



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO  
ESCUELA DE POSGRADO

**RELACIONES MORFODINÁMICAS DE LA LÍNEA DE COSTA ENTRE  
TONGOY Y LAS DUNAS DE LOS CHOROS.  
TRANSFERENCIA SEDIMENTARIA EN LA MEGA ENSENADA DE  
COQUIMBO.**

**Tesis para optar al grado de Magíster en Geografía mención Recursos Territoriales**

Vanessa Olaya Magallanes Luna

**Profesor guía**  
María Victoria Soto Bäuerle

**Santiago, marzo de 2017.**

*A Clemente, que, sin saberlo aún,  
es gestor de éste y cada uno de mis pasos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis agradecimientos a la profesora María Victoria, que permitió que, al amparo de su proyecto y conocimientos, se gestara esta investigación. Principalmente por su aliento, críticas, amistad y paciencia.

A mi querido amigo y hermano, Rayner De Ruyt, y obviamente con familia incluida, por regalarme horas preciadas, para así poder enriquecer mi análisis, y llegar a resultados de forma rápida y eficiente.

A Misael e Ignacio, colegas que aun cuando no compartimos generación, fueron un apoyo constante en el proceso, y considero amigos.

A mi compañera de terreno Ivonne, que a pesar de mi estado de gravidez supo acompañarme en el trabajo y las largas jornadas de viaje.

A mis compañeros de magíster, y desde el día uno amigos: Carlos, David, José, Militza, César y Carolina. Emprendimos un camino juntos, que nos llevó a diferentes lugares, lo que rescato es que generamos camaradería y amistad.

A mis sobrinos Félix y Martina, junto a mi familia, que estuvieron siempre atentos a mi trabajo y a ayudar si era necesario.

Finalmente, a Clemente y José Luis por estar en cada etapa de este trabajo y de mi vida.

## CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Planteamiento del problema.....	10
1.2. Área de estudio .....	11
1.3. Hipótesis .....	13
1.4. Objetivos.....	13
II. Estado del asunto .....	14
2.1. Ensenadas o bahías de espiral logarítmico.....	14
2.2. Depósitos dunares .....	15
2.3. Transporte de sedimentos .....	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	19
3.1. Caracterización geomorfológica evolutiva .....	19
3.1.1. Geología.....	19
3.1.2. Geomorfoloía, morfometría y morfodinámica de ensenadas .....	20
3.2. Análisis sedimentológico.....	20
3.2.1. Tratamiento de los datos .....	23
3.2.1.1. Modelo de mezcla lineal .....	23
3.2.1.2. Diagnóstico de los parámetros para evaluar el modelo de mezcla lineal.....	24
3.2.1.2.1. Similitud y distancia Camberra.....	24
3.2.1.2.2. Análisis de varianza (ANOVA).....	24
3.3. WAVECALC - Transporte de sedimentos .....	25
IV. RESULTADOS .....	30
4.1. Marco geológico.....	30
4.1.1. Contexto regional.....	30
4.1.2. Contexto local .....	33
4.1.2.1. Unidades Paleozoicas .....	33
4.1.2.2. Unidades Mesozoicas .....	33
4.1.2.3. Unidades del Triásico al Cretácico Inferior en la Cordillera de la Costa.....	34
4.1.2.4. Unidades del Cretácico Superior al Terciario.....	34
4.1.2.5. Mioceno -Pleistoceno – Holoceno .....	35
4.2. Caracterización geomorfológica .....	41
3.3.1. Geomorfoloía, morfometría y morfodinámica de ensenadas del área de estudio.....	48
3.3.1.1. Los Choros.....	48
3.3.1.2. Ramadilla:.....	51
3.3.1.3. Caleta Tinajas .....	52
3.3.1.4. Caleta Cruz Grande .....	53
3.3.1.5. Caleta Temblador .....	55

3.3.1.6.	Caleta Totorallillo norte.....	56
4.1.1.1.	La Serena-Coquimbo.....	57
4.1.1.2.	Guañeros.....	58
4.1.1.3.	Tongoy.....	60
4.2.	Constitución mineralógica.....	61
4.2.1.	Análisis comparativo de sedimentos.....	81
4.3.	Análisis de transporte de sedimentos.....	90
4.3.1.	Malla de análisis.....	90
4.3.2.	Batimetría.....	91
4.3.3.	Velocidad del viento.....	92
4.3.4.	Altura de la ola.....	93
4.3.5.	Pendientes batimétricas.....	94
4.3.6.	WAVECALC.....	95
4.3.6.1.	Tipo de quiebre de ola.....	96
4.3.6.2.	Transporte de sedimentos.....	98
4.3.6.2.1.	Transporte hacia el mar.....	98
4.3.6.2.2.	Transporte hacia la tierra.....	100
V.	DISCUSIÓN.....	107
5.1.	Conformación y funcionamiento de la Mega Ensenada de Coquimbo.....	107
5.2.	Depósitos dunares.....	108
5.3.	Mineralogía, proveniencia y modelación de las condiciones de transporte de sedimentos.....	109
VI.	CONCLUSIONES.....	111
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
VIII.	MATERIAL COMPLEMENTARIO.....	117
9.1.	Anexos y apéndices.....	117
9.1.1.	INFORME: Análisis comparativo de estudios mineralógicos de sedimentos en la región de Coquimbo. Julio de 2015. Proyecto FONDECYT N° 1120234.....	117
9.1.2.	Informe 2: Informe: Análisis mineralógico mediante microscopía óptica y Comparación de estudios mineralógicos de sedimentos. Diciembre de 2016. Proyecto FONDECYT N° 1120234.....	141
9.2.	Material acompañante.....	174
9.2.1.	Disco Modelación en Matlab de WAVECALC.....	174
9.2.2.	Base de datos WAVECALC.....	174

## FIGURAS

Figura 1 Área de estudio.....	12
Figura 2. Áreas de Cartas Geológicas utilizadas .....	19
Figura 3 Muestreo sedimentológico .....	21
Figura 4 WAVECALC .....	28
Figura 5 Matlab – Programación WAVECALC, adaptado para el trabajo de investigación.....	29
Figura 6 Esquema geológico área de análisis .....	32
Figura 7 Geología Los Choros .....	37
Figura 8 Geología del área de La Serena – Higuera .....	38
Figura 9 Geología del área de Andacollo – Puerto Aldea .....	39
Figura 10 Geología del área de Ovalle – Peña Blanca .....	40
Figura 11 Geomorfología Los Choros.....	42
Figura 12 Geomorfología Cordón de Sarco.....	43
Figura 13 Geomorfología Cuenca costera occidental saliente Roca Blanca y Ensenada Poroto.....	44
Figura 14 Geomorfología Bahía de Coquimbo .....	45
Figura 15 Geomorfología Guanqueros .....	46
Figura 16 Geomorfología Limarí-Tongoy.....	47
Figura 17 Morfometría y morfodinámica de Caleta Ramadilla.....	48
Figura 18 Ancho de playa ensenada Los Choros.....	50
Figura 19 Perfiles de playa Ensenada Los Choros .....	51
Figura 20 Morfometría y morfodinámica de Caleta Ramadilla.....	52
Figura 21 Morfometría y morfodinámica de Caleta Tinajas .....	53
Figura 22 Morfometría y morfodinámica de Caleta Cruz Grande.....	54
Figura 23 Morfometría y morfodinámica de Caleta Temblador.....	56
Figura 24 Morfometría y morfodinámica de Caleta Tororalillo Norte.....	57
Figura 25 Morfometría y morfodinámica de ensenada La Serena-Coquimbo.....	58
Figura 26 Morfometría y morfodinámica de ensenada Guanqueros .....	59
Figura 27 Morfometría y morfodinámica de ensenada Tongoy .....	60
Figura 28 Muestreo sedimentológicos zona de desembocadura del río Limarí, en playa moderna y bancos laterales fluviales.....	72
Figura 29 Afluentes del Limarí .....	73
Figura 30 Tongoy Barnes .....	75
Figura 31 Barnes .....	76
Figura 32 Los Choros .....	78
Figura 33 La Serena .....	80
Figura 34 Mineralogía Quebrada Los Choros.....	87
Figura 35 Fuentes probables de Sedimento que alimentan los campos dunares de la desembocadura de la Quebrada de Los Choros, en relación a su cuenca aportante directa.....	88
Figura 36 Malla de muestreo de análisis .....	90
Figura 37 Batimetría mega ensenada de Coquimbo y desembocadura del Limarí.....	91
Figura 38 Batimetría mega ensenada de Coquimbo .....	92
Figura 39 Vientos promedio anuales para la Mega ensenada de Coquimbo y la zona de la desembocadura del Limarí.....	93
Figura 40 Altura significativa oleaje, promedio año 2010. ....	94
Figura 41 Pendientes Mega Ensenada de Coquimbo.....	95
Figura 42 Tipo de Quiebre de Ola .....	97
Figura 43 Transporte sedimentario hacia el mar .....	99
Figura 44 Transporte hacia la tierra, Tongoy .....	101
Figura 45 Transporte hacia la tierra, Guanqueros.....	102
Figura 46 Transporte hacia la tierra, La Serena.....	103

Figura 47 Transporte hacia la tierra, General promedio ..... 104  
Figura 48 Transporte hacia la tierra, localidades ..... 105

### TABLAS

Tabla 1 Variables incluidas en el trabajo con WAVECALC ..... 27  
Tabla 2 Datos macroscópicos muestras ..... 62  
Tabla 3 Características Microscópicas del muestreo ..... 65  
Tabla 4 Descripción de sedimentos quebrada Los Choros ..... 86  
Tabla 5 Correlación y similaridad entre las muestras de la quebrada Los Choros y los campos dunares de Los Choros. .... 89

### GRÁFICOS

Gráfico 1 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre las muestras M23, M24, M26, M27 y M28, correspondientes a depósitos dunares en la zona de Los Choros, en contraste al muestreo general de la Mega Ensenada y la Cuenca del río Limarí. .... 81  
Gráfico 2 Coeficiente de similaridad (s) entre las muestras M23, M24, M26, M27 y M28, correspondientes a depósitos dunares en la zona de Los Choros, en contraste al muestreo general de la Mega Ensenada y la Cuenca del río Limarí. .... 82

## RESUMEN

Los depósitos dunares de las características de volumen, superficie, formación y evolución, como las del campo dunar de Los Choros, requieren de fuentes de alimentación sedimentaria acorde al tamaño de las mismas. Dada la pequeña extensión de quebrada Los Choros, surge la necesidad de identificar qué otro tipo de aporte está ayudando en su configuración y mantención actual.

Esta investigación aborda las condiciones de transferencia de masa sedimentaria, a través de la mega ensenada de Coquimbo, teniendo así herramienta que pueden orientar a la proveniencia de los sedimentos que constituyen el depósito dunar de Los Choros.

Esta tesis investigativa se inserta en el proyecto FONDECYT N° 1120234, el cual genera la hipótesis de que esta mega ensenada se comporta como un sistema, por lo cual se puede asociar la formación y posterior alimentación de las dunas de Punta de Choros, al río Elqui y río Limarí principalmente, y a la quebrada Los Choros, probablemente como fuente secundaria de aporte de material sedimentario. Lo anterior, aporta en la generación de conocimiento respecto a cómo interactúan diferentes elementos desarrolladores de material sedimentario entre ensenadas constituyentes de una mega estructura como la de Coquimbo. Además, de generar antecedentes para su cuidado y protección ambiental.

En una primera instancia se realiza una caracterización del área desde la perspectiva geomorfológica evolutiva y descripción de las ensenadas en zeta que conforman la mega ensenada, para después contrastar con un análisis sedimentario de muestras de los diferentes sistemas que tienen potencial aporte al sistema dunar.

El análisis del comportamiento del transporte sedimentario de las zonas aportantes (Limarí, Tongoy, Coquimbo-La Serena y Los Choros), mediante la utilización de la hoja de cálculo Excel-VBA denominada WAVECAL (LE ROUX *et al.*, 2010), aportó en el reconocimiento del potencial comportamiento del traslado de materiales al interior de esta mega unidad, generando conocimiento en la dirección del traslado, desde o hacia el mar, y del comportamiento del oleaje en cada una de estas sub-unidades.

Los resultados obtenidos evidencian aporte de carácter sedimentario al depósito de Los Choros, desde el sector del Limarí, y las pequeñas estructuras que configuran la mega ensenada.

**Palabras claves:** transferencia sedimentaria, campo dunar, Los Choros, mega ensenada de Coquimbo, Limarí, WAVECALC.

## ABSTRACT

The sand dune deposits of the characteristics of volume, surface, formation and evolution, as to the Los Choros dune field, require sedimentary supply sources according to the size of them. Given the small size of Los Choros catchment, it arises to identify what other sources areas are helping in its geomorphological configuration and current working.

This thesis is focusing to the sediment transfers conditions through the Coquimbo mega bay, thus having a tool that can guide the discussion about the origin of the sediments that form Los Choros dune reservoir.

This thesis is part of the project FONDECYT N ° 1120234, which support the hypothesis that this mega bay behaves like a system, that is possible to associate to the formation and later feeding of the Punta de Choros dune fields, with the Elqui and Limarí river catchment, mainly to the Los Choros stream, probably as a secondary source of sediment. All this, generating knowledge about how different elements of sediment working between the bays components of the mega structure, such as that of Coquimbo mega bay. In addition, this research aspire to generate a significant background for their care and environmental protection.

First, from an evolutionary geomorphological perspective and description of the bays in zeta form that make up the mega bay, it is carried out a characterization of the study area. Secondly, this characterization is compared with a sedimentary analysis of samples taken from the different places in the study area that has the potential source of sediment supply to the dune system.

The analysis of the sedimentary transport behavior of the contributing areas (Limarí, Tongoy, Coquimbo-La Serena and Los Choros) is undertaken using an Excel-VBA spreadsheet called WAVECAL (LE ROUX *et al.*, 2010). This approach contributed in the recognition of the behavior of the sedimentary transfer within this mega bay, generating knowledge in the direction of the transfer, from the sea or to the sea, and wave behavior in each of these sub-bays.

The present results are an evidence of sedimentary feeding of Los Choros dune fields are from the Limarí and Elqui catchment and from others small structures belonging to the mega bay.

**Keywords:** sedimentary transfer, dune field, Los Choros, Coquimbo mega bay, Limarí, WAVECALC.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

Los procesos presentes de conformación y evolución de la línea de costa se ven influenciados por condiciones morfoestructurales, tectónicas, morfodinámicas, oceanográficas y ambientales, proyectando efectos en la morfología costera de forma directa, generando cambios sedimentológicos, en el perfil de las playas, evidencias de procesos erosionales, entre otros procesos altamente dinámicos (SOTO & ARRIAGADA, 2007).

Procesos complejos, asociados al dominio morfoestructural imperante y la geodinámica exógena presentes en el territorio, dan paso a la generación de sistemas o unidades costeras denominadas ensenadas, las que son muy recurrentes en el litoral chileno. El sistema de la ensenada o bahías estructurales (*Headland bay beach*) es uno de los agentes acondicionadores de los procesos de modelado costero de mayor presencia a nivel nacional. Estas ensenadas están constituidas como sistemas complejos de transferencia de masa y de evolución de formas, controladas por las debilidades estructurales, tectónicas y litológicas del área (MARTÍNEZ, 2001; MARTÍNEZ *et al.*, 2011; SOTO, 2005; SOTO & ARRIAGADA, 2007; ARRIAGADA, 2010; ARRIAGADA *et al.*, 2014).

Estos sistemas han sido tratados por SHORT (1999); BIRD (2000); KLEIN & DE MENEZES (2001) y KLEIN *et al.*, (2002), mientras que en Chile han sido estudiadas como unidades espaciales complejas (ARAYA-VERGARA, 1996 y 2003; MARTÍNEZ, 2001; SOTO, 2005; VILLAGRÁN, 2007; GIMÉNEZ, 2012), reconocidas en la zona central por ARAYA-VERGARA (1983; 2003), denominándolas “ensenadas en forma de zeta” y otorgando a ellas el efecto de ensenada (SOTO, 2005; SOTO Y ARRIAGADA, 2007), efecto que conlleva fuerte determinación en las diferentes formas costeras asociadas.

Dada la constitución de la ensenada, sobre la base de un *headland* o promontorio rocoso (remanente de la erosión diferencial, controlada por la estructura y la tectónica), que distribuye la energía de la onda que se intercepta en él, movilizándola deriva abajo, desde la zona proximal a la distal, (MARTÍNEZ, 2001; MARTÍNEZ *et al.*, 2011), se identifica un nivel de transferencia sedimentaria al interior de las ensenadas estudiadas; adjuntando a lo anterior posibilidades de ser asociado a entrega de material entre bahías continuas o cercanas no pertenecientes a una misma mega estructura.

Se asume la necesidad de identificar el nivel de injerencia de este sistema, en subprocesos de transferencia sedimentaria acontecidos en la denominada mega ensenada, evidenciada en la Región de Coquimbo entre bahía Tongoy y Punta de Choros.

Según investigaciones asociadas a aportes sedimentarios de la cuenca de Quebrada Los Choros (OCAMPO, 2015), se han podido evidenciar valores de correlación y similitud negativas, que no han permitido identificar con certeza si los campos dunares son provenientes de aportes del sistema de cuencas asociado. Teniendo esto como antecedente se

puede indicar que el aporte de estos sistemas es marginal, y podría indicar la presencia de aportes sedimentarios de diferente procedencia.

BENAVENTE (2015) y ROJAS (2016), ha identificado en sus análisis, variaciones asociadas a continuum dunar<sup>1,2</sup> de Los Choros, entre los años 2002 y 2014, lo cual aseveraría el constante abastecimiento de sedimentos de forma permanente, aun cuando las cuencas del semiárido adscritas al área de la Mega Ensenada no presentan caudales permanentes, ni eventos ENSO (NIÑO)<sup>3</sup> que generen recarga y movimiento de sedimentos, de la magnitud necesaria para abastecer un campo dunar como el Los Choros.

## 1.2. Área de estudio

El análisis fue realizado en la estructura de mega ensenada de Coquimbo, en especial en las zonas consideradas aportantes al sistema sedimentario de las dunas de Los Choros, que para el área se ven representadas en las playas constituyentes como litoral cercano desde Tongoy a Punta de Choros, y la desembocadura de los principales ejes hídricos: río Elqui y quebrada Los Choros, sumando la zona de desembocadura del río Limarí, esta última, de relevancia en la hipótesis planteada para la presente investigación.

Los resultados presentados a continuación, sitúan la atención específicamente, en el comportamiento de las bahías de Tongoy, Coquimbo – La Serena y Los Choros.

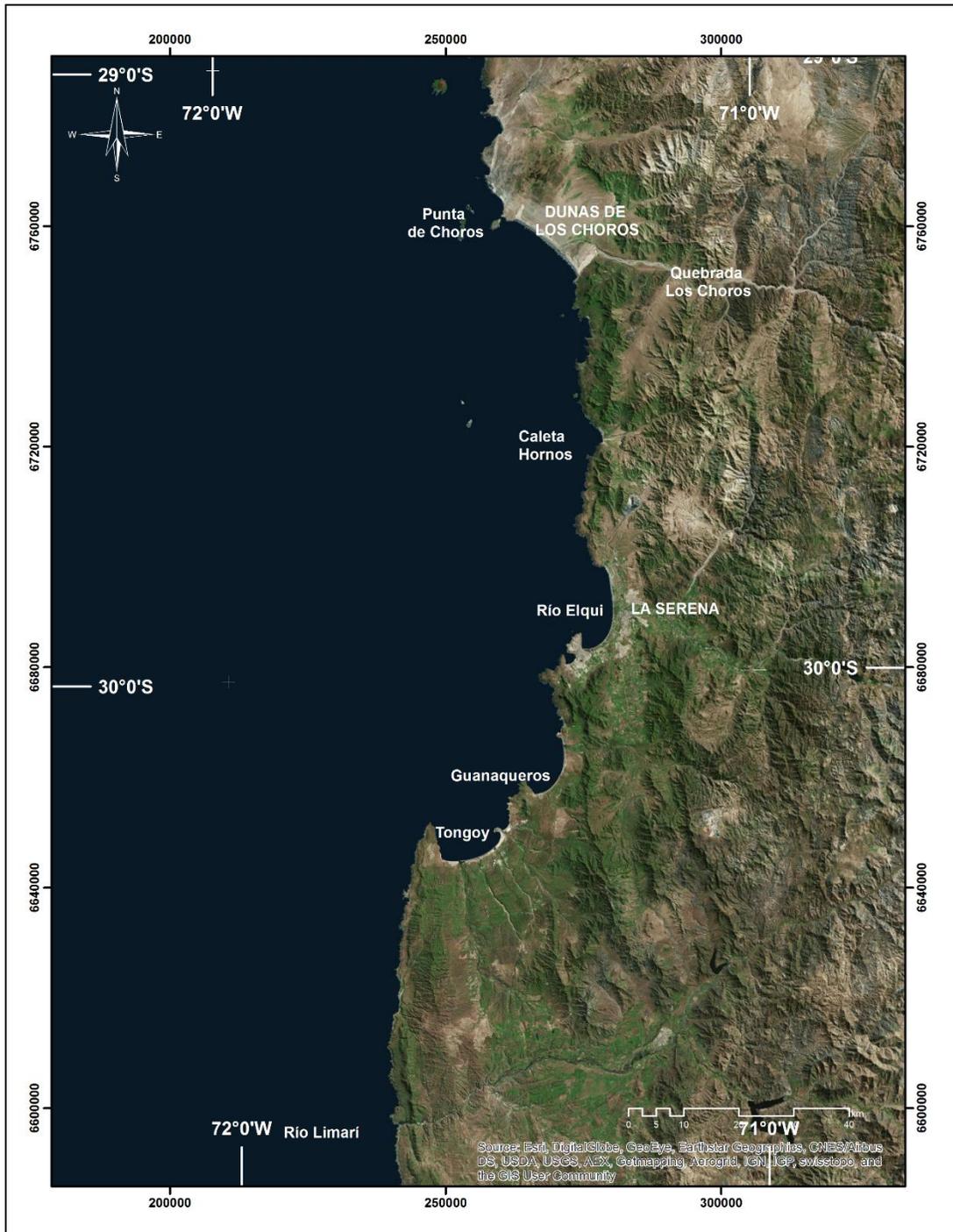
---

<sup>1</sup> Nociones derivadas de VERSTAPPEN (1972) y ARAYA-VERGARA (1986,1987), en ARRIAGADA *et al.*, 2014.

<sup>2</sup> De las dunas anteriores y los barjanes, además de la evolución de las formas transgresivas y el desarrollo de dunas embrionarias.

<sup>3</sup> Último evento ENSO en 1997.

Figura 1 Área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

### **1.3. Hipótesis**

El litoral de Coquimbo está en constante proceso dinámico, asociado a la condición de ensenada, experimentando cambios geomorfológicos propios de la localización geográfica y configuración espacial del litoral semiárido de Chile. En este escenario, se plantea que las cuencas de los ríos Elqui y Limarí, además de la quebrada Los Choros aportan el material sedimentario y lo distribuyen a través de la ensenada, presentándose morfológicamente, y sedimentariamente, como playas arenosas y campos dunares al norte del sistema.

Tanto el río Elqui como el Limarí, no poseen un depósito sedimentario cercano a la zona de desembocadura, como tampoco formas depositacionales correlativas al tamaño de sus cuencas. A partir de ello, se hipotetiza que los sedimentos de ambas cuencas, distribuyen su aporte entre las dunas cercanas a su desembocadura, las playas intermedias y el gran campo dunar de Los Choros.

Existen evidencias morfológicas actuales de transferencia de sedimentos a las playas arenosas en toda la mega ensenada, observándose también la coexistencia de depósitos dunares antiguos y actuales con procesos activos, que permite asumir la condición de transferencia de masa desde ambas cuencas hacia el campo dunar de Los Choros.

De esta forma, la mega ensenada de Coquimbo, funciona a partir de las bases planteadas por la teoría de ensenadas, estrechamente ligada a condiciones morfoestructurales, morfodinámicas y oceanográficas, que controlan la dinámica del litoral cercano, que dicen relación con evidencia de mayores depósitos sedimentarios en las partes dístales de las ensenadas.

### **1.4. Objetivos**

Realizar una caracterización del transporte de materiales sedimentarios, en la mega ensenada de Coquimbo y del Limarí, en específico en lo que respecta a potenciales aportes al campo dunar Los Choros.

Entre los objetivos específicos de la presente investigación se presentan los siguientes.

- a. Caracterización geomorfológica evolutiva del litoral de la mega ensenada de Coquimbo y de la zona de desembocadura del río Limarí.
- b. Caracterización de tipos de zona de rompiente en la mega ensenada y zona de desembocadura del río Limarí.
- c. Análisis de transporte sedimentario de las dunas de los Choros y de los sectores de potencial alimentación en la mega ensenada, que para el caso son: desembocadura río Elqui, río Limarí, quebrada de Los Choros, playas entre Tongoy y Punta de Choros.

## II. Estado del asunto

### 2.1. Ensenadas o bahías de espiral logarítmico

La costa chilena se presenta influenciada por la presencia de estructuras morfogénicas relacionadas a desalinamiento y líneas de costa contrapuestas con respecto al litoral, estructuras de margen continental que interactúan con la deriva SW. Estos desalineamiento (*offset*<sup>4</sup>), se han denominado como bahías en zeta griega (costa dentadas y playas rectas) o ensenadas. (ARAYA-VERGARA, 1983).

También asociadas al concepto de bahías de espiral logarítmico, estudiadas por YASSO (1965), y definidas por BLON (1979), en términos del balance entre el efecto de la saliente rocosa adjunta (headland) y la batimetría del litoral cercano en relación a la refracción y la difracción del oleaje, la pendiente de la playa, la energía del oleaje y el tamaño de los sedimentos presentes (SOTO, 2005).

Las ensenadas están estrechamente ligadas a condiciones morfoestructurales, tectónicas, morfodinámicas, oceanográficas y ambientales, que controlan la dinámica del litoral cercano (SOTO & ARRIAGADA (2007). Éstas son clasificadas y asociadas a su headland, como punto base, de donde se tiene una zona proximal, media y distal. Partes de la ensenada que presentan evidencias evolutivas distintas, diferencias reconocibles, en cuanto a perfiles de playa, ancho de la misma, tipología de zonas de rompientes, o la presencia o ausencia de campos dunares (SOTO, 2005).

Éstas ensenadas se originan bajo condiciones dinámicas en que playas arenosas se asocian a ambientes de refracción en la parte proximal de la misma, mientras en las partes distales se presentan dunas costeras más anchas y rectas. Teniendo el sector más ancho de los sistemas dunares en la zona distal, en posición relativamente transversal, y en zonas de rompiente de tipo intermedias (ARAYA-VERGARA (1986, 1987 y 1996) en SOTO (2005).

Estos fenómenos, para las costas chilenas, han sido estudiados por ARAYA-VERGARA (1967, 1983, 1985, 1996, 2003), MARTÍNEZ (2001, 2011), SOTO (2003, 2005), FEDERICI & RODOLFI (2004), SOTO & ARRIAGADA (2007), VILLAGRÁN (2007), ARRIAGADA (2009), SOTO *et al.*, (2010), ARRIAGADA *et al.*, (2014), entre otros.

Este tipo de estructuras se observan también en ambiente semiáridos, con dinámicas diferentes a considerar, dado que las cuencas aportantes no presentan flujos permanentes o semipermanentes desde episodios El Niño (ENOS) en los noventas.

Estudios recientes incluidos en el proyecto marco de esta tesis (LAGOS (2013), Amaya (2013), SÁNCHEZ (2014), BENAVENTE (2015), CABELLO (2015) y ROJAS (2016)), se presentan también como base de análisis que corrobora la presencia de formas y

---

<sup>4</sup> Se entiende como la recta que pasa por dos puntas sucesivas y la que pasa por la parte más rectilínea de la playa en forma de zeta griega que media entre ellos (DAVIES (1977) en ARAYA-VERGARA, 1983)

comportamientos asociados al litoral y ensenadas constituyentes de la Mega ensenada estructural de Coquimbo.

## 2.2. Depósitos dunares

Una duna es la acumulación de arena debida a la acción del viento, que tiene la capacidad de desplazarse sobre el suelo. Las dunas sin vegetación y que cambian constantemente de forma por la acción del viento se consideran activas o vías, mientras que aquellas que están cubiertas por vegetación que impiden el movimiento del grano de arena, se les denomina dunas fijas o inactivas (STRAHLER & STRAHLER, 1986). La formación, geomorfología y dinámica evolutiva de dunas, ha sido analizado por HESP (2002), así también modelos conceptuales de evolución de sistemas dunares transgresivas (HESP, 2013).

En el litoral de Chile, se observa el desarrollo de una diversidad de formas y tipos de depósitos dunares<sup>5</sup>, diferenciados por los dominios morfoclimáticos en los cuales se ven insertos, presentes desde el desierto de Atacama a sectores meridionales e insulares. Además de los factores antes mencionados, se identifica como condicionantes, el régimen de vientos efectivos, y las múltiples formas de suministro de arenas en la línea de costa.

El abastecimiento se ve condicionado a las potenciales modificaciones actuales en las cuencas directas o aportantes (SOTO *et al.*, 2011), el cambio climático, o eventos cosísmicos, como los estudiados por SOTO *et al.*, (2015), para la costa de Chile central. Así también, el desarrollo de dunas se asocia a equilibrios morfológicos, vinculados a cambios de tasas de transporte de sedimentos y de los procesos de erosión y depositación (BAGNOLD (1941), MCKEE (1979), MAINGUET (1983,1984) y GOLDMITH (1989) en SOTO *et al.*, 2016).

Los sedimentos dunares se conforman, primordialmente de cuarzo y feldespato del tamaño de arena (63 a 1000 $\mu$ m), originarios de la erosión de las rocas ricas en cuarzo, especialmente granitos y arenisca; así también pueden ser derivados de materiales que han sido transportados, erosionados y depositados por algún otro medio. Se identifica como principal fuente, la derivada de sedimentos fluviales y deltaicos a nivel local (LANCASTER & OILIER (1983) en ROJAS (2016)).

Se reconocen análisis de la correlación de lo acontecido en una cuenca con respecto al litoral arenoso litoral registrado (SOTO *et al.*, 2011), como por ejemplo el caso del Aconcagua en la Región de Valparaíso. En dicha cuenca, los procesos de modernización e intensificación del uso de suelo han incidido en los procesos de transferencia de masa desde la cuenca hacia la desembocadura, y por lo tanto al litoral arenoso presente. Litoral, que territorialmente es poco significativo, pero evolutivamente importante, más aún cuando se sobre alimenta de sedimentos, acontecidos por cambios al interior de la cuenca. Estudios similares se presentan para la cuenca del Choapa en ARRIAGADA (2009) y del Copiapó en SOTO *et al.*, (2010).

---

<sup>5</sup> Los sistemas dunares pueden ser evidenciados desde los 29° 48'S y los 41° 50'S (CASTRO, 1992).

Las dunas litorales, dada su localización en la interfase mar-tierra son medios de alta fragilidad, con una dinámica muchas veces actual, natural y particular. Dependiente de su naturaleza se pueden ver o no afectadas por la actividad humana, como por ejemplo la capacidad de paleodunas de sustentar mayor nivel de afectación, siempre y cuando no se activen la movilización de las mismas, mientras que dunas borderas no son capaces de ser expuesta al uso intensivo de ellas. El sobre uso del área, más allá de lo recreacional tipo, provocan nivelación, generan pérdida o deterioro de la cubierta vegetal fijadora, activan la erosión, generan transformaciones geomorfológicas irreversibles (canteras), se reactivan dunas estabilizadas, y remobilizan las mismas, o en otro escenario interrumpen el intercambio sedimentario entre la playa y la duna bordera. (CASTRO *et al.*, (2001), CASTRO (1992, 1984).

BENAVENTE (2015), ROJAS (2016) y SOTO *et al.*, (2016), han evidenciado cambios en el sistema dunar de Los Choros, indicando que el desarrollo de dunas embrionarias, anteriores, barjanes y dunas alargadas son evidencia un abastecimiento actual del depósito.

Estos depósitos, a nivel nacional y bajo diferentes aristas, han sido estudiados por FUENZALIDA (1956), BÖRGEL (1963), CASTRO (1985, 1992), PASKOFF & MANRÍQUEZ (2004), PASKOFF *et al.*, (2003), SOTO *et al.*, (2005, 2007, 2010, 2011, 2015, 2016), ARRIAGADA (2005), BENAVENTE (2015), ROJAS (2016), entre otros.

### **2.3. Transporte de sedimentos**

La modificación del ambiente costero, se produce mediante la erosión, el transporte y la depositación de material, que ha sido afectado por el oleaje, las corrientes y ha sido transportado hacia la costa, ya sea por ríos, deriva o por acción del transporte de fluido, para el caso marino (DAVIDSON, 2010).

El transporte sedimentario comienza cuando las fuerzas de arrastre y elevación generadas por los flujos exceden las fuerzas estabilizadoras de la gravedad y la fricción. Si la velocidad del flujo es baja, la principal vía de transportes mediante el arrastre, o mediante saltación. Cuando la intensidad del flujo aumento, éstas partículas comienzas a dar saltos cada vez mayores, y en conjunto al choque entre los mismos granos más la turbulencia del fluido, se genera el transporte por suspensión (AFONSO, 2011).

Los sedimentos finos (limos y arcillas), no son, de forma considerable, producidos en zonas costeras, sino que tienden a ser colocados en estos sectores por efectos de transporte por suspensión, de forma uniforme en la columna de agua. En general el sedimento, se puede encontrar en aguas clamas como en movimiento, así también en sectores de transición entre éstas: estuarios, bahías o lagunas.

Por otra parte, son los sedimentos de mayor grosor exhiben mayor presencia en zonas costeras, de surf o de playa (depósitos), siendo posible su transporte a lo largo de la costa, en

mayor cantidad (DAVIDSON, 2010), que puede evolutivamente llegar a generar depósitos dunares de gran superficie y data.

Al no tener cohesión, las arenas y fracciones gravas, son fácilmente afectadas por el oleaje, no así los sedimentos finos, que en ocasiones pueden tener cohesión con sí mismas o con elementos vegetales. Es, así como se pueden movilizar en el océano, en el litoral, y así mismo a lo largo de misma costa.

La mayoría de los sedimentos en las fracciones de gran y tamaño de grava se transportan mediante mecanismos de saltación, y sólo se colocan en suspensión durante períodos cortos en zonas de ruptura altamente energéticas (DAVIDSON, 2010).

Las investigaciones sobre transporte de sedimentos, y en especial sobre oleaje, se centran en estudiar la mecánica de carga, la dirección, velocidad, volumen y cambios potenciales a las morfologías que el transporte pueda afectar, mediante ecuaciones que pretenden comprender el funcionamiento del fenómeno (AIRY (1845), STOKES (1847, 1880), BOUSSINESQ (1871), KORTEWEG & DE VRIES (1895), DEAN (1965), COKELET (1977), MILES (1980), SAKAI & BATTJES (1980), FENTON (1985, 1988), FENTON & MCKEE (1990), SHORE PROTECTION MANUAL (1984) y DEAN & DALRYMPLE (1991) en LE ROUX *et al.*, 2010).

La modelación de las condiciones de olas, se han estudiado, analizado, y puesto a disposición en formatos de trabajo uniforme, mediante base de datos de carácter dinámico, utilizadas en formato Microsoft Excel. Una ventaja de la utilización de este tipo de herramientas, es que encuentra disponible por un número de usuarios mayor y es fácilmente adaptable a las necesidades personales. Ejemplos de esto es lo realizado por la Universidad de Jons Hopkins en su página de Ingeniería Costera, WAVECALC de LE ROUX *et al.*, (2010).

A nivel nacional, el estudio de transporte de sedimentos es realizado para la protección de obras ingenieriles como puertos u otro que sea necesario de proteger del exceso de material sedimentario. Tiene un alto costo y se ve obstaculizado por las dificultades de observar los flujos de sedimentos de las columnas de agua durante condiciones energéticas tales como inundaciones y tormentas, excepto en puntos discretos servidos por instrumentos desplegados. Los modelos numéricos basados en los procesos relevantes para el transporte pueden usarse para extrapolar observaciones de puntos a escalas espaciales continuas, más allá de la cobertura espacial y temporal de los experimentos de campo (DAVIDSON, 2010).

El estudio bajo otras aristas, es realizado mediante análisis sedimentológicos de procedencia, o de comportamiento de las olas en un lugar determinados, dependiente de aspectos como la batimetría, la velocidad del viento, la altura de ola, entre otras (LE ROUX *et al.*, (2010)).

La mayoría de los métodos utilizados se basan en estudios de laboratorio y teorías de ondas lineales <sup>6</sup>y que por lo tanto no son directamente aplicables a las condiciones de onda no lineal en el campo. LE ROUX *et al.*, (2010) con WAVECALC, utiliza los métodos planteados para la determinación de arrastre de sedimentos, que compara la velocidad horizontal máxima calculada, teóricamente de la partícula de agua, en la parte superior de la capa límite, con la velocidad límite determinada según el método de YOU & YIN (2006), modificado por LE ROUX (2007).

---

<sup>6</sup> BAGNOLD (1946), MANOHAR (1955), RANCE Y WARREN (1969), KOMAR Y MILLER (1973), MADSEN Y GRANT (1976), MIGNIOT (1977), HAMMOND Y COLLINS (1979), RIGLER Y COLLINS (1983), WHITE (1989), ASANO (1990), SOULSBY Y WHITEHOUSE (1997), DONG Y ZHANG (1999), LE ROUX (2001), NIELSEN Y CALLAGHAN (2003), HASSAN Y RIBBERINK (2005), WANG (2007); EN LE ROUX *et al.*, (2010).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Caracterización geomorfológica evolutiva

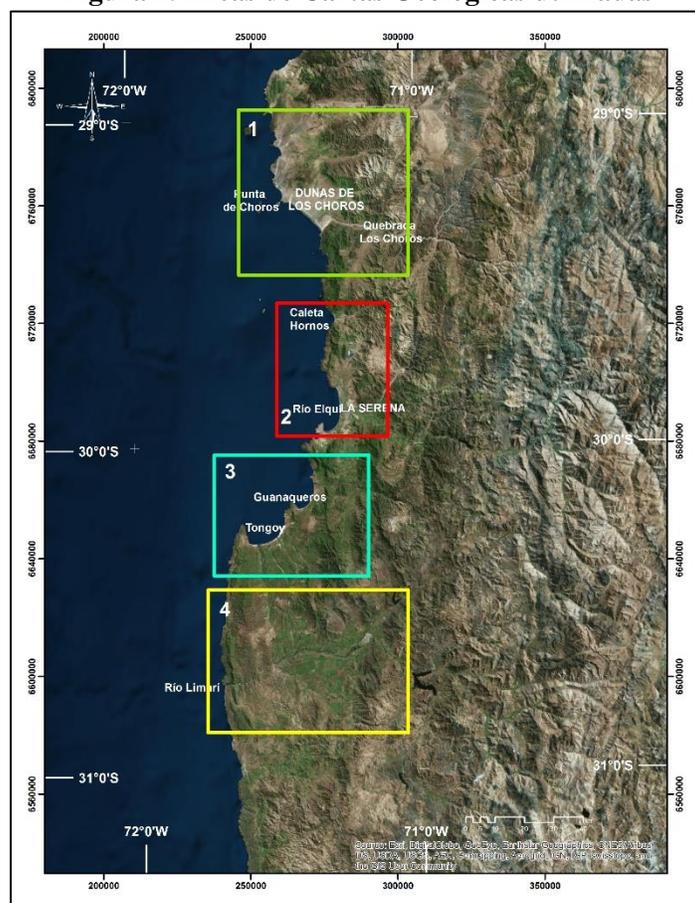
##### 3.1.1. Geología

Para el reconocimiento de las formaciones y estructuras geológicas al interior del área de estudio, se consultaron las siguientes fuentes.

- Geología del área Carrizalillo – El Tofo (CREIXELL *et al.*, (2012)).
- Geología del área de Ovalle - Peña Blanca. Región de Coquimbo. (EMPARAN C. & PINEDA, G., 2014)
- Geología del área de Andacollo – Puerto Aldea. Región de Coquimbo. (EMPARAN C. & PINEDA F., 2006)
- Geología área La Serena – La Higuera. Región de Coquimbo. (EMPARAN C. & PINEDA F., 2000).

Las cartas geológicas se especializaron de la siguiente manera, cubriendo las áreas costeras del sector en análisis, tal como se presenta a continuación.

**Figura 2. Áreas de Cartas Geológicas utilizadas**



Nota: 1) Carrizalillo- El Tofo, 2) La Serena – La Higuera, 3) Andacollo – Puerto Aldea, y 4) Ovalle – Peña Blanca. Fuente: Elaboración Propia.

### 3.1.2. Geomorfología, morfometría y morfodinámica de ensenadas

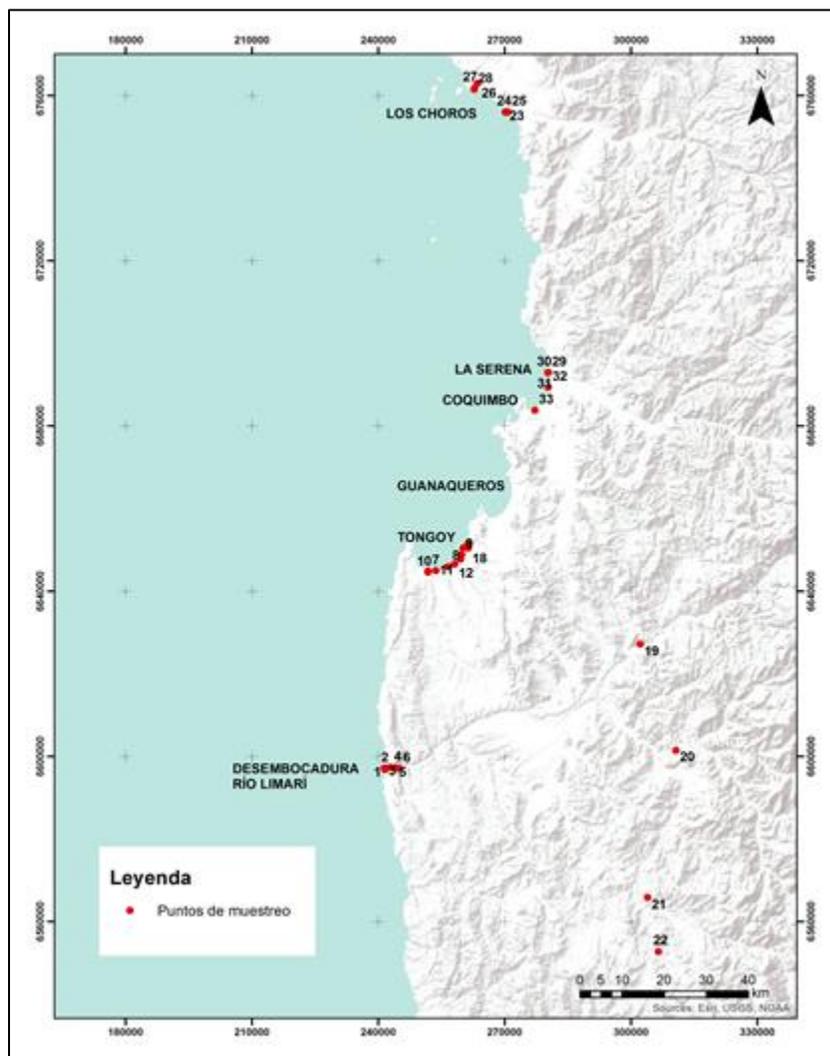
Para la caracterización geomorfológica del área se consultaron las siguientes fuentes, la mayoría parte de los resultados del Proyecto FONDECYT N°1120234.

- PASKOFF, R. 1970. Recherches geomorphologiques dans le Chili semi-aride. Vol 1. Bordeaux: Bordeaux Biscaye; 1970.
- PETTIJOHN, F. J., 1963. Rocas sedimentarias. Editorial Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires, 731 pp.
- VILLAGRÁN, C. P. 2007. Dinámica costera en el sistema de bahías comprendidas entre ensenada Los Choros y Bahía Tongoy. Memoria para optar al título de Geógrafa. Universidad de Chile.
- LAGOS G. 2013. Caracterización geomorfológica y dinámica costera de bahías del semiárido de Chile. Casos de estudio: Bahía Tongoy y Bahías Barnes. Región de Coquimbo. Memoria para optar al título de Geógrafa. Santiago, Chile.
- BENAVENTE N. 2015. Relaciones dinámicas asociadas al litoral-playa-dunas anteriores del campo de duna de Los Choros, Región de Coquimbo. Memoria para optar al título de Geógrafa. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- CABELLO M. 2016. Análisis geomorfológico de la sección occidental del Cordón de Sarco: Identificación de terrazas marinas. Región de Coquimbo, Chile. Memoria para optar al título de Geógrafo. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- ROJAS ORMEÑO, I. 2016. Caracterización dinámica de las dunas activas en la Ensenada de Los Choros, IV región de Coquimbo. Memoria para optar al título de Geógrafa. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

### 3.2. Análisis sedimentológico

Uno de los métodos de contrastación utilizados para evidenciar aporte sedimentario entre la mega ensenada, sus partes, y el río Limarí, es la evidencia sedimentológica. Para éste caso, se ha realizado un análisis mineralógico de 33 puntos a lo largo de la costa de la ensenada de Coquimbo y de la desembocadura del Limarí, así como de los afluentes de éste último. La Figura 3 expresa la distribución del muestreo, que incluye las localidades de Los Choros, Tongoy y Bahía Barnes, la desembocadura del río Limarí y sus afluentes – río Hurtado, río Grande, río Cogotí y río Combarbalá.

**Figura 3 Muestreo sedimentológico**



Fuente: Proyecto FONDECYT N°1120234.

La sedimentología proporciona un acercamiento a reconocer la naturaleza de origen de los sedimentos que conforman la unidad dunar de Los Choros; lo anterior, en base a características texturales, de hábito, esfericidad y grado de redondeamiento de cada especie mineral y fragmento lítico; que en su conjunto pueden ser indicador asociativo a tipologías de roca en específico, su fuente de origen y el tipo de transporte al cual han sido afectas.

Las muestras han sido descritas porcentualmente según la composición de los sedimentos, aplicando conteos modales y técnicas de descripción petrográficas. Los estudios basados en petrografía para la identificación de procedencia de sedimentos, se basan en análisis estadísticos, que entregan información de relevancia sobre la fuente de sedimentos que conforman los depósitos (DICKINSON, 1970).

En los depósitos identificados – dunas, bancos fluviales, etc. - se determina la abundancia relativa de los fragmentos detríticos presentes en las muestras recolectadas, por medio de la identificación de categorías de granos, tanto cristales mono-minerales como fragmentos de roca poliminerálicos, abarcando toda el área de la lámina delgada, en intervalos fijos, el cual debería ser mayor o igual al clasto de mayor tamaño presente en el corte transparente, el cual se analiza bajo un microscopio óptico (INGERSOLL, 1984).

Corresponden a muestras de arenas, los sedimentos detríticos más utilizados en estudios de procedencia, dado que se originan como partículas sólidas que se desprenden de la roca, pero, a la vez, son lo suficientemente pequeñas como para observar una muestra considerable de granos en una sola lámina delgada. Las partículas tamaño arena poseen la ventaja de conservar la composición y textura original cuando están formadas por fragmentos líticos, a pesar del transporte y de los procesos diagenéticos estos están casi inalterados, además de que guardan información sobre la roca que derivaron. Por otra parte, las características texturales (tamaño y forma de grano, entre otras) permiten determinar la madurez del sedimento original (INGERSOLL, 1984).

Los pasos seguidos en laboratorio, con las muestras mencionadas, son los siguientes:

- En primera instancia, se procedió a realizar el tamizaje del material sedimentario mediante el uso de la malla de 2mm con el fin de separar la muestra y poder realizar el análisis al material del tamaño comprendido entre el rango de arena gruesa y finos, además de extraer material vegetal e impurezas contenidas en la muestra. Las muestras inicialmente poseían una selección de tamaño de granos que fluctuaba entre buena a muy buena, en el análisis de microscopía óptica se destacó este hecho cuando la selección era excesivamente buena, lo que también indica condiciones especiales de transporte y deposición.
- Después de efectuado el tamizaje, se envió a un laboratorio externo, especializado en este tipo de cortes, una porción de cada muestra para la elaboración de briquetas aptas para el análisis con microscopía óptica mediante luz transmitida. La realización de estas briquetas demoró entre 15 a 20 días.
- Posteriormente se procedió con el análisis microscópico que consistió en la observación de las características mineralógicas y la abundancia relativa de las especies minerales y fragmentos hallados en las muestras, principalmente a 5x. La detección de una determinada especie mineral es posible mediante la observación de las propiedades ópticas características que ésta presenta, tales como color, geometría, clivaje, relieve, absorción y pleocroísmo a nícoles paralelos, y color de interferencia y extinción a nícoles cruzados. En un inicio el análisis por cada corte tomó aproximadamente 2 horas debido a la gran complejidad de las muestras, mientras que hacia el final del trabajo realizado este tiempo se redujo considerablemente.

- Para una mejor visualización y mayor entendimiento de la información obtenida, se confeccionaron tablas para cada muestra, separando así la especie mineral, su porcentaje y posibles alteraciones. Además, se realizaron observaciones adicionales como la granulometría, la forma en que se presentan los cristales, tanto en su redondeamiento y esfericidad, factores que hablan del retrabajo que experimentó y su proximidad a la fuente, y también indicaciones como la existencia de minerales clave, como es el caso de la microclina (feldespato potásico indicativo de rocas intrusivas). Así mismo, se incluyó en otra tabla la información entregada por el equipo que realizó el muestreo e imágenes tomadas con microscopía óptica de los cortes transparentes, tanto a nícoles paralelos como a cruzados de un mismo sector, principalmente a 5x, para facilitar las comparaciones entre las granulometrías de las muestras.
- Finalmente, las muestras son contrastadas entre sí, con los puntos cercanos a la quebrada de Los Choros y los depósitos dunares continuos a ésta.

El trabajo de laboratorio antes mencionado, se encuentra suscrito a esfuerzos realizados en el marco del Proyecto FONDECYT N°1120234 para el período 2012-2015.

### **3.2.1. Tratamiento de los datos**

Las muestras analizadas corresponden a tipos recolectados por el Proyecto Fondecyt N° 1120234, que consta de 33 muestras, 6 de éstas derivadas del análisis sedimentológico de la Quebrada Los Choros realizada por OCAMPO (2015), para su memoria de título.

Para el análisis fue utilizado el método de determinación de fuente de sedimento: Método de VEZZOLI (2007), que se detalla a continuación.

#### **3.2.1.1. Modelo de mezcla lineal**

Los modelos lineales son fundamentales en el análisis de información con múltiples variables. Cuando se formula un modelo lineal, uno observa un fenómeno representado por un vector de información obtenida a partir de distintos análisis y la relaciona con un set de información de variables fijas linealmente independientes. La composición petrográfica de las arenas que constituyen un tipo de depósito puede ser expresada por una mezcla de un número fijo de miembros terminales (end-members), la cual puede ser representada usando un análisis de regresión. Por definición, los análisis de regresión predicen una variable continua dependiente desde un número de variables independientes:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p)$$

El objetivo principal de los métodos de regresión es la descripción de cómo uno o más atributos que caracterizan cierta entidad en cierto set de datos dependen de un atributo de destino elegido. Esta dependencia funcional puede ser lineal o no lineal. Siendo  $y$  el vector fila que contiene la información porcentual de los  $p$  distintos fragmentos detríticos en sus  $p$  columnas,  $X$  una matriz que contiene la información composicional de los  $n$  miembros

terminales (end-members) en sus filas y  $p$  columnas en las que se representa la composición porcentual de los mismos  $p$  fragmentos detríticos con los que se representa el vector  $y$ , además  $b$  un vector columna con  $n$  columnas que representan la contribución de cada uno de los miembros terminales a  $y$ . En una notación matricial, un modelo de regresión lineal puede ser expresada como:

$$\gamma = bX + e$$

$$[y_1 \cdots y_p] = \begin{bmatrix} b_1 \\ \cdots \\ b_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ \cdots \\ e_n \end{bmatrix}$$

Donde  $e$  sería un vector columna con  $n$  filas, las que representan el error de la variable representada.

### 3.2.1.2. Diagnóstico de los parámetros para evaluar el modelo de mezcla lineal

El buen ajuste del modelo de regresión lineal es evaluado por medio de diferentes parámetros, que se dan a conocer a continuación.

#### 3.2.1.2.1. Similitud y distancia Camberra

Similitud ( $s$ ) es un concepto fundamental y ampliamente usado. Las medidas de Similitud son usadas para comparar objetos, y para decidir cuáles deberían ser agrupadas (objetos similares) y cuáles no. La forma más natural de análisis de Similitud es calcular la distancia ( $d$ ) entre los dos objetos ( $v$  y  $t$ ) que están siendo comparados. En estadísticas, la distancia de Camberra es basada en la correlación entre variables, por la cual diferentes parámetros pueden ser identificados y analizados (**Lance y Williams, 1966**). Es una forma útil de determinar la Similitud de un set de muestras desconocidas a una conocida.

$$d_{vt} = \sum_{j=1}^p \frac{|x_{vj} - x_{tj}|}{(x_{vj} + x_{tj})}$$

Como cada elemento de la suma está entre 0 y 1, valor máximo de  $d_{vt}$  es igual a  $p$ , donde  $p$  es el número de variables. Dividiendo la distancia de Camberra por  $p$ , la similitud de los objetos  $v$  y  $t$  es:

$$s_{vt} = 1 - \frac{d_{vt}}{p}$$

Donde valores cercanos a 1 representan objetos con un mejor ajuste al de un modelo de regresión lineal.

#### 3.2.1.2.2. Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis ANOVA es una herramienta útil para evaluar buenos ajustes. Se calculan los siguientes parámetros:

- Suma residual de cuadrados (*RSS*, *residual sum of squares*)

$$RSS = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$$

- Suma de desviaciones de cuadrados (*MSS*, *model sum of squares*)

$$MSS = \sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2$$

Bajos valores de *RSS* y altos valores de *MSS* indican un buen ajuste del modelo de regresión lineal.

