



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
ESCUELA DE GEOGRAFÍA

Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo

**CAMBIOS EN EL SISTEMA ESTUARIAL DEL MAIPO Y SU
RELACIÓN CON OBRAS PORTUARIAS, CHILE CENTRAL**

JOSELYN ANDREA ARRIAGADA GONZÁLEZ

Profesor guía: José Araya Vergara

SANTIAGO, CHILE

Agosto 2005

Agradecimientos

Primero que todo, quisiera agradecer a mi Profesor Guía, José Araya Vergara por todos sus alcances y recomendaciones para que esta investigación llegara a buen término. A la Profesora María Victoria Soto, cuyas recomendaciones y sugerencias estuvieron siempre presentes.

Quiero agradecer con todo cariño a mi madre, quien confió en mí, y me dio todo su apoyo; ojalá se sienta orgullosa del trabajo que he realizado. Gracias a mis hermanas: Sandra, Clara, Pamela y Jéssica; siempre me daban ánimo en los momentos de flaqueza.

No puedo dejar fuera de este agradecimiento a mis amigos de la generación '99: Cecilia (gracias por todo, amiga!), Mariajosé (*“vivía lo indescriptible, lo imperecedero, la vida...”*), Raulito, Dano y Marcia. Gracias por los alegres momentos y por el apoyo (mutuo) que nos dimos, y que nos seguiremos dando. No puedo dejar fuera a Anita Huaico, cuyo apoyo fue fundamental en mis primeros años en la carrera, y le agradezco su sana amistad.

También quiero agradecer a Pablo y Rodrigo, quienes hicieron de tutores conmigo, cuando yo apenas me acercaba a los SIG; gracias por el tiempo que se dieron para enseñarme, y también por el apoyo brindado. A Carmencita, de quien nunca escuché un *no* por respuesta.

Finalmente, quisiera agradecerte a ti, Sergio. Muchísimas gracias por todo (ambos sabemos a qué me refiero); gracias por tu apoyo incondicional y tu disposición a escuchar y aguantar a esta cascarrabias. Gracias por tu cariño y por tu amor.

Joselyn



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
ESCUELA DE GEOGRAFÍA

**“Geomorfología del estuario del río Maipo, y su
relación con las obras portuarias.
Caso de San Antonio, Chile Central”.**

Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo

Alumna: Joselyn Arriagada González.
Profesor guía: José Araya Vergara.

INDICE

	Página
Resumen.....	3
Índice de tablas y figuras	4
I. Introducción	
1.1. Estado del asunto.....	6
1.2. Hipótesis	19
1.3. Propósito.....	19
II. Materiales y Métodos	
2.1. Área de estudio.....	20
2.2. Procedimientos.....	25
III. Resultados	
3.1. Tendencia evolutiva del estuario del río Maipo e impactos morfológicos de las obras portuarias.....	30
3.2. Situación actual del estuario y su clasificación.....	46
3.3. Análisis geomorfológico del área aledaña al estuario del río Maipo.....	50
3.4. Impactos futuros por ampliación del Puerto de San Antonio. Simulación.....	60
IV. Discusión.....	68
V. Conclusiones.....	73
VI. Bibliografía.....	76

RESUMEN

El propósito de esta investigación es conocer los cambios en el sistema estuarial del río Maipo (33° 47' S) y el papel que han tenido las obras portuarias en la evolución de éste. La tendencia evolutiva se determinó con cartas históricas, topográficas y batimétricas, además de fotografías aéreas, las cuales abarcan desde el año 1904 hasta la actualidad. Se recolectaron sedimentos de la zona de rompiente, de las generaciones de dunas y del cordón antiguo de playa. Se realizó un levantamiento geomorfológico del sector. Se tomaron en cuenta factores oceanográficos y la orientación de la línea de costa en este sector. El sistema estuarial del río Maipo ha sido modelado por efectos antrópicos; a partir de la construcción del puerto de San Antonio se produjo un proceso de acreción del litoral y una transmutación del sistema estuarial. Éste se clasificó en tres zonas: proximal, media y distal; existen formas estabilizadas y formas estacionales. Geomorfológicamente, el estuario del río Maipo presenta rasgos asociados a las rías progradadas de Chile Semiárido y a los deltas estuariales de Chile Central; constituye una zona de transición que da paso a los sistemas estuariales del sur de Chile Central. La futura ampliación del puerto de San Antonio implica un nuevo impacto en la morfología del sistema estuarial del Maipo y del litoral, por cuanto la línea de costa cambia su configuración para alcanzar un nuevo equilibrio. Se contempla la acumulación de arena - conformando nuevas playas - y una nueva transmutación del sistema estuarial del río Maipo.

Palabras claves: Sistema estuarial, deriva litoral, inducción antrópica, progradación.

Abstract

The intention of this investigation is to know the changes in the estuarial system of Maipo river (33° 47' S) and the role that have had harbor works in the evolution of this one. The evolutionary tendency was determined with historical, topographic and bathymetrics letters, in addition to aerial photographies, which include from year 1904 to the present time. Sediments of the breaking zone, the dune generations and the old cord beach were collected. A geomorphologic rise of the sector was made. Oceanographic factors were taken into account and the direction of the coastline in this sector. The estuarial system of the Maipo river has been modeled by anthropics effects; from the construction of the port of San Antonio took place a process of accretion of the coast and a transmutación of the estuarial system. This one was classified in three zones: proximal, media and distal; stabilized forms and seasonal forms exist. Geomorphologicly, the estuary of the Maipo river presents displays characteristics associated to you rías them progradadas of Semi-arid Chile and to the estuariales deltas of Central Chile; it constitutes a zone of transition that takes step to the estuariales systems of the south of Central Chile. The future extension of the port of San Antonio implies a new impact in the morphology of the estuarial system of the Maipo and the coast, inasmuch as the coastline changes its configuration to reach a new balance. A new transmutación of the estuarial system of the Maipo river is contemplated to the sand accumulation - conforming new beaches - and a new transmutación of the estuarial sistem of the Maipo river.

Palabras claves: Estuarial system, longshore drift, antropic induction, prograding coastline.

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras:

1. Elementos que condicionan un estuario.
2. Zonas características de un estuario.
3. Estuario dominado por olas.
4. Estuario dominado por mareas.
5. Elementos constituyentes en cada zona.
6. Situación área de estudio.
7. Situación del río Maipo y sus principales afluentes.
8. Situación general del estuario del Maipo.
9. Situación del puerto en el año 1904.
10. Bosquejo del Puerto, 1908.
11. San Antonio, 1917.
12. San Antonio, 1939.
13. San Antonio, 1950.
14. San Antonio, 1965.
15. Sistema del estuario del Maipo, 1976.
16. Situación del puerto y del estuario del Maipo, 1983.
17. Situación del puerto y del estuario del Maipo, 1986.
18. Situación del puerto y del estuario del Maipo, 1990.
19. Sistema estuarial del Maipo, 1992.
20. Situación del puerto y del estuario del Maipo, 1996.
21. Superposición de mapas de San Antonio, años 1904 y 1997.
22. Vista del sector portuario.
23. Zonación del sistema estuarial del Maipo.
24. Vista del río Maipo hacia el interior (atravesando el bloque costero).
25. Vista del río Maipo hacia su desembocadura.
26. Carta geomorfológica playa de Llolleo.
27. Vista a los cordones dunares 1 y 2.
28. Cordón dunar 3.
29. Laguna litoral (Llolleo).
30. Curva semilogarítmica.

31. Textura superficial por unidad de análisis.
32. Etapa 1, ampliación del puerto de San Antonio.
33. Etapa 2, ampliación del Puerto de San Antonio.
34. Diagrama de refracción del oleaje; alineamiento.
35. Carta batimétrica, San Antonio, 1985.
36. Simulación por ampliación del Puerto de San Antonio.

Tablas:

1. Material cartográfico, fotografías aéreas, atlas e información digital utilizados.
2. Clasificación tipo de zona de rompiente.
3. Tabla granulométrica, playa de Llolleo.
4. Análisis arena fina (tamiz 0.125).

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del asunto

El conocimiento de la geomorfología y de la dinámica de los ambientes estuariales en Chile Central es muy reciente y es tratado de manera muy general; entre estos estudios se encuentran trabajos realizados por ARAYA VERGARA (1970, 1978 y 1981). En ellos se investigan los problemas físicos derivados del movimiento del agua, los procesos de mezcla, así como también se analiza la distribución de la salinidad y la densidad; otro tipo de investigación está centrada en analizar la condición de turbidez fluvial en el mar. Asimismo, también existe la inquietud de determinar la terminología adecuada para referirse a estas formas litorales, de acuerdo a las fases de formación de estuarios, así como también de las formas encontradas. En este último caso, se logra determinar una zonificación de sistemas estuariales en Chile Central (ARAYA-VERGARA, 1981).

Otro acercamiento importante en materia de sistemas estuariales resulta de la investigación realizada por CORTÉZ (2002), para el caso del estuario del Aconcagua. Tal investigación arroja resultados interesantes en las características químicas, físicas y procesos de mezcla; asimismo, se logra establecer su localización dentro de las costas de Chile Central.

Por otra parte, PASKOFF *et al.* (1983) trata tangencialmente el tema estuarial, pues ahonda en la evolución de algunas playas de Chile, en donde incluye la formación de cordones litorales asociados al sistema estuarial del Maipo.

Los tradicionales estudios europeos y norteamericanos sobre deltas y estuario permiten, en parte, llegar a la realidad de la mayor parte de las desembocaduras con esquemas evolutivos y taxonómicos claros. Tal es el caso de las desembocaduras en las costas de Chile Central, que pueden estudiarse siempre y cuando se enriquezca y modifiquen algunos moldes de la Geomorfología Litoral como disciplina (ARAYA VERGARA, 1981).

De acuerdo a trabajos realizados por PRITCHARD y CASPERS (1967, en ARAYA VERGARA, 1970) se señala que *estuario* es un término hidrológico y no

geomorfológico; asimismo, PRITCHARD (1967, en ARAYA VERGARA 1970) contempla una definición de *estuario* aceptada por los especialistas: lo define como un cuerpo de aguas costero que tiene una conexión libre con el mar abierto y desde el cual el agua de mar es mensurablemente diluida con agua dulce, derivada del drenaje continental.

Por su parte, PERILLO (1995 en EVANS *et al.* 2003) señala a las rías como estuario, dando a entender que todas las rías son también estuarios, es decir, están dominadas por la mezcla de agua dulce y agua salada. Sin embargo, EVANS *et al.* (2003) concluye que una ría es un valle anegado, en donde la zona de estuario puede moverse estacionalmente, citando como ejemplo las rías gallegas.

Debido a que la expresión *delta estuarial* (entendido como acumulación de bancos que crecen desde el interior de la ría hacia el mar) se aplica a un delta desarrollado dentro de un estuario, se hace necesario buscar la forma del terreno sobre la cual se desarrolló éste, y entonces se persigue usar un concepto geomorfológico. Así, ARAYA VERGARA (1981) concluye en que esta forma en su expresión más típica comúnmente es una ría; por lo tanto, propone llamar **deltas en ría** a los deltas interiores formados en valles anegados por el mar.

Cabe destacar que DAVIES (1977, en ARAYA VERGARA 1981) ubica al **delta estuarial** como parte de un continuum de tipos de desembocadura y que constituye la fase de transición entre la ría y el delta propiamente tal (entendiendo como **delta** a una forma típicamente marina y distal).

En el caso de Chile Central, en donde la génesis de los valles inferiores está relacionada con las fases transgresivas del Cenozoico Superior, las más recientes permitieron la presencia de rías hacia el máximo transgresivo (ARAYA VERGARA, 1981); a su vez, se convirtieron en estuarios.

Una de las conclusiones encontradas por ARAYA-VERGARA (1981 y 1982) en Chile Central, se refiere a la fuerte influencia morfoclimática que parece delimitar el dominio de estos ambientes de desembocadura. Se reconocen las

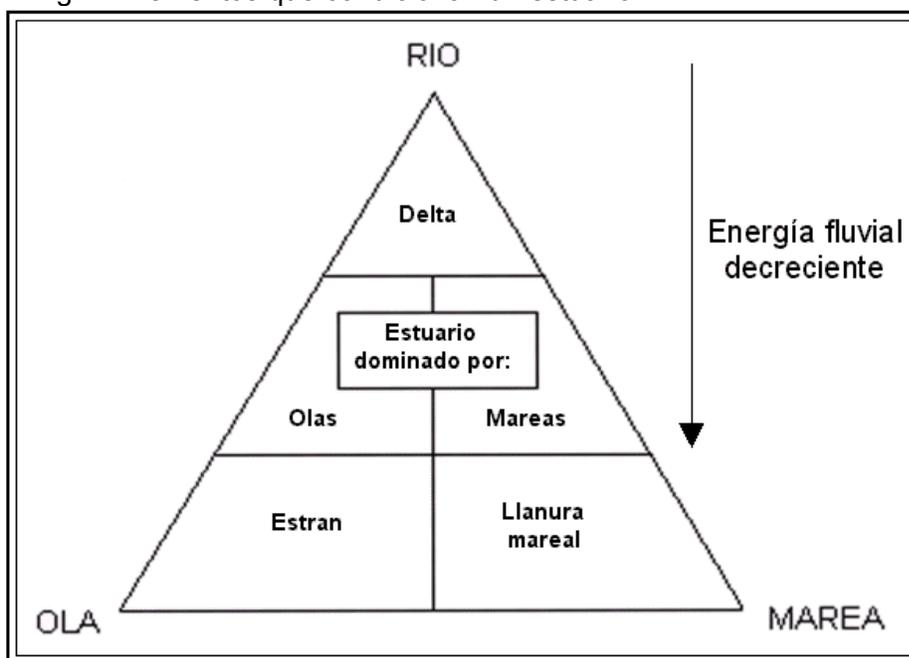
siguientes zonas en función de la significación morfoclimática:

- a) La zona de los deltas distales corresponde a la influencia morfoclimática del desierto, con aportes estivales derivados de influencias halógenas de altura.
- b) La zona de las rías progradadas coincide con las condiciones semiáridas del Norte Chico, desde el río Copiapó (27° 20' lat. S) hasta el Maipo inclusive (33° 47' lat. S). Estas paleo – rías determinadas por PASKOFF (1970, en ARAYA-VERGARA, 1982) muestran un relleno más perfecto poco ponderado por el sistema fluvial. Ello refleja a su vez la carga sólida superior que se atribuye a los ríos de zonas semiáridas.
- c) La zona de los deltas estuariales parece corresponder al área de transición entre el semiárido y el húmedo, desde la desembocadura del río Rapel (34° lat. S) y la del Bío-Bío (37° lat. S) inclusive, donde la energía fluvial es importante para calibrar canales amplios de curso inferior y para aportar abundante substancia deltaica, pero la energía marina también es suficiente como para impedir el progreso de la progradación hacia el mar.
- d) La zona de las rías se relaciona con las condiciones húmedas y muy húmedas de la Región de Los Lagos.

Componentes de un sistema estuarial

Desde el punto de vista de la masa sedimentaria, DALRYMPLE *et al.* (1992), definieron estuario como "la parte ubicada hacia el mar de un valle inundado, que recibe sedimentos de origen tanto fluvial como marino y que está sometida a la acción de las olas, las mareas y el río. Se extiende desde el límite superior de influencia de las mareas hasta el límite de las facies marinas costeras". Dicha definición implica que un estuario es un sistema cuyo desarrollo depende de la morfología de la costa (valle) y de un contexto eustático transgresivo (Fig. 1).

Fig. 1: Elementos que condicionan un estuario.

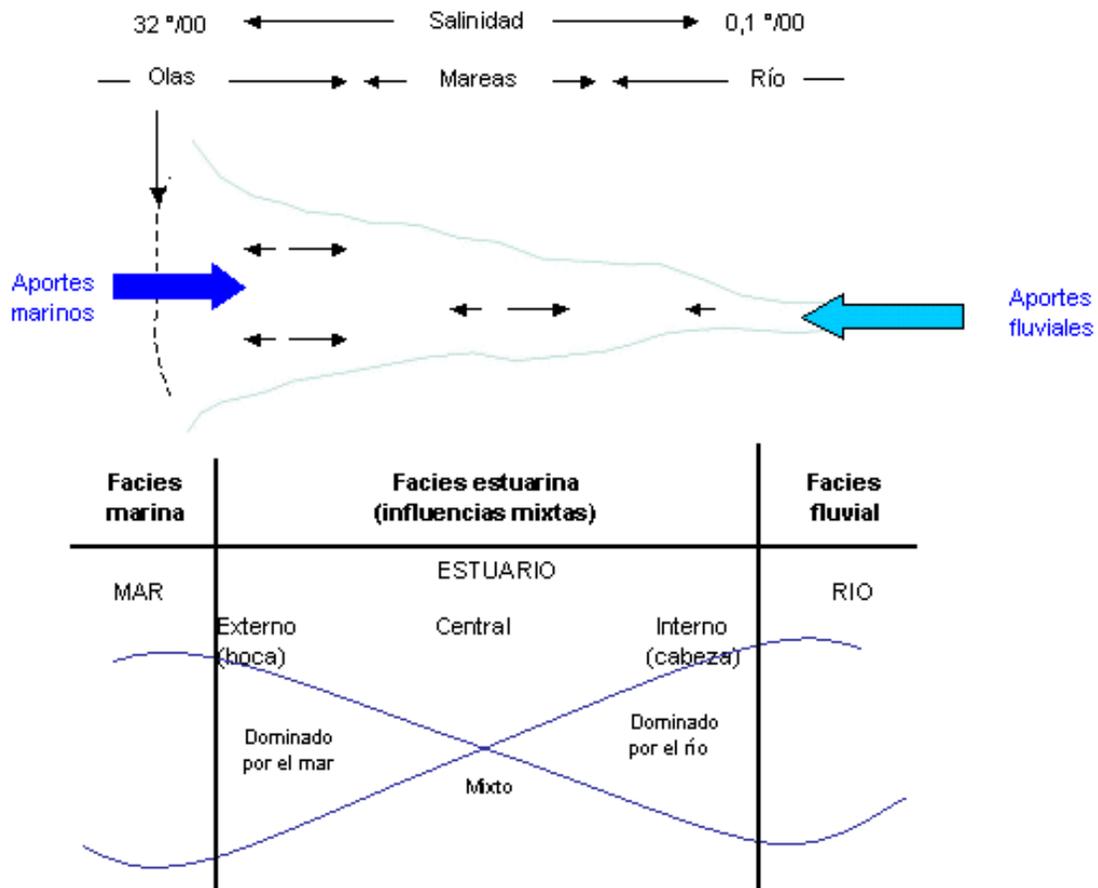


Fuente: Dalrymple *et al.* "Estuarine facies models. Conceptual basis and stratigraphic implications", 1992.

Por lo tanto, los sistemas estuariales pueden ser efímeros a la escala geológica, ya que si aumentan los aportes sedimentarios, o si baja la velocidad eustática, el estuario se rellena y se vuelve *delta*. Por lo tanto, los depósitos estuarinos se encuentran intercalados dentro de las cuencas deltaicas, formando sistemas fluviomarinos. Sin embargo, estas formas (estuario y delta) no son excluyentes, por cuanto puede darse la existencia de estuarios dentro de deltas.

Por su ubicación, el estuario está caracterizado por salinidades variables y por la interacción de procesos fluviales y marinos. Es así como en todos los estuarios se distinguen las siguientes zonas (Fig. 2):

Fig. 2: Zonas características de un estuario



Fuente: Dalrymple et al. "Estuarine facies models. Conceptual basis and stratigraphic implications", 1992.

- Una parte externa (distal, boca) dominada por las corrientes de las olas o de las mareas, que inducen una sedimentación gruesa (arenas) y un transporte aguas arriba de los sedimentos.

- b) Una parte central con energía mínima, porque se equilibran más o menos las influencias fluviomarinas, en donde se depositan sedimentos más finos.
- c) Una parte interna (proximal, cabeza) dominada por la energía del río, que induce una sedimentación gruesa transportada aguas abajo.

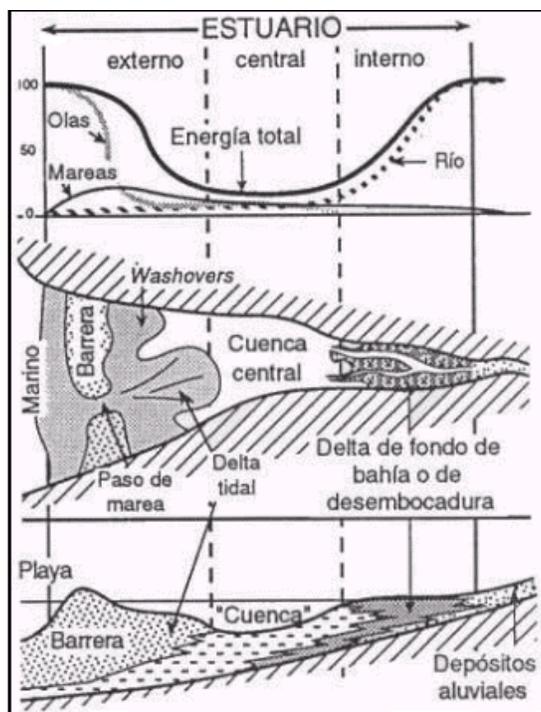
Tipos de estuarios

Los sistemas de estuarios, como ambientes costeros transitorios situados en la interfaz marina y terrestre, dependen de las olas, las mareas y de las descargas de un sistema fluvial para su fuente de alimento y su expresión geomorfológica (ANTHONY, *et al.*, 2002).

