UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA

ESTUDIO DEL POTENCIAL ECONÓMICO PARA DESARROLLO DE PEQUEÑA Y MEDIANA MINERÍA DEL PROSPECTO CAYUCUPIL, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE

Memoria para optar al Título de Geólogo

Daniel Felipe Carvajal Escalona

Profesor Guía:	Dra. Fernanda Álvarez Amado
Profesional Tutor:	Sr. Álvaro Abarzúa Acevedo
Profesores Comisión:	Mcs. Abraham González Martínez
	Mcs. Liubow González Martínez.

Concepción, 2018

Índice

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. OBJETIVOS 1
1.1.1. **Objetivo general** 1
1.1.2. **Objetivos específicos** 1
1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS 2
1.2.1. **Propiedad minera y sectores** 2
1.3. METODOLOGÍA DE TRABAJO 2
1.3.1. **Etapa gabinete 1** 3
1.3.2. **Etapa de pre-terreno** 4
1.3.3. **Etapa de terreno** 5
1.3.4. **Etapa de gabinete 2** 6
1.4. TRABAJOS ANTERIORES 7
1.5. MARCO GEOMORFOLÓGICO 10
1.5.1. **Geomorfología regional** 10
1.5.2. **Geomorfología local** 11
1.5.2.1. Terrazas costeras en la Península de Arauco 13
1.6. CLIMA 15
1.7. DRENAJE 17
1.8. AGRADECIMIENTOS 18
2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL 19
2.1. GENERALIDADES 19
2.2. ROCAS METAMÓRFICAS 19
2.3. ROCAS INTRUSIVAS 22
2.4. ROCAS ESTRATIFICADAS 22
2.4.1. **Rocas mesozoicas** 22
2.4.1.1 Formación Quiriquina (Maastrichtiano Superior) 23
2.4.2. **Rocas cenozoicas** 23
2.4.2.1. Formación Pilpilco (Eoceno Inferior) 23
2.4.2.2. Formación Curanilahue (Eoceno Inferior) 23
2.4.2.3. Formación Boca Lebu (Eoceno Inferior) 24

2.4.2.4. Formación Trihueco (Eoceno Medio) 25
2.4.2.5. Formación Millongue (Eoceno Medio- Eoceno Superior) 26
2.4.2.6. Formación Ranquil (Mioceno) 27
2.4.2.7. Formación Tubul (Plioceno) 28
2.4.2.8. Depósitos de areniscas y arcillolitas marinas (Plioceno) 28
2.4.2.9. Depósitos del Pleistoceno – Holoceno 28
2.5. MARCO TECTÓNICO 29
2.5.1. **Zona de Falla Lanalhue (ZFL)** 29
2.5.2. **Zona de Falla Mocha-Villarrica (ZFMV)** 31
2.5.3. **Lineamiento Bío-Bío (LBB)** 31
2.5.4. **Tectónica de la Península de Arauco** 31
3. **MARCO GEOLÓGICO LOCAL** 33
3.1. BASAMENTO METAMÓRFICO (SERIE OCCIDENTAL) 33
3.2. UNIDAD NAHUELBUTA 34
4. **MARCO METALOGÉNICO** 35
4.1. GENERALIDADES 35
4.2. MINERALES METÁLICOS 35
4.3. ORO 37
4.4. TIERRAS RARAS 39
4.5. ARENAS TITANÍFERAS 40
4.6. DEPÓSITOS TIPO PLACER 41
4.6.1. **Placeres Residuales** 42
4.6.2. **Placeres Eluviales** 42
4.6.3. **Placeres Aluviales** 43
5. **RESULTADOS** 45
5.1. PETROGRAFÍA DE DEPÓSITOS ALUVIALES 45
5.2. MORFOLOGÍA DEL DEPÓSITO 45
5.3. DESCRIPCIÓN DE SEDIMENTOS 46
5.4. RESULTADOS DE LABORATORIO 47
5.4.1. **Concentraciones de Au y Ag** 47
5.4.2. **Elementos mayores y menores** 50
5.4.3. **Elementos traza** 53

5.4.4. **Tierras raras** 56
6. **DISCUSIÓN** 58
6.1. ELEMENTOS MAYORES 58
6.2. ELEMENTOS TRAZAS 59
7. **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES** 64
7.1 CONCLUSIONES 64
7.2 RECOMENDACIONES 65
9. **REFERENCIAS** 66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1. 1.	Mapa ubicación zona de estudio ……..	3
1. 2.	Mapa propiedad minera …….....	4
1. 3.	Metodología de muestreo …….....	6
1. 4.	Unidades geomorfológicas de la Región del Biobío……	11
1. 5.	Extensión espacial Cordillera de Nahuelbuta y Bloque de Arauco .	12
1. 6.	Mapa geomorfológico y de elevación del sector Cayucupil ……	13
1. 7.	Esquema de la distribución de terrazas en la Península de Arauco .	14
1. 8.	Mapa con diferentes niveles de terrazas definidas por Kaizuka ….	15
1. 9.	Mapa tipos de clima que imperan en la región del Biobío ……..	16
1.10.	Imagen DEM, drenaje del sector Cayucupil …….....	17
2. 1.	Mapa geológico Regional …….....	20
2. 2.	Síntesis tectónica regional del área de estudio ……	30
3. 1.	Afloramiento de roca ígnea batolito Nahuelbuta ……	33
3. 2.	Esquisto de micas Unidad Nahuelbuta ……	34
3. 3.	Granodiorita de biotita con granate Unidad Nahuelbuta …….	34
4. 1.	Catastro de recursos económicos de la región del Bíobío ……	36
4. 2.	Producción de Au en la región del Bíobío ……...	38
4. 3.	Formación de placeres residuales y eluviales ……..	43
4. 4.	Perfil transversal de un río ……..	44
5. 1.	Fotografía del cauce río Cayucupil …….	45
5. 2.	Fotografías de puntos de interés ……..	46
5. 3.	Fotografía de los depósitos muestreados …….	47
5. 4.	Fotografía muestreo en terraza ……	48
5. 5.	Mapa concentración de Au en prospecto Cayucupil ……...	49
5. 6.	Muestreo FRX …….	51
5. 7.	Clasificación de sedimento. Diagrama de Herron ……	53
5. 8.	Ubicación de muestras analizadas por ICP-AES …….	55

5. 9. Concentración de tierras raras ……. 57
6. 1. Concentraciones en la corteza terrestre según Wedepohl ……... 60
6. 2. Diagrama comparativo concentraciones de REE …… 62
6. 3. Fuente, transporte y depositación de tierras raras …… 63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla **Página**
2. 1. Fórmula de minerales característicos de depósitos de placeres…... 42
5. 1. Concentraciones de Au y Ag en el prospecto Cayucupil…… 49
5. 2. Contenido de ley en trampas del prospecto Cayucupil…… 50
5. 3. Resultados de elementos mayores y menores por FRX…….. 52
5. 4. Concentraciones de elementos traza…… 54
5. 5. Contenido de tierras raras…… 56
5. 6. Comparación de valores de tierras raras en rocas de la región…… 56
6. 1. Valores de tierras raras en ppm del prospecto Cayucupil …… 62

RESUMEN

Hay numerosos placeres auríferos y sectores con presencia de oro detrítico en la Cordillera de la Costa de la Región del Biobío, los cuales han sido explotados desde los tiempos de la conquista española.