- Coeficiente de determinación

$$R^2 = \left( 1 - \frac{RSS}{MSS} \right) 100$$

Donde valores de  $R^2$  cercanos a 100 indican un buen ajuste de variables.

Mientras mayor sea el valor de  $R^2$  mejor es el ajuste de las variables regresoras para predecir  $y$ . Pues a mayor  $R^2$ , menor *RSS* y, por lo tanto, más cercanos están los puntos calculados con los valores observados.

### 3.3. WAVECALC - Transporte de sedimentos

Como parte del trabajo de investigación, se realizó el análisis bajo los parámetros de transporte de sedimentos desde las zonas aportantes de la mega ensenada de Coquimbo, con las variables indicadas por LE ROUX *et al.*, (2010), mediante su sistema WAVECALC.

Sobre la base teórica de los parámetros estadísticos para establecer tendencias de transporte de la hoja de cálculo Excel-VBA denominada WAVECALC, que permite estimar las características de las ondas y las condiciones de transferencia de masa, además de la influencia de los sedimentos de fondo; a diferentes profundidades oceánicas, latitudes, períodos de las olas, distancias desde las crestas, profundidades de generación de las olas, longitudes de las mismas, entre otros parámetros. Para esta investigación se ha utilizado para caracterizar la forma y dirección de transporte de sedimentos en la ensenada.

La mayoría de los cálculos generados por WAVECALC se basan en cuatro elementos, la longitud de onda ( $Lo$ )<sup>7</sup>, la altura de onda ( $Ho$ ), la profundidad de ruptura ( $db$ ), y la altura de la ruptura ( $Hb$ ). Sobre esa base se pueden obtener resultados del comportamiento de un sector

---

<sup>7</sup> El subíndice o indica condiciones de aguas profundas completamente desarrolladas.

en específico, para condiciones de olas en aguas profundas, condiciones de transición y aguas poco profundas y para reconocer características de arrastre de sedimentos.

Es éste último *output* es considerado en específico para la presente investigación, dado que ayuda a predecir el comportamiento del transporte de material sedimentario, que es difícil de realizar en condiciones mareales de aguas profundas.

La mayoría de los métodos utilizados se basan en estudio de laboratorio y teorías de ondas lineales<sup>6</sup> y que por lo tanto no son directamente aplicables a las condiciones de onda no lineal en el campo. Mientras que WAVECALC, utiliza los métodos planteados por LE ROUX *et al.*, (2010), para la determinación de arrastre de sedimentos, que compara la velocidad horizontal máxima calculada, teóricamente de la partícula de agua, en la parte superior de la capa límite, con la velocidad límite determinada según el método de YOU & YIN (2006), modificado por LE ROUX (2007).

Entre los resultados que proporciona la WAVECALC, entre las celdas D30 y D32 se obtiene información sobre el comportamiento de arrastre, teniendo en cuenta que la pendiente ( $\alpha$ )<sup>8</sup> es positiva para el transporte terrestre y negativa para el transporte marítimo. En estas celdas se comparan la velocidad de límite crítico requerida para arrastrar los sedimentos a la velocidad de límite calculada bajo la cresta de onda y la depresión, respectivamente. Si la velocidad límite crítica es superada por los valores reales, entonces se indica en estas células el arrastre hacia tierra o hacia el mar.

Es importante tener presente que WAVECALC, y las teorías ahí incluidas, no siempre presenten una transición perfecta desde aguas profundas a poco profundas, es por lo que se debe tener en consideración este aspecto al momento de analizar los resultados obtenidos.

Sobre la base de lo anterior, la hoja de cálculo Excel-VBA WAVECALC, de ahora en adelante WAVECALC, precisa de los siguientes datos a considerar para su utilización, conjunto a su exposición se indican las principales fuentes utilizadas en el presente documento.

---

<sup>8</sup> Condiciones de pendiente de fondo.

Tabla 1 Variables incluidas en el trabajo con WAVECALC

VARIABLES	FUENTE
Latitud	Posición geográfica, entre los 29° y 30° latitud sur.
Profundidad de generación de la ola	Mediante la extracción de valores batimétricos de las bases medidas y estimadas de la topografía del suelo marino. Proyecto GEBCO2014. Grid de terreno continuo del océano y continente, con resolución espacial de 30 arc seconds. Se presenta como la actualización del GEBCo08grid, que a su vez se basa los archivos del srtm desde FTP SRTM30_PLUS, entre grid V11. Fuentes David T. Sandwell, Walter H. F. Smith, and Joseph J. Becker, 2008. The Regents of the University of California. Actualización: 29 de noviembre de 2014. Becker, J. J., D. T. Sandwell, W. H. F. Smith, J. Braud, B. Binder, J. Depner, D. Fabre, J. Factor, S. Ingalls, S-H. Kim, R. Ladner, K. Marks, S. Nelson, A. Pharaoh, G. Sharman, R. Trimmer, J. vonRosenburg, G. Wallace, P. Weatherall., Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS, Marine Geodesy, 32:4, 355-371, 2009. Smith, W. H. F., and D. T. Sandwell, Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, Science, v. 277, p. 1957-1962, 26 Sept., 1997. ( <a href="http://topex.ucsd.edu/WWW_html/srtm30_plus.html">http://topex.ucsd.edu/WWW_html/srtm30_plus.html</a> ) GEBCO (General Bathymetric Chart of the oceans), grilla GEBCO 2014. ( <a href="http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/">http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/</a> )
Velocidad del viento	Explorador de Energía Eólica. Extracción de velocidad de vientos promedio para el año 2010. Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, Ministerio de Energía y GIZ. Simulaciones numéricas realizadas usando el modelo WRF (Weather Research and Forecasting), con alta resolución en la horizontal (1km), como en la vertical (10m), todo para el año 2010. Datos validados, mediante observación de viento en más de 350 sitios a lo largo del país. ( <a href="http://walker.dgf.uchile.cl/explorador/eolico2/">http://walker.dgf.uchile.cl/explorador/eolico2/</a> )
Altura de la ola	Fuente: Explorador de energía Marina. Departamento de Geofísica (DGF) de la Universidad de Chile, Ministerio de energía, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), y la Dirección de Investigación, Programas y Desarrollo de la Armada (DIPRIDA). Simulaciones realizadas usando el modelo WW3 (Wave Watch III) con alta resolución en el horizontal (1 km). Se simula la altura, dirección y período del oleaje para el año 2010. Datos validados en terreno a lo largo del país. ( <a href="http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Marino/">http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Marino/</a> )
Pendientes	Pendientes en grados, obtenidas de los datos batimétricos procesados en la plataforma Quantum GIS 2.8.1 Base batimétrica del proyecto GEBCO (General Bathymetric Chart of the oceans), grilla GEBCO 2014. ( <a href="http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/">http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/</a> )
Tamaño del sedimento	Tamaño por defecto 7,24mm. Guijaro según UDDEN (1914) – WENTWORTH (1922), y Guijaro medio según FRIEDMAN and SANDERS (1978)

Fuente: Elaboración propia en base a datos solicitados por WAVECALC en LE ROUX *et al.*, (2010)

WAVECALC se utiliza como una hoja de cálculo, donde es posible ingresar datos precisos para el área de análisis, generando como resultado una serie de datos referentes a la naturaleza de las condiciones de las aguas profundas, a condiciones de las olas de agua de transición y poco profundas, zonas de rompientes y de arrastre de sedimentos. En la Figura 4, a continuación, se presenta WAVECALC, y la disposición de cada uno de los ítems antes mencionados, presentes en la vista de trabajo. De los cuáles se indican para reemplazar según el área de análisis, entre las celdas A4 y D12, dependiendo de la disponibilidad de los datos solicitados. En caso contrario, el autor indica valores por defecto que pueden ser utilizados.

Figura 4 WAVECALC

A		B		C		D	
J.P. Le Roux <sup>1</sup> , Z. Demirbilek <sup>2</sup> M. Brodalka <sup>3</sup> , B. Flemming <sup>4</sup>		<b>WAVECALC</b>		Fully developed waves and sediment entrainment		<sup>1</sup> Universidad de Chile, <sup>2</sup> US Army Corps of Engineers, <sup>3</sup> University of Pretoria, <sup>4</sup> Senckenberg Institute	
Measured atmospheric and hydraulic conditions						Actions	
Latitude: $\Omega$ (°)	Wave period: $T_w$ (s)	Distance from crest: $x$ (m)		Breaker height: $H_b$		6.2087	
45	6	0		1.8371			
Wave generation depth: $d_g$ (m)	Wave length: $L_w$ (m)	Time: $t$ (s)		Iterate!		Change C10 until D4eD5 Add C10 value to D9 Add D5 value to D10	
200	0	0					
Water viscosity: $\mu$ (kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	Wave height: $H_w$ (m)	Depth from DWL: $z$ (m)					
0.00099	0	0					
Water density: $\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )	Wave length: $L_w$	Still water depth $d$ (m)				6.7803	
1025	0	6.7803				6.2088	
Wind velocity: $U_s$ (m s <sup>-1</sup> )	Wave height: $H_w$	Sea floor slope: $\alpha$ (°)		Sediment size: $D$ (mm)		7.24	
15	2	1					
Deepwater wave conditions							
Gravity acceleration: $g$ (m s <sup>-2</sup> )	Wave period: $T_w$ (s)	Water surface elevation: $\eta$ (m)		Horizontal crest velocity: $U_{chc}$ (m s <sup>-1</sup> )		1.0409	
9.81	6	0.994		-1.0409			
Radian frequency: $\omega$	Wave height: $H_w$ (m)	Median crest diameter: $MCD_c$ (m)		Horizontal trough velocity: $U_{htc}$ (m s <sup>-1</sup> )		9994.92	
1.0472	1.9879	28.1036		-1.0409			
Wave number: $k$	Wavelength: $L_w$ (m)	Median trough diameter: $MTD_o$ (m)		Subsurface pressure: $P$ (kg m <sup>-2</sup> )		279179.7438	
0.1118	56.2072	28.1036		9994.92			
Wave phase: $\theta$ (°)	Orbital diameter at $z$ : $d_{or}$ (m)	Wave celerity: $C_o$ (m s <sup>-1</sup> )		Total wave energy: $E_t$ (kg m s <sup>-2</sup> )		279179.7438	
0	1.9879	9.3679		279179.7438			
Transitional and shallow water wave conditions				Breaker zone		Sediment entrainment	
Significant wave height: $H_w$ (m)	Horizontal semi-exc. at $z$ : $A_{horc}$ (m)	Breaker height: $H_{ba}$ (m)		Critical boundary velocity: $U_{bc}$ (m s <sup>-1</sup> )		0.6649	
2	0.99395	6.2088		0.6649			
Significant wave length: $L_w$ (m)	Vertical semi-exc. at $z$ : $A_{vert}$ (m)	Breaker depth: $d_{br}$ (m)		Max. crest boundary veloc: $U_{bc}$ (m s <sup>-1</sup> )		0.7227	
59.0837	0.99395	6.7803		0.7227			
Significant wave celerity: $C_w$ (m s <sup>-1</sup> )	Hor. veloc. below crest: $U_{chrc}$ (m s <sup>-1</sup> )	Breaker length: $L_{ba}$ (m)		Max. trough boundary veloc: $U_{htc}$ (m s <sup>-1</sup> )		0.8782	
9.8473	0.9004	59.0838		0.8782			
Median crest diameter: $MCD_w$ (m)	Vert. veloc. below crest: $U_{chvt}$ (m s <sup>-1</sup> )	Breaker celerity: $C_{ba}$ (m s <sup>-1</sup> )		Landward sediment transport		Yes	
30.9801	0.9004	9.8473		Yes			
Distance crest from bottom: $y_c$ (m)	Hor. veloc. below trough: $U_{chtrc}$ (m s <sup>-1</sup> )	Distance breaker from shore: $X_{ba}$ (m)		Seaward sediment transport		Yes	
7.7453	-1.0941	388		Yes			
Distance trough from bottom: $y_t$ (m)	Vert. veloc. below trough: $U_{chtrt}$ (m s <sup>-1</sup> )	Breaker type		Thickness of boundary layer: $\delta$ (m)		0.041	
5.7453	1.0941	Spilling		0.041			
$a$	$b$	$d/L_w$		$d_{ba}$		$d_{ba}$	
0.805702364	0.569219203	0.120630453		18.95689713			
$Re^*$	$H_w/H_w$	$H_w/L_w$		$U_{bc}$		$U_{bc}$	
4984.06354	0.9241	0.0339		22.396			
$s^*$	$C$	$T_R$		$U_{bc}$		$U_{bc}$	
6.366455607	18.53018065	7.778500749		0.6649			
Time (s)	Start	Pause	Continue	Reset time to zero	Type graph update speed (s) below		
0					0.3		
$D$	$E$		$\eta_c$		$\eta_{br}$		
0.017683	0.000166		-1.035		1.0546		
0.294372	$f$		$\eta_o$		$DWL$		
0.310939	171.8100		0.965		6.7393		
Note: This program is based on theoretical principles and has not been tested under field conditions, where complications arise because of wave interference, refraction and reflection, as well as coastal currents and irregular bottom topography.							

Nota: Captura de la hoja de cálculo WAVECALC, mostrando la sección de input y output, para un período de ola de 6s y una altura de onda de 2m. El gráfico en la parte inferior ilustra la onda ejemplificada.

Fuente: (LE ROUX *et al.*, 2010).

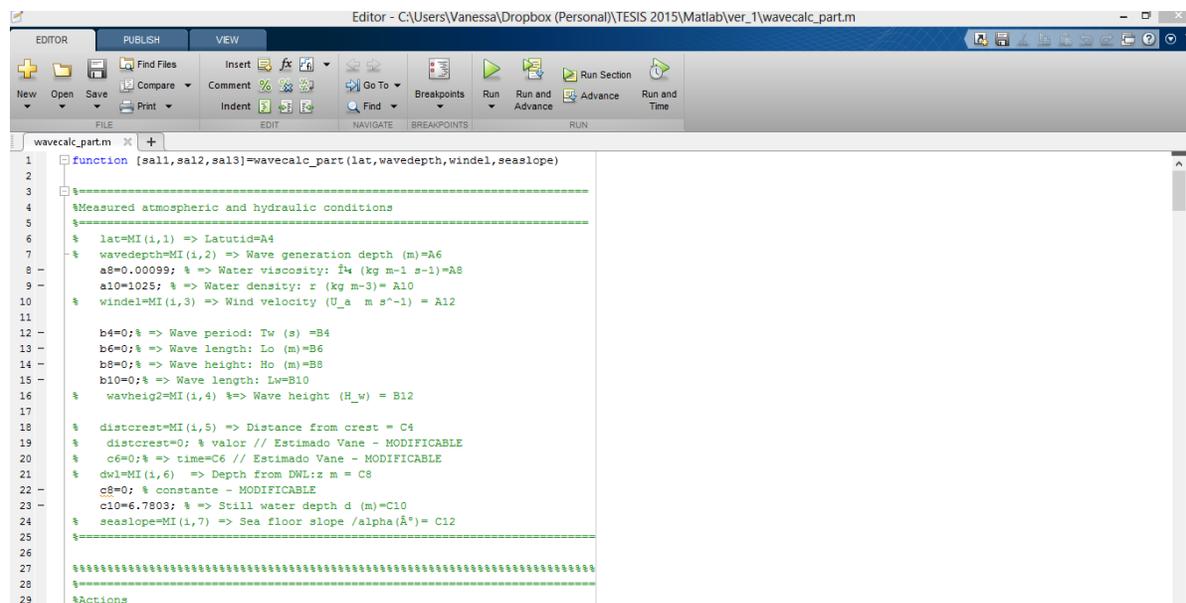
Por otra parte, los resultados del modelo matemático y tendencial, se observan desde las celdas A15 hasta el final de la hoja, entregando antecedentes claves para entender el comportamiento del oleaje en el sector, el potencial transporte de material sedimentario y la tipología de oleaje en el sector.

Todo el manejo de la información antes mencionada, trabajo satelital, cartográfico, y de diseño de resultados, se ha realizado a través de *ArcMap 10.3*, *Quantum GIS 2.18.2.*, apoyado de *Google Earth Pro* y *Gvsig Desktop*.

Dada la cantidad de información a manejar para caracterizar el área de la mega ensenada, y de las áreas aportantes de sedimentos planteadas, se utilizó la plataforma Matlab (ver Figura 5) para así manipular los 4.075 puntos identificados en la malla de muestreo del área de investigación.

En la plataforma Matlab, se ha diseñado un programa<sup>9</sup> que incluye el modelo matemático planteado por LE ROUX *et al.*, (2010), conectando así las matrices de entrada al programa y generando archivos de salida, principalmente las variables de tipo de quiebre de ola, el comportamiento de los sedimentos que se movilizan hacia la tierra, o desde la tierra hacia el mar. Los resultados son expresados en tablas de datos, que son manipulados posteriormente en plataformas SIG, para así espacializar los resultados obtenidos.

**Figura 5 Matlab – Programación WAVECALC, adaptado para el trabajo de investigación.**



```

1 function [sal1, sal2, sal3] = wavecalc_part(lat, wavedepth, windel, seaslope)
2
3
4 %-----
5 %Measured atmospheric and hydraulic conditions
6 %-----
7 % lat=MI(1,1) => Latitud=A4
8 % wavedepth=MI(1,2) => Wave generation depth (m)=A6
9 % a8=0.00099; % => Water viscosity:  $\mu$  (kg m-1 s-1)=A8
10 % a10=1028; % => Water density:  $\rho$  (kg m-3)= A10
11 % windel=MI(1,3) => Wind velocity (Ua m s-1)= A12
12
13 % b4=0; % => Wave period: Tw (s) =B4
14 % b6=0; % => Wave length: Lo (m)=B6
15 % b8=0; % => Wave height: Ho (m)=B8
16 % b10=0; % => Wave length: Lw=B10
17 % wavheight=MI(1,4) %=> Wave height (Hw) = B12
18
19 % distorest=MI(1,5) => Distance from crest = C4
20 % distorest=0; % valor // Estimado Vane - MODIFICABLE
21 % c6=0; % => time=C6 // Estimado Vane - MODIFICABLE
22 % dvl=MI(1,6) => Depth from DWL: z m = C8
23 % c8=0; % constante - MODIFICABLE
24 % c10=6.7803; % => Still water depth d (m)=C10
25 % seaslope=MI(1,7) => Sea floor slope /alpha(°)= C12
26
27 %-----
28 %-----
29 %Actions

```

Fuente: Elaboración propia en base a MATLAB.

<sup>9</sup> Programación del modelo de LE ROUX *et al.*, (2010), se presenta como anexo para su futura utilización por usuarios.

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Marco geológico

El área de estudio se constituye por un grupo de cuencas menores -sector norte -, que forman parte del piso costero de la cordillera, que ha sido modificado por procesos de depositación cuaternaria. Conformado principalmente por laderas modeladas en rocas de características volcánicas intrusivas y plutónicas. Todas estas cuencas conviven entre la presencia de remanentes de la cordillera costera con procesos de modelación actual, evidenciado por depósitos eólicos, fluviales y antrópicos.

Para el Limarí se presenta una situación diferente, teniendo para el área como característica principal, en un alto porcentaje del terreno en áreas denominadas como Cordillera de la Costa, siendo los depósitos holocénicos solo suscritos a superficies específicas, como el cauce del río Limarí, y algunas expresiones aisladas y alineadas a la costa en el interior del territorio. En esta área las zonas de depositación eólica no se encuentran presentes.

A continuación, se presenta la descripción geológica del área de estudio, poniendo atención a las áreas de potencial aporte sedimentario al sistema de Ensenada de Coquimbo.

#### 4.1.1. Contexto regional

La geología constituyente del área se conforma de rocas de edades desde el Triásico hasta el Holoceno, identificando trabajo mecánico, dada la presencia de sedimentos no consolidados producto de procesos erosivos actuales.

Según la geología a nivel nacional (SERNAGEOMIN, 2003), el área de estudio posee las siguientes unidades de roca características.

#### Secuencias sedimentarias<sup>10</sup>

Asociadas a rocas del Pleistoceno-Holoceno y Mioceno Superior, caracterizado por constituirse de depósitos aluviales (Qa), eólicos (Qe) *-con arenas de finas a medias con intercalaciones bioclásticas de dunas y barjanas tanto activos como inactivos (Zona de Los Choros, La Serena y menor presencia al sur de la ensenada de Coquimbo)-*, fluviales (Qf), en especial de los ríos Limarí y Elqui, que se presentan en formas de terrazas y relacionado a sus desembocaduras; así también se evidencia en el sistema de quebradas que confluyen hacia la costa a lo largo de la mega ensenada.

Finalmente, se presentan secuencias sedimentarias marinas transgresivas (MP1m) en sectores de Los Choros y Tongoy.

---

<sup>10</sup> Qa. Pleistoceno-Holoceno. Depósitos de carácter aluvial, subordinadamente coluviales o lacustres, gravas, arenas y limos. Qe. Pleistoceno-Holoceno. Depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanas tanto activos como inactivos. Qf. Pleistoceno-Holoceno. Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos de curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación. Q1. Pleistoceno-holoceno. Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. MP1m. Mioceno superior-Plioceno. Secuencias sedimentarias marinas transgresivas: areniscas, limolitas, coquinas, conglomerados, calizas y fangolitas.

### Rocas intrusivas

Rocas del Mesozoico entre el Triásico-Jurásico al Cretácico inferior bajo (TrJg, Kibg y Jsg),<sup>11</sup> compuesto por rocas monzodioritas, dioritas y granodioritas en general. Se sitúan principalmente al sur de Tongoy, junto al área costera del Limarí, río que la disecta. Aisladamente se observa en la zona entre Guanaqueros y Coquimbo, intercalada por secuencias sedimentarias. Es entre el sector distal de la ensenada de Serena y la proximal de Los Choros que se destaca su presencia.

### Rocas metamórficas

Rocas paleozoicas devónico-carbonífero<sup>12</sup> presentan en las zonas distales y proximales de la mega ensenada. Su existencia se limita a áreas específicas del área norte de la ensenada de Los Choros, intercalada por secuencias sedimentarias eólicas, y también, en el headland de Tongoy. Finalmente tiene presencia en el área norte de la desembocadura del Limarí, siendo antecedida a la costa por depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa litorales.

### Secuencias volcánicas

Secuencias volcánicas<sup>13</sup> presentes en terrazas altas, asociadas al Mesozoico entre el Jurásico y el cretácico inferior. Se presentan como secuencias con intercalaciones clásticas continentales y marinas.

Una de las principales estructuras identificadas corresponde a la **Zona de Falla de Atacama**, que tiene presencia desde el sur de Iquique hasta El Romeral, pueblo al norte de La Serena (asociada a zonas de rocas cataclásticas y miloníticas), MOSCOSO *et al.* 1982.

Así también la **Zona de Falla Romeral**, cuya traza se reconoce en las bases de la Cordillera de la Costa, dentro de ésta se identifican las denominadas falla Puerto Aldea y falla de Pachingo al sur del área, ubicadas en el sector suroccidental de los Altos de Tallinay, SOTO *et al.*, 2012.

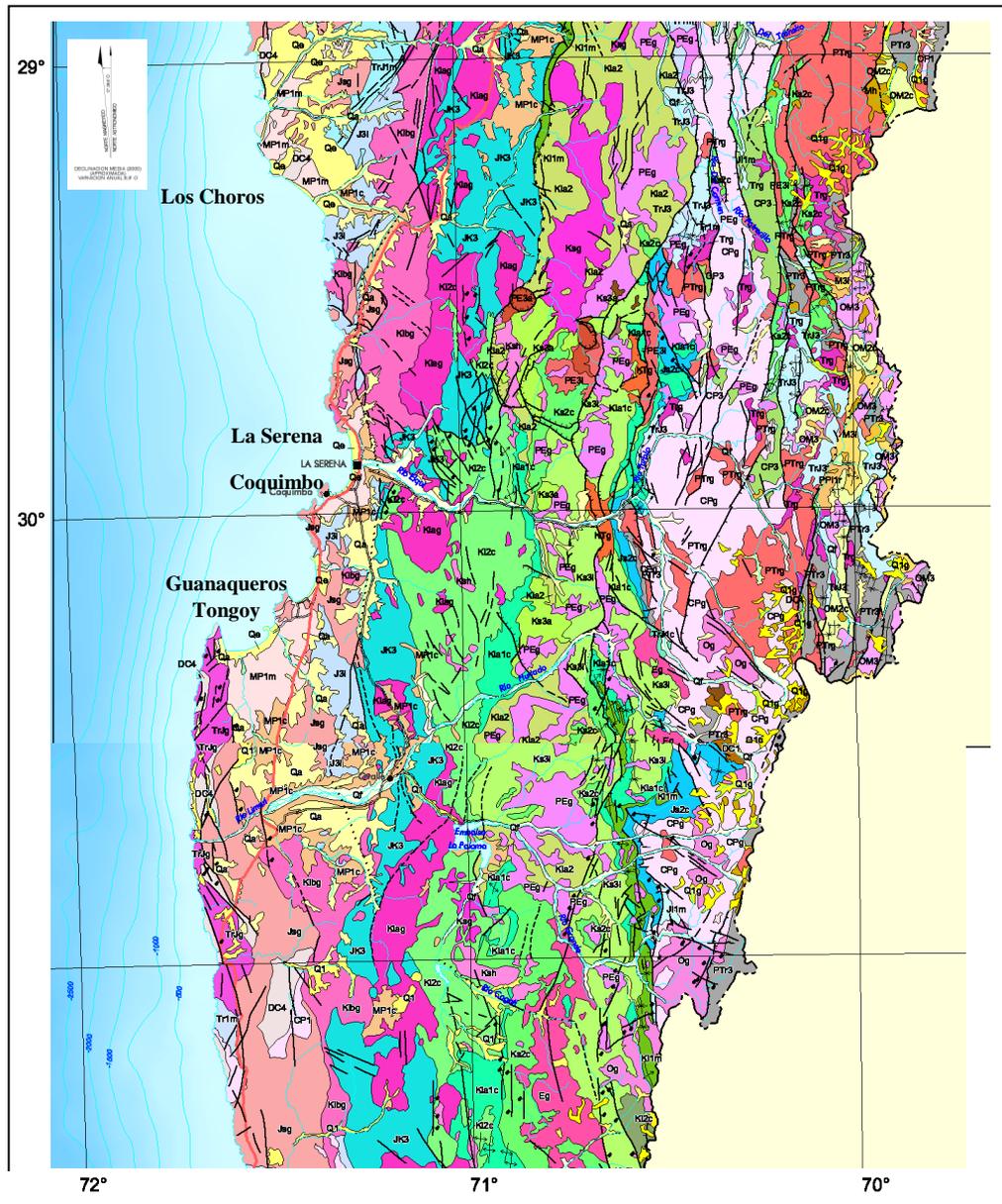
---

<sup>11</sup> **Jsg.** Jurásico Medio-Superior. (180-142 Ma). Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda. **Kibg.** Cretácico inferior bajo (144-124 Ma). Monzodioritas, dioritas de piroxeno, hornblenda y biotita, granodiorita y tonalita. **TrJg.** Triásico-Jurásico (212-180 Ma). Granodioritas. Monzogranitos, monzodioritas, dioritas y gabros de piroxeno y hornblenda.

<sup>12</sup> **DC4.** Devónico-Carbonífero. Metaareniscas, filitas y en menor proporción mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de mélange.

<sup>13</sup> **JK3.** Jurásico Superior-Cretácico inferior. Secuencias volcánicas: lavas basálticas a riolitas, domos, brechas y aglomerados andesíticos a dacíticos con intercalaciones clásticas continentales y marinas. **J3i.** Jurásico. Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas, riolitas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales.

Figura 6 Esquema geológico área de análisis



Fuente: Hoja 1 y 2 del Mapa Geológico de Chile. Versión digital (SERNAGEOMIN, 2003).

#### 4.1.2. Contexto local

A continuación, se presenta la estratigrafía del área de estudio, haciendo énfasis en los sectores costeros, principalmente asociados a las formas terminales de aporte y recepción de material sedimentario.

##### 4.1.2.1. Unidades Paleozoicas.

Las metamórficas de la costa (**Pz**), según la carta geológica Hoja Vallenar y parte Norte de La Serena (MOSCOSO *et al.*, 1982), corresponde a un conjunto de rocas de mediano a bajo grado de metamorfismo, intensamente deformadas, afloradas en el flanco occidental de la Cordillera de la Costa. Estas se ubican al norte de Los Choros y los tipos litológicos que la corresponden a esquistos, filitas y cuarcitas, se incluyen en la unidad, las metaareniscas y metapelitas con menor deformación.

En la Hoja Geológica de Ovalle (BOHNHORST, 1967), dentro las Unidades Paleozoicas y/o Precámbrico, desde Punta Lengua de Vaca, hasta el sur del Río Limarí, se cuentan la unidad **P**, correspondiente a rocas metamórficas y la unidad **Pm**, inserta en la Formación Matahuaico, principalmente formado por rocas volcánicas riolíticas con intercalaciones de rocas sedimentarias continentales; y la **Pzg**, esta última asociada a rocas graníticas.

Mientras que para la geología de Ovalle – Peña Blanca (EMPARAN & PINEDA, 2014), para el sector del Limarí, se presenta el complejo metamórfico del Choapa (**Pzch (c)**, **Pzch (a)**), compuesto por metasedimentitas y matabasitas de depositación submarina distal, en específico filitas de biotita, muscovita, anfíbola, cuarzo y epidota, bandeadas negro y blanco (metapelitas)

Por otra parte, el Complejo Metamórfico Punta de Choros (**CPmch**), se presenta como una unidad que se define como un complejo de rocas metamórficas constituido por paquetes decamétricos de esquistos micáceos con intercalaciones de esquistos verdes y anfibolitas. En menor proporción, se encuentran rocas metasedimentarias (metaareniscas y filitas). Esta se manifiesta como un conjunto de afloramientos, más bien aislados, ubicados en los llanos costeros a lo largo de la línea de costa actual (CREIXELL *et al.*, 2012).

##### 4.1.2.2. Unidades Mesozoicas

EMPARAN & PINEDA (2014), se identifica el complejo plutónico Altos de Talinay, en el Triásico superior (**Trat (a)**, **Trat (b)**). Compuesto principalmente por roca de falla con relaciones de contacto y afloramientos de aspecto intrusivo<sup>14</sup>.

Por otra parte, el mismo autor, emplaza intrusivos monzodioríticos-granodioríticos del Jurásico Medio-superior (**Jmg**), con monzodiorita cuarcífera de anfíbola-piroxeno-biotita,

---

<sup>14</sup> (a) Facies melanocrática de aspecto diorítico, (b) Facies leucocrática de aspecto granitoide, (c) Facies de apariencia agmática.

granodiorita de biotita-piroxeno-anfíbola y granodiorita leucocrática de anfíbola. Presentando en sectores, rocas cataclásticas y sectores de rocas miloníticas.

Para la zona del promontorio entre Tongoy y Guanaqueros, se indica la presencia del Complejo volcánico Agua Salada (**Jas (c)**), del Jurásico, con rocas volcánicas y subvolcánicas continentales, andesíticas, dacíticas, con escasa intercalación de areniscas y lutitas. Principalmente, de ignimbritas, con intercalaciones de andesitas y escasos filones andesíticos (EMPARAN & PINEDA, 2006).

#### 4.1.2.3. Unidades del Triásico al Cretácico Inferior en la Cordillera de la Costa

El grupo Bandurrias (**Kb**) se reconoce en el sector costero, al sur de Los Choros, intercalándose, hasta Los Hornos. Corresponde a un conjunto de rocas, predominantemente volcánicas, con intercalaciones sedimentarias, clásticas y calcáreas marinas, que presenta una relación de engrane lateral de facies con calizas de Grupo Chañarcillo.

#### Rocas Intrusivas asociadas.

- Franja Central (**Kg, Kgb**). Afloran desde Los Choros al sur, y se constituye de extensos plutones, incluyendo en su constitución, desde granitos a gabros. Los granitos (**Kg**) corresponden a rocas seminésico de anfíbola, de color rosado, con un notorio bandeamiento de minerales. Los gabros (**Kgb**), por su parte, afloran al norte del río Huasco y al sur de la quebrada de Los Choros.
- Franja Occidental o Costera (**Jkg**). Se ubica en la península de Coquimbo, y corresponde a franja de intrusivos discontinua y está formada por extensos plutones, principalmente por tonalíticos, granodioríticos, graníticos y dioríticos y algunos cuerpos gábricos.
- Intrusivos monzodioríticos-granodioríticos (**Jmg**), en el sector de Tongoy y Guanaqueros. Descritos como monzodiorita cuarcífera de anfíbola-piroxeno-biotita, granodiorita de biotita-piroxeno-anfíbola y granodiorita leucocrática de anfíbola.

#### 4.1.2.4. Unidades del Cretácico Superior al Terciario

La Formación Coquimbo (**Tec**), corresponde al conjunto de sedimentos marinos que aflora en la zona costera, que incluye areniscas amarillas, de grano medio a grueso, en parte limosas, con niveles de coquinas y, en su parte superior, areniscas amarillentas y conglomerados, con niveles carbonatados y fosilíferos.

Así también se tiene Depósitos Modernos No Consolidados (**Qal**), correspondientes a depósitos constituidos por gravas, arenas y ripios, con mala o ninguna estratificación y pobre selección, que se ubican en sectores de quebradas actuales, siendo parte de un rejuvenecimiento del paisaje.

En formaciones del Cuaternario de la Hoja de Ovalle (BOHNHORST, 1967), se hallan **Qtb**, **Qtm**, asociadas, la primera, a terrazas de abrasión marina bajas y rocas sedimentarias, la segunda.

#### 4.1.2.5. Mioceno -Pleistoceno – Holoceno

Según la carta de Carrizalilo El Tofo (CREIXELL *et al.*, 2012), para el área de Los Choros, se identifican los siguientes tipos de depósitos.

- Depósitos Litorales (**PIHI**). Corresponden a limos, arenas y gravas que cubren terrazas de abrasión marib y zonas litorales, siendo cubiertos, en sectores como Los Choros por depósitos eólicos.
- Depósitos Eólicos (**PIHE**). Son arenas bien seleccionadas de grano medio a muy fino, con nulo o leve grado de consolidación, originándose a partir de transporte de partículas por el viento.

En el sector de Tongoy y Guanaqueros (EMPARAN & PINEDA, 2000;2006), se observan depósitos de carácter:

- Eólico (**Qe**), presentados como dunas y mantos de arenas finas arcóscas no consolidadas, situadas en áreas continuas a las playas marinas actuales, en especial en el sector de Tongoy.
- Aluvional (**Qa**), como brechas no consolidadas polimícticas con matriz de arena y limo, son la constitución fundamente del relleno de quebradas y forman conos en las zonas distal de las mismas.
- Fluvial (**Qf**), antiguos y recientes, con composición de gravas gruesas y muy gruesas con matriz de arenas débilmente o no consolidadas.
- y asociados a playas marinas (**Qm (a)**), caracterizada por arenas medias a gruesas arcóscas-lícticas, no consolidadas, con un contenido variable de bioclastos.

Para la Hoja Geológica de Ovalle (BOHNHORST, 1967), entre otras unidades el Cretácico Inferior, se suma los Estratos de Tamaya (**Kt**). Estos se forman, principalmente, en rocas volcánicas traquícticas y riolícticas de color gris claro anaranjado o blanco, las rocas volcánicas corresponden a lavas, brechas y tobas ignimbrícticas. Para la misma carta, pero en el Jurásico, se cuenta las unidades con predominio de Granito a granodiorita (**Jgd**).

Así también, EMPARAN & PINEDA (2000; 2006), reconocen la presencia, en Tongoy y Guanaqueros y La Serena, de la formación Coquimbo (**MPlcq (a)**, **MPlcq (b)**), con areniscas finas limosas, y de calizas bioclásticas de matriz soportadas y (bio) clastosoportadas minoritarias. Con intercalaciones de areniscas bioclásticas finas y gruesas.

EMPARAN & PINEDA (2014), identifica para el sector de Limarí, la formación confluencia **MPlc (b)**, con depósitos continentales fluviales, aluvionales y lacustres, con brechas matriz soportadas, gruesas a muy gruesas, oligomícticas, con mediana a baja consolidación, Clastos

angulosos en parte orientados, con matriz que varía de limo-arenosa a areniscas de guijarros, del tipo aluvional.

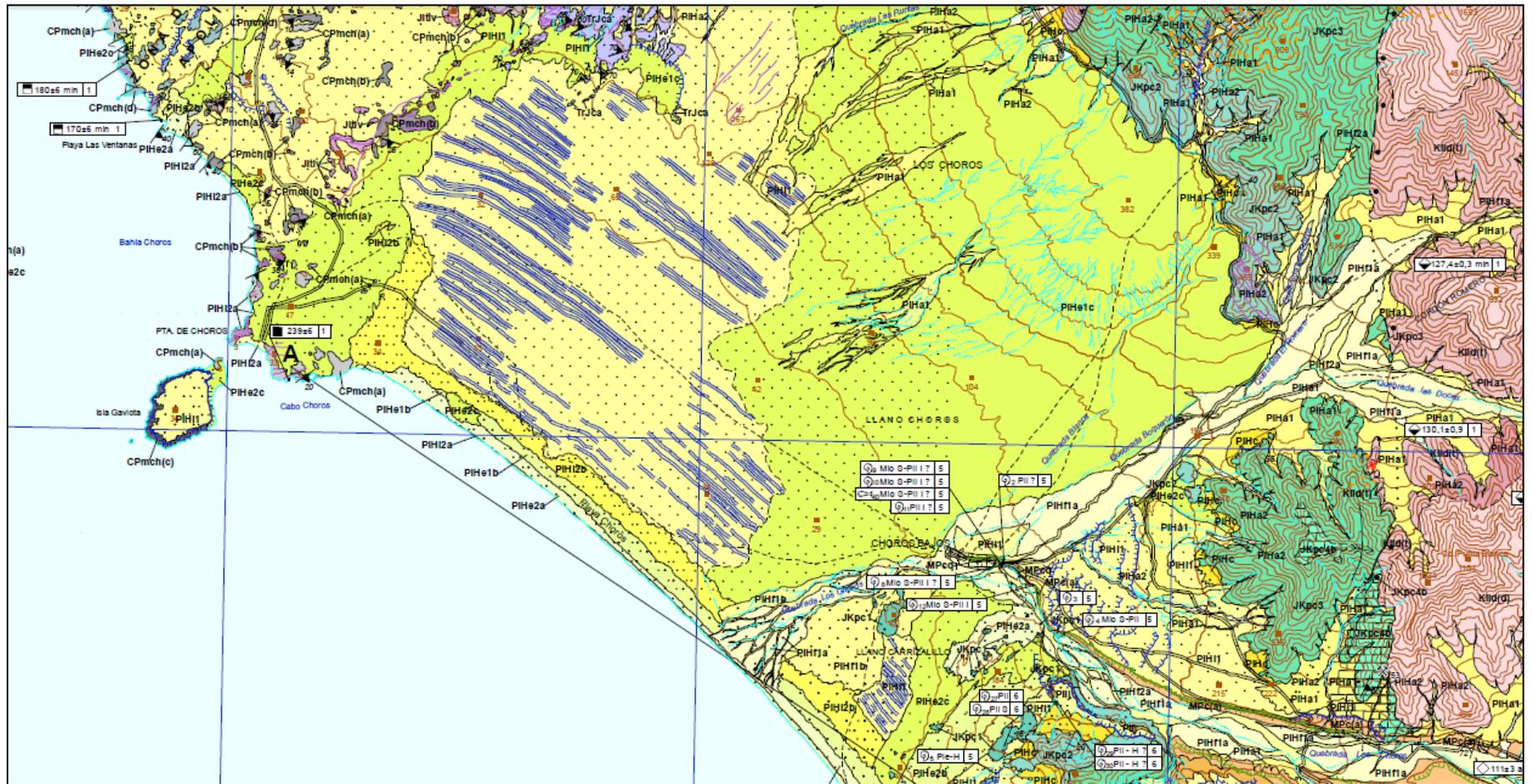
También, describe depósitos aluvionales antiguos y reciente (**PIHa**), con brechas polimícticas con matriz de arena y limo, débilmente consolidadas y no consolidadas; formando conos en la salida de quebradas.

Entre los depósitos identificados, se tienen fluviales recientes (**Hf**), constituidas por gravas gruesas y muy gruesas, polimícticas, con abundante matriz de arena, no consolidada. Se asocia principalmente a los cauces actuales.

Con respecto a depósitos de playa, éstos sólo se observan en el sector costero asociado a la Quebrada Arrayán, al norte de la desembocadura del Limarí, con depósitos de playas marinas (**Hm (a)**), con arenas medias a gruesas arcósico-líticas, no consolidadas, con un contenido variable de bioclastos.

Los extractos de los sectores costeros, en las mencionadas cartas, se presentan en las figuras: **Figura 7, Figura 8, Figura 9 y Figura 10.**

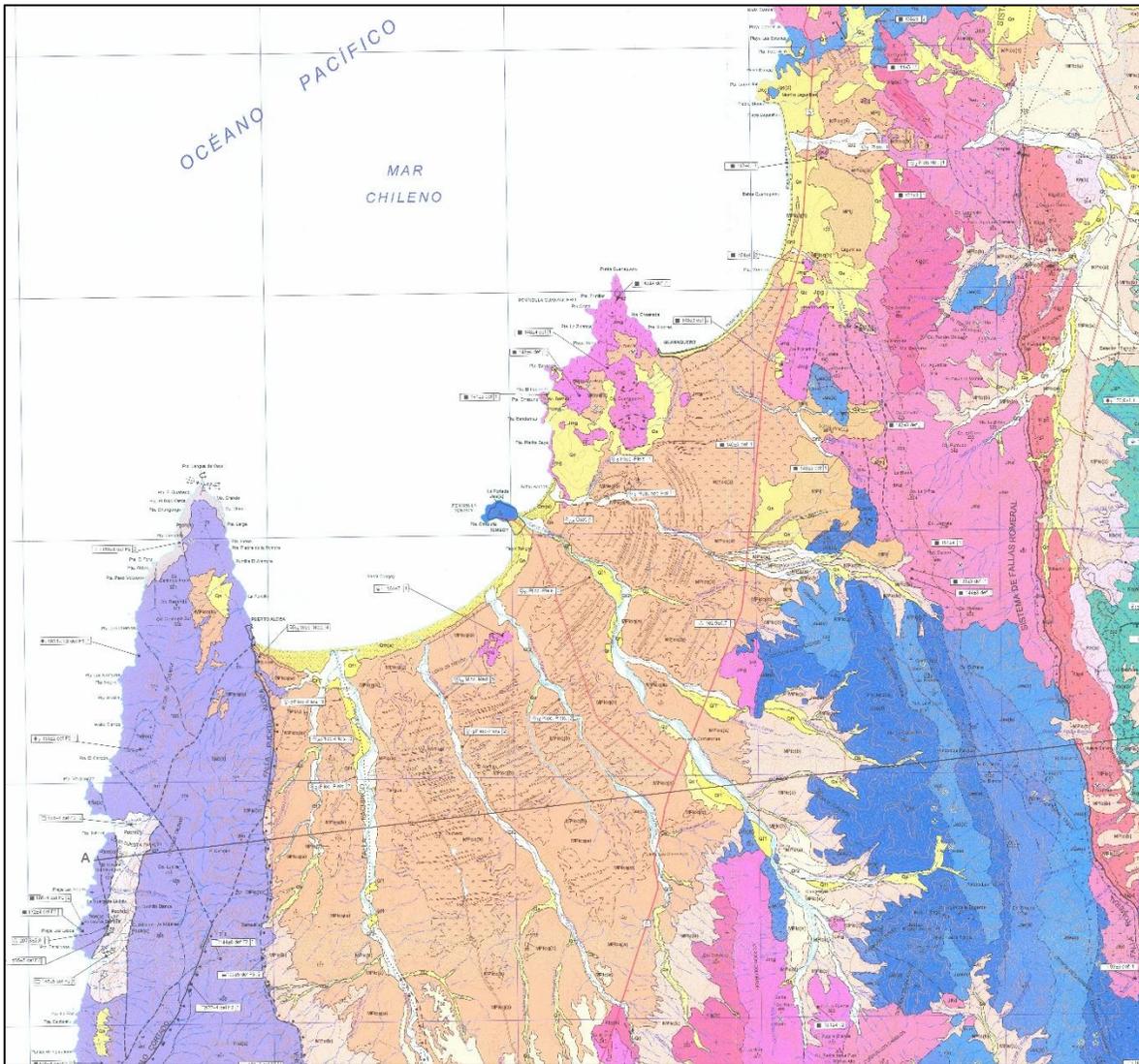
Figura 7 Geología Los Choros



Fuente: Extracto Geología del área Carrizalillo - El Tofo. (CREIXELL *et al.*, 2012).

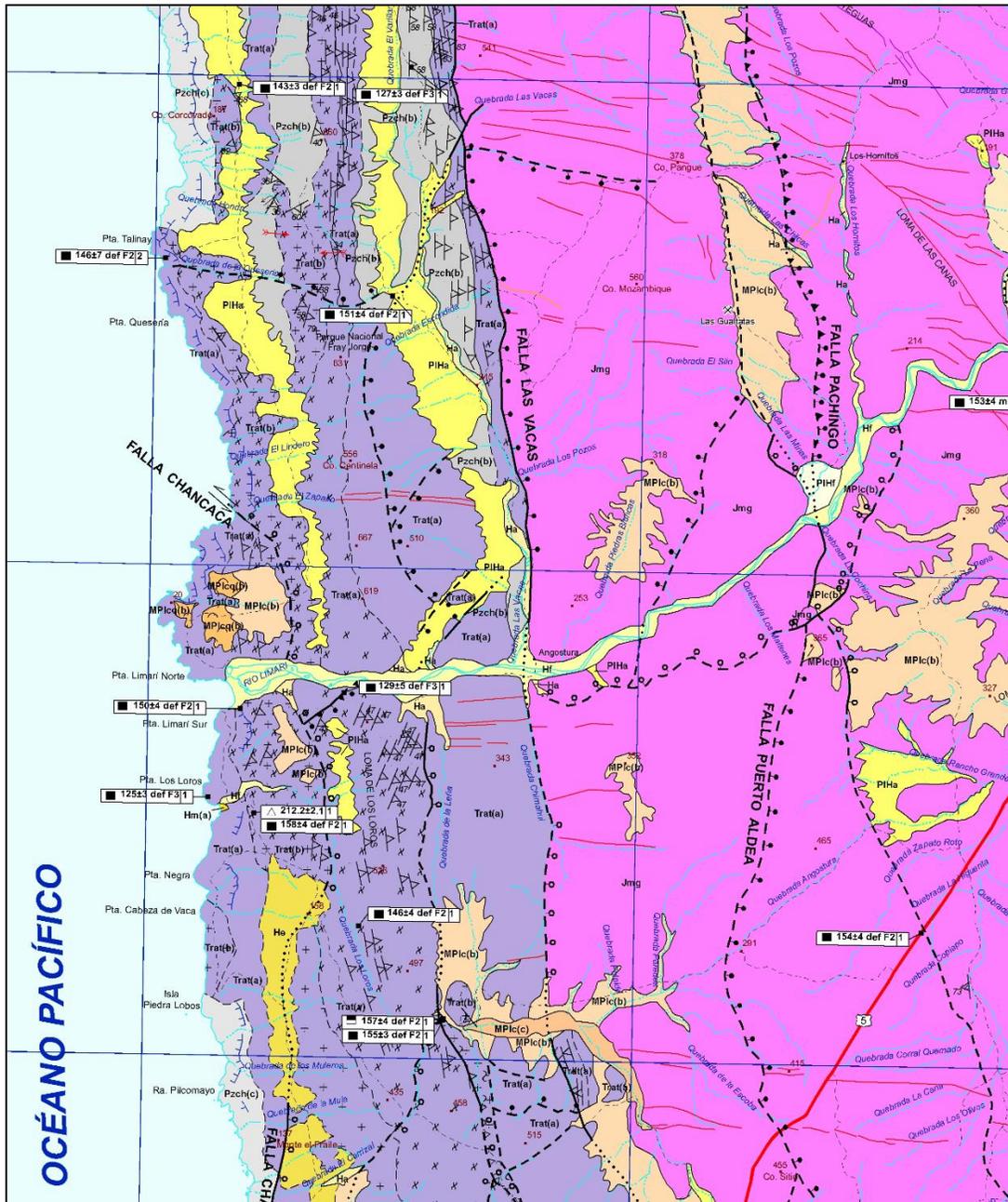


**Figura 9 Geología del área de Andacollo – Puerto Aldea**



Fuente: Extracto Geología del área Andacollo – Puerto Aldea (EMPARAN & PINEDA, 2006).

Figura 10 Geología del área de Ovalle – Peña Blanca



Fuente: Extracto Geología del área Ovalle – Peña Blanca (EMPARAN & PINEDA, 2014).

#### 4.2. Caracterización geomorfológica

La configuración morfológica del área analizada, está estrechamente ligada a la importancia de la tectónica. Según CABELLO (2015), el segmento correspondiente a la Región de Coquimbo presenta a lo menos dos factores que contribuyeron al alzamiento y la caracterización del paisaje regional, el primero, es el aumento de la convergencia de placas durante el Oligoceno, y la migración norte a sur de la subducción de la Dorsal de Juan Fernández, ocurrida entre los 16 y 12 Ma.

VILLAGRÁN (2007) indica que en el sector litoral norte chileno, entre las latitudes 26°S y 33°S, la subducción del plateau oceánico como es el caso del archipiélago Juan Fernández, se ha evidenciado a unos 150 km. al norte de Tongoy, donde existió un levantamiento de alrededor de 80 m.

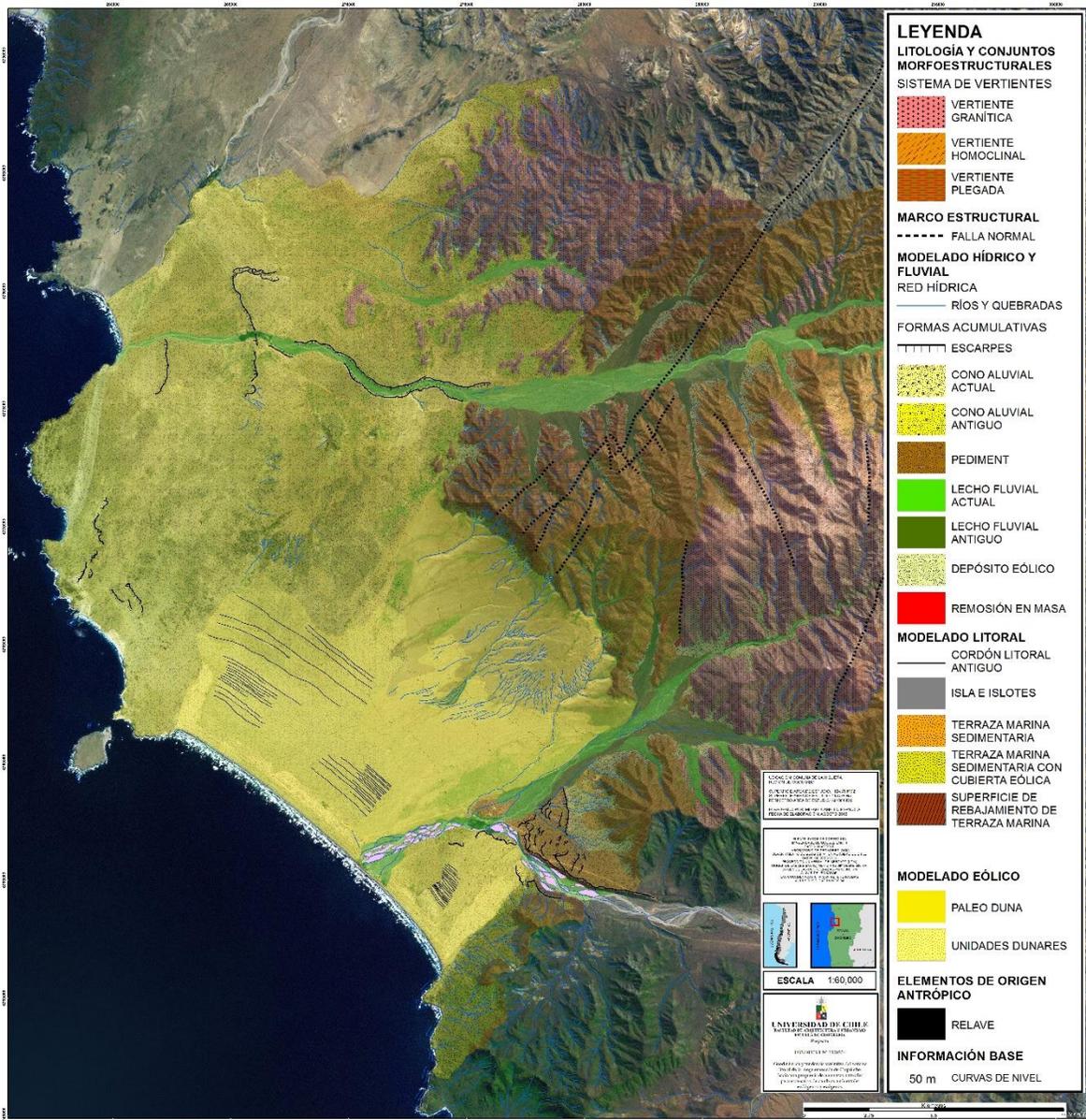
Esta situación tuvo un efecto sobre el nivel del mar en todo este sector, asociándose a un elevamiento del continente en el área de Tongoy. A partir de la combinación de movimientos tectónicos, depositación y abrasión marina durante el periodo de alzamiento tectónico, se pasa a un hundimiento, que acaba a la sedimentación marina e iniciándose el retiro del mar.

Es así como la geomorfología específica del área se presenta en las siguientes figuras, desde Los Choros hasta el sur de la desembocadura del río Limarí. En ellas, para el sector costero, puede evidenciarse la presencia de terrazas, las cuales, según VILLAGRÁN (2007), son los resultados de transgresiones y regresiones asociadas a las fluctuaciones del nivel del mar de origen glacio-eustático, que fueron sobrepuestas en un levantamiento del continente, identificándose a través de evidencias arqueológicas y la datación con radiocarbono.

