tendencia a la concentración de la precipitación en los meses invernales. Sin embargo, a pesar de que los años 2015 y 2017 llegaron a superar el umbral de los 200 mm, el año 2016 no logró superar los 150 mm en ninguno de sus meses invernales. Además, se visualiza que junio de 2016 fue un mes que casi no acumuló precipitaciones, muy por el contrario, respecto de los otros años analizados.

Al año 2016, isla del Perro se ve conformada por dos bancos (Fig. 23) a pesar de que la imagen corresponde al mes de octubre. En los casos anteriores se registra que los meses posteriores a las precipitaciones invernales poseen ganancia de masa en isla del Perro, caso que no ocurre en el año 2016. En ese sentido, las precipitaciones en los meses de invierno no fueron tan importantes como años anteriores (Gráfico 6), siendo incluso el año más seco analizado hasta el momento, por lo que no significaron influencia en el enbancamiento de sedimentos y ganancia de masa en los bancos.

Gráfico 6. Precipitación mensual acumulada, estación Constitución, años 2015 - 2016 - 2017.



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 7 da cuenta de la precipitación para los años 2018, 2019 y 2020. En este nuevo esquema, se puede observar que, aunque la tendencia es levemente más difusa, sigue notándose la concentración invernal de la precipitación. No obstante, también da cuenta de cambios. El más evidente tiene relación con la cantidad de precipitaciones acumuladas, donde solo el año 2020 traspasa el umbral de los 80 mm y donde no alcanza a acumular 160 mm. Así también, los meses correspondientes a verano son totalmente secos, a diferencia de los años anteriores que sí registran una leve acumulación de precipitación.

En los años 2018, 2019 y 2020 (Fig. 25), isla del Perro está constituida por los dos bancos. Para el año 2018, imagen correspondiente al mes de abril, se infiere que debido a que los meses de primavera y verano no registran gran acumulación de precipitación, no se dio paso al movimiento de sedimentos que pudiesen generar ganancia de masa. Mismo caso para el año 2019, con una imagen correspondiente al mes de mayo, donde previamente hay cinco meses que no acumularon ni siquiera 20 mm de precipitación (Gráfico 7). Para el año 2020, correspondiente al mes de julio (invierno) se trata de meses donde generalmente hay acumulación y constantes precipitaciones, por lo que aún no se da paso el enbancamiento de sedimentos.

Gráfico 7. Precipitación mensual acumulada, estación Constitución, años 2018 - 2019 - 2020.



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 8 da cuenta de la precipitación mensual acumulada en los años 2021, 2022 y 2023. Si bien hubo falta de datos para completar el gráfico, aún es posible su análisis. Al igual que lo observado en el gráfico anterior, el año 2021 no llega a superar el umbral de los 100 mm en los meses invernales de precipitaciones más concentradas. Así, el año 2022 logra pobremente superar los 150 mm en meses invernales, además de no existir acumulación de precipitaciones en los meses veraniegos. No así con el año 2023, donde se llegó a superar el umbral de los 250 mm, hecho que no ocurría desde el año 2015.

Gráfico 8. Precipitación mensual acumulada, estación Constitución, años 2021 - 2022 - 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Desde el año 2015 se registra una sostenida y notable disminución de las precipitaciones, sin embargo, a pesar de esto no se ha generado un embancamiento importante de las geoformas estudiadas. Es más, la ganancia de masa de isla del Perro (usado como ejemplo en este análisis) tiene una relación completamente estacional, donde hay meses que se fusionan ambos bancos y meses donde los sedimentos ganados se pierden.

Por otro lado, el único año donde existe una notoria modificación de las geoformas es el año 2023, donde si bien se alcanzaron precipitaciones invernales similares a los años 2009 - 2010 - 2011 (las que en su momento no modificaron las geoformas), es importante resaltar que esto es una consecuencia de dos eventos (casi seguidos) de precipitaciones concentradas.

4.3.3 Caudal

El análisis de los datos de caudal tiene el propósito de ser un complemento al estudio de las precipitaciones y, con esto, realizar un análisis más completo de ambos factores. De este modo, se continuará con el análisis de isla del Perro (al igual que se hizo con las precipitaciones) debido a que es la geoforma que más varió respecto a acreción y pérdida de masa.