Estos depósitos se emplazan principalmente en dominios de rocas intrusivas y metamórficas, compuesto principalmente por granitos, granodioritas y tonalitas que integran el Batolito Costero del Sur y esquistos micáceos, rocas más antiguas que corresponden a rocas metamórficas de la Serie Oriental depositadas durante el Paleozoico.

El objetivo de este trabajo es realizar una metodología de muestreo con el fin de caracterizar los depósitos, para posteriormente efectuar análisis geoquímicos con el fin de estimar el potencial económico del prospecto Cayucupil.

Los sedimentos analizados de la zona de estudio son transportados por los ríos Cayucupil y Butamalal ubicados 10 km al este de Cañete, luego los sedimentos son depositados en meandros, barras y trampas a lo largo de los 22 km de cauce entre ambos ríos, presentando granulometría media compuesta principalmente por cuarzo, feldespato, muscovita biotita y minerales opacos sin magnetismo.

La mayoría de las concentraciones de Au está bajo el límite de detección (<0.005 ppm) y todas las muestras de Ag también (< 0.2 ppm), por lo que se considera una baja o nula concentración económica de Au en la mayoría de los sedimentos extraídos. Siete muestras presentan concentraciones de Au levemente superiores al límite de detección y corresponden a *point bars* en meandros de flujo de poca energía

A partir de los resultados de concentraciones de Au obtenidos, se calcula la ley media del prospecto y el promedio de las leyes tanto en g/m^3 como en g/ton estás corresponden a 0.01367 g/m^3 y 0.0054 g/ton.

En mapas elementales de tierras raras, se observa que la mayor concentración se localiza en la zona oeste del área de estudio, lo cual podría estar relacionado a la pendiente del río Cayucupil llegando al valle de Cayucupil. El origen de estas tierras raras tiene como fuente rocas ígneas alcalinas pertenecientes a la unidad Nahuelbuta, se forman a partir de procesos geológicos que extraen y concentran elementos que no encajan en las estructuras de los minerales comunes formadores de rocas

El prospecto Cayucupil clasifica como interesante respecto a una futura evolución de explotación con referencia en tierras raras para la pequeña minería.

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio ha sido solicitado por el jefe de desarrollo minero de la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) financiada por la misma empresa, con el fin de valorizar los depósitos de placeres auríferos antiguamente explotados y los cuales podrían corresponder a depósitos económicamente rentables de la VIII región. En la región del Biobío depósitos aluviales pertenecientes a la Cordillera de la Costa han sido identificados y estudiados por ENAMI (1983-1986), Greiner (1991), Pincheira (1991), Collao (2000) y Stange (2011) en diferentes sectores como Poñen, Lajuela, Butamalal, Cayucupil, Los maitenes, entre otros. En los años 2015–2016 se realizó un estudio de Identificación y Valorización de Recursos Mineros Aluviales de Oro en Chile por parte de la Pontificia Universidad Católica de Chile cofinanciado por Innova Chile. En este estudio se identificó el Prospecto Cayucupil, como uno de los depósitos aluviales con mayor interés económico para el desarrollo de una pequeña minería de oro (Au). Este placer aurífero correspondería a la acumulación de sedimentos provenientes de la erosión de rocas granodioríticas y esquistosas de la cuenca del río Butamalal. La topografía del sector favoreció la formación de un ancho paleocurso de agua, el que fue paulatinamente desplazado hacia el este, constituyendo así un gran meandro cuya parte interior ha ido acumulando sedimentos producto del transporte generado por el agua. Esta memoria tiene por objetivo estudiar las leyes de oro del sector, analizando a escala detallada el manto y los recursos que en hay en él. De forma complementaria se realiza un estudio geoquímico detallado con el fin de identificar existencia de tierras raras en el sector.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Analizar el potencial económico del prospecto aurífero Cayucupil para la pequeña y mediana minería.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la geoquímica de los depósitos aluviales del prospecto Cayucupil.

- Estimar las leyes de oro de los depósitos aluviales del prospecto Cayucupil.

- Establecer una nueva metodología de muestreo y estudio de depósitos aluviales de oro en la región del Bío-bio.

- Estimar el potencial económico de tierras raras presente en el prospecto.

1.2. Ubicación y accesos

El prospecto Cayucupil se ubica a 116 km al S de Concepción y a 12 km al NE de Cañete, en la provincia de Arauco, Región del Biobío, Chile. Entre las coordenadas 37°48' - 37°50' Latitud S y 73°15' - 73°11' Longitud W (Figura 1.1). Su acceso desde la localidad de Cañete se realiza por camino pavimentado hasta Cayucupil, luego se sigue por el valle del río Cayucupil en los primeros 4 km, desde este punto se sigue hacia el sureste por aproximadamente 8 km por camino de ripio bordeando el río Butamalal donde confluyen ambos ríos.

Los caminos principales y vías de acceso dentro del área del prospecto son principalmente de ripio y tierra, por lo tanto, el estado de éstos se encuentra condicionado a las condiciones meteorológicas.

1.2.1. Propiedad minera y sectores

Las propiedades mineras corresponden a 3 pedimentos de exploración, llamados Cayucupil 1, Cayucupil 2 y Cayucupil 3 con fecha de inscripción 25-11-2017 a nombre de la Empresa Nacional de Minería (Figura 1.3).

1.3. Metodología de trabajo

El prospecto Cayucupil fue escogido para realizar el estudio sobre placeres de oro de la región del Biobío debido a que datos preliminares entregados por el informe de Lagos y otros (2015), indican un volumen de 2.815.315 m^3 correspondiente a un manto con ley promedio de 3,3 g/m^3, o bien, 1,65 g/ton. Para el cálculo del tonelaje, se utiliza una densidad del medio de 2,0 g/cm^3. En total, el potencial de mineralización estimado es de 301.447 Onzas Troy. El prospecto Cayucupil es calificado por los autores antes mencionados como un proyecto para desarrollar una explotación de mediana minería de alta eficiencia con capacidad de planta de 300 m^3/hr y un Plan de Vida de

la Minería (LOM) de 2 años. Este trabajo corresponde a una nueva etapa de exploración de la zona donde se analizan sedimentos a lo largo del río Cayucupil y columnas de sedimentos en terrazas. Para esto, se dividen las etapas de trabajo en cuatro: Gabinete 1, Etapa de pre- terreno, etapa de terreno y Gabinete 2.