Se evidencian, además importantes sectores con presencia de Plataformas de abrasión Marina, las cuales, según CABELLO (2015), corresponden a superficies que se presenta con una serie de niveles aterrizados, ondulados e inclinados, generados a partir de procesos de alzamiento continental, teniendo como límite superior en contacto la Cordillera de la Costa, llegando, aproximadamente a los 100 m.s.n.m. Indica, además, que en sectores como las bahías de Coquimbo y Tongoy, y considerando su extensión en relación de la línea de costa y la Cordillera de la Costa, se presentan 5 niveles de superficies aterrizadas.

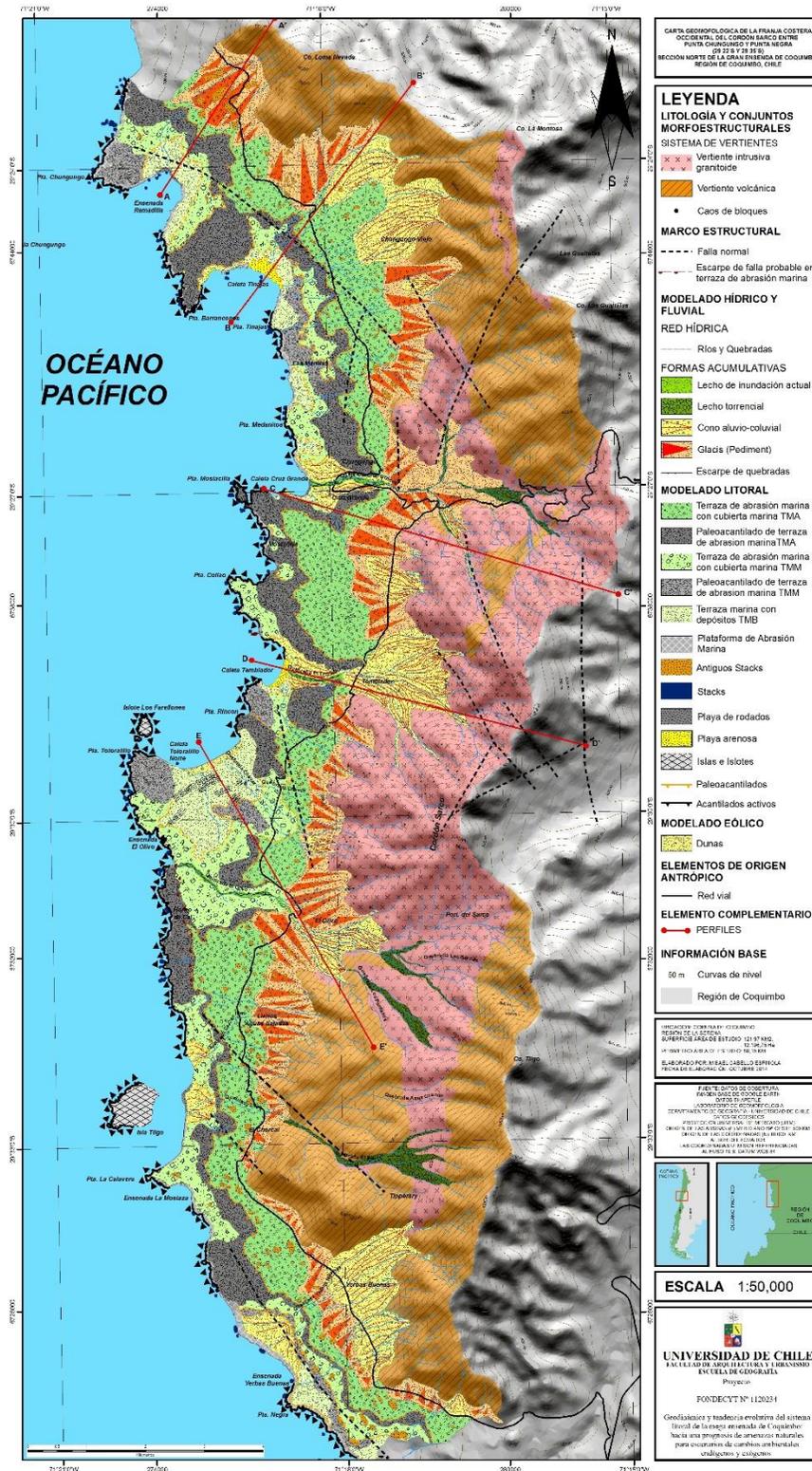
Finalmente, la caracterización geomorfológica de terrazas de abrasión, campos dunares, playas arenosas u otra forma asociada al área, fue realizada en el marco del Proyecto FONDECYT N°1120234, en conjunto a los aportes de PASKOFF (1966), y se presenta en las figuras a continuación.

Figura 11 Geomorfología Los Choros



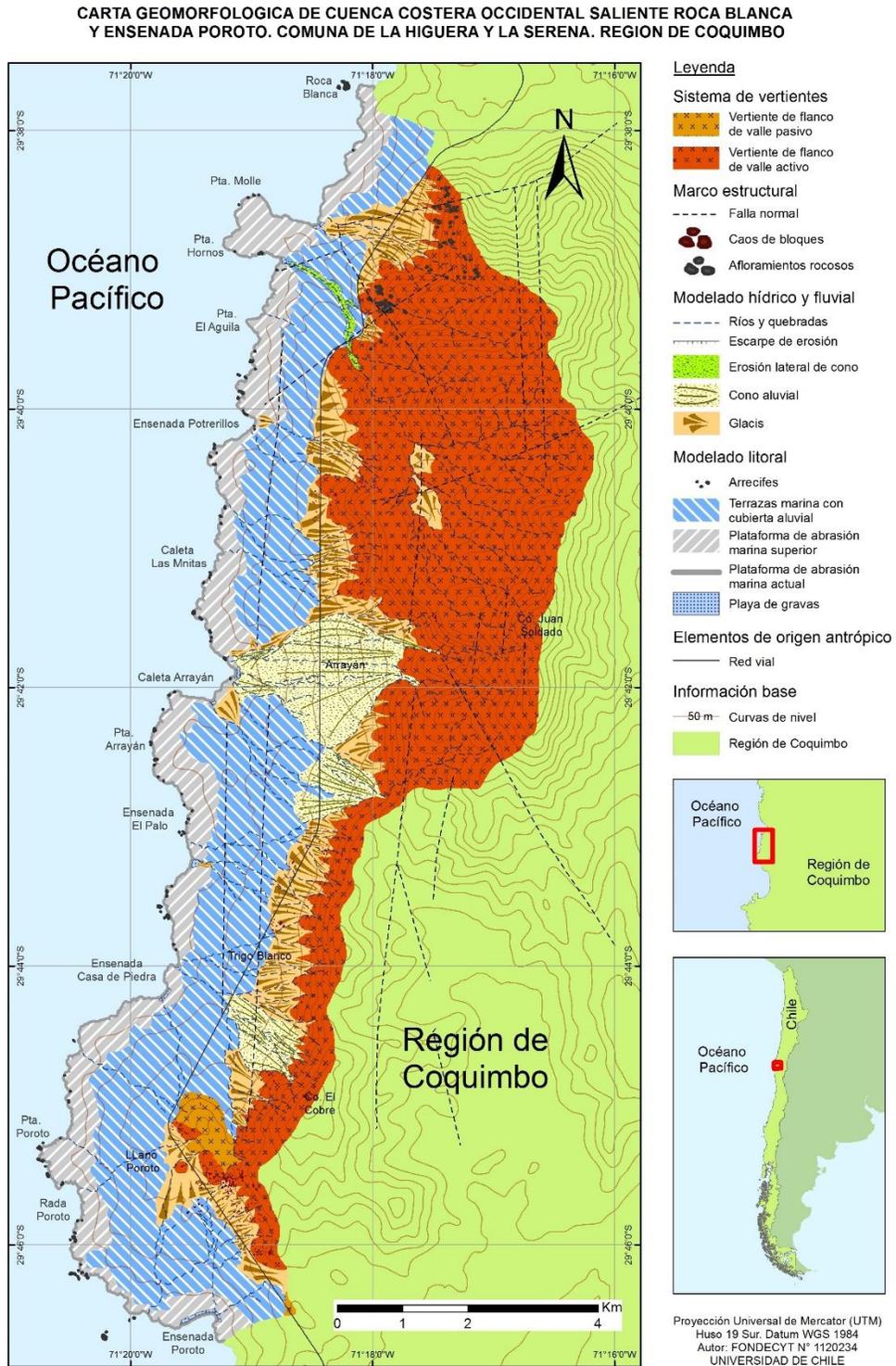
Fuente: Proyecto FONDECYT N° 1120234.

Figura 12 Geomorfología Cordón de Sarco



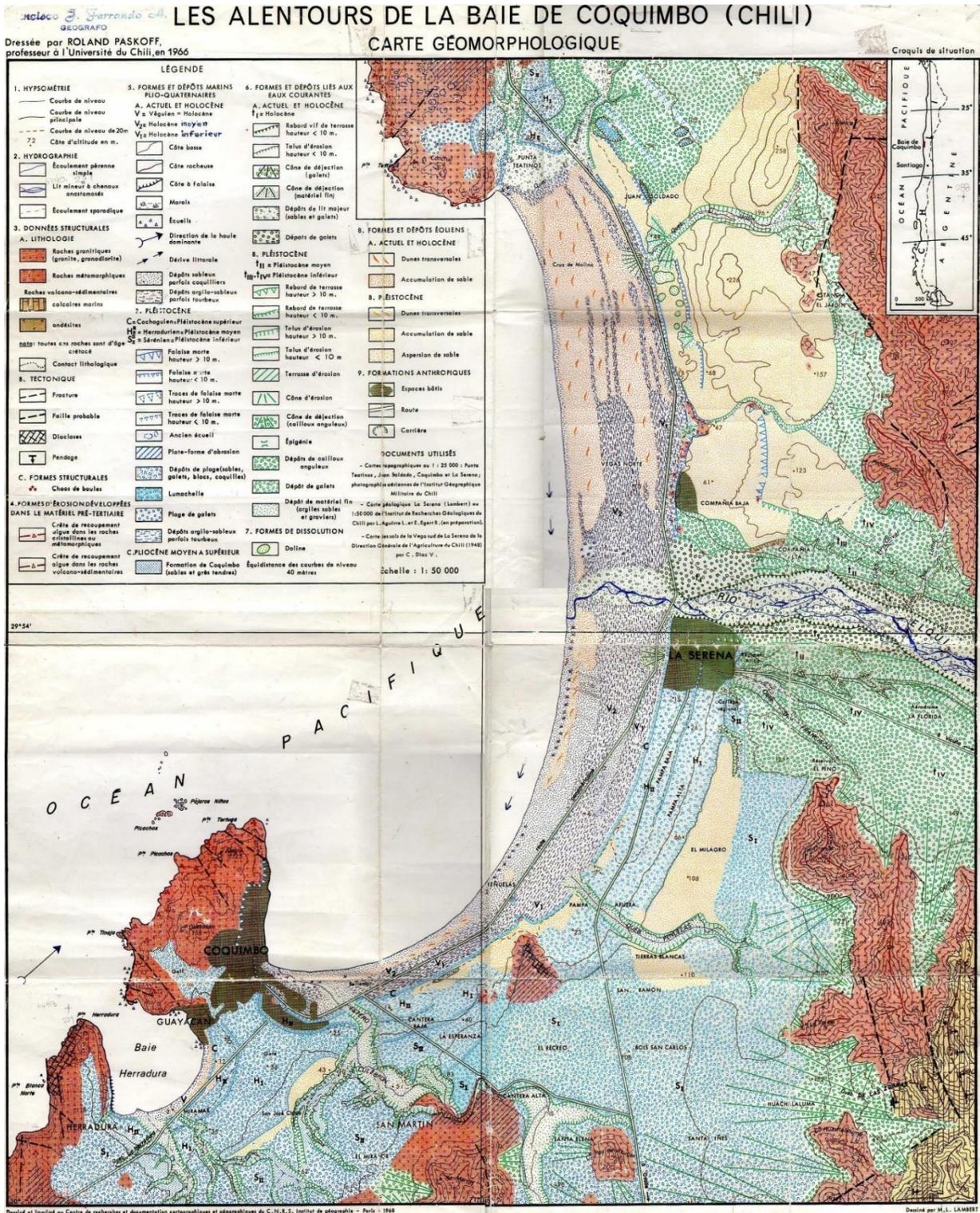
Fuente: Proyecto FONDECYT N° 1120234.

Figura 13 Geomorfología Cuenca costera occidental saliente Roca Blanca y Ensenada Poroto.



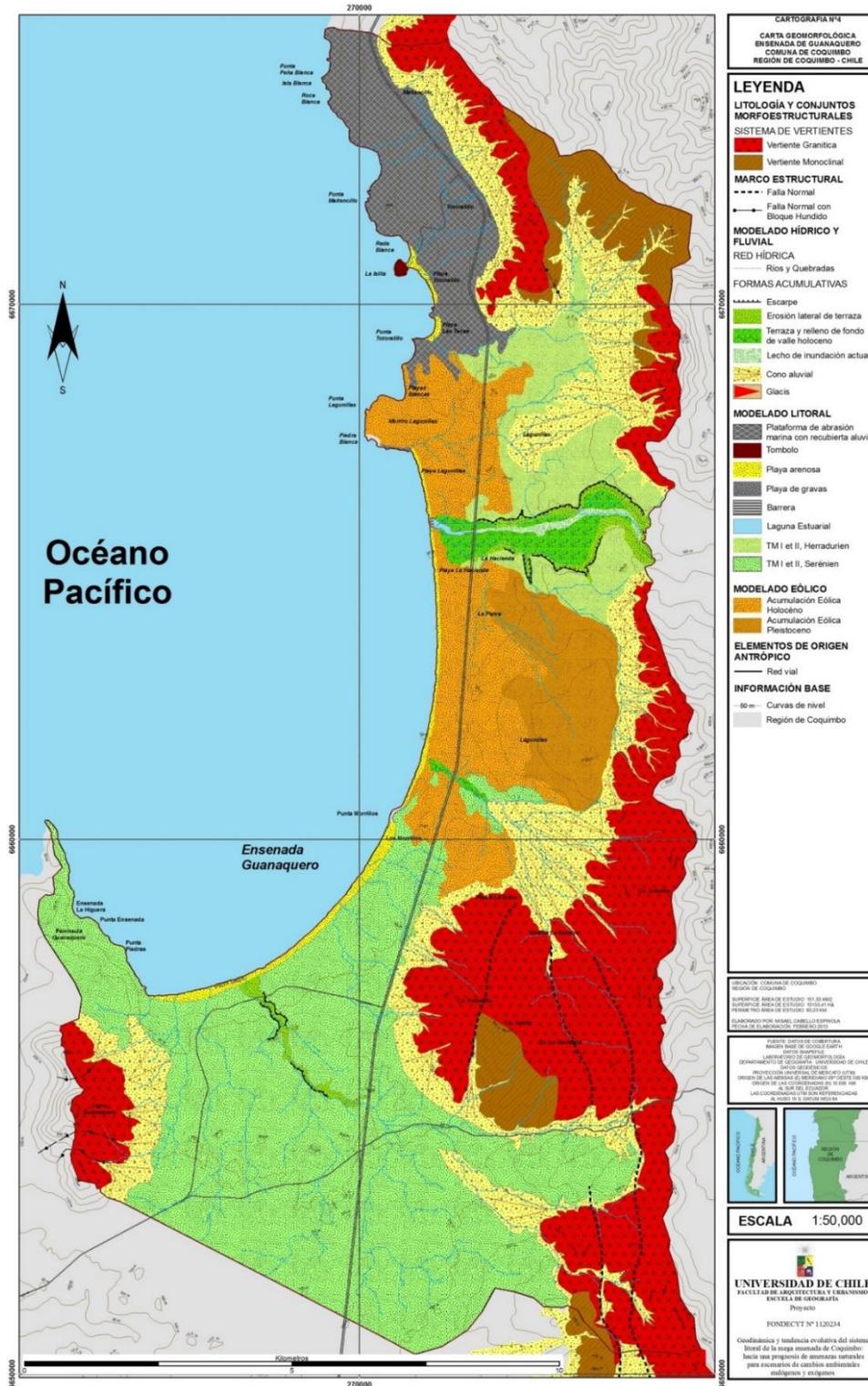
Fuente: Proyecto FONDECYT N° 1120234.

Figura 14 Geomorfología Bahía de Coquimbo



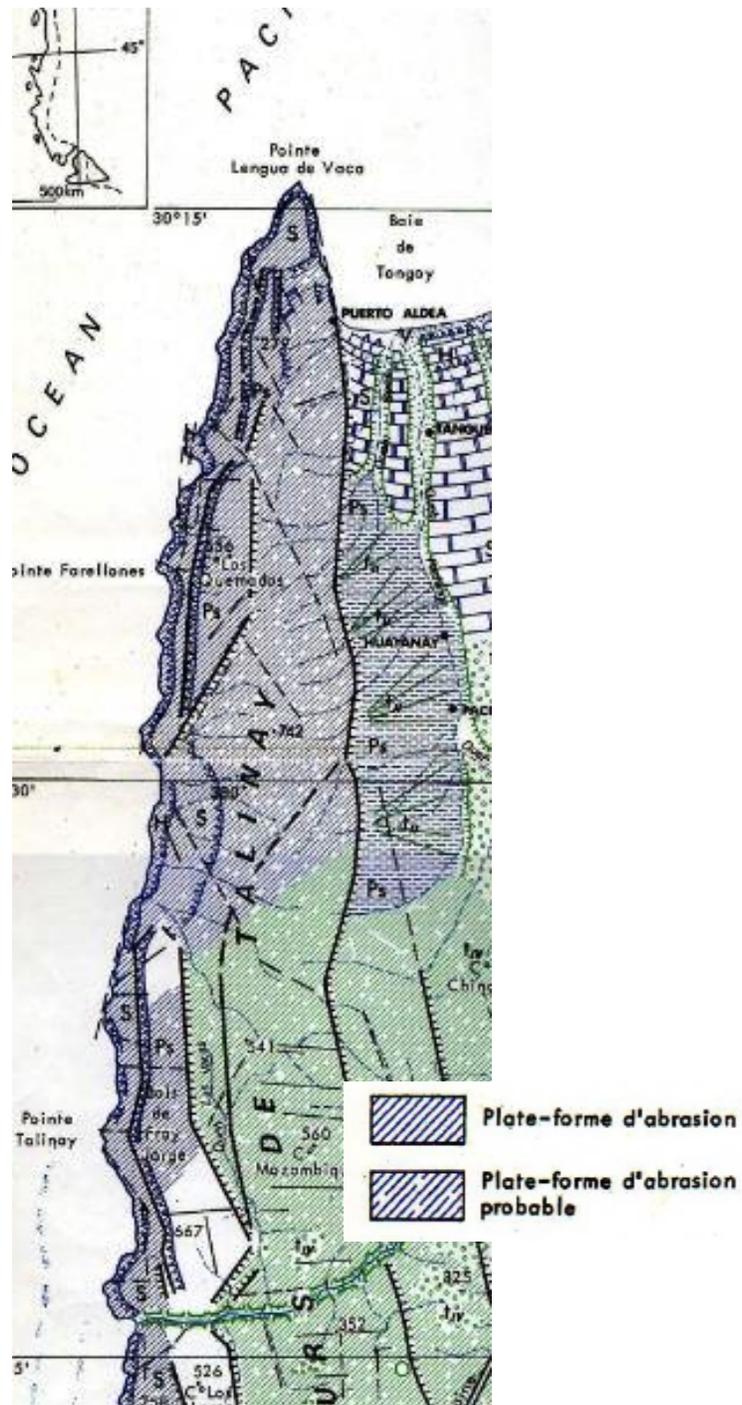
Fuente: PASKOFF (1966).

Figura 15 Geomorfología Guanaqueros



Fuente: Proyecto FONDECYT N° 1120234.

Figura 16 Geomorfología Limarí-Tongoy



Fuente: PASKOFF (1966).

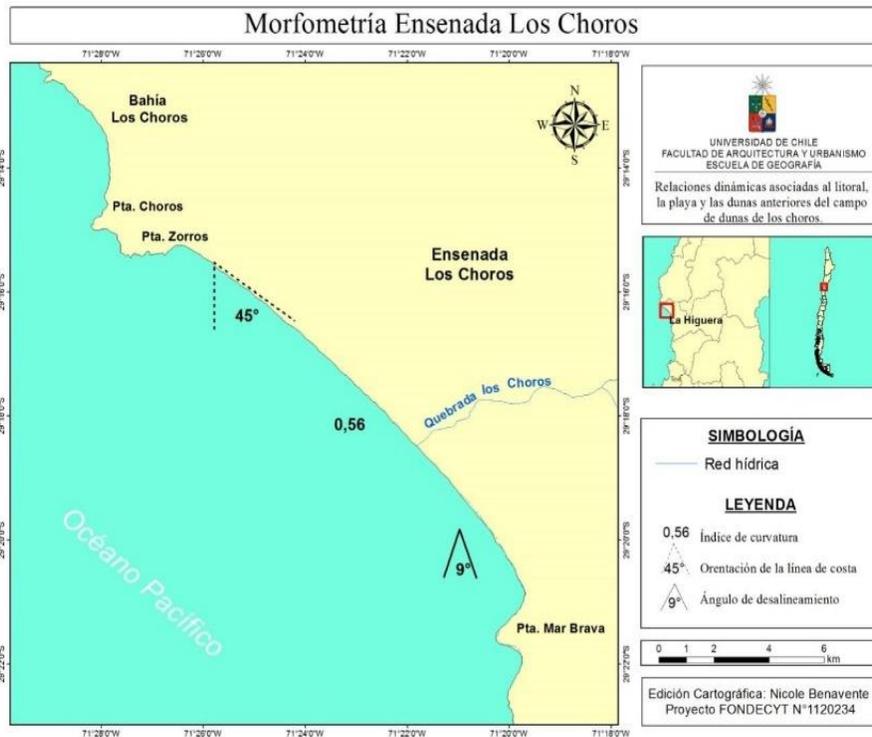
### 3.3.1. Geomorfología, morfometría y morfodinámica de ensenadas del área de estudio

#### 3.3.1.1. Los Choros

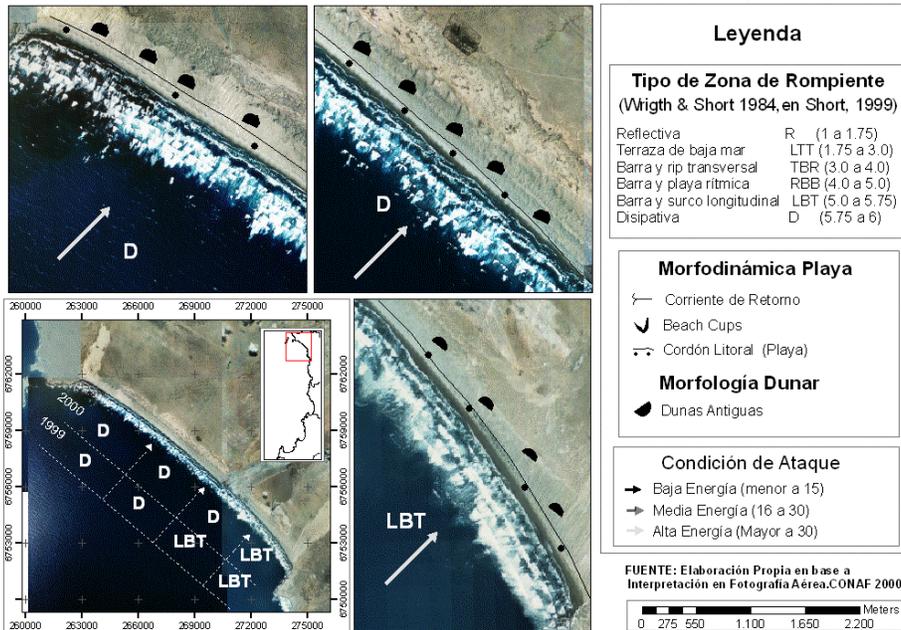
Con respecto a la morfometría litoral y tipología de zona de rompientes se indica lo siguiente; la ensenada posee una orientación respecto al norte de  $45^\circ$  en sus tres secciones con dirección NW-SE. Condición que deja expuesta la línea de ataque y arribo de manera perpendicular tanto del viento como del oleaje (BENAVENTE, 2015). Con respecto a los análisis de zonas de rompientes se tienen análisis de dos fuentes, para así cubrir un lapso mayor. Mientras para los años 1999 y 2000, la zona de rompientes se describía por ser de carácter disipativa en la zona dista y media, en la zona proximal se tienen barras y surcos longitudinales (VILLAGRÁN, 2007). Para los años 2002, 2007 y 2013 la condición no ha sufrido mayores cambios. Lo anterior denota alta energía en el sector (BENAVENTE, 2015).

Con respecto a la condición global de ataque, está se expresa con un promedio de 22 para la zona proximal (nivel medio de ataque), zona media con 56 (alta energía) y finalmente la zona distal con 28 (media energía).

**Figura 17** Morfometría y morfodinámica de Caleta Ramadilla

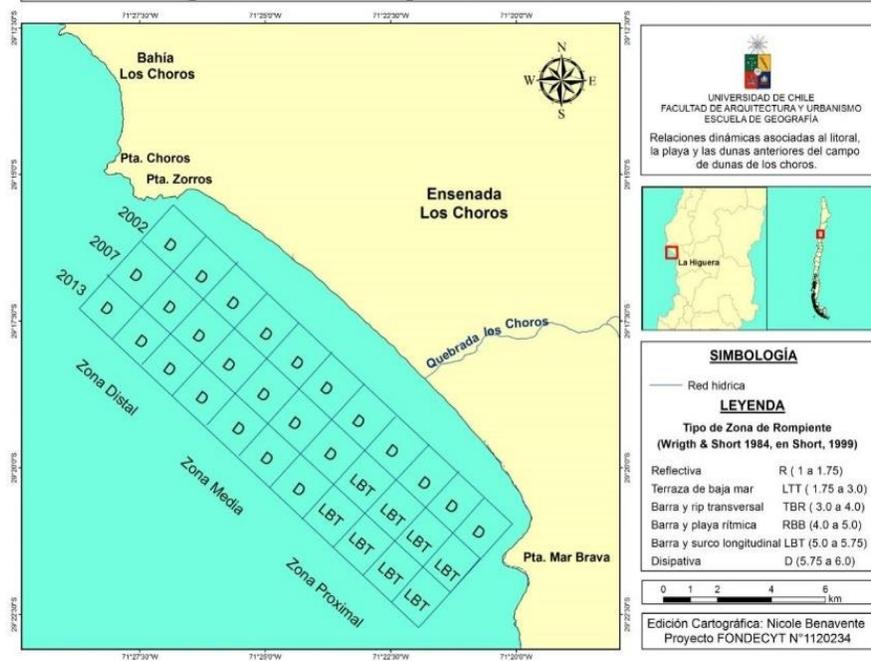


Tipo de Zona de Rompiente (TZR) en Los Choros, IV Región de Coquimbo



"Dinámica costera en el sistema de bahías y ensenadas comprendidas entre Sector de Los Choros y Bahía Tongoy"

Tipo de Zona de Rompiente Ensenada Los Choros

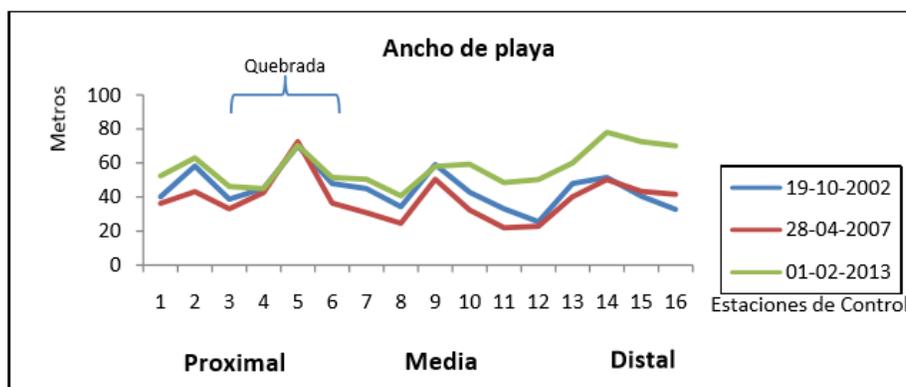


Fuente: FONDECYT N°1120234, BENAVENTE (2015) y VILLAGRÁN (2007).

El ancho de la zona de surf, entre los años 2002 y 2013, ha experimentado variaciones del orden de los 50 a 576m, el ancho de playa en el mismo periodo ha variado de forma significativa. BENAVENTE (2015), denota que el ancho de playa, en su límite más interno, está determinado por la aparición de dunas anteriores, mientras que en la quebrada Los Choros, el cordón de dunas se encuentra interrumpido por su desembocadura, lo que explica

el ensanchamiento de la playa en las estaciones de control que coinciden con desembocadura de la quebrada.

**Figura 18 Ancho de playa ensenada Los Choros**



Nota: Estaciones de control cada 1.000m, aproximadamente.

Fuente: BENAVENTE (2015).

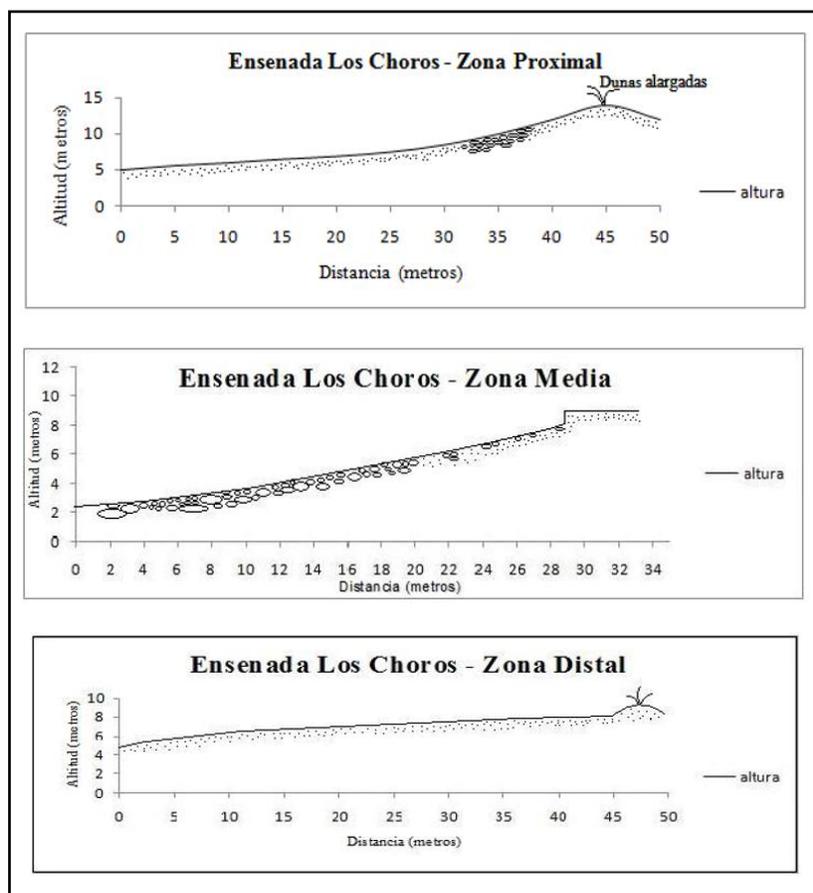
Con respecto al sistema dunar, ROJAS (2016), describe la ensenada caracterizada por tres frentes activos, con dos lenguas transgresivas; las dunas anteriores, dunas embrionarias, barjanes, barjanoides, transversales y longitudinales conllevan una condición de abastecimiento de arenas en el litoral como en la playa; y finalmente, indica que el campo dunar se encuentra en un proceso evolutivo asociado al *continuum dunar*, evidenciando un abastecimiento de arenas constante.

En la zona proximal de la ensenada, la playa tiene una longitud de 40m, de ellos 30m corresponden a cara de playa. El perfil asciende de forma cóncava y posee una inclinación moderada hasta la alta-playa (BENAVENTE, 2015). Se constituye como un depósito de rodados, de potencial establecimiento por episodios de brazas o de marea alta.

La zona media, se caracteriza por presentar un perfil de playa de 33m, desde la máxima resaca al comienza las lagunas litorales. La playa se constituye en su primer tramo de una playa de rodados, que en extremo alcanzan los 40cm, evidenciando alta energía del oleaje en el sector. Según ARAYA-VERGARA (1986) en BENAVENTE (2015), el perfil se denomina como monosecucional con características erosionales.

Finalmente, la zona distal experimenta un aumento en el ancho de playa, en comparación a las secciones anteriores, el perfil posee una extensión de 50m de los cuales 45m corresponden a la playa en sí. La playa se denomina monosecucional con características acrecionales (BENAVENTE, 2015).

Figura 19 Perfiles de playa Ensenada Los Choros



Fuente: BENAVENTE (2015).

### 3.3.1.2. Ramadilla:

Referente a la tipología de zona de rompientes, es caracterizada por ser del tipo Reflectiva (años 2001-, 2005 y 2011), con una orientación de la línea de costa (azimut) de  $315^\circ$ , un ángulo de desalinamiento (offset) de  $5^\circ$  y un índice de curvatura de 0.31.<sup>15</sup>

Según CABELLO (2016), en la ensenada presenta forma de herradura muy cerrada, protegida por dos salientes rocosas, aun así, debido a la perpendicularidad de la ensenada con la dirección del viento, las olas atacan de igual manera directamente a la playa. Se clasifica como rocosa, aparecen algunos stacks en ella, y en la zona distal presenta una playa de bolsillo o *pocket beach*, con un ancho aproximado de 20m que cuenta con dos fases de depositación que el autor describe como:

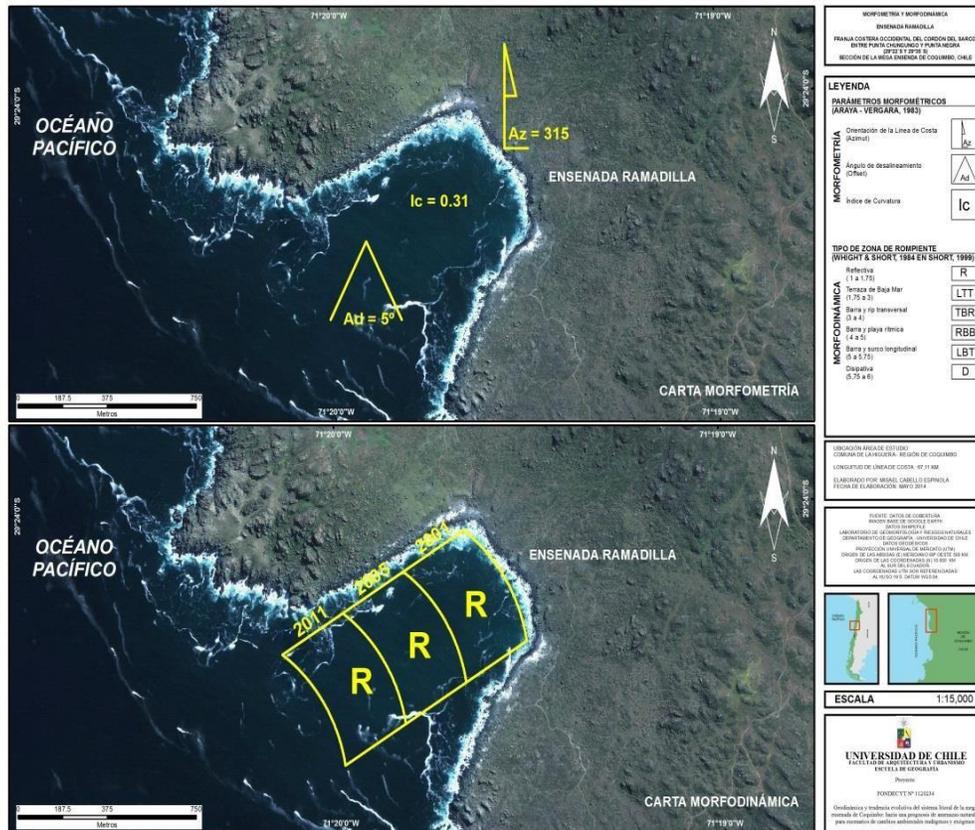
- “La primera fase en contacto directo con el mar, corresponde a depósitos de cantos rodados heterométricos, de forma redondeada y sub redondeada y aplanados por la

<sup>15</sup> Datos obtenidos de las observaciones hechas por CABELLO (2016), para el período 2001-2011)

acción del oleaje. Litológicamente se encuentran en su mayoría gravas de tipo granitoides, conglomerados y andesitas.

- La segunda fase, posterior a la playa de rodados, corresponde a una playa con depósitos de arenas mezcladas con material calcáreo (fragmentos de conchas) y con algunos bloques y rodados, que, en condiciones de pleamar y marejadas, puede ser alcanzada por el oleaje. El ancho es de 38 m aproximadamente con una longitud ~ 210 m.

Figura 20 Morfometría y morfodinámica de Caleta Ramadilla



Fuente: CABELLO (2016) y FONDECYT N° 1120234.

### 3.3.1.3. Caleta Tinajas.

Referente a la tipología de zona de rompientes, es caracterizada por ser del tipo Barra y playa rítmica (años 2001 y 2005) y de Barras y rips transversales (2011), con una orientación de la línea de costa (*azimut*) de 297°, un ángulo de desalineamiento (*offset*) de 30° y un índice de curvatura de 0.66.<sup>16</sup>

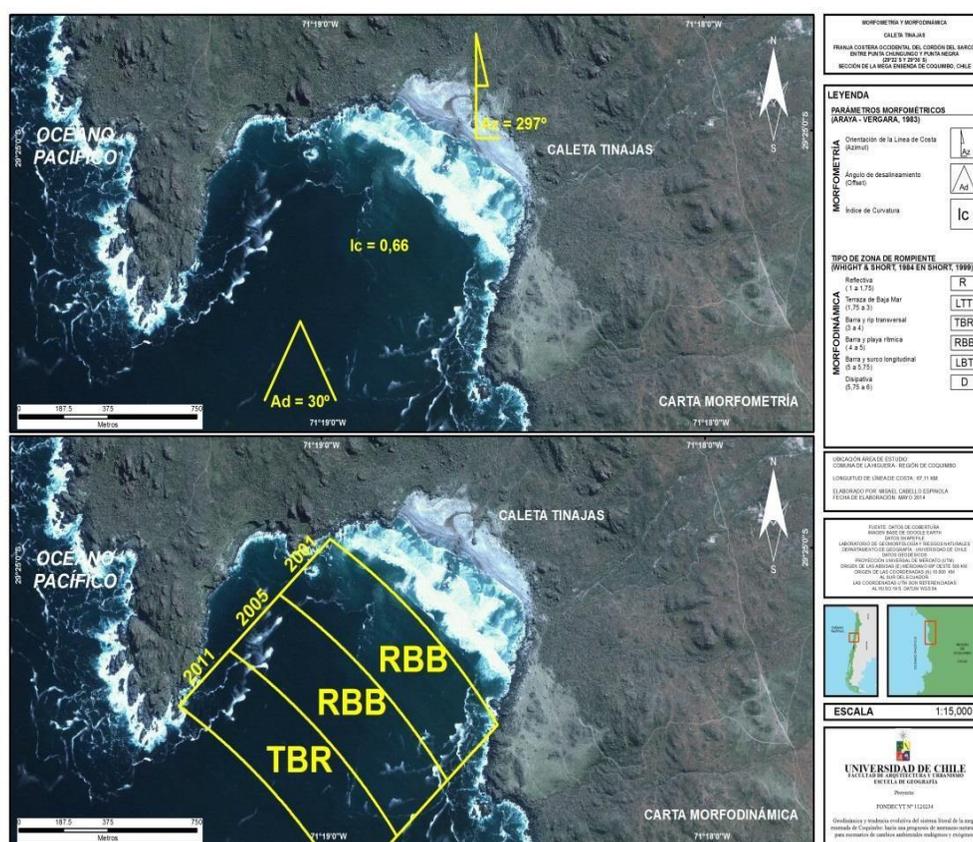
<sup>16</sup> Datos obtenidos de las observaciones hechas por CABELLO (2016), para el período 2001-2011)

Presenta una forma de herradura, con una posición perpendicular a la dirección del viento, por lo cual el oleaje incide directamente en la ensenada y en la morfología de la playa CABELLO (2016).

Ensenada rocosa, con muy pocos *stacks*, donde los más visibles se encuentran frente a ella. Presenta una playa tipo pocket beach, donde el material depositado corresponde a arenas claras, una extensión de 670m de longitud y con un ancho promedio de 195m.

En el centro de la playa se aprecian *stacks* abandonados, que evidencian en superficie procesos de erosión, similares a las terrazas de abrasión marina, indicando la actividad conjunta entre la erosión marina y el sollevamiento tectónico (CABELLO, 2016).

Figura 21 Morfometría y morfodinámica de Caleta Tinajas



Fuente: CABELLO (2016) y FONDECYT N° 1120234.

### 3.3.1.4. Caleta Cruz Grande

La tipología de zona de rompientes, es caracterizada por ser del tipo reflectiva para todos los años de análisis (2001, 2005 y 2011), con una orientación de la línea de costa (azimut) de 6°, un ángulo de desalinamiento (offset) de 14° y un índice de curvatura de 1,1.<sup>17</sup>

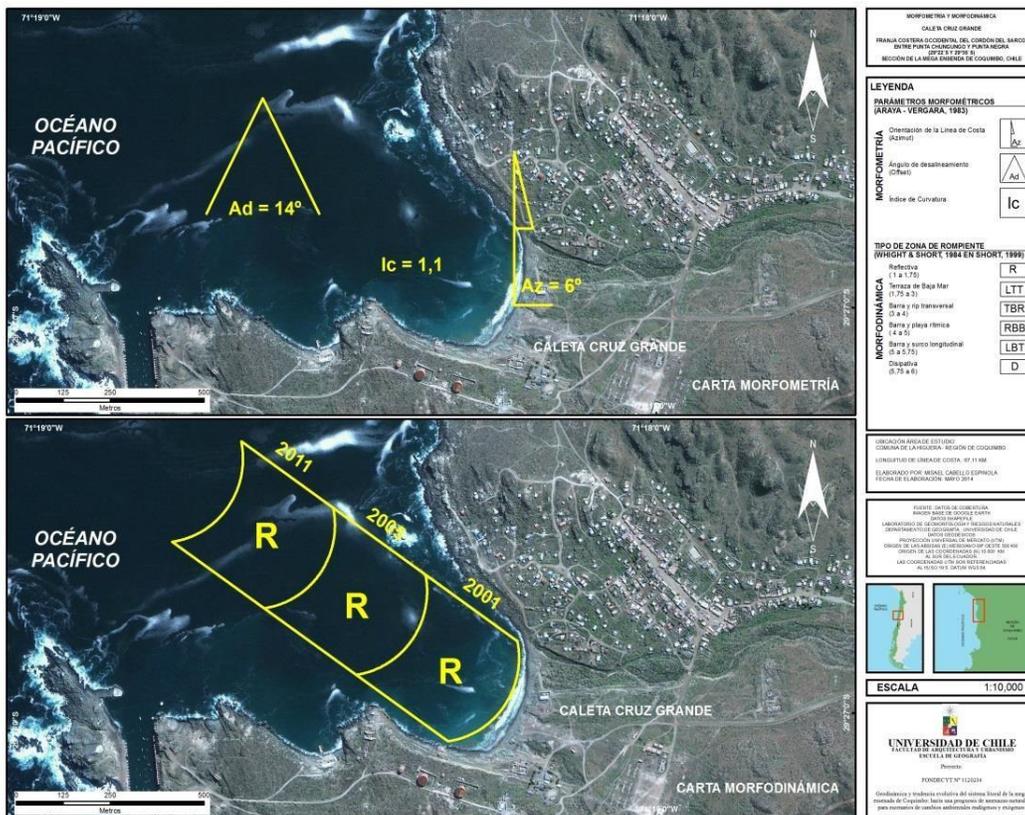
<sup>17</sup> Datos obtenidos de las observaciones hechas por CABELLO (2016), para el período 2001-2011)

Presenta forma de herradura muy cerrada, es una ensenada principalmente rocosa, presenta sólo dos formas de *stack*, el headland se presenta en la zona proximal de la ensenada, y su longitud es aproximadamente de 1.5km, con una altura que va desde los 2m hasta los 20m (CABELLO, 2016).

La playa posee depósitos de rodados, pero en la zona proximal, se observan depósitos de arenas, similares a los de la playa Tinajas. Sus dimensiones son de 390m de longitud, y 11m de ancho promedio. Los rodados presentes corresponden a rocas granitoides, conglomerados y andesitas (CABELLO, 2016).

Finalmente, CABELLO (2016) indica que las gravas que conforman la playa se encuentran depositadas sobre la pendiente de la terraza, evidenciando la altura y la fuerza que alcanza el ataque del oleaje. Además, identifica la presencia en la zona proximal de la playa, de depósitos de arenas, evidencia cierto nivel de progradación y alimentación de la playa de materiales finos transportados por la deriva litoral.

Figura 22 Morfometría y morfodinámica de Caleta Cruz Grande



Fuente: CABELLO (2016) y FONDECYT N° 1120234.

### 3.3.1.5. Caleta Temblador

Dentro de la tipología de zona de rompientes, es caracterizada por ser del tipo Terraza de Bajamar (2001-2005) y reflectiva (2011), con una orientación de la línea de costa (azimut) de 12°, un ángulo de desalinamiento (offset) de 2° y un índice de curvatura de 1.24. Presenta una saliente rocosa en la zona proximal, una longitud de 200m, e incluye otra saliente rocosa en la zona distal de 1.2km. La playa asociada a la ensenada tiene 840m de longitud, y un ancho de 92m.<sup>18</sup>

CABELLO (2016), ha identificado características de doble efecto en el movimiento ondulatorio, el primero de ellos se debe a la cercanía con la ensenada Caleta Totoralillo Norte ubicada inmediatamente al sur, donde la presencia de una gran saliente rocosa, sumado al Islote Los Farellones y un pequeño *stacks* provocan un doble efecto de difracción.

Por otra parte, se produce un segundo efecto, cuando los trenes de ola, que han sufrido los efectos de difracción, se enfrentan al *headland* de la ensenada Caleta Temblador. Se produce, entonces, el efecto de refracción de estas olas provenientes del suroeste, provocando que lleguen a la playa con una notoria disminución de energía.

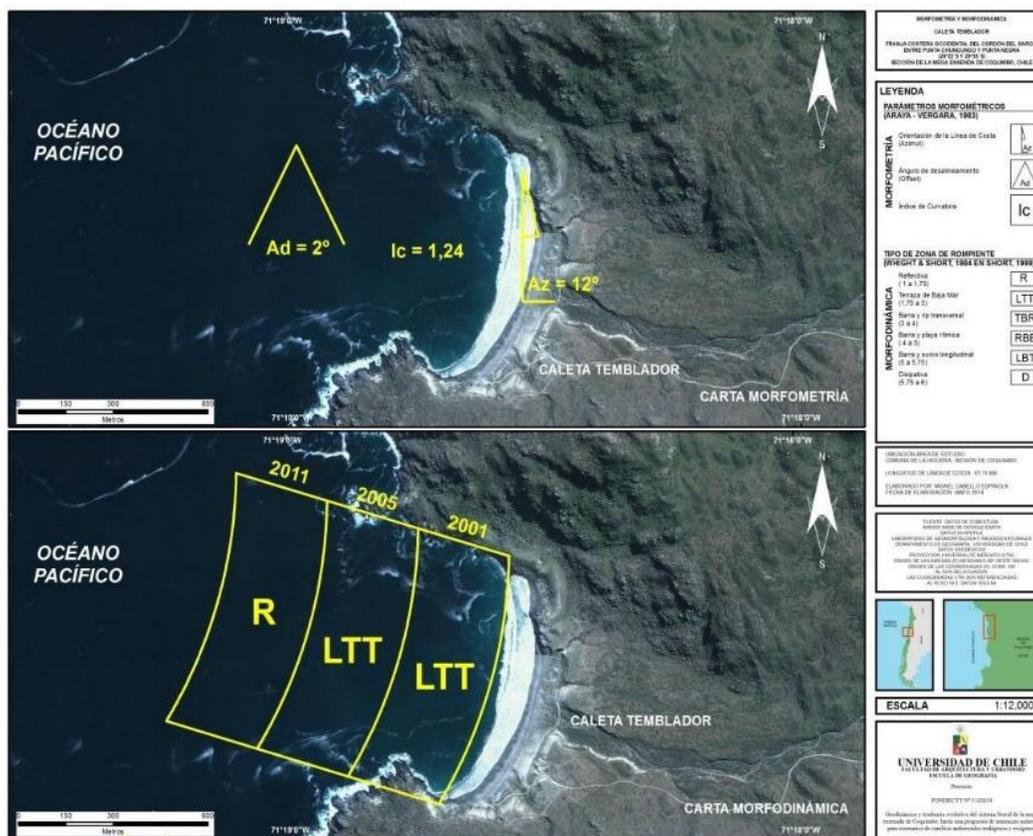
Los materiales depositados en la playa, presenta dos fases de depositación, la primera corresponde a una antigua playa de rodados, además de presentar sectores con cubierta de arenas por efecto eólicos, Se observan cuatro cordones de playas (*beach ridge*), lo que evidencia antiguos niveles de playa. Esta playa y los *beach ridge* asociados tienen un ancho promedio de 64m., mientras que la playa arenosa 28m.

Finalmente, el autor asevera lo siguiente: *“La presencia de este tipo de sedimentos, la condición estructural y las características actuales de una playa reflectiva, permiten evidenciar que la playa se encuentra en un proceso de acreción, alimentada del material transportado por la acción de la deriva litoral”*.

---

<sup>18</sup> Datos obtenidos de las observaciones hechas por CABELLO (2016), para el período 2001-2011)

Figura 23 Morfometría y morfodinámica de Caleta Temblador



Fuente: CABELLO (2016) y FONDECYT N° 1120234.

### 3.3.1.6. Caleta Totorallillo norte.

La tipología de zona de rompientes es caracterizada por ser del tipo Reflectiva (2001, 2005 y 2011), con una orientación de la línea de costa (azimut) de 58°, un ángulo de desalinamiento (offset) de 10° y un índice de curvatura de 0.65.<sup>19</sup>

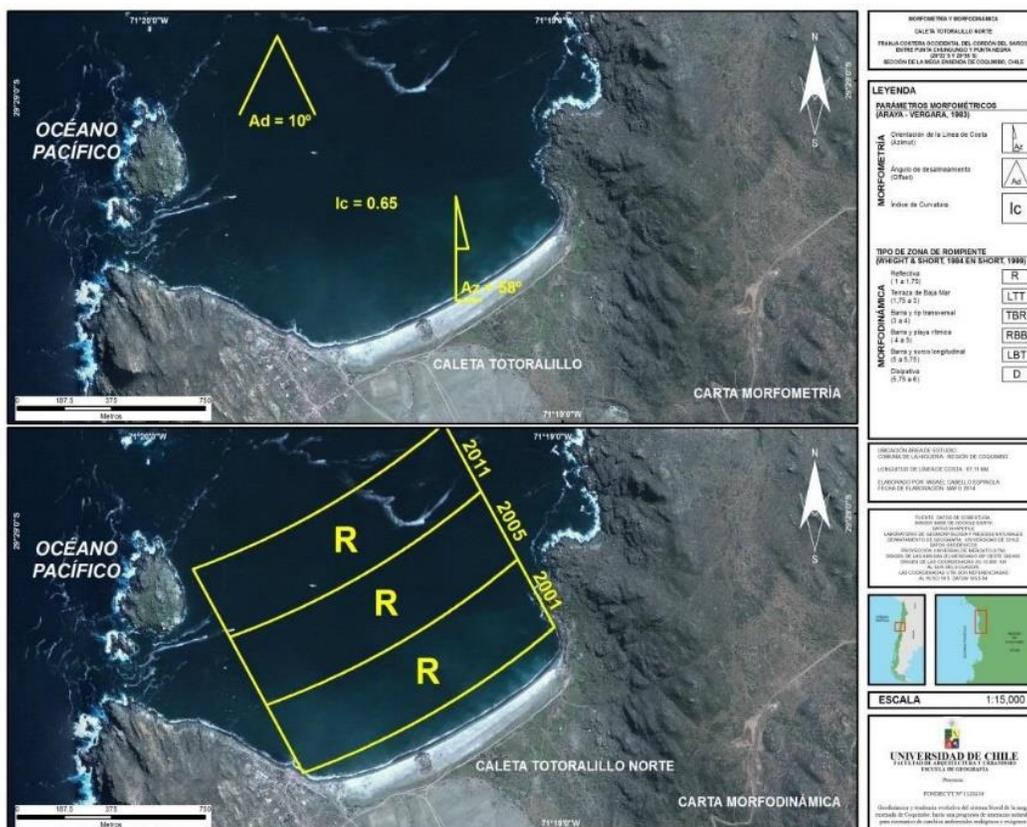
CABELLO (2016) denota que la zona proximal de la ensenada, presenta un headland que mide aproximadamente 842m de longitud, con alturas de van desde los 4 hasta los 70m, frente al headland se ubica el Islote Los Farellones.

Estas estructuras se presentan como una barrera de protección a la dirección de los vientos y los trenes de olas, generando entre la saliente y el islote el efecto de difracción. La presencia de este islote genera el efecto de refracción, ambos efectos se traducen en la disminución de la energía del oleaje que arriba a la ensenada y a la playa.

La situación anterior, se evidencia directamente en la conformación de la ensenada, donde la playa se caracteriza por ser de tipo reflectiva.

<sup>19</sup> Datos obtenidos de las observaciones hechas por CABELLO (2016), para el período 2001-2011)

Figura 24 Morfometría y morfodinámica de Caleta Tororalillo Norte



Fuente: CABELLO (2016) y FONDECYT N°1120234.