Según DALRYMPLE *et al.* (1992) sólo existen dos tipos de estuarios: los dominados por las olas y los dominados por las mareas.

- a) Estuarios dominados por las olas: En la boca de tales estuarios, las olas edifican barreras o cordones litorales emergidos o subacuáticos que impiden a las olas y a las corrientes de marea entrar en el estuario. Por lo tanto, la energía detrás de dicha barrera es muy débil y, si la desembocadura está totalmente cerrada, se forma un laguna. Por disminución de la pendiente y aumento de la sección por la cual transita el agua (disminución del gradiente hidráulico), la energía del río decrece hacia el mar. Por lo tanto, los estuarios dominados por las olas están caracterizados por una alta energía en la boca, un mínimo muy pronunciado en la parte central, y nuevamente una alta energía fluvial en el fondo (Fig. 3).

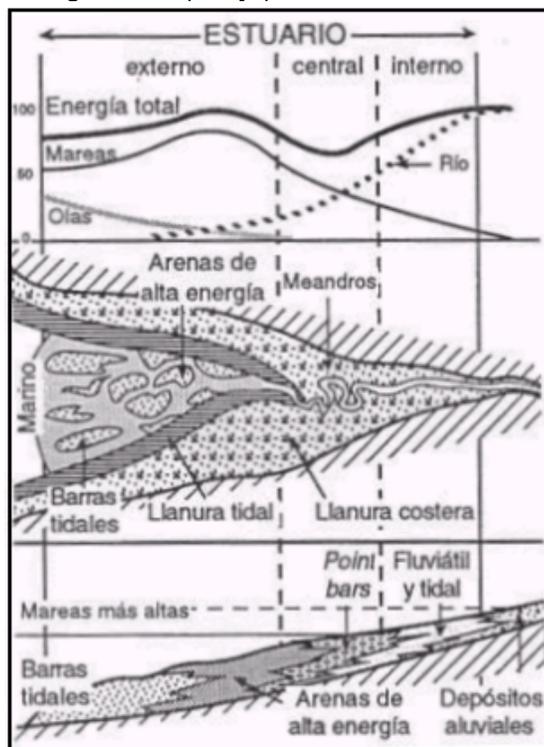
Fig. 3: Estuario dominado por olas. Energía (arriba), morfología en planta (medio) y facies en sección longitudinal (abajo).



Fuente: Dalrymple et al. "Estuarine facies models. Conceptual basis and stratigraphic implications", 1992.

- b) Estuarios dominados por mareas: la mayoría de los ejemplos actuales de estuarios dominados por las mareas están ubicados en zonas macrotidales y tienen una forma de embudo. Sin embargo, algunos se encuentran en zonas mesotidales con débil energía de las olas. En esos deltas, la energía de las corrientes de marea domina en la boca y edifica cordones alargados, que rompen la energía de las olas si existen. Por otro lado, la forma ensanchada (embudo) provoca la aceleración de las corrientes de marea aguas arriba, hasta el punto donde la fricción contra el fondo y los bordes compense dicha energía (límite de influencia de las mareas). La energía fluvial decrece aguas abajo, pero, ya que la ausencia de barrera (si es que ocurre este fenómeno) permite una mejor penetración de las corrientes de marea, el mínimo de energía es menos nítido que en los estuarios dominados por las olas (Fig. 4).

Fig. 4: Estuario dominado por marea. Energía (arriba), morfología en planta (medio) y facies en sección longitudinal (abajo).



Fuente: Dalrymple et al. "Estuarine facies models. Conceptual basis and stratigraphic implications", 1992.

Por otra parte, COOPER (1994, 2001 y 2002) señala que los estuarios poseen características propias, dependiendo si son influenciados por las olas, mareas o por el régimen fluvial. De esta manera, señala un modelo para clasificar estuarios.

Por su parte, ARAYA VERGARA (1981) destaca la existencia de tres zonas en un sistema estuarial:

- una **zona fluvial** con meandros estuariales.
- una **zona deltaica interior** con bancos medios y distributarios.
- una **zona lagunar** con laguna distal semibloqueada por barrera litoral o flecha, una barrera o flecha exterior.

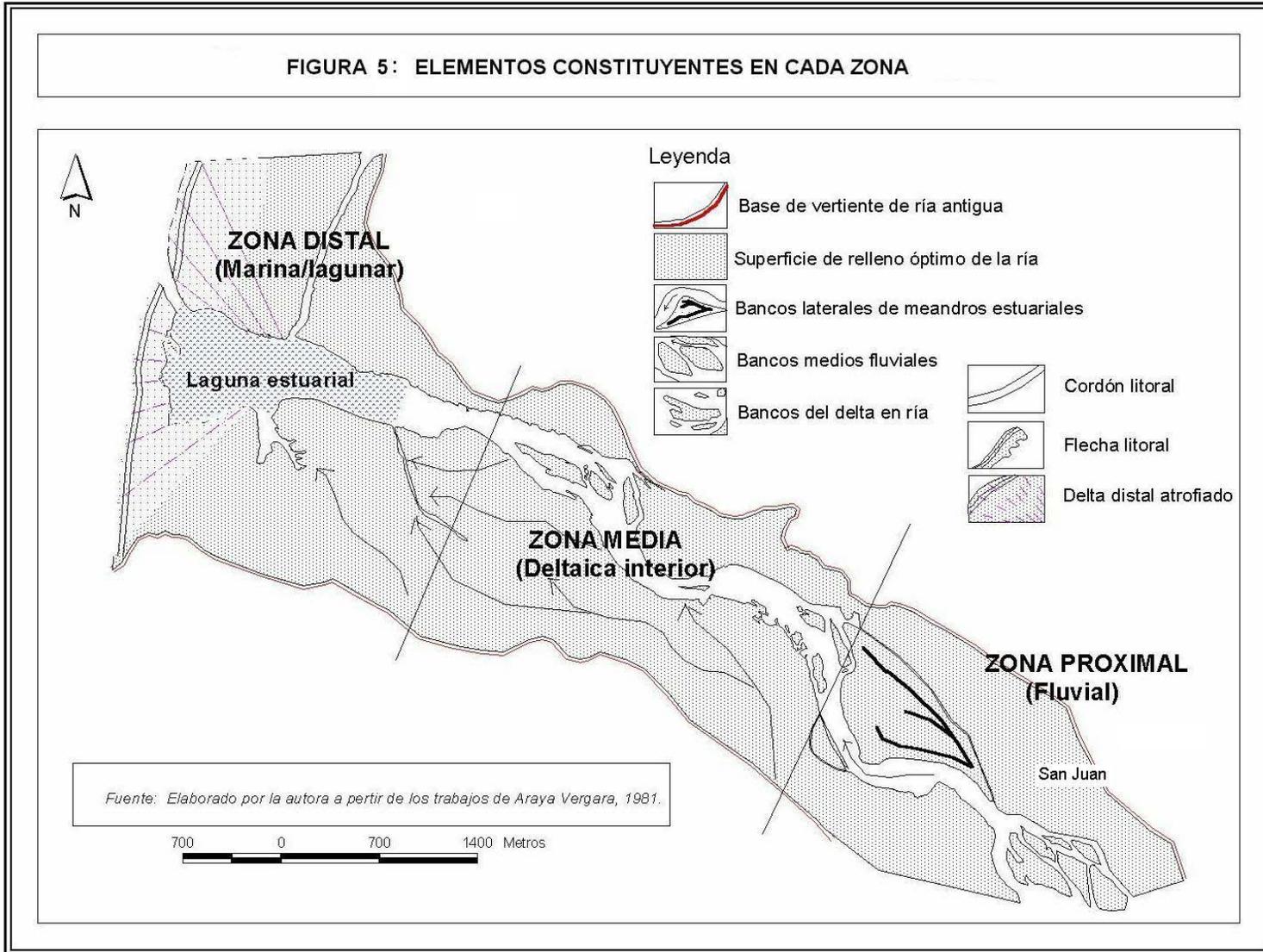
Estas zonas poseen las siguientes especificaciones (Fig. 5)

- a) **Zona proximal:** en el caso del Maipo, se determina la existencia de meandros estuariales, en el sector de San Juan, lugar en el cual el río se transforma en un canal rectilíneo de anchura considerable. Estos meandros deben sus características a la acción de las corrientes de flujo y de refluo, las cuales están relacionadas con la acción fluvial y la acción marina. Los meandros estuariales presentan una característica esencial, la cual queda reflejada en su forma, que se presenta es ancha en la parte central y angosta en los extremos; asimismo, los bancos laterales presentan una forma cuspidada, es decir, en cuernos.

- b) **Zona media:** se determina a través de un cambio en el patrón de los canales, aguas debajo de la zona de meandros estuariales. En el caso del Maipo, se nota el paso hacia una zona con canales difluentes, los cuales pierden su curvatura hacia un canal único hacia el mar, representado por la laguna estuarial.

- c) **Zona distal:** según las observaciones, es posible identificar la existencia de una laguna estuarial, la cual se localiza entre la parte distal de la zona deltaica y una flecha en la desembocadura. Las flechas se edifican con los aportes de la deriva litoral (en el caso de las costas chilenas, ésta tiene un sentido de Sur a Norte), la cual transporta sedimentos de la prolongación del cordón litoral existente más al Sur; las olas empujan estos sedimentos hacia la costa en forma de flecha, con su punta libre dando cara al oleaje y alargada en el mismo sentido que la playa de la que proceden los materiales. Su encorvadura, a modo de gancho hacia el interior de la entrante, se explica por la refracción del oleaje.

FIGURA 5: ELEMENTOS CONSTITUYENTES EN CADA ZONA



Impacto de obras costeras

Para el caso del sistema estuarial del Maipo, estas consideraciones adquieren una real importancia, por cuanto la morfología actual del área aledaña al estuario (playa, laguna litoral, entre otros) ha sido modelada, tanto por la dinámica del sistema estuarial, como por una elevada inducción antrópica.

Entre las características propias del estuario, resalta la alta capacidad de carga que posee el río Maipo, lo cual va a regular la cantidad de sedimentos aportados hacia el mar; junto a ello, se debe considerar la deriva litoral, la cual es responsable del transporte de sedimentos hacia el norte, provocando (en este caso) la acreción de la playa de Llolleo; asimismo, se genera la formación de una laguna litoral (laguna de Llolleo, Fig. 6).

En lo referente a la inducción antrópica, se hace referencia a la construcción del Puerto de San Antonio localizado al norte del estuario del Maipo, lo cual produjo importantes transformaciones en la línea litoral (POMAR, 1963), como lo son: el origen de la laguna de Llolleo, la acreción de la playa del mismo nombre, y la desviación de cursos de agua (caso del estero El Sauce, Fig. 6).

Fig. 6: Situación área de estudio.



Al respecto, POMAR (1963) señala que el socavamiento del molo sur del puerto desvió la corriente litoral, lo cual hizo avanzar la playa en cerca de 600 metros. Este mismo autor señala que durante los primeros decenios del siglo XX, la desembocadura del río Maipo se fue desplazando hacia al norte, formando hacia el lado del mar una lengua de guijarros, la que en 1937 tenía un largo de 900 mts., y en 1939, de 1960 mts., la cual se anuló con las obras de regulación de la desembocadura, como lo fue la construcción de una escollera, realizada por el Departamento de Puertos.

De esta manera es necesario notar la importancia que adquieren estos sistemas cuando son intervenidos, como el caso del río Maipo, dado el alto grado de turbidez que posee (ARAYA VERGARA, *et al.*, 1978). En el caso de las construcciones portuarias, se debe recurrir a estructuras paralelas al litoral, las cuales impiden la propagación del oleaje en los puertos (OTTMANN, 1967).

En un ambiente costero intervenido, como es el caso a analizar, se tiene que con el establecimiento de fuentes sedimentarias y bajo cierto clima marítimo, una playa tendería hacia un equilibrio natural donde las olas serían capaces de redistribuir las arenas suministradas por las fuentes. Cuando los muelles, rompeolas y otras estructuras son construidas en la zona costera, el equilibrio natural es alterado, algunas veces con consecuencias desastrosas; muchos de los más severos casos de erosión costera pueden ser atribuidos a esta alteración del equilibrio natural (KOMAR, 1976).

Este mismo autor señala los distintos impactos que se producen en el litoral debido a las obras costeras, por ejemplo, los **muelles y rompeolas**. Tal es el caso de la construcción del puerto de Madras, en la India. Éste tomó lugar en 1875, en donde la extensión del rompeolas fue de aproximadamente 1000 metros, desde la línea de costa. Este sector se caracteriza por un fuerte transporte de arena litoral desde el sur hacia el norte, por lo que la arena se acumuló en el lado sur del puerto, por lo que la línea de costa avanzó. En los siguientes 36 años (1876-1912), se formó más de un millón de metros cuadrados de nueva tierra (KOMAR, 1976). Estas apreciaciones son importantes de considerar, por cuanto constituyen ejemplos claros de cómo la intervención antrópica afecta a los

ambientes litorales.

Es así como ANTHONY y BLIVI (1999) analizaron cambios del litoral entre 1967 y 1992, en la localidad de Lome (África) por la construcción de un puerto. Éste, inaugurado en 1997, ha tenido un papel importante en la perturbación de la dinámica de la línea de costa. Por un lado, ha erosionado el sector, lo cual ha dado a lugar a un daño considerable en la morfología aledaña. Por otro lado, se ha producido el proceso denominado *progradación*, es decir, acumulación de sedimentos. En el ejemplo citado, este fenómeno ha significado el incremento de 1 kilómetro en los últimos 30 años, en el sector del rompeolas occidental del puerto.

En el caso chileno, se puede agregar lo sucedido en Constitución (POMAR, 1963): con el objeto de dotar a Constitución de un puerto marítimo, la caleta inmediata al sur de la desembocadura del río Maule fue cerrada por medio de dos molos construidos entre 1926 y 1929, lo que produjo un embaucamiento de la caleta.

1.2 Hipótesis

Se establece como hipótesis que si hay cambios morfológicos e impactos conocidos (tal como lo demuestra POMAR, 1963) por la construcción de una obra portuaria, entonces se tendría que estos cambios debieran mostrar tendencias definibles; asimismo, nuevas obras debieran producir efectos siguiendo las mismas leyes del anterior proceso, pudiendo simularse esos efectos.

1.3. Propósito

Esta investigación tiene por propósito determinar la morfología del sistema estuarial del río Maipo para tener una referencia morfológica que permita apreciar los cambios. Además, se pretende analizar las variaciones históricas y temporales, tanto del sistema estuarial como de la morfología del área aledaña al sistema estuarial del Maipo, para visualizar los cambios en el litoral por la construcción del Puerto de San Antonio, y simular la situación futura por la eventual ampliación de éste.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La hoya del Maipo comprende una extensión de 15.380 km², la mayor parte de la cual se desarrolla en la Región Metropolitana; sus cabeceras se generan en una de los sectores más altos de la cordillera de los Andes (FUENZALIDA, 1965) (Fig. 7).

El Maipo nace al pie occidental del volcán del mismo nombre, de la conjunción de tres arroyos, en una cota cercana a los 3.135 mt. Siempre en la cordillera, el río Maipo recibe tres grandes tributarios con cabeceras altas. Aguas abajo, el Maipo no tiene afluentes de importancia, salvo algunos esteros que descienden de las montañas confinantes. En este sector, el sistema Maipo-Mapocho ha desarrollado un espeso manto de sedimentos fluviales que cubre toda la cuenca de Santiago; esta planicie en la cual divaga el Maipo se extiende en forma bien desarrollada (FUENZALIDA, 1965).

Aguas abajo, y en plena llanura aluvial, el Maipo recibe al río Mapocho; éste, con su extensa red de drenaje de 4.230 km², desagua la porción norte de la hoya entre los faldeos orientales de la cordillera de la Costa y la precordillera andina.

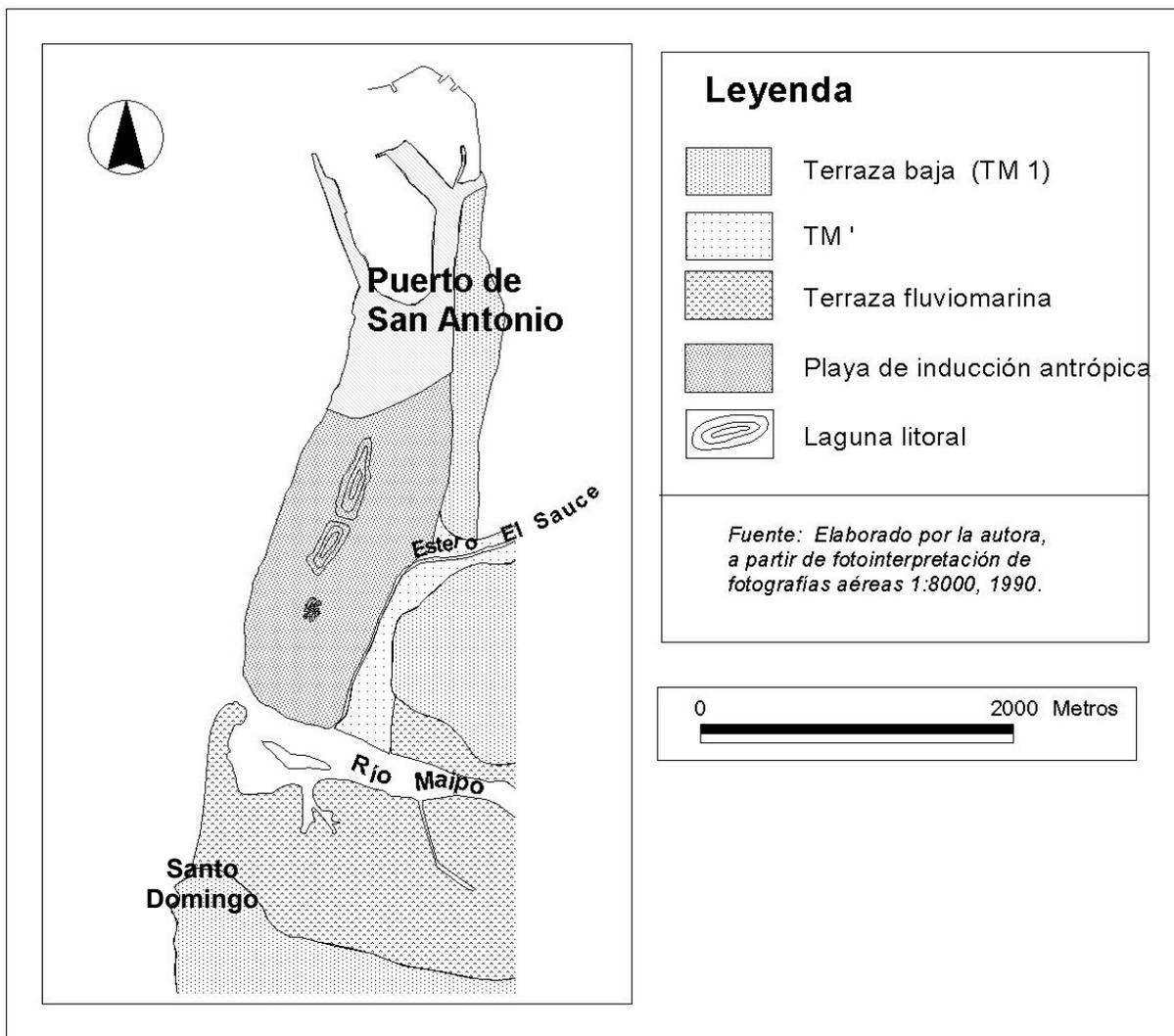
En su curso inferior, al Maipo tributan otros esteros de escaso caudal, entre los que se encuentra el estero El Sauce. Finalmente, tras un recorrido de 250 kilómetros, el río Maipo desemboca en Lolleo, inmediatamente al sur de San Antonio (Figs. 6 y 7).

El régimen hidrológico del Maipo y de sus principales afluentes andinos es **mixto (con aporte pluvial y nival)**, aunque con primacía del régimen nival (FUENZALIDA, 1965).

En cuanto a las características climáticas, la Provincia de San Antonio presenta un clima templado y cálido con estación seca y prolongada entre los meses de Octubre y Marzo. El 64% de las precipitaciones se producen entre Junio y Agosto, ambos meses incluidos. Según estos datos, la pluviosidad en un año normal, oscila entre los 450 a 500 mm.; las temperaturas del borde costero presentan una oscilación térmica leve de 6,4°C a 13°C. Se debe destacar que el momento más frío del año está por sobre los 10°C, y la media del verano se encuentra en los 19°C; la humedad relativa promedio alcanza el 80% (GOBERNACIÓN PROVINCIAL DE SAN ANTONIO, 2001).