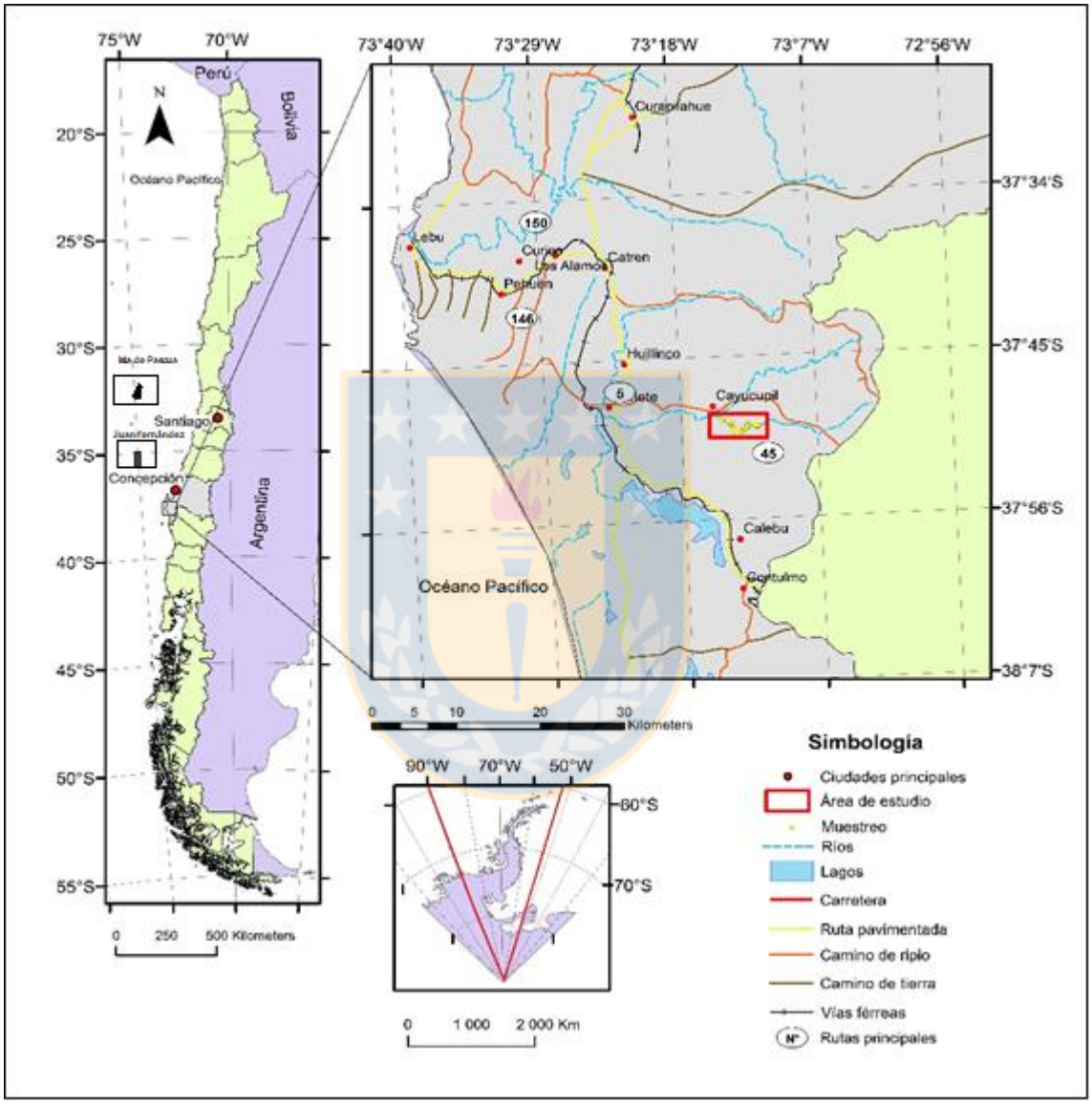

Figura 1.1. Mapa ubicación zona de estudio.

1.3.1. Etapa Gabinete 1

Etapa de recopilación de información bibliográfica y estudio de imágenes satelitales en oficina. Estudio de metodologías de muestreo de Au en placeres fluviales. La información bibliográfica

recogida apunta a la caracterización de placeres de Au en Chile, con énfasis en la región del Biobío, con el fin de caracterizar este tipo de depósitos. Mediante el uso del software ArcGis 10.1 se estudia satelitalmente el área de Cayucupil-Butamalal-Los Maitenes con el objetivo de identificar posibles trampas (meandros) a gran escala de minerales. Posteriormente, se definen los sitios de muestreo geoquímico, los cuales son validados mediante un reconocimiento *in situ.*

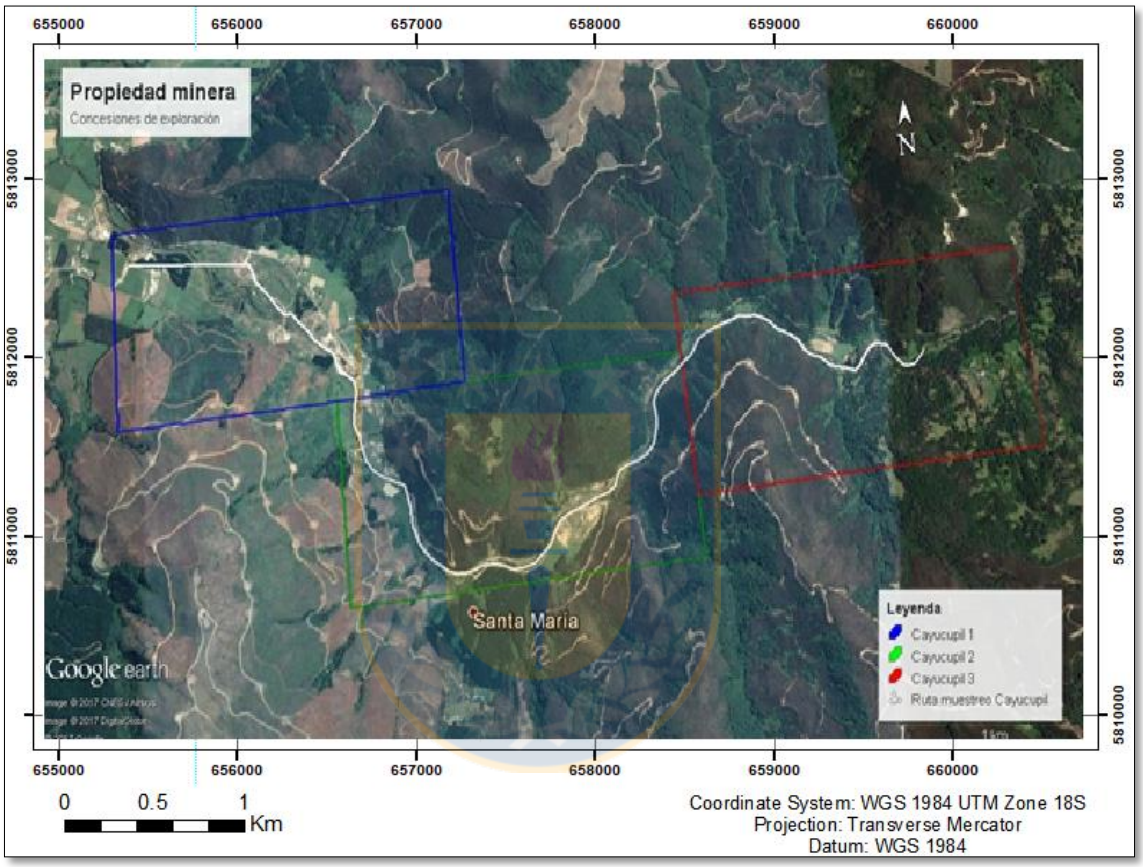

Figura 1.2. Mapa propiedad minera.