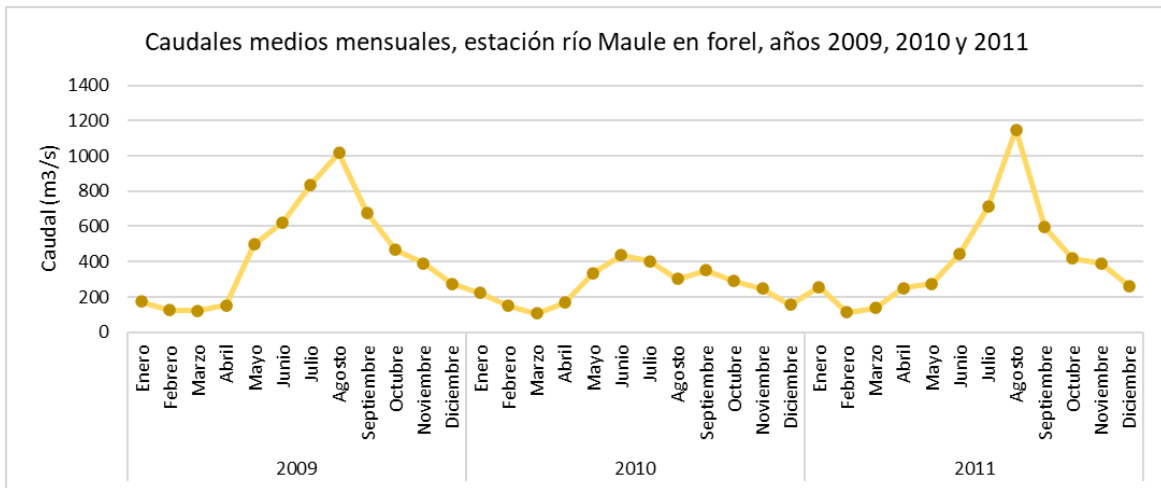
Los datos fluviométricos, correspondientes a caudales medios mensuales (m³/s), se extrajeron desde las estaciones de monitoreo pertenecientes a la Dirección General de Aguas. Los datos disponibles pertenecen a la estación Río Maule en Forel (35°24'29" S, 72°12'38"), la que se encuentra a aproximadamente 22 kilómetros de la desembocadura del río Maule y tiene una altura de 30 m.s.n.m. Es importante destacar que los datos de precipitación y caudal son de estaciones distintas, con una distancia de aprox 20 km entre ambas, por lo que los resultados podrían diferir levemente.

El gráfico 9 expone los caudales medios mensuales en los años 2009, 2010 y 2011. En él, se visualiza la tendencia al aumento de caudales en los meses invernales, la que es más notoria en los años 2009 y 2011 donde se superan los 1000 m³/s.

Respecto al gráfico 1 y su relación con el embancamiento de isla del Perro en el año 2009, el gráfico 9 complementa el análisis dado que es posible visualizar una abrupta disminución de los caudales (para el mes de noviembre, al que pertenece la imagen satelital trabajada), infiriendo una relación en la pérdida de fuerza para transportar sedimentos.

En cuanto al año 2011, continuando con el análisis del gráfico 1 y su relación con la presencia de ambos bancos en isla del Perro (mes de julio), el gráfico 9 evidencia que existe un notorio aumento en los caudales, por lo que se afirma mayor movimiento en los sedimentos.

Gráfico 9. Caudales medios mensuales, estación río Maule en Forel, años 2009, 2010 y 2011.

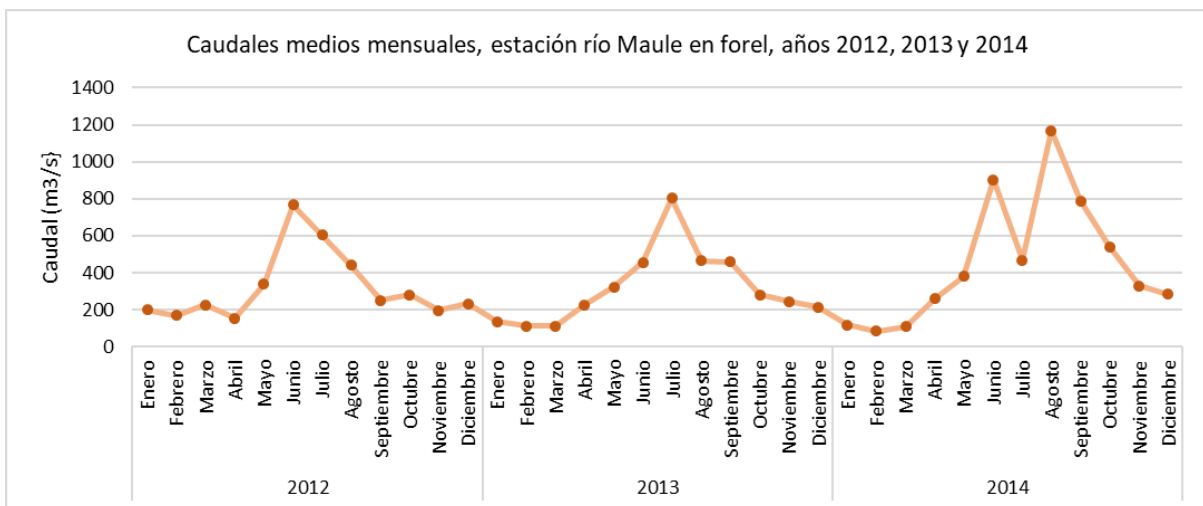


Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, en el gráfico 10 (correspondiente a los años 2012, 2013 y 2014) la tendencia al aumento invernal es mucho más clara que en el gráfico anterior. Este gráfico exhibe que los meses entre junio y agosto son los que poseen mayor caudal mensual, superando los 800 m³/s y alcanzando casi los 1200 m³/s.

En ese sentido, se mantiene lo analizado para el gráfico 5. El gráfico 10 es un gran complemento para comprender la estacionalidad a la que está sometida el estuario del río Maule, que en los meses invernales se registre una importante acumulación de precipitación (gráfico 5) tiene directa relación con el aumento de los caudales. En tanto, dependiendo de la estacionalidad de las imágenes analizadas, será posible inferir si se encuentra en un periodo donde hay gran movimiento de sedimentos o, por el contrario, estos están embancando.