Desde el punto de vista geomorfológico, el área de estudio se caracteriza por presentar una terraza marina alta principal, con alturas que alcanzan los 200 metros, aproximadamente; la terraza media presenta alturas que oscilan entre los 100 y 120 metros; la terraza baja alcanza alturas de entre 30 y 50 metros (en el sector de Llolleo; Tm1). El sector correspondiente a la playa de Llolleo comprende playa y dunas de inducción antrópica (Tm') (Fig. 8).

Fig. 8: Situación general del estuario del Maipo.



Fuente: Elaborado por la autora, 2004.

Hacia la desembocadura, el valle del Maipo se ensancha y la distancia entre las terrazas bajas (Tm') alcanza unos 2 kilómetros, desarrollándose un fondo relativamente plano; sobre un lecho de arenas y rodados, el canal presenta numerosas difluencias y anastomosamientos y sólo se unifica unos 2 kilómetros antes de llegar al mar, donde el lecho alcanza un ancho de unos 100 a 200 mts. A partir de la Punta de Santo Domingo se desarrolla una flecha litoral que desvía el estuario hacia el norte y que tiende a romperse en casos de crecidas; además, se desarrolla una barra submarina que la corriente de deriva proyecta hacia en norte

(ARAYA VERGARA, 1970).

Entre las características propias del estuario (en lo referente a la densidad del agua), el Maipo presenta valores de sigma-T muy poco dispersos y muy bajos (-1,8 a -0,6 aprox.); ésto significa agua homogénea y de predominio fluvial. La distribución con respecto a las superficies sigma-T sugiere mezclas de carácter preferentemente lateral; ella es predominante en profundidad hacia la desembocadura y de tendencia horizontal hacia el interior (ARAYA VERGARA, 1970).

Asimismo, el estuario del Maipo se caracteriza por presentar la excesiva turbidez que llevan las aguas de altas aguas medias. La gran turbidez que circula en la bahía es especialmente abundante en la época de altas aguas medias del Maipo (primavera y comienzos del verano); se tiene que el sector con mayor turbidez en verano llegaba a 1,8 millas de la costa (ARAYA VERGARA 1966, en RAMÍREZ, 1984).

2.2 Procedimientos

- La observación de la **evolución de los rasgos morfológicos** se llevó a cabo a través de la utilización de cartas topográficas, cartas náuticas y fotografías aéreas, como se detalla a continuación (Tabla 1):

Tabla 1: Material cartográfico, fotografías aéreas, atlas e información digital utilizados.

Cartas Topográficas	Escala	Institución	Año
San Antonio-Cartagena/San Juan i La boca	1: 25.000.-		1904
San Antonio	1: 50.000.-	I.G.M.	1986
San Antonio	1: 25.000.-	I.G.M.	1996

Fotografías aéreas			
	20.000.-	S.A.F	1976
	60.000.-	S.A.F	1983
	8.000.-	S.A.F	1990
	20.000.-	S.A.F	1992
	5.000.-	S.A.F	1998

Otros	Autor	Año
Atlas del Puerto	Gerardo Von Broekman	1908
Carta Base Proyecto OTAS	Sinia	1997

Con este material se procedió a un levantamiento geomorfológico, lo que permitió conocer aspectos del sistema estuarial.

- **Tendencia evolutiva** del sistema estuarial del río Maipo y el **cambio en la línea litoral**. Se realizó una comparación temporal de cartas topográficas y fotografías aéreas (Tabla 1), en un área que abarca desde el puerto de San Antonio hasta la Punta de Santo Domingo (Fig. 8).
- **Situación actual del sistema**. Se distinguieron los diferentes componentes geomorfológicos y sus tendencias al cambio (con especial énfasis en las transformaciones ocurridas debido a las obras portuarias); se hizo según la sistemática de ARAYA VERGARA (1981), con la cual se procedió a ejecutar un levantamiento geomorfológico del sistema estuarial del río Maipo, con análisis

de fotos aéreas y cartas topográficas anteriormente señaladas. De esta manera, se usó un modelo morfológico conceptual general, en el cual se clasificó el sistema estuarial en las siguientes zonas: proximal, media y distal.

Junto a lo anterior, se utilizaron los trabajos de COOPER (1994 y 2001), para determinar bajo qué influencia (fluvial, olas o mareas) se encuentra el sistema estudiado. Este autor revisa la morfología estuarial en función de la importancia relativa del río, las olas y la energía de las mareas.

- **Dinámica de la línea litoral y procesos asociados.** Se hizo hincapié en el *cómo* se produjo el cambio en la línea litoral; para ello, se llevaron a cabo salidas a terreno con el fin de verificar los antecedentes recopilados en cuanto a la variación de la línea de costa, enfatizando los sistemas dunares y los cordones litorales, con el fin de conocer el comportamiento de la acreción de la playa de Lolloe. De esta manera, se pudo determinar cualitativamente las diferencias de las generaciones de dunas anteriores, como indicadores de cambio; los resultados de este análisis fueron representados en una carta geomorfológica en detalle, la cual señala las distintas familias de dunas existentes en el área estudiada.

Con el fin de comparar las generaciones de dunas y determinar diferencias o semejanzas significativas entre ellas que permitan conocer su génesis, se procedió a recoger muestras de arenas en cada una de ellas, además del cordón antiguo de playa y de la zona de rompiente. Para ello, se hizo un análisis *granulométrico* y *morfoscópico*, con el fin de reestablecer el escenario en el cual se produjo la acumulación de arena.

El análisis *granulométrico* se llevó a cabo mediante los siguientes pasos:

- Se obtuvo la distribución textural de las arenas, de acuerdo a la escala de WENTWORTH (1922).
- Se obtuvieron los Índices de Trask (*selección* y de *simetría*), (en PETTIJOHN, 1963).

El análisis *morfoscópico*, el cual permite analizar los granos de arena, se realizó sólo en el rango de arenas finas, por cuanto es el que predomina en todas las muestras tomadas. Para el análisis se consideró lo siguiente:

- *Esfericidad y redondez* del grano de arena (PETTIJOHN 1963): la primera permite conocer el comportamiento dinámico de los materiales durante el transporte; la segunda, permite conocer el grado de desgaste que presentan los sedimentos. Ambos, permiten analizar y comparar el estado de los granos de arenas tanto en los cordones dunares, como en la zona de rompiente y en el cordón de playa antiguo.
- *Textura Superficial*: Para completar el análisis, se tomó en cuenta si el grano no presenta brillo (Mate, M), si posee brillo natural (BN), y si se presenta ferrugizado (F). Esto, se relaciona con el análisis de 4 tipos petrográficos: cuarzo (Q), lítico (L), vidrio (V) y ferromagnesiano (Ferr). Ello con el propósito de comparar la forma del grano con la presencia del mineral preponderante.
- **Impactos de la construcción del puerto y futura ampliación.** A partir del trabajo realizado por POMAR (1963), se analizaron las fotografías aéreas y las cartas históricas, dando énfasis en las transformaciones en el litoral como consecuencia de la construcción del Puerto. Además, se recopilaron antecedentes respecto al proyecto de ampliación del Puerto, tanto en la Ilustre Municipalidad de esa ciudad, como en la Empresa Portuaria San Antonio (EPSA).

La situación morfológica futura se simuló tomando en cuenta las siguientes componentes oceanográficas:

Componentes:

- Deriva litoral: su comportamiento general está basado en trabajos realizados por ANTHONY *et al.* (1999 y 2002), BHATTACHARYA *et al.* (2003), COOPER (2001 y 2002), OTTMANN (1967), KOMAR (1976), ; su comportamiento en el área estudiada

está basado en trabajos realizados por ARAYA VERGARA (1970, 1978, 1981 Y 1982), CORTÉZ (2002), PASKOFF *et al.* (1983), POMAR (1963) y RAMÍREZ (1984).

- Refracción del oleaje: se confeccionó un Diagrama de Refracción del oleaje, a partir de las crestas de olas, trazando octogonales para cada una de ellas. Además, se consideró un esquema realizado por ARAYA VERGARA (2001), para el área de la costa de Chile Central.
- Tipo de zona de rompiente: se realizó de acuerdo a la sistemática de WRIGHT & SHORT (1984 en SHORT, 1987), modificada por ARAYA VERGARA (1996) para su uso en fotografías aéreas; se sigue la siguiente clasificación (Tabla 2:

Tabla 2: Clasificación tipo de zona de rompiente

Tipo de Zona de Rompiente	Nomenclatura	Valores
Reflectiva	D	1 - 1,75
Terraza de bajamar	LTT	1,75 - 3,0
Barra y Rips Transversal	TBR	3,0 - 4,0
Barra y Playa Rítmica	RBB	4,0 - 5,0
Barra y Surco Longitudinal	LBT	5,0 - 5,75
Disipativa	D	5,75 - 6,0

Las observaciones se hicieron en los siguientes sectores: Playa de Lollo (a), boca del estuario (b) y Punta de Santo Domingo (c). Cabe señalar que esta observación se hizo sólo en aquellas fotografías aéreas que lo permitieron.

- Tipo de alineamiento: se determinó de acuerdo a la sistemática de DAVIES (1977, en ARAYA VERGARA 2001), el cual toma en cuenta su orientación respecto a los componentes del oleaje.
- Transporte de sedimentos: su comportamiento está basado en trabajos realizados por KOMAR (1976), ARAYA VERGARA (1978) y RAMÍREZ (1984).

Para realizar la simulación (la cual consiste en vislumbrar los cambios esperados dada la futura ampliación del puerto), el enfoque está dado en analizar el comportamiento de las variables señaladas anteriormente, junto al mapa del proyecto de ampliación del puerto. en base a la cartografía recopilada referente a la situación final del puerto. Es decir, se analiza cada uno de los componentes en el nuevo escenario, teniendo en cuenta el carácter dinámico que poseen en el litoral; junto a ello, se vislumbra la tendencia que presentaría cada componente, las que tenderían a lograr un nuevo equilibrio en la línea litoral.

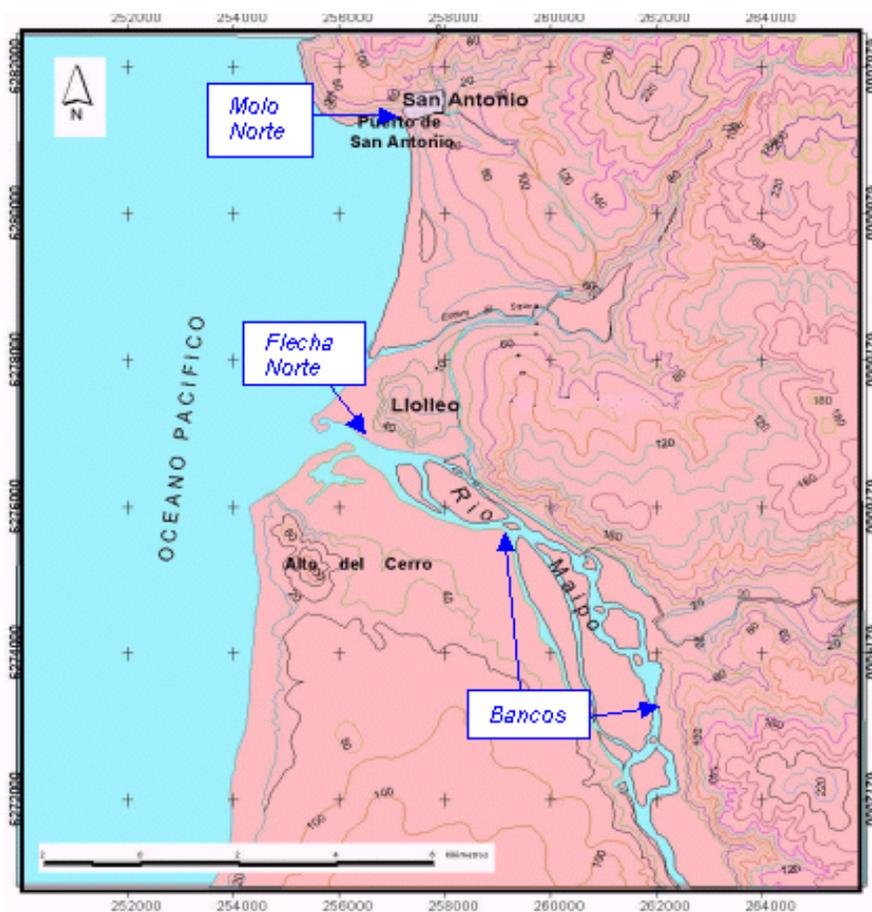
III. RESULTADOS

3.1. Tendencia evolutiva del estuario del río Maipo e impactos morfológicos de las obras portuarias.

Para desarrollar este punto, a continuación se mostrarán distintas cartas y croquis del área de estudio en orden cronológico, con su correspondiente análisis, para así vislumbrar los mayores cambios morfológicos ocurridos en la zona.

◆ Carta San Antonio, 1904.

Fig. 9: Situación del puerto en el año 1904.



Fuente: Planchetas 1:25.000.-, cartas San Antonio-Cartajena y San Juan i La Boca, 1904.

De acuerdo con la Fig. 9, y desde el punto de vista de la infraestructura portuaria, se deja ver la existencia del molo norte (Puerto Viejo) en San Antonio; junto a ello, el asentamiento urbano de San Antonio quedaba reducido a una pequeña extensión, cuya localización estaba estrechamente relacionada con el puerto.

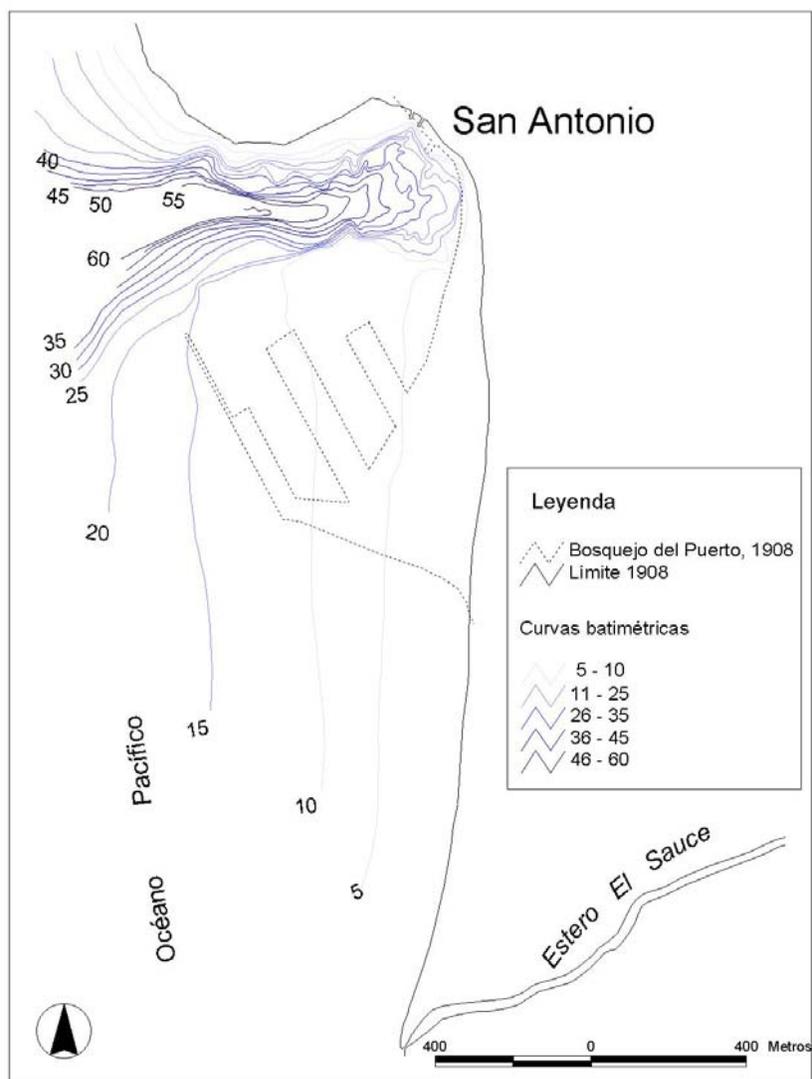
Desde el punto de vista morfológico, la figura deja entrever la existencia de una línea costera continua, extendiéndose casi sin accidentes desde el Puerto Viejo hasta la desembocadura del río Maipo; la bahía se podía extender hasta el sector sur del río (correspondiente a Alto del Cerro, hoy Rocas de Santo Domingo).

El estero El Sauce, por su parte, luego de atravesar el bloque costero desemboca directamente en el mar donde una pequeña flecha lo desvía hacia el Norte, situación que variará en el tiempo y que se explicará en el desarrollo del presente trabajo. En lo concerniente a la situación del estuario del Maipo, para ese año, se puede considerar la existencia de grandes bancos en el estuario, señalando canales difluentes que no alcanzan a transformarse en anastomosamiento completo. Cabe destacar la existencia de flechas litorales en la boca del sistema; la flecha norte está claramente desarrollada, con un encorvamiento de su punta hacia el interior del sistema estuarial; puede inferirse la existencia de una flecha sur.

◆ **Carta San Antonio, 1908.**

De acuerdo con la Fig. 10, se puede decir que la situación morfológica no varía, puesto que el estero sigue su curso hacia el mar; sólo se observa una pequeña diferencia con respecto a 1904 en su parte distal, ya que se encorva hacia el Sur.

Fig. 10: Bosquejo del Puerto, 1908.



Fuente: Atlas del Puerto, Gerardo Van Broekman, 1908.

Lo más significativo de esta carta, es que señala el bosquejo del puerto propuesto por el ingeniero Gerardo Van Broekman (BROEKMAN, 1908), el cual denota la ubicación ideal que debiera tener la construcción del puerto para ese año, el cual comprendía, desde luego, las obras de abrigo indispensables y además 630 metros de malecones para el atraque de buques. Los requerimientos para ese año decían relación con la construcción de un gran malecón desde la playa mar adentro, que debía cumplir la función de rompeolas.

Se aprecian las isóbatas que son de vital importancia para explicar los procesos posteriores de transporte de sedimentos (progradación). En la figura, se destaca que el puerto sería ampliado en un área cuya profundidad debía variar entre los 0 y 15 metros, encerrando el valle submarino de San Antonio.

♦ **Croquis del puerto, años 1917 y 1939.**

Fig. 11: San Antonio, 1917.

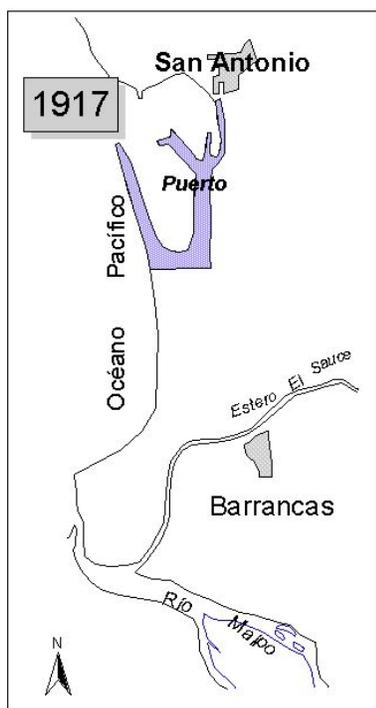
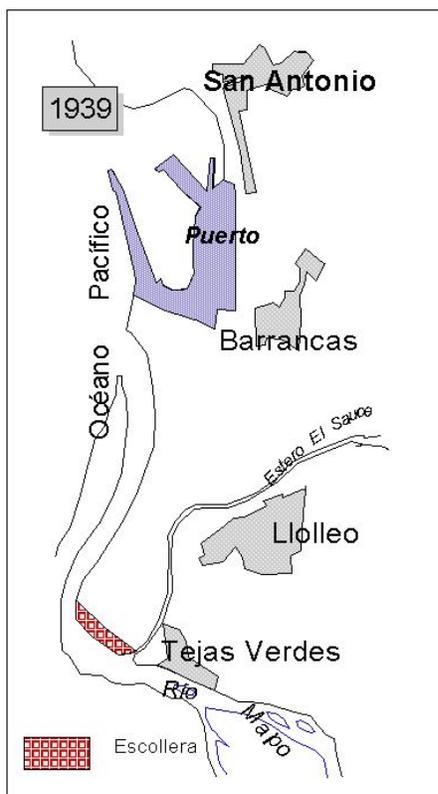


Fig. 12: San Antonio, 1939.



Fuente: Elaborado por la autora a partir del trabajo de Pomar, 1963.

En el caso de 1917 (Fig. 11), se ve que la morfología cercana al puerto (cuyas obras comenzaron el 05 de Mayo de 1912 y fueron terminadas en 1916) sufre notables modificaciones. Por una parte, comienza a producirse una acumulación de sedimentos desde el rompeolas hasta la desembocadura del río Maipo. Este proceso, denominado *progradación*, es el resultado de la interacción entre la deriva litoral y la gran cantidad de sedimentos que transporta el Maipo hacia el mar; dicho proceso se ve favorecido por la poca profundidad que presenta el fondo oceánico en ese sector, lo que permite la acumulación de sedimentos (junto con la existencia del molo sur, el cual constituye un fuerte regulador de presencia, dado que su objetivo es precisamente frenar el transporte de sedimentos y evitar que el fuerte oleaje ingrese al puerto).