1.3.2. Etapa de pre-terreno

En el río Cayucupil el agua fluye según la línea más directa dónde erosiona las orillas cóncavas y deposita en las convexas, como consecuencia, los sedimentos de mayor tamaño se depositan en las partes cóncavas del lecho, situándose cerca de la corriente, y la grava fina y arena en el lado opuesto. La pendiente origina zonas accidentadas, el lecho del río no presenta siempre la misma inclinación, con lo que los remolinos, las barras rocosas o simplemente obstáculos, modifican la velocidad de las aguas en ciertos puntos, provocando la acumulación de los elementos más densos.

Las concentraciones de minerales pesados se encontrarán en las reducciones de pendientes, principalmente en la parte anterior de las barras y de los obstáculos, no obstante, en las partes posteriores en zonas de depresión (marmitas) también se pueden concentrar estos minerales. El realizar una etapa de pre-terreno permite muestrear algunos sectores de manera estratégica, comparando lo observado a través de imágenes satelitales con el depósito. De esta forma también es posible muestrear aquellos meandros nuevos (provocados por alguna tormenta o lluvia reciente), evaluando la presencia de elementos de interés en ellos. Por otro lado, el reconocimiento del área permite evitar contratiempos y ayuda a la prevención de accidentes, puesto que son zonas de difícil acceso peatonal y vehicular.

En base a información bibliográfica, estudio de imágenes satelitales y visita preliminar a terreno se identifican los puntos que puedan resultar atractivos para la depositación de minerales pesados.

1.3.3. Etapa de terreno

El grupo de trabajo en terreno, conformado por el Geólogo tutor Sr. Álvaro Abarzúa, el Técnico en Geología Sr. Cristian Castillo y los memoristas María Fernanda Freedman y Daniel Carvajal muestrean la zona de Butamalal caracterizada por la presencia de Au en placeres fluviales. En particular, se realiza un muestreo de ciertas pertenencias del prospecto Cayucupil. Se efectúa un mapeo superficial del prospecto, identificando con GPS los puntos definitivos de interés. En cada uno de éstos, se realizan pozos de muestreo o columna (Figura 1.3). Luego se extraen 3,7 l de sedimentos por muestra para su posterior análisis geoquímico, macroscópico y microscópico. Se guardan en bolsas resistentes para muestras, se rotulan, clasifican y almacenan en sacos, además, se confeccionan fichas con la información tomada en terreno (anexo 4). Se describe en detalle la litología y geomorfología del sector. La cantidad de muestras extraídas en terreno y las consideraciones respectivas dependerá del tipo de depósito:

- Trampa de depositación mayor a 1 m de longitud: se realizan 3 pozos separados a una distancia designada en terreno para cada uno y se extraen 3 muestras de 3,7 l cada una.
- Columna: se extraen 3 muestras desde la columna de 3,7 l cada una, teniendo en consideración el metraje de donde se localiza el muestreo.
- Trampa de depositación menor a 1 m de longitud: se hace 1 pozo y se extrae sólo 1 muestra de 3,7 l.

- Pozo en Río: con ayuda de un balde o pala se extrae 1 muestra de 3,7 l, sacando una primera capa de 3 cm, procurando no perder el material recolectado mientras se saca a flote.

Con el fin de disminuir el efecto pepa se intenta aumentar el volumen y número de muestras a estudiar.

Figura 1.3. Metodología de muestreo: **a)** Sedimentos en columna b**)** Sedimentos en pozo de río **c)** Sedimentos en barras y/o trampas **d)** Muestreo de 3,7 litros.

1.3.4. Etapa de gabinete 2

Con el fin de calcular la cantidad de Au total por volumen de muestra, cada una será sometida a ensayo de fuego y análisis de espectroscopia de absorción atómica (AAS). Las muestras que sean de interés geológico, ya sea por su disposición a lo largo de la trayectoria del río Butamalal o por su contenido mineralógico, serán estudiadas con el análisis de fluorescencia de rayos X (FRX). Además, se seleccionan 6 muestras para efectuar análisis de concentración de tierras raras (REE).

Con los datos de concentración de oro de las muestras enviadas al laboratorio se procede al cálculo de la ley media. Para ello se hace un cálculo (Anexo 1) por cada punto muestreado y a partir de ellos se estima la ley total para el prospecto.

$$\text{Ley} = \text{masa} / \text{volumen}$$

Se envían las muestras al laboratorio ALS Santiago, donde se someten a ensayos de fuego y AAS para determinar la composición química de las muestras. Además, se envían muestras al Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) para realizar el análisis de FRX de elementos mayores. También se realizan análisis de ICP (Espectroscopia de plasma de acoplamiento inductivo) que darán información respecto a elementos menores y tierras raras. Con los resultados de las concentraciones de Au en los depósitos aluviales, se procede al cálculo de la ley de Au en cada punto y se realiza una estimación de ley general del prospecto. Sumado a esto se hace una interpretación de resultados de todos los análisis. De esta manera se efectúa una aproximación de explotación del recurso aurífero en el sector considerando su escala, equipos necesarios, índices económicos, entre otros, y evaluar una futura exploración de tierras raras.

1.4. Trabajos anteriores

Muñoz Cristi (1946 y 1956) revisa la estratigrafía del Piso Concepción y define dos pisos carbogénicos separados por una secuencia marina: Piso Trihueco en la parte superior y Piso Curanilahue en la parte inferior, al cual divide en tres miembros: Miembro Lota, Miembro Intercalación y Miembro Colico. En 1956 define las Formaciones Curanilahue, Boca Lebu, Trihueco y Millongue en el Terciario de Arauco.

Ferraris y Bonilla (1981) confeccionan un mapa geológico preliminar de la Hoja Arauco- Lebu a escala 1:250.000 y describen las unidades geológicas presentes.

Hintze y otros (1981) realizan una evaluación geológica del sector los Pehuenches Concesión Lebu, abarcando un área de 140 km^2, donde a través de sondajes identifican y caracterizan las unidades presentes en este sector.

Pineda (1983) realiza un análisis de facies de las unidades meso- cenozoicas de la Península de Arauco y presenta una evolución paleogeográfica durante el Cretácico Superior – Terciario.

Elgueta y Arcos (1994) Estratigrafía basada en datos de pozos.