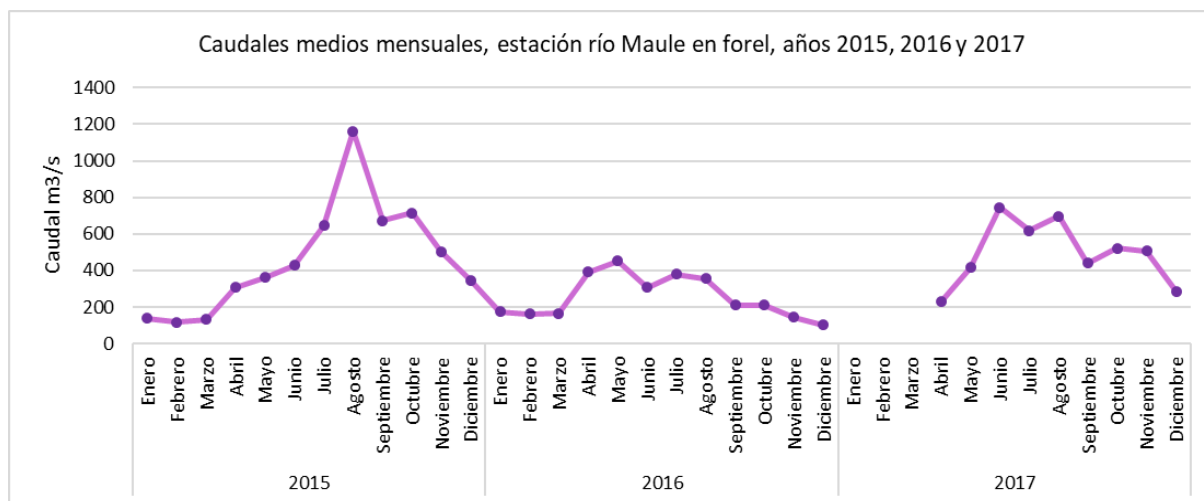
Gráfico 10. Caudales medios mensuales, estación río Maule en Forel, años 2012, 2013 y 2014.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los años 2015, 2016 y 2016, el gráfico 11 expone los datos. Se visualiza que solo el año 2015 el caudal medio alcanzó casi los 1200 m³/s, al contrario de los años siguientes que registraron una notoria baja, donde los caudales medios no superaron los 800 m³/s.

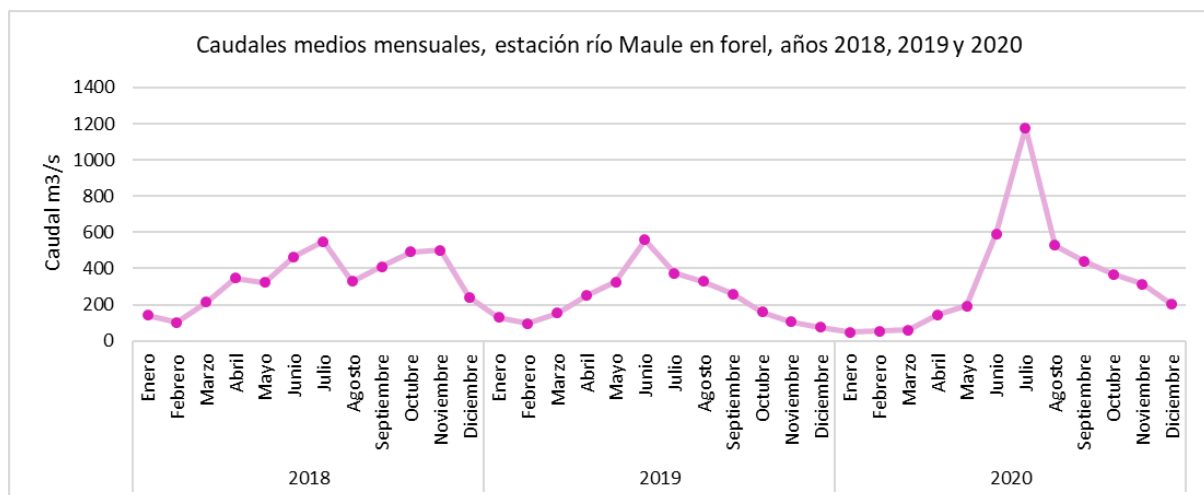
Gráfico 11. Caudales medios mensuales, estación río Maule en Forel, años 2015, 2016 y 2017.



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 12, aunque todavía da cuenta de una tendencia invernal al aumento de caudales, ésta ya no es tan pronunciada como los años anteriores. Así, los años 2018 y 2019 no logran superar los 600 m³/s, mientras que el año 2020 alcanzó los 1000 m³/s.

Gráfico 12. Caudales medios mensuales, estación río Maule en Forel, años 2018, 2019 y 2020.



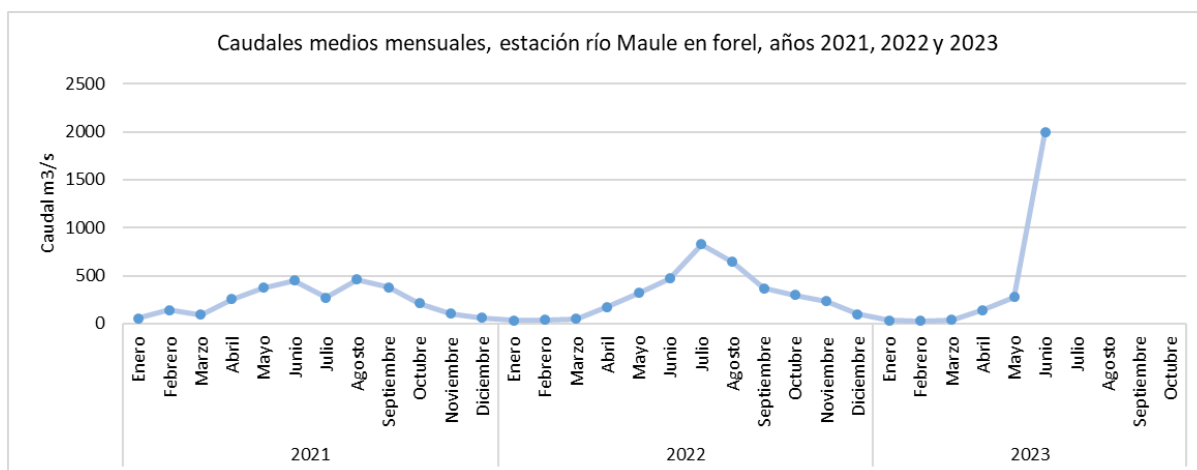
Fuente: Elaboración propia.