Como resultado de dicho proceso, en la misma figura se ve cómo cambia el sentido de la desembocadura del Estero El Sauce. Este, como se aprecia en las Figuras 9 y 10, desembocaba directamente en el mar; sin embargo, debido a la agregación de sedimentos, cambia el sentido de su desembocadura, y vierte sus aguas en el estuario (Fig. 11). Éste es el cambio más notorio con respecto a las cartas anteriores y está estrechamente ligado a la acción portuaria. Es de vital importancia denotar el efecto de la escollera en este sector; esta infraestructura condujo a la formación de un largo cordón de guijarros, cuya génesis se puede explicar según los planteamientos de FITZGERALD (1982, en BHATTACHARYA 2003), quien propuso tres modelos conceptuales para las formas establecidas en una desembocadura. Estas son:

- a) Cuando las desembocaduras son estables, la arena se mueve a través de un canal en forma perpendicular hacia el mar.
- b) Cuando la **corriente de deriva** actúa, transporta los sedimentos (ya sea de norte a sur o viceversa) originando un canal que se va desviando hacia el sentido del transporte de sedimentos a lo largo de la línea de costa.
- c) Cuando el canal es hidráulicamente ineficiente, la entrada vertirá su flujo de manera directa al mar siguiendo el flujo señalado anteriormente, con lo que el cordón se alarga aún más.

Es importante destacar que estos procesos están estrechamente relacionados con la deriva litoral, en donde en el caso c) la intensidad -y por lo tanto, influencia- de la deriva es más fuerte que en el caso b). Así, se tiene que este hecho puede explicar el fenómeno asociado al origen del cordón de gravas.

Asimismo, se denota un crecimiento espacial de la ciudad de San Antonio y el surgimiento de la localidad de la localidad de Barrancas. Por último, en la Fig. 12 se ve la consolidación de la ciudad de San Antonio y la aparición de otros centros poblados, como Llolleo y Tejas Verdes.

◆ **Croquis del puerto, años 1950 y 1965.**

Fig. 13: San Antonio, 1950.

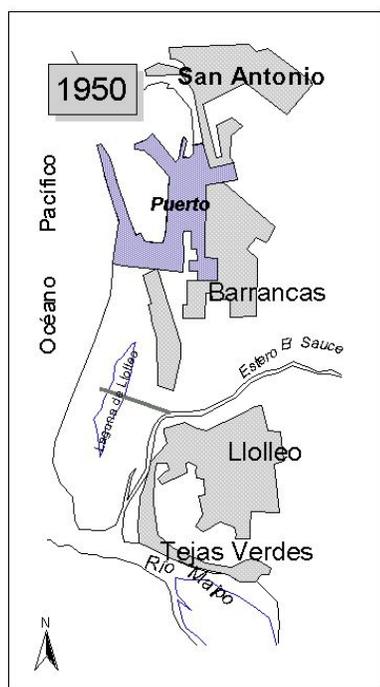
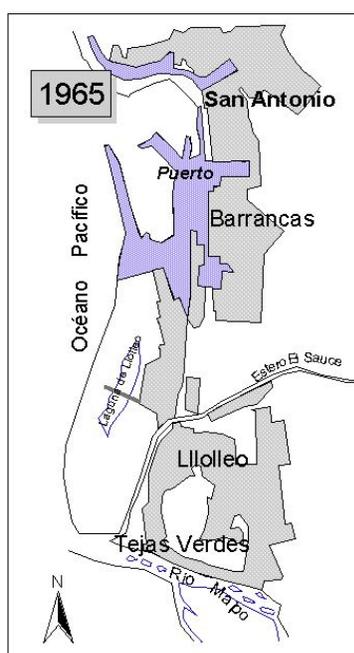


Fig. 14: San Antonio, 1965.



Fuente: Elaborado por la autora a partir de las observaciones de Pomar (1963).

De acuerdo con la Fig. 13, se tiene que el cordón de gravas y arena que se desplazaba paralelo a la línea de costa, se cierra atrapando un cuerpo de agua conformando una laguna litoral (laguna de Llolleo). De esta forma, se hace notar la fuerte influencia de la construcción del Puerto de San Antonio en la regularización de la costa y de sus resultados en la morfología litoral.

En la misma figura, se hace notar en crecimiento de la infraestructura portuaria y de los centros poblados (Barrancas, Lillole y Tejas Verdes).

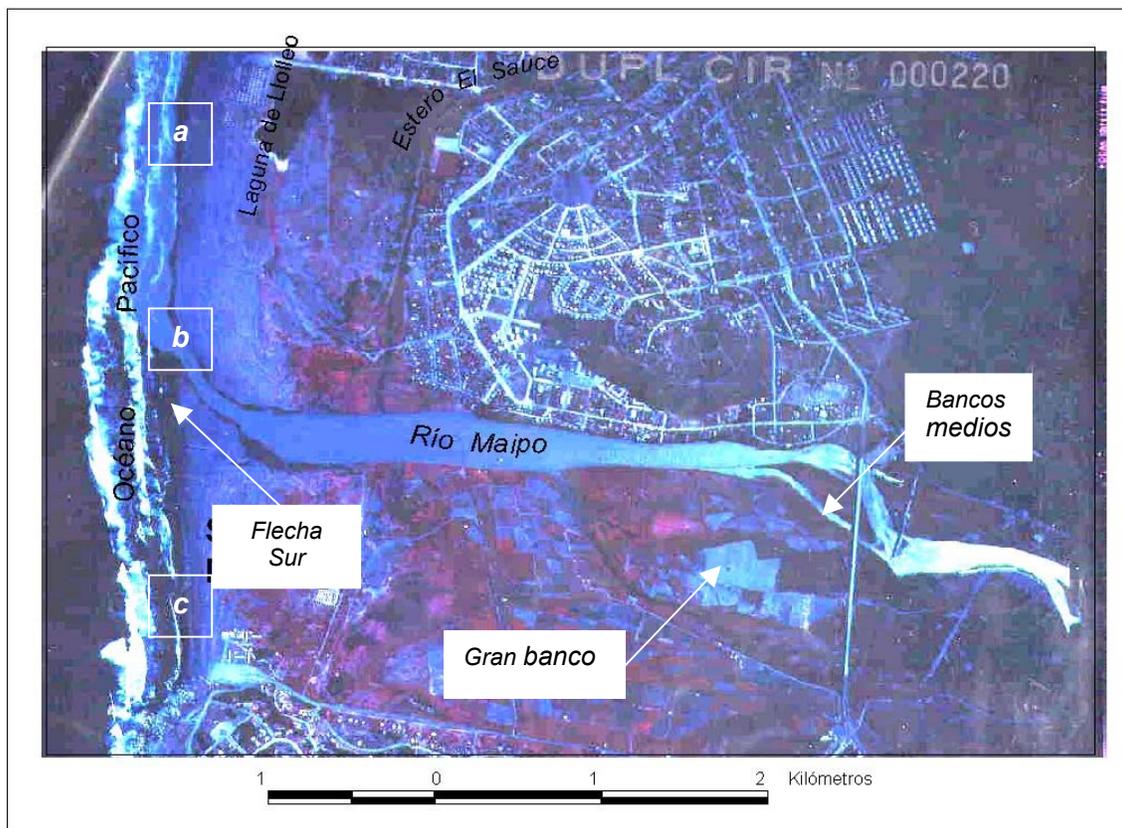
En la Fig. 14 se ve claramente el crecimiento de la infraestructura portuaria, tanto hacia al norte como hacia el sur del emplazamiento inicial; de la misma forma se ve un crecimiento de las localidades urbanas.

Por último, el estuario del Maipo aparece (como en las anteriores figuras) con un gran banco, pero especialmente en este año (1965) se destaca la aparición de bancos más pequeños.

A continuación, se analizarán croquis de fotografías aéreas y de cartas topográficas con énfasis en el sistema del río Maipo.

◆ **San Antonio, 1976.**

Fig. 15: Sistema estuarial del Maipo.



Fuente: Fotografía aérea 1: 20.000.- SAF, 1976.

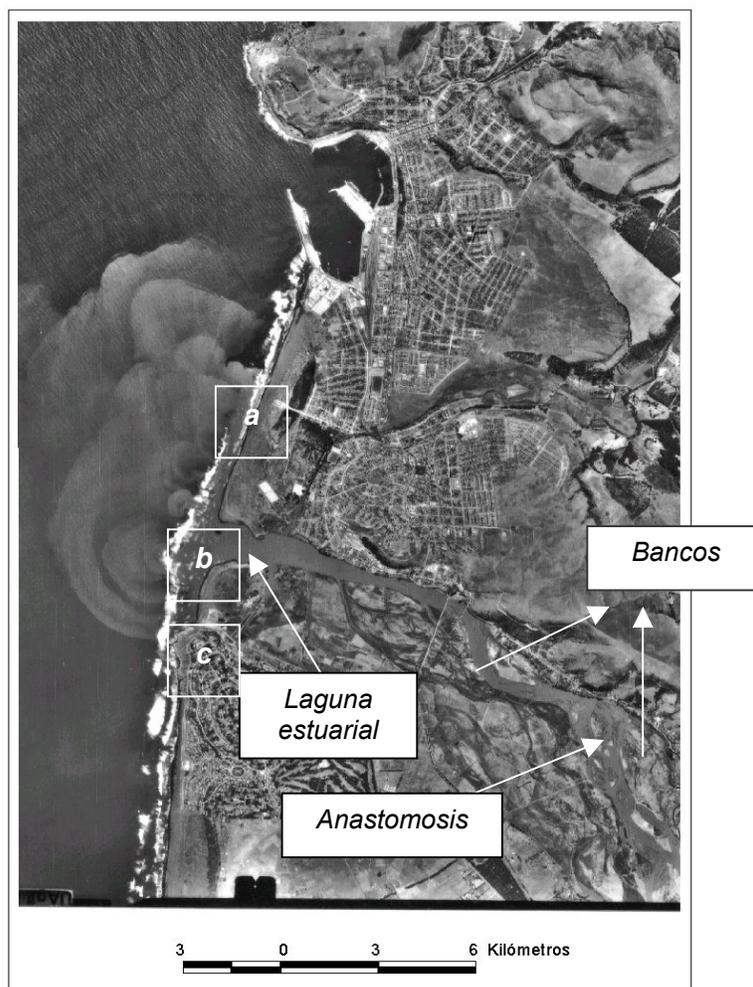
De acuerdo con la Fig. 15, se puede considerar el desarrollo de la flecha sur, en detrimento de la flecha norte, la cual no se desarrolla. La boca del estuario se presenta muy angosta y con dirección al Norte, lo que hace inferir la importancia de la deriva litoral, la cual arrastra los sedimentos hacia esa dirección; a esto se une la inexistencia de bancos hasta unos 2 a 3 kilómetros hacia el interior.

En lo referente al tipo de zona de rompiente, se tiene que frente a la Playa de Lillole (a) se presenta con un valor de 5 - 5.25 (Barra y Surco Longitudinal); en la boca del estuario (b), presenta un valor de 5.5 (Barra y Surco Longitudinal); y

para el caso de la Punta de Santo Domingo (c), presenta un valor de 5 (Barra y Playa Rítmica a Barra y Surco Longitudinal).

◆ **San Antonio, 1983.**

Fig. 16: Situación del puerto y del estuario del Maipo.



Fuente: Fotografía aérea 1: 60.000.-, SAF, 1983.

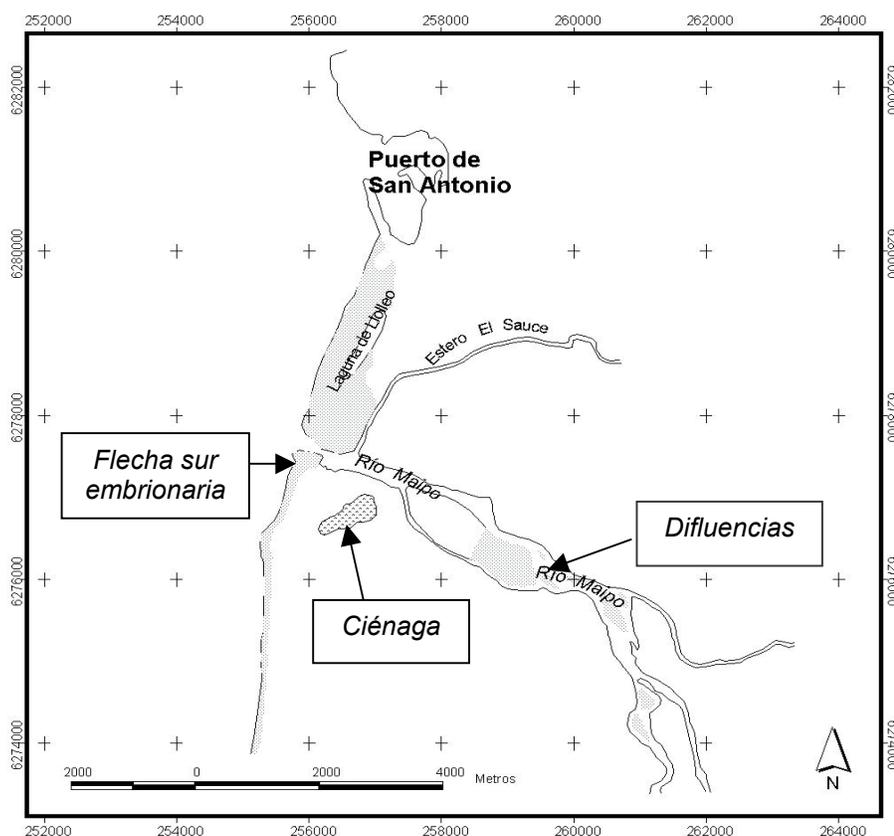
En la situación de la Fig. 16 se nota la ausencia de flecha litoral, lo cual puede tener dos explicaciones: por un lado, el caudal del río pudo crecer a tal nivel que arrasó con la acumulación de arena en la parte distal; por otra parte, un fuerte oleaje pudo haber destruido la flecha litoral.

Asimismo, en la carta se puede notar el anastomosamiento que presentan los canales del río hacia el interior (en dirección al Este).

En lo referente al tipo de zona de rompiente, se tiene que frente a la Playa de Lolleo (a) se presenta con un valor de 4.75 (Barra y Playa Rítmicas); en la boca del estuario (b), presenta un valor de 4 (Barra y Rips Transversal a Barra y Playa Rítmicas); y para el caso de la Punta de Santo Domingo (c), presenta un valor de 5.5 (Barra y Surco Longitudinal).

◆ **Croquis San Antonio, 1986.**

Fig. 17: Situación del puerto y del estuario del Maipo.



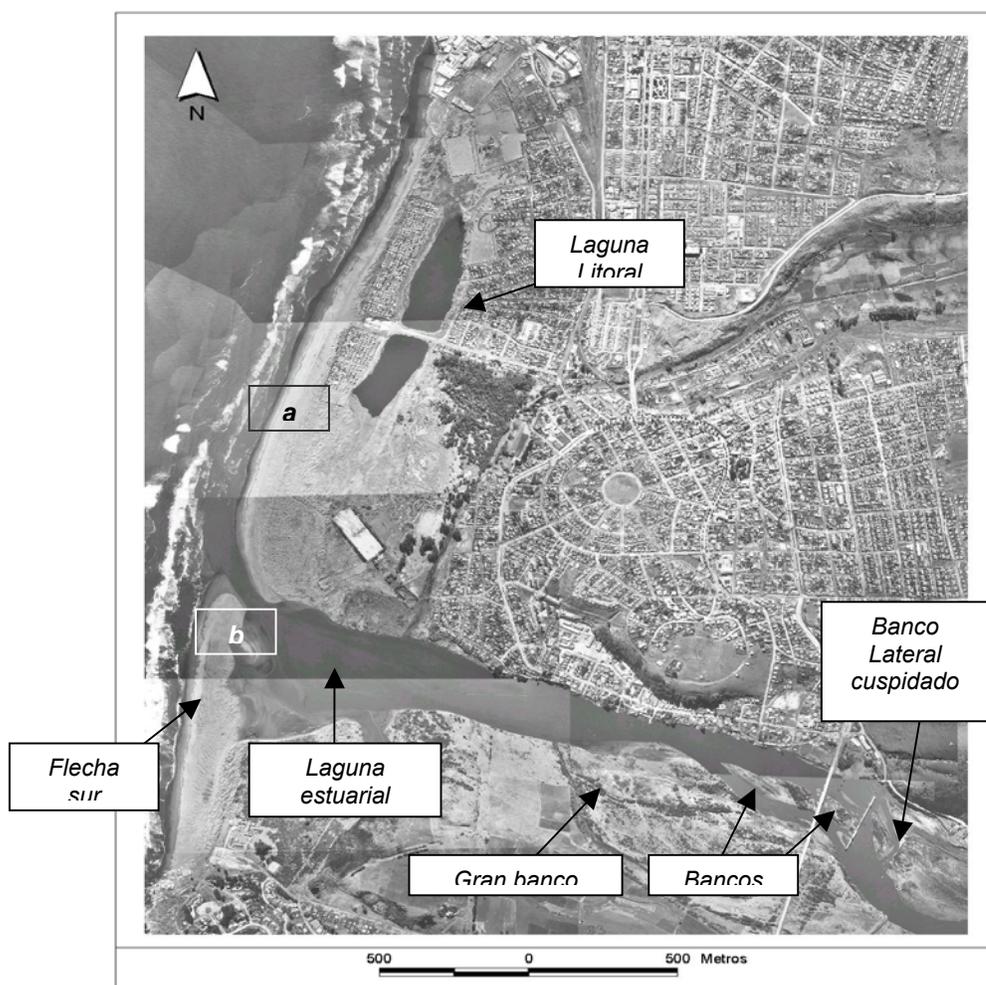
Fuente: Carta Topográfica San Antonio, 1 : 50.000.-, I.G.M., 1986

En la Fig. 17 es posible notar cómo comienza a formarse la flecha sur, lo que indica una retroalimentación del sistema. Junto a ello, se puede agregar la

individualización del gran banco estuarial por difluencia, el cual se separa de la terraza más baja. Hacia al interior del sistema estuarial, se pueden visualizar bancos medios, los cuales dan paso a difluencias, indicando una mayor carga de sedimentos; asimismo, surge una nueva forma: la ciénaga, la cual se originó por el cierre de la entrante (que se puede visualizar en la Fig. 17), producto del mayor flujo de sedimentos por parte del río.

◆ **San Antonio, 1990.**

Fig. 18: Situación del puerto y del estuario del Maipo.



Fuente: Fotografías aéreas 1.8.000.- SAF., 1990.

Lo más significativo que se aprecia en la Fig. 18 es el creciente desarrollo de la flecha sur, cuyo proceso de formación ya se ha explicado. Se ve una tendencia parecida (pero no exacta) a la situación ocurrida en 1976 (Fig.15), en donde el desarrollo de la flecha sur también fue importante.

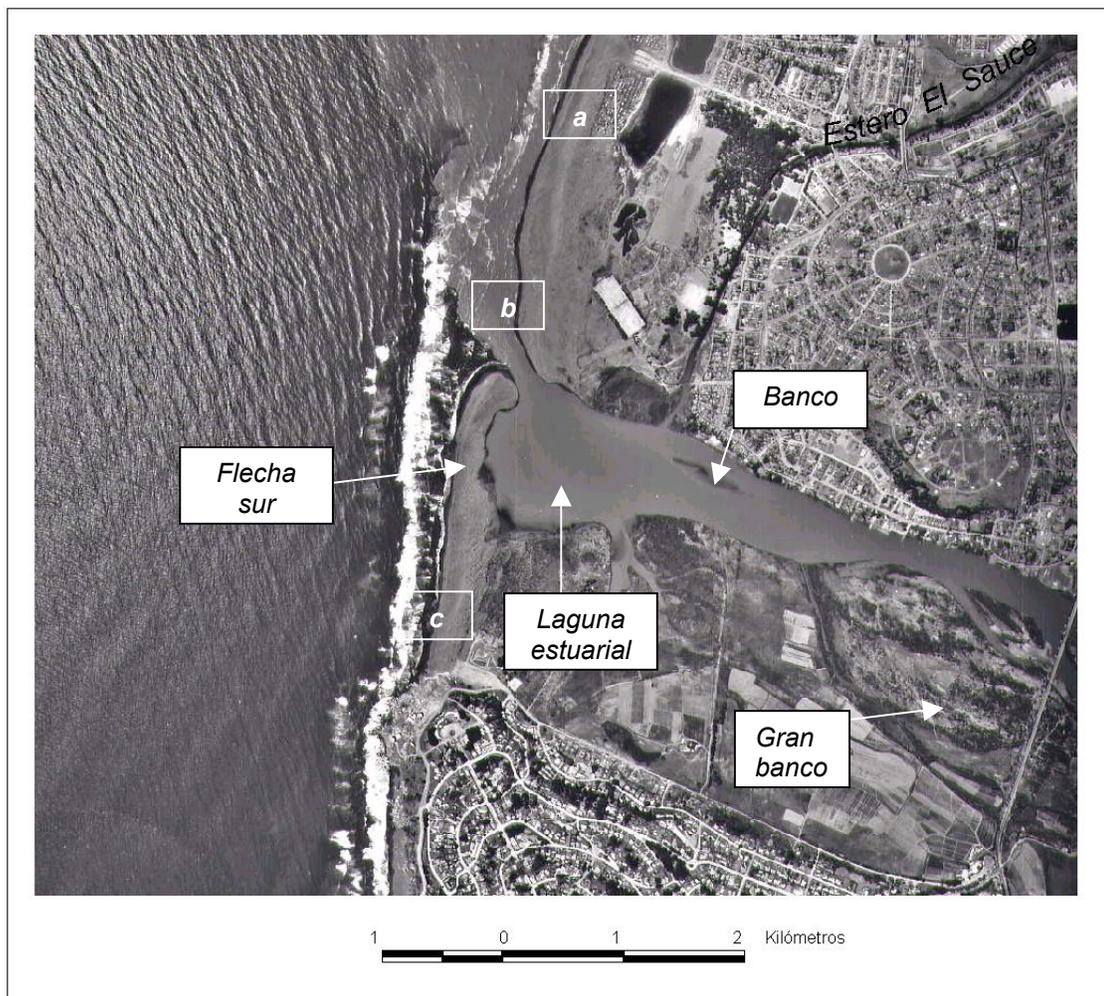
Sin embargo, la forma de la flecha varía entre estos dos años; en 1990, la flecha casi encierra la laguna estuarial, la cual presenta un ancho mayor que en 1976, año en el cual la laguna es muy angosta. En lo que coinciden ambas cartas es en la forma que presenta la boca del estuario, la cual es estrecha en los dos años comparados.