Brady y otros (1998) realiza una compilación bibliográfica sobre la predicción del drenaje minero asociado a la minería de carbón y la prevención de contaminación en Pennsylvania, Estados Unidos. Incluyendo trabajos de geoquímica de las aguas afectadas por la minería del carbón, hidrogeología, impacto del drenaje sobre la vida acuática y calidad del agua, técnicas analíticas para la predicción de la calidad del drenaje y métodos de prevención.

Earle y Callaghan (1998) estudian el impacto del drenaje minero sobre la vida acuática en la cuenca carbonífera de Pennsylvania, Estados Unidos. Concluyen que los efectos más drásticos sobre la vida acuática son la eliminación de especies de algas, invertebrados y peces, los cuales son causados por un gran volumen de descargas líquidas de bajo pH con altas concentraciones de metales disueltos que drenan hacia corrientes con poca capacidad de neutralización produciendo acumulaciones de precipitados de Fe y Al.

Plumlee y Logsdon (1999) realizan una compilación de trabajos de geoquímica ambiental vinculados a depósitos minerales. Menciona los efectos ambientales y en la salud que provocan las actividades mineras a través de una combinación de procesos geológicos, geoquímicos y biológicos, y describe los métodos utilizados para evaluar estos efectos.

Rose y Cravotta (1998) determinan la geoquímica de los drenajes de minas de carbón en Pennsylvania, Estados Unidos. Concluyen que estos drenajes varían composicionalmente desde ácidos a alcalinos, dependiendo de la ausencia o presencia de minerales neutralizadores. Además, describen los factores que controlan la velocidad de formación y extensión del drenaje ácido.

Alpers y otros (2000) analizan las concentraciones de Cd, Cu, Pb y Zn presentes en seis sectores del río Sacramento, Estados Unidos, durante un período de muestreo de seis meses. Concluyen que la forma de transporte de los metales (disuelto o coloidal), dependiendo del metal, varía en relación a la distancia de la fuente (sector mineralizado).

Bigham y Nordstrom (2000) realizan un estudio de los hidroxisulfatos de Fe y Al que se forman a partir de aguas sulfato ácidas. Describen tanto las propiedades físicas como las condiciones de formación de estos minerales; dentro de las propiedades físicas mencionan una pobre cristalinidad, lo que muchas veces dificulta su identificación. En relación a las condiciones de formación, concluyen que el pH es la variable principal, donde los hidroxisulfatos precipitan según los siguientes pH: schwertmannita a pH 2.5 - 4.5, jarosita a pH < 2.5, ferrihidrita a pH 6 – 8 y los hidroxisulfatos de Al a pH 4.5 -5.5. Además, mencionan que la schwertmannita y la ferrihidrita (hidroxisulfatos de fe) son metaestables con respecto a la goethita y que la hidrobasaluminita y aluminita (hidroxisulfatos de Al) son metaestables en relación a la alunita y gibbsita.

Kleinmann (2000) realiza una compilación de técnicas, métodos y procedimientos usados en la predicción de la calidad del agua superficial afectada por la minería del carbón en la cuenca carbonífera Apalachiana, Estados Unidos. Explica la importancia de factores geológicos, como paleoclimas, ambiente depositacional de minerales sulfurados de Fe y litología en la calidad del drenaje y factores hidrológicos. Además, describe los métodos usados en la predicción de la calidad del drenaje, los cuales incluyen test estáticos y cinéticos, dando algunas recomendaciones para su utilización.

Lapakko (2002) presenta un resumen de las técnicas y métodos que se utilizan en la caracterización de desechos mineros. Menciona, por ejemplo, en la identificación de desechos mineros abandonados el uso de técnicas no invasivas como imágenes espectroscópicas y métodos geofísicos, en la evaluación de la reactividad de los desechos mineros el uso de test estáticos como el test ABA y en la identificación mineralógica la utilización de técnicas como microscopía óptica, difracción de rayos X (XRD), microscopio electrónico de barrido (SEM) y microsonda electrónica.

Moreno (2004) con la ayuda del análisis de la deformación superficial actual y el estudio del alzamiento de las terrazas costeras pleistocenas, propone un modelo geodinámico preliminar del ante-arco del margen continental de Chile entre los 37º-38°S. Como base de este análisis caracteriza la tectónica del Bloque de Arauco, segmento del ante-arco entre la desembocadura de los ríos Imperial y Bío-Bío.

Shahabpour y otros (2005) estudian los drenajes mineros en las minas de carbón en la región de Kerman en Irán, donde identifican drenajes ácidos (pH 3) en un solo lugar y drenajes alcalinos

ampliamente distribuidos en la zona (pH 7-8.8). Concluyen que la predominancia del drenaje alcalino se debe a la presencia de carbonatos (calizas, dolomitas y como cemento en areniscas), a la inclinación de túneles que permiten un movimiento rápido del flujo de agua, el cual minimiza el tiempo de contacto con los sulfuros, y al bajo contenido de sulfuros en los carbones.

Melnick (2009) Este trabajo explora el control estructural del antearco sobre la segmentación de la ruptura por terremotos, utilizando marcadores geomorfológicos costeros.

Stange (2011) relaciona patrones químicos anormales como anomalías litogeoquímicas, las cuales podrían ser indicativas de zonas mineralizadas con oro en placeres. Los placeres auríferos corresponden exclusivamente a sedimentos fluviales activos, los cuales se han agrupado dentro de dos grandes zonas, denominadas Concepción- Florida y Hualqui-Santa Juana-Quilacoya, las cuales se relacionan principalmente con litologías granitoides.

1.5. Marco geomorfológico

1.5.1. Geomorfología regional

La región del Biobío posee cinco unidades fisiográficas principales según Börgel (1983), dispuestas de modo paralelo con orientación aproximada NE-SW y que, distribuidas de oeste a este corresponden a: planicie marina y/o fluviomarina, Cordillera de la Costa, llano central fluvio-glacio-volcánico, precordillera y cordillera andina (Figura 1.4). De menor extensión superficial, existen cuatro subunidades sin una disposición espacial preferencial, que, según el mismo autor, corresponden a llano central con presencia de morrenas y conos, llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional, cuenca granítica marginal y cordillera volcánica activa.