Por último, el gráfico 13 exhibe los datos para los años 2021, 2022 y 2023. El año 2021 responde al menor caudal medio mensual, no llegando a superar los 500 m³/s, mientras que el año 2022 intenta alcanzar los 1000 m³/s, aunque no lo logra. El año 2023 tiene un explosivo aumento, superando incluso años anteriores, superando levemente los 2000 m³/s; se infiere que el exponencial aumento guarda relación con el temporal ocurrido entre el 21 y 24 de junio del mismo año. Lamentablemente

no fue posible obtener datos para los meses de agosto y septiembre, entre los que se registró el temporal de mayor potencia en el año.

En ese sentido, este abrupto aumento en los caudales tiene directa relación con la modificación de las geformas estudiadas, donde isla Orrego (junto con los bancos laterales) fue notoriamente afectada, perdiendo gran parte de su masa y transformándose en dos bancos (parte de la masa que perdió isla Orrego estaba constituida por vegetación, donde es posible dimensionar la fuerza que trajo el caudal). Si bien la tendencia estacional está bien marcada, aumentando caudales en los meses invernales, siempre fue registrado de manera progresiva, muy diferente a lo ocurrido en el año 2023.

Gráfico 13. Caudales medios mensuales, estación río Maule en Forel, años 2021, 2022 y 2023.



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1 DISCUSIÓN

5.1.1 Clasificación del estuario

Según lo expuesto por Dalrymple et al (1992), los estuarios pueden clasificarse según su distribución de facies, dividiéndolos entre estuarios dominados por mareas y estuarios dominados por olas. La primera clasificación queda totalmente descartada para el estuario del río Maule, debido a que los mareogramas realizados para los meses de enero, febrero y marzo (gráfico 1, gráfico 2 y gráfico 3) dan respaldo de que las mareas no tienen gran influencia en el comportamiento del estuario.

En cuanto a los estuarios dominados por olas, a pesar de que no coinciden exactamente todas las características mencionadas por los autores, es posible encontrar similitudes. El estuario del río Maule se encuentra expuesto a un oleaje de alta energía, además posee gran parte de los individuos geomorfológicos descritos por Dalrymple *et al* (1992) como lo son barras, flechas y abanicos de lavado. No así con formas como un delta de fondo en la cabecera del estuario, la que no se encuentra presente en el estuario del río Maule.

Conforme a lo anterior, no sería correcto analizar al estuario del río Maule basándose en la clasificación de Dalrymple *et al* (1992).

Por otra parte, la clasificación propuesta por Cooper (1993) es más adecuada para identificar al río Maule. En los estuarios dominados por ríos se resalta la importancia del factor fluvial, destacando la importancia de la descarga de sedimentos, sin embargo, también se incluye la alta energía del oleaje como un factor, donde esta no permite la progradación.

En ese sentido, hay gran coincidencia con el estuario del río Maule y las características de un estuario dominado por río desarrollado por Cooper (1993). Tal como se desarrolló en los puntos de precipitación y caudal, el estuario del río Maule posee un régimen pluvial, donde el caudal aumenta y disminuye respecto a la estacionalidad. Esto trae consigo una gran carga sedimentaria que, una vez en la desembocadura, se ven dispersados por acción de la deriva litoral en dirección sur - norte. Frente a esto, como indica Araya - Vergara (1981), la costa oeste experimenta oleaje de energía alta a media, que no permite la progradación.

No obstante, Cooper (1993) no desarrolla de gran manera la configuración morfológica de este tipo de estuarios, solamente señala que es cíclica, interpretándose como que los individuos geomorfológicos del estuario de Mgeni son altamente dinámicos y dependen de la estacionalidad en que se estudien. Este aspecto no coincide con el estuario del río Maule, debido a que la estacionalidad afecta mínimamente a la morfología de los bancos (como se desarrolló en el punto de las precipitaciones), los que predominan todo el tiempo (identificado por la vegetación, que indica desarrollo de suelo y estabilidad).

Dado lo expuesto por Araya - Vergara (1981) el estuario del río Maule corresponde a un delta en ría, sin embargo, a criterio de la autora esto no sería preciso. El autor señala que dentro de esta clasificación no se exhibe un delta típico debido a su ubicación frente a una costa de alta energía, así, en vez de formar un delta se da paso a formas deposicionales como barras y flechas. A pesar de lo anterior, el trabajo realizado por Venegas (2014) y el presente trabajo dan cuenta de una total estabilidad en las geoformas del estuario del río Maule, por lo que el calificativo de delta estaría alejado de esta realidad. Dentro del *continuum* de tipos de desembocadura señalado por el mismo autor, el estuario del río Maule estaría mejor clasificado como un estuario. Frente a lo anterior, como ejemplo de un delta en ría se expone a la desembocadura del río Itata donde es posible encontrar claramente formas deltaicas, las que están constantemente condicionadas por aumentos o disminuciones de caudales, resultando en una geomorfología altamente dinámica.