### 3.3.1.7. La Serena-Coquimbo.

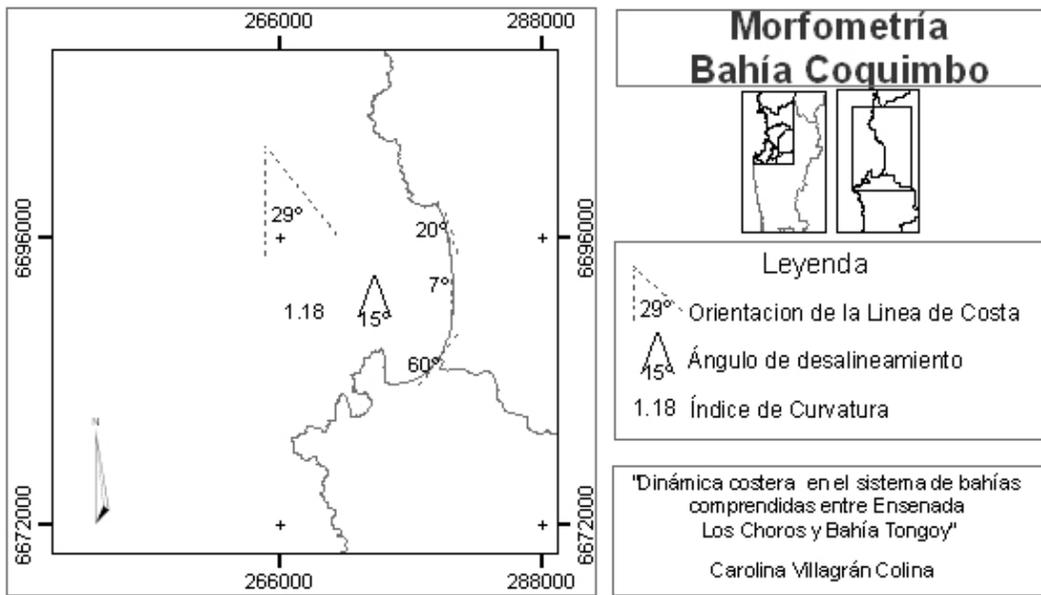
Datos obtenidos del trabajo realizado por VILLAGRÁN (2007), indican que la posición relativa de la línea de costa, se caracteriza por una marcada concavidad, de gran extensión, con una posición relativa oblicua, de orientación EW, mientras que la dirección del oleaje y los vientos predominantes provienen del SW.

La tipología de zona de rompientes es caracterizada por ser del tipo reflectiva en la zona proximal, terraza de baja mar acompaña barra y rip transversal en la zona media y de barra y rip transversal en la zona distal; una orientación de la línea de costa (azimut) de  $29^\circ$ , un ángulo de desalinamiento (offset) de  $15^\circ$  y un índice de curvatura de 1.18.<sup>20</sup>

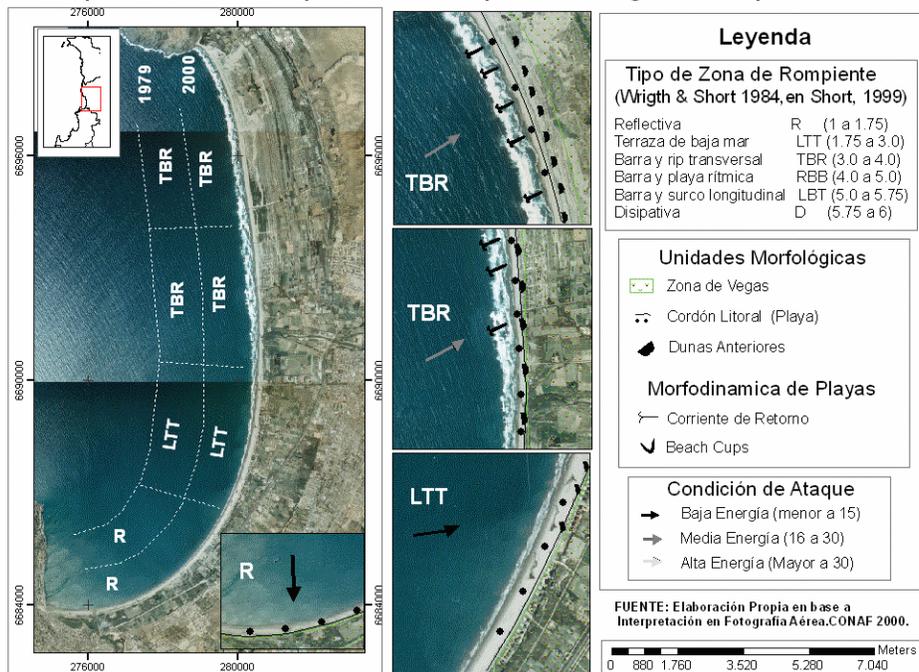
La zona presenta depósitos dunares en la zona distal, que en la actualidad se ven afectados por actividad antrópica que ha modificado en forma y carga sedimentaria el área.

<sup>20</sup> Datos obtenidos de las observaciones hechas por VILLAGRÁN (2016), para los años 1979 y 2000)

**Figura 25** Morfometría y morfodinámica de ensenada La Serena-Coquimbo



**Tipo de Zona de Rompiente Bahía Coquimbo, IV Región de Coquimbo**



"Dinámica costera en el sistema de bahías y ensenadas comprendidas entre Sector de Los Choros y Bahía Tongoy"

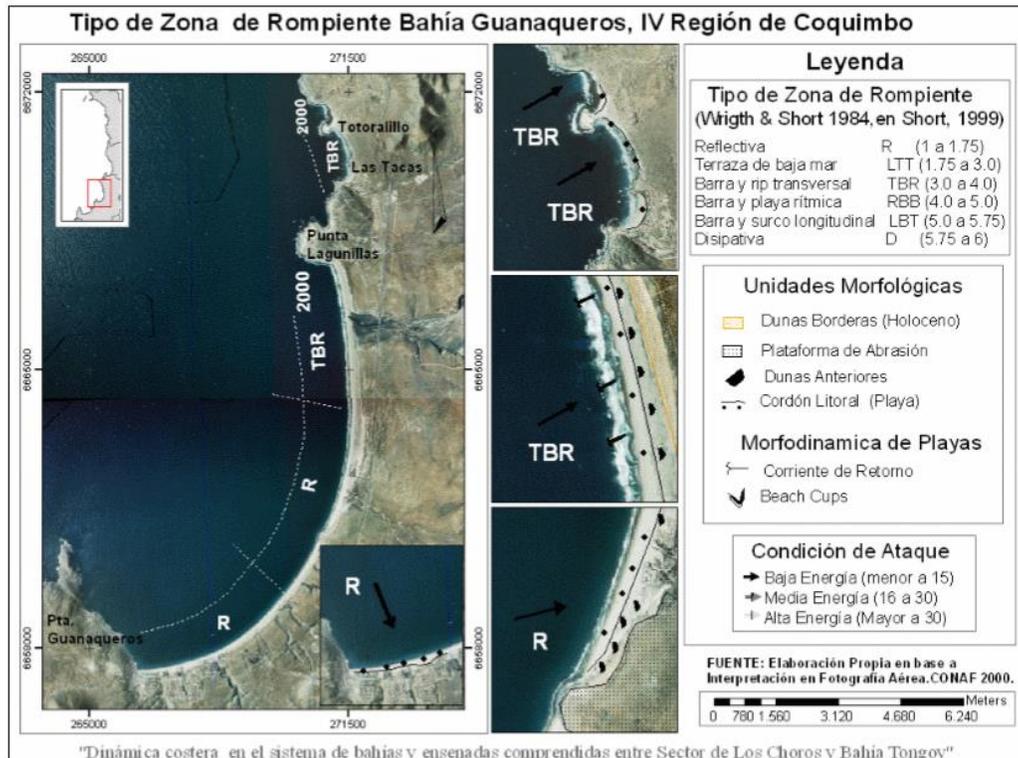
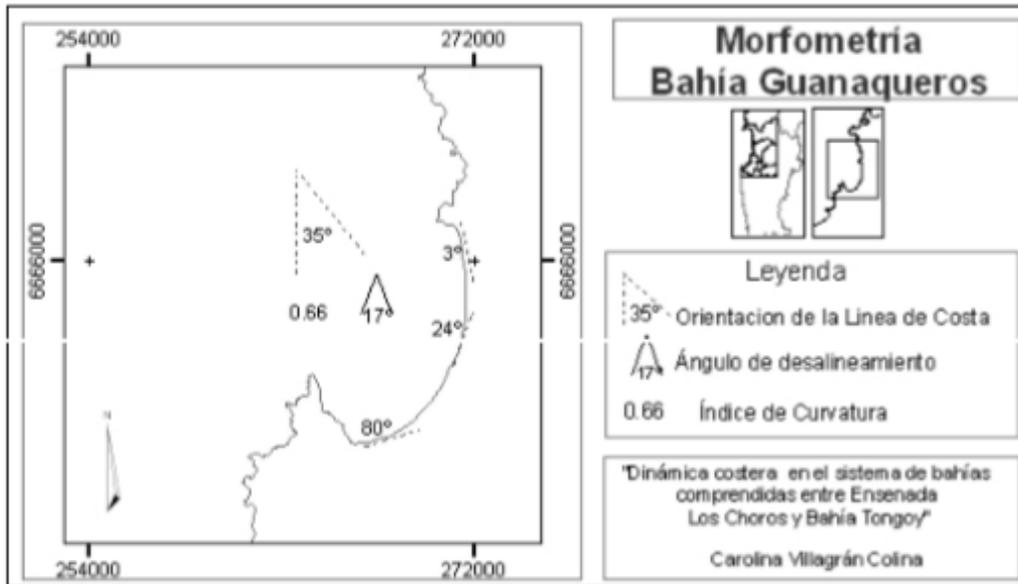
Fuente: VILLAGRÁN, 2007.

### 3.3.1.8. Guanaqueros.

La tipología de zona de rompientes es caracterizada por ser del tipo reflectiva en la zona proximal y media, la zona distal presenta zona de rompiente asociada a Barras y rip transversal (VILLAGRÁN, 2007).

La ensenada presenta una orientación de la línea de costa (azimut) de  $35^\circ$ , un ángulo de desalinamiento (offset) de  $17^\circ$  y un índice de curvatura de 0.66 (VILLAGRÁN, 2007).

**Figura 26** Morfometría y morfodinámica de ensenada Guanqueros



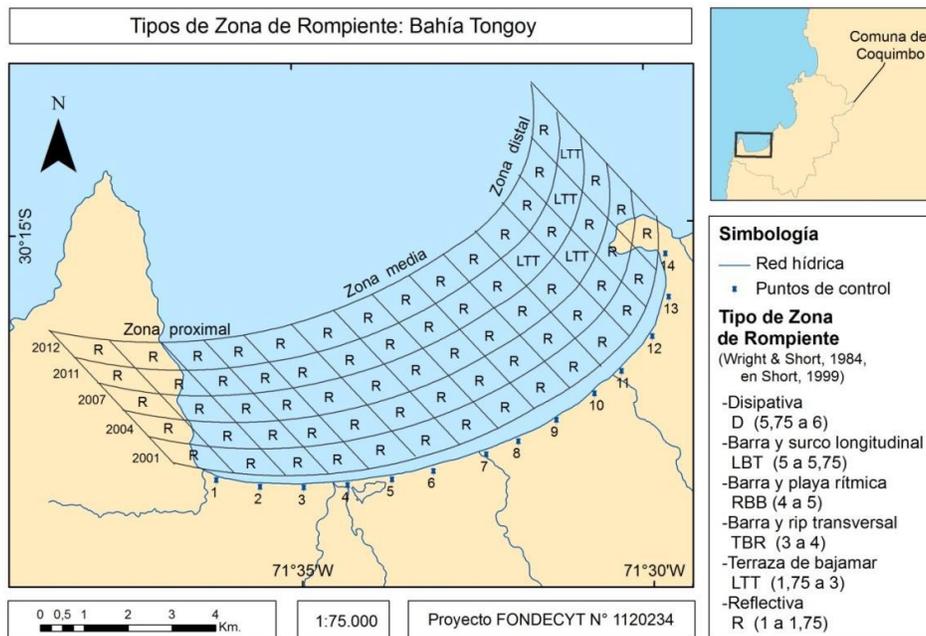
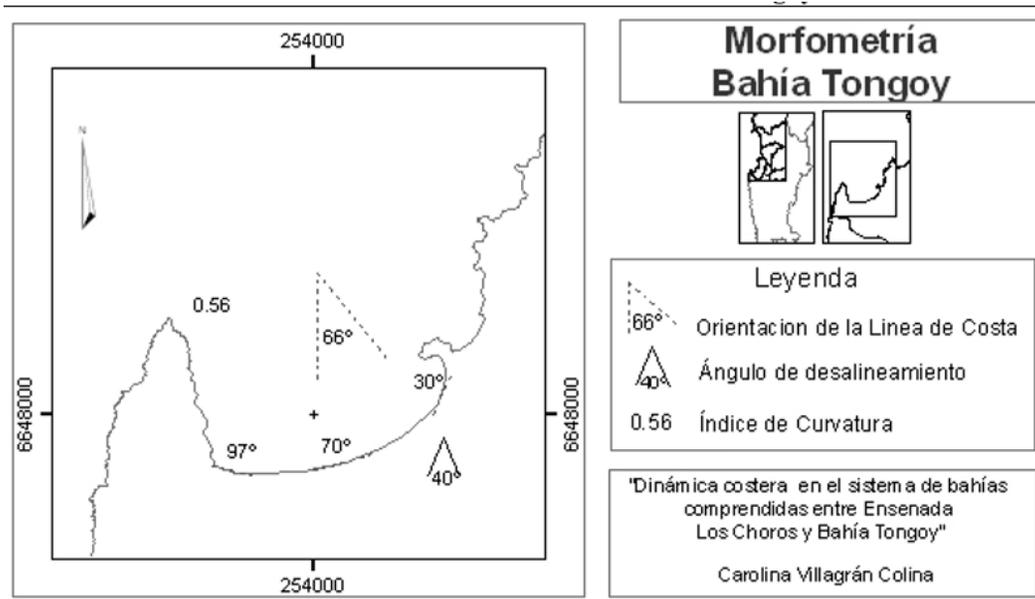
Fuente: VILLAGRAN, 2007

### 3.3.1.9. Tongoy.

La tipología de zona de rompientes es caracterizada por ser del tipo reflectiva en la zona proximal y media, e inclusive parte de la distal, con variaciones para los años 2007, 2011 y 2012, donde la zona distal presenta zona de rompiente asociada a Terrazas de bajamar (VILLAGRÁN, 2007).

La ensenada presenta una orientación de la línea de costa (azimut) de  $66^\circ$ , un ángulo de desalinamiento (offset) de  $40^\circ$  y un índice de curvatura de 0.56 (VILLAGRÁN, 2007).

**Figura 27** Morfometría y morfodinámica de ensenada Tongoy



Fuente: VILLAGRÁN (2007), LAGOS (2013) y FONDECYT N° 1120234.

### 3.4. Constitución mineralógica

El universo de muestras realizado incluye la zona costera entre Los Choros y la desembocadura del río Limarí, de norte a sur. En específico en las zonas de playas moderadas de Los Choros, Tongoy y Bahía Barnes, la Serena y Limarí en costa; además, de la inclusión de zonas representativas de la cuenca del Limarí en el interior: río Hurtado, río Grande, río Cogotí y río Combarbalá, todos de norte a sur.

El muestreo realizado arrojó la presencia de mineralogía asociada a rocas de origen ígneo intrusivo, y volcánico, secundada por abundancia de fragmentos de roca sedimentaria. No fueron detectados fragmentos asociados a rocas metamórficas de forma directa.

- Mineralogía asociada a rocas ígneas intrusivas y volcánicas. Se ha observado presencia y predominancia, halladas en muestras asociadas a rocas diferenciadas, de alto contenido de sílice, con feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo y biotita. Referente a elementos volcánicos, se divisan fragmentos de rocas conformados por plagioclasas euhedrales a subhedrales, contenidas en una masa fundamental vítrea. En algunas muestras se detectó la presencia de piroxeno y hornblenda en menor cantidad, siendo el primero un mineral propio de rocas ígneas menos diferenciadas y de menor contenido en sílice, como lo son basaltos y andesitas en la categoría de rocas ígneas extrusivas o volcánicas, mientras que la hornblenda es típica en andesitas y dacitas principalmente. Los equivalentes intrusivos de las rocas recién mencionadas corresponden a gabros, dioritas y tonalitas.
- Mineralogía asociada a rocas sedimentarias. Caracterizados por la presencia de minerales arcillosos en abundancia, con casos de existencia de fragmentos de chert y algunos cúmulos de arcillas, que pueden tener como escenario de formación procesos de transporte fluvial.
- Mineralogía asociada a rocas metamórficas. Aun cuando no fueron detectados fragmentos de rocas metamórficas, se observa gran abundancia de minerales como clorita y epidota que son característicos de rocas metamórficas en facies esquistos verdes, pero su presencia no es excluyente, ya que también se originan por otros procesos de alteración como la circulación de fluidos hidrotermales.

A continuación, se resumen los resultados macroscópicos y microscópicos obtenidos de los 33 cortes analizados, para su posterior contraste entre sí, con las muestras de Los Choros, en Quebrada y sistemas dunares.

**Tabla 2 Datos macroscópicos muestras**

Corte	Características Macroscópicas						
	Posición geomorfológica	granulometría	Morfoscopia	Mineralogía	Clasificación Granulométrica	Textura	Observaciones
1 Ensenada Limarí	Playa Moderna	Predominantemente fina, también muy fina y media	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Cuarzo, además de Líticos y Ferromagnesianos	Bien clasificado	Sin información	-
2 Ensenada Limarí, zona media	Playa Moderna	Predominantemente media, también muy fina, fina, media y gruesa	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Cuarzo, además de Líticos y Ferromagnesianos	Moderadamente clasificado	Sin información	-
3 Ensenada Limarí, zona distal	Playa Moderna	Predominantemente media, también muy fina, fina, media y gruesa	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Líticos, además de Cuarzo y Ferromagnesianos	Moderadamente clasificado	Sin información	-
4 Estuario Limarí, paleobanco lateral fluvial	Banco Lateral Fluvial	Predominantemente muy fina, también fina, media, gruesa y muy gruesa	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Cuarzo y Líticos, además de Ferromagnesianos y Óxidos	Muy poco clasificado	Mate, rugoso y áspera	-
5 Estuario Limarí, banco lateral fluvial A	Banco Lateral Fluvial	Predominantemente muy fina, también fina y media	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Cuarzo, además de Líticos y Ferromagnesianos	Moderadamente clasificado	Brillante, rugoso y áspera	Gran contenido de pirita y material orgánico
6 Estuario Río Limarí, Banco fluvial B	Banco Lateral Fluvial	Predominantemente media, también fina, gruesa y muy gruesa	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Cuarzo y Líticos , además Ferromagnesianos	Muy poco clasificado	Brillante, rugoso y áspera	-
7 Bahía Tongoy, Zona proximal	Playa Moderna	Predominantemente media, también muy fina, fina y gruesa	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Cuarzo y Líticos , además Ferromagnesianos y Óxidos	Bien clasificado	Brillante, rugoso y áspera	-
8 Bahía Tongoy, zona media	Playa Moderna	Predominantemente fina, también muy fina y media	Esférico, anguloso	Predominantemente Cuarzo, además de Líticos, Ferromagnesianos y Óxidos	Bien clasificado	Brillante, rugoso y áspera	-
9 Bahía Tongoy, Zona distal	Playa Moderna	Predominantemente fina, también muy fina y media	Esférico, anguloso	Predominantemente Cuarzo, además de Líticos, Ferromagnesianos y Óxidos	Bien clasificado	Brillante, rugoso y áspera	-
10 Bahía Tongoy, cordón de playa, zona proximal	Cordón de Playa Holoceno	Predominantemente fina, también muy fina y media	Esférico, anguloso	Predominantemente Cuarzo, además de Líticos, Ferromagnesianos y Óxidos	Poco clasificado	Sin información	Presencia de material calcáreo
11 Bahía Tongoy, cordón de playa, zona media A	Cordón de Playa Holoceno	Predominantemente fina, también muy fina y media	Esférico, anguloso	Predominantemente Cuarzo, además de Líticos y Ferromagnesianos	Moderadamente clasificado	Sin información	-
12 Bahía -Tongoy, cordón de playa, zona media B	Cordón de Playa Holoceno	Predominantemente fina, también muy fina y media	Esférico, anguloso	Predominantemente Cuarzo, además de Líticos,	Moderadamente clasificado	Sin información	-

Corte	Características Macroscópicas						
	Posición geomorfológica	granulometría	Morfoscopia	Mineralogía	Clasificación Granulométrica	Textura	Observaciones
				Ferromagnesianos y Óxidos			
13 Bahía Tongoy, duna transversal estabilizada	Duna	Predominantemente fina, también muy fina y media	Esférico, anguloso	Predominantemente Cuarzo, además de Líticos, Ferromagnesianos y Óxidos	Bien clasificado	Sin información	-
14 Bahía Barnes, Zona proximal	Playa	Predominantemente fina, también muy fina y media	Esférico, anguloso	Predominantemente Líticos, además de Cuarzo y Ferromagnesianos	Bien clasificado	Sin información	Presencia de material calcáreo
15 Bahía Barnes, zona media	Playa	Predominantemente fina, también muy fina y media	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Cuarzo y Ferromagnesianos, además de Líticos	Bien clasificado	Brillante, rugoso y áspero	-
16 Bahía Barnes, zona distal	Playa	Predominantemente fina, también muy fina, media y gruesa	Esférico, anguloso	Predominantemente Cuarzo, además de Líticos, Ferromagnesianos y Óxidos	Moderadamente clasificado	Brillante, rugoso y áspero	-
17 Bahía Barnes, zona media, 3er cordón de dunas	Duna	Predominantemente fina, también muy fina, media y gruesa	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Cuarzo y Líticos, además de Ferromagnesianos	Moderadamente clasificado	Brillante, rugoso y áspero	Presencia de material calcáreo
18 Bahía Barnes, Dunas longitudinales	Duna	Predominantemente fina, también muy fina y media	Esférico, anguloso	Predominantemente Cuarzo, además de Líticos y Ferromagnesianos	Bien clasificado	Sin información	-
19 Río Hurtado	Depósito Aluvial	Predominantemente fina, también muy fina, media, gruesa y muy gruesa	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Líticos, además de Cuarzo, Ferromagnesianos y Óxidos	Poco clasificado	Mate, rugoso y áspero	-
20 Río Grande	Depósito Aluvial	Predominantemente media, también muy fina, fina, gruesa y muy gruesa	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Líticos, además de Cuarzo	Muy poco clasificado	Sin información	-
21 Río Cogotí	Depósito Aluvial	Predominantemente media, también muy fina, fina, gruesa y muy gruesa	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Cuarzo y Líticos, además de Ferromagnesianos y Óxidos	Muy poco clasificado	Mate, rugoso y áspero	-
22 Río Combarbalá	Depósito Aluvial	Predominantemente media, también muy fina, fina, gruesa y muy gruesa	Alargado, sub-anguloso	Predominantemente Líticos y Óxidos, además de Cuarzo y Ferromagnesianos	Muy poco clasificado	Mate, rugoso y áspero	-
23 Los Choros	Duna zona media Bahía Los choros	-	Tamaño máx, intrusivo redondeado, Mx. Angulosos a sub	-	-	-	-

Corte	Características Macroscópicas						
	Posición geomorfológica	granulometría	Morfoscopía	Mineralogía	Clasificación Granulométrica	Textura	Observaciones
			redondeados, baja esfericidad				
24 Los Choros	Duna zona media de la Bahía de Los Choros	-	-	-	-	-	-
25 Quebrada Los Choros	Desembocadura Quebrada de Los Choros	Media-gruesa 2cm arena Subred; esf. / 10 cm más elong.	Elongadas y Esféricas	Domina levemente los clastos volcánicos. Polimíctico. Clastos sedimentarios tamaño gravilla Granodirotrias con enclaves melanocrático de composición diorítica.	-	-	-
26 Los Choros	Dunas zona distal de la Bahía de Los Choros	-	-	-	-	-	-
27 Los Choros	Dunas zona distal de la Bahía de Los Choros	-	-	-	-	-	-
28 Los Choros	Dunas zona distal Bahía de Los Choros.	-	-	-	-	-	-
29 La Serena	Zona distal	Arena fina	Sub-redondeado	Mayoritariamente Cuarzo, Feldespato y Ferromagnesianos	Bien seleccionado	Brillante, rugoso y áspera	Presenta fragmentos de conchillas en bajas cantidades
30 La Serena	Zona distal	Arena fina	Sub-redondeado	Mayoritariamente Cuarzo, Feldespato y Ferromagnesianos	Bien seleccionado	Brillante, rugoso y áspera	Presenta fragmentos de conchillas en bajas cantidades
31 La Serena	Zona distal	Arena fina	Sub-redondeado	Mayoritariamente Cuarzo, Feldespato y Ferromagnesianos	Bien seleccionado	Brillante, rugoso y áspera	Presenta fragmentos de conchillas en bajas cantidades
32 La Serena	Zona media	Arena fina a muy fina	Sub-redondeados	Mayoritariamente Cuarzo, Feldespato y Ferromagnesianos	Bien seleccionado	Brillante, rugoso y áspera	Presenta fragmentos de conchillas en bajas cantidades
33 La Serena	Zona proximal	Arena muy fina	Sub-redondeado	Mayoritariamente Cuarzo y Ferromagnesianos	Bien seleccionado	Brillante, rugoso y áspera	Presenta fragmentos de conchillas en bajas cantidades

Fuente: Proyecto FONDECYT N° 1120234.

**Tabla 3 Características Microscópicas del muestreo**

Corte	Características Microscópicas	Mineralogía										Óptica
		Cristal/Fragmentos %										
		Carb	Pl	Qz	KF	Lsm	Lv	Opax y vidrio	Ep	Chl	Bt	Otros
1	En general se tiene una muy buena selección de tamaños de grano. Cristales de feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo se presentan sub-angulosos a angulosos. En general los cristales se presentan sub-angulosos. Se observa un nivel de esfericidad relativamente bajo. Fragmentos líticos corresponden a chert y fragmentos volcánicos.	0	30	25	15	0	0	10	0	0	10	10
2	Selección del tamaño de los granos es menor que la del Corte 1. Cristales se presentan en general sub-redondeados a angulosos. Se observa una esfericidad relativamente baja. Minerales micáceos se presentan en sus formas euhedrales a subhedrales. Fragmentos líticos correspondientes a chert y fragmentos volcánicos. Presencia de microclina.	0	15	15	18	0	8	10	4		10	21
3	Cristales se presentan en general sub-redondeados a angulosos. La esfericidad de los cristales es media a baja. Minerales micáceos se presentan en general en sus formas euhedrales a subhedrales	0	15	10	25	0	30	2	5	6	7	0
4	En general, se tienen cristales pequeños sub-redondeados a angulosos y cristales de mayor tamaño con buen redondeamiento. Minerales micáceos se presentan subhedrales a anhedrales. Se tiene media a buena esfericidad para los cristales mayores, mientras que para los más pequeños esta varía de media a baja	0	5	5	15	0	15	10	0	10	40	0
5	En general se tienen cristales sub-redondeados a angulosos. La esfericidad es media a baja, aunque los cristales de mayor tamaño poseen mejor esfericidad. Minerales micáceos se presentan en forma subhedral a euhedral. Presencia de hematita entre los opacos. Fragmentos corresponden a masas de arcilla.	0	5	5	15	0	0	15	0	10	35	15
6	Se observó textura gráfica en algunas plagioclasas. Presencia de microclina. Mal redondeamiento de los cristales en general. Cristales de biotita y micas blancas se encuentran euhedrales, sub-redondeados a angulosos, al igual que la mayoría de los cristales. Fragmentos volcánicos se presentan altamente redondeados y esféricos.	0	15	10	20	0	15	10	3	15	10	2
7	Cristales de feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo presentan esfericidad media, sub-redondeados a angulosos. Fragmentos volcánicos poseen baja esfericidad, pero buen redondeamiento. Calcita presente en conchillas.	0	10	5	15	0	10	15	0	20	15	10
8	Tamaño de grano menor y fragmentos mucho más angulosos que los del Corte 7. Cristales de feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo se presentan angulosos a sub-angulosos, con esfericidad media a alta. Fragmentos volcánicos con buena esfericidad. Algunos cristales micáceos (biotita y clorita) están en sus formas euhedrales.	0	5	10	15	0	10	20	0	20	10	10
9	Tamaño de grano menor que los clastos del corte 8. Selección del tamaño de grano aumenta paulatinamente desde el Corte 7 hasta el corte 9. Presencia de microclina, por macla tartán. Fragmentos se observa levemente más sub-redondeados que en los cortes anteriores (7 y 8). Se observa un nivel de esfericidad medio. Cristales de micas se presentan tanto en fragmentos como en sus formas euhedrales.	0	5	15	15	0	10	20	0	20	5	10
10	Presencia de hematita entre los opacos. Calcita se presenta en conchillas redondeadas, pero de baja esfericidad. Cristales de feldespato potásico, plagioclasas y cuarzo se presentan sub-redondeados a angulosos en su mayoría y con esfericidad media a alta. Cristales de micas están en sus formas euhedrales, existiendo unos pocos subhedrales y subredondeados a angulosos.	10	10	5	15	15		15	0	10	10	10

Corte	Características Microscópicas	Mineralogía										Óptica						
		Cristal/Fragmentos %										Opax y vidrio	Ep	Chl	Bt	Otros		
		Carb	Pl	Qz	KF	Lsm	Lv											
	Presencia de microclinas. Feldespatos potásicos se presentan más alterados, al igual que las plagioclasas																	
11	Presencia de hematita entre los opacos. Fragmentos de epidota poseen un buen redondeamiento y buena esfericidad. Cristales de feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo se presentan sub-redondeados a angulosos. Minerales micáceos están en su forma subhedral a levemente euhedrales.	0	5	25	10	0	15				17	5	15	8				0
12	Presenta una buena selección de tamaños granulométricos. Fragmentos en general son sub-redondeados a angulosos. En general se tiene una buena esfericidad, excepto por los minerales micáceos que mantienen sus formas subhedral a euhedrales, a pesar de estar algunos fracturados. Fragmentos líticos incluyen fragmentos volcánicos y chert.	0	10	25	15	0	10				5	0	30	5				0
13	Presenta una buena selección de tamaños granulométricos. Fragmentos en general son sub-angulosos a angulosos, con esfericidad media. Minerales micáceos presentes en sus formas subhedral a euhedrales. Calcita presente en conchillas.	0	10	10	20	10	5				15	5	15	10				0
14	Calcita presente en conchillas angulosas. Cristales de plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo se presentan angulosos. Fragmentos volcánicos en su mayoría sub-redondeados	15	10	10	35	0	10				15	0	0	5				0
15	Calcita presente en conchillas, algunas de ellas redondeadas y otras angulosas. Cristales de plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo se presentan sub-angulosos. Fragmentos volcánicos en su mayoría sub-redondeados.	5	10	10	25	15	10				10	0	5	10				0
16	Calcita presente en conchillas redondeadas. Cristales de plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo se presentan sub-redondeados a sub-angulosos. Cristales de feldespato potásico se presentan mucho más alterados que en el Corte 15. Fragmentos volcánicos en su mayoría sub-redondeados.	5	10	10	15	20	10				5	5	10	10				0
17	Presencia de hematita entre los opacos. Calcita presente en conchillas redondeadas. Cristales de plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo se presentan sub-redondeados a angulosos. Fragmentos volcánicos en su mayoría sub-redondeados a angulosos.	5	10	10	15	15	10				10	5	10	10				0
18	Presencia de microclina. Calcita presente en conchillas sub-redondeadas a redondeadas. Cristales de plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo se presentan sub-redondeados. Fragmentos volcánicos en su mayoría sub-angulosos.	5	10	10	15	10	5				15	5	15	10				0
19	Cristales de plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo se presentan sub-redondeados. Fragmentos volcánicos en su mayoría angulosos. Cristales de mayor tamaño se presentan mucho más redondeados y esféricos que los de menor tamaño.	0	5	5	20	0	20				20	5	10	15				0
20	Cristales de plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo se presentan sub-angulosos, con esfericidad que varía de media a alta. Fragmentos volcánicos en su mayoría sub-angulosos. Cristales de biotita se presentan subhedral.	0	5	15	25	0	18				5	5	10	12				5
21	Cristales de plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo se presentan sub-redondeados, con esfericidad que varía de media a baja. Cristales de cuarzo con distintos niveles de redondeamiento y esfericidad. Cristales de biotitas subhedral a euhedral, al igual que los cristales de clorita. Fragmentos volcánicos en su mayoría sub-redondeados a sub-angulosos y medianamente esféricos. Mala selección, fragmentos volcánicos de gran tamaño respecto a los otros cristales. Fragmentos arcillosos se presentan como masas muy redondeadas de arcilla	0	5	20	10	0	20				5	5	10	20				5
22	Cristales de plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo se presentan redondeados, pero con esfericidad media a alta. Cristales de biotitas euhedral, al igual que los cristales de clorita y micas blancas.	0	5	5	10	0	40				5	5	10	15				5

Corte	Características Microscópicas	Mineralogía										Óptica										
		Cristal/Fragmentos %										Opax y vidrio	Ep	Chl	Bt	Otros						
		Carb	Pl	Qz	KF	Lsm	Lv															
	Fragmentos volcánicos en su mayoría sub-angulosos y medianamente esféricos. Cristales de hematita entre los opacos. Presencia de hornblenda redondeados.																					
23	-	3	4	8	14	13	4				14	9	0	3								29
24	-	1	8	8	20	8	5				15	10	0	1								24
25	-	2	2	5	9	7	0				0	11	0	3								60
26	-	0	6	9	17	17	2				1	4	1	0								43
27	-	0	5	9	10	12	1				1	3	2	0								59
28	-	0	6	9	12	27	3				1	7	2	0								34
29	Cristales se presentan en general sub-redondeados. La esfericidad es media a alta. Minerales micáceos se presentan subhedrales a anhedrales y en su mayoría muy alterados. Presencia alta de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de conchillas.	3	15	30	15	0	2				15	0	5	10								0
30	Cristales se presentan en general sub-redondeados. La esfericidad es media a alta en minerales y baja en fragmentos de conchillas. Minerales micáceos se presentan subhedrales a anhedrales y en su mayoría muy alterados. Presencia alta de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de conchillas.	10	10	20	20	0	3				15	5	4	1								12
31	Cristales se presentan en general sub-redondeados a redondeados. La esfericidad es media. Minerales micáceos se presentan subhedrales y en su mayoría muy alterados. Presencia alta de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de conchillas.	5	10	20	25	0	3				15	5	4	2								11
32	Cristales se presentan en general sub-redondeados. La esfericidad es media a alta. Minerales micáceos se presentan subhedrales y en su mayoría muy alterados. Presencia alta de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de conchillas.	5	10	20	20	0	5				15	5	3	5								12
33	Cristales se presentan en general sub-redondeados. La esfericidad es media a alta. Minerales micáceos se presentan subhedrales y en su mayoría muy alterados. Presencia de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de arcilla y conchillas en menor cantidad.	5	10	25	15		2				10	7	5	10								11

Nota: Carb: Fragmentos monominerálicos de carbonatos; Pl: Fragmentos monominerálicos de plagioclasa, con macla albitica y en algunos casos con cierta zonación o con presencia de parches; Qz: Cuarzo monominerálico; KF: Fragmentos monominerálicos de feldespato potásico; Lsm: Líticos sedimentarios marinos, constituido por lutitas ricas en carbonatos y fragmentos cabonáticos, presencia de aloquemos; Lv: Líticos volcánicos e hipabisales, texturas porfíricas, vitrofírica, felsítica, traquítica; Opax y vidrio: fragmento de monominerálicos de ortopiroxeno; Ep., fragmentos de alteración epidótica, puede o no incluir fragmentos de epidota poli y mono cristalina; Chl: fragmentos de alteración clorítica; Bt: fragmentos con alteración potásica con presencia de biotita secundaria.

Fuente: Proyecto FONDECYT N°1120234.

De los análisis realizados, se identifican los siguientes escenarios.

- Las muestras asociadas a la desembocadura del Limarí, se presentan con alta similitud entre ellas, con plagioclasas, cuarzos y fragmentos de feldespato potásico entre su composición principal. En general, se tiene que el porcentaje de cuarzo aumenta mientras más cerca de la costa se encuentran las muestras, incluso llegando a un 25% contra un 5% en las zonas más altas, además la cantidad de biotita y clorita disminuyen en esta dirección. Se observa que la cantidad de feldespato aumenta a medida que estamos más cerca de aguas arriba, esto ya que es un mineral no muy resistente a la abrasión y se altera fácilmente. Las especies minerales en general se encuentran sub-angulosas y con esfericidad media a mala, pero mientras más cerca de la costa la selección del tamaño de grano mejora y también lo hacen el redondeamiento y la esfericidad.

Estas características hablan de un retrabajo provocado por el transporte, en el cual los cristales más distales de la fuente aguas arriba se mantienen en este régimen por más tiempo, por lo que quedan mucho más esféricos y redondeados y con una madurez composicional mucho mayor (clastos de cuarzo son difíciles de alterar y retrabajar, por lo que tiende a aumentar su proporción relativo a otros minerales). Por ello los diferentes niveles de redondeamiento y esfericidad, cuando son en la misma especie, hablan de la distancia relativa a la fuente, y cuando son en especies minerales distintas, hablan de la resistencia a la abrasión que posee cada una y la madurez textural y composicional del sedimento final.

Se debe tener en cuenta que la zona de drenaje, en este caso el río Limarí, arrastra sedimentos de los lugares por los que avanza, por lo que cristales que son más angulosos que otros de la misma especie pudieron ser adquiridos posteriormente, e incluso pudieron ser adquiridos por otros métodos, como lo son transporte eólico, aluvial, litoral o coluvial,

- En las muestras de los afluentes del río Limarí, se identifican las siguientes características mineralógicas.
  - **Río Hurtado.** La muestra fue extraída de un depósito de carácter aluvial, destacando en él una gran cantidad de feldespato potásico por sobre el cuarzo, ambas especies minerales subredondeadas, lo que indica una fuente de proveniencia con abundancia de feldespato potásico y que se encuentra distanciada del depósito sedimentario. El carácter subredondeado principalmente del cuarzo podría indicar que este mineral proviene de una fuente que se ubica previa a la fuente del feldespato potásico, en el trayecto del agente deposicional, sugerido también por la mayor abundancia de éste último con respecto al cuarzo, dado que el feldespato es menos resistente a la erosión y meteorización. La fuente de ambos minerales correspondería posiblemente a roca ígnea intrusiva con alto contenido de sílice y álcalis, altamente diferenciada, posiblemente tratándose de granodiorita-granito.

La alta presencia de fragmentos volcánicos, esencialmente angulosos, indica la cercanía de depósitos volcánicos que aportan material sedimentario al cauce.

La presencia de biotita euhedral a subhedral, junto al tamaño de los cristales observados, sugieren una fuente relativamente cercana, probablemente roca intrusiva diferenciada.

El hallazgo de clorita y epidota podría explicarse por el aporte desde roca metamórfica en facies esquistos verdes o roca que ha sufrido alteración hidrotermal, no pudiendo descartar alguna de estas opciones debido a que la muestra no representa el contexto general de una misma roca, por tratarse de sedimentos no consolidados.

- **Río Grande.** La muestra asociada también a un depósito aluvial posee alta presencia feldespato potásico y cuarzo subordinado, ambos sub-angulosos, nuevamente se sugiere una fuente de proveniencia con alto contenido de sílice y fuertemente diferenciada. El carácter sub-anguloso de los cristales indica relativamente poco tiempo de transporte, sugiriendo una fuente no lejana al depósito sedimentario. En este caso la abundancia de cuarzo es mayor al contenido que presentan otras muestras, y es notoria la alteración que presentan los cristales de feldespato, por lo que no es posible asumir que la fuente sea tan cercana. Nuevamente la fuente de proveniencia podría tratarse de un intrusivo granodiorítico-granítico.

La alta presencia de fragmentos volcánicos puede deberse a un afloramiento de lavas cercano al trayecto del agente de transporte, sin embargo, la gran presencia de arcillas en la matriz es indicio de mayor alteración del vidrio volcánico y, por lo tanto, mayor tiempo de transporte, siendo una fuente de sedimentos no tan cercana.

Nuevamente aparecen clorita y epidota, cuyo origen no se puede determinar con seguridad.

- **Río Cogotí.** Se caracteriza por la alta presencia de cuarzo, fragmentos volcánicos y biotita, junto al poco contenido de feldespato potásico y plagioclasa. Estas características son indicadoras de un depósito más maduro composicionalmente, donde predominan minerales más resistentes a la erosión y meteorización, además de la abrasión sufrida durante el transporte de los sedimentos. La menor abundancia de feldespato, cuyos cristales también presentan alteración a sericita<sup>21</sup>, respalda la ocurrencia de procesos sedimentarios con mayor tiempo de transporte y abrasión. Sin embargo, cabe

---

<sup>21</sup> La sericita no es propiamente un mineral, sino un término que hace referencia a un agregado de grano fino de micas blancas del tipo moscovita-paragonita u otros minerales con una estructura similar a estos, como son los del grupo de la illita (minerales del grupo de la arcilla). Es un agregado de baja temperatura que suele aparecer por la transformación subsólidos de los feldespatos, siendo las plagioclasas las que con mayor frecuencia desarrollan este tipo de alteración. Sus características son un aspecto "sucio" y gris (borroso) con nícoles paralelos y aspecto policristalino microgranular con colores de birrefringencia elevados (como los de la moscovita) con nícoles cruzados. (<https://petroigne.wordpress.com/minerales/minerales-de-alteracion/sericita/>)

destacar que los cristales de cuarzo varían en cuanto a su redondeamiento y esfericidad, por lo que es probable que haya una fuente más cercana que también esté aportando cuarzo al depósito. Nuevamente se sugiere una fuente intrusiva, rica en sílice y diferenciada, posiblemente granodioritagranito.

La biotita también puede provenir de una fuente ígnea intrusiva diferenciada, debido al tamaño de los cristales y abundancia en el depósito.

Los fragmentos volcánicos sub-redondeados, parcialmente esféricos y con gran alteración a minerales de arcilla sugieren afloramientos de lavas cercanos al agente de transporte pero que se encuentran lejanos al depósito sedimentario.

- **Río Combarbalá.** La muestra posee una gran cantidad de fragmentos volcánicos (40%), los que presentan su matriz alterada a arcilla y algunos de sus cristales con epidota. La fuente no debiese ser muy lejana, puesto que estos fragmentos a pesar de estar fuertemente alterados, no presentan un redondeamiento y esfericidad elevados, además es importante considerar que son fáciles de alterar, por lo que no necesariamente es un factor clave en la interpretación de la muestra.

La mayoría de los cristales se encuentran sub-redondeados y con esfericidad media, así como los minerales micáceos se presentan en sus formas primarias (euhedrales), por lo que se podría aceptar aún más el poco tiempo de transporte, ya que no se observa una notoria madurez textural en general, lo que sigue apoyando una fuente muy próxima al depósito.

El porcentaje de cuarzo es muy pequeño en relación a la cantidad de minerales composicionalmente inmaduros, por lo que se puede proponer que la energía del medio de transporte no debe ser tan alta como lo es en otras zonas de mayor pendiente o desembocaduras o el tiempo de transporte es bajo, junto con una fuente muy próxima. Como en los casos anteriores, el material encontrado puede ser producto de otros tipos de transporte.

En cuanto al análisis de la cuenca del Limarí y sus afluentes principales, se denota una clara relación en cuanto a contenido mineralógico presente en los sedimentos – asociados a la desembocadura y al interior de la cuenca -. Se observa predominancia de feldespato potásico, con cuarzo y plagioclasa subordinados, junto a biotita, clorita y opacos (óxidos de Fe-Ti), variando la abundancia y evolución de la mineralogía de acuerdo a sus características de resistencia a la abrasión en base al tiempo de transporte y energía del agente transportador. Así es como se permite concluir que la principal área de proveniencia de gran parte de los sedimentos presentes en los depósitos de ambos dominios estudiados se trataría de la misma o afloramientos de roca muy similares, con características de roca ígnea intrusiva, diferenciada y con el desarrollo de mineralogía hidratada correspondiente, con alto contenido en sílice y álcalis.

Esto último queda evidenciado principalmente por la variación de la abundancia y cambio en las características primarias del feldespato potásico, cuyos cristales cambian desde sub-angulosos a subredondeados en el trayecto desde la cuenca del río Limarí hasta su desembocadura y su abundancia va disminuyendo progresivamente al aumentar las distancias de transporte, generándose mineralogía de alteración que reemplaza al feldespato ante las nuevas condiciones del ambiente y la gran abrasión sufrida. No deja de ser llamativo el hecho de encontrar feldespato potásico en la zona de la desembocadura del río Limarí, ya que como se mencionó, se trata de un mineral de baja resistencia a la abrasión y meteorización, por lo que, al ser hallado tanto en esta zona como en las muestras tomadas hacia el interior de la cuenca, es posible de inmediato correlacionar su presencia con una misma fuente de aporte de material rica en este mineral.

Lo anterior no descarta el aporte de sedimentos diversas fuentes que aparecen durante el trayecto los ríos que conforman la cuenca del río Limarí hacia su desembocadura.

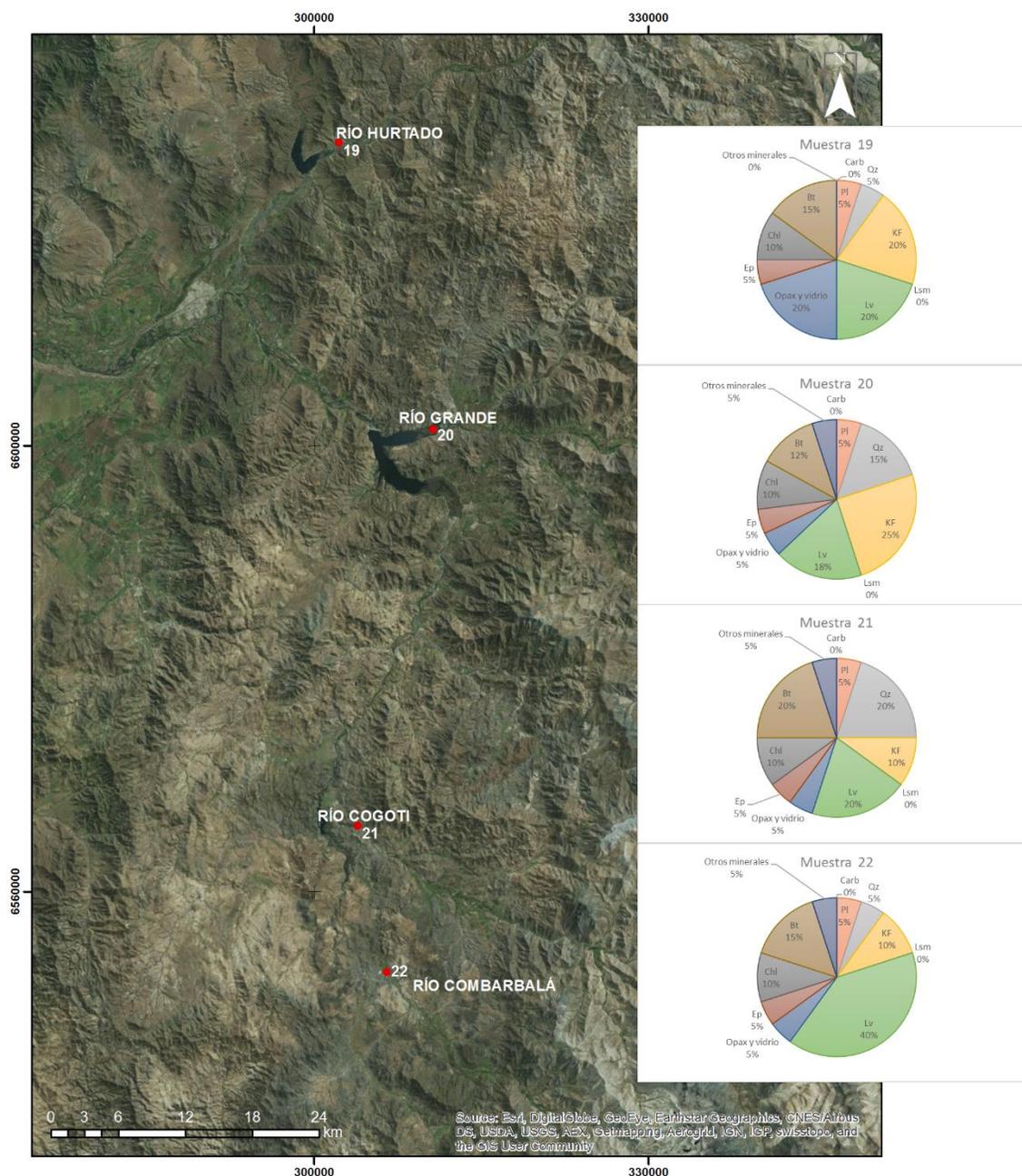
**Figura 28 Muestreo sedimentológico zona de desembocadura del río Limarí, en playa moderna y bancos laterales fluviales.**



Nota: La localización de las muestras se relaciona a la zonificación proximal, media y distal de la desembocadura del río Limarí (1,2 y 3 respectivamente). Mientras que, al interior de ésta, se ubican en bancos fluviales laterales (muestras 4,5 y 6).

Fuente: Proyecto FONDECYT N°1120234.

**Figura 29** Afluentes del Limarí



Nota: Se indican los principales afluentes del río Limarí como puntos representativos del potencial sedimentario a la cuenca del mismo nombre. Las muestras tomadas en las zonas de depósitos asociados representan de forma general la evolución y potenciales procesos que han afectado de manera progresiva a los sedimentos provenientes de su roca fuente o de origen.

Fuente: Proyecto FONDECYT N°1120234.

- La zona de Tongoy (ver Figura 30), presenta porcentajes de cuarzo en aumento mientras más cerca de la costa se encuentran las muestras, incluso llegando a un 25%

versus un 5%, sin embargo, el cordón de playa posee mucho más cuarzo que los depósitos de la misma playa, la cual posee una mayor cantidad de micas, lo cual podría explicarse desde el punto de vista que el mar también retrabaja y moviliza los sedimentos, por lo que puede que estos queden concentrados en el cordón de playa o incluso ser arrastrados mar adentro.

Las especies minerales en general se encuentran angulosas y con esfericidad media a buena, lo que habla de un nivel de retrabajo medio provocado por el mismo transporte. La madurez composicional es mucho mayor en el cordón de playa, por el mayor porcentaje de cuarzo y la selección es mucho mejor en la duna, ya que esta se forma por transporte eólico principalmente. Los diferentes niveles de redondeamiento y esfericidad, hablan de las distancias relativas a la fuente de los sedimentos y la madurez textural de las muestras, los que no necesariamente son iguales para todos, y se debe recordar que los sedimentos pudieron ser adquiridos posteriormente o en distintos lugares.

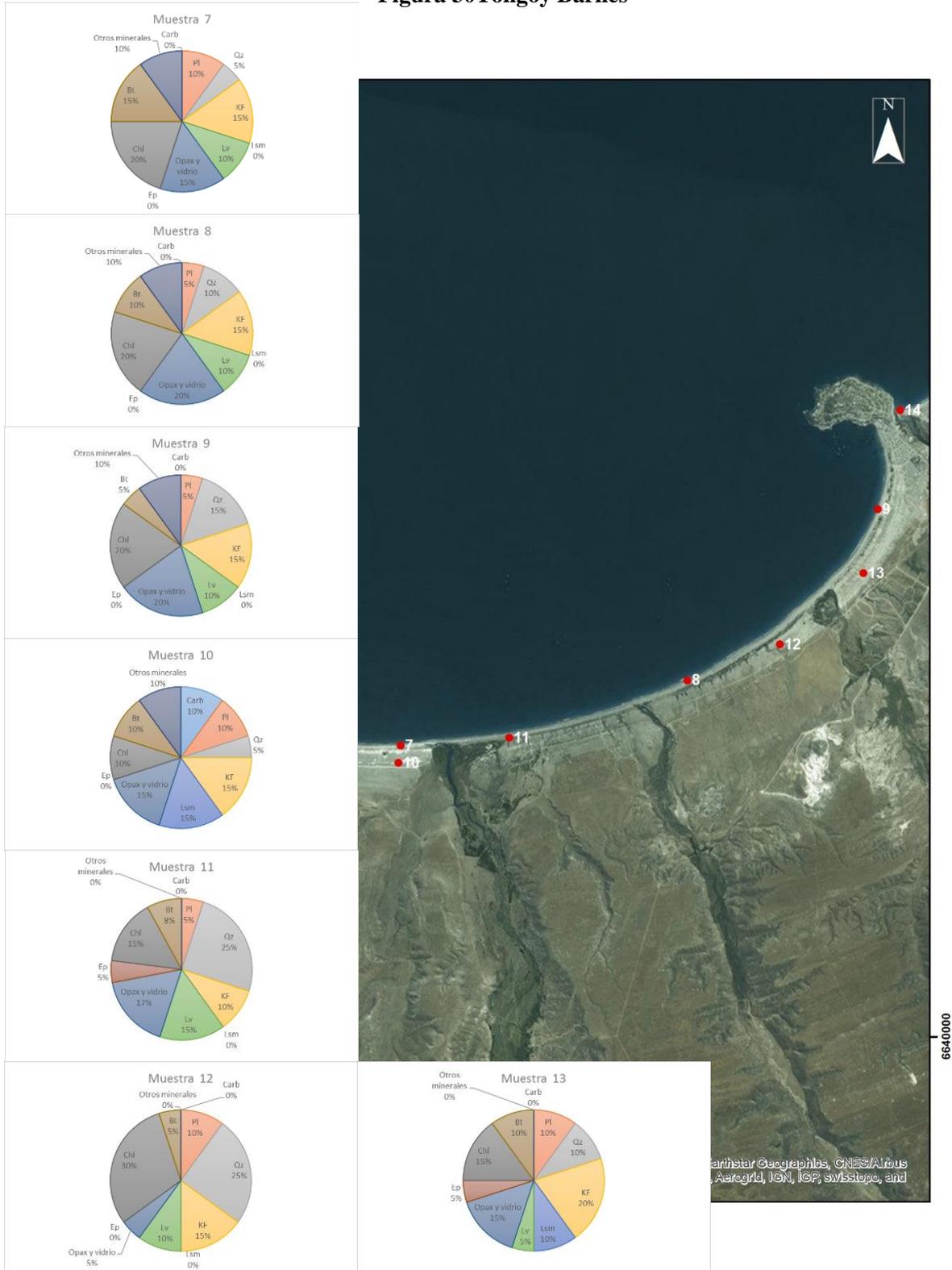
Se debe tener en cuenta que en la bahía también actúan otros métodos de transporte, como lo son transporte eólico, aluvial, litoral o coluvial, por lo que no se puede asegurar sólo esta hipótesis, como ocurre en todos los otros casos del estudio.