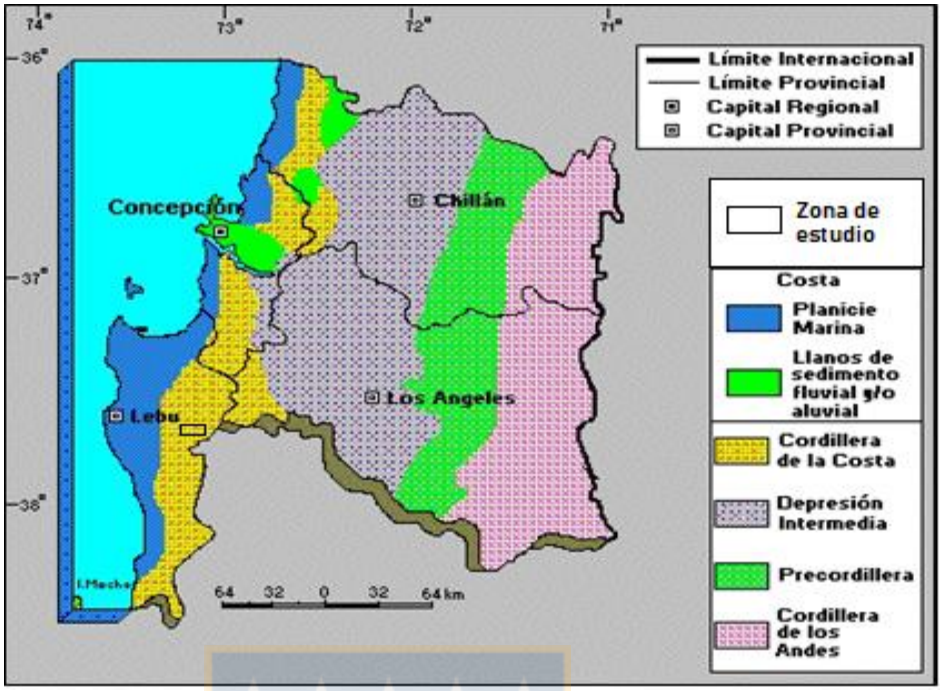

Figura 1.4. Unidades geomorfológicas de la región del Biobío, Extraído de Börgel, 1983.

1.5.2. Geomorfología local

Morfológicamente el Bloque de Arauco queda definido por la Cordillera de Nahuelbuta y las planicies litorales entre los ríos Bíobío e Imperial (Figura 1.5). Se observa que estos ríos limitan un bloque alzado tanto en la cordillera de la costa como en las plataformas costeras. Así se observa que la morfología de la cordillera es de pendiente abrupta hacia el oeste, mientras que al este la pendiente disminuye suavemente (Figura 1.6).

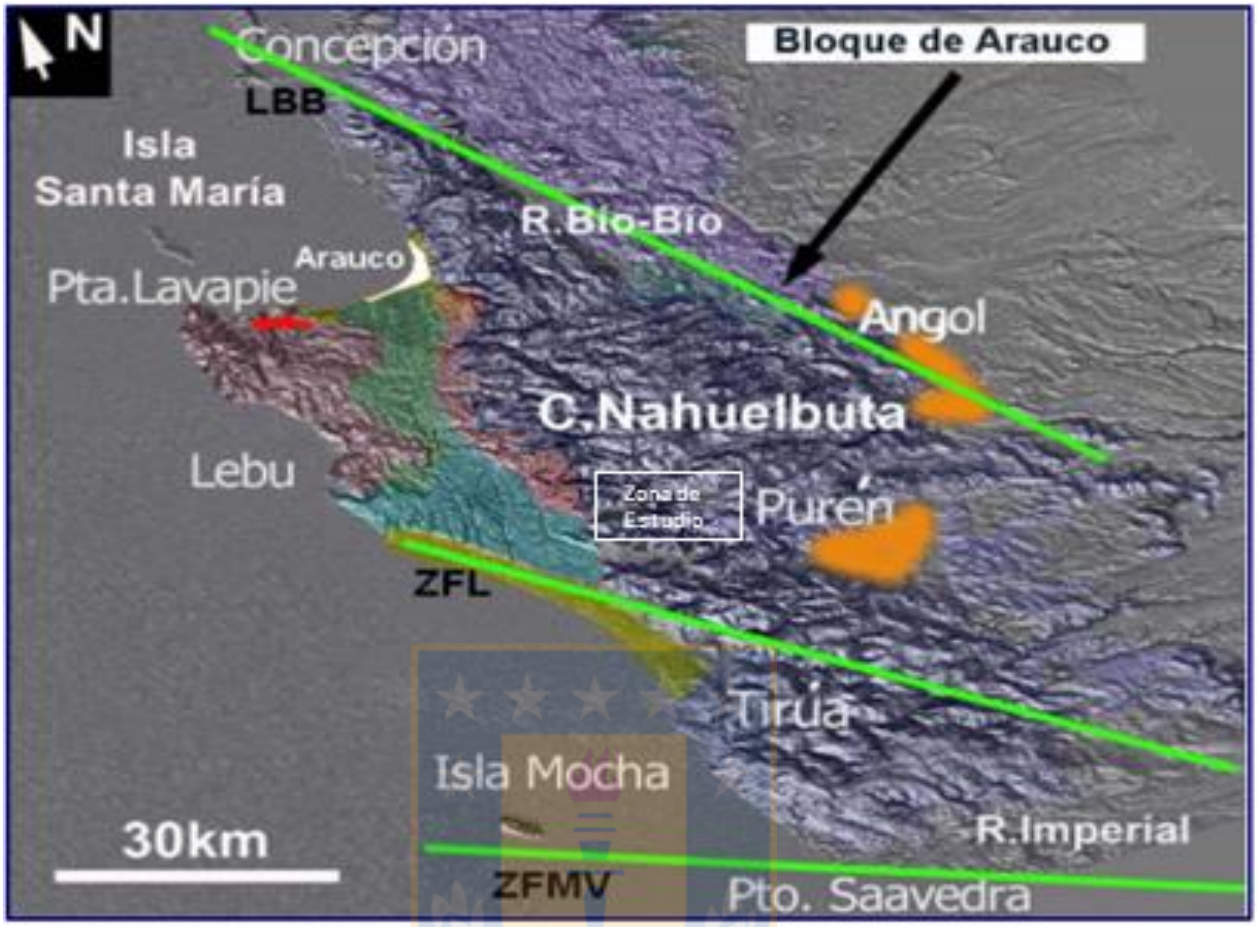

Figura 1.5. Extensión espacial de la Cordillera de Nahuelbuta y el Bloque de Arauco. Entre líneas verdes se trazan las estructuras mayores de ZFMV (Zona de Falla Mocha Villarrica), ZFL (Zona de Falla Lanalhue) y LBB (lineamiento Biobío) El Bloque de Arauco se limita por la ZFMV y los LBB. En azul se esquematiza la Cordillera de Nahuelbuta (C.Nahuelbuta), en tono morado se representa al horst de Punta Lavapie (Pta.Lavapie) y las terrazas de abrasión en las faldas de la C.Nahuelbuta. En celeste se observa las terrazas alzadas pleistocenas. En amarillo se representan las dunas recientes. En blanco, en el sector de Arauco, se esquematiza las líneas de costas holocenas. En rojo al este de Pta. Lavapie se representa el desarrollo de estuarios. En naranjo se exhiben las cuencas intra-montañosas de Angol y Purén. Tomado de Moreno 2004.