5.1.2 Zonificación del estuario

Los resultados obtenidos en la zonificación del estuario difieren levemente de la zonificación realizada por Venegas (2014).

En primer lugar, los bancos laterales de meandro identificados tienen una superficie mucho mayor a la abarcada por Venegas (2014), esto debido a que en el presente trabajo se utilizaron perfiles de elevación en Google Earth, por lo que fue posible identificar zonas que (cubiertas por vegetación) a simple vista no se identificaban como parte de un banco lateral.

En segundo lugar, se planteó una nueva longitud para las zonas media y proximal del estuario. Mientras que Venegas (2014) sugiere que la zona media mide 5.6 kilómetros y la zona proximal 10 kilómetros, en el presente trabajo se plantea que la zona media del estuario abarca 3.6 kilómetros, mientras que la zona proximal alcanza los 12.3 kilómetros. Este cambio tiene justificación en el primer (de poniente a oriente) banco lateral de meandro ubicado en la ribera sur del río Maule. Como señala Araya - Vergara (1981) la zona proximal de un delta en ría se encuentra constituida principalmente por meandros estuariales y, por consecuencia, por bancos laterales de meandro. En este sentido, el banco lateral recién nombrado está ubicado en una zona donde aún se distingue un canal meándrico, justo antes de que comience la forma de embudo en la boca del estuario. Conforme a lo anterior, al estar insertado dentro del canal meándrico y al poseer una morfología que infiere influencia totalmente fluvial, el banco corresponde a la zona proximal del estuario y no a la zona media.

En tercer y último lugar, se realizó una modificación en la zona de relleno óptimo. Mientras que Venegas (2014) identifica como relleno óptimo a gran parte del área poblada de la comuna de Constitución, en el presente trabajo se identificó como relleno óptimo a la terraza fluviomarina más joven sobre la cual descansa una parte de la comuna. Tal como se realizó con los bancos laterales de meandro, con ayuda de perfiles de elevación se logró identificar la superficie que corresponde a la terraza fluviomarina, la que es menor respecto del trabajo realizado en 2014.

5.1.3 Geomorfología de la zona media y distal del estuario del río Maule

El análisis morfológico realizado entre los años 2009 - 2023 no muestra una evolución significativa de las geoformas estudiadas. En ese sentido, se afirma que la morfología de las zonas media y distal del estuario son completamente estables, y donde tanto la flecha litoral sur como la flecha litoral norte son las únicas formas que tuvieron cambios significativos a través de los años. La formación constante de la flecha litoral norte y la aparición de la flecha litoral sur dejan en evidencia el aporte sedimentario del río Maule. Esto se ve exceptuado por los temporales del año 2023 donde, con un caudal que alcanzó los 2000 m³/s, tanto los bancos medios como los laterales sufrieron modificaciones notorias.

Sobre el análisis de precipitación y caudales, se registró que el río Maule tiene un régimen pluvial donde los caudales están directamente relacionados con la estacionalidad. En ese sentido, se evidenció una leve influencia de estos factores en los bancos medios y laterales, dando cuenta de leves ganancias y pérdidas de masa que no van más allá de un aspecto estacional. En imágenes de meses primaverales, posteriores a meses invernales con gran acumulación de precipitación, se manifiestan leves ganancias de sedimento en los bancos, lo que la autora asocia a la abrupta disminución de la precipitación. Por otro lado, en las imágenes correspondientes a meses de invierno, donde la precipitación aumenta notoriamente, las geoformas no presentaban ganancia de masa (pérdidas leves en algunos casos), por lo que se infiere que se debe al aumento de caudal como consecuencia de las lluvias.

Por otro lado, en cuanto a la situación actual posterior al temporal se visualiza una importante ganancia de masa en los bancos medios y laterales, también la formación de nuevos bancos medios en algunos sectores. En el caso específico de isla Orrego, goza de una gran acreción en su parte distal (Fig. 38), situación que evidenció Venegas (2014) en análisis del año 1955. El análisis realizado entre los años 1944-5 y 2011 registra la importante transformación en isla Orrego, la que a modo general sólo experimentó disminución de su superficie por acción de la erosión. En ese sentido, solo el año 1955 isla Orrego experimentó acreción en su parte distal hasta el límite máximo para no ser erosionada por la acción marina (Venegas, 2014). Por tanto, es adecuado inferir que la acreción registrada en el año 2023 (Fig. 38) será probablemente erosionada en algún momento por acción marina, retomando su forma anterior al temporal.

Así también, la situación actual registrada en terreno (posterior al temporal) registra la formación de nuevos bancos, específicamente un banco en la ribera norte del río, a un costado de isla Orrego (Fig. 38). El trabajo realizado por Venegas (2014), aparte de identificar las geoformas en el estuario, también dejó en evidencia la proyección sub-acuática de bancos en algunos casos. En base a este trabajo, es posible dar cuenta que en esta zona existió un banco similar sub-acuático en los años 1994 y 2007, además de que en el año 2004 este banco estuvo de manera superficial. Frente a eso, es posible afirmar que es una zona que acumula sedimentos sub-acuáticos de manera constante y que, debido a un aumento en la carga sedimentaria que trajo el caudal del río, logró acreción hasta manifestarse en la superficie.