- En el muestreo de Bahía Barnes (ver Figura 31), en playa, predomina la presencia de feldespato potásico y calcita, el último mineral presente principalmente en conchas observadas. La abundancia de feldespato disminuye desde la muestra 14 a la 16, mientras que el contenido de calcita aumenta. Esto es coincidente con el acercamiento progresivo de la zona de toma de muestras en dirección desde el continente hacia el mar. La gran abundancia de feldespato es indicador de una fuente de sedimentos más bien cercana y de carácter ígneo cuya composición se caracteriza por un alto contenido en sílice y álcalis, mientras que el carácter sub-anguloso de estos cristales presentes en las muestras y la poca alteración de los feldespatos refuerza la teoría de la cercanía de la fuente. El aumento progresivo de calcita es razonable al aumentar la cercanía al ambiente de depositación de conchas.

La presencia de fragmento volcánicos sub-redondeados sugiere afloramientos de rocas volcánicas en zonas más bien lejanas al depósito de sedimentos estudiado.

En las muestras de duna se observa una proporción más bien homogénea entre las abundancias de feldespato, cuarzo y plagioclasa. Se tienen cristales y fragmentos de menor tamaño en comparación a los que componen a las muestras de playa. También, de forma general, se tienen fragmentos más angulosos y mayor abundancia relativa de opacos, junto a mayor presencia de biotita y clorita. Lo observado coincide con características de un depósito con buena selección y media madurez composicional, debido a que siguen presentes minerales que son poco resistentes a la erosión y meteorización, como lo son el feldespato y la plagioclasa. Se sugiere una fuente de sedimentos diferenciada, rica en sílice, posiblemente granodiorita-granito.

Figura 30 Tongoy Barnes



Fuente: Proyecto FONDECYT N° 1120234.

Figura 31 Barnes



Fuente: Proyecto FONDECYT N°1120234.

Los Choros, para las muestras M23, M24 y M25 se tiene que los fragmentos monominerales más abundantes corresponden al feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa y en menor proporción carbonatos, mientras que los fragmentos detríticos líticos (poliminerálico), corresponden a los fragmentos de minerales de óxido y hierros con vidrio volcánico, principalmente de los primeros, seguido de los fragmentos graníticos, luego los líticos sedimentarios marinos, y por último los fragmentos con alteración epidótica, donde se incluye además la epidota policristalina. En menor proporción, se observan líticos volcánicos y dioríticos.

Las muestras al norte (M26, M27 y M28) cumplen el mismo dominio de los minerales, en orden de abundancia similar. Los fragmentos líticos más abundante, esta vez son los líticos de composición granítica, seguido por los líticos sedimentarios marinos, con menor presencia de los líticos tonalíticos, dioríticos, feldespatos con alteración fuerte a arcillas y fragmentos con alteración epidótica, donde nuevamente abundan los fragmentos de epidota policristalina<sup>22</sup>.

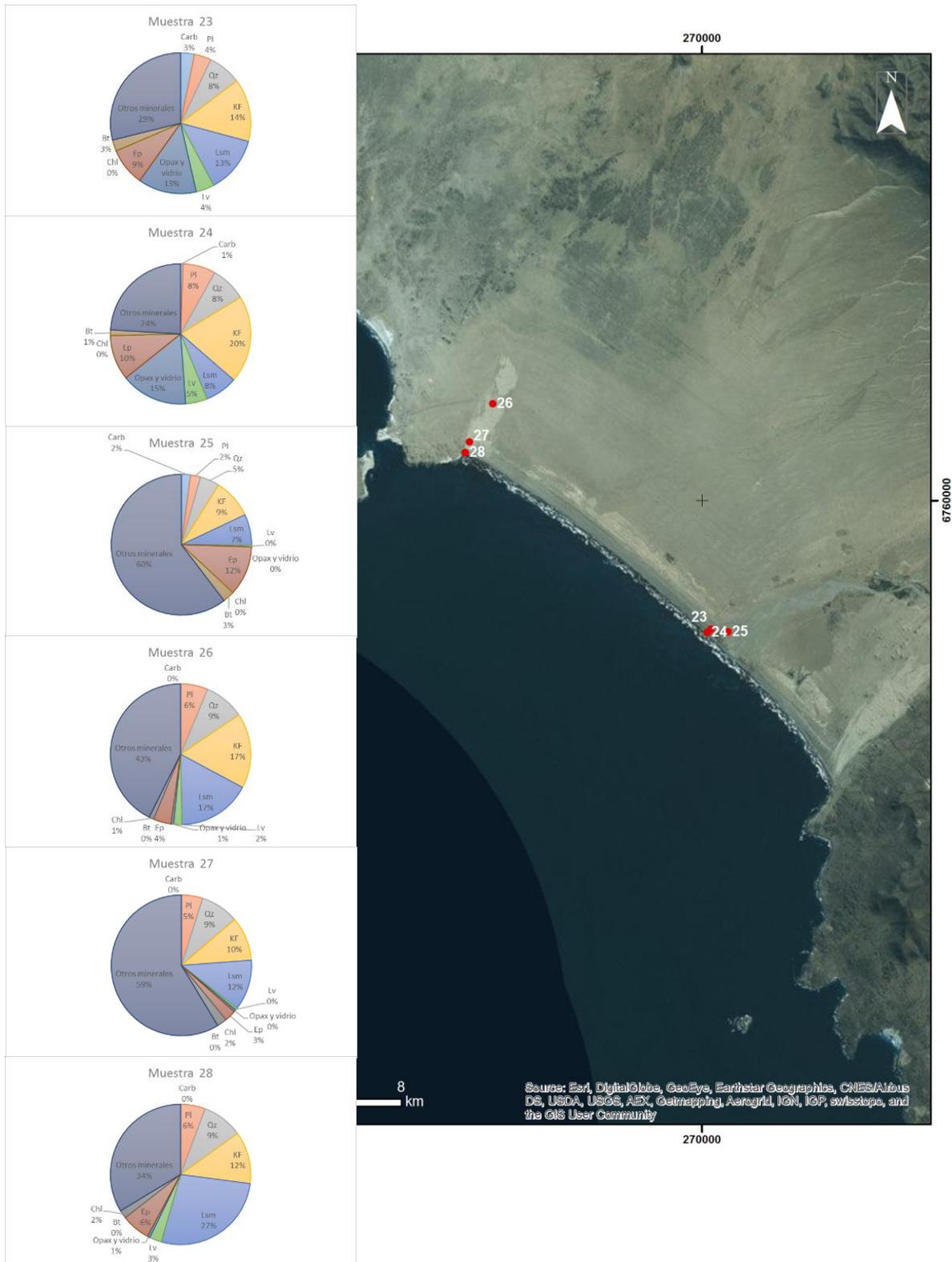
Las muestras del lugar indican presencia de feldespatos, cuarzos, líticos sedimentarios marinos, entre otros elementos. Referente al feldespato potásico, se identifican con porcentajes que rondan los 12% y 20%, siendo el área con mayor presencia la muestra 24. La tendencia de las muestras indica menores porcentajes de feldespato en la zona de muestreo, siendo las muestras 26 y 24 las que sale de la norma. Ambas pueden relacionarse a una fuente de abastecimiento cercana, como lo sería la quebrada Los Choros. Sin embargo, lo anterior se contrasta con porcentajes bajos en los otros sitios muestrales, lo cual indicaría un tiempo mayor entre el transporte y la abrasión.

Es por los antecedentes indicados que los depósitos dunares del sector, podrían tener una procedencia combinada, cercana y de baja data como potencialmente antigua o de lejanía al punto de acumulación.

---

<sup>22</sup> Análisis extraídos de OCAMPO (2015).

Figura 32 Los Choros



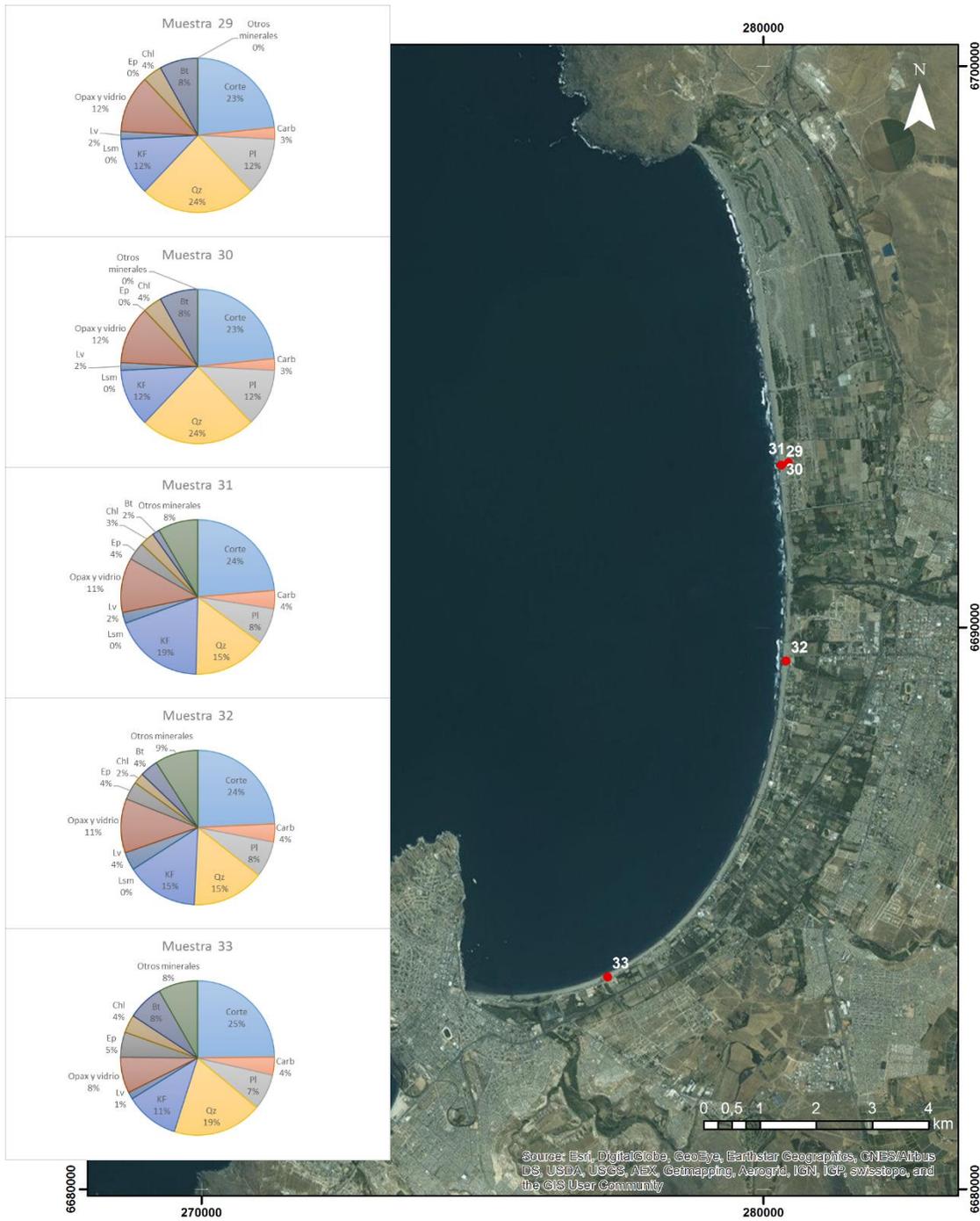
Fuente: Proyecto FONDECYT N° 1120234.

La Serena, para las muestras M29, M30 y M31 se presentan relativamente el mismo porcentaje en casi todos los tipos de fragmentos y minerales. No se aprecian cambios mineralógicos grandes, ni tampoco texturales, esto puede ser causado por la cercanía en la extracción de arena y al tratarse de una playa, la posible homogeneidad del depósito. La morfoscopía de las muestras de este sector corresponde a fragmentos sub-redondeados de arena fina, bien seleccionados y con presencia de ferromagnesianos, cuarzo, feldespatos y conchillas, aspectos que definen un ambiente distal de playa con una tasa de transporte relativamente alta.

Mientras que, para la zona media de la ensenada, la muestra M32, tiene relativamente el mismo porcentaje que las muestras de las otras zonas de La Serena, en casi todos los tipos de fragmentos y minerales. Lo que sí se observa en esta zona es parámetros intermedios entre la zona proximal y distal de la playa. Esto puede ser causado por la cercanía en la extracción de arena y al tratarse de una playa, la posible homogeneidad del depósito. La morfoscopía de la muestra de este sector corresponde a fragmentos subredondeados de arena fina a muy fina, bien seleccionados y con presencia de ferromagnesianos, feldespatos y cuarzo, aspectos que definen un ambiente Medial de playa con una tasa de transporte relativamente alta.

Finalmente, la muestra de la zona proximal, muestra M33, exhibe relativamente el mismo porcentaje que las muestras de la Zona Distal en casi todos los tipos de fragmentos y minerales. No se aprecian cambios mineralógicos grandes, lo que puede ser causado por la cercanía en la extracción de arena y al tratarse de una playa, la posible homogeneidad del depósito. Lo que sí se observa en esta zona es una disminución en el porcentaje de fragmentos de conchilla, el tamaño de la arena, que es muy fina en este sector y la cantidad de minerales de alteración encontrados. Esto puede ser explicado por la proximidad de ésta a la línea de costa y el constante re-trabajo y meteorización química que ejerce el mar sobre los depósitos. La morfoscopía de la muestra de este sector corresponde a fragmentos subredondeados de arena muy fina, bien seleccionados y con presencia de ferromagnesianos, feldespatos y cuarzo, aspectos que definen un ambiente proximal de playa con una tasa de transporte relativamente alta.

Figura 33 La Serena



Fuente: Proyecto FONDECYT N°1120234.

### 3.4.1. Análisis comparativo de sedimentos

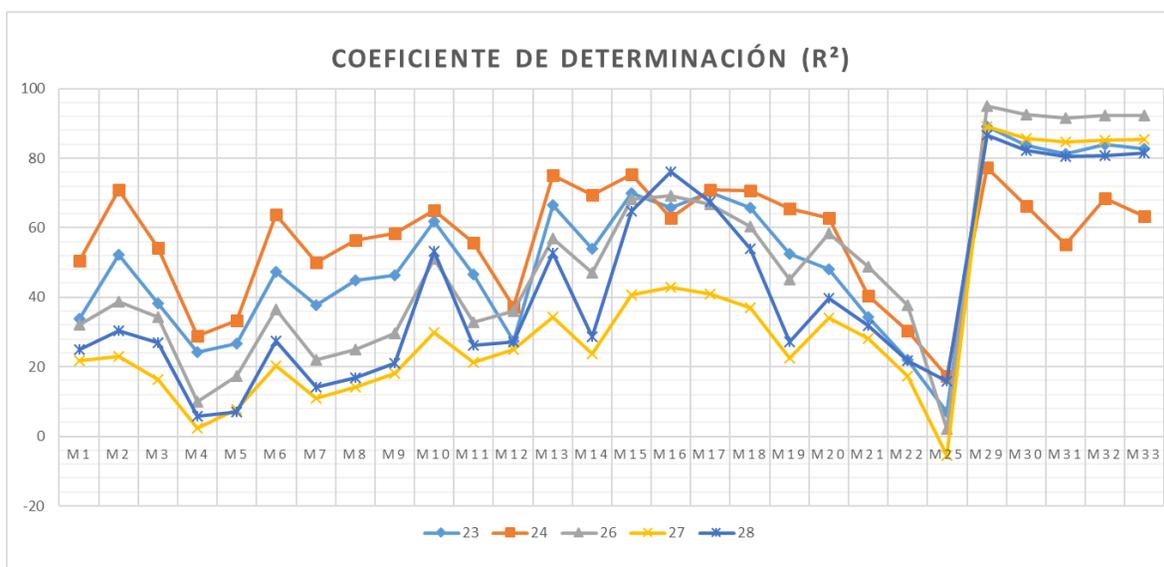
Para identificar la relación entre los datos de las diferentes fuentes analizadas, se ha calculado los coeficientes de determinación y similitud, teniendo con ellos respuesta a la potencial correspondencia entre las muestras y su origen.

*Los valores de  $R^2$  están comprendidos porcentualmente entre 0 y 100, donde 0 es correlación nula y 100 es muy buena correlación. Los valores de  $s$  están dentro del rango 0 a 1, donde 0 significa que no son similares y 1 corresponde a que son muy similares.*

Se considerará una similitud baja, en relación a los valores calculados entre todas las muestras, si los valores de  $s$  se encuentran dentro del grupo ubicado a la izquierda de la zona comprendida entre la media y una desviación estándar, esto es, el grupo compuesto por el 16,4% de valores menores ( $s < \mu - \sigma$ , donde  $\mu$  corresponde a la media y  $\sigma$  a la desviación estándar), una similitud considerable, si los valores de  $s$  se encuentran alrededor de la media, con valores entre la media más y menos una desviación estándar ( $\mu - \sigma \leq s \leq \mu + \sigma$ ) y similar si los valores de  $s$  se encuentran ubicados a la derecha de la media más una desviación estándar, dentro del grupo compuesto por el 16,4% de mayores valores ( $\mu - \sigma < s$ ), según una distribución normal.

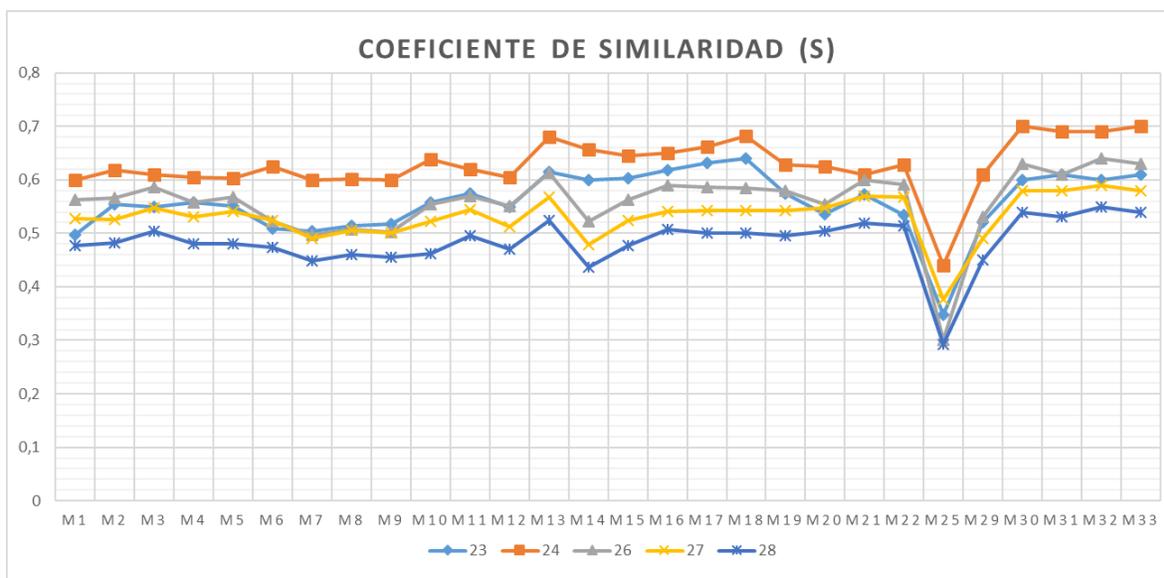
Para el caso se han tomado las muestras M23, M24, M26, M27 y M28 para la contrastación base referente al resto del área muestral. A continuación, se grafican los resultados de ambos coeficientes, y se realiza el análisis correspondiente de correlación y similitud.

**Gráfico 1 Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre las muestras M23, M24, M26, M27 y M28, correspondientes a depósitos dunares en la zona de Los Choros, en contraste al muestreo general de la Mega Ensenada y la Cuenca del río Limarí.**



Fuente: Proyecto FONDECYT N° 1120234.

**Gráfico 2 Coeficiente de similitud (s) entre las muestras M23, M24, M26, M27 y M28, correspondientes a depósitos dunares en la zona de Los Choros, en contraste al muestreo general de la Mega Ensenada y la Cuenca del río Limarí.**



Fuente: Proyecto FONDECYT N°1120234.

Asociado a las muestras en general se tiene que los valores tanto de  $R^2$  como de  $s$  son significativos para las muestras M24, siendo ésta la que recibe mejor correlación y similitud entre los puntos de Los Choros analizados y las potenciales zonas aportantes de material sedimentario. Se indica a la vez, son las muestras M27 y M28 las que denotan menor correlación entre los datos analizados, y por lo tanto menor similitud entre ellos.

En seguida, se realiza un desglose situacional de cada una de las áreas consideradas en la presente tesis, como de potencial aporte sedimentario a la unidad dunar de Los Choros.

Las muestras de **La Serena**<sup>23</sup>, los resultados de  $R^2$  para la muestra M23 denota una alta correlación entre el muestreo, con un promedio de 84,15%, mientras para  $s$ , se tiene 0,588 de promedio, indicando una baja similitud. Por otra parte, la muestra M24 denota una alta similitud, con un valor promedio de  $s = 0,679$ , y con 2 muestras que superan los 0,7 (M30, M32) y cercanas a este con 0,69 (M31, M33); mientras que para  $R^2$ , se tiene un promedio de 66,063%, indicando una baja correlación entre los tipos analizados.

En definitiva, las muestras de La Serena, poseen un comportamiento muy similar entre ellas, respecto a las muestras de Los Choros.

En general, las 5 muestras de La Serena poseen similitudes bajo 0,7, lo que indicaría una baja correlación. La muestra M24 de La Serena es siempre la que posee una similitud más alta respecto a las otras y la muestra M25 es la más baja en todos los análisis.

<sup>23</sup> Muestras M29, M30 y M31 en zona distal, muestra M32 en zona media y muestra M33 en zona proximal.

Respecto a los resultados de  $R^2$ , los porcentajes varían, pero en general, las muestras M23, M26, M27 y M28 siempre poseen porcentajes mayores a 80%, por lo que existe una alta correlación con las muestras de La Serena. La muestra 26 en este caso es la que siempre posee el valor más alto de correspondencia. Finalmente se puede concluir que las muestras M23, M26, M27 y M28 son las que se asemejan más a las muestras de La Serena, en todos los análisis. La muestra M25 es la que posee una composición menos similar en todos los casos. Respecto a la muestra M24, que posee una “alta” similaridad, pero no un alto porcentaje de correlación, es necesario tener más información para concluir adecuadamente si se asemeja o no a las muestras de La Serena.

Para la **Bahía de Tongoy**<sup>24</sup>, la mayor correlación y similaridad fue observada para la muestra M24, con los valores promedio de  $R^2 = 56,823\%$  y  $s = 0,621$ . Estos valores se encuentran en el grupo de valores intermedios para estos parámetros. Se obtuvo un valor de  $s$  considerable, levemente por sobre la media, con una correlación moderada. Por otra parte, para la muestra M23 los valores promedio fueron  $R^2 = 47,365\%$  y  $s = 0,548$ . Estos valores se encuentran en el grupo de valores intermedios para estos parámetros. Se obtuvo un valor de  $s$  considerable, bajo la media, con una baja correlación.

Lo anterior, se traduce en que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de Tongoy hacia la zona de Choros Bajos y dentro del grupo de valores intermedios para la zona estudiada, con una correlación en promedio, moderada y con un punto en específico, la muestra M13, el cual tiene la segunda mayor similitud y la segunda mejor correlación de todas las muestras.

La zona de **Bahía Barnes**<sup>25</sup> posee mayor correlación y similaridad con respecto al punto M24, con valores promedio de los parámetros de  $R^2 = 69,835\%$  y  $s = 0,659$ . Estos valores son los mayores de todas las zonas estudiadas.

Así para la muestra M23, los valores promedio de los parámetros fueron  $R^2 = 65,053\%$  y  $s = 0,618$ . Estos valores son los mayores de todas las zonas estudiadas.

De lo anteriormente señalado, se infiere que desde la zona de Bahía Barnes es muy probable que exista aporte sedimentario hacia la zona de Choros Bajos, y dentro de todas las zonas estudiadas, sería la que haría el principal aporte.

Con respecto a la **desembocadura del Limarí**<sup>26</sup> y las muestras asociadas a playa moderna y bancos fluviales, se tiene que referente a la muestra M23 los valores en promedio tanto para  $R^2$  como para  $s$ , en la zona de la desembocadura del Río Limarí, se encuentran en el grupo de menores valores para estos parámetros, con valores promedio de  $R^2 = 37,094\%$  y  $s =$

---

<sup>24</sup> Muestras M7, M8 y M9 en playa moderna; M10, M11 y M12 en playa holocénica y M13 en dunas.

<sup>25</sup> Muestras M14, M15 y M16 en playa; M14 y M18 en duna.

<sup>26</sup> Muestras M1, M2 y M3 en playa moderna; M4, M5 y M6 en bancos fluviales laterales.

0,537, por tanto, se puede inferir que se obtuvo un resultado de  $s$  considerable, pero bajo la media, con una correlación muy baja.

Por otra parte, en relación a la muestra M24, los valores en promedio tanto para  $R^2$  como para  $s$ , en la zona de la desembocadura del Río Limarí, se encuentran en el grupo de menores valores para estos parámetros, con valores promedio de  $R^2 = 50,292\%$  y  $s = 0,610$ , por tanto, se puede inferir que se obtuvo un resultado de  $s$  considerable, pero bajo la media, con una correlación baja.

Sobre la base de lo anterior, se indica que existe la posibilidad de aporte sedimentario desde la desembocadura del río Limarí hacia la zona de Choros Bajos, pero estadísticamente, el aporte sedimentario sería menor que la mayor parte de las zonas estudiadas en este trabajo.

Adjuntando a lo anterior, los resultados para los afluentes del Limarí estudiados, indican lo siguiente.

Para el **río Hurtado**<sup>27</sup>, en zona de depósito aluvial, existe sólo una muestra, con valores de  $R^2 = 52,457\%$  y  $s = 0,574$  con respecto al punto 23 y  $R^2 = 65,461\%$  y  $s = 0,629$  con respecto al punto 24. Siendo la muestra 24 la con mayor correlación y similitud entre las muestras del sector de Los Choros.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto M23 y M24, esta zona sería la que tiene la segunda mayor similitud y segunda mayor correlación.

Se infiere que existe una alta posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de Río Hurtado hacia la zona de Choros, ya que los valores para los parámetros están en el grupo de los mayores valores, con una buena correlación. Se destaca que el hecho de que sólo exista un punto de muestreo, no permite generalizar a toda una zona como la segunda zona de mayor aporte sedimentario hacia el área de los Choros, pero si incentiva a obtener más datos para verificar esta alta probabilidad de aporte sedimentario.

Con respecto al **río Grande**<sup>28</sup>, la muestra tiene valores de  $R^2 = 48,093\%$  y  $s = 0,536$  para la muestra M23, y  $R^2 = 62,809\%$  y  $s = 0,624$  para la muestra M24.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto M23, el área tiene el segundo resultado más bajo en similitud y en correlación, ambos valores por debajo de la media para ambos parámetros. Por otra parte, en comparación a la muestra M24, esta zona tendría un valor intermedio, por sobre la media, con una buena correlación de datos.

Se infiere que existe la posibilidad de aporte sedimentario desde río Grande hacia Los Choros, en mayor medida con respecto al punto M24 que al M23. Se destaca que el hecho de que sólo exista un punto de muestreo, no permite generalizar a toda un área como de

---

<sup>27</sup> Muestra M19 en depósito aluvial.

<sup>28</sup> Muestra M20 en depósito aluvial.

importancia en el aporte sedimentario de Los Choros, pero si impulsa a obtener más datos para verificar esta alta probabilidad de aporte sedimentario.

El **Cogotí**<sup>29</sup> posee valores de  $R^2 = 34,206\%$  y  $s = 0,573$  con respecto al punto M23 y  $R^2 = 40,323\%$  y  $s = 0,609$  con respecto al punto M24. En relación con el total de las muestras, con respecto al punto M23, tiene los mayores valores para  $s$ , pero con muy baja correlación ( $R^2$ ). Por otra parte, para el punto M24, tiene el segundo valor más bajo de  $s$  con una muy baja correlación.

Se deduce que existe la posibilidad de carga sedimentaria desde el río Cogotí hacia Los Choros, pero es una de las muestras con menor aporte en comparación con todas las zonas analizadas. Así mismo, la existencia de un solo punto de muestreo, no permite generalizar el área como de baja contribución sedimentaria.

Finalmente, el **río Combarbalá**<sup>30</sup> posee valores de  $R^2 = 22,087\%$  y  $s = 0,534$  para la muestra M23, y  $R^2 = 30,303\%$  y  $s = 0,628$  en la muestra M24. Una vez más, la similitud es mayor con respecto al punto M24 que al M23.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto M23, para la zona de Río Combarbalá, tiene una baja similitud, por debajo de la media, con una correlación muy baja. Por otra parte, la muestra M24, tiene alto valor de similitud, por sobre la media, pero con una muy baja correlación.

De lo anterior se deduce que existe la posibilidad de aporte sedimentario desde la zona de Río Combarbalá hacia Los Choros, pero esta sería una de las zonas de menor aporte en comparación con todas las zonas analizadas.

### **Aporte sedimentario de la Quebrada de Los Choros al campo dunar del mismo nombre.**

Se realiza el análisis de correlación y similaridad entre las muestras totales y la muestra M25 en relación a las muestras M23 y M24, correspondiente a la Quebrada de Los Choros en desembocadura. De éstas se indican los siguientes resultados.

Los valores de los parámetros estudiados son  $R^2 = 6,958\%$  y  $s = 0,347$  con respecto al punto 23 y  $R^2 = 17,233\%$  y  $s = 0,441$  con respecto al punto 24. La similitud es mayor con respecto al punto M24 que al M23.

En relación con el total de las muestras, tanto para la muestra M23 como M24, ambas de la zona de la desembocadura de la quebrada Los Choros, tienen las más bajas similitudes, con las peores correlaciones de todas las zonas estudiadas.

---

<sup>29</sup> Muestra M21 en depósito aluvial.

<sup>30</sup> Muestra M22 en depósito aluvial.

Se infiere que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de la desembocadura de la quebrada Los Choros hacia la zona de Choros Bajos, pero que sería la zona de menor aporte en comparación con todas las zonas estudiadas en este trabajo.

En contraste a lo anterior, y para obtener mayor información referente al área y el potencial aporte al campo dunar, se indica como antecedente, los resultados de OCAMPO (2015), referido a las fuentes de contribución referidas a la cuenca que sustenta la Quebrada Los Choros, indicando ésta, que los fragmentos monominerales de mayor abundancia a lo largo de la Quebrada Los Choros son el cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa, seguidos en menor medida por anfíbola. Mientras los fragmentos líticos de mayor abundancia son los graníticos, seguidos por los fragmentos constituidos por vidrio volcánico alterado a minerales opacos u opacos posiblemente monominerales, fragmentos dioríticos y fragmentos feldespáticos con alteración pervasiva a arcillas y micas blancas.

OCAMPO (2015) realiza una descripción de los sedimentos encontrados a lo largo de la quebrada de oriente a poniente, junto a las variaciones evidenciadas. Los resultados expuestos se resumen en la siguiente tabla.

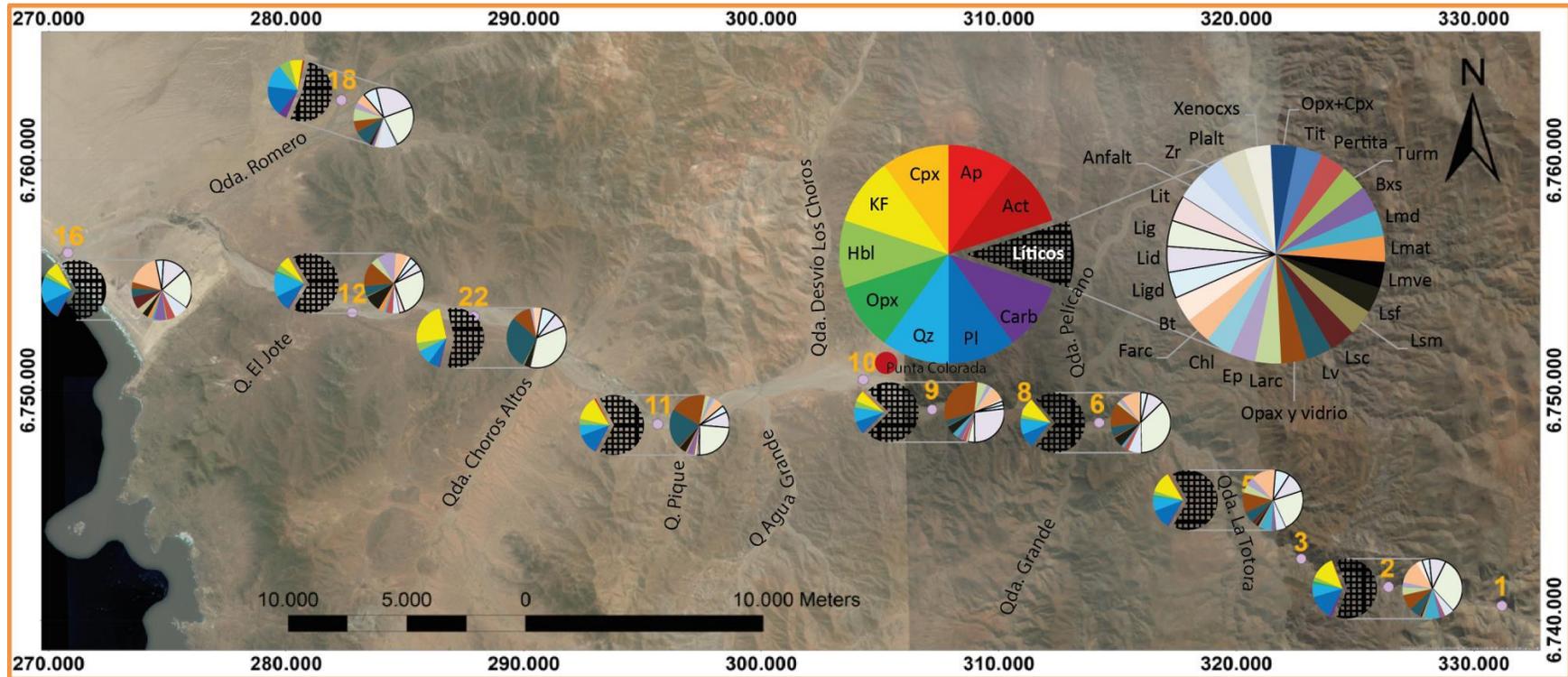
**Tabla 4 Descripción de sedimentos quebrada Los Choros**

Mineral	Variación
Feldespato potásico	Disminuye su abundancia desde la cabecera hasta pasado la Quebrada Pelicano, donde tiene un aumento explosivo hacia la confluencia con la Quebrada Choros Altos, donde vuelve a disminuir y aumentar progresivamente hasta la desembocadura.
Cuarzo	Aumenta progresivamente a lo largo de la quebrada, aunque presenta un leve descenso entre las quebradas Pelicano y Choros Altos.
Monocristalinos de plagioclasa	Presentan una disminución progresiva hasta pasada la confluencia de la con la quebrada Pelicano para luego presentar un peak en la confluencia con la Quebrada Choros Altos, y posteriormente volver a aumentar progresivamente hacia la desembocadura del sistema de drenaje.
Anfíbola	Aumento progresivo hacia la confluencia con la Quebrada Choros Altos, donde presenta un peak y disminuye hacia la desembocadura.
Epidota	Disminuye constantemente, pasada la confluencia con la Quebrada Choros Altos, donde luego disminuye hasta conformar un elemento traza dentro de la muestra de la desembocadura.
Fragmentos graníticos	Disminuyen hacia la confluencia con la Quebrada La Totorá para luego presentar un peak en las cercanías de la confluencia con las quebradas Grande y Pelicano, donde desciende su valor para luego mostrar un peak relativo en las cercanías a la confluencia con la Quebrada Choros Altos, desde donde disminuyen nuevamente.
Vidrio volcánico y opacos	Aumentan exponencialmente hasta las cercanías de la confluencia con la Quebrada Desvío los Choros, para luego disminuir progresivamente hacia la desembocadura.
Líticos de composición diorítica	No presentan un comportamiento continuo, si no que más bien varían su abundancia a lo largo de toda la quebrada
Fragmentos extrusivos	Presentan una disminución relativa hacia la confluencia con la Quebrada Desvío Los Choros, para luego presentar un aumento abrupto entre la quebrada recién mencionada y Quebrada El Jote, donde nuevamente disminuye hacia la desembocadura.
Fragmentos de feldespatos <sup>31</sup> alterados a arcillas y micas blancas	Presenta un comportamiento sinusoidal de baja amplitud a lo largo de la quebrada, aumentando relativamente hacia la confluencia con la quebrada la totora, para luego disminuir hacia la confluencia con la quebrada choros altos, para volver a aumentar hacia la desembocadura, donde presenta su mayor concentración

Fuente: OCAMPO (2015).

<sup>31</sup> Indiferenciados entre plagioclasa y feldespato potásico.

Figura 34 Mineralogía Quebrada Los Choros.

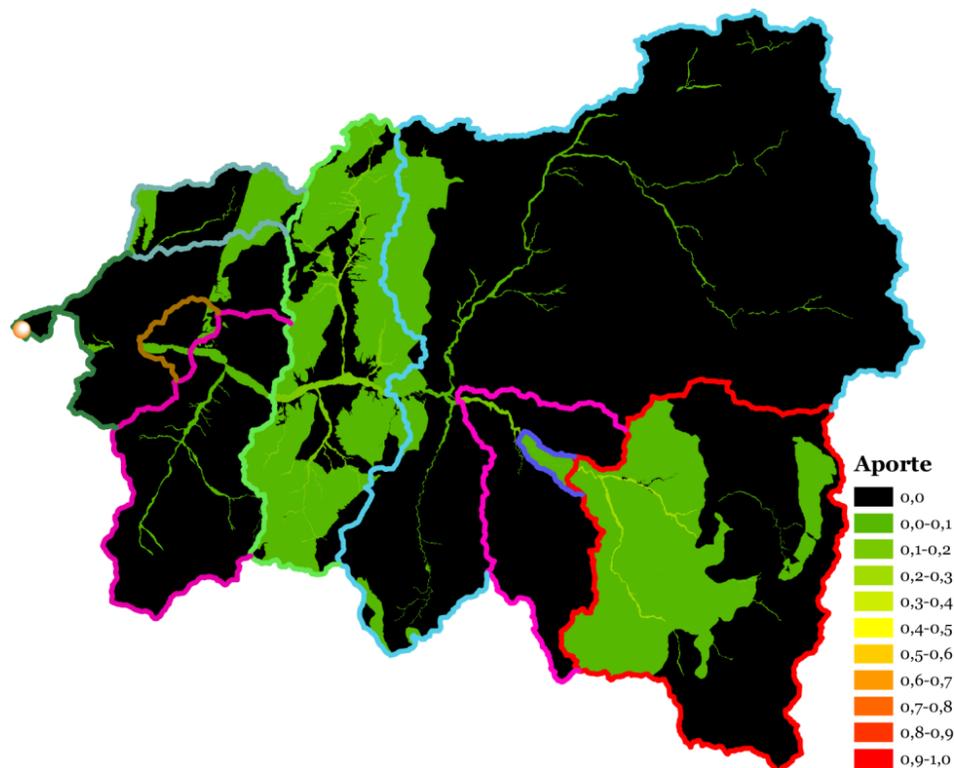


Nota: Mineralogía y petrografía de los puntos estudiados a lo largo de la Quebrada Los Choros. Arriba a la derecha junto con la orientación de la imagen satelital, se encuentra la simbología general. Carb: carbonatos, Pl: Plagioclasa, Qz: Cuarzo, Opx: ortopiroxeno, Hbl: anfíboles, KF: Feldespato potásico, Cpx: clinopiroxeno, Ap: apatito, Act: actinolita, Ligd: granodiorita, Lid: diorita, Lig: granito, Lit: tonalita, Anfalt: anfíbol alterado a opacos, Plalt: plagioclasas alteradas, Xenocxs: Xenocristales, Opx+Cpx: clinopiroxeno con lamelas de ortopiroxeno (o viceversa), tit: minerales alterados a titanita, Pertita, Turm: fragmentos alterados a turmalina, Bxs: textura brechosa, Lmd: fragmentos metamorfismo dinámico, Lmat: fragmentos metamorfismo de alta temperatura, Lmve: fragmentos metamorfismo facies esquistos verdes, Lsf: líticos sedimentarios finos, Lsm: líticos sedimentarios marinos, Lsc: líticos sedimentarios continentales, Lv: líticos volcánicos, Opax y vidrio: fragmentos de minerales opacos reemplazando vidrio volcánico, Larc: arcillas, Ep: alteración epidótica, Chl: alteración clorítica, Farc: feldspatos alterados a arcillas, Bt: alteración biotítica.

Fuente: OCAMPO (2015) y FONDECYT N°1120234.

Referente al análisis de probables fuentes de sedimento referido a la muestra M25, OCAMPO (2015) refiere a un aporte similar de todas las unidades de subcuencas asociados a su análisis (ver Figura 35).

**Figura 35 Fuentes probables de Sedimento que alimentan los campos dunares de la desembocadura de la Quebrada de Los Choros, en relación a su cuenca aportante directa.**



Fuente: OCAMPO (2015) y FONDECYT N°1120234.

Así también realizó el análisis de similaridad y correlación, para medir el aporte sedimentario desde la quebrada de Los Choros, hacia los campos arenosos presentes, para el caso las muestras M25 con respecto a las M23 y M24, así como también para las muestras M26, M27 y M28; encontrando que, para ambos casos, tanto el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el de similaridad ( $s$ ), dan valores negativos, lo que no permitiría entregar un resultado certero (OCAMPO, 2015).

**Tabla 5 Correlación y similitud entre las muestras de la quebrada Los Choros y los campos dunares de Los Choros.**

Sector	Con respecto a la muestra 25	Coefficiente de determinación (R <sub>2</sub> )	Coefficiente de Similitud (s)
Los Choros zona costera y de desembocadura	Muestra 23	-31,13%	-22,50
	Muestra 24	-10,91%	-19,13
Campos dunares cercanos a Punta de Choros.	Muestra 26	-26,24	-24,19
	Muestra 27	-34,51	-21,46
	Muestra 28	-7,44	-24,28

Fuente: OCAMPO (2015) y FONDECYT N°1120234.

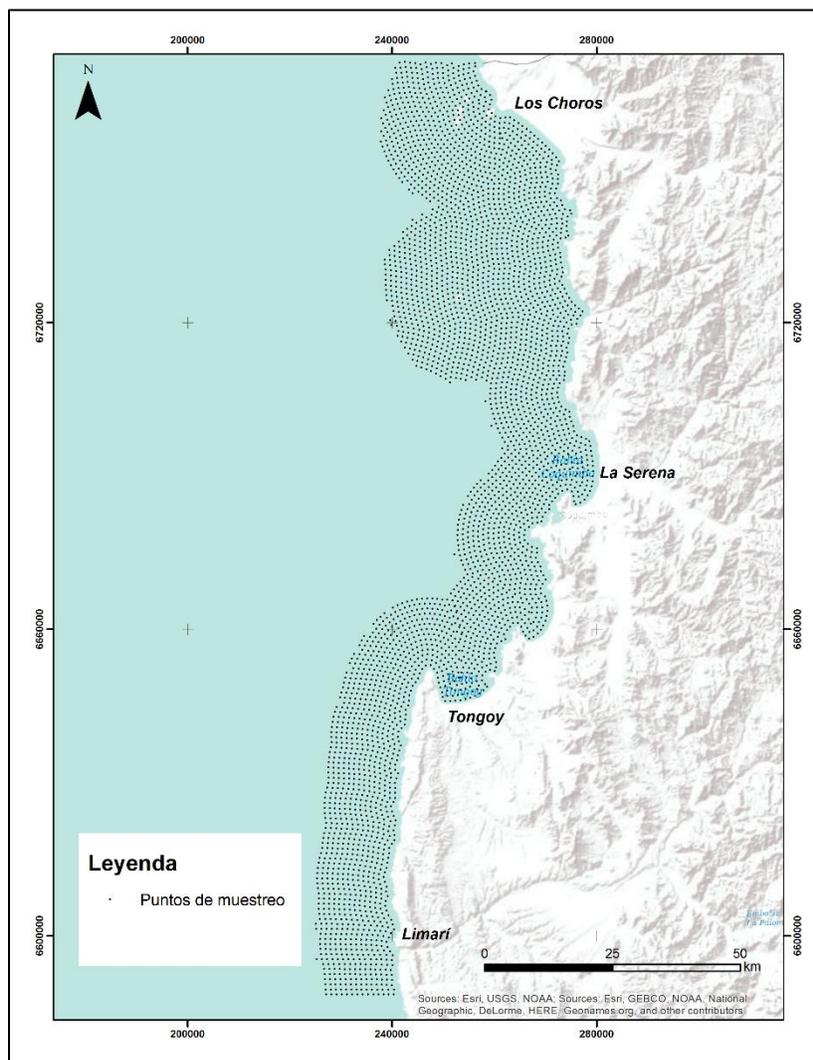
La autora, indica que los parámetros de correlación sean valores negativos, implicaría en términos técnicos una relación inversa, entre las arenas presentes en la desembocadura de la quebrada, y los presentes en el manto arenosos. Para efectos prácticos esto sólo implicaría que dichos sedimentos no guardarían relación con los presentes tanto en el sector Choros – muestras M23, M24 y M25 -, como en el sector Punta de Choros – muestras M26, M27 y M28-, por tanto, el aporte de esta sería marginal o inexistente, dejando la posibilidad de que el material sedimentario tenga una procedencia externa a la proporcionada por la quebrada de Los Choros. Otra opción posible, que plantea el estudio, es que el aporte de la Quebrada Los Choros al campo dunar no fuese homologable a una regresión lineal. Finalmente concluye que no existiría correlación entre los sedimentos a lo largo de la Quebrada de Los Choros, con los presentes en los campos dunares costeros (OCAMPO, 2015).

### 3.5. Análisis de transporte de sedimentos

#### 3.5.1. Malla de análisis.

Los resultados preliminares se centran en identificar el comportamiento de las subunidades, desde norte a sur, Bahías Los Choros, Coquimbo-La Serena, Tongoy y la desembocadura del Limarí. Asociadas a éstas, se generó una malla de muestreo de puntos equidistantes cada 1.000m y paralelos a la línea de costa<sup>32</sup>, para así obtener el escenario inicial de cómo el transporte de sedimentos se comporta en los sectores que se ha hipotetizado como principales aportantes en la generación de las dunas de Los Choros.

**Figura 36** Malla de muestreo de análisis



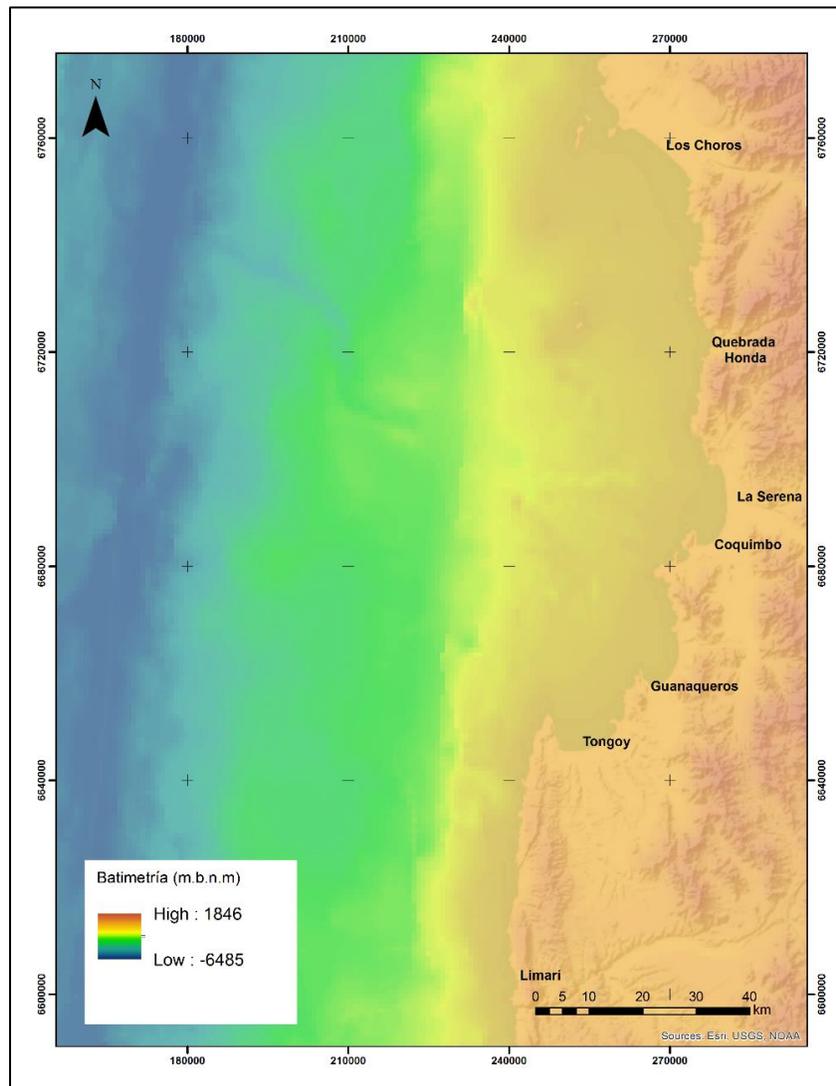
Fuente: Elaboración propia.

<sup>32</sup> La distancia desde la costa fue determinada en base a la información disponible para realizar la modelación.

### 3.5.2. Batimetría

La profundidad de generación de la ola, que se traduce en la batimetría asociada, para el caso, indica que los valores promedio de Tongoy, Coquimbo-La Serena, Los Choros y Limarí, oscila entre los 0 y 50 m.b.n.m. Valores que determinan el tipo de quiebre de ola que se presenta en el área, como la posibilidad de transporte en la misma.

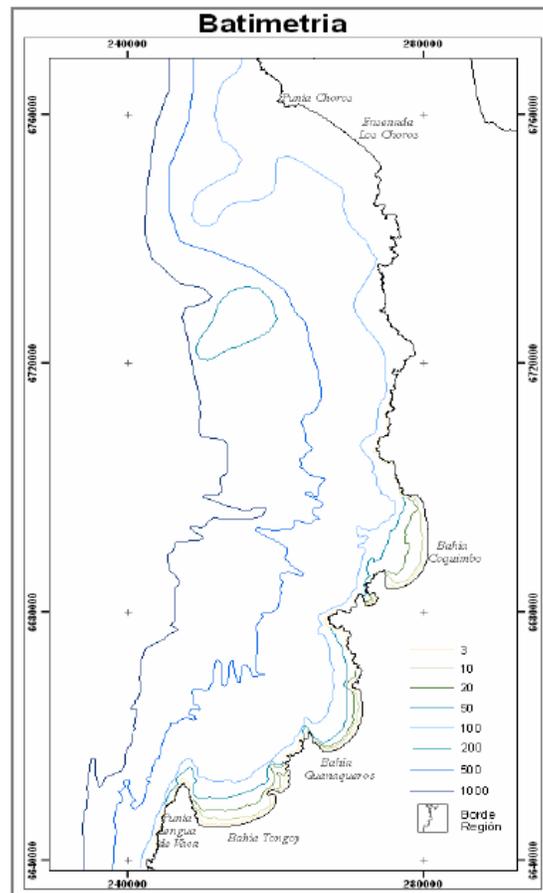
**Figura 37** Batimetría mega ensenada de Coquimbo y desembocadura del Limarí.



Fuente: Proyecto GEBCO2014<sup>33</sup>.

<sup>33</sup> Grid de terreno continuo del océano y continente, con resolución espacial de 30 arc seconds. Se presenta como la actualización del GEBCo08grid, que a su vez se basa los archivos del srtm desde FTP SRTM30\_PLUS, entire grid V11.

**Figura 38** Batimetría mega ensenada de Coquimbo



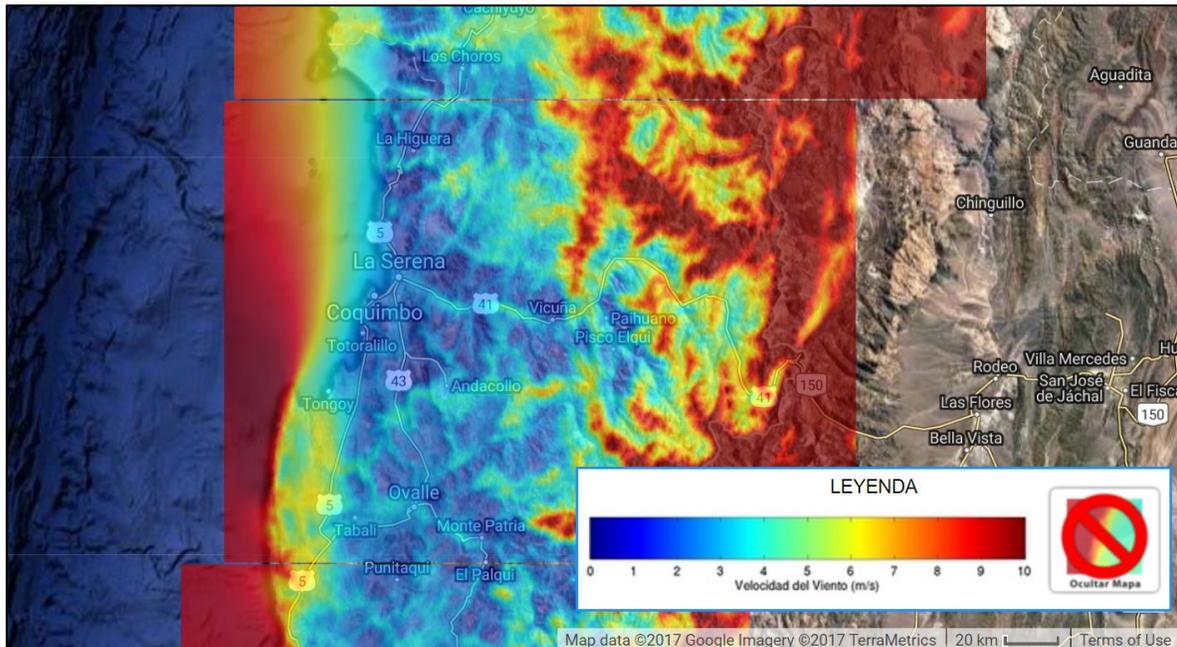
Fuente: VILLAGRÁN (2007).