En 1990, en la zona media del estuario, es posible identificar bancos medios, lo que indica la enorme cantidad de sedimentos que acarreó el río en esta fecha; asimismo, es posible identificar bancos laterales cuspidados, los cuales son característicos del ambiente fluvio-marino de los estuarios.

En lo referente al tipo de zona de rompiente, se tiene que frente a la Playa de Lollole (a) se presenta con un valor de 4 – 4.25 (Barra y Playa Rítmica) y en la boca del estuario (b), presenta un valor de 4 (Barra y Rips Transversal a Barra y Playa Rítmica). En el punto c (Punta de Santo Domingo) no se hizo la observación, por cuanto el área no alcanza a aparecer claramente en la fotografía.

◆ **San Antonio, 1992.**

Fig. 19: Sistema estuarial del Maipo.



Fuente: Fotografía aérea 1: 20.000.-, SAF, 1992.

En la Fig. 19 es posible identificar un encorvamiento de la punta de la flecha hacia el interior del estuario; éste, producido por la refracción del oleaje, deja en evidencia la influencia marina en el sistema.

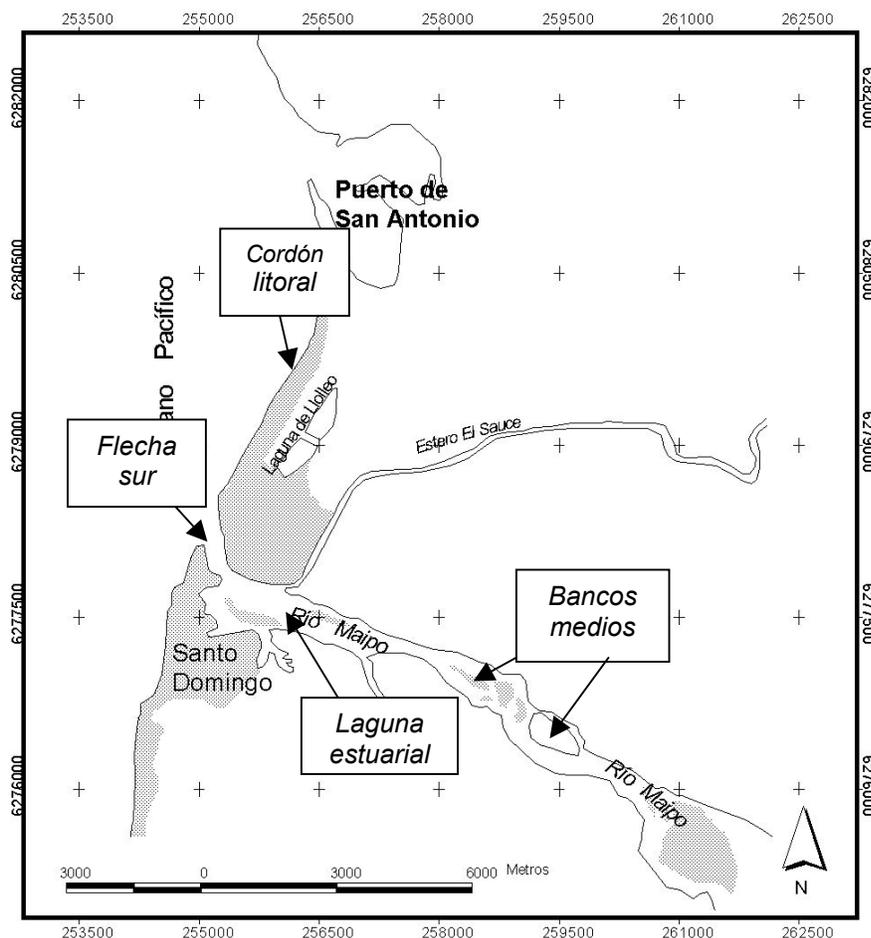
En la figura es posible identificar la existencia de un banco cerca de la desembocadura del Estero El Sauce, próximo a la boca del estuario; esta forma no se había presentado en las figuras anteriores. Esta situación deja en evidencia,

tanto el aumento de la carga de sedimentos, como la poca competencia del estuario para transportarlos.

En lo referente al tipo de zona de rompiente, se tiene que frente a la Playa de Lolleo (a) se presenta con un valor de 5.5 (Barra y Surco Longitudinal); en la boca del estuario (b), presenta un valor de 4 (Barra y Rips Transversal a Barra y Playa Rítmicas) y en el punto c (Punta de Santo Domingo) presenta un valor de 5.5 (Barra y Surco Longitudinal).

◆ **Croquis San Antonio, 1996.**

Fig. 20: Situación del puerto y del estuario del Maipo.

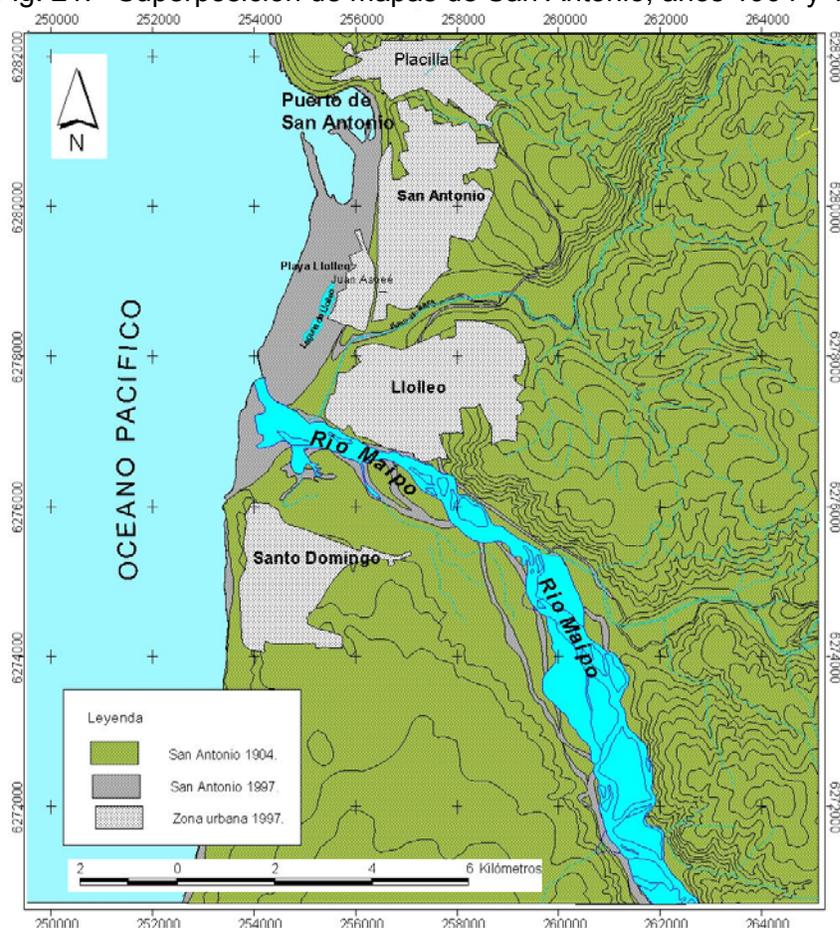


Fuente: Carta Topográfica San Antonio 1: 25.000.-, I.G.M., 1996.

En la Fig.20, se sigue notando la existencia de la flecha sur, pero lo más significativo es la aparición de una mayor cantidad de bancos medios, por lo que se puede afirmar (al igual que en el caso anterior) que las condiciones hidrodinámicas del estuario no son competentes con la cantidad de sedimentos transportados; ello, puede considerarse como un hecho estacional, puesto que pueden desaparecer.

◆ **Carta 1904 y 1997.**

Fig. 21: Superposición de mapas de San Antonio, años 1904 y 1997.

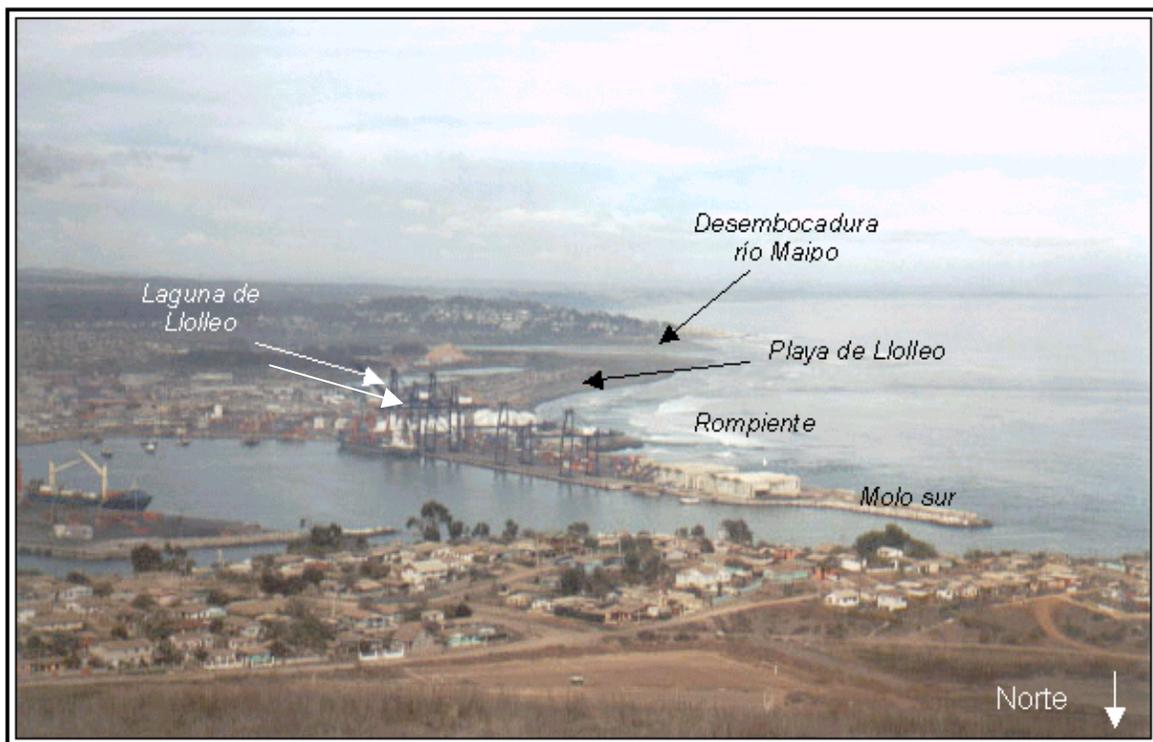


Fuente: Carta 1904: Planchetas 1: 25.000., 1904-; carta 1997: Cartografía digital, Proyecto OTAS, 1997.

En la Fig. 21, se puede tener una visión más general del avance del litoral, en particular de la playa de Lolloe sobre la plataforma sur. De la misma manera se nota la estabilización del cordón litoral que alimenta de sedimentos a la flecha sur, la cual se forma a partir del cordón localizado al norte de Santo Domingo (a pesar de su desaparición en ocasiones, tal como se ha visto a lo largo de las cartas analizadas).

La situación actual del sector portuario se puede ver en la Fig. 22:

Fig. 22: Vista del sector portuario.



Fuente: Fotografía tomada por el profesor José Araya Vergara, desde el mirador de San Antonio, 2003.

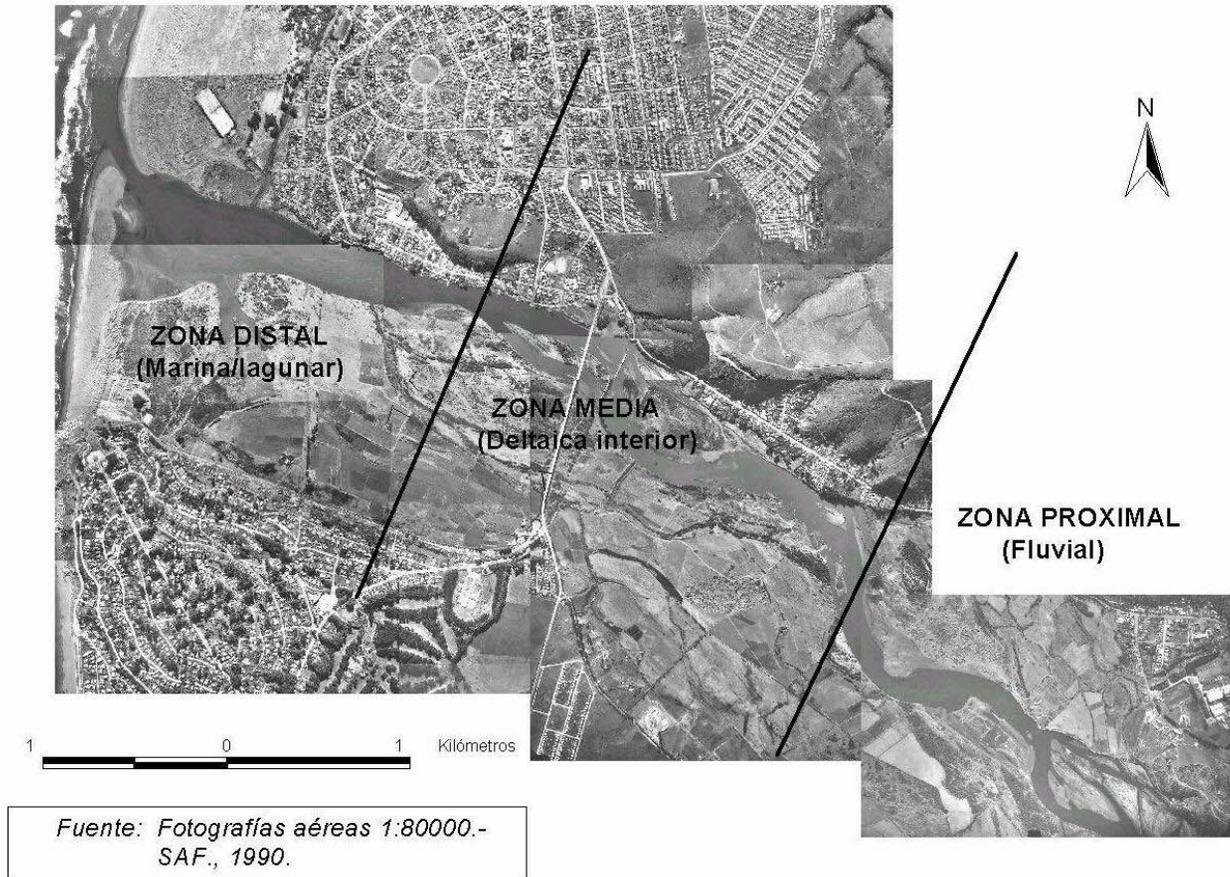
3.2. Situación actual del sistema estuarial y su clasificación.

◆ Componentes del sistema estuarial:

De acuerdo a la clasificación realizada por ARAYA VERGARA (1981), se determinaron las tres zonas en el sistema del río Maipo (Fig. 23):

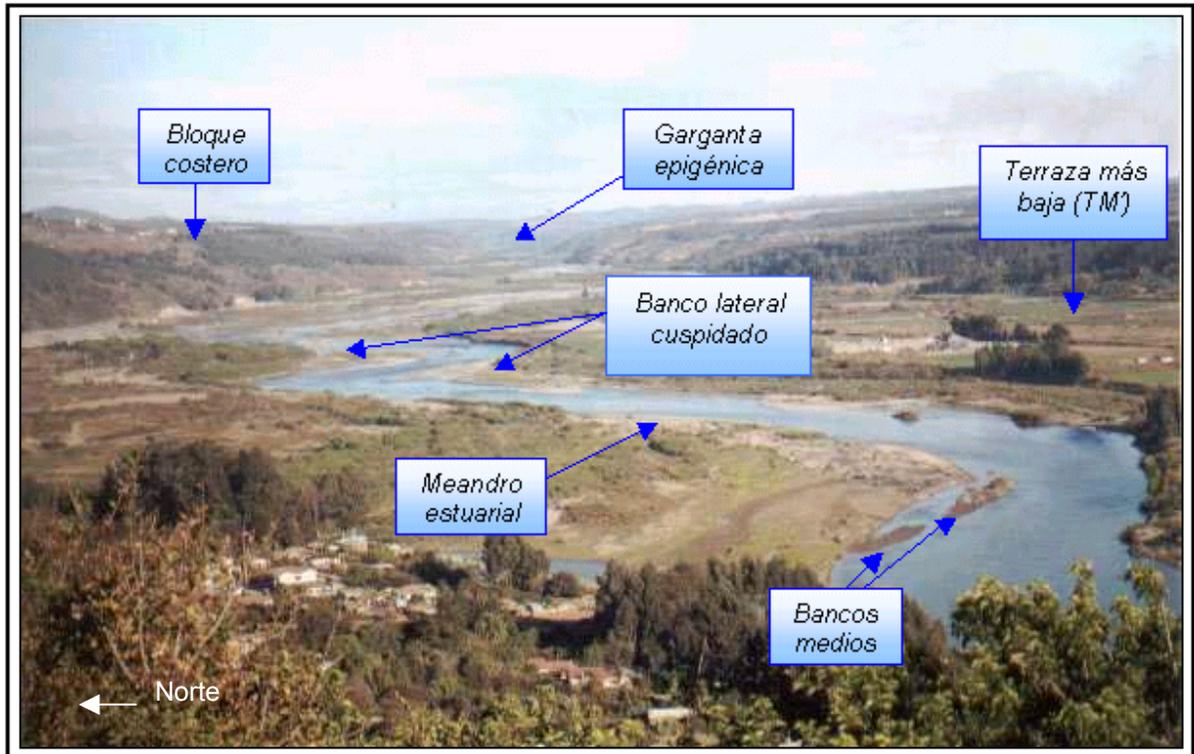
- una **zona fluvial** con meandros estuariales (zona proximal)
- una **zona deltaica interior** con bancos medios y distributarios (zona media).
- una **zona lagunar** con laguna distal semibloqueada por barrera litoral o flecha, una barrera o flecha exterior (zona distal).

Figura 23: ZONACIÓN DEL SISTEMA ESTUARIAL DEL MAIPO



Como una manera de mostrar con mayor nitidez las formas, se tienen las fotografías de las figuras 24 y 25:

Fig. 24: Vista del estuario Maipo hacia el interior (atravesando el bloque costero).