En otro aspecto, hace importante destacar que, tras el paso del temporal los más afectados resultaron ser los bancos laterales unidos a la ribera norte del río. Tal como indica Venegas (2014), la construcción del espigón de isla Orrego se hizo con el propósito de desviar el caudal para proteger la comuna ante

crecidas. Por tanto, sería posible proponer que, por consecuencia del desvío de caudal ante futuras crecidas los bancos laterales seguirán siendo los más afectados y, junto con esto, también serían propensos a recuperar masa más rápido.

Araya - Vergara (1981) hablaba de la presencia de una proyección de barra submarina en el estuario del río Maule, la que Venegas (2014) también desarrolla en su trabajo. En ese sentido, se comprobó la presencia de la flecha litoral sur en los años 2011, 2014, 2016, 2018, 2020 y 2021, debido a la identificación de zonas de rompiente alejadas de la playa, lo que indica presencia de acumulación de sedimentos bajo el agua (barras y surcos).

5.1.4 Tendencia evolutiva

Respecto a lo expuesto por Dalrymple et al (1992) y su planteamiento de esquema evolutivo entre estuarios y deltas, el Maule estaría ubicado en medio de ambos términos y que para Venegas (2014) se está inclinando a un estuario (según Dalrymple, 1992), es necesario exponer antecedentes sobre su estabilidad. Tanto los bancos laterales como los bancos medios mantienen su morfología (muy parecida a la actual) desde aproximadamente los años 90s, además de que isla Orrego no registraba acreciones desde el año 1955 (Venegas, 2014). Por tanto, no se trataría de una desembocadura que constantemente evidencia cambios morfológicos importantes, pudiendo afirmar que es un estuario.

En cuanto a la situación posterior al temporal en la flecha litoral sur y dado que los sedimentos fueron movidos por acción de la fuerza del caudal, sería posible afirmar que esta volverá a ser alineada por acción de la deriva litoral, donde nuevamente será formada de manera sub-acuática hasta que gane la suficiente masa para mostrarse de manera superficial.

Sobre la flecha litoral norte, se evidenció que esta recuperó masa de manera rápida, dando paso a una lenta formación de la flecha. A diferencia de los años anteriores, es posible dar cuenta que la nueva flecha se está formando estuario adentro, directamente en la desembocadura del estero de Guenón y casi cerrándolo. En ese sentido, se infiere que la flecha se está formando más dentro del estuario por acción del oleaje, el que estaría impidiendo que se forme en su posición normal. En caso de que la flecha siga ganando longitud en la misma posición en la que está, sería correcto proponer que en algún punto llegaría a fusionarse con el extremo distal de isla Orrego, sin embargo, esto deberá ser comprobado con el tiempo.

5.2 CONCLUSIONES

Se concluye que el estudio geomorfológico realizado en el estuario del río Maule logró ser una actualización del trabajo realizado por Venegas (2014), donde además se incluyó el análisis de los factores mareas, precipitación y caudal para así encontrar una relación entre estos y la variación morfológica de las geoformas.

A pesar de que notoriamente existe una disminución de precipitaciones y caudales, el análisis de factores arrojó que su relación con la morfología es netamente estacional, impactando levemente en la ganancia y pérdida de masa en las geoformas. Los cambios morfológicos en el estuario del río Maule son totalmente esporádicos, indicando que las geoformas tienen un gran grado de estabilidad, que puede verse indicado en el desarrollo de suelo y vegetación en los bancos medios y laterales estudiados.

Dado que el principal objeto de estudio del presente trabajo es la formación y crecimiento anormal de la flecha litoral sur, se concluye que esto no se trata de una situación excepcional. Se afirma que la flecha litoral sur estuvo presente en gran parte de los años estudiados (2011, 2014, 2016, 2018, 2020 y 2021), con la característica de que su formación fue de manera sub-acuática. Es posible afirmar esto dado el estudio directo de la desembocadura, donde se registraron zonas de rompiente alejadas de la costa que dan indicios de barras y surcos importantes. Así también, al comparar el mes de marzo de 2023 (donde la flecha litoral sur alcanzó su longitud máxima) con los años donde se registró la formación sub-acuática, se evidencia que estos se encuentran en la misma posición, reafirmando que la barra siempre estuvo constituida.

Si bien los caudales registrados en los meses de verano del año 2023 son los mínimos dentro del periodo estudiado, no sería correcto afirmar que esta es la única razón por la que la flecha litoral sur comenzó a manifestarse de manera superficial. Pudiendo ser un factor que claramente incidió en el suceso, se recomienda complementar con estudios de tipo sedimentológicos con la finalidad de tener un panorama claro sobre la carga sedimentológica que está arrastrando el río, si existe disminución (relacionada con el caudal) o, por el contrario, aumento de esta.

En cuanto a su posicionamiento dentro del *continuum* de tipos de desembocaduras, la autora propone que el río Maule en su desembocadura se trataría de un estuario. Esto tiene justificación en que los bancos medios y laterales estudiados están completamente estables, sin mostrar modificaciones ni progresos significativos que se mantengan en el tiempo, al contrario, las acreciones y pérdidas de masa solamente son estacionales tal como se demostró. Esto evidencia un equilibrio entre la carga sedimentaria aportada por la energía fluvial y la acción de la energía marina frente a esto.