### 3.5.3. Velocidad del viento

Con respecto a la variable vientos, en la zona interna de la ensenada, los valores no superan los 3m/s, velocidades menores a las necesarias para la contribución de transporte de material sedimentario. Las velocidades sobre 7 m/s se originan en la zona externa de la ensenada, asociada a profundidades mayores, que se acercan a los umbrales de movimiento aéreo del agente eólico, que sí potenciarían el movimiento de material sedimentario. <sup>34</sup>De igual manera, se ha realizado un trabajo de variabilidad estacional, con los datos provenientes del proyecto Explorador Eólico de la Universidad de Chile y el Ministerio de Energía.

<sup>34</sup> En referencia al año tipo promedio 2010. Se han realizado modelaciones estacionales dónde estos valores fluctúan dependiendo la estación.

**Figura 39** Vientos promedio anuales para la Mega ensenada de Coquimbo y la zona de la desembocadura del Limarí

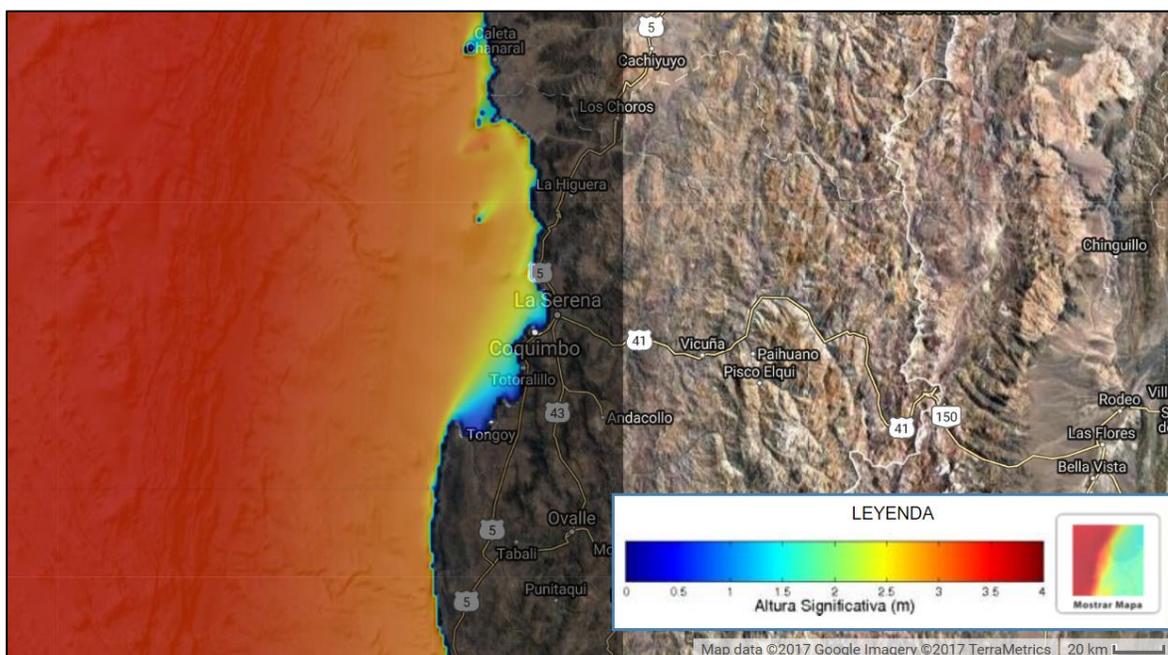


Fuente: Explorador eólico. <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>

### 3.5.4. Altura de la ola

Se han introducido como antecedentes los valores aportados por el proyecto de energía marina del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Éste proyecto proporciona la modelación promedio de alturas del oleaje para el año 2010. Pudiendo en esta investigación generar análisis temporales, asociados a la estacionalidad invierno, primavera, otoño e invierno.

Se observa en la zona interior de la ensenada, que los valores aumentan desde la costa, entre los 0 a 2 metros, mientras una vez que se aleja del sistema los valores superan los 2.5m, en especial en el sector de la desembocadura del Limarí.

**Figura 40** Altura significativa oleaje, promedio año 2010.

Fuente: Explorador de energía marina (<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Marino/>).

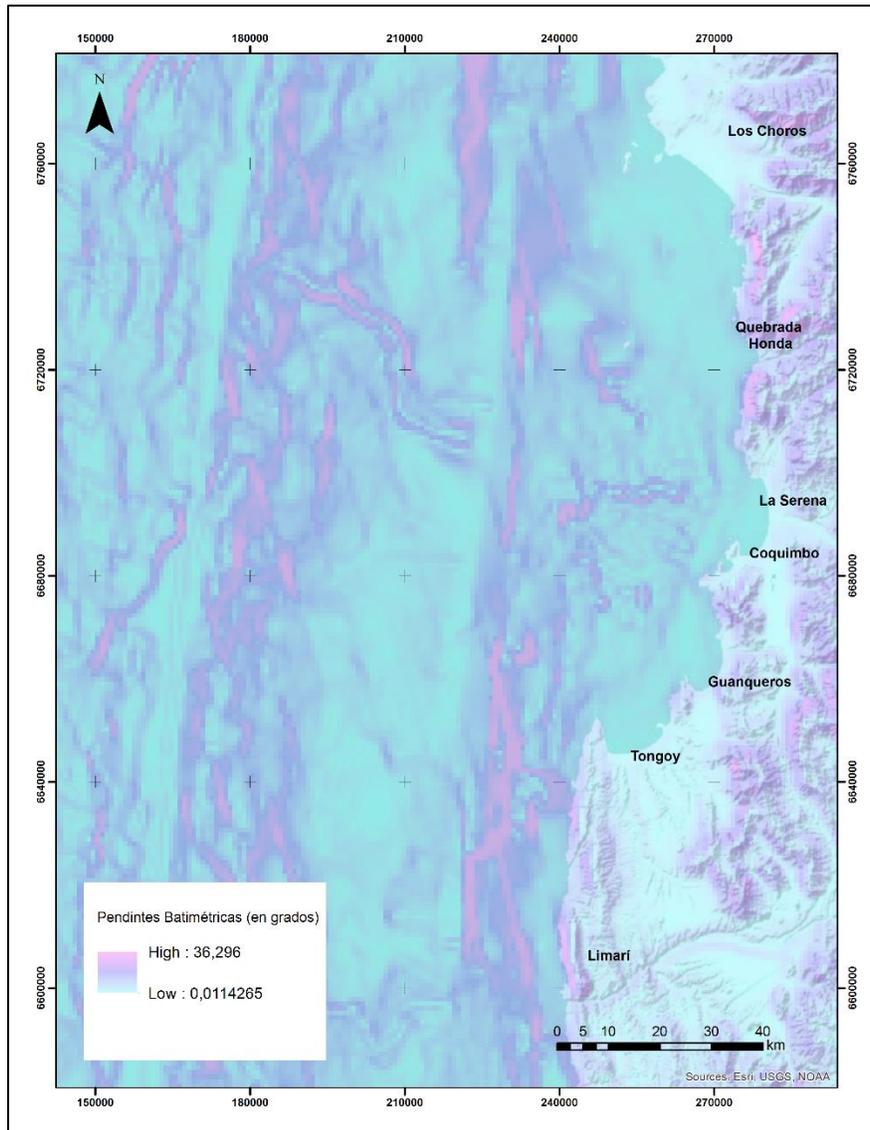
### 3.5.5. Pendientes batimétricas

Se ha obtenido las pendientes batimétricas del área entre Tongoy y Limarí, hasta la fosa oceánica. La disponibilidad de esta información permite reconocer formas submarinas cercanas a la costa del área, para así identificar la existencia de pendientes fuertes o de llanuras que puedan afectar y condicionar el movimiento, precipitación o decantamiento de material en la zona.

El área de análisis, presenta una mayor área con pendientes suaves, en especial en el sector de Los Choros, y las costas de las localidades analizadas. Para el caso del Limarí, se observan pendientes pronunciadas cercanas a la zona de desembocadura, que difiere de las zonas al norte de ésta.

Las pendientes que se muestran a continuación, se ha utilizado como *input* en el modelo matemático de LE ROUX *et al.*, (2010).

**Figura 41 Pendientes Mega Ensenada de Coquimbo**



Fuente: Elaboración propia en base a proyecto GEBCO2014.

### 3.5.6. WAVECALC

De los análisis, se han llevado a cabo de modalidades de estudio, directamente relacionadas a la disponibilidad de información para las áreas que componen la Mega Ensenada como el sector del Limarí.

El primer análisis se ha centrado en la zona de la mega ensenada de Coquimbo que generarían aporte sedimentario al campo dunar de Los Choros, sobre la base de la variación estacional del comportamiento de los vientos y las alturas que las olas evidenciadas a lo largo del año

modelo, para este caso 2010. Este análisis no incluye ni la zona de Los Choros ni del Limarí, por no disponer de la información a detalle.

La segunda instancia, es de carácter general para el área de estudio (incluye todas las localidades consideradas en la presente tesis) con promedio de vientos y alturas significativas para el año tipo 2010, siendo resultados promedios para el área, que representan un escenario sin variabilidad estacional.

En definitiva, con estos resultados se ha podido modelar el comportamiento sedimentario de la mega ensenada y del área del Limarí en desembocadura, obteniendo un panorama óptimo para la representación de resultados y análisis de éstos.

#### **3.5.6.1. Tipo de quiebre de ola**

WAVECAL entrega resultados sobre el comportamiento del oleaje, referente a tres tipos de quiebres de ola, todos ellos influenciados por la pendiente del área submarina, de accidentes en el fondo u otro antecedente que genere cambios verticales en el piso del área. Los resultados obtenidos para el área de la mega ensenada se exponen a continuación.

El rompimiento de las olas es estudiado por la dinámica de fluidos, una sub-disciplina de la física que estudia la ciencia detrás de líquidos y gases. Llegando a la conclusión de que las olas rompen cuando su amplitud alcanza un nivel crítico que causa que grandes cantidades de energía de las olas se transformen en energía cinética turbulenta, como rodado.

En otras palabras, cuando las olas llegan a aguas poco profundas - por lo general cerca de las costas - que aumentan en altura, y sus crestas cumplen la Ley de la Gravitación, y sus olas rompen. Así también, la topografía fonda del océano determina cómo la energía de onda se transforma generando diferentes tipos de quiebres de ola.

En vista de lo anterior, WAVECALC entrega antecedentes sobre la dominancia de procesos de hundimiento (*Pluning*), de derrame (*Spilling*) o de colapso (*Colapsing*).

Para el área se presentan dos tipologías de quiebre de ola, *pluning* y *spilling*, no identificándose variaciones estacionales en la modelación.

Principalmente, se observa que, dadas las características batimétricas, de cambio gradual, en general la mega ensenada presenta con olas asociadas al *spilling* o quiebre de derrame, siendo estas de baja intensidad, regulares en tiempo y distancia de cresta. El tipo de quiebre de ola, o se zona de rompiente, de *spilling* conlleva rompientes más suaves y permiten un mayor aporte de arenas a las playas.

Por otra parte, ya los sectores alejados de la costa, en especial cercanos al Limarí, presentan oleaje asociado al *pluning*, que posee un carácter erosivo, en especial en sectores con pendientes batimétricas abruptas, o cercanas a acantilados. El aporte al modelo sedimentario es referido al proceso erosivo que provocan.



### 3.5.6.2. Transporte de sedimentos

#### 3.5.6.2.1. Transporte hacia el mar

El modelo matemático indica que no existen procesos de transporte sedimentario desde la costa hacia el mar, para la malla de nuestro generada. Lo cual puede tener bases en dos aspectos: uno referente a las bases del modelo que determinan el resultado, y por otra parte la potencial transferencia de material sedimentario de forma local, en las pequeñas ensenadas que componen la mega ensenada de Coquimbo, no así entre ellas. Así también se puede realizar la lectura de que el transporte generalizado se realiza asociado a al depositación en costa, y no a la acreción de ésta. Lo cual indicaría que el material no proviene de la misma ensenada, sino que, de zonas cercanas, como se indica en la hipótesis, de la desembocadura del Limarí.

WAVEACL indica que la variable, <sup>35</sup>tiene dependencia de resultados con la velocidad máxima del límite de la cresta de la ola, así como del valor crítico de ésta, además de la pendiente del piso oceánico. En la misma, se fundan en datos de período de ola, velocidad del viento, la aceleración de gravedad y la profundidad batimétrica.

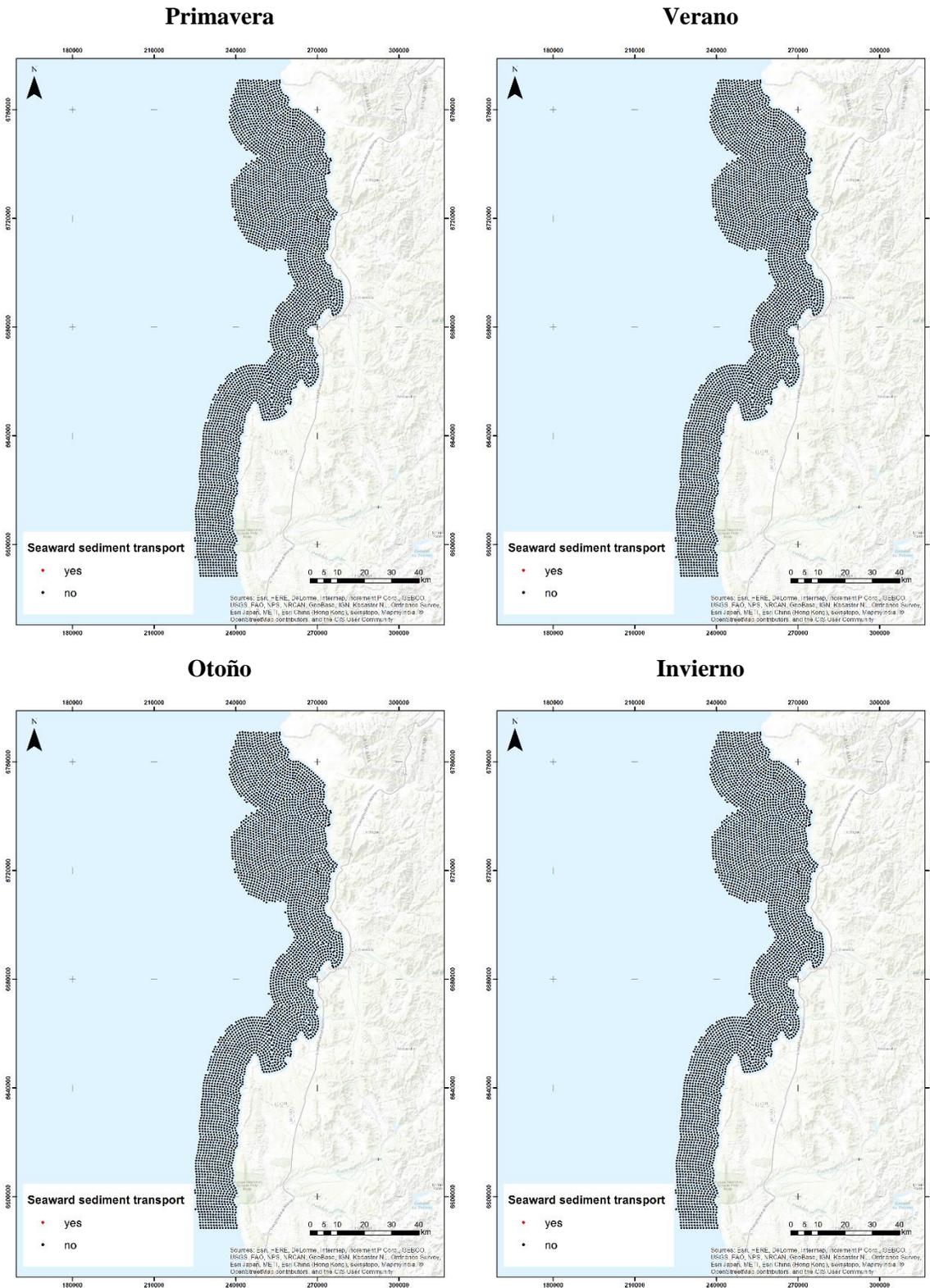
Dados lo *inputs* requeridos, se pueden indicar que, no se reconoce razón por cuál el resultado sea tal, dado que las variables antes mencionadas, se presentan de forma variable, y no como constante. Siendo solo respuesta a esto que sea necesario incluir datos sobre período de ola, aun cuando el modelo indica que puede aplicarse en modo default sin que conlleve problema al cálculo.

No se observan variaciones estacionales ni en localización para la mega ensenada, comportándose de la misma forma a través de ella. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las áreas aportantes estudiadas.

---

<sup>35</sup> =SI(D26>D24\*RAIZ(SENOC((31+C12)\*PI()/180)/SENO(31\*PI()/180));"Yes";"No")

Figura 43 Transporte sedimentario hacia el mar



Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.6.2.2. Transporte hacia la tierra

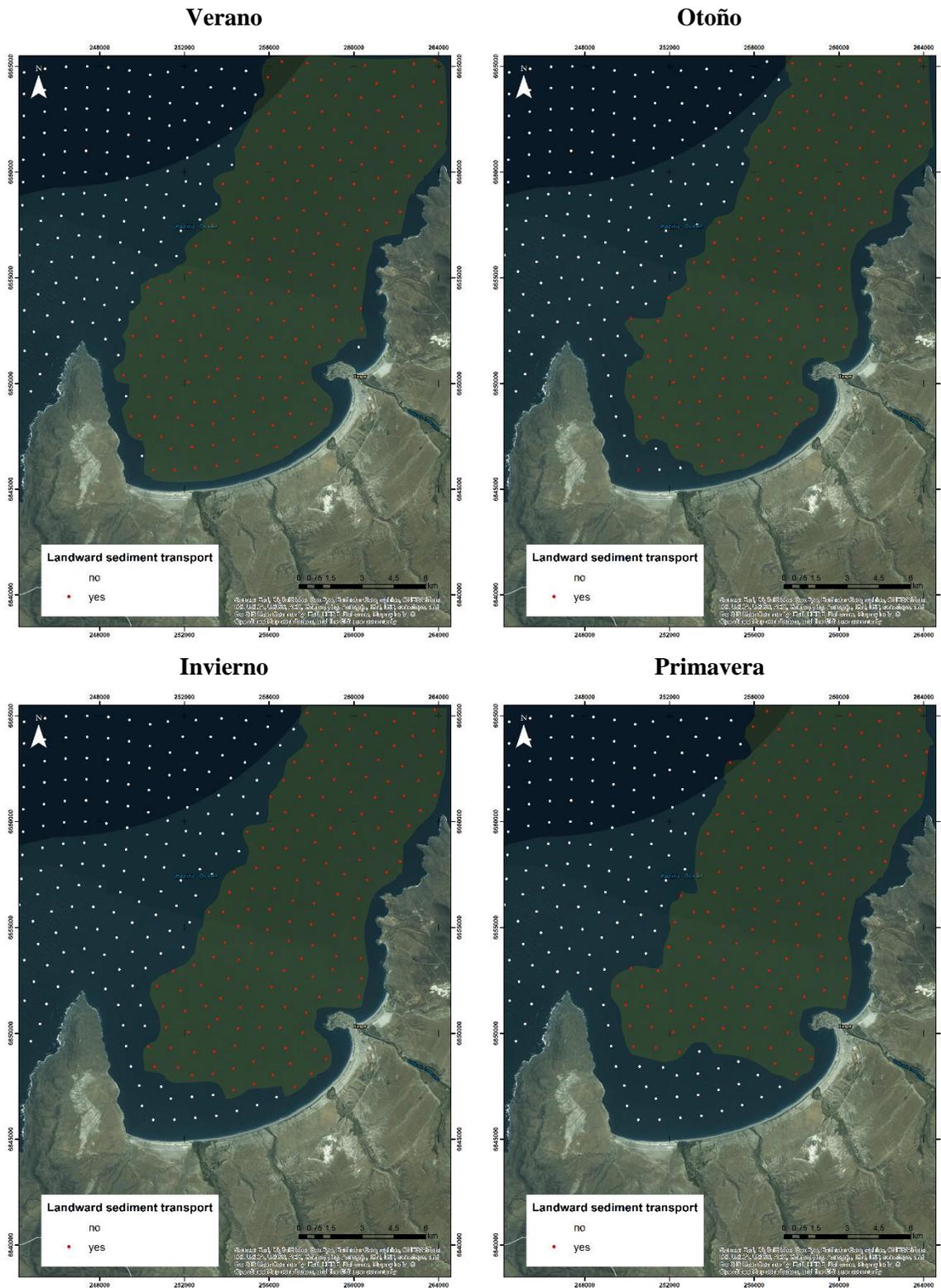
WAVECALC proporciona resultados que indican diferencias entre estaciones durante un año de estudio, para el caso año 2010 según fuentes utilizadas. Los resultados indican la presencia de transporte sedimentario hacia la tierra (yes en rojo), y de no aporte hacia la tierra (no en negro), que presenta un patrón similar a lo largo de la mega ensenada.

Para el caso de **Tongoy**, se observan diferencias en estaciones asociadas a mayor aporte hídrico de las quebradas costeras, y aquellas estaciones identificadas con mayor estabilidad. Es así como en verano y otoño, se observan procesos de transporte hacia tierra para toda la costa, potenciando así la depositación y generación de formas dunares para el área; caso diferente es mostrado en los meses de primavera e invierno, dónde la depositación se desplaza hacia el norte de la ensenada, teniendo consecuencia con lo planteado por la bibliografía asociada al tema, que indica que son las zonas distales las propensas a generar depositación de carácter dunar o sedimentario. La zona proximal de la ensenada en primavera e invierno presenta condiciones de transferencia que difieren, teniendo como resultado el no transporte hacia la tierra, generando posibilidad de que el área se presente neutra a estos procesos, cosa poco probable al tratar un sistema natural, o que sea el transporte en dirección contraria, entregando material sedimentario a la costa, que potencialmente puede ser transportado hacia el norte por la misma ensenada, por efecto de la deriva continental.

En **Guaqueros**, los resultados indican baja variación entre estaciones, mostrando áreas similares con el mismo comportamiento, sólo viéndose afectado por leves variaciones en el ancho del área de depositación hacia tierra. Es importante mencionar, que se presenta una barrera previa a la costa, donde el modelo indica que no existe transporte hacia tierra, lo cual puede tener explicación en que los procesos de transporte no interfieren en la composición interna de ésta ensenada, lo cual implicaría que la transferencia de sedimentos se presenta a partir de los 5.000m mar adentro y no al interior de la misma. También por otra parte, sea una condición prevista por el modelo de WAVECALC, que indica que no siempre se presentan transiciones perfectas desde aguas profundas a poco profundas, por lo cual para éste caso y los otros (La Serena, Coquimbo y Quebrada Honda), se daría este escenario.

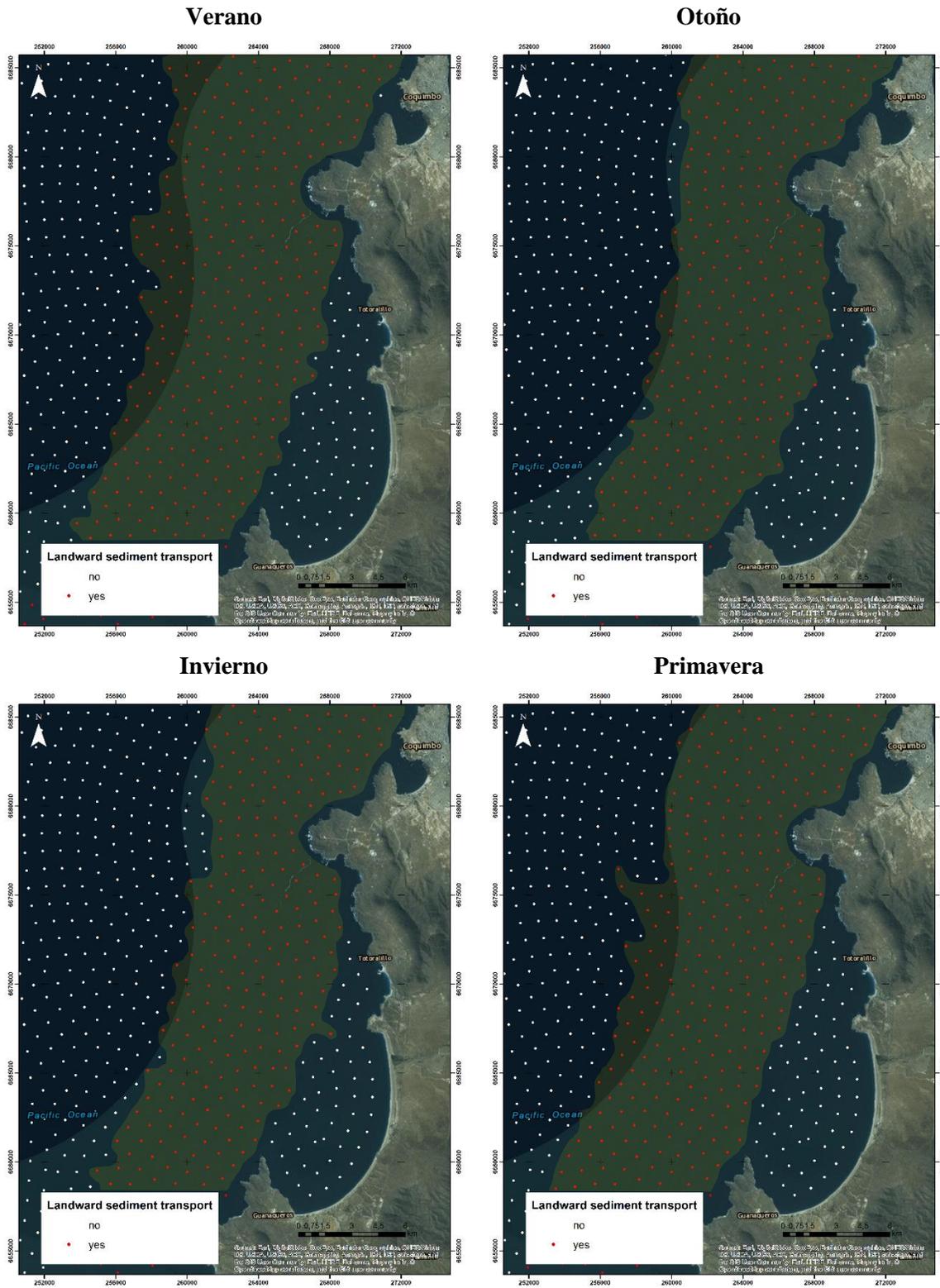
Para la **Serena y Coquimbo** se observa que, para primavera e invierno, el área de indica transporte hacia tierra se acerca a la línea de costa por la zona distal, lo cual contempla transferencia de sedimentos que aporta en la depositación en las formas dunares del área. Para el resto del área, media y proximal se indica que no existe transporte hacia la tierra, lo cual puede indicar que los procesos internos de la ensenada son los que provocan los cambios que se perciben en la misma, bajo los conceptos conocidos de procesos internos de ensenadas en zeta, o por otra parte, pase lo descrito con anterioridad, sobre las transiciones entre aguas profundas a poco profundas y la aplicación de WAVECALC.

Figura 44 Transporte hacia la tierra, Tongoy



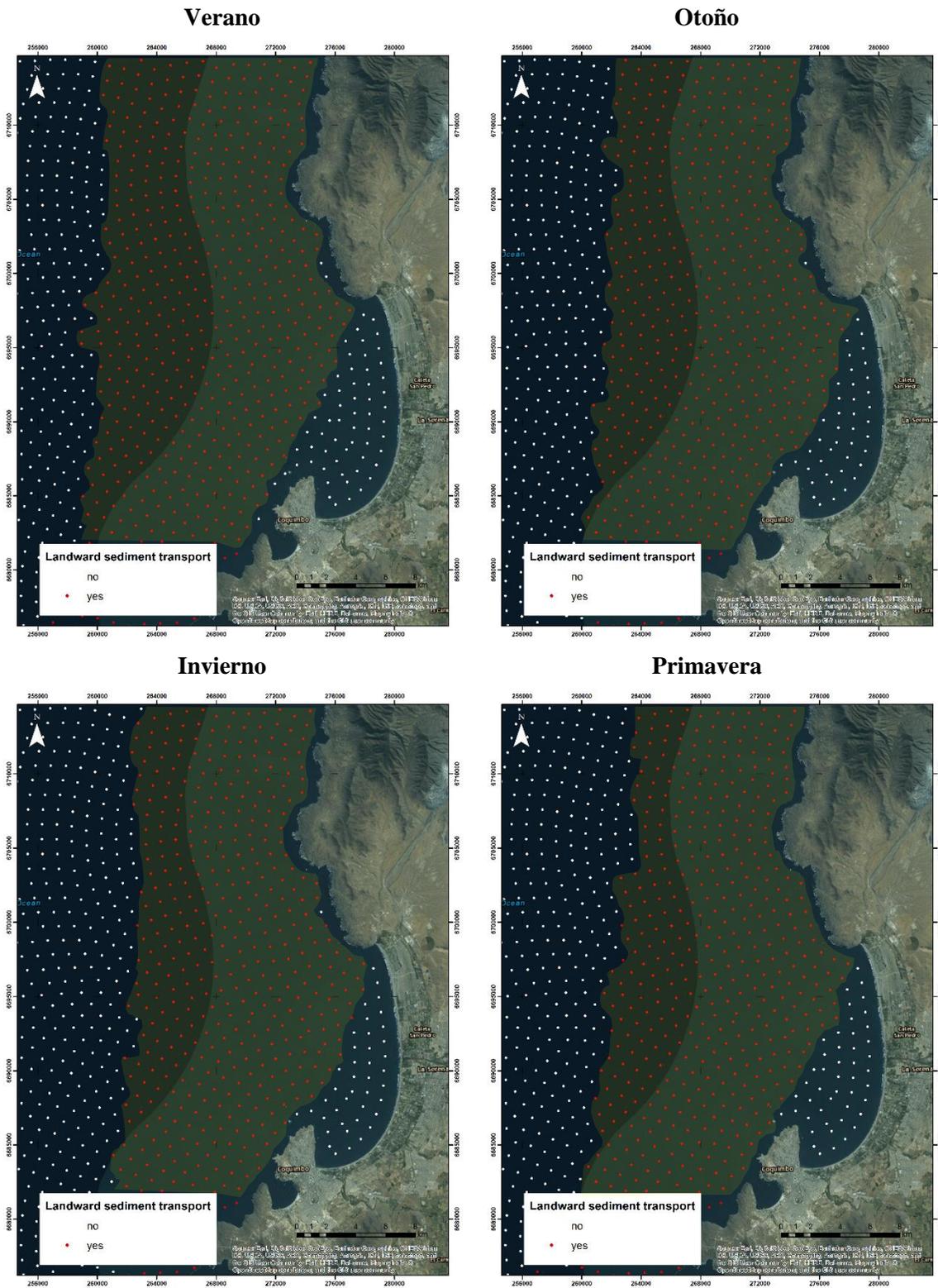
Fuente: Elaboración propia.

Figura 45 Transporte hacia la tierra, Guanqueros



Fuente: Elaboración propia.

Figura 46 Transporte hacia la tierra, La Serena.

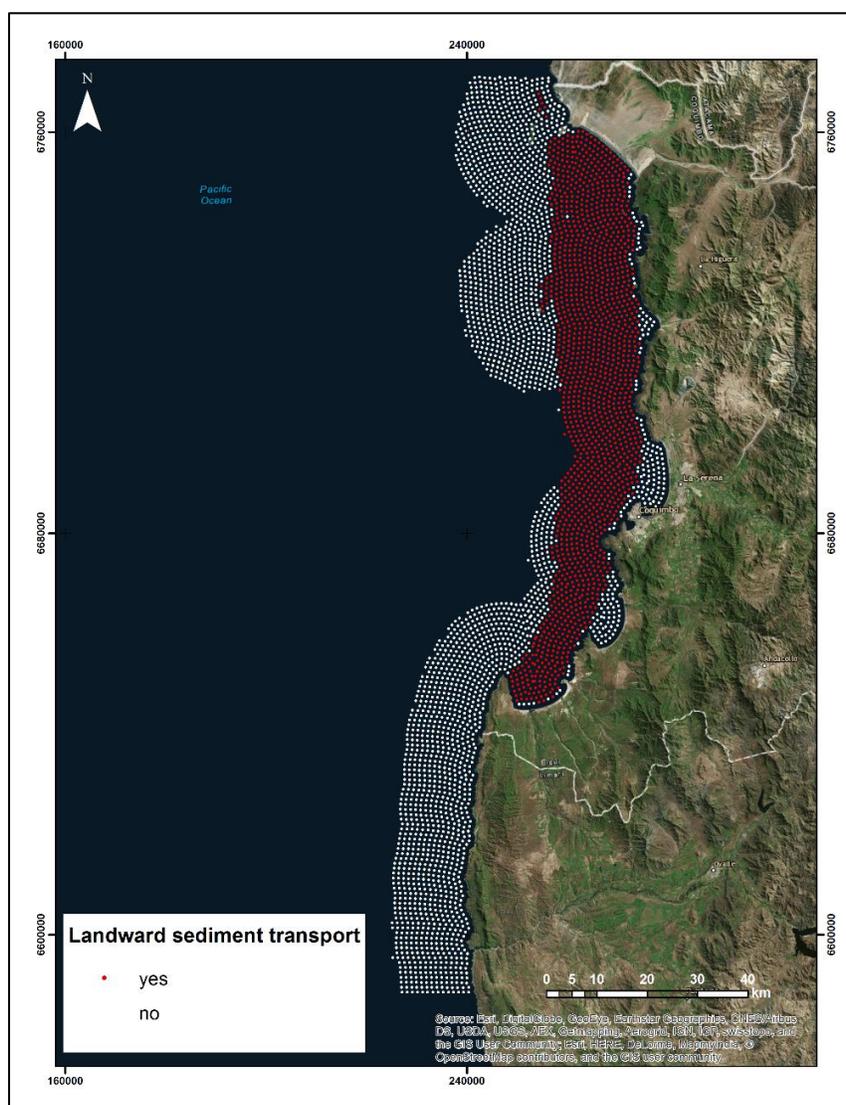


Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, sobre la base de los resultados promedio anuales, se identifica que existe transferencia sedimentaria en la mega ensenada, desde Tongoy hasta Los Choros, que, según el comportamiento de la deriva continental y los fenómenos asociados a la conformación de ensenadas, tendría tendencia de movimiento hacia el norte, con depositación en la zona distal de la misma.

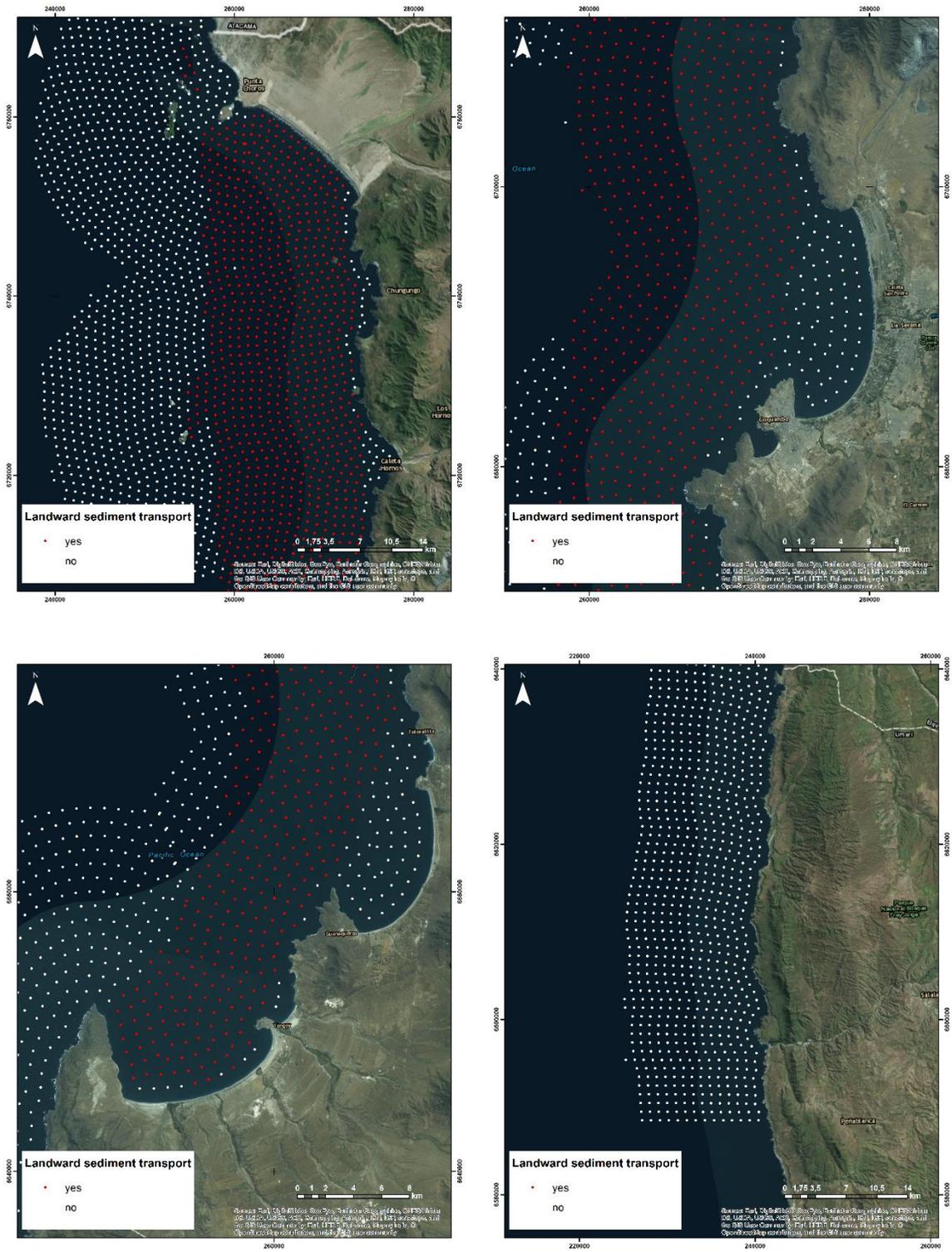
De forma contraria, se presenta el área del Limarí sin transporte hacia tierra, que se traduce en la no existencia de depósitos dunares asociados en la costa cercana a la desembocadura. Escenario que respalda la hipótesis de la potencial transferencia de ese material sedimentario hacia el norte por efecto de la deriva continental, siendo éste depositado a lo largo de la mega Ensenada, y siendo un actor relevante en el aporte a las dunas de Los Choros.

**Figura 47** Transporte hacia la tierra, General promedio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 48 Transporte hacia la tierra, localidades.



Fuente: Elaboración propia.

A medida que se observa a detalle cada zona de estudio, se identifica un patrón recurrente en las áreas de Guanaqueros, Coquimbo, La Serena y Quebrada Honda; la no existencia de transporte hacia tierra en área de directo contacto con el litoral, caos contrario a lo ocurrido en Los Choros, donde cada punto de muestreo tuvo resultados positivos, con respecto al aporte sedimentario.

Lo anterior, se puede analizar respecto a la morfología de cada pequeña ensenada, siendo más cerradas, de menor extensión, lo cual pudo tener afectación en los resultados dadas las batimetrías dispares entre ellas.

Otra razón, es la derivada de las observaciones hechas por LE ROUX *et al.*, (2010), referente a su modelo, donde indica que es posible que exista variación en los resultados dado que WAVECALC, no siempre presenta una transición perfecta desde aguas profundas a poco profundas, es por lo que se debe tener en consideración este aspecto al momento de analizar los resultados obtenidos.

## V. DISCUSIÓN

### 4.1. Conformación y funcionamiento de la Mega Ensenada de Coquimbo

La mega ensenada de Coquimbo, posee características identificadas por la literatura referidas a las ensenadas, bahías en forma de zeta griega o de espiral logarítmico (ARAYA-VERGARA (1983) y YASSO (1965)). La característica primordial, es la complejidad que presenta en su estructura y funcionamiento, asociadas a conjunto de ensenadas, más o menos contiguas, que la conforman como un sistema natural complejo y que aún no ha sido profundamente estudiado.

Se identifican entre sus rasgos, el efecto ensenada provocado por el promontorio rocoso (*headland*), que se ubica entre la desembocadura del Limarí y el Sector de Puerto Aldea y Tongoy, generando la denominada zona proximal o sur, en La Serena la zona media, y en el sector de Los Choros y el Cordón de Sarco, el área distal o norte de la ensenada.

Aun cuando la mega estructura denota las fracciones que la literatura reconoce como propias de una ensenada, éstas se comportan de forma diferente, dada la variación de la refracción del oleaje provocado por los promontorios interiores de las meso ensenadas de Guanaqueros, Coquimbo y La Serena. Tales *headland* o salientes (promontorios), generados por las ensenadas de menor superficie (micro ensenadas en el litoral del Cordón de Sarco), se traducen en diferencias en la tipología de las zonas de rompientes, y por lo tanto en las playas y depósitos dunares asociados (LAGOS (2013), AMAYA (2013), SÁNCHEZ (2014), ARRIAGADA *et al.*, (2014), BENAVENTE (2015), CABELLO (2015), ROJAS (2016), y SOTO (2016)).

Las diferencias o similitudes de funcionamiento de las zonas distales, medias y proximales, ejemplificadas en la literatura nacional se ven representadas en las siguientes observaciones:

- a. En la zona proximal se evidencia como el oleaje posee menos energía, lo que se traduce que en el sector de Tongoy no se observen depósitos dunares de consideración, fuera de las playas arenosas existentes. Caso contrario es lo acontecido en Guanaqueros, donde el comportamiento de la meso ensenada posee una conducta interna diferente, que denota las características tipo de las ensenadas a escala nacional. Lo anterior, corroboraría el planteamiento de que la Mega ensenada de Coquimbo, no se comporta como ensenadas en dominios morfoclimáticos al centro-sur de la costa chilena.
- b. Referente a la zona media de la ensenada, esta se presenta con una estructura morfogenética accidentada por numerosos promontorios (sobre 10), que generan meso y micro ensenadas, con poco desarrollo de dunas a su interior, con la excepción del sector de La Serena, donde el campo dunar el norte de la misma, posee un desarrollo asociado al continuum dunar mencionado por ARAYA-VERGARA (1987). Dunas que en la actualidad se encuentran

impactadas y modificadas por el accionar humano, en especial en la zona distal de meso ensenada de La Serena. La fuerza del oleaje genera menor cantidad de depósitos dunares asociadas a arenas, de forma contraria a la alta presencia de dunas de gravas, desde La Serena a Los Choros, en la zona denominada Cordón de Sarco (CABELLO, 2016).

- c. Finalmente, la no existencia de un depósito dunar ancho continuo y recto en referencia al litoral en la zona distal, referido como de potencial forma para una ensenada, se tiene en cambio un sistema dunar que no cubre más que el 10% de la línea de costa de la mega ensenada (sector de Los Choros). El sector adjunto al campo dunar de Los Choros (al sur), se caracteriza por la presencia de más de 10 micro ensenadas, que con diferencias en el ataque el oleaje, distancias, superficie, y presencia de playas arenosas o de gravas, generan una estructura que difiere de las vistas en ensenadas a lo largo de la costa chilena, donde la zona distal es la contenedora del material sedimentario, que para el caso sólo se traduce en el sector de Los Choros. Aun así, las características del depósito de Los Choros, reúne características acordes a un campo dunar antiguo, y a la vez con actividad actual, donde la masa dunar no se concibe sin el abastecimiento de zonas distantes a la Quebrada Los Choros adjunta, lo cual se alinearía a la constitución indicada por exponentes en el territorio nacional (ARAYA- VERGARA (1983; 1996; 2003), MARTÍNEZ, 2001; MARTÍNEZ *et al.*, 2011 SOTO, 2005; SOTO & ARRIAGADA, 2007; ARRIAGADA, 2010; ARRIAGADA *et al.*, 2014).

#### 4.2. Depósitos dunares

Se han observado variaciones en continuum de las dunas adscritas a la Mega ensenada, en especial a las situadas en Los Choros, no así en las áreas intermedias, donde la afectación humana (La Serena), han frenado el desarrollo de las mismas, o en zonas proximales, no pudiendo evidenciar cambios en las mismas (BENAVENTE, 2015; ROJAS, 2016).

Las dunas de los Choros poseen la característica de evidenciar la presencia de dunas estabilizadas con actuales procesos de generación de las mismas (con tres frentes activos, con dos lenguas transgresivas, además de dunas anteriores, dunas embrionarias, barjanas, barjanoides, transversales y longitudinales conllevan una condición de abastecimiento de arenas en el litoral como en la playa). Junto a esto, el hecho de que la ensenada mantenga su estado disipativo todo el año ((alta energía en el oleaje), acentúa los procesos de erosión, los cuales ponen en movimiento los sedimentos, que acompañados por los vientos predominantes y la deriva litoral entregan las condiciones para la sedimentación (ROJAS, 2016).

La dualidad en el comportamiento que posee el campo dunar de Los Choros, indica como recomendación su protección, ya ROJAS (2016) lo ha comentado, debido a la fragilidad del

sistema, dado que se observaron procesos de transmutación, degradación de las formas y estabilización de éstas; siendo relacionado con las variaciones en los suministros sedimentarios, la velocidad e intensidad de los vientos predominantes, la acción antrópica (zona distal). Así, también se han identificado como unidades dunares altamente activas, resultando en una alta sensibilidad ante cualquier afectación o intervención. Lo anterior concuerda con los planteamientos sobre fragilidad y protección de sistemas dunares en nuestro país de CASTRO (1992, 1984) y CASTRO *et al.*, (2001).

#### **4.3. Mineralogía, proveniencia y modelación de las condiciones de transporte de sedimentos**

El ambiente costero asociado a la Mega ensenada de Coquimbo, se ha generado bajo condiciones geodinámicas de pendiente de fondo, vientos, oleaje y corrientes, que generan procesos de transporte, erosión y depositación de material sedimentario. Éste se encuentra distribuido en mayor o menor cantidad a lo largo de las más de 10 meso y micro ensenadas constituyente de la mega estructura. Se observa como el proceso de transporte se genera a través de toda ella, con incidencia en el transporte por deriva SW (SOTO, 2005).

Las fuerzas de arrastre de sedimentos identificadas para el área, se relacionan con las generadas por quebradas y cuencas aportantes presentes en el área (Cuencas del Limarí, Elqui, Los Choros, entre las de mayor dimensión), donde el arrastre por suspensión de material fino y grueso, es demostrado por la presencia de minerales con similaridad en las muestras sedimentológicas captadas en terreno y posteriormente analizadas en laboratorio.

La intensidad de las fuerzas de arrastre se ve directamente afectada por la presencia semi-permanente de agua, en los cauces, embalses y quebradas asociadas a las cuencas aportantes. Dada la ubicación de la mega estructura, es una zona de carácter semiárido, la carga sedimentaria es variable en estación, y afecta a episodios de sequía, eventos pluviométricos como ENOS (El Niño), o a la afectación humana por parte de sus actividades y la intensificación del uso de suelo al interior de las unidades antes mencionadas.

Los depósitos dunarios analizados, se caracterizaron por constituirse por arenas y gravas de mayor tamaño, que en ocasiones evidenciaban playas de gravas, sin presencia de arenas (zona media de La Serena, y meso y micro ensenadas del Cordón de Sarco), para el área de Los Choros, el material sedimentario era compuesto por gravas y arenas, que disminuían su tamaño desde la zona proximal a la distal.

Dada la constitución de la ensenada, sobre la base de un *headland* o promontorio rocoso (remanente de la erosión diferencial, controlada por la estructura y la tectónica), que distribuye la energía de la onda que se intercepta en él, movilizándola deriva abajo, desde la zona proximal a la distal, (MARTÍNEZ, 2001; SOTO *et al.*, (2005); MARTÍNEZ *et al.*, 2011), se identifica un nivel de transferencia sedimentaria al interior de las meso y micro ensenadas estudiadas; adjuntando a lo anterior la asociación de entrega de material entre bahías continuas o cercanas no pertenecientes a una misma mega estructura, para el caso la cuenca del Limarí.

Según los resultados obtenidos se han podido evidenciar valores de correlación y similaridad positivos entre las muestras de Los Choros, la Mega ensenada y la cuenca del Limarí, aun cuando los resultados no son totalmente resolutivos, dado que en algunas muestras no se obtuvo correlación o similaridad positiva. Lo anterior, sumado a lo evidenciado por OCAMPO (2015), donde las correlaciones entre las muestras en costa y las de la Quebrada de Los Choros, obtuvieron resultados negativos, se puede indicar que el aporte de estos sistemas menores (quebradas) es marginal e inexistente, que concluiría en afirmar la necesaria presencia de aportes sedimentarios de diferente procedencia.

La modelación realizada al sector desde el Limarí a Los Choros, se vio directamente condicionada a la velocidad de los vientos presentes, no así con la latitud o batimetría asociada. También fue necesario utilizar otra plataforma de trabajo (MATLAB) para manipular la gran cantidad de puntos de muestreo a lo largo de la costa. Contradiendo la facilidad de uso que LE ROUX *et al.*, (2010) indica para la planilla Excel.

## VI. CONCLUSIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos en la presente investigación, se puede indicar que el litoral asociado a la mega ensenada de Coquimbo, se constituye como una estructura compleja de analizar, teniendo aristas aún no estudiadas, como la multi-refracción del oleaje provocado por los más de diez promontorios rocosos presente en su interior y la no concordancia teórica, en su totalidad, con el comportamiento de las ensenadas estudiadas a nivel nacional, principalmente por la presencia de campos dunares de dimensiones considerables en Guanaqueros y La Serena, que a su vez funcionaban y dividía como un sistema de ensenada por sí solas, situando a la Mega estructura en un escenario multisistémico y que generaría efectos geomorfológicos y de carga sedimentaria no reconocidos en la actualidad.

Se afirma que la mega estructura está en constante proceso dinámico, resultado no solo por su condición de ensenada, sino que por las características antes mencionadas. Además, ha experimentado cambios geomorfológicos propios de su localización geográfica y la variación en la carga sedimentaria, que transita en ella y su ubicación en un ambiente semiárido.

Mediante el análisis de similaridad y correlación, acompañada de los resultados de WAVECALC, se han comprobado que las cuencas de los ríos Elqui y Limarí, en conjuntos a los sectores de Tongoy y Guanaqueros, son responsables del material sedimentario que constituye las playas arenosas y campos dunares al norte del sistema de la Mega Ensenada.

La Quebrada de Los Choros, por otra parte, queda limitada a ser un aporte marginal al sistema dunar y de playa arenosa en costa.

Existen evidencias morfológicas actuales de transferencia de sedimentos a las playas arenosas en toda la mega ensenada, observándose también la coexistencia de depósitos dunares antiguos y actuales con procesos activos, que permite aseverar la condición de transferencia de masa desde ambas cuencas hacia el campo dunar de Los Choros.

Finalmente, es necesario aclarar que es necesario ampliar el análisis mineralógico (número de muestras) y de comportamiento del transporte de sedimentos (WAVECALC, en sus módulos de a) condiciones de aguas profundas y b) condiciones de las olas de agua de transición y poco profundas, y c) zonas de rompientes), a análisis por cuenca aportante, reflejando cada subsistema de potencial afectación en la carga sedimentaria.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO M.S. 2011. Dinâmica Sedimentar Na Zona De Rebentação. Mestrado Em Geologia Do Ambiente, Riscos Geológicos E Ordenamento Do Território. Universidade De Lisboa. Faculdade De Ciências. Departamento De Geologia
- ARAYA-VERGARA, J. F. Análisis de la Localización de los procesos y formas predominantes de la línea litoral de Chile. Observación Preliminar. Revista Informaciones Geográficas, 1982, N° 29, p. 35-55.
- ARAYA-VERGARA, J. F. Cambios actuales de la línea litoral en Chile Central sur. Revista Geográfica de Chile Terra Australis, 1986, N° 29, p. 23-28.
- ARAYA-VERGARA, J. F. Génesis de la ensenada en zeta de Pichilemu, Chile Central. Revista Investigaciones Geográficas, 2003, N° 37, p. 41-65.
- ARAYA-VERGARA, J. F. Influencias morfogenéticas de los desalineamientos y líneas de costa contrapuestas en el litoral de Chile Central. Revista Informaciones Geográficas, 1983, N° 30, p. 3-23.
- ARAYA-VERGARA, J. F. Sistema de interacción oleaje-playa frente a los ergs de Chanco y Arauco, Chile. Gayana Oceanol, 1996, Vol. 4, N° 2, p.159-167.
- ARAYA-VERGARA, J. F. The evolution of modern coastal dune systems in central Chile. In: GARDINER, V. (ed.). International Geomorphology 1986. Proceedings of the First International Conference on Geomorphology Part II. Chichester: John Wiley & Sons, 1987, p. 1231-1244.
- ARAYA-VERGARA, J. F. Trend analysis of shoreline changes and coastal management in Central Chile (33 - 34.5° S). In: UNION GEOGRAPHIQUE INTERNATIONALE. Actes Escursion- Symposium N° 9: La Côte Atlantique. France: Commission sur l'Environnement Côtier, 1985, p. 99-110.
- Araya-Vergara, J.F. 1967 Morfometría de la curvatura de las playas entre Punta de Tralca y Punta Roro. (17): 5-30
- ARRIAGADA GONZÁLEZ J., CASTRO CORREA C.P., SOTO BAUERLE M.V. & RODOLFI G., Towards a classification of the delta systems in transitional semi-arid Chile between the rivers Copiapó and Aconcagua. (IT ISSN 0391-9838, 2010).
- ARRIAGADA GONZÁLEZ J., SOTO BAUERLE M.V. & SARRICOLEA P. 2014. Morphodynamic environment in a semiarid mouth river complex Choapa river, Chile. Advanced Geoscience Remote Sensing. Chapter 11, Prof. Maged Marghany (Ed), 2014.
- ARRIAGADA J. Geomorfología comparada en la zona semiárida de Chile: casos Copiapó y Choapa. Tesis de Magister. Universidad de Chile: 2009.
- ARRIAGADA, J. Geomorfología estuarial comparada en la zona semiárida de Chile. Casos de Copiapó y Choapa. Tesis para optar al grado de Magister en Geografía, mención recursos territoriales. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2009.