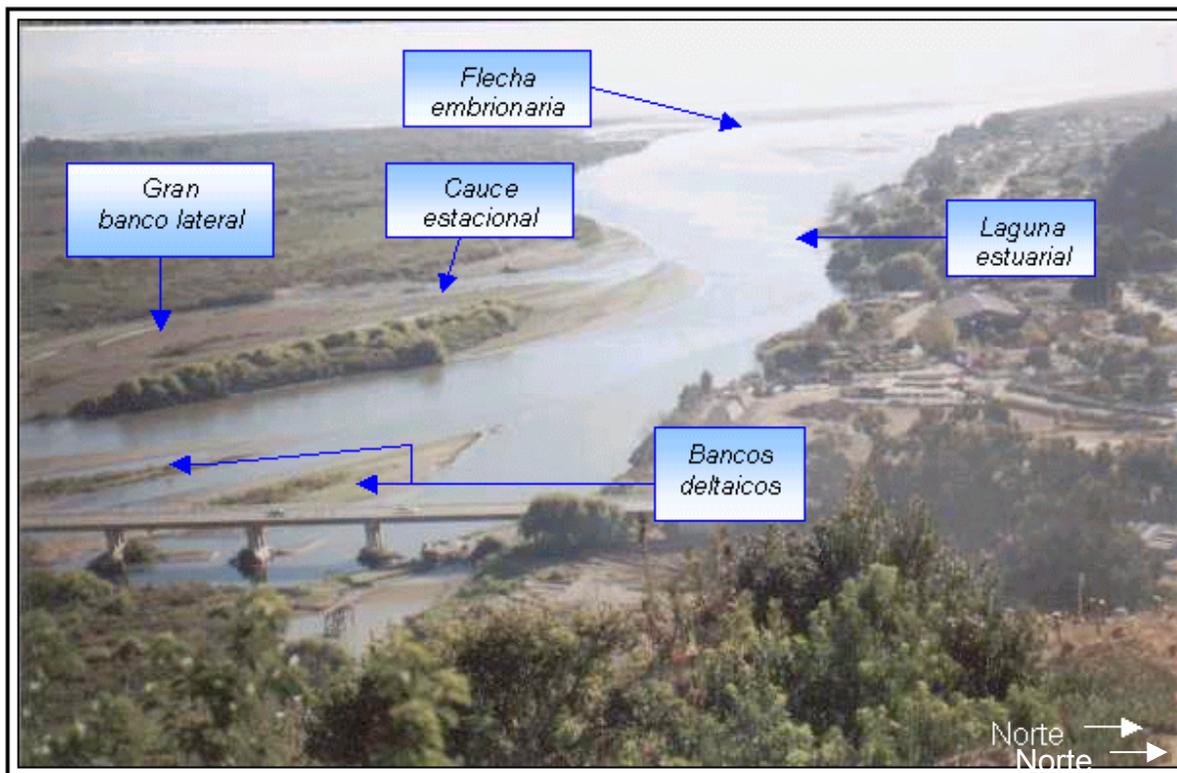


Fuente: Fotografía tomada por el profesor José Araya Vergara desde el sector de Tejas Verdes, 2003.

En la Fig. 24 se pueden identificar meandros estuariales, bancos medios, bancos laterales cuspidados, en lo que correspondería a la zona proximal y media del estuario.

Es importante señalar cómo el río Maipo atraviesa el bloque costero a través de una garganta epigénica, antes de entrar al estuario.

Fig. 25: Vista del estuario del Maipo hacia su desembocadura.



Fuente: Fotografía tomada por el profesor José Araya Vergara, desde el sector de Tejas Verdes, 2003.

En la Fig. 25, se puede notar la desembocadura del estuario del Maipo hacia el mar, notándose una flecha litoral en formación y un canal de crecida estacional que en ocasiones separa el gran banco lateral de la terraza más baja; asimismo, se pueden notar bancos deltaicos.

Es así como la fotografía deja ver la zona media y la zona distal del estuario del Maipo.

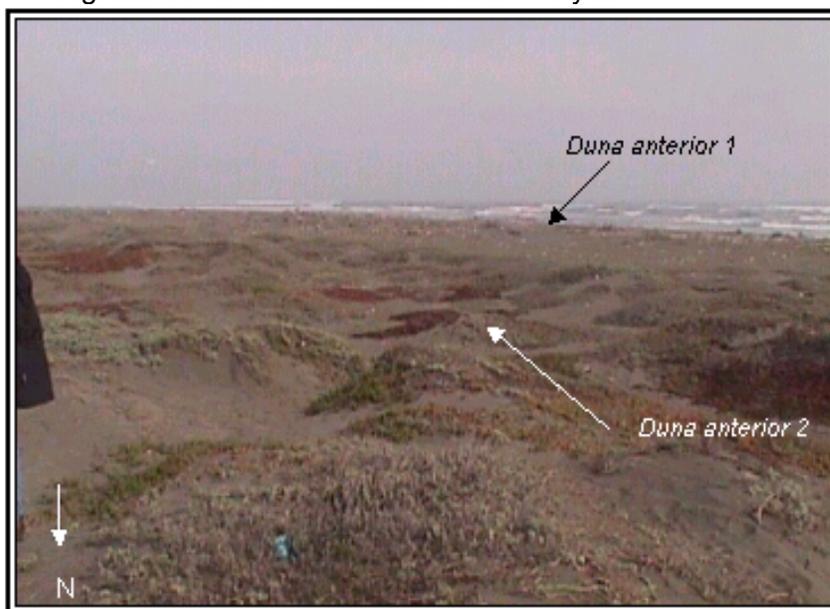
3.3 Análisis geomorfológico del área aledaña al estuario del río Maipo.

- **Levantamiento geomorfológico playa de Lollole.**

En la Fig. 26 se pueden apreciar las formas identificadas para el sector de la playa de Lollole; de acuerdo a ésta, se tiene lo siguiente: en el sector **A**, se identifica la cara de playa, en donde es posible encontrar dunas embrionarias o microdunas, asociadas a la playa actual, en donde se denota la presencia de *Ambrosia chamissonis*, la cual permite captar y acumular arena; por este motivo cumplen un papel importante en la acumulación de arena abastecida por la playa. Esta planta es reconocida como una planta pionera.

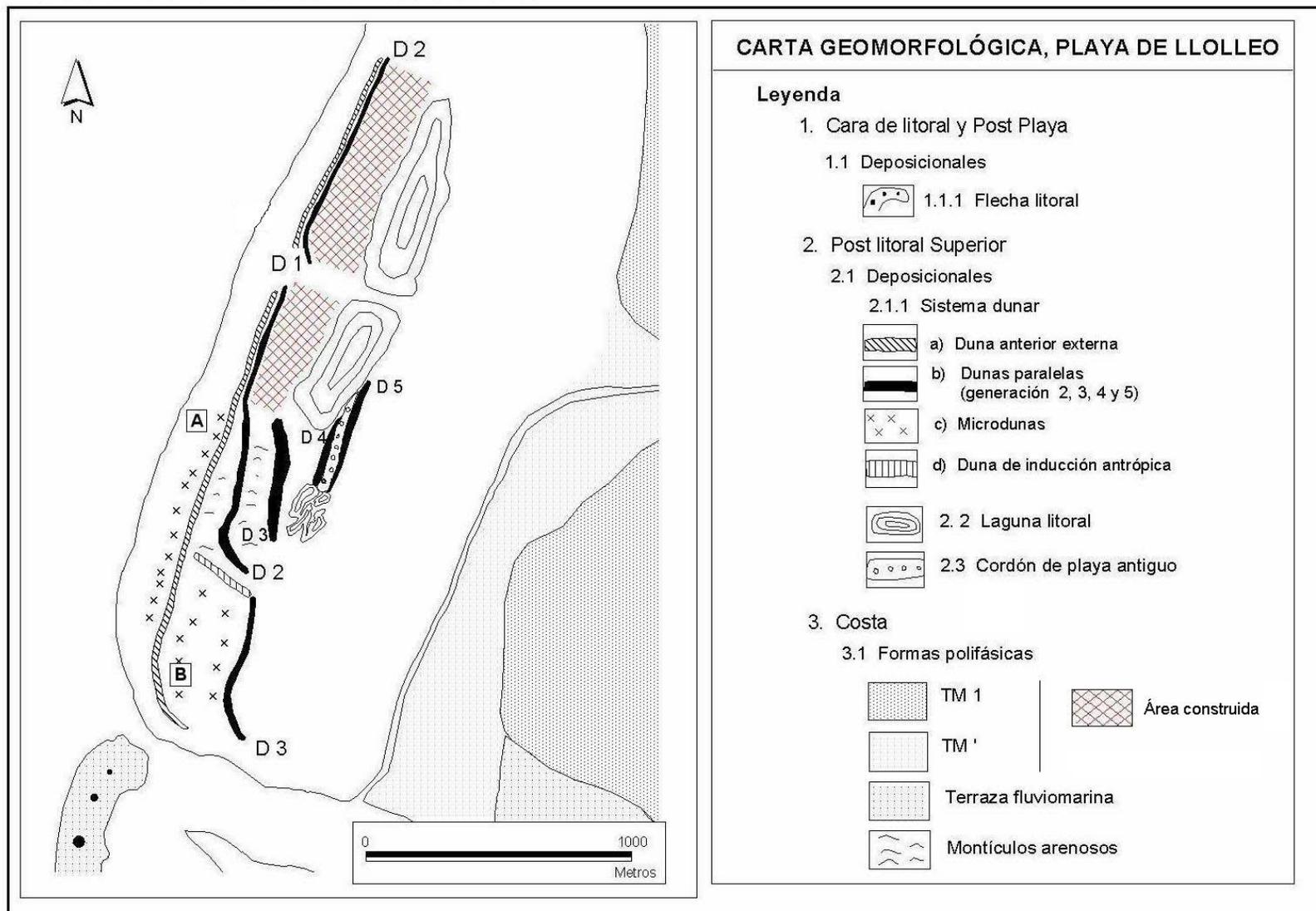
Continuando hacia el interior, es posible encontrar un cordón dunar, el cual se reconoce como el cordón de duna anterior 1 (D1). Hacia el interior, aparece una depresión interdunar, que separa al primer cordón de dunas con el segundo (D2; Fig. 27), el cual es más alto que el primero.

Fig. 27: Vista a los cordones dunares 1 y 2.



Fuente: Gentileza de Claudio González, 2003.

Figura 26: CARTA GEOMORFOLÓGICA, PLAYA DE LLOLLEO



Fuente: Elaborado por la autora, a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas, 1: 8000 (1990) y 1: 5000 (1998) y salidas a terreno.

En este cordón, además de la presencia de *Ambrosia chamissonis*, es posible identificar la existencia de otra especie: *Carpobrotus aequilaterus*. Esta corresponde a especies que permiten acumulación de arena, y logran el establecimiento de especies más tardías, como la *Baccharis concava* (CALDICHOURY, 2000),

Separando a este cordón del siguiente (D3), es posible encontrar otra depresión interdunar. El nuevo cordón dunar presenta una mayor cantidad de masa dunar, pues se presenta más alto y ancho respecto a los dos anteriores (Fig. 28); en éste es posible reconocer, además de la vegetación ya señalada, una nueva especie: *Baccharis concava*. Esta especie se ubica a sotavento del cordón dunar, por lo que se asume que es más antiguo respecto a los cordones anteriores, lo que da cuenta de su condición ecológica.

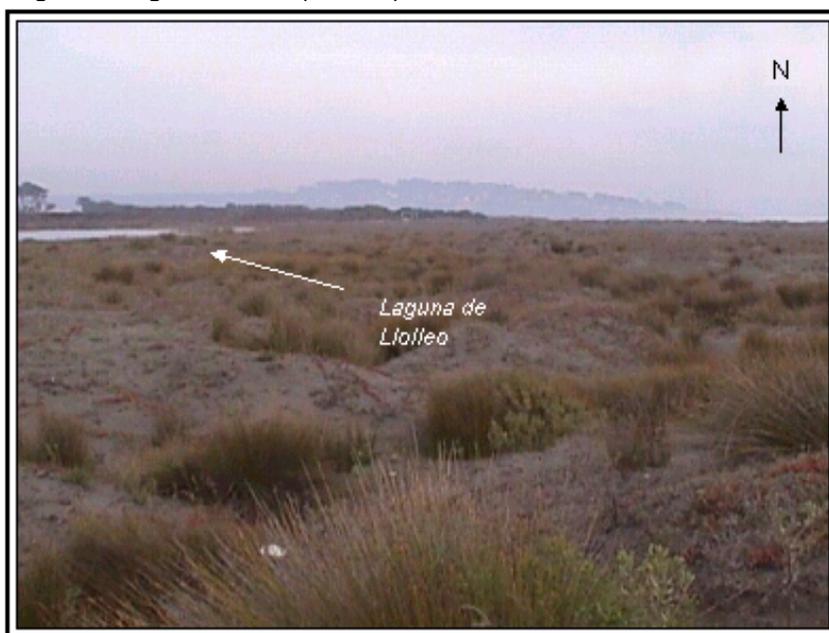
Fig. 28: Cordón dunar 3.



Fuente: Gentileza de Claudio González, 2003.

Luego del tercer cordón dunar aparece otra especie, la cual es característica de los ambientes de pantano y lagunas: *Scirpus americanus* (Batros). Esta vegetación yace sobre una nueva depresión interdunar, que contiene a la laguna litoral (laguna de Lolloe, Fig. 29), además de contener dunas aisladas.

Fig. 29: Laguna litoral (Lolloe).



Fuente: Gentileza de Claudio González, 2003.

Siguiendo hacia el interior, aparece otro cordón dunar (D4); junto a este cordón (hacia el interior) es posible encontrar un cordón de gravas y arenas, con material redondeado y aplanado. Son gravas de origen andino, (principalmente basálticas), las cuales pueden ser transportadas a lo largo de la costa.

Detrás de este cordón de playa antiguo, fue posible reconocer otro cordón dunar, el cual debe corresponder a la duna anterior 5 (D5), que posee todo el tipo de especies ya descritas.

Es importante destacar que un área cercana al estuario del río Maipo (**B**, en Fig. 26), se da la inexistencia del segundo cordón dunar. Se debe asumir que desapareció debido a un proceso de *cut*, ya que la duna anterior 3 (D3) en este sector se presenta acantilada, además de sostener *Baccharis concava* tanto a barlovento como a sotavento. Este hecho es indicativo e importante, por cuanto la *Baccharis concava* es una planta continental por lo que crece a sotavento respecto a los cordones dunares. Por ello, la existencia de esta planta, tanto a barlovento como a sotavento del cordón dunar 3 se explica por un proceso de *cut* (en períodos de braveza).

Con estos antecedentes se puede decir que la playa de Lillole se encuentra en un proceso de progradación, dada la formación de nuevos cordones de dunas anteriores, cuyo indicador preferencial lo da la abundancia de microdunas existentes en la anteplaya (para el año 2004).

▪ **Análisis granulométrico playa de Lolloe:**

De acuerdo al análisis de las muestras recolectadas en terreno, se obtuvo los siguientes datos (Tabla 3):

Tabla 3: Tabla granulométrica, playa de Lolloe.

Muestra	Diámetro menor (mm)	Nombre	Acumulado	%
Duna anterior 1	1	arena m gr	0,00	0,00
	0.5	arena gruesa	0,03	0,03
	0.250	arena media	24,66	24,63
	0.125	arena fina	95,10	70,44
	0.062	arena muy fina	99,98	4,88
Duna anterior 3	1	arena m gr	0,00	0,00
	0.5	arena gruesa	0,08	0,08
	0.250	arena media	38,68	38,60
	0.125	arena fina	98,68	60,00
	0.062	arena muy fina	99,97	1,29
Duna anterior 4	1	arena m gr	0,01	0,01
	0.5	arena gruesa	0,04	0,03
	0.250	arena media	27,43	27,39
	0.125	arena fina	97,99	70,56
	0.062	arena muy fina	99,98	1,99
Zona de rompiente	1	arena m gr	0,05	0,05
	0.5	arena gruesa	0,69	0,64
	0.250	arena media	41,79	41,10
	0.125	arena fina	97,65	55,86
	0.062	arena muy fina	99,99	2,34
Cordón Antiguo	1	arena m gr	0,01	0,01
	0.5	arena gruesa	0,35	0,34
	0.250	arena media	41,82	41,47
	0.125	arena fina	96,79	54,97
	0.062	arena muy fina	99,99	3,20

Fuente: Elaborado por la autora, 2004.

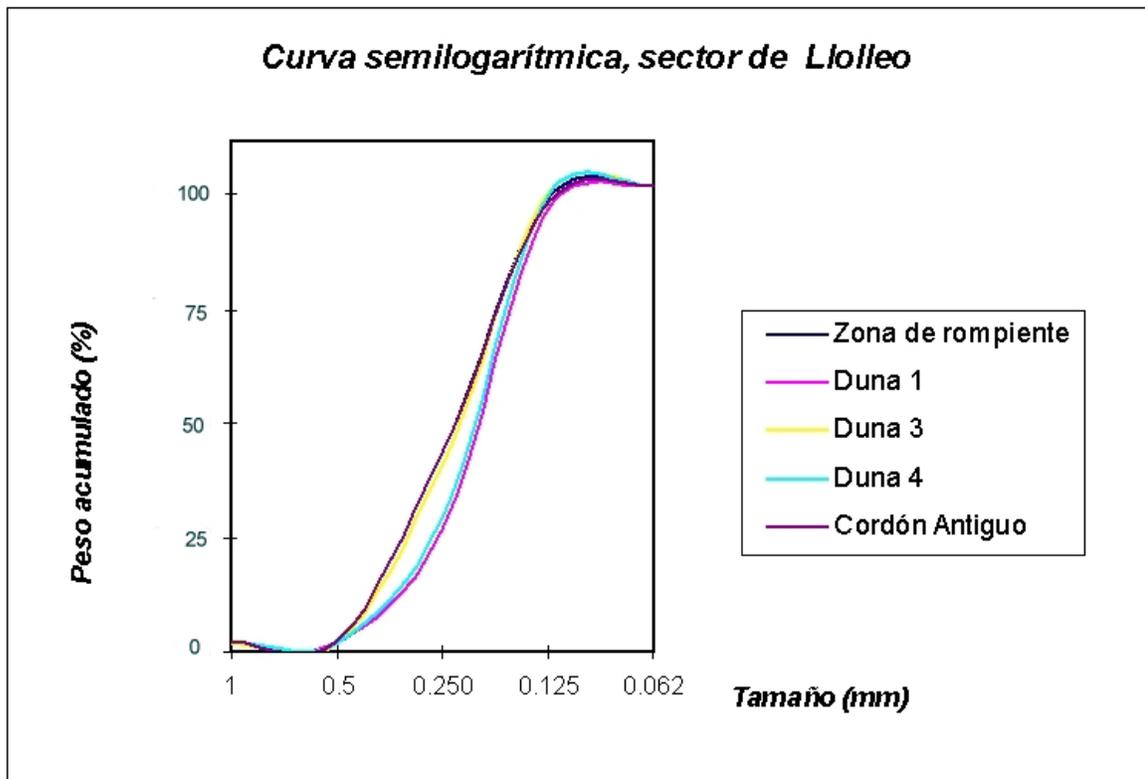
En lo referente a los rangos texturales, se tiene que en todas las muestras analizadas predomina la arena fina, seguida de la arena media. En el caso de la duna anterior 1 (D1), se tiene que el porcentaje de arena fina es de un 70,44 %, seguida de arena media, con un 24,63 %; para la duna anterior 3 (D3), el porcentaje de arena fina es de un 60%, y de un 38,60 %. Para la duna anterior 4 (D4), se da un porcentaje similar a la duna anterior 1, con valores que alcanzan a un 70,56 % para arena fina, y un 27,39 % de arena media. Para el caso de las muestras correspondientes a la zona de rompiente y a la del cordón antiguo de

playa, se tienen porcentajes similares de arenas finas y medias, lo cual diferencia a estas muestras con respecto a las otras. En la muestra de la zona de rompiente, el porcentaje de arena fina es de 55,86 %, y de arena media es de 41,10 %; en el caso del cordón antiguo, el porcentaje de arena fina alcanza a los 54,97 % y de arena media, 41,47 %.

Estos resultados se pueden asociar a la curva de acumulación en forma de S, la cual demuestra que la concentración de las partículas se produce en el rango de arena fina y arena media (0.125 y 0.250) (Fig. 30)

Además de lo anterior, para cada muestra se obtuvo el coeficiente de Asimetría (predominancia de mezclas finas o gruesas: S_k) y el coeficiente de clasificación de los sedimentos (cantidad de grados granulométricos: S_o). De esta manera, se tiene que D1 presenta una asimetría de 1.035, mientras que sus materiales se encuentran bien clasificados. Por su parte, D3, presenta una asimetría de 0.98, y sus materiales se encuentran bien clasificados; D4 presenta una asimetría de 1.006, con una buena clasificación de sus arenas. En la zona de rompiente, los materiales presentan una asimetría de 1.96, y sedimentos bien clasificados; por último, se tiene que en el cordón antiguo de playa, el nivel de asimetría alcanza a 1.009, y sus materiales se encuentran bien clasificados (ver Fig. 30).

Fig. 30: Curva semilogarítmica.



Fuente: Elaborado por la autora, 2004

En resumen, se tiene que el índice de Asimetría (Sk) para casi todas las muestras analizadas (excepto duna anterior 3 y zona de rompiente) arroja resultados mayores que 1, es decir, el modo es mayor que la mediana; a su vez, todas las muestras denotan un buen grado de selección de sus sedimentos.

▪ **Análisis morfoscóptico, playa de Lilloe:**

De acuerdo a la Tabla 4, se tiene que para las cinco muestras analizadas, las arenas poseen similares características referentes a la esfericidad media; ésta varía entre los valores 0.65 y 0.67. Sin embargo, es en el análisis de la redondez de las partículas en donde se presentan diferencias; éstas se distinguen en la muestra 3 (D3) y la muestra 5 (cordón antiguo), pues sus arenas son redondeadas (R), a diferencia de las demás muestras, en donde las arenas son subredondeadas (SA).