Dada la situación de variabilidad climática que se vive actualmente, no hay certeza sobre con qué frecuencia o si volverán a ocurrir eventos de precipitación extrema como los que afectaron a la zona central de Chile el año 2023. En ese sentido, el presente trabajo abre una puerta al estudio del estuario del río Maule en los próximos años.

En un primer aspecto y en caso de volver a atravesar por eventos extremos, sería importante estudiar si estos tendrán el mismo impacto en las geoformas estudiadas, donde fueron enormemente modificadas. Por otro lado, frente a la situación actual del estuario será necesario un monitoreo de los próximos años para evidenciar si la acreción en algunos bancos será erosionada o estabilizada, también si los bancos nuevos permanecerán o desaparecerán y, por último, la situación de ambas flechas litorales y su nueva formación.

Finalmente, si bien la ocurrencia de los eventos extremos en invierno de 2023 puede verse como una recuperación de las tendencias pluviales de años pasados, no es una situación normal que gran cantidad de precipitación acumulada sea producida por dos eventos que no superan los 7 días de duración. Así, todo lo que es activado por el agua no comienza a moverse parcialmente, sino al contrario, significa que las quebradas son activadas rápidamente moviendo todo el material seco que contenían y resultando un peligro para las comunidades establecidas en las riberas. En ese sentido, el estudio morfológico es un aporte para conocer en dónde impactan en mayor manera estos eventos y, con esto, planificar territorialmente de mejor manera.

REFERENCIAS

Aránguiz, R., Catalán, P. (2022). Revisión de los métodos de análisis de la amenaza de tsunami en Chile. En Martínez et al. (Ed). *Hacia una Ley de Costas en Chile: bases para una Gestión integrada de Áreas Costeras*. Pág. 159 - 176.

Araya - Vergara, J. F. (1970). Contribución al estudio de los procesos estuariales en las desembocaduras de los ríos Rapel y Maipo. *Revista Investigaciones Geográficas*, (20) 17–38.

Araya - Vergara, J. F. (1971). Bases geomorfológicas para una división de costas en Chile. *Revista Informaciones Geográficas*. (21-22) 5-35.

Araya - Vergara, J. F. (1976). Reconocimiento de tipos e individuos geomorfológicos regionales en la costa de Chile. *Revista Informaciones Geográficas*. (23) 9-30.

Araya - Vergara, J. F. (1981). El concepto de “delta en ría” y su significado en la evolución litoral (ejemplo en Chile Central). *Revista Informaciones Geográficas* (28) 71 - 102.

Araya - Vergara, J. F. (1982). Análisis de la localización de los procesos y formas predominantes de la línea litoral de Chile: Observación preliminar. *Revista Informaciones Geográficas*. (29) 35-45.

Araya - Vergara, J. F. (1996). Sistema de interacción oleaje - playa frente a los ergs de Chanco y Arauco, Chile. *Gayana Oceanol*. 4(2): 159-167.

Arriagada, J. (2005). *Cambios en el sistema estuarial del Maipo y su relación con obras portuarias, Chile Central*. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Chile.

Arriagada, J. (2009). *Geomorfología estuarial comparada en la zona semiárida de Chile: casos Copiapó y Choapa*. [Tesis de Magister]. Universidad de Chile

Beltrán, A. (16 de abril del 2023). *Embancamiento en la desembocadura del río Maule causa preocupación en la Perla del Maule*. Diario La Mañana. <https://xn--diariolamaana-rkb.cl/2023/04/16/embancamiento-en-la-desembocadura-del-rio-maule-causa-preocupacion-en-la-perla-del-maule/>

Benavente, N. (2015). *Relaciones dinámicas asociadas al litoral - playa - dunas anteriores del campo de dunas Los Choros, Región de Coquimbo*. [Tesis de Pregrado] Universidad de Chile.

Bird, E. (2008). *Coastal geomorphology: an introduction*. Second Edition. Geostudies, University of Melbourne, Australia. 411 pp.

Cámara de Diputadas y Diputados. (03 de mayo del 2023). Solicitan mesa de trabajo para abordar condición de desembocadura del Río Maule.

<https://www.camara.cl/cms/noticias/2023/05/03/solicitan-mesa-de-trabajo-para-abordar-condicion-de-desembocadura-del-rio-maule/>

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2015). *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. <https://www.cr2.cl/megasequia/>

Centro de Información de Recursos Naturales [CIREN] (2015). Región del Maule, provincia de Talca, comuna de Constitución. Recursos naturales y proyectos. https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2020/03/Constituci%C3%B3n_rec_nat_proy.pdf

Comisión Europea. (s.f.). Consecuencias del Cambio Climático. Comisión Europea. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_es . Consultado el 14 de noviembre de 2023.

Cooper, J.A (1993). Sedimentation in a river dominated estuary. *Sedimentology*, 40, 979- 1017.

Dalrymple, R., Zaitlin, B. & Boyd, R. (1992). Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*. Vol. 62, N° 6, 1130- 1146.

Del Pozo, A., Del Canto, P. (1999). Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII Regiones. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*. N° 113.

Dirección General de Aguas (2005). Evaluación de los recursos hídricos superficiales de la cuenca del río Maule. Informe técnico. S. D. T. N°197.

Dirección General de Aguas (2019). Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. Boletín Nro. 494 Junio 2019. [pdf] Disponible en: http://www.dga.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/boletin_06_junio_2019.pdf

Dirección General de Aguas (2020). Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca del Maule. Informe final. S. I. T. N°465.