- BENAVENTE N. 2015. Relaciones dinámicas asociadas al litoral-playa-dunas anteriores del campo de duna de Los Choros, Región de Coquimbo. Memoria para optar al título de Geógrafa. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- BIRD, E. Coastal Morphology, An Introduction. Chichester: Wiley & Sons, 2000.
- BÖRGEL, R. (1963). *Las dunas litorales en Chile: teoría y aplicación*.
- CABELLO M. 2016. Análisis geomorfológico de la sección occidental del Cordón de Sarco: Identificación de terrazas marinas. Región de Coquimbo, Chile. Memoria para optar al título de Geógrafo. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- CASTRO C.P. Influencia del río Itata en el desarrollo de costas con playas arenosas en la parte sur de Chile central. Memoria para optar al título de Geógrafo. Universidad de Chile. 1987.
- CASTRO, C. (1985). Reseña del estado actual del conocimiento de las dunas litorales en Chile. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 28, 13-32.
- CASTRO, CONSUELO. Alteración antrópica sobre las dunas chilenas y su estado de conservación. *Bosque*, 1992, vol. 13, no 1, p. 53-58.
- CASTRO, CONSUELO. Alteración antrópica sobre las dunas chilenas y su estado de conservación. *Bosque (Valdivia)*, 1992, vol.13, no.1, p.53-58. ISSN 0717-9200.
- CREIXELL, C1.; ORTIZ, M1.; ARÉVALO, C2. 2012. Geología del área Carrizalillo-El Tofo, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica Nos. 133 y 134 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- DAVIDSON R. 2010. An introduction to coastal process and geomorphology. Cambridge University Press. UK.
- EMPARAN C. & PINEDA F. 2000. Geología del área de La Serena – La Higuera. Región de Coquimbo. Escala 1: 100.000. Servicio Nacional de Geología. Chile
- EMPARAN C. & PINEDA F. 2006. Geología del área de Andacollo – Puerto Aldea. Región de Coquimbo. Escala 1: 100.000. Servicio Nacional de Geología. Chile.
- EMPARAN C. & PINEDA, G. 2014. Geología del área de Ovalle - Peña Blanca. Región de Coquimbo. Escala 1: 100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. Chile.
- FEDERICI, P. & RODOLFI, G. Geomorphological features and evolution of the Ensenada de Atacames (Provincia de Esmeraldas, Ecuador). *Journal of Coastal Research*, 2004, vol. 20, N° 3, p. 700-708.
- FUENZALIDA, H. (1956). Campos de dunas en la costa de Chile Central. *XII e Congrès Intern. Geo. Río de Janeiro*, 234-240.
- GIMÉNEZ D. Caracterización de la estructura geomorfológica y dinámica costera de las ensenadas de la Ligua, Horcón y Quintay. Región de Valparaíso. 2012. Memoria para optar al grado de Geógrafo. Universidad de Chile.
- HESP, P. 2002. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology* 48. pp 245–268.

- HESP, P. 2013. Conceptual models of the evolution of transgressive dune field systems, *Geomorphology* . [http:// dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.014](http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.014)
- KLEIN, A. & DE MENEZES, J. Beach morphodynamics and profile sequence for a headland bay coast. *Journal of Coastal Research*, 2001, Vol. 17, N° 4, p. 812-835.
- KLEIN, A.; FILHO, L. & SCHUMACHER, H. Short-term beach rotation processes in distinct headland bay beach systems. *Journal of Coastal Research*, 2002, Vol. 18, N° 3, p. 442-458.
- LAGOS G. 2013. Caracterización geomorfológica y dinámica costera de bahías del semiárido de Chile. Casos de estudio: Bahía Tongoy y Bahías Barnes. Región de Coquimbo. Memoria para optar al título de Geógrafa. Santiago, Chile.
- LE BLON, P. An explanation of the logarithmic spiral plan shape of headland-bay beaches. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1979, Vol. 49, N° 4, p. 1.093-1.100.
- LE ROUX, J.P., VARGAS, G., 2005. Hydraulic behavior of tsunami backflows: insights from their modern and ancient deposits. *Environmental Geology* 49:65-75.
- LE ROUX, J.P.; DEMIRBILEK, Z.; BRODALKA, M.; FLEMMING, B.W. 2010. WAVECALC: an Excel- VBA spreadsheet to model the characteristics of fully developed wave and their influences on bottom sediment in different water depths. *Geo-mar Lett*, 30: 549-560.
- MARTÍNEZ C. 2001. El efecto de ensenada en los procesos litorales de las ensenadas de Valparaíso, Algarrobo y Cartagena, Chile Central. Tesis de Magíster, Universidad de Chile; 2001.
- MARTÍNEZ C., QUEZADA M. Y RUBIO P. 2011. Historical changes in the shoreline and littoral processes on a headland bay beach in central Chile. *Geomorphology* Volume 135: 80–96.
- MARTÍNEZ, C. El efecto de ensenada en los procesos litorales de las ensenadas de Valparaíso, Algarrobo y Cartagena, Chile Central. Tesis para optar al grado de Magíster en Geografía. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2001.
- MOSCOSO R., NASI C. Y SALINAS P. Carta Geológica N° C-55. Hoja Vallenar y parte norte de La Serena. Servicio Nacional de Geología y Minería. 1982.
- PASKOFF, R. 1970. Recherches geomorphologiques dans le Chili semi-aride. Vol 1. Bordeaux: Bordeaux Biscaye; 1970. PETTIJOHN, F. J., 1963. Rocas sedimentarias. Editorial Universitaria de Buenos Aires, Buenos Aires, 731 pp.
- PASKOFF, R., & MANRÍQUEZ, H. (2004). *Las dunas de las costas de Chile*. Instituto Geográfico Militar de Chile.
- PASKOFF, R., CUITIÑO, L., & MANRÍQUEZ, H. (2003). Origen de las arenas dunares de la región de Copiapó, Desierto de Atacama, Chile. *Revista geológica de Chile*, 30(2), 355-361.
- ROJAS ORMEÑO, I. (2016). Caracterización dinámica de las dunas activas en la Ensenada de Los Choros, IV región de Coquimbo. Memoria para optar al título de Geógrafa. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

- SHORT, A. Waves - dominated beaches. In: SHORT, A. (Ed.). Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. Chichester: John Wiley & Sons, 1999, p. 173-191.
- SOTO B., MARÍA V. ; LAGOS S., GERALDINE ; MÄRKER, MICHAEL ; SEPÚLVEDA V., SERGIO. Geodinámica actual de cuencas y bahías del semiárido chileno y su incidencia en la generación de amenazas de origen natural. Bahía de Tongoy, Coquimbo [artículos de congresos]. 2012. Publicado en: Congreso Geológico Chileno, 13, Antofagasta, Chile, 05-09 Agosto, pp.833-835.
- SOTO BÄUERLE, M. V., ARRIAGADA GONZÁLEZ, J., CASTRO CORREA, C. P., MÄRKER, M., & RODOLFI, G. (2010). Aspectos geodinámicos de un paleoestuario del desierto marginal de Chile: Río Copiapó. *Revista de geografía Norte Grande*, (46), 123-135.
- SOTO BÄUERLE, MARÍA VICTORIA, ARRIAGADA GONZÁLEZ, JOSELYN, CASTRO CORREA, CARMEN PAZ, MAERKER, MICHAEL, & RODOLFI, GIULIANO. (2011). Relación entre el cambio de uso del suelo en la cuenca del Aconcagua y su litoral arenoso correlativo: Chile central. *Revista de geografía Norte Grande*, (50), 187-202. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000300011>
- SOTO BAUERLE, MV. Aspectos geodinámicos de un paleoestuario del desierto marginal de Chile: Río Copiapó. *Rev. geogr. Norte Gd.* [online]. 2010, n.46 [citado 2017-01-31], pp.123-135. Disponible en: <[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-34022010000200007&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022010000200007&lng=es&nrm=iso)>. ISSN 0718-3402. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000200007>.
- SOTO M. V. & ARRIAGADA J. Características dinámicas de ensenadas estructurales de Chile central. Maitencillo – Cachagua y Papudo, Región de Valparaíso. *Revista de Geografía Norte Grande*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago. 2007.
- SOTO, M. V. & ARRIAGADA, J. Características dinámicas de ensenadas estructurales en Chile central. Maitencillo y Papudo, Región de Valparaíso. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2007, N° 38, p. 99-112.
- SOTO, M. V. Análisis de los cambios asociados al oleaje en una ensenada de la zona central de Chile. *Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas*, 2003, p. 135-144.
- SOTO, M. V. Aspectos morfodinámicos de ensenadas desalineadas del litoral de Chile central: Pichilemu y caleta Los Piures. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2005b, N° 33, p. 73-87.
- SOTO, M. V. Aspectos morfodinámicos de ensenadas desalineadas del litoral de Chile central: Pichilemu y caleta Los Piures. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2005 b, N° 33, p. 73-87.
- SOTO, M. V. Relaciones morfodinámicas y estructurales en ensenadas desalineadas del litoral de Chile central: Pichilemu y caleta Los Piures. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2005, N° 33, p. 73-78.

- SOTO, M. V., & ARRIAGADA, J. (2007). Características dinámicas de ensenadas estructurales de Chile central: Maitencillo-Cachagua y Papudo, Región de Valparaíso. *Revista de Geografía Norte Grande*, (38), 99-112.
- SOTO, MARÍA VICTORIA & ARRIAGADA, JOSELYN. Características dinámicas de ensenadas estructurales de Chile central: Maitencillo-Cachagua y Papudo, Región de Valparaíso. *Rev. geogr. Norte Gd.* [online]. 2007, n.38 [citado 2017-01-31], pp.99-112. Disponible en: <[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-34022007000200006&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022007000200006&lng=es&nrm=iso)>. ISSN 0718-3402. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022007000200006>.
- SOTO, MARÍA-VICTORIA, ARRIAGADA, JOSELYN, CASTRO-CORREA, CARMEN PAZ, IBARRA, IGNACIO, & RODOLFI, GIULIANO. (2015). Condiciones geodinámicas derivadas del terremoto y tsunami de 2010 en la costa de Chile central: El caso de Pichilemu. *Revista de geografía Norte Grande*, (60), 79-95. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022015000100005>
- SOTO, MV., ARRIAGADA J., BENAVENTE, N., ROJAS, I. CABERLLO, M. Dinámica y tendencia evolutiva de dunas en un sistema de Bahías en Chile Semiárido. Punta de Choros, Coquimbo. 2016. In press
- VILLAGRÁN, C. P. 2007. Dinámica costera en el sistema de bahías comprendidas entre ensenada Los Choros y Bahía Tongoy. Memoria para optar al título de Geógrafa. Universidad de Chile.
- WENTHWORT, C. K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geol.*, 30:377-392.
- YASSO, W. Plan geometry of headland-bay beaches. *Journal of Geology*, 1965, N° 73, p. 702-714.

## VIII. MATERIAL COMPLEMENTARIO

### 8.1. Anexos y apéndices

#### 8.1.1. INFORME: Análisis comparativo de estudios mineralógicos de sedimentos en la región de Coquimbo. Julio de 2015. Proyecto FONDECYT N° 1120234.



### INFORME:

## Análisis comparativo de estudios mineralógicos de sedimentos en la región de Coquimbo

Integrantes: Sebastián González Fuentes

Profesores: María Victoria Soto

Sergio Sepúlveda

Fecha: 31 de Julio 2015

## Tabla de contenido

1	Introducción .....	4
2	Objetivos .....	5
2.1	Objetivo General .....	5
2.2	Objetivos Específicos .....	5
3	Metodología .....	6
3.1	Origen de Muestras .....	6
3.2	Tratamiento de datos .....	6
3.2.1	Modelo de mezcla lineal .....	6
3.2.2	Diagnóstico de los parámetros para evaluar el modelo de mezcla lineal .....	7
4	Resultados .....	9
4.1	Tabla 1: Punto 14 Choros Bajos, $R^2$ y s. ....	9
4.2	Tabla 02: Punto 15 Choros Bajos, $R^2$ y s. ....	10
4.3	Tabla 03: Punto 19 Punta de Choros, $R^2$ y s. ....	11
4.4	Tabla 04: Punto 20 Punta de Choros, $R^2$ y s. ....	12
4.5	Tabla 05: Punto 21 Punta de Choros, $R^2$ y s. ....	13
5	Análisis de Resultados .....	14
5.1	Punto 14 y 15 Choros Bajos .....	14
5.1.1	Desembocadura río Limarí, muestras 1-2-3 playa moderna y 4-5-6 banco lateral fluvial 14	
5.1.2	Bahía Tongoy, muestras 7-8-9 playa moderna, 10-11-12 playa Holoceno y 13 dunas 15	
5.1.3	Bahía Barnes, muestras 14-15-16 playa 17-18 dunas .....	16
5.1.4	Río Hurtado, muestra 19 depósito aluvial .....	16
5.1.5	Río grande, muestra 20 depósito aluvial .....	17
5.1.6	Río Cogotí, muestra 21 depósito aluvial .....	17
5.1.7	Río Combarbalá, muestra 22 depósito aluvial .....	18
5.1.8	Desembocadura quebrada Los Choros, Punto 16 .....	18
5.2	Punto 19, 20 y 21 Punta de Choros .....	19
5.2.1	Desembocadura río Limarí, muestras 1-2-3 playa moderna y 4-5-6 banco lateral fluvial 19	
5.2.2	Bahía Tongoy, muestras 7-8-9 playa moderna, 10-11-12 playa Holoceno y 13 dunas 20	

5.2.3	Bahía Barnes, muestras 14-15-16 playa 17-18 dunas .....	20
5.2.4	Río Hurtado, muestra 19 depósito aluvial .....	20
5.2.5	Río grande, muestra 20 depósito aluvial .....	21
5.2.6	Río Cogotí, muestra 21 depósito aluvial .....	21
5.2.7	Río Combarbalá, muestra 22 depósito aluvial .....	22
5.2.8	Desembocadura quebrada Los Choros, Punto 16 .....	22
6	Conclusiones .....	23
7	Bibliografía y Referencias .....	24

## 1 Introducción

Se presenta en este informe un análisis comparativo entre datos de Punta de Choros y Choros bajos y datos de distintas zonas cercanas, al sur de las recién nombradas: la desembocadura del río Limarí, Bahía Barnes, Bahía Tongoy y los ríos Grande, Combarbalá y Hurtado. Este estudio se enmarca en el desarrollo del curso Proyecto II como apoyo a la Tesis de Doctorado de María Victoria Soto.

Los datos de Punta de Choros y Choros bajos representan a una unidad de planicies litorales, definida por Castro y Bringnardellos (2005), antecedidas por una unidad de costa arenosa, descrita por los mismos autores, la cual cubre una superficie de 15 km de longitud y cerca de 800 m de ancho, compuesta por un litoral arenoso y campos de dunas. Las arenas obtenidas en cada punto se aglutinaron en pegamento epoxy y se hicieron láminas delgadas, las que fueron analizadas bajo microscopía óptica. Todos estos datos son pertenecientes a la memoria de pregrado para optar al Título de Geóloga de Tania Ocampo (2015).

Los datos de la desembocadura del río Limarí, Bahía Barnes, Bahía Tongoy y los ríos Grande, Combarbalá y Hurtado serán los datos a comparar con los datos de Punta de Choros y Choros bajos. Estos datos, al igual que los de Punta de Choros y Choros Bajos, son arenas aglutinadas por pegamento epoxy formando láminas delgadas y analizadas bajo microscopía óptica. Se obtuvieron del estudio Proyecto II realizado por Paulina Arellano y Constanza Celis (2014).

Al igual que en el estudio de Tania Ocampo (2015) y para mantener la línea de investigación, el análisis comparativo entre los datos de estos trabajos se hará según el Método de Vezzoli (2007), el cual entrega como resultado una medida de similaridad y correlación entre las distintas muestras a analizar.

El objetivo de este análisis comparativo es descubrir si existe una relación entre las muestras de ambos trabajos, de modo que se pueda concluir si hay aporte sedimentario desde el sur hacia los campos de dunas y planicies litorales en la zona de Los Choros.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Determinar por medio de un análisis comparativo de distintos trabajos en la zona de estudio, si existe relación mineralógica entre muestras de arena de los campos de dunas de Punta de Choros y otras zonas al sur de la región.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Crear un archivo con datos mineralógicos de la región de Coquimbo obtenidos bajo microscopía óptica.
- Hacer un análisis comparativo entre las muestras de la zona de “Los Choros” y el resto de las muestras de la región, por medio del uso de la similaridad, para hacer las comparaciones, y el análisis ANOVA, para evaluar el ajuste de datos.
- Establecer la proveniencia, según los datos mineralógicos y estadísticos, de los campos de dunas de la zona de “Los Choros”

### 3 Metodología

#### 3.1 Origen de Muestras

Las muestras del trabajo de “Los Choros” y del proyecto de “Limari” fueron descritas porcentualmente según la composición de los sedimentos, aplicando conteos modales y técnicas de descripción petrográficas. La petrografía es una de las herramientas más utilizadas para estudios de proveniencia sedimentaria, la cual sirve como una primera aproximación para conocer la naturaleza de la fuente de sedimentos. Además, características texturales, como el hábito, esfericidad y grado de redondeamiento de cada especie mineral y fragmento lítico, pueden ser indicadores del tipo de roca fuente, la cercanía a la fuente y el tipo de transporte asociado al depósito.

Los estudios de proveniencia petrográficas se basan en análisis estadísticos, que entregan importante información sobre la fuente de sedimentos que constituyen un depósito (Dickinson, 1970). En estos, se determina la abundancia relativa de los fragmentos detríticos presentes en las muestras recolectadas, por medio de la identificación de categorías de granos, tanto cristales mono-minerales como fragmentos de roca poliminerálicos, abarcando toda el área de la lámina delgada, en intervalos fijos, el cual debería ser mayor o igual al clasto de mayor tamaño presente en el corte transparente, el cual se analiza bajo un microscopio óptico (Ingersoll *et al.*, 1984).

Las arenas son los sedimentos detríticos más utilizados en estudios de procedencia, ya que se originan como partículas sólidas que se desprenden de la roca, pero, a la vez, son lo suficientemente pequeñas como para observar una muestra considerable de granos en una sola lámina delgada. La ventaja de las partículas tamaño arena es que conservan la composición y textura original cuando están formadas por fragmentos líticos, a pesar del transporte y de los procesos diagenéticos estos están casi inalterados, además de que guardan información sobre la roca que derivaron. Las características texturales (tamaño y forma de grano, entre otras) permiten determinar la madurez del sedimento original (Ingersoll *et al.*, 1984).

#### 3.2 Tratamiento de datos

De modo que los distintos estudios sean comparables, se usará la misma metodología que la usada en el trabajo de “Los Choros” de Tania Ocampo (2015), la que se describe a continuación:

##### 3.2.1 Modelo de mezcla lineal

Los modelos lineales son fundamentales en el análisis de información con múltiples variables. Cuando se formula un modelo lineal, uno observa un fenómeno representado por un vector de información obtenida a partir de distintos análisis y la relaciona con un set de información de variables fijas linealmente independientes. La composición petrográfica de las arenas que constituyen el fondo de una quebrada puede ser expresada por una mezcla de un número fijo de miembros terminales (*end-members*), la cual puede

ser representada usando un análisis de regresión. Por definición, los análisis de regresión predicen una variable continua dependiente desde un número de variables independientes:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p)$$

El objetivo principal de los métodos de regresión es la descripción de cómo uno o más atributos que caracterizan cierta entidad en cierto set de datos dependen de un atributo de destino elegido. Esta dependencia funcional puede ser lineal o no lineal. Siendo  $y$  el vector fila que contiene la información porcentual de los  $p$  distintos fragmentos detríticos en sus  $p$  columnas,  $X$  una matriz que contiene la información composicional de los  $n$  miembros terminales (*end-members*) en sus filas y  $p$  columnas en las que se representa la composición porcentual de los mismos  $p$  fragmentos detríticos con los que se representa el vector  $y$ , además  $b$  un vector columna con  $n$  columnas que representan la contribución de cada uno de los miembros terminales a  $y$ . En una notación matricial, un modelo de regresión lineal puede ser expresada como:

$$y = bX + e$$

$$[y_1 \quad \dots \quad y_p] = \begin{bmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1p} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ \dots \\ e_n \end{bmatrix}$$

Donde  $e$  sería un vector columna con  $n$  filas, las que representan el error de la variable representada.

### 3.2.2 Diagnóstico de los parámetros para evaluar el modelo de mezcla lineal

El buen ajuste del modelo de regresión lineal es evaluado por medio de diferentes parámetros.

#### 3.2.2.1 Similaridad y distancia Camberra

Similaridad ( $s$ ) es un concepto fundamental y ampliamente usado. Las medidas de Similaridad son usadas para comparar objetos, y para decidir cuáles deberían ser agrupadas (objetos similares) y cuáles no. La forma más natural de análisis de Similaridad es calcular la distancia ( $d$ ) entre los dos objetos ( $v$  y  $t$ ) que están siendo comparados. En estadísticas, la distancia de Camberra es basada en la correlación entre variables, por la cual diferentes parámetros pueden ser identificados y analizados (Lance y Williams, 1966). Es una forma útil de determinar la Similaridad de un set de muestras desconocidas a una conocida.

$$d_{vt} = \sum_{j=1}^p \frac{|x_{vj} - x_{tj}|}{(x_{vj} + x_{tj})}$$

Como cada elemento de la suma esta entre 0 y 1, valor máximo de  $d_{vt}$  es igual a  $p$ , donde  $p$  es el número de variables. Dividiendo la distancia de Canberra por  $p$ , la similaridad de los objetos  $v$  y  $t$  es:

$$s_{vt} = 1 - \frac{d_{vt}}{p}$$

Donde valores cercanos a 1 representan objetos con un mejor ajuste al de un modelo de regresión lineal.

### 3.2.2.2 Análisis de Varianza (ANOVA)

El análisis ANOVA es una herramienta útil para evaluar buenos ajustes. Se calculan los siguientes parámetros:

- Suma residual de cuadrados (*RSS, residual sum of squares*)

$$RSS = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$$

- Suma de desviaciones de cuadrados (*MSS, model sum of squares*)

$$MSS = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$$

- Coeficiente de determinación

$$R^2 = \left(1 - \frac{RSS}{MSS}\right) 100$$

Donde valores de  $R^2$  cercanos a 100 indican un buen ajuste de variables.

## 4 Resultados

A continuación se muestran los datos obtenidos según la metodología antes señalada.

### 4.1 Tabla 1: Punto 14 Choros Bajos, $R^2$ y $s$ .

Con respecto al Punto 14 Choros Bajos	$R^2$	$s$
Punto 16	6,958	0,347
Muestra 1	33,852	0,498
Muestra 2	52,208	0,555
Muestra 3	38,267	0,549
Muestra 4	24,203	0,557
Muestra 5	26,781	0,551
Muestra 6	47,255	0,509
Muestra 7	37,788	0,504
Muestra 8	44,948	0,514
Muestra 9	46,408	0,517
Muestra 10	61,880	0,558
Muestra 11	46,650	0,575
Muestra 12	27,489	0,550
Muestra 13	66,395	0,615
Muestra 14	53,873	0,599
Muestra 15	69,873	0,603
Muestra 16	65,781	0,618
Muestra 17	70,104	0,631
Muestra 18	65,635	0,640
Muestra 19	52,457	0,574
Muestra 20	48,093	0,536
Muestra 21	34,206	0,573
Muestra 22	22,087	0,534

Tabla 01: Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) y similitud ( $s$ ) entre el Punto 14 de Choros Bajos y los datos del Punto 16, correspondiente a la desembocadura de la quebrada Los Choros, y las muestras de Cortes del 1 al 22 del Informe Limarí.

4.2 Tabla 02: Punto 15 Choros Bajos, R<sup>2</sup> y s.

Con respecto al Punto 15 Choros Bajos	R <sup>2</sup>	s
Punto 16	17,233	0,441
Muestra 1	50,468	0,600
Muestra 2	70,965	0,618
Muestra 3	54,300	0,609
Muestra 4	28,978	0,605
Muestra 5	33,195	0,603
Muestra 6	63,847	0,625
Muestra 7	50,086	0,600
Muestra 8	56,413	0,601
Muestra 9	58,356	0,600
Muestra 10	64,882	0,639
Muestra 11	55,697	0,620
Muestra 12	37,137	0,605
Muestra 13	75,189	0,680
Muestra 14	69,443	0,656
Muestra 15	75,352	0,645
Muestra 16	62,795	0,650
Muestra 17	70,999	0,662
Muestra 18	70,587	0,682
Muestra 19	65,461	0,629
Muestra 20	62,809	0,624
Muestra 21	40,323	0,609
Muestra 22	30,303	0,628

Tabla 02: Coeficiente de Determinación (R<sup>2</sup>) y similitud (s) entre el Punto 15 de Choros Bajos y los datos del Punto 16, correspondiente a la desembocadura de la quebrada Los Choros, y las muestras de Cortes del 1 al 22 del Informe Limarí.

4.3 Tabla 03: Punto 19 Punta de Choros, R<sup>2</sup> y s.

Con respecto al Punto 19 Punta de Choros	R <sup>2</sup>	s
Punto 16	1,998	0,300
Muestra 1	32,118	0,563
Muestra 2	38,618	0,566
Muestra 3	34,225	0,587
Muestra 4	10,022	0,557
Muestra 5	17,462	0,568
Muestra 6	36,460	0,522
Muestra 7	22,024	0,497
Muestra 8	25,027	0,507
Muestra 9	29,744	0,502
Muestra 10	51,005	0,555
Muestra 11	32,892	0,569
Muestra 12	36,002	0,551
Muestra 13	56,825	0,613
Muestra 14	47,038	0,522
Muestra 15	68,118	0,563
Muestra 16	69,204	0,589
Muestra 17	66,641	0,587
Muestra 18	60,340	0,585
Muestra 19	45,166	0,579
Muestra 20	58,375	0,554
Muestra 21	48,763	0,600
Muestra 22	37,825	0,592

Tabla 03: Coeficiente de Determinación (R<sup>2</sup>) y similaridad (s) entre el Punto 19 de Punta de Choros y los datos del Punto 16, correspondiente a la desembocadura de la quebrada Los Choros, y las muestras de Cortes del 1 al 22 del Informe Limarí.

4.4 Tabla 04: Punto 20 Punta de Choros,  $R^2$  y s.

Con respecto al Punto 20 Punta de Choros	$R^2$	s
Punto 16	-5,433	0,376
Muestra 1	21,718	0,527
Muestra 2	22,912	0,525
Muestra 3	16,479	0,547
Muestra 4	2,429	0,530
Muestra 5	7,740	0,541
Muestra 6	20,226	0,524
Muestra 7	11,026	0,491
Muestra 8	14,042	0,505
Muestra 9	18,183	0,500
Muestra 10	29,814	0,522
Muestra 11	21,323	0,544
Muestra 12	24,902	0,512
Muestra 13	34,174	0,567
Muestra 14	23,631	0,478
Muestra 15	40,681	0,524
Muestra 16	42,903	0,541
Muestra 17	40,830	0,542
Muestra 18	36,998	0,542
Muestra 19	22,523	0,543
Muestra 20	34,074	0,547
Muestra 21	28,103	0,569
Muestra 22	17,251	0,568

Tabla 04: Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) y similaridad (s) entre el Punto 20 de Punta de Choros y los datos del Punto 16, correspondiente a la desembocadura de la quebrada Los Choros, y las muestras de Cortes del 1 al 22 del Informe Limarí.

4.5 Tabla 05: Punto 21 Punta de Choros,  $R^2$  y  $s$ .

Con respecto al Punto 21 Punta de Choros	$R^2$	$s$
Punto 16	15,859	0,292
Muestra 1	25,065	0,477
Muestra 2	30,447	0,482
Muestra 3	26,830	0,504
Muestra 4	5,778	0,480
Muestra 5	7,042	0,480
Muestra 6	27,422	0,473
Muestra 7	14,096	0,448
Muestra 8	16,847	0,461
Muestra 9	21,076	0,455
Muestra 10	53,201	0,462
Muestra 11	26,182	0,496
Muestra 12	27,153	0,471
Muestra 13	52,763	0,524
Muestra 14	28,553	0,437
Muestra 15	64,843	0,477
Muestra 16	75,986	0,507
Muestra 17	67,450	0,501
Muestra 18	54,049	0,500
Muestra 19	27,109	0,496
Muestra 20	39,815	0,504
Muestra 21	31,799	0,519
Muestra 22	21,722	0,5133

Tabla 05: Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) y similaridad ( $s$ ) entre el Punto 21 de Punta de Choros y los datos del Punto 16, correspondiente a la desembocadura de la quebrada Los Choros, y las muestras de Cortes del 1 al 22 del Informe Limarí.

## 5 Análisis de Resultados

En este capítulo, según los resultados obtenidos en el capítulo 4 de este informe, se usaran los datos de coeficiente de determinación  $R^2$  y similitud  $s$  para determinar el aporte sedimentario desde las distintas zonas de cada muestra  $M_i$  a las zonas de Choros Bajos y Punta de Choros.

Los valores de  $R^2$  están comprendidos porcentualmente entre 0 y 100, donde 0 es correlación nula y 100 es muy buena correlación. Los valores de  $s$  están dentro del rango 0 a 1, donde 0 significa que no son similares y 1 corresponde a que son muy similares.

Se considerará una similitud baja, en relación a los valores calculados entre todas las muestras, si los valores de  $s$  se encuentran dentro del grupo ubicado a la izquierda de la zona comprendida entre la media y una desviación estándar, esto es, el grupo compuesto por el 16,4% de valores menores ( $s < \mu - \sigma$ , donde  $\mu$  corresponde a la media y  $\sigma$  a la desviación estándar), una similitud considerable, si los valores de  $s$  se encuentran alrededor de la media, con valores entre la media más y menos una desviación estándar ( $\mu - \sigma \leq s \leq \mu + \sigma$ ) y similar si los valores de  $s$  se encuentran ubicados a la derecha de la media más una desviación estándar, dentro del grupo compuesto por el 16,4% de mayores valores ( $\mu - \sigma < s$ ), según una distribución normal.

### 5.1 Punto 14 y 15 Choros Bajos

#### 5.1.1 Desembocadura río Limarí, muestras 1-2-3 playa moderna y 4-5-6 banco lateral fluvial

Para la zona de choros bajos, los valores de  $s$  para cada muestra son mayores con respecto al punto 15 que al 14, esto quiere decir que se asemejan más al punto 15, con valores promedio de 0,537 y 0,610 respectivamente. Con respecto al punto 14, las muestras con un mayor  $s$  son las muestra 2 con un  $s = 0,555$ , muestra 4 con un  $s = 0,557$  y la muestra 5 con un  $s = 0,551$ , de las cuales, la que tiene una mejor correlación de datos es la muestra 2, con un  $R^2 = 52,208\%$ , siendo la mayor de esta zona. Con respecto al punto 15, las muestras con mayor similitud son la muestra 2 con un  $s = 0,618$  y la muestra 6 con un  $s = 0,625$ , de las cuales, la que tiene mejor correlación de datos es la muestra 2, con un  $R^2 = 70,965\%$ .

En relación con las muestras de todas las zonas estudiadas con respecto al punto 14, los valores en promedio tanto para  $R^2$  como para  $s$ , en la zona de la desembocadura del Río Limarí, se encuentran en el grupo de menores valores para

estos parámetros, con valores promedio de  $R^2 = 37,094\%$  y  $s = 0,537$ , por tanto, se puede inferir que se obtuvo un resultado de  $s$  considerable, pero bajo la media, con una correlación muy baja.

En relación con las muestras de todas las zonas estudiadas con respecto al punto 15, los valores en promedio tanto para  $R^2$  como para  $s$ , en la zona de la desembocadura del Río Limarí, se encuentran en el grupo de menores valores para estos parámetros, con valores promedio de  $R^2 = 50,292\%$  y  $s = 0,610$ , por tanto, se puede inferir que se obtuvo un resultado de  $s$  considerable, pero bajo la media, con una correlación baja.

Esto se traduce en que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la desembocadura del río Limarí hacia la zona de Choros Bajos, pero estadísticamente, el aporte sedimentario sería menor que la mayor parte de las zonas estudiadas en este trabajo.

#### 5.1.2 Bahía Tongoy, muestras 7-8-9 playa moderna, 10-11-12 playa Holoceno y 13 dunas

Para la zona de Tongoy, los valores para  $s$  fueron mayores con respecto al punto 15 que al 14, lo que quiere decir que se asemejan en mayor medida al punto 15 que al 14, con valores promedio de  $s = 0,621$  y  $s = 0,548$  en esta zona, respectivamente. Con respecto al punto 14, el mayor valor de  $s$  se encuentran en la muestras 13, con un valor de  $s = 0,615$  y una correlación de  $R^2 = 66,395\%$ , la mayor para la zona. Con respecto al punto 15, los mayores valores de  $s$  se encuentran en las muestras 13 y 10, donde  $s_{13} = 0,680$  y  $s_{10} = 0,639$ . De estas, la muestra con mayor correlación corresponde a la de la muestra 13, con un  $R^2 = 75,189\%$ , siendo la mayor de esta zona y la segunda mayor de todas las muestras.

En relación con el total de las muestras de todas las zonas estudiadas, con respecto al punto 14, para la zona de Tongoy, los valores promedio fueron  $R^2 = 47,365\%$  y  $s = 0,548$ . Estos valores se encuentran en el grupo de valores intermedios para estos parámetros. Se obtuvo un valor de  $s$  considerable, bajo la media, con una baja correlación.

En relación con el total de las muestras de todas las zonas estudiadas, con respecto al punto 15, para la zona de Tongoy, los valores promedio fueron  $R^2 = 56,823\%$  y  $s = 0,621$ . Estos valores se encuentran en el grupo de valores intermedios para estos parámetros. Se obtuvo un valor de  $s$  considerable, levemente por sobre la media, con una correlación moderada.

Esto se traduce en que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de Tongoy hacia la zona de Choros Bajos y dentro del grupo de valores intermedios para la zona estudiada, con una correlación en promedio, moderada y con un punto en específico, la muestra 13, el cual tiene la segunda mayor similitud y la segunda mejor correlación de todas las muestras.

#### 5.1.3 Bahía Barnes, muestras 14-15-16 playa 17-18 dunas

Para la zona de Bahía Barnes, los valores de  $s$  fueron mayores con respecto al punto 15 que al 14, lo que quiere decir que se asemejan en mayor medida al punto 15 que al 14. Con respecto al punto 14, los mayores valores de  $s$  se encontraron en las muestras 17 y 18, con  $s_{17} = 0,631$  y  $s_{18} = 0,640$ , los valores de similitud más altos entre todas las muestras comparadas con respecto al punto 14. Además de ser los valores más altos de  $s$ , tienen una buena correlación,  $R^2_{17} = 70,104\%$  y  $R^2_{18} = 65,635\%$ . Con respecto al punto 15, los mayores valores de  $s$  se encuentran en las muestras 18 y 17,  $s_{18} = 0,682$  y  $s_{17} = 0,662$ . La muestra 18 es la que tiene el mayor valor de similitud de todas las muestras, con una buena correlación de  $R^2_{18} = 70,872\%$ .

En relación con el total de las muestras de todas las zonas estudiadas, con respecto al punto 14, para la zona de Bahía Barnes, los valores promedio de los parámetros fueron  $R^2 = 65,053\%$  y  $s = 0,618$ . Estos valores son los mayores de todas las zonas estudiadas.

En relación con el total de las muestras de todas las zonas estudiadas, con respecto al punto 15, para la zona de Bahía Barnes, los valores promedio de los parámetros fueron  $R^2 = 69,835\%$  y  $s = 0,659$ . Estos valores son los mayores de todas las zonas estudiadas.

De lo anteriormente señalado, se infiere que desde la zona de Bahía Barnes es muy probable que exista aporte sedimentario hacia la zona de Choros Bajos, y dentro de todas las zonas estudiadas, sería la que haría el principal aporte.

#### 5.1.4 Río Hurtado, muestra 19 depósito aluvial

Para la zona del depósito aluvial de Río Hurtado, existe sólo una muestra, con valores de  $R^2 = 52,457\%$  y  $s = 0,574$  con respecto al punto 14 y  $R^2 = 65,461\%$  y  $s = 0,629$  con respecto al punto 15. Una vez más, la similitud es mayor con respecto al punto 15 que al 14.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto 14, para la zona de Río Hurtado, esta zona sería la que tiene la segunda mayor similitud y segunda mayor correlación.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto 15, para la zona de Río Hurtado, esta zona sería la que tiene la segunda mayor similitud y segunda mayor correlación.

Se infiere que existe una alta posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de Río Hurtado hacia la zona de Choros Bajos, ya que los valores para los parámetros están en el grupo de los mayores valores, con una buena correlación. Se destaca que el hecho de que sólo exista un punto de muestreo, no permite generalizar a toda una zona como la segunda zona de mayor aporte sedimentario hacia la zona de los Choros, pero si incentiva a obtener más datos para verificar esta alta probabilidad de aporte sedimentario.

#### **5.1.5 Río grande, muestra 20 depósito aluvial**

Para la zona del depósito aluvial de Río Grande, existe sólo una muestra, con valores de  $R^2 = 48,093\%$  y  $s = 0,536$  con respecto al punto 14 y  $R^2 = 62,809\%$  y  $s = 0,624$  con respecto al punto 15. Una vez más, la similitud es mayor con respecto al punto 15 que al 14.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto 14, para la zona de Río Grande, esta zona sería la que tiene la segunda más baja similitud y baja correlación, ambos valores por debajo de la media para ambos parámetros.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto 15, para la zona de Río Grande, esta zona tendría un valor intermedio, por sobre la media, con una buena correlación de datos.

Se infiere que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de Río Grande hacia la zona de Choros Bajos, en mayor medida con respecto al punto 15 que al 14. Se destaca que el hecho de que sólo exista un punto de muestreo, no permite generalizar a toda una zona como la una zona de importante aporte sedimentario hacia la zona de los Choros, pero si incentiva a obtener más datos para verificar esta alta probabilidad de aporte sedimentario.

#### **5.1.6 Río Cogotí, muestra 21 depósito aluvial**

Para la zona del depósito aluvial de Río Cogotí, existe sólo una muestra, con valores de  $R^2 = 34,206\%$  y  $s = 0,573$  con respecto al punto 14 y  $R^2 = 40,323\%$  y  $s = 0,609$  con respecto al punto 15. Una vez más, la similitud es mayor con respecto al punto 15 que al 14.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto 14, para la zona de Río Cogotí, esta zona sería de los mayores valores para  $s$ , pero con muy baja correlación.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto 15, para la zona de Río Cogotí, esta zona tendría el segundo valor más bajo de  $s$  con una muy baja correlación.

Se infiere que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de Río Cogotí hacia la zona de Choros Bajos, pero que sería una de las zonas de menor aporte en comparación con todas las zonas estudiadas en este trabajo. Se destaca que el hecho de que sólo exista un punto de muestreo, no permite generalizar a toda una zona como la zona de más bajo aporte sedimentario hacia la zona de los Choros, es por esto que sería recomendable obtener más datos para verificar lo descrito.

#### 5.1.7 Río Combarbalá, muestra 22 depósito aluvial

Para la zona del depósito aluvial de Río Combarbalá, existe sólo una muestra, con valores de  $R^2 = 22,087\%$  y  $s = 0,534$  con respecto al punto 14 y  $R^2 = 30,303\%$  y  $s = 0,628$  con respecto al punto 15. Una vez más, la similitud es mayor con respecto al punto 15 que al 14.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto 14, para la zona de Río Combarbalá, esta zona tendría una baja similitud, por debajo de la media, con una correlación muy baja.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto 15, para la zona de Río Combarbalá, esta zona tendría un alto valor de similitud, por sobre la media, pero con una muy baja correlación.

Se infiere que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de Río Combarbalá hacia la zona de Choros Bajos, pero que sería una de las zonas de menor aporte en comparación con todas las zonas estudiadas en este trabajo. Se destaca que el hecho de que sólo exista un punto de muestreo, no permite generalizar a toda una zona como la zona de más bajo aporte sedimentario hacia la zona de los Choros, es por esto que sería recomendable obtener más datos para verificar lo descrito.

#### 5.1.8 Desembocadura quebrada Los Choros, Punto 16

El punto 16 corresponde a la desembocadura de la quebrada Los Choros. Los valores de los parámetros estudiados son  $R^2 = 6,958\%$  y  $s = 0,347$  con respecto al

punto 14 y  $R^2 = 17,233\%$  y  $s = 0,441$  con respecto al punto 15. La similitud es mayor con respecto al punto 15 que al 14.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto 14, para la zona de la desembocadura de la quebrada Los Choros, esta zona tendría la más baja similitud, con la peor correlación de todas las zonas estudiadas.

En relación con el total de las muestras, con respecto al punto 15, para la zona de la desembocadura de la quebrada Los Choros, esta zona tendría la más baja similitud, con la peor correlación de todas las zonas estudiadas.

Se infiere que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de la desembocadura de la quebrada Los Choros hacia la zona de Choros Bajos, pero que sería la zona de menor aporte en comparación con todas las zonas estudiadas en este trabajo.

## 5.2 Punto 19, 20 y 21 Punta de Choros

### 5.2.1 Desembocadura río Limarí, muestras 1-2-3 playa moderna y 4-5-6 banco lateral fluvial

Para la zona de Punta de Choros, los valores de  $s$  para cada muestra de la desembocadura del río Limarí son mayores con respecto al punto 19 que al 20 o 21, lo que quiere decir que las muestras de la desembocadura del río Limarí se asemejan más al punto 19 que al 20 o 21, con un valor promedio de  $s = 0,561$ . Las muestras de mayores valores de  $s$  se encuentran con respecto al punto 19, con  $s = 0,587$  y  $s = 0,566$ , con  $R^2 = 34,225\%$  y  $R^2 = 38,618\%$ , respectivamente, siendo estas además las correlaciones más altas.

En relación con las muestras de todas las zonas estudiadas, las muestras de la desembocadura del río Limarí se encuentran en el grupo de los menores valores de  $s$ , donde los valores son mayores con respecto al punto 19, luego al 20 y en menor similitud al 21, al igual que los valores de  $R^2$ .

De esto se infiere que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la desembocadura del río Limarí hacia la zona de Punta de Choros, pero estadísticamente, el aporte sedimentario sería de los menores entre las zonas estudiadas en este trabajo.

### 5.2.2 Bahía Tongoy, muestras 7-8-9 playa moderna, 10-11-12 playa Holoceno y 13 dunas

Para la zona de Punta de Choros, los valores de  $s$  para cada muestra de la bahía Tongoy son mayores con respecto al punto 19 que al 20 o 21, lo que quiere decir que las muestras de la bahía Tongoy se asemejan en mayor medida al punto 19 que al 20 o 21, con un valor promedio de  $s = 0,542$ . Con respecto al punto 19, se encuentra la muestra de mayor valor de  $s$  de todas las zonas, con respecto a los puntos 19, 20 y 21, con un valor de  $s = 0,613$  y correlación  $R^2 = 56,825\%$ .

En relación con las muestras de todas las zonas estudiadas, las muestras de la bahía Tongoy se encuentran en el grupo de los menores valores de  $s$ , donde los valores son mayores con respecto al grupo 19, luego al 20 y en menor similitud al 21, al igual que los valores de  $R^2$ .

De esto se infiere que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la bahía Tongoy hacia la zona de Punta de Choros, pero estadísticamente el aporte sedimentario sería el segundo menor entre las zonas estudiadas. Se destaca que en esta zona se encuentra el punto con mayor similitud para la zona de Punta de Choros, con una correlación moderada.

### 5.2.3 Bahía Barnes, muestras 14-15-16 playa 17-18 dunas

Para la zona de Punta de Choros, los valores de  $s$  para cada muestra de la bahía Barnes son mayores con respecto al punto 19 que al 20 o 21, lo que quiere decir que las muestras de la bahía Barnes se asemejan en mayor medida al punto 19 que al 20 o 21, con un valor de  $s$  promedio de  $0,569$ . Los mayores valores de  $s$  se encuentran con respecto al punto 19 en las muestras 16, 17 y 18, con valores  $s_{16} = 0,589$ ,  $s_{17} = 0,587$  y  $s_{18} = 0,585$ .

En relación con las muestras de todas las zonas estudiadas, las muestras de la bahía Barnes se encuentran en el grupo de valores intermedios de  $s$ . Se destaca en esta zona que se encuentran los valores más altos de correlación, con un promedio de  $R^2 = 62,268\%$ .

De esto se deduce que existe una alta probabilidad de que haya aporte sedimentario desde la bahía Barnes hacia a la zona de Punta de Choros, con la correlación más alta para cada punto encontrada en todas las zonas estudiadas.

### 5.2.4 Río Hurtado, muestra 19 depósito aluvial

Para la zona del depósito aluvial del Río Hurtado, existe sólo una muestra con respecto a cada punto, donde el valor más alto de  $s$  y  $R^2$  se encuentra, una vez más, con respecto al punto 19, con valores de  $s = 0,579$  y  $R^2 = 45,166\%$ .

Nuevamente, la similitud es mayor con respecto al punto 19, luego al 20 y en menor medida al 21.

En relación con el total de las muestras, esta zona sería la tercera en mayor similitud y la cuarta mayor correlación.

Se infiere que existe una alta posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de río Hurtado hacia la zona de Punta de Choros, ya que los valores de  $s$  están en el grupo de mayores valores de similitud, pero con una correlación baja. Se destaca el hecho de que sólo exista un punto de muestreo, de modo que es difícil generalizar a toda una zona en una categoría de similitud con solo un punto. Sería interesante investigar más puntos ya que se obtuvo un valor alto de  $s$ .

#### **5.2.5 Río grande, muestra 20 depósito aluvial**

Para la zona del depósito aluvial de río Grande, existe solo una muestra con respecto a cada punto, donde el valor más alto de  $s$  y  $R^2$  se encuentra, una vez más, con respecto al punto 19, con valores de  $s = 0,554$  y  $R^2 = 58,375\%$ . Nuevamente, la similitud es mayor con respecto al punto 19, luego al 20 y en menor medida al 21.

En relación con el total de las muestras, esta zona sería de los menores valores de similitud, pero el segundo mayor valor de correlación entre todas las zonas estudiadas.

Se infiere que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de río Grande hacia la zona de Punta de Choros, con una correlación alta. Se destaca el hecho de que sólo exista un punto de muestreo, de modo que es difícil generalizar a toda una zona en una categoría de similitud con solo un punto. Sería interesante investigar más puntos ya que se obtuvo un valor alto de  $s$ .

#### **5.2.6 Río Cogotí, muestra 21 depósito aluvial**

Para la zona del depósito aluvial del Río Cogotí, existe sólo una muestra con respecto a cada punto, donde el valor más alto de  $s$  y  $R^2$  se encuentra, una vez más, con respecto al punto 19, con valores de  $s = 0,600$  y  $R^2 = 48,763\%$ . Nuevamente, la similitud es mayor con respecto al punto 19, luego al 20 y en menor medida al 21.

En relación con el total de las muestras, esta zona sería la de mayor similitud y la tercera mayor correlación.

Se infiere que existe una alta posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de río Cogotí hacia la zona de Punta de Choros, ya que los valores de  $s$  son los

mayores con respecto a cada punto, pero con una correlación baja. Se destaca el hecho de que sólo exista un punto de muestreo, de modo que es difícil generalizar a toda una zona en una categoría de similitud con solo un punto. Sería interesante investigar más puntos ya que se obtuvo un valor alto de  $s$ .

#### 5.2.7 Río Combarbalá, muestra 22 depósito aluvial

Para la zona del depósito aluvial del Río Combarbalá, existe sólo una muestra con respecto a cada punto, donde el valor más alto de  $s$  y  $R^2$  se encuentra, una vez más, con respecto al punto 19, con valores de  $s = 0,592$  y  $R^2 = 37,825\%$ . Nuevamente, la similitud es mayor con respecto al punto 19, luego al 20 y en menor medida al 21.

En relación con el total de las muestras, esta zona sería la de segunda mayor similitud, pero con la tercera correlación más baja.

Se infiere que existe una alta posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de río Combarbalá hacia la zona de Punta de Choros, ya que los valores de  $s$  son los segundos mayores con respecto a cada punto, pero con una correlación muy baja. Se destaca el hecho de que sólo exista un punto de muestreo, de modo que es difícil generalizar a toda una zona en una categoría de similitud con solo un punto. Sería interesante investigar más puntos ya que se obtuvo un valor alto de  $s$ .

#### 5.2.8 Desembocadura quebrada Los Choros, Punto 16

El punto 16 corresponde a la desembocadura de la quebrada Los Choros, donde el valor más alto de  $s$  se encuentra con respecto al punto 20, con un valor de  $s = 0,376$  y  $R^2 = 5,433\%$ . La similitud es mayor con respecto al punto 20, luego al 19 y en menor medida al 21.

En relación con el total de las muestras, esta zona sería la de menor similitud y de menor correlación.

Se infiere que existe la posibilidad de que haya aporte sedimentario desde la zona de la desembocadura de la quebrada Los Choros hacia la zona de Choros Bajos, pero que sería la zona de menor aporte en comparación con todas las zonas estudiadas en este trabajo y con menor correlación con respecto a cada punto de la zona de Punta de Choros.

## 6 Conclusiones

Según el estudio realizado, se obtuvieron valores intermedio y altos para el parámetro de similitud  $s$ , por lo que se infiere que existe la posibilidad de aporte sedimentario desde todas las zonas estudiadas.

Los valores de similitud y correlación fueron mayores con respecto a los puntos 14 y 15 correspondientes a la zona de Choros Bajos, que a los valores de los puntos 19, 2 y 21 correspondientes a la zona de Punta de Choros.

Tanto para la zona de Choros Bajos como para la zona de Punta de Choros, los mayores valores de similitud y correlación se encontraron en relación a las muestras correspondientes a la zona de bahía Barnes, por lo que se entiende que sería la de principal aporte hacia el campo de dunas de Los Choros. Es importante señalar que además de ser la de mayores valores de los parámetros estudiados, también es la zona que tiene mayor cantidad de puntos de muestreo, lo que apoya esta afirmación.

La zona que sigue a la bahía Barnes en el mayor valor de similitud con respecto a Choros Bajos corresponde a las zonas de la bahía Tongoy, pero con valores de correlación bajos.

Las dos zonas que siguen a la bahía Barnes en el mayor valor de similitud con respecto a Punta de Choros corresponden a las zonas de río Cogotí y río Combarbalá, las cuales tienen valores de correlación bajos y solo un punto de muestreo.

La zona de menores valores de similitud y correlación se encuentran en el punto 16, correspondiente a la desembocadura de la quebrada Los Choros. De esto se infiere que el principal aporte hacia el campo de dunas de Los Choros proviene principalmente de todas las zonas estudiadas hacia el sur, principalmente de bahía Barnes.