La morfología de la C~~c~~ordillera de Nahuelbuta presenta una disposición NW-SE, es decir, es probable que su geometría esté controlada por estructuras del mismo rumbo (Echtler y otros, 2003). La proyección de estas estructuras al oeste coincide con la anomalía vertical de la Península de Arauco. La existencia de las cuencas intra-montañosas de Purén y Angol, cuyo relleno es Eoceno nos indica que la cordillera fue un rasgo previamente emergido. El alzamiento continuo de este alto se ha vinculado en su historia al alzamiento costero, estando ambos muy relacionados espacial y temporalmente. La presencia de las cuencas intra-montañosas es importante en la definición de la dinámica de este bloque, ya que indica límites donde ocurre extensión, relacionada a la tectónica de rotación de bloques (Moreno, 2004).

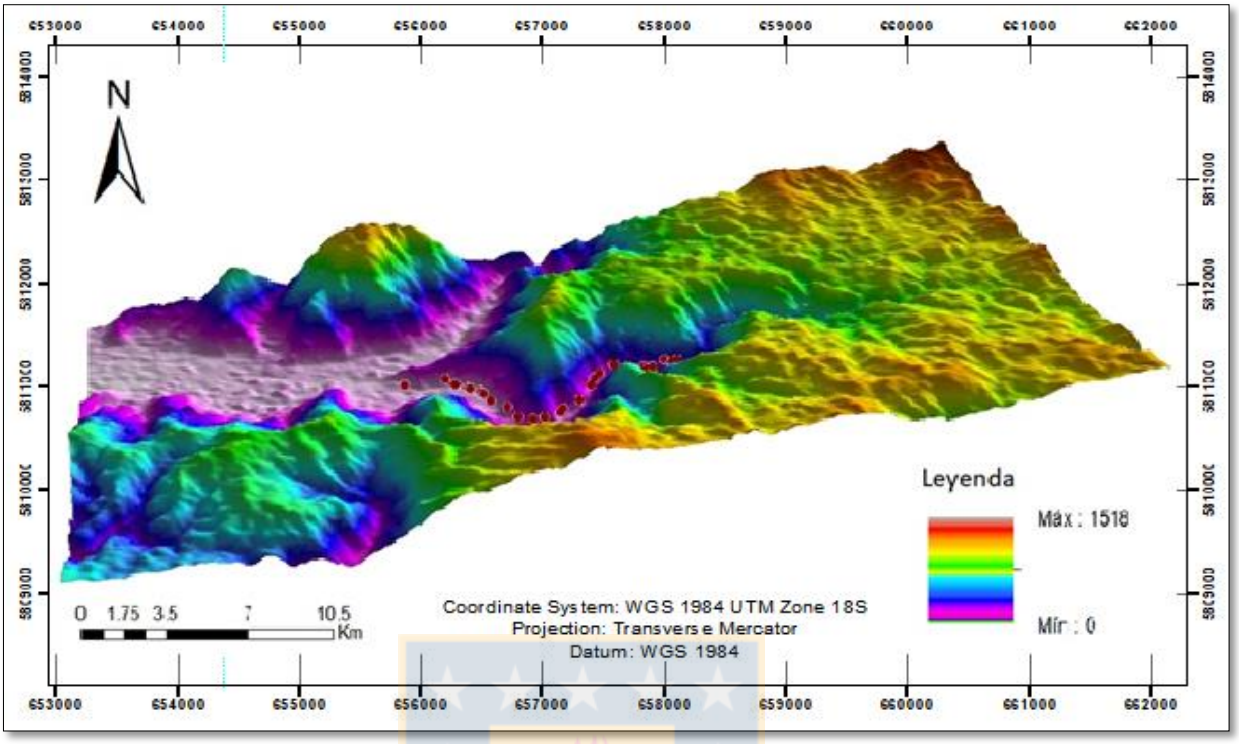

Figura 1.6. Mapa geomorfológico y de elevación del sector Cayucupil. La zona de muestreo se destaca en círculos rojos.

1.5.2.1. Terrazas costeras en la Península de Arauco

En los acantilados costeros alrededor de la desembocadura del río Tubul y en la costa sur del Golfo de Arauco se disponen las secuencias sub-horizontales de la Formación Tubul (García, 1968), las que sobreyacen en discordancia a los sedimentos miocenos. Arcos y Elgueta (1993), mediante el estudio de microfósiles concluyen que la parte basal de la Formación Tubul corresponde al Plioceno Medio (Figura 1.7). Dos divisiones son reconocidas dentro del Plioceno, las que corresponden a dos eventos transgresivos, perfectamente separados (Biró, 1979).