Escenarios Hídricos 2030. (2022). *Cuencas Regenerativas, de la crisis a la Seguridad Hídrica. Hoja de Ruta Maipo y Maule*. Fundación Chile, Santiago, Chile.

Fuentes, T. (2009). *Análisis de la Contribución de la Fitodiversidad al Paisaje Terrestre Costero del Santuario de la Naturaleza Rocas de Constitución, Región del Maule, Chile Central*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Católica del Maule.

Garreaud, R. D. (2019). Análisis: “Te pillamos po’ compadre” (las causas de la megasequía). Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. <https://www.cr2.cl/analisis-te-pillamos-po-compadre-las-causas-de-la-megasequia-cr2/>

Henríquez, P. (24 de agosto de 2023). *Casi 800 milímetros de lluvias en el Maule: estos fueron los mayores acumulados del reciente sistema frontal*. Meteored. <https://www.meteored.cl/noticias/actualidad/agosto-2023-casi-800-milímetros-de-lluvias-en-el-maule-estos-fueron-los-mayores-acumulados-del-reciente-sistema-frontal-chile.html>

Instituto Milenio en Socio - Ecología Costera. (27 de enero del 2023). *Campaña científica identifica posibles causas tras el cierre de la desembocadura del río Maipo*. <https://socioecologiacostera.cl/2023/03/campana-cientifica-investiga-posibles-causas-tras-el-cierre-de-la-desembocadura-del-rio-maipo/>

Istúriz, D. (29 de octubre de 2018). *Tres consecuencias del cambio climático que ya se sienten en Chile*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. <https://www.cr2.cl/tres-consecuencias-del-cambio-climatico-que-ya-se-sienten-en-chile-revista-que-pasa/>

Lagos, G. (2013). *Caracterización geomorfológica y dinámica costera de bahías del semiárido de Chile. Casos de estudio: Bahía Tongoy y Bahía Barnes Región de Coquimbo*. [Tesis de Pregrado] Universidad de Chile.

Llorente, A. (15 de abril de 2020). *"Megasequía" en Chile: las imágenes satelitales que muestran las consecuencias de la escasez de lluvia en el país, la peor desde 1915*. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-52288489>

Martínez, C. (20 julio de 2023). *Cierre de desembocaduras de ríos: el colapso de los ecosistemas costeros en Chile*. El Mostrador. <https://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/2023/07/20/cierre-de-desembocaduras-de-rios-el-colapso-de-los-ecosistemas-costeros-en-chile/>

Montes, C. (27 de abril, 2022). *Hipersequía: Santiago y la zona central ante el escenario de un nuevo clima*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. <https://www.cr2.cl/hipersequia-santiago-y-la-zona-central-ante-el-escenario-de-un-nuevo-clima-la-tercera/>

Organización de las Naciones Unidas. (s.f.). *El agua: en el centro de la crisis climática*. [https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20afecta%20al,agua%20\(ONU%2DAgua\).](https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20afecta%20al,agua%20(ONU%2DAgua).)

Organización de las Naciones Unidas. (s.f.). *¿Qué es el Cambio Climático?*. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>

Perillo, G., Piccolo, M. (2013). *Procesos físicos en estuarios*. En Marcovecchio y Freije (Ed). *Procesos químicos en estuarios. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional*. ISBN: 978-987-1896-16-5. Pag. 48 - 83.

Piccolo, M., Perillo, G. (1997). *Geomorfología e hidrografía de los estuarios. El Mar Argentino y sus recursos pesqueros*. (1) 133-161.

Piccolo, M. (2013). Consecuencias del cambio climático en estuarios. En Marcovecchio y Freije (Ed). Procesos químicos en estuarios. *Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional*. ISBN: 978-987-1896-16-5. Pag. 288-339.

Pincheira, E. (2021). *Análisis de las interacciones y problemas ambientales percibidos por actores socioterritoriales en la cuenca media y alta del río Maule*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Concepción]. Repositorio Universidad de Concepción.

Ramírez, C. (2014). *Análisis espacio-temporal de las precipitaciones en la región del Maule en el contexto de cambio climático*. [Tesis de magíster] Universidad de Talca.

Servicio Nacional de Geología y Minería (2003). Mapa Geológico de Chile. Versión digital.

Soto, M., Arriagada, J. (2007). Características dinámicas de ensenadas estructurales de Chile central. Maitencillo-Cachagua y Papudo, Región de Valparaíso. *Revista de Geografía Norte Grande*, 38: 99-112.

Urbina, V. (24 de junio de 2023). *Región del Maule ha recibido más de 10 veces la lluvia que cayó en Santiago*. Meteored. <https://www.meteored.cl/noticias/actualidad/region-del-maule-ha-recibido-mas-de-10-veces-la-lluvia-que-cayo-en-santiago-de-chile.html>

Venegas, V. (2014). *Caracterización y análisis temporo - espacial de la morfología del estuario del Maule: zonas media y distal (entre los años 1945 y 2011)*. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Chile.

Vivanco, E. (2019). Institucionalidad del Cambio Climático en Chile. *Biblioteca Nacional del Congreso (BCN)*.
https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27116/1/Cambio_climatico_institucionalidad_Chile_2019_FINAL.pdf

Zúñiga, J. (2021). *Aspectos geomorfológicos y tendencia evolutiva del litoral de la ensenada de Concón - Ritoque, región de Valparaíso, entre los años 2009-2019*. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Chile.