## 7 Bibliografía y Referencias

- Arellano, P., Celiz, C. (2014). "Análisis mineralógico mediante microscopía óptica"
- Ocampo, T. (2015). ""

**8.1.2. Informe 2: Informe: Análisis mineralógico mediante microscopía óptica y Comparación de estudios mineralógicos de sedimentos. Diciembre de 2016. Proyecto FONDECYT N° 1120234.**



**Informe:**  
**Análisis mineralógico  
mediante microscopía óptica  
y Comparación de estudios  
mineralógicos de sedimentos**

Constanza Celis Sáez

Diciembre 2016

## Contenido

1. Introducción.....	6
2. Metodología.....	8
2.1 Microscopía Óptica.....	8
2.2 Análisis de Proveniencia.....	8
2.2.1 Modelo de Mezcla Lineal .....	8
2.2.2 Diagnóstico de los parámetros para evaluar el modelo de mezcla lineal .....	9
3. Descripción de Muestras .....	11
3.1 Muestra M1: Duna Antigua, Los Choros .....	11
3.1.1 Características Macroscópicas.....	11
3.1.2 Características Microscópicas.....	11
3.2 Muestra M2: Duna Distal Bahía, Punta Choros .....	13
3.2.1 Características Macroscópicas.....	13
3.2.2 Características Microscópicas.....	13
3.3 Muestra M3: Duna Antigua, Los Choros.....	15
3.3.1 Características Macroscópicas.....	15
3.3.2 Características Microscópicas.....	15
3.4 Muestra M5: Zona Distal, La Serena .....	17
3.4.1 Características Macroscópicas.....	17
3.4.2 Características Microscópicas.....	17
3.5 Muestra M6: Zona Distal, La Serena .....	19
3.5.1 Características Macroscópicas.....	19
3.5.2 Características Microscópicas.....	19
3.6 Muestra M7: Zona Distal Bahía, La Serena .....	21
3.6.1 Características Macroscópicas.....	21
3.6.2 Características Microscópicas.....	21
3.7 Muestra M8: Zona Proximal, La Serena .....	23
3.7.1 Características Macroscópicas.....	23
3.7.2 Características Microscópicas.....	23
3.8 Muestra M9: Zona Media, La Serena .....	25
3.8.1 Características Macroscópicas.....	25
3.8.2 Características Microscópicas.....	25

4.	Análisis de Proveniencia.....	27
4.1	Muestra M1: Duna Antigua.....	27
4.2	Muestra M2: Duna Distal Bahía, Punta Choros.....	28
4.3	Muestra M3: Duna Antigua, Los Choros.....	29
4.4	Muestra M5: Zona Distal, La Serena.....	30
4.5	Muestra M6: Zona Distal, La Serena.....	31
4.6	Muestra M7: Zona Distal Bahía, La Serena.....	32
4.7	Muestra M8: Zona Proximal Bahía, La Serena.....	33
4.8	Muestra M9: Zona Media, La Serena.....	34
5.	Análisis.....	35
5.1	Descripción de muestras.....	35
5.1.1	Muestras 1, 2 y 3: Los Choros.....	35
5.1.1.1	Dunas Antiguas, M1 y M3.....	35
5.1.1.2	Duna Distal Bahía M2.....	36
5.1.2	Muestras 5, 6, 7, 8 y 9: La Serena.....	36
5.1.2.1	Zona Distal, M5, M6 y M7.....	36
5.1.2.2	Zona Proximal, M8.....	37
5.1.2.3	Zona Medial, M9.....	37
5.2	Análisis de proveniencia.....	38
5.2.1	Análisis M1.....	38
5.2.2	Análisis M2.....	38
5.2.3	Análisis M3.....	39
5.2.4	Análisis M5.....	39
5.2.5	Análisis M6.....	40
5.2.6	Análisis M7.....	40
5.2.7	Análisis M8.....	40
5.2.8	Análisis M9.....	41
6.	Conclusión.....	42
7.	Referencias.....	44
8.	Anexos.....	45

## Ilustraciones

Ilustración 1: Imagen extraída y modificada de Google Earth en donde se puede observar la ubicación de las muestras M1, M2 y M3 del sector de Punta de Choros .....	6
Ilustración 2: Imagen extraída y modificada de Google Earth en donde se puede observar la ubicación de las muestras M5, M6, M7, M8 y M9 del sector de La Serena. ....	7
Ilustración 3: Imagen 5x muestra M1, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Micas blancas, Cuarzo y Plagioclasas, entre otros.....	12
Ilustración 4: Imagen 20x muestra M1, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Epidota y Plagioclasa, entre otros. ....	12
Ilustración 5: Imagen 5x muestra M2, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Cuarzo, Plagioclasas y fragmentos de Calcita, entre otros. ....	14
Ilustración 6: Imagen 20x muestra M2, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas con Sericita y Plagioclasas con Arcillas, entre otros. ....	14
Ilustración 7: Imagen 5x muestra M3, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas alteradas a Sericita, entre otros.....	16
Ilustración 8: Imagen 20x muestra M3, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Biotita y Feldespatos alterado a Clorita, entre otros. ....	16
Ilustración 9: Imagen 5x muestra M5, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas, Biotitas y Anfíbolos, entre otros.....	18
Ilustración 10: Imagen 20x muestra M5, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas alteradas a Sericita, entre otros. ....	18
Ilustración 11: Imagen 5x muestra M6, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas y Biotitas, entre otros. ....	20
Ilustración 12: Imagen 20x muestra M6, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecia un cristal de Feldespato potásico. ....	20
Ilustración 13: Imagen 5x muestra M7, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas y Hornblenda, entre otros....	22
Ilustración 14: Imagen 20x muestra M7, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Epidota y Biotitas Cloritizadas, entre otros. ....	22
Ilustración 15: Imagen 5x muestra M8, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas, Cuarzo, entre otros. ....	24
Ilustración 16: Imagen 20x muestra M8, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Epidota, entre otros. ....	24
Ilustración 17: Imagen 5x muestra M9, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas y Biotita, entre otros. ....	26

Ilustración 18: Imagen 20x muestra M9, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecia un cristal de Hornblenda, entre otros. .... 26

Ilustración 19: Imagen extraída y modificada de Google Earth, en ella se puede observar los lugares a los que pertenecen las muestras más y menos similares. .... 42

## Anexos

Anexo 1: Desembocadura del Limarí, se observan las muestras 1, 2 y 3 en la Playa Moderna, y las muestras 4, 5 y 6 en el Banco Lateral Fluvial. .... 45

Anexo 2: Bahía de Tongoy, se observan las muestras 7, 8 y 9 en la Playa Moderna, las muestras 10, 11 y 12 en el Cordón de playa Holoceno y la muestra 13 en las Dunas. .... 46

Anexo 3: Bahía Barnes, se observan las muestras 14, 15 y 16 en la Playa Moderna y 17 y 18 en la Duna Longitudinal. .... 47

Anexo 4: Río Hurtado, se observa la muestra 19 en el Depósito Aluvial. .... 48

Anexo 5: Río Grande, se observa la muestra 20 en el Depósito Aluvial. .... 49

Anexo 6: Río Combarbalá, se observa la muestra 22 en el Depósito Aluvial. .... 50

## 1. Introducción

En el presente informe se presenta el análisis mineralógico mediante microscopía óptica de luz transmitida de 8 muestras de sedimentos extraídas de Punta de Choros (Ilustración 1) y La Serena (Ilustración 2), las que posteriormente son contrastadas con las 22 muestras descritas en el informe de proyecto del Limarí de Arellano y Celis (2014). Este estudio se enmarca como apoyo al Proyecto de Investigación Fondecyt 1120234.



Ilustración 1: Imagen extraída y modificada de Google Earth en donde se puede observar la ubicación de las muestras M1, M2 y M3 del sector de Punta de Choros

El principal objetivo de este análisis es obtener indicios que permitan determinar la fuente o área de proveniencia del material sedimentario en estudio, en este caso la hipótesis principal es que provienen de las zonas donde se extrajeron las 22 muestras en el estudio de Limarí. Al igual que en el estudio de Ocampo (2015) y González (2015) y para mantener la línea de investigación, el análisis comparativo entre los datos de estos trabajos se realizará según el Método de Vezzoli (2007), el cual entrega como resultado una medida de similitud y correlación entre las distintas muestras a analizar.



Ilustración 2: Imagen extraída y modificada de Google Earth en donde se puede observar la ubicación de las muestras M5, M6, M7, M8 y M9 del sector de La Serena.

Para los resultados de los análisis mineralógicos se presentan en tablas con la descripción de cada muestra en términos macroscópicos y microscópicos, junto a las características mineralógicas y su abundancia relativa. Además, se adjuntan dos sets de imágenes obtenidas mediante microscopía óptica, cada uno con imágenes a nícoles paralelos y nícoles cruzados.

Para los resultados del análisis de proveniencia se adjuntan las tablas con los resultados comparativos de cada muestra respecto a las muestras del 2014. En ellas también se sitúan los límites para considerar una similitud alta, considerable o baja.

Con el fin de evitar confusiones, en este informe las 8 muestras que se analizarán se definen como “M<sub>i</sub>”, mientras que las 22 muestras analizadas en el 2014 se definen como “muestra i”.

## 2. Metodología

### 2.1 Microscopía Óptica

Para este trabajo, se procedió separar la muestra de manera homogénea, para obtener la sección que sería enviada al laboratorio para, posteriormente, ser aglutinada con epoxy y generar las láminas transparentes necesarias para realizar este análisis. La realización de estas briquetas demoró entre 15 a 20 días.

Cabe destacar que las muestras poseen una selección buena a muy buena, en el análisis de microscopía óptica se destacó este hecho cuando la selección era excesivamente buena, lo que también indica condiciones especiales de transporte y deposición, consistentes con un ambiente de playa.

Posteriormente se procedió con el análisis microscópico que consistió en la observación de las características mineralógicas y la abundancia relativa de las especies minerales y fragmentos hallados en las muestras, principalmente a 5x y 20x. La detección de una determinada especie mineral es posible mediante la observación de las propiedades ópticas características que ésta presenta, tales como color, geometría, clivaje, relieve, absorción y pleocroísmo a nicoles paralelos, y color de interferencia y extinción a nicoles cruzados.

### 2.2 Análisis de Proveniencia

De modo que los distintos estudios sean comparables, se usará la misma metodología que la usada en el trabajo de “Los Choros” de Tania Ocampo (2015) y González (2015), la que se describe a continuación:

#### 2.2.1 Modelo de Mezcla Lineal

Los modelos lineales son fundamentales para el análisis de información con múltiples variables. La composición petrográfica de las arenas que constituyen el fondo de una quebrada puede ser expresada por una mezcla de un número fijo de miembros terminales (end-members), la cual puede ser representada usando un análisis de regresión. Por definición, los análisis de regresión predicen una variable continua dependiente desde un número de variables independientes:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p)$$

El objetivo principal de los métodos de regresión es la descripción de cómo uno o más atributos que caracterizan cierta entidad en cierto set de datos dependen de un atributo de destino elegido. Esta dependencia funcional puede ser lineal o no lineal. Siendo  $y$  el vector fila que contiene la información porcentual de los  $p$  distintos fragmentos detríticos en sus  $p$  columnas,  $X$  una matriz que contiene la información composicional de los  $n$  miembros terminales (end-members) en sus filas y  $p$  columnas en las que se representa la composición porcentual de los mismos  $p$  fragmentos detríticos con los que se representa el vector  $y$ , además  $b$  un vector columna con  $n$  columnas que representan la contribución de cada uno de los miembros terminales a  $y$ . En una notación matricial, un modelo de regresión lineal puede ser expresada como:

$$y = bX + e$$

$$[y_1 \dots y_p] = \begin{bmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1p} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ \dots \\ e_n \end{bmatrix}$$

Donde  $e$  sería un vector columna con  $n$  filas, las que representan el error de la variable representada.

### 2.2.2 Diagnóstico de los parámetros para evaluar el modelo de mezcla lineal

El buen ajuste del modelo de regresión lineal es evaluado por medio de diferentes parámetros:

#### 2.2.2.1 Similaridad y Distancia de Camberra

Similaridad ( $s$ ) es un concepto fundamental y ampliamente usado. Las medidas de Similaridad son usadas para comparar objetos, y para decidir cuáles deberían ser agrupadas (objetos similares) y cuáles no. La forma más natural de análisis de Similaridad es calcular la distancia ( $d$ ) entre los dos objetos ( $v$  y  $t$ ) que están siendo comparados. En estadísticas, la distancia de Camberra es basada en la correlación entre variables, por la cual diferentes parámetros pueden ser identificados y analizados (Lance y Williams, 1966). Es una forma útil de determinar la Similaridad de un set de muestras desconocidas a una conocida.

$$d_{vt} = \sum_{j=1}^p \frac{|x_{vj} - x_{tj}|}{(x_{vj} + x_{tj})}$$

Como cada elemento de la suma esta entre 0 y 1, valor máximo de  $d_{vt}$  es igual a p, donde p es el número de variables. Dividiendo la distancia de Camberra por p, la similaridad de los objetos v y t es:

$$s_{vt} = 1 - \frac{d_{vt}}{p}$$

Donde valores cercanos a 1 representan objetos con un mejor ajuste al de un modelo de regresión lineal.

#### 2.2.2.2 Análisis de Varianza (ANOVA)

El análisis ANOVA es una herramienta útil para evaluar buenos ajustes. Se calculan los siguientes parámetros:

- Suma residual de cuadrados (RSS, residual sum of squares)

$$RSS = \sum_i (y_i - \check{y}_i)^2$$

- Suma de desviaciones de cuadrados (MSS, model sum of squares)

$$MSS = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$$

- Coeficiente de determinación

$$R^2 = \left(1 - \frac{RSS}{MSS}\right) * 100$$

Donde valores de  $R^2$  cercanos a 100 indican un buen ajuste de variables.

### 3. Descripción de Muestras

#### 3.1 Muestra M1: Duna Antigua, Los Choros

##### 3.1.1 Características Macroscópicas

Tabla 1: Características Macroscópicas M1

<b>Características</b>	
Posición Geomorfológica	Duna Antigua
Granulometría	Limo arcilloso, predominantemente grano fino a muy fino
Morfoscopia	Sub-redondeado
Mineralogía	Arcillas, baja cantidad de Cuarzo y Ferromagnesianos
Selección	Bien seleccionado
Textura	Mate, rugoso y áspera
Observaciones	Presenta fragmentos de mayor tamaño, de manera aglomerada y hojoso

##### 3.1.2 Características Microscópicas

Tabla 2: Características Microscópicas M1

<b>Observaciones Generales</b>
Cristales se presentan en general sub-redondeados. La esfericidad es media a alta. Minerales micáceos se presentan subhedrales a anhedrales y en su mayoría alterados. Presencia de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de arcilla y feldespatos con alteración.

##### 3.1.2.1 Mineralogía óptica

Tabla 3: Mineralogía Óptica M1

<b>Cristal/Fragmento</b>	<b>%</b>	<b>Observaciones</b>
Cuarzo	5	
Plagioclasa	10	Una gran cantidad presenta alteración a epidota.
Feldespato potásico	30	En su mayoría cristales fuertemente alterados a sericita y arcilla.
Fragmentos de arcilla	10	Pueden ser el resultado de feldespatos completamente alterados.
Epidota	15	Algunas pueden ser el resultado de plagioclasas totalmente alteradas.

Biotita	2	Muy alteradas a clorita.
Micas blancas	3	
Opacos y óxidos de hierro	5	Fragmentos aislados.
Carbonatos	5	Correspondientes a fragmentos de conchillas.
Hornblenda (Anfibola)	10	
Clorita	5	Posibles fragmentos de biotitas completamente alteradas.

### 3.1.2.2 Imágenes cortes transparentes

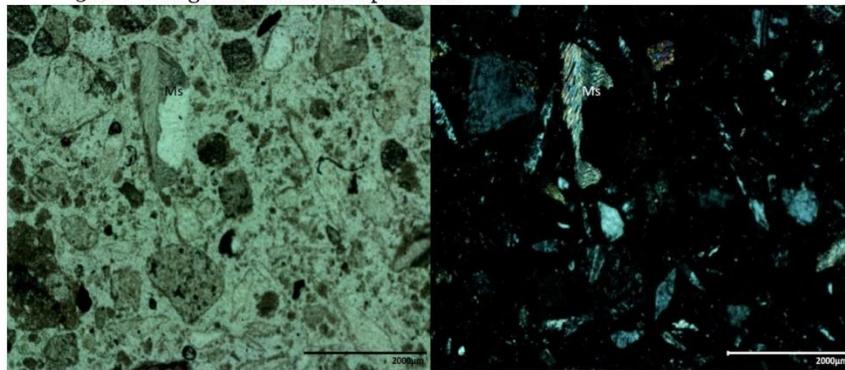


Ilustración 3: Imagen 5x muestra M1, a la izquierda nicóles paralelos, a la derecha nicóles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Micas blancas, Cuarzo y Plagioclasas, entre otros.

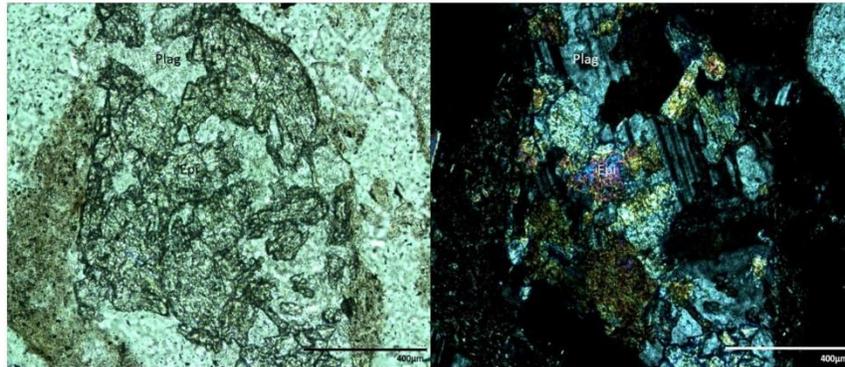


Ilustración 4: Imagen 20x muestra M1, a la izquierda nicóles paralelos, a la derecha nicóles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Epidota y Plagioclasa, entre otros.

### 3.2 Muestra M2: Duna Distal Bahía, Punta Choros

#### 3.2.1 Características Macroscópicas

Tabla 4: Características Macroscópicas M2

<b>Características</b>	
Posición Geomorfológica	Duna sector distal bahía
Granulometría	Arena fina
Morfoscopia	Sub-redondeado a redondeado
Mineralogía	Mayoritariamente Cuarzo y Ferromagnesianos
Selección	Bien seleccionado
Textura	Brillante, rugoso y áspera
Observaciones	Presenta fragmentos de conchillas

#### 3.2.2 Características Microscópicas

Tabla 5: Características Microscópicas M2

<b>Observaciones Generales</b>
<p>Cristales se presentan en general sub-redondeados a redondeados. La esfericidad es media a alta.</p> <p>Minerales micáceos se presentan subhedrales a anhedrales y en su mayoría muy alterados.</p> <p>Presencia de óxidos de hierro, minerales Opacos y fragmentos de conchillas.</p>

##### 3.2.2.1 Mineralogía óptica

Tabla 6: Mineralogía Óptica M2

<b>Cristal/Fragmento</b>	<b>%</b>	<b>Observaciones</b>
Cuarzo	20	
Plagioclasa	10	Algunas presentan alteración a epidota.
Feldespato potásico	15	Cristales fuertemente alterados a sericita y arcilla.
Epidota	2	Algunas pueden ser el resultado de plagioclasas totalmente alteradas.
Biotita	1	Alteradas mayoritariamente a clorita.
Opacos y óxidos de hierro	20	Fragmentos muy frecuentes.

Carbonatos	25	Correspondientes a fragmentos de conchillas.
Hornblenda (Anfibola)	3	
Clorita	4	Posibles fragmentos de biotitas completamente alteradas.

### 3.2.2.2 Imágenes cortes transparentes

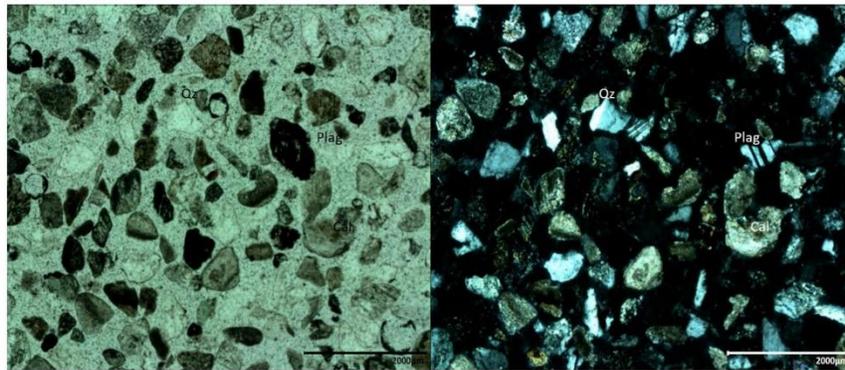


Ilustración 5: Imagen 5x muestra M2, a la izquierda nicols paralelos, a la derecha nicols cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Cuarzo, Plagioclasas y fragmentos de Calcita, entre otros.

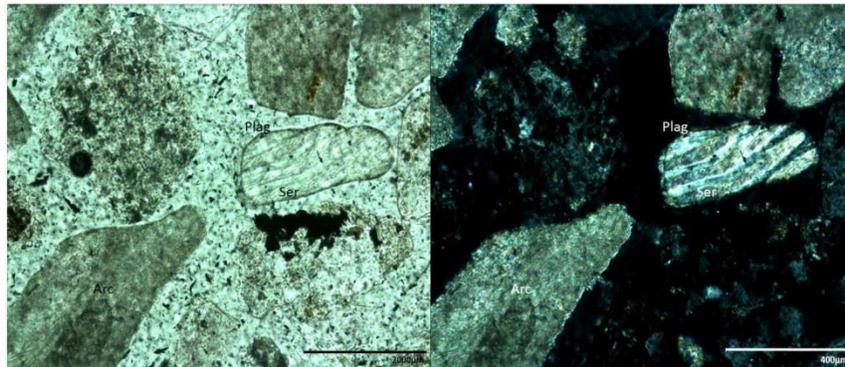


Ilustración 6: Imagen 20x muestra M2, a la izquierda nicols paralelos, a la derecha nicols cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas con Sericita y Plagioclasas con Arcillas, entre otros.

### 3.3 Muestra M3: Duna Antigua, Los Choros

#### 3.3.1 Características Macroscópicas

Tabla 7: Características Macroscópicas M3

<b>Características</b>	
Posición Geomorfológica	Duna Antigua
Granulometría	Limo arcilloso, predominantemente grano fino
Morfoscopía	Sub-anguloso a sub-redondeado
Mineralogía	Arcillas, baja cantidad de Cuarzo y Ferromagnesianos
Selección	Bien seleccionado
Textura	Mate, rugoso y áspera
Observaciones	Presenta fragmentos de mayor tamaño, de manera aglomerada y hojoso

#### 3.3.2 Características Microscópicas

Tabla 8: Características Microscópicas M3

<b>Observaciones Generales</b>
Cristales se presentan en general sub-angulosos a sub-redondeados. La esfericidad es media a baja. Minerales micáceos se presentan subhedrales a anhedrales. Presencia baja de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de arcilla y feldespatos con alteración.

##### 3.3.2.1 Mineralogía óptica

Tabla 9: Mineralogía Óptica M3

<b>Cristal/Fragmento</b>	<b>%</b>	<b>Observaciones</b>
Cuarzo	15	
Plagioclasa	10	Algunas presentan alteración a epidota.
Feldespato potásico	40	Cristales fuertemente alterados a sericita y arcilla.
Epidota	3	Pueden ser el resultado de plagioclasas totalmente alteradas.
Biotita	3	Alteradas mayoritariamente a clorita.
Opacos y óxidos de hierro	5	Fragmentos aislados.

Carbonatos	2	Correspondientes a fragmentos de conchillas.
Hornblenda (Anfibola)	2	
Clorita	5	Posibles fragmentos de biotitas completamente alteradas.
Fragmentos de arcilla	15	Pueden ser el resultado de feldspatos completamente alterados.

### 3.3.2.2 Imágenes cortes transparentes

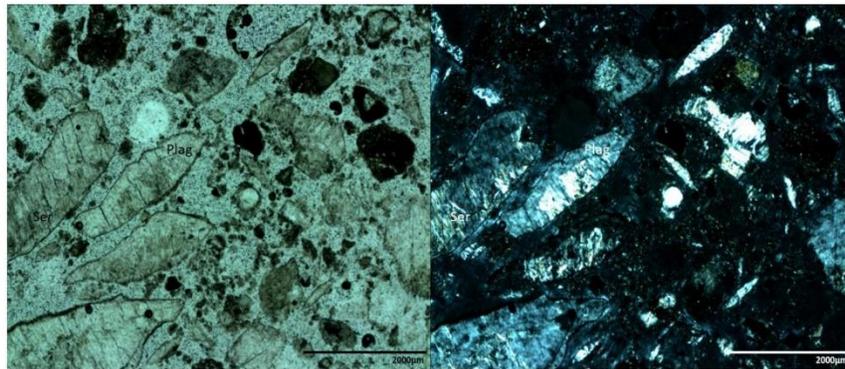


Ilustración 7: Imagen 5x muestra M3, a la izquierda nicols paralelos, a la derecha nicols cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas alteradas a Sericita, entre otros.

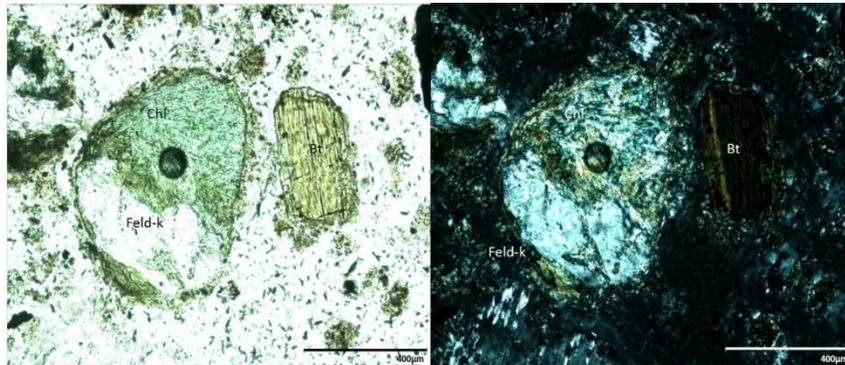


Ilustración 8: Ilustración 6: Imagen 20x muestra M3, a la izquierda nicols paralelos, a la derecha nicols cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Biotita y Feldspatos alterado a Clorita, entre otros.

### 3.4 Muestra M5: Zona Distal, La Serena

#### 3.4.1 Características Macroscópicas

Tabla 10: Características Macroscópicas M5

<b>Características</b>	
Posición Geomorfológica	Zona Distal
Granulometría	Arena fina
Morfoscopía	Sub-redondeado
Mineralogía	Mayoritariamente Cuarzo, Feldespato y Ferromagnesianos
Selección	Bien seleccionado
Textura	Brillante, rugoso y áspera
Observaciones	Presenta fragmentos de conchillas en bajas cantidades

#### 3.4.2 Características Microscópicas

Tabla 11: Características Microscópicas M5

<b>Observaciones Generales</b>
<p>Cristales se presentan en general sub-redondeados. La esfericidad es media a alta. Minerales micáceos se presentan subhedrales a anhedrales y en su mayoría muy alterados.</p> <p>Presencia alta de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de conchillas. Feldespatos se presentan alterados a arcilla, no se observa tanta alteración como en muestras 1,2 y 3.</p>

##### 3.4.2.1 Mineralogía óptica

Tabla 12: Mineralogía Óptica M5

<b>Cristal/Fragmento</b>	<b>%</b>	<b>Observaciones</b>
Cuarzo	30	
Plagioclasa	15	
Feldespato potásico	15	Cristales fuertemente alterados a sericita.
Biotita	10	Alteradas a clorita y anhedrales. Los cristales que no se encuentran alterados se encuentran subhedrales.
Opacos y óxidos de hierro	15	Fragmentos muy frecuentes.
Carbonatos	3	Correspondientes a fragmentos de conchillas.

Hornblenda (Anfibola)	5	
Clorita	5	Posibles fragmentos de biotitas completamente alteradas.
Fragmentos de rocas volcánicas	2	Se presentan con alteración en feldespatos.

### 3.4.2.2 Imágenes cortes transparentes

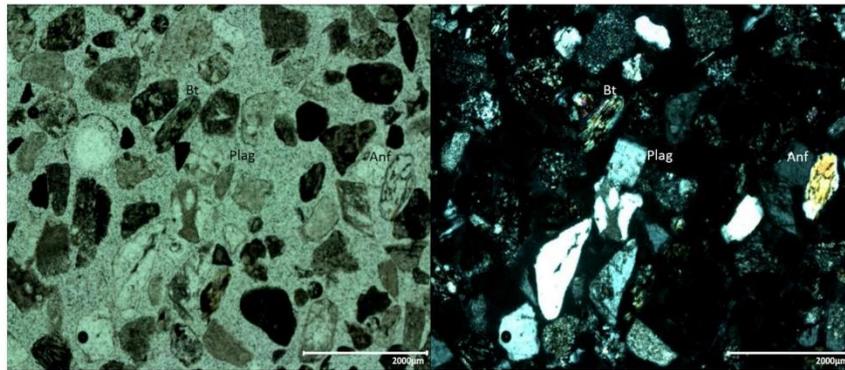


Ilustración 9: Imagen 5x muestra M5, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas, Biotitas y Anfibolas, entre otros.

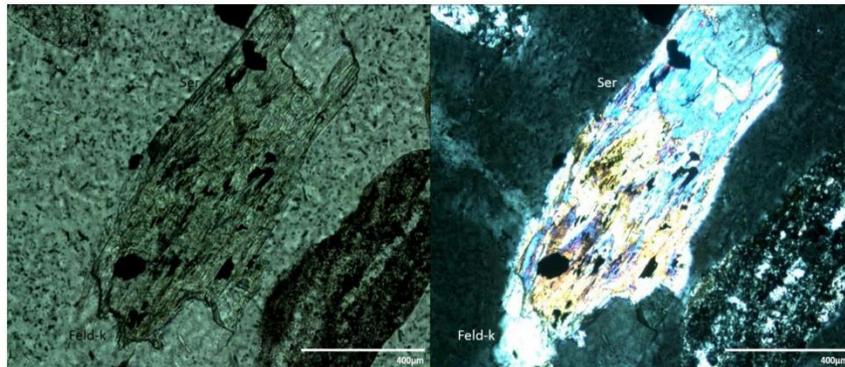


Ilustración 10: Imagen 20x muestra M5, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas alteradas a Sericita, entre otros.

### 3.5 Muestra M6: Zona Distal, La Serena

#### 3.5.1 Características Macroscópicas

Tabla 13: Características Macroscópicas M6

<b>Características</b>	
Posición Geomorfológica	Zona Distal
Granulometría	Arena fina
Morfoscopia	Sub-redondeado
Mineralogía	Mayoritariamente Cuarzo, Feldespato y Ferromagnesianos
Selección	Bien seleccionado
Textura	Brillante, rugoso y áspera
Observaciones	Presenta fragmentos de conchillas en bajas cantidades

#### 3.5.2 Características Microscópicas

Tabla 14: Características Microscópicas M6

<b>Observaciones Generales</b>
<p>Cristales se presentan en general sub-redondeados. La esfericidad es media a alta en minerales y baja en fragmentos de conchillas.</p> <p>Minerales micáceos se presentan subhedrales a anhedrales y en su mayoría muy alterados.</p> <p>Presencia alta de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de conchillas.</p> <p>Feldespatos se presentan alterados a arcilla, no se observa tanta alteración como en muestras 1,2 y 3.</p>

##### 3.5.2.1 Mineralogía óptica

Tabla 15: Mineralogía Óptica M6

<b>Cristal/Fragmento</b>	<b>%</b>	<b>Observaciones</b>
Cuarzo	20	
Plagioclasa	10	
Feldespato potásico	20	Cristales fuertemente alterados a arcilla.
Biotita	1	Alteradas a clorita.
Opacos y óxidos de hierro	15	Fragmentos muy frecuentes.
Carbonatos	10	Correspondientes a fragmentos de conchillas.

Hornblenda (Anfibola)	5	
Clorita	4	Posibles fragmentos de biotitas completamente alteradas.
Epidota	5	Alterando a feldespatos.
Fragmentos de arcilla	5	Posible alteración completa de feldespatos.
Fragmentos de rocas volcánicas	3	Se presentan con alteración en feldespatos.
Fragmentos de Chert	2	

### 3.5.2.2 Imágenes cortes transparentes

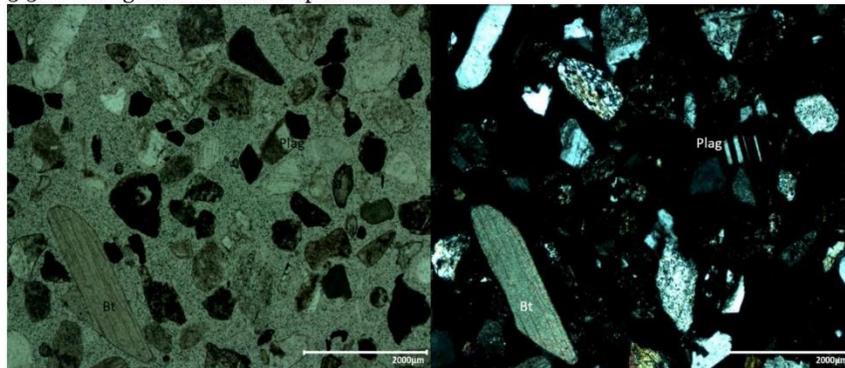


Ilustración 11: Imagen 5x muestra M6, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas y Biotitas, entre otros.

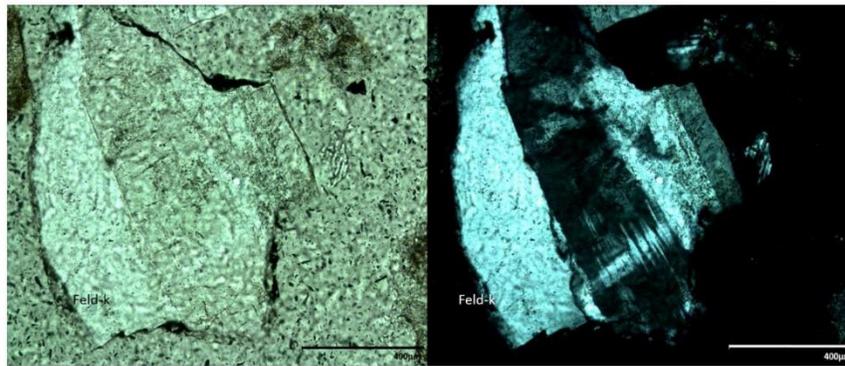


Ilustración 12: Imagen 20x muestra M6, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecia un cristal de Feldespato potásico.

### 3.6 Muestra M7: Zona Distal Bahía, La Serena

#### 3.6.1 Características Macroscópicas

Tabla 16: Características Macroscópicas M7

<b>Características</b>	
Posición Geomorfológica	Zona Distal Bahía
Granulometría	Arena fina
Morfoscopía	Sub-redondeado
Mineralogía	Mayoritariamente Cuarzo, Feldespato y Ferromagnesianos
Selección	Bien seleccionado
Textura	Brillante, rugoso y áspera
Observaciones	Presenta fragmentos de conchillas en bajas cantidades

#### 3.6.2 Características Microscópicas

Tabla 17: Características Microscópicas M7

<b>Observaciones Generales</b>
<p>Cristales se presentan en general sub-redondeados a redondeados. La esfericidad es media.</p> <p>Minerales micáceos se presentan subhedrales y en su mayoría muy alterados.</p> <p>Presencia alta de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de conchillas.</p> <p>Feldespatos se presentan alterados a arcilla, no se observa tanta alteración como en muestras 1,2 y 3.</p>

##### 3.6.2.1 Mineralogía óptica

Tabla 18: Mineralogía Óptica M7

<b>Cristal/Fragmento</b>	<b>%</b>	<b>Observaciones</b>
Cuarzo	20	
Plagioclasa	10	
Feldespato potásico	25	Cristales fuertemente alterados a arcilla.
Biotita	2	Alteradas a clorita.
Opacos y óxidos de hierro	15	Fragmentos muy frecuentes.
Carbonatos	5	Correspondientes a fragmentos de conchillas.
Hornblenda (Anfibola)	5	

Clorita	4	Posibles fragmentos de biotitas completamente alteradas.
Epidota	5	Alterando a feldespatos.
Fragmentos de arcilla	2	Posible alteración completa de feldespatos.
Fragmentos de rocas volcánicas	3	Se presentan con alteración en feldespatos.
Fragmentos de Chert	2	
Micas blancas	2	

### 3.6.2.2 Imágenes cortes transparentes

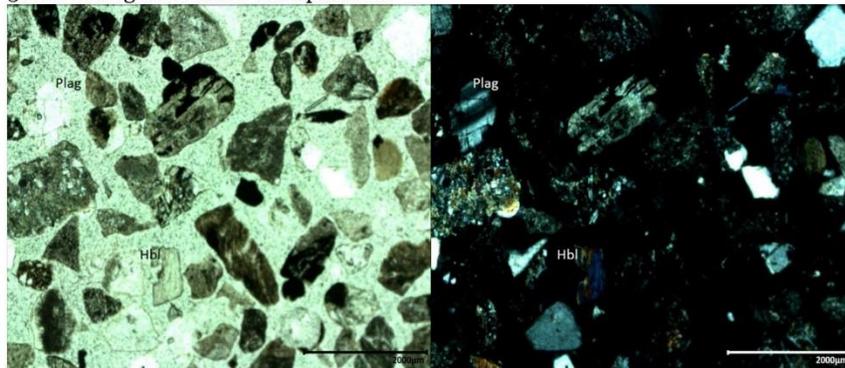


Ilustración 13: Imagen 5x muestra M7, a la izquierda nicóles paralelos, a la derecha nicóles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas y Hornblenda, entre otros.

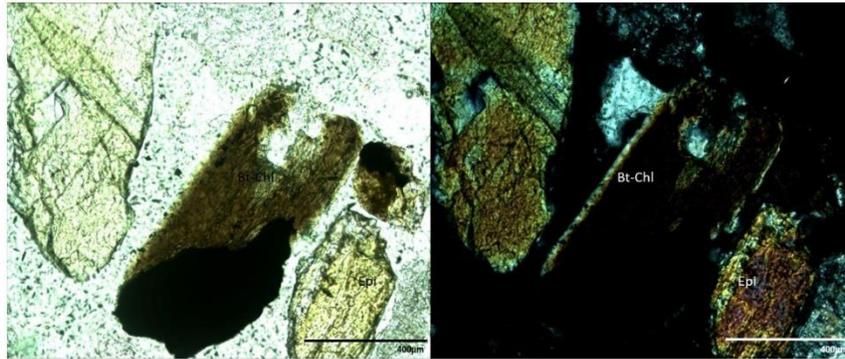


Ilustración 14: Imagen 20x muestra M7, a la izquierda nicóles paralelos, a la derecha nicóles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Epidota y Biotitas Cloritizadas, entre otros.

### 3.7 Muestra M8: Zona Proximal, La Serena

#### 3.7.1 Características Macroscópicas

Tabla 19: Características Macroscópicas M8

<b>Características</b>	
Posición Geomorfológica	Zona Proximal
Granulometría	Arena muy fina
Morfoscopía	Sub-redondeado
Mineralogía	Mayoritariamente Cuarzo y Ferromagnesianos
Selección	Bien seleccionado
Textura	Brillante, rugoso y áspera
Observaciones	Presenta fragmentos de conchillas en bajas cantidades

#### 3.7.2 Características Microscópicas

Tabla 20: Características Microscópicas M8

<b>Observaciones Generales</b>
Cristales se presentan en general sub-redondeados. La esfericidad es media a alta. Minerales micáceos se presentan subhedrales y en su mayoría muy alterados. Presencia de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de arcilla y conchillas en menor cantidad. Feldespatos se presentan alterados a arcilla, no se observa tanta alteración como en muestras 1,2 y 3.

##### 3.7.2.1 Mineralogía óptica

Tabla 21: Mineralogía Óptica M8

<b>Cristal/Fragmento</b>	<b>%</b>	<b>Observaciones</b>
Cuarzo	25	
Plagioclasa	10	
Feldespato potásico	15	Cristales fuertemente alterados a arcilla.
Biotita	10	Alteradas a clorita.
Opacos y óxidos de hierro	10	Fragmentos muy frecuentes.
Carbonatos	5	Correspondientes a fragmentos de conchillas.

Hornblenda (Anfibola)	3	
Clorita	5	Posibles fragmentos de biotitas completamente alteradas.
Epidota	7	Alterando a feldespatos.
Fragmentos de arcilla	5	Posible alteración completa de feldespatos.
Fragmentos de rocas volcánicas	2	Se presentan con alteración en feldespatos.
Fragmentos de Chert	3	

### 3.7.2.2 Imágenes cortes transparentes

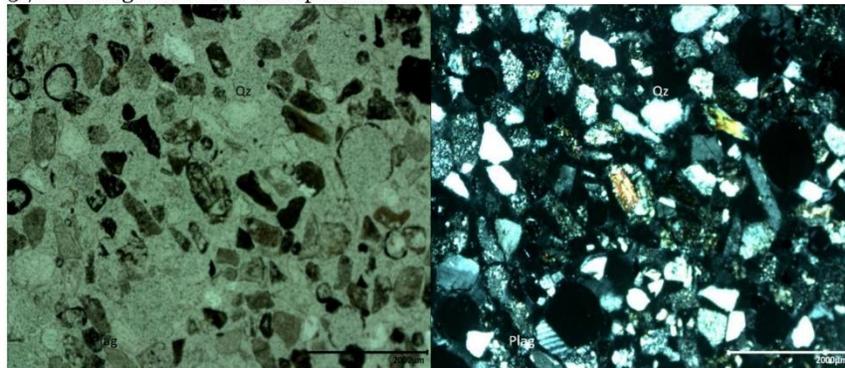


Ilustración 15: Imagen 5x muestra M8, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas, Cuarzo, entre otros.

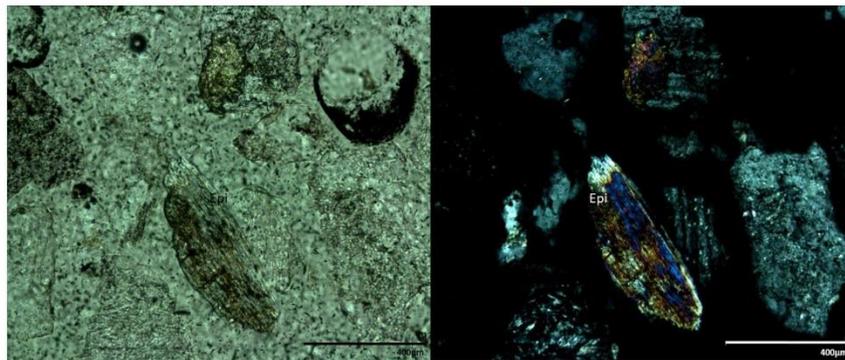


Ilustración 16: Imagen 20x muestra M8, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Epidota, entre otros.

### 3.8 Muestra M9: Zona Media, La Serena

#### 3.8.1 Características Macroscópicas

Tabla 22: Características Macroscópicas M9

<b>Características</b>	
Posición Geomorfológica	Zona Media
Granulometría	Arena fina a muy fina
Morfoscopía	Sub-redondeados
Mineralogía	Mayoritariamente Cuarzo, Feldespato y Ferromagnesianos
Selección	Bien seleccionado
Textura	Brillante, rugoso y áspera
Observaciones	Presenta fragmentos de conchillas en bajas cantidades

#### 3.8.2 Características Microscópicas

Tabla 23: Características Microscópicas M9

<b>Observaciones Generales</b>
Cristales se presentan en general sub-redondeados. La esfericidad es media a alta. Minerales micáceos se presentan subhedrales y en su mayoría muy alterados. Presencia alta de óxidos de hierro y minerales Opacos, fragmentos de conchillas. Feldespatos se presentan alterados a arcilla, no se observa tanta alteración como en muestras 1,2 y 3.

##### 3.8.2.1 Mineralogía óptica

Tabla 24: Mineralogía Óptica M9

<b>Cristal/Fragmento</b>	<b>%</b>	<b>Observaciones</b>
Cuarzo	20	
Plagioclasa	10	
Feldespato potásico	20	Cristales fuertemente alterados a arcilla.
Biotita	5	Alteradas a clorita.
Opacos y óxidos de hierro	15	Fragmentos muy frecuentes.
Carbonatos	5	Correspondientes a fragmentos de conchillas.
Hornblenda (Anfibola)	5	

Clorita	3	Posibles fragmentos de biotitas completamente alteradas.
Epidota	5	Alterando a feldespatos.
Fragmentos de arcilla	5	Posible alteración completa de feldespatos.
Fragmentos de rocas volcánicas	5	Se presentan con alteración en feldespatos.
Fragmentos de Chert	2	

### 3.8.2.2 Imágenes cortes transparentes

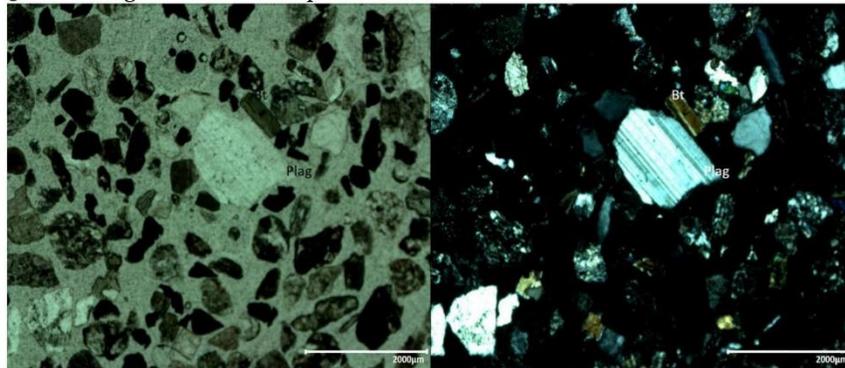


Ilustración 17: Imagen 5x muestra M9, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecian cristales de Plagioclasas y Biotita, entre otros.

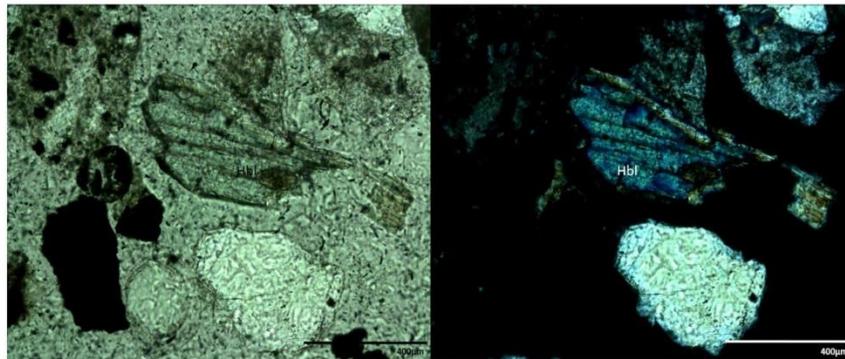


Ilustración 18: Imagen 20x muestra M9, a la izquierda nícoles paralelos, a la derecha nícoles cruzados. En la imagen se aprecia un cristal de Hornblenda, entre otros.

## Análisis de Proveniencia

A continuación, se muestran los datos obtenidos según la metodología antes mencionada.

Para simplificar los análisis, las muestras de La Serena son llamadas M5, M6, M7, M8 y M9; para las muestras de Los Choros, todas son llamadas como “muestra x”, siendo x el número correspondiente entre 14 y 21.

### 1. Muestra M5: Zona Distal, La Serena

Tabla 1: Resultados similaridad y R<sup>2</sup> Muestra M5 respecto puntos Los Choros.

Muestra	S	R <sup>2</sup>	Parámetros	
14	0.52	89.10	Promedio	0.50
15	0.61	77.24	Desv. Std.	0.07
16	0.42	72.61		
19	0.53	94.86	Lim. Inferior	0.43
20	0.49	88.97	Lim. Superior	0.57
21	0.45	86.73		

#### 1.1 Análisis M5

La muestra M5 presenta similaridades bajo 0.7 respecto a todas las muestras, por lo que en este caso no son lo suficientemente similares a la arena de la zona de Los Choros.

Considerando, los límites propuestos anteriormente, la muestra 15, posee una similaridad relativamente alta; la muestra 16 presenta una similaridad baja; y el resto de las muestras presentan similaridades considerables.

Como se pudo ver en la tabla 1, los valores obtenidos en R<sup>2</sup> presentan porcentajes sobre un 70%, con valores que alcanzan aproximadamente 95%, en la muestra 19, la cual en este caso sería la más cercana en composición con las arenas de La Serena, pero las muestras 14, 20 y 21 también tienen porcentajes considerables.

## 2. Muestra M6: Zona Distal, La Serena

Tabla 2: Resultados similaridad y  $R^2$  Muestra M6 respecto puntos Los Choros.

Muestra	S	R2	Parámetros	
14	0.60	83.67	Promedio	0.58
15	0.70	66.14	Desv. Std.	0.09
16	0.45	54.85		
19	0.63	92.52	Lim. Inferior	0.50
20	0.58	85.65	Lim. Superior	0.67
21	0.54	82.08		

### 2.1 Análisis M6

La muestra M6 presenta similaridades bajo 0.7 respecto a casi todas las muestras, por lo que en este caso no son lo suficientemente similares a la arena de la zona de Los Choros. Excepto por la muestra 15, que en este caso sería la más cercana en composición a las arenas de La Serena.

Considerando, los límites propuestos anteriormente, la muestra 15, posee una similaridad relativamente alta; la muestra 16 presenta una similaridad baja; y el resto de las muestras presentan similaridades considerables.

Como se pudo ver en la tabla 2, los valores obtenidos en  $R^2$  presentan porcentajes sobre un 50%, con valores que alcanzan aproximadamente un 93%, en la muestra 19, la cual en este caso sería la más cercana en composición con las arenas de La Serena, pero las muestras 14, 20 y 21 también tienen porcentajes considerables.

### 3. Muestra M7: Zona Distal Bahía, La Serena

Tabla 3: Resultados similaridad y R<sup>2</sup> Muestra M7 respecto puntos Los Choros.

Muestra	S	R2	Parámetros	
14	0.61	81.23	Promedio	0.57
15	0.69	55.16	Desv. Std.	0.09
16	0.42	49.67		
19	0.61	91.44	Lim. Inferior	0.48
20	0.58	84.66	Lim. Superior	0.66
21	0.53	80.45		

#### 3.1 Análisis M7

La muestra M7 presenta similaridades bajo 0.7 respecto a todas las muestras, por lo que en este caso no son lo suficientemente similares a la arena de la zona de Los Choros.

Considerando, los límites propuestos anteriormente, la muestra 15, posee una similaridad relativamente alta; la muestra 16 presenta una similaridad baja; y el resto de las muestras presentan similaridades considerables.

Como se pudo ver en la tabla 3, los valores obtenidos en R2 presentan porcentajes sobre un 50%, aproximadamente, con valores que alcanzan un 91%, en la muestra 19, la cual en este caso sería la más cercana en composición con las arenas de La Serena, pero las muestras 14, 20 y 21 también tienen porcentajes considerables.

#### 4. Muestra M8: Zona Proximal Bahía, La Serena

Tabla 4: Resultados similaridad y R<sup>2</sup> Muestra M8 respecto puntos Los Choros.

Muestra	S	R2	Parámetros	
14	0.60	83.96	Promedio	0.59
15	0.69	68.36	Desv. Std.	0.08
16	0.45	57.10		
19	0.64	92.32	Lim. Inferior	0.50
20	0.59	85.22	Lim. Superior	0.67
21	0.55	80.61		

##### 4.1 Análisis M8

La muestra M8 presenta similaridades bajo 0.7 respecto a todas las muestras, por lo que en este caso no son lo suficientemente similares a la arena de la zona de Los Choros.

Considerando, los límites propuestos anteriormente, la muestra 15, posee una similaridad relativamente alta; la muestra 16 presenta una similaridad baja; y el resto de las muestras presentan similaridades considerables.

Como se pudo ver en la tabla 4, los valores obtenidos en R2 presentan porcentajes sobre un 57%, aproximadamente, con valores que alcanzan un 92%, en la muestra 19, la cual en este caso sería la más cercana en composición con las arenas de La Serena, pero las muestras 14, 20 y 21 también tienen porcentajes considerables.

## 5. Muestra M9: Zona Media, La Serena

Tabla 51: Resultados similaridad y  $R^2$  Muestra M9 respecto puntos Los Choros.

Muestra	S	R2	Parámetros	
14	0.61	82.79	Promedio	0.58
15	0.70	63.28	Desv. Std.	0.09
16	0.44	51.98		
19	0.63	92.24	Lim. Inferior	0.50
20	0.58	85.28	Lim. Superior	0.67
21	0.54	81.46		

### 5.1 Análisis M9

La muestra M9 presenta similaridades bajo 0.7 respecto a todas las muestras, por lo que en este caso no son lo suficientemente similares a la arena de la zona de Los Choros. Excepto por la muestra 15, que en este caso sería la más cercana en composición a las arenas de La Serena.

Considerando, los límites propuestos anteriormente, la muestra 15, posee una similaridad relativamente alta; la muestra 16 presenta una similaridad baja; y el resto de las muestras presentan similaridades considerables.

Como se pudo ver en la tabla 5, los valores obtenidos en R2 presentan porcentajes sobre un 52%, aproximadamente, con valores que alcanzan un 92%, en la muestra 19, la cual en este caso sería la más cercana en composición con las arenas de La Serena, pero las muestras 14, 20 y 21 también tienen porcentajes considerables.

## Conclusión

Las muestras pertenecientes a La Serena presentan en conjunto un comportamiento muy similar entre ellas respecto a las muestras de Los Choros.

- En general, las 5 muestras de La Serena poseen similaridades bajo 0.7, lo que indicaría una baja correlación. La muestra 15 de La Serena es siempre la que posee una similaridad más alta respecto a las otras y la muestra 16 es la más baja en todos los análisis.
- Respecto a los resultados de  $R^2$ , los porcentajes varían, pero en general, las muestras 14, 19, 20 y 21 siempre poseen porcentajes mayores a 80%, por lo que existe una alta correlación con las muestras de La Serena. La muestra 19 en este caso es la que siempre posee el valor más alto de correspondencia.

Finalmente se puede concluir que las muestras 14, 19, 20 y 21 son las que se asemejan más a las muestras de La Serena, en todos los análisis. La muestra 16 es la que posee una composición menos similar en todos los casos. Respecto a la muestra 15, que posee una “alta” similaridad, pero no un alto porcentaje de correlación, es necesario tener más información para concluir adecuadamente si se asemeja o no a las muestras de La Serena.

## Fe de Erratas Informe 1

Tabla 6: Valores correspondientes a  $R^2$  de las Muestras de La Serena

Muestra	M1	M2	M3	M5	M6	M7	M8	M9
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.08	33.77	14.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	26.77	48.55	11.19	33.55	30.67	18.35	23.98	21.94
4	33.91	45.44	31.19	24.13	32.51	26.24	8.74	18.07
5	18.16	43.69	5.55	25.89	23.58	18.05	0.00	7.92
6	36.18	55.96	15.07	40.18	30.32	7.79	19.76	17.17
7	42.02	52.72	35.36	38.44	39.93	29.67	30.88	31.59
8	43.31	43.39	32.50	28.50	28.00	14.14	22.27	19.37
9	40.93	33.80	24.33	13.11	13.28	0.00	9.29	5.54
10	42.09	0.00	51.76	56.19	32.97	36.74	49.02	44.14
11	37.79	22.29	21.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	30.95	31.40	3.13	0.00	8.37	0.00	0.00	4.02
13	41.24	34.87	37.14	38.14	33.96	25.09	28.52	32.82
14	31.12	15.57	0.00	34.75	20.96	6.03	28.37	22.50
15	58.27	31.62	48.29	57.50	49.65	47.70	52.08	52.18
16	57.20	25.82	63.74	66.12	51.95	57.12	57.12	58.87
17	45.93	15.77	57.74	53.30	45.44	51.31	51.31	50.91
18	38.67	0.00	51.96	37.88	27.86	33.43	36.07	35.39
19	32.65	46.64	41.18	36.77	17.30	8.71	16.96	0.00
20	24.17	47.54	23.10	32.14	0.00	0.00	0.00	0.00
21	39.96	51.50	30.96	5.41	25.04	19.72	0.00	2.09
22	36.05	52.68	41.40	44.05	38.11	33.54	35.09	29.91

En la tabla 6 se pueden observar los valores del coeficiente de correlación con una nueva fórmula para calcularlo, coincidente con la fórmula utilizada en este reporte. En azul se marcan aquellas muestras con la más baja correlación y en amarillo las que poseen valores sobre un 50%. En negrita, además, se muestran aquellas con una similitud relativamente alta, según el anterior informe.

Nuevamente se puede observar que ambos métodos concluyen resultados distintos, siendo en algunos casos diametralmente opuestos, como es el caso de la muestra 11 respecto a la muestra M6, M7, M8 y M9.

## **8.2. Material acompañante**

### **8.2.1. Modelación en Matlab de WAVECALC**

### **8.2.2. Base de datos WAVECALC**