Tabla 4: Análisis arena fina (tamiz 0.125).

N° MUESTRA	DESCRIP.	ESF. MEDIA	DESV. ST	RED. MEDIA	DESV. ST	MINERALOGIA (%)				TEXTURA SUPERFICIAL (%)			
						Q	V	L	Ferr	Br	Mat	BN	F
1	Z. Romp	0,67	0,129	0,378	0,16	22	20	46	12	34	52	14	38
2	D. Ant. 1	0,659	0,128	0,396	0,19	24	16	44	16	18	70	12	36
3	D. Ant. 3	0,65	0,0134	0,452	0,135	28	16	38	18	28	58	14	34
4	D. Ant. 4	0,664	0,138	0,334	0,153	32	16	8	1	12	68	16	40
5	Cord. Antiguo	0,632	0,146	0,46	0,177	32	46	46	4	10	80	10	50

Fuente: Elaborado por la autora.

En lo referente al análisis mineralógico, se tiene que en todas las muestras analizadas predominan los *líticos*, seguidos por los *cuarcos*. Para el caso de la muestra 1 (zona de rompiente) se tiene un 46 % de *líticos*, seguido por un 22% de *cuarzo*; la textura superficial predominante corresponde a *mate*, con un 52%; junto al material *ferrugizado*, con un 38 % (se pueden dar ambas texturas en un mismo grano) .

Para la muestra 2 (D2), se tiene la presencia de un 44% de *líticos*, seguido de un 24% de *cuarzo*; en cuanto a la textura superficial, se tiene un 70% de *mate*, y un 36% de textura superficial ferrugizada.

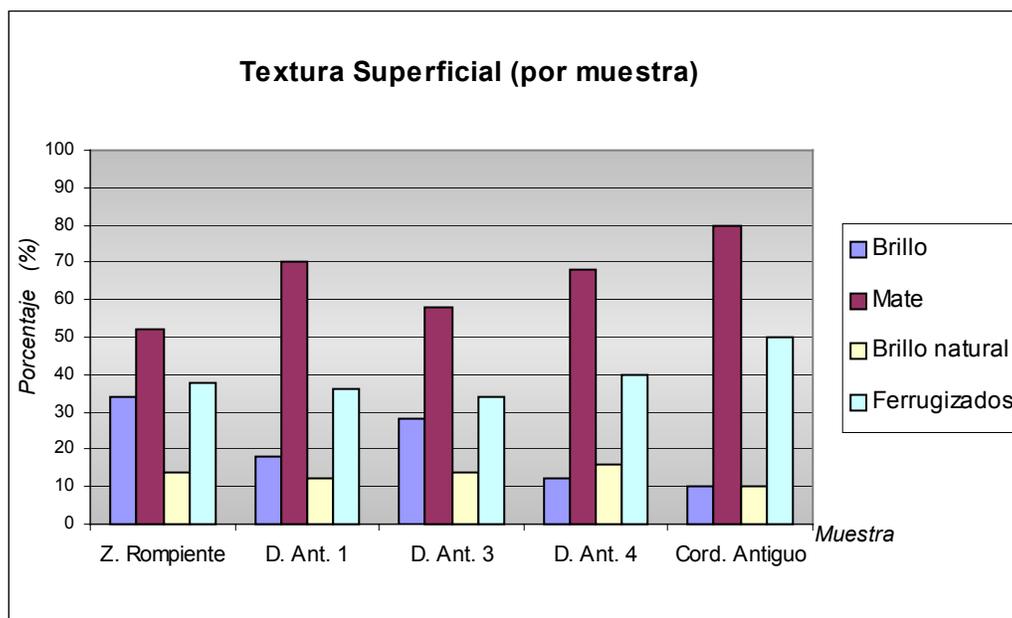
La muestra 3 (D3) presenta un 38% de material *lítico*, seguido por un 28% de *cuarzo*. En la textura superficial se tiene un 58% de *mate* y un 34% de material *ferrugizado*.

La muestra 4 (D4) presenta una variación con respecto a las anteriores, ya que presenta un alto porcentaje de *cuarzo* (32%), seguido por *vidrio* (16%). La textura superficial *mate* se presenta con un 68%, y el material *ferrugizado* alcanza el 40%.

Por último, la muestra 5 (cordón antiguo o D5) presenta un 46% de material *lítico*, seguido por el *cuarzo* con un 32%. La textura superficial *mate*, tiene una presencia de un 80%, y el material *ferrugizado* tiene una presencia de un 50%.

Por lo tanto, se tiene que en casi todas las muestras (excepto la muestra 4, correspondiente a D4) predominan los *líticos*, seguido por los *cuarzos*. En cuanto al estado de los materiales, llama la atención el alto porcentaje de material ferrugizado en las muestra 4 y 5 (duna generación 4 y cordón antiguo de playa), con un 40 y 50%, respectivamente. Además, se tiene un alto porcentaje de granos con brillo natural y brillantes en las muestras 1 y 3, mientras que en todas las muestras predominan las grano mate (sin brillo), pero la 5 presenta el más alto porcentaje de ésta (ver Fig. 31)

Fig. 31: Textura superficial por unidad de análisis.



Fuente: Elaborado por la autora.

3.4. Impactos futuros por ampliación del Puerto de San Antonio. Simulación.

Antes de analizar los futuros impactos, se hace necesario conocer en forma general el proyecto de ampliación del Puerto de San Antonio, ya que de esta manera se podrá entender en mayor medida lo que se está tratando de vislumbrar.

El Plan Maestro corresponde a un plan territorial donde se delimitan las áreas marítimas y terrestres comprometidas para el desarrollo de Puerto San Antonio, y sus usos para la situación actual y para los períodos definidos por los años 2020 y 2050. Conforme a la ley N°19.542 y sus reglamentos, durante el año de 1998, la Empresa Portuaria San Antonio elaboró su primer Plan Maestro, seleccionándose como horizonte de planificación el año 2020.

El proyecto está dividido en 2 etapas: la primera está proyectada para el año 2020 y la segunda, para el año 2050.

Plan Maestro

Proyecto Dársena: Etapa I Desarrollo al 2020 (Fig. 32)

- Puerto incorpora 100 há al sur de sus recintos (2002).
- Extensión Sitio 3 ; 95 mts.
- Nuevo Puerto Pesquero.
- Nueva Dársena. Incorpora 2 nuevos sitios ; 500 mts.
- Frente Costanera. Incorpora 3 nuevos sitios ; 620 mts.
- Nuevo emplazamiento de los sitios 6 y 7.
- Incremento Área de Transferencia del espigón.

Plan Maestro

Proyecto Dársena: Etapa II Desarrollo al 2050 (Fig. 33)

- Frente continuo en Terminal Norte.
- Llegar a un total de 23 sitios.
- Expandir las aguas abrigadas de 40 a 120 hectáreas.
- Aumentar los metros lineales de muelle de 1,4 a 6 kms.
- Aumento áreas de respaldo para operación portuaria

Fig. 32: Etapa 1.

Fig. 33: Etapa 2.



Fuente: Empresa Portuaria San Antonio (EPSA).

Conociendo estos antecedentes, ya es posible comenzar a analizar las variables necesarias para indicar los impactos que se producirán en el futuro. De esta manera, a continuación se hará un apronte de las variables y fenómenos que están relacionados con el tema en cuestión.

- **Situación actual del transporte de sedimentos.**

Para vislumbrar los impactos futuros debido a la ampliación del Puerto de San Antonio, se hace necesario conocer cómo actúa el transporte de sedimentos a lo largo de la línea litoral, así como también los procesos oceanográficos asociados.

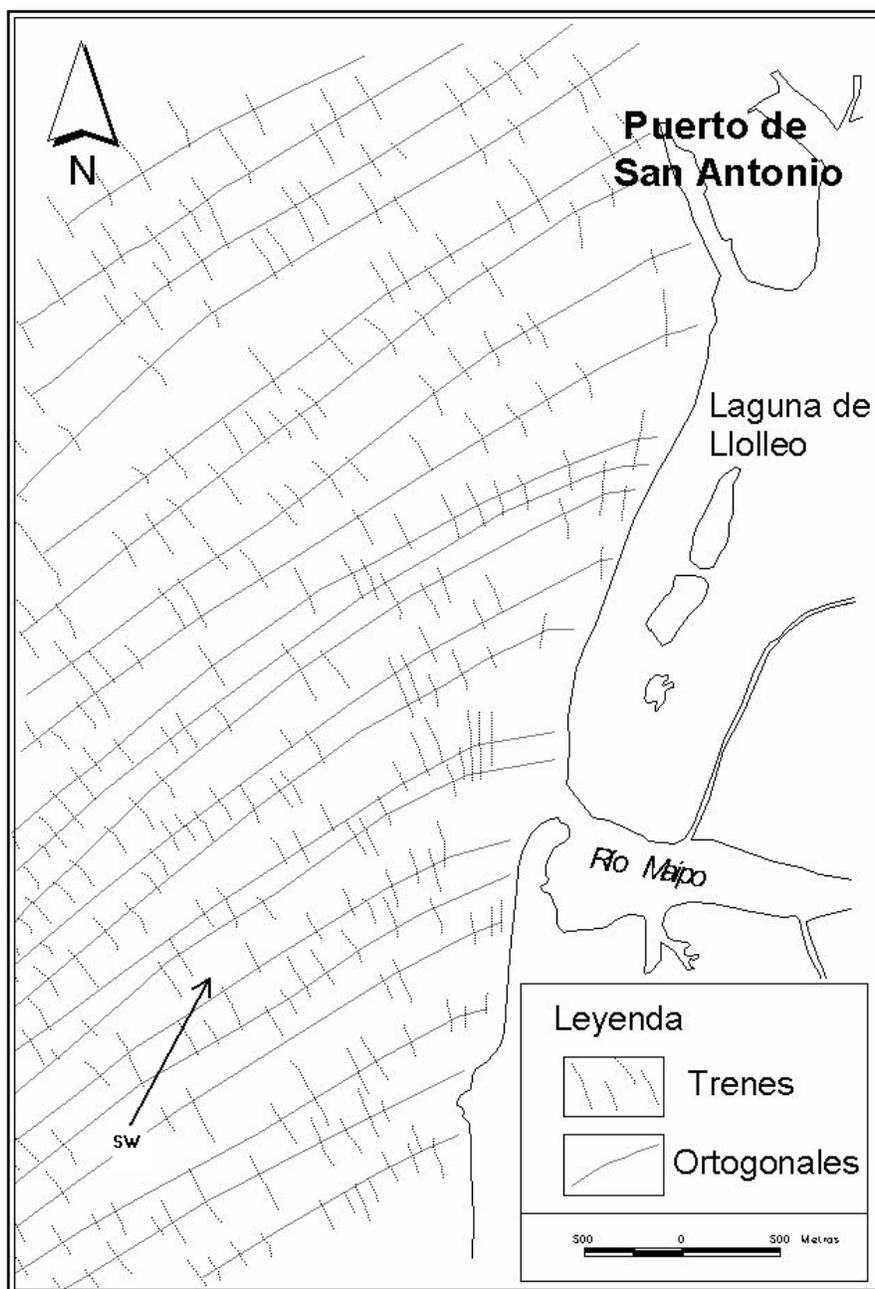
Primero, hay que tomar en cuenta que a lo largo de la costa se hace presente la *corriente de deriva*, la cual (como ya se ha explicado) es en dirección sur a norte. Ésta es de vital importancia, por cuanto ejerce influencia sobre los sedimentos del fondo, sobre todo en aquellos que se mueven desde la zona de

rompiente hasta la orilla de la playa de Lolleo (RAMÍREZ, 1984).

Tal como se demostró en la primera parte de este trabajo, la acreción de sedimentos en la playa de Lolleo está estrechamente relacionada con la deriva litoral, por cuanto el transporte de sedimentos del río Maipo ha contribuido a la progradación del litoral. Por este motivo, al modificar el actual estado del puerto no sería inadecuado suponer una nueva acreción del litoral, tal como ocurrió luego de la construcción del puerto actual.

Tal ocurrencia se puede afirmar al analizar los componentes oceanográficos, como lo es la *refracción del oleaje* (Fig. 34); el cual se presenta bastante homogéneo a lo largo de la línea de costa; es decir, no presenta refracciones muy pronunciadas. Esta situación se puede asociar con el *tipo de alineamiento*, en donde en este sector la línea de costa se presenta oblicua al ataque del oleaje (Fig. 34). Todos estos fenómenos están asociados a la deriva litoral.

Fig. 34: Diagrama de refracción del oleaje; alineamiento

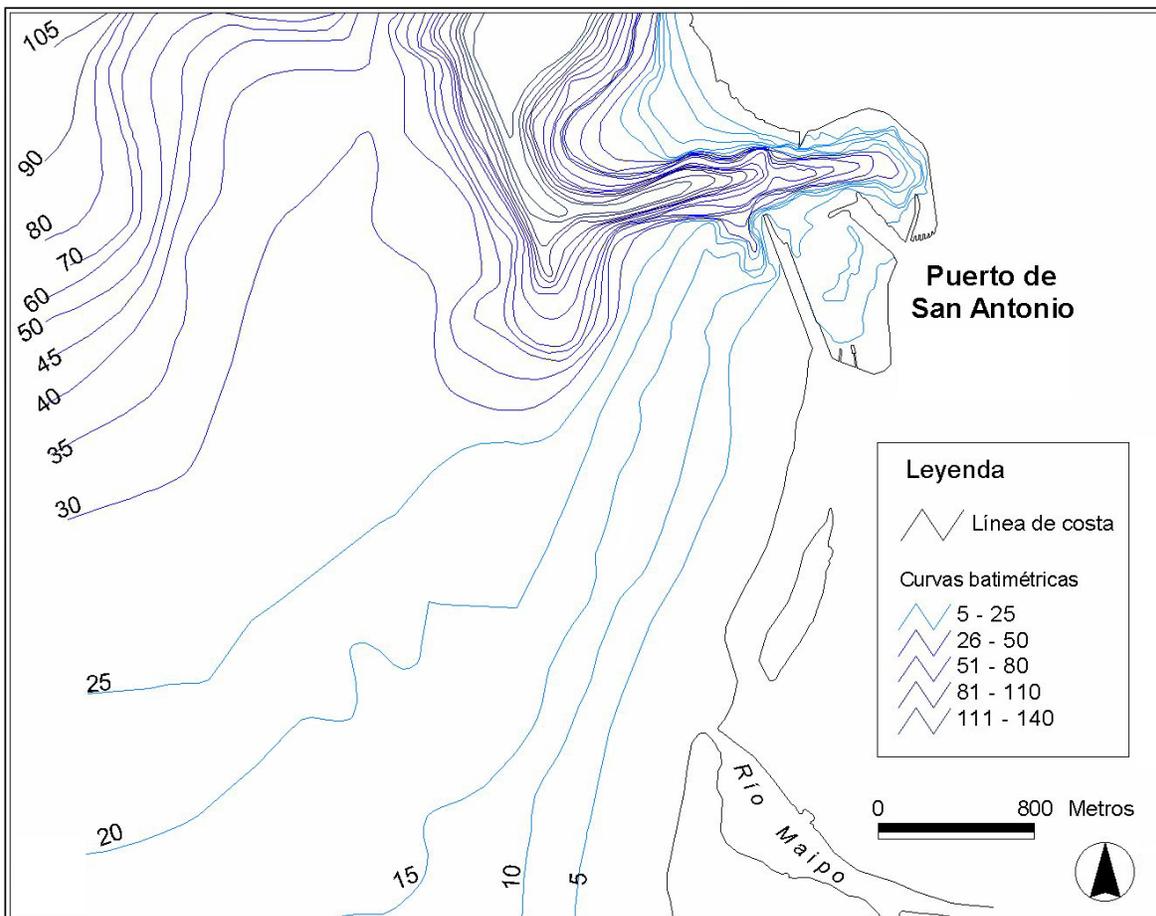


Fuente: Elaborado por la autora, 2004.

Tal situación se explica porque el mar de fondo del SW es refractado, de acuerdo a las profundidades mostradas en la Fig. 35; sin embargo esto, el ataque

sigue siendo esencialmente oblicuo.

Fig. 35: Carta batimétrica, San Antonio 1985.



Fuente: Araya Vergara, J. Carta batimétrica de San Antonio, 1:10.000, 1985.

La carta batimétrica indica que las isóbatas frente a la playa de Lolleo se presentan separadas hasta los 30 metros; si bien esta situación es relevante, lo era aun más la situación acontecida en 1908 (Fig. 9), en donde las isóbatas se hallaban más separadas, lo cual permitió la acumulación de arena en los años subsiguientes.

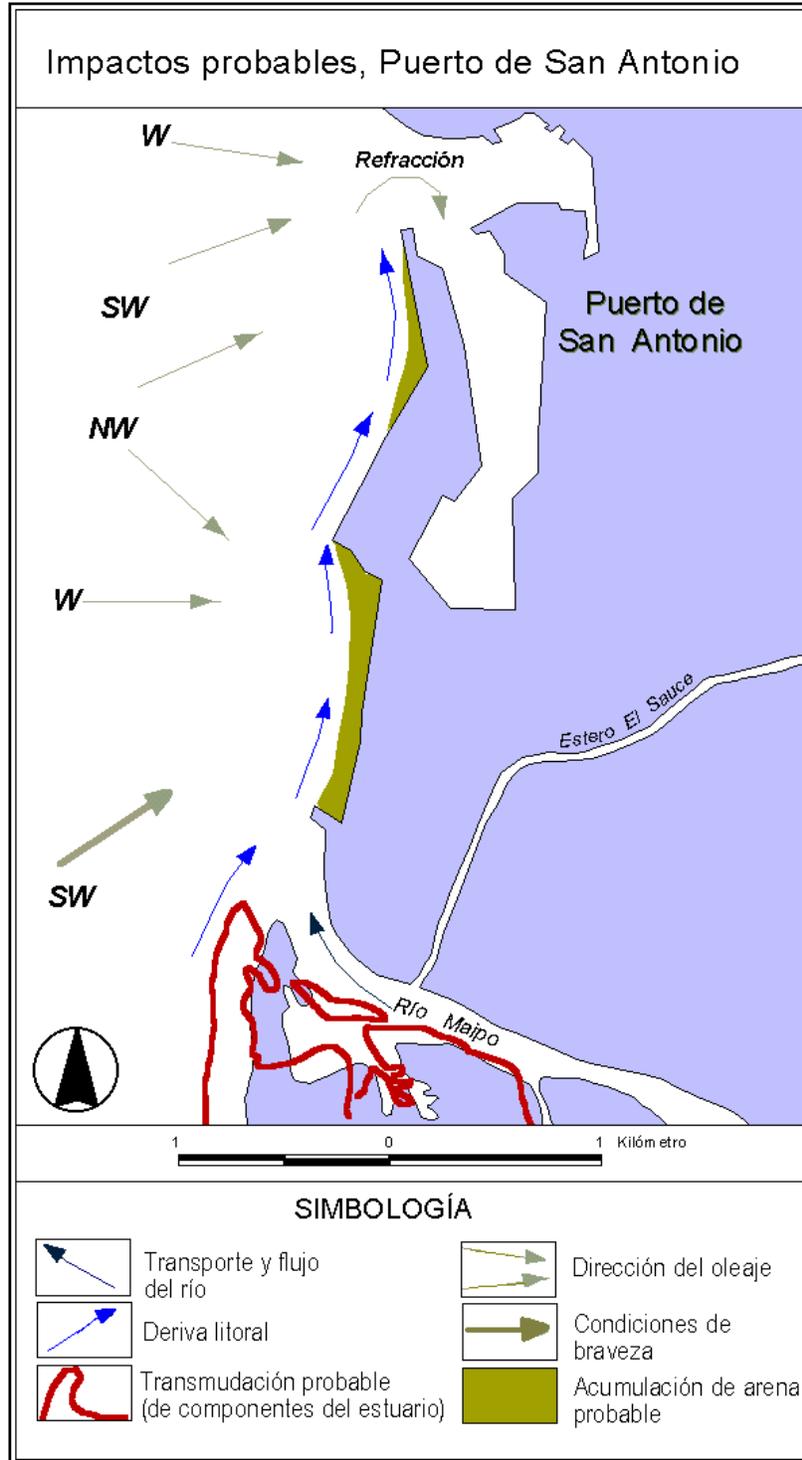
- **Simulación de impactos geomorfológicos futuros por ampliación del puerto.**

Como se ha señalado anteriormente, cualquier intervención en un sistema (en este caso estuarial) tendrá como respuesta un impacto en éste, el cual va a depender del comportamiento que adquieran los distintos factores oceanográficos ya descritos.

En este sentido, y para llegar a una simulación del sistema, se analiza cada factor oceanográfico en una situación hipotética. Si se toma en cuenta la Fig. 32 (proyecto de ampliación del puerto), y se superpone a la situación actual, se tiene que los principales efectos podrían ser:

- Sedimentación: dado que la ampliación del puerto es un obstáculo que alterará el equilibrio natural entre las fuentes de sedimento de la playa y la deriva litoral, la línea de costa debería cambiar su configuración en tendiendo a alcanzar un nuevo equilibrio. Por ello, la corriente de deriva continuará operando, llevando consigo un proceso de depositación de arena en algunos sectores de la nueva infraestructura (entrantes), y erosión en otros sectores (salientes), tal como se muestra en la Fig. 36.