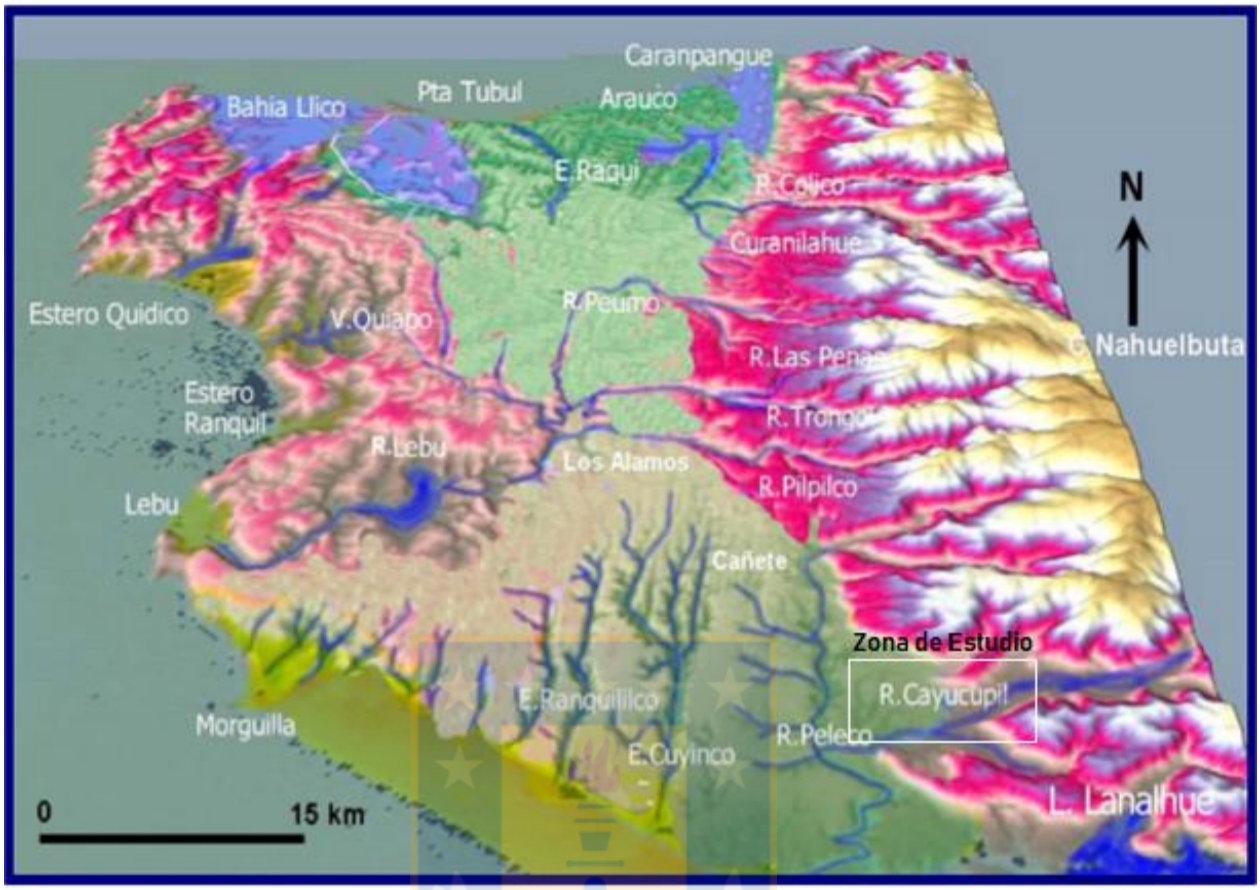

Figura 1.7 Esquema de la distribución de terrazas en la Península de Arauco. En verde: superficies de terrazas pleistocenas; en azul: principales ríos y esteros; en amarillo pardo: dunas adosadas holocenas; en celeste: estuarios. Se observa como en los pies de la Cordillera de Nahuelbuta y en el bloque de Lavapie se desarrollaron terrazas de abrasión correspondientes a las Terrazas Altas. Tomado de Moreno 2004.

Las formaciones terciarias en la Península de Arauco están cubiertas discordantemente por depósitos de ambiente costero pleistocénos de la Formación Arauco (Muñoz Cristi, 1968) y por sedimentos holocenos. Kaizuka y otros (1973) reconoce superficies de morfología plana, formadas en ambientes de transgresión marina por efectos inter y postglacial (Figura 1.8). En orden descendente de altitud son: Las Nochas, Buena Esperanza y Cañete. Mardones (1999) describe siete niveles de terrazas de abrasión según su altitud, que se disponen en franjas paralelas a la línea costera. Moreno y otros (2003) distinguen la extensión espacial de las superficies aterrazadas de la Península de Arauco, en base al levantamiento de terreno, análisis sedimentológico, sensores remotos y curvas isobáticas. Se simplifica la clasificación de los niveles a cuatro superficies principales: terrazas altas, terrazas medias, terrazas bajas y los depósitos holocenos (Moreno, 2004; Anexo 2).

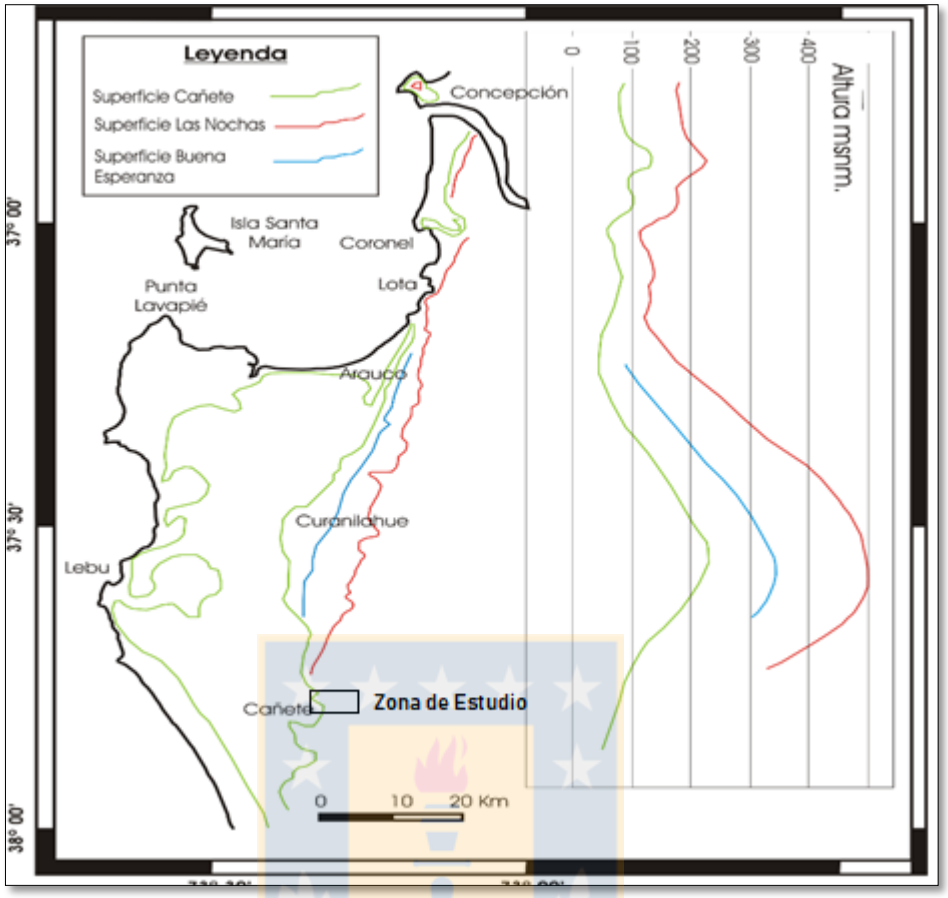

Figura 1.8. Mapa con diferentes niveles de terrazas definidas por Kaizuka (1973).

1.6. Clima

En la zona de estudio domina un clima templado cálido, con lluvias en invierno y humedad atmosférica alta (Figura 1.9). La estación seca es de cuatro a cinco meses con un régimen térmico moderado producto de la influencia marina en el sector. Las temperaturas se mantienen alrededor de los 10°C la mayor parte del año y las precipitaciones se concentran entre mayo y agosto, las cuales equivalen a cerca del 70% del total anual (Dirección Meteorológica de Chile). Particularmente, el río Biobío marca la transición entre los climas templados secos al norte y los climas templados húmedos y más lluviosos que desarrollados al sur de éste (Dirección Meteorológica de Chile). De esta forma, son reconocidos cerca de cuatro variaciones climáticas menores o subclimas (Devynck, 1970, en Creixell, 2001):

El sector costero, las zonas altas y hacia las laderas occidentales de la Cordillera de la Costa, está caracterizados por un clima templado húmedo. Las precipitaciones anuales fluctúan entre 1.200 mm y 2.000 mm de norte a sur y la humedad es más o menos constante.

- Hacia el interior, el mismo clima templado húmedo posee temperaturas menos extremas y las precipitaciones alcanzan los 1.300 mm anuales con un marcado periodo seco que dura cuatro meses. Las temperaturas del valle longitudinal tienen mayor contraste entre día y noche.

- En el sector norte es posible observar un clima templado mediterráneo que abarca toda la zona intermedia, los bordes orientales de la Cordillera de la Costa y las zonas más bajas de la Precordillera.

- Ya en la Cordillera de los Andes y a una altura superior a los 1.500 m s. n. m. es desarrollado un clima frío de altura con precipitaciones sobre los 2.000 mm anuales y bajas temperaturas, las cuales permiten el desarrollo de nieves permanentes en las alturas.