Fig. 36: Simulación por ampliación del Puerto de San Antonio.



Fuente: Elaborado por la autora, 2005..

- Acreción del litoral: estrechamente relacionado con lo anterior, se debiera tener un proceso de progradación de la línea litoral, dada la acumulación de arena en ciertos sectores (entrantes) de la nueva infraestructura. Esta situación debiera ser respaldada porque, tal como se ve en la Fig. 35, frente a la playa de Lollole (y por lo tanto, en el mismo lugar en donde debiera emplazarse el nuevo puerto) las isóbatas se presentan bastante separadas, lo cual permitiría la acumulación de sedimentos favorecido por una suave pendiente (en la parte submarina).

Lo anterior se puede asociar con el tipo de zona de rompiente (la cual es una respuesta a la playa submarina), que predomina en este sector; ésta fluctúa entre la Barra y Playa Rítmica – Barra y Surco Longitudinal, las cuales indican claramente la formación de barras debido a la baja pendiente del fondo y al alto aporte de sedimentos provenientes del Maipo.

- Transmudación de componentes del estuario: con lo señalado debe inferirse que algunas formas se verán modificadas con respecto a su situación actual, ya que debe alcanzar su equilibrio. Tal como sucedió entre 1917 y 1950, el estuario debiera acomodarse a las nuevas condiciones, por lo que tendría que desplazarse hacia el W junto a sus componentes: flecha litoral, laguna estuarial y bancos medios estuariales (Fig. 36).

Además, en la entrada del puerto debiera embancarse sedimentos (lo que sucede en la actualidad), debido a la refracción del oleaje (Fig. 36). Asimismo, se puede señalar que los materiales que no sean embancados o depositados en la nueva estructura portuaria, debieran ser transportados y depositados en el Valle de San Antonio.

Por último, se debe tener en cuenta que la simulación efectuada contiene no solamente el efecto del oleaje SW, sino que también oleaje de distintas direcciones (W, NW; Fig. 36), lo que eventualmente indica una mayor dinámica en la nueva línea evolutiva.

IV. DISCUSIÓN

- **Cambios y su relación con las obras portuarias:**

El trabajo realizado por POMAR (1963) ha sido de vital importancia para conocer cómo la construcción del puerto de San Antonio modificó la morfología adyacente a la desembocadura del río Maipo, preferentemente entre los años 1917 y 1965), período en donde la transformación de la línea de costa fue más evidente, dado que en los años siguientes la morfología tiende a estabilizarse.

Resultados de ciertos trabajos (KOMAR, 1976; ANTHONY y BLIVI, 1999, ANTHONY, 2002) dan cuenta de procesos morfosedimentarios similares a los acontecidos en San Antonio (para el caso de una estructura oblicua y/o perpendicular a la línea de costa).

A partir de lo anterior, se puede recrear el proceso de *acreción* en el sector estudiado, a partir de las obras portuarias existentes (tal como ya lo había planteado POMAR en 1963). Es así, como se deduce lo siguiente:

- En un comienzo (y por la construcción del Molo Sur) se tiene un embancamiento de arena en el sector sur del Puerto, lo que conlleva a una sucesiva acumulación de material en esa área; ello, lleva consigo el taponamiento de la desembocadura del estero El Sauce, por lo cual éste debe reacomodarse en la morfología existente, por lo que cambia el sentido de su recorrido hacia el Sur, desembocando directamente en el estuario del Maipo.
- Luego, se tiene que por la construcción de la escollera en la ribera norte del estuario (para enderezar su desembocadura), el cordón de la ribera sur del estuario del Maipo alarga, producto del transporte de arena de la corriente de deriva; tal cordón se cierra entre los años 1939-1950. Al encerrarse el cordón de gravas, se deja aislado un cuerpo de agua, el cual se mantiene actualmente por aportes hídricos subterráneos (MANRÍQUEZ, 1997).

Para tal proceso (formación de la laguna litoral de Lolloe), pareciese que uno de los modelos propuestos por FITZGERALD (1982, en BHATTACHARYA 2003) se ajusta bastante bien en la explicación de su génesis. Sin embargo, este autor se refiere a estuarios dominados por olas, pero igualmente sería aplicable al caso de San Antonio, ya que las variables principales (aporte de sedimentos y presencia de la corriente de deriva) son las que ejercen mayor influencia en esta situación.

Cabe destacar, que a partir de la formación de la laguna litoral, se produjo consecutivamente una acumulación de arenas, la cual dio origen a la playa de Lolloe. Es así como a partir de los años '60 la morfología tanto del estuario del Maipo como la nueva playa tienden a estabilizarse (a grandes rasgos, pues en la playa se siguen dando procesos, asociados a la génesis de cordones dunares). Esto confirma lo anunciado por PASKOFF y DEL CANTO (1983), por cuanto la mayoría de las playas del litoral central tienden a un estado de equilibrio en su balance sedimentario.

A partir de esto, se han ido originando nuevas formas, asociadas principalmente a los cordones dunares. Es así como se tiene generaciones de dunas; se asume que las más antiguas (generaciones 5 y 4) formaban parte de la antigua línea de costa (cuando aún no se construía el puerto). Luego, y a partir de las transformaciones impulsadas por el Departamento de Puertos, se han ido formando nuevos cordones (generaciones 3, 2 y 1). Hay que señalar, que los cordones más recientes han sufrido modificaciones actuales, las cuales se deben a procesos netamente asociados a las condiciones oceanográficas propias de ambientes litorales.

Hay que señalar que los análisis mineralógicos de los cordones dunares no arrojan grandes diferencias entre las generaciones de dunas, por lo que se confirmaría que son dunas relativamente actuales en su génesis (por lo menos las más recientes

En lo que concierne a los cambios sufridos por el estuario del Maipo, se tiene que, producto de la acreción ya señalada, éste resultó modificado. Es decir, sufrió un proceso de *transmudación* (cambio de forma y de lugar), puesto que tuvo que acomodarse al nuevo escenario, lo que se traduce en que se desplazó hacia mar adentro, con todos sus componentes (bancos, flecha, etc.)

- **Morfología actual:**

En cuanto a los componentes del sistema estuarial, la sistemática de ARAYA VERGARA (1981) parece entregar en forma bastante gráfica la configuración del sistema estuarial del río Maipo, aun cuando hay formas (como la existencia de la laguna estuarial) que no fueron identificadas por el autor para ese año, pero que sí se agregaron en la situación actual.

Actualmente el estuario del Maipo sufre modificaciones locales, principalmente estacionales; entre ellas se cuentan:

- *Flecha litoral:* ésta aparece en ocasiones, y en otras desaparece. Este hecho puede tener dos explicaciones: por un lado, el estuario puede crecer a tal nivel que arrasa con la acumulación de arena en la parte distal; aparte de esto, puede ocurrir un fenómeno que no es excluyente del anteriormente señalado, el cual corresponde a un fuerte oleaje. Estos procesos pueden combinarse hasta hacer desaparecer la flecha litoral; hay que tener en cuenta que este hecho es un fenómeno oscilatorio, por lo que la flecha puede volver a formarse.
- *Bancos medios estuariales:* éstos tienen un comportamiento similar al de la flecha litoral; en ocasiones, se forma un banco medio estuarial cerca de la desembocadura del estero el Sauce, pero en ocasiones desaparece, asociados a los mismos procesos señalados anteriormente.
- *Laguna estuarial:* ocasiones ésta se presenta más ancha, llegando a inundar terrenos que hoy son utilizados para la siembra. Ello, se demuestra por la existencia de canales (que se marcan claramente en la carta geomorfológica

presentada en esta investigación), los cuales se presentan abandonados, o bien presentan un pequeño curso de agua. Este fenómeno se puede asociar a la crecida del cauce del estuario, la cual puede ser estacional (al igual que los dos ejemplos nombrados anteriormente).

En cuanto a la clasificación de estuario que se podría aplicar teniendo en cuenta lo anterior, las planteadas por DALRYMPLE, *et al.* (1992) podrían asociarse al estuario del Maipo, pero no de manera excluyentes pues va a depender del momento en que se hagan las observaciones. Así el estuario podría estar dominado por las olas en el momento en que éstas edifican barras que impiden el ingreso de olas al estuario, como fue el caso de algunas fotografías aéreas analizadas en esta investigación. Del mismo modo, va a estar dominado por las mareas cuando se denota la ausencia de barreras en la boca del estuario.

En lo que concierne a la playa de Lolloe, se puede decir que también se denotan cambios; es así, como en el período analizado se ve la aparición (y también desaparición, sobre todo por bravezas) de microdunas. Así también es posible observar el paso de microdunas a cordones dunares (en terreno, esta situación es clara de observar). La génesis de microdunas es importante para señalar que la playa de Lolloe está en un proceso constante de acumulación; ello, porque las condiciones son favorables para ello: el estuario del Maipo sigue transportando sedimentos, y la corriente de deriva continúa actuando.

- **Simulación por nuevas obras:**

El comportamiento de los componentes oceanográficos analizados, fueron corroborados con los trabajos realizados por ANTHONY *et al.* (1999 y 2002), BHATTACHARYA *et al.* (2003) y OTTMANN (1967), principalmente en lo concerniente al comportamiento de la deriva litoral. Al trasladar esta situación al tema de investigación, se pudo llegar a una síntesis de su importancia en el reestablecimiento del transporte de sedimentos, una vez que el sistema ha sido intervenido.

Los autores coinciden en que el proceso de depositación y erosión en el litoral es una respuesta obligada, sobre todo si se tiene en cuenta la morfología submarina del área y la orientación de la línea de costa, en donde se pudo comprobar en el trabajo mismo (y en conjunto con antecedentes aportados por ARAYA VERGARA, 1978, 1981, 1982 y 2001; y RAMÍREZ, 1984). Estos antecedentes dejan entrever que la condición de la costa favorece el proceso de adición de masa, constituyendo así nuevas playas, tal como sucedió en San Antonio en los inicios y mitad del siglo XX, y como sucedería producto de la ampliación del puerto.

Por último, es de vital importancia señalar que la simulación hecha posee sólo el atributo cualitativo, es decir, no se midieron tasas de sedimentación. Para ello, los aportes de COOPER (2002) y KOMAR (1976) referente al transporte de sedimentos fueron importantes, por cuanto señalan que en los sistemas estuariales el volumen adicional de sedimentos puede producir una costa significativamente progradada; así también se señala que cuando una infraestructura costera es construida, altera el equilibrio natural entre las fuentes de sedimentos de la playa y el patrón de la deriva litoral, produciendo con ello un cambio en la configuración en un intento de alcanzar un nuevo equilibrio.

Teniendo en cuenta que la simulación se hizo basada en autores que han aplicado el tratamiento de componentes oceanográficos en otras latitudes, sería importante e interesante seguir con esta investigación; se pueden agregar variables cuantitativas, para conocer el tiempo en que se llegará a la situación

simulada, si es que así ocurriese.

V. CONCLUSIONES

A partir de la revisión y observación detallada del material recopilado, se puede decir que las obras portuarias tuvieron un impacto directo en el cambio de la línea litoral, particularmente en el sistema estuarial del Maipo.

La **evolución histórica** del litoral por infraestructura portuaria, se puede analizar mediante los cambios traducidos en rupturas de equilibrio y procesos de ajuste (TRICART, 1965; en Análisis de Sistemas, 2005). Es así, como la construcción del Puerto de San Antonio debiera corresponder a una *ruptura del equilibrio* inicial del sistema; ello, porque los factores que antes permanecían constantes, fueron modificados. Luego, debió producirse un período de *ajuste* del sistema, puesto que se acomodan los fenómenos a la situación post-ruptura. Ello se relaciona con la conformación de nuevas formas litorales, entre las que se encuentran la laguna litoral y la génesis de una nueva playa; todo ello da cuenta del proceso de acreción del litoral. La dimensión temporal de estos procesos de cambio, fluctúa entre los 30 a 40 años.

Asociando lo anterior, se puede hacer un análisis similar con la situación del estuario del Maipo y de la playa de Lollole. En el caso de la **situación del estuario** (una vez que ya se acomoda a la nueva situación morfológica), se puede decir que también presenta cambios traducidos en rupturas de equilibrio y procesos de ajuste; sin embargo estos procesos suelen ser oscilatorios. Por ejemplo (y como ya se ha mencionado), una situación de *ruptura de equilibrio* podría corresponder a una crecida del estuario del Maipo, o bien ocasiones de braveza. Los alcances de estas consideraciones son: la desaparición de la flecha litoral, la desaparición de bancos medios estuariales y el aumento del tamaño de la laguna litoral. Puede decirse que la condición de equilibrio es *metaestable* (es decir, presenta oscilaciones en su funcionamiento).

Una vez que se ha producido la ruptura de equilibrio, se tiene el *período de ajuste*, en donde se tendrían los siguientes procesos: acumulación de arena en la

parte distal del estuario, lo cual (asociado con la corriente de deriva) dará origen nuevamente a la flecha litoral.

Es en este período en donde el sistema se retroalimenta, para lograr nuevamente el equilibrio. Hay que considerar que estos cambios son estacionales (e incluso anuales), lo que contrasta con el caso anterior.

En el caso de la **playa de Llolleo**, el análisis se enfoca a la génesis de cordones dunares. La situación de equilibrio se traduce en acumulación de arena formando microdunas, y luego, generando cordones dunares. Para este caso, una condición de *ruptura de equilibrio* está dada por un fuerte oleaje, o bien, por la presencia de algún regulador que impida tal acumulación. Ello se denota claramente en la playa de Llolleo: por un lado, la generación 2 de dunas desaparece (señalado como **B** en la carta geomorfológica); ello se debió a que condiciones de braveza del oleaje destruyó ese cordón. Al igual que el caso anterior, se puede decir que el tipo de equilibrio es *metaestable*.

Por otra parte, la existencia de una escollera en un sector de la playa, se transforma como un regulador que impide el avance de las dunas hacia el interior. Pero, hay que considerar que luego de la ruptura viene el ajuste; en la playa de Llolleo, el *ajuste* se traduce en la conformación de microdunas. Aún cuando condiciones de braveza hagan desaparecer incluso cordones dunares bien formados, las microdunas aparecen de inmediato. Ello no deja de ser importante, pues indica que el sistema siempre va a lograr su equilibrio, y en este caso, el equilibrio consiste en la depositación de arena en la playa.

En cuanto a la simulación vislumbrada, en donde aparecen los impactos probables dada la futura ampliación del puerto, se hace importante denotar las repercusiones de las rupturas y ajustes en el sistema. Claramente se deduce que la ampliación será un ente que provocará una *ruptura* al sistema en general; para eso, se tiene como ejemplo la situación generada por la construcción del Puerto de San Antonio.

Lo importante de destacar en esta parte, es el proceso de *ajuste*; tal como se ve en la figura en donde simulan los impactos futuros (Fig. 36), el sistema tenderá a buscar las condiciones de equilibrio. Dado que se repetiría la situación del siglo pasado, todo indica que la conformación nuevas playas será un proceso de ajuste muy claro. Asimismo, la nueva transmutación del estuario del Maipo será la respuesta a estas nuevas condiciones, por cuanto el litoral nuevamente se verá afectado por el proceso de acreción. A todo esto, se debe sumar el reestablecimiento de la corriente deriva; sólo así, el sistema va a lograr el equilibrio inicial que fue perturbado.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- 1) ANTHONY, E.J. & BLIVI A.B., 1999. Morphosedimentary evolution of a delta-sourced, drift-aligned sand barrier-lagoon complex, western Bight of Benin. *Marine Geology*, 158: 161-176.
- 2) ANTHONY, E., OYÉDÉ, L., & LANG, J., 2002. Sedimentation in a fluvially infilling, barrier-bound estuary on a wave-dominated, microtidal coast: the Ouémé River estuary, Benin, west Africa. *Sedimentology*, 49: 1095-1112.
- 3) ARAYA VERGARA, J.F., 1970. Contribución al estudio de los procesos estuariales en las desembocaduras de los ríos Rapel y Maipo. *Inform. Geogr., Chile*, 20: 17-38.
- 4) ARAYA VERGARA, J.F., CASTRO C., y ANDRADE B., 1978. Análisis de la turbidez fluvial en el mar mediante teledetección y control terrestre. Congreso de Percepción Remota, Santiago, Ed. Instituto Geográfico Militar, Santiago.
- 5) ARAYA VERGARA, J.F., 1981. El concepto de delta en ría y su significado en la evolución litoral (ejemplo de Chile Central). *Inform. Geogr., Chile*, 28: 19-42.
- 6) ARAYA VERGARA, J.F., 1982. Análisis de la localización y de los procesos y formas predominantes de la línea litoral de Chile. *Inform. Geogr., Chile*, 29: 35-55.
- 7) 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.
- 8) ARAYA VERGARA, J. F., 2001. Beach orientation. En: *The Earth Sciences Encyclopedia Online (ESEO), Beaches and Coastal Geology*, File: //D:\encyclopediaonline\beachorient.online.htm
- 9) BHATTACHARYA, J., & GIOSAN, L., 2003. Wave-influenced deltas: geomorphological implications for facies reconstruction. *Sedimentology*, 50: 187-210.
- 10) BROEKMAN, G., 1908. Atlas del Puerto de San Antonio. Proyecto de Gerardo Von Broekman. Santiago, 67 pp.
- 11) COOPER, J.A., 1994. Sedimentary processes in the river-dominated Mvoti estuary, South Africa. *Geomorphology*, 9: 271-300.

- 12) COOPER, J.A., 2001. Geomorphological variability among microtidal estuaries from the wave-dominated South African coast. *Geomorphology*, 40: 99-122.
- 13) COOPER, J.A., 2002. The role of extreme floods in estuary-coastal behaviour: contrast between river and tide-dominated microtidal estuaries. *Marine Geology*, 150: 123-137.
- 14) CORTÉZ, C., 2002. Observaciones dinámicas y geomorfológicas en el estuario del Aconcagua, Chile Central. Memoria para optar al título de geógrafo, Universidad de Chile, Santiago; 73 pp.
- 15) CORVALÁN, J., & MUNIZAGA, F., 1972. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín N°28, Editorial Universitaria, Santiago, 40 pp.
- 16) DALRYMPLE, R., ZAIMLN, B., & BOYD, R., 1992. Estuarine facies models. Conceptual basis and stratigraphic implications. *J. Sedim. Petrol*, 62: 1130-1146.
- 17) EVANS, G. & PREGO, R., 2003. Rias, estuaries and incised valleys: is a ria an estuary?. *Marine Geology*, 196: 171-175.
- 18) GOBERNACIÓN PROVINCIAL DE SAN ANTONIO, 2001. Revista turística Provincia de San Antonio. Editada por La Nación, Santiago.
- 19) FUENZALIDA, H., 1965. Hidrología. En *Geografía Económica de Chile*, Corporación de Fomento de la Construcción, Santiago, 31-44.
- 20) KOMAR, P., 1976. Beach processes and sedimentation. Prentice – Hall, New Jersey, 426 pp.
- 21) MANRÍQUEZ, H., 1997. Evolución morfológico-histórica en la zona costera de la ciudad de San Antonio. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 28: 267-273.
- 22) NIEMEYER, H. y CERECEDA, P., 1984. Hidrografía. En: Instituto Geográfico Militar (Ed), Santiago, 320 pp.
- 23) OTTMANN, F., 1967. Introducción a la geología marina y litoral, Editorial Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires, 287 pp.
- 24) PASKOFF, R. y DEL CANTO, S., 1983. Características y evolución geomorfológica actual de algunas playas de Chile Central, entre Valparaíso y San Antonio (V región). *En Norte Grande*, 10: 31-45.

- 25) PASKOFF, R., 1993. Geomorfología de Chile Semiárido, Editorial Universidad de La Serena, Facultad de Humanidades, La Serena, 321 pp. Traducción.
- 26) PETTIJOHN, F. J., 1963. Rocas sedimentarias. Editorial Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires, 731 pp.
- 27) POMAR, J., 1963. Cambios en los ríos y en la morfología de la costa de Chile. Revista Chilena de Historia y Geografía, 130: 318-356.
- 28) RAMÍREZ, C., 1984. Contribución al estudio de los sistemas de transporte de sedimentos en el litoral chileno (Bahía de San Antonio, Concepción y Puerto Montt). Memoria para optar al grado de Magister, Universidad de Chile, Santiago; 88 pp.
- 29) SHORT, A., D., 1987. A note on the control of beach type and change, with S. E. Australian Examples. J. of Coastal Res. 3 (3): 387-395.
- 30) TRICART, J., 1965. Principes et méthodes de la géomorphologie. Masson, Paris. Texto aplicado en la Cátedra de Análisis de Sistemas, Magíster 2005.
- 31) WENTHWORT, C. K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. J. Geol., 30: 377-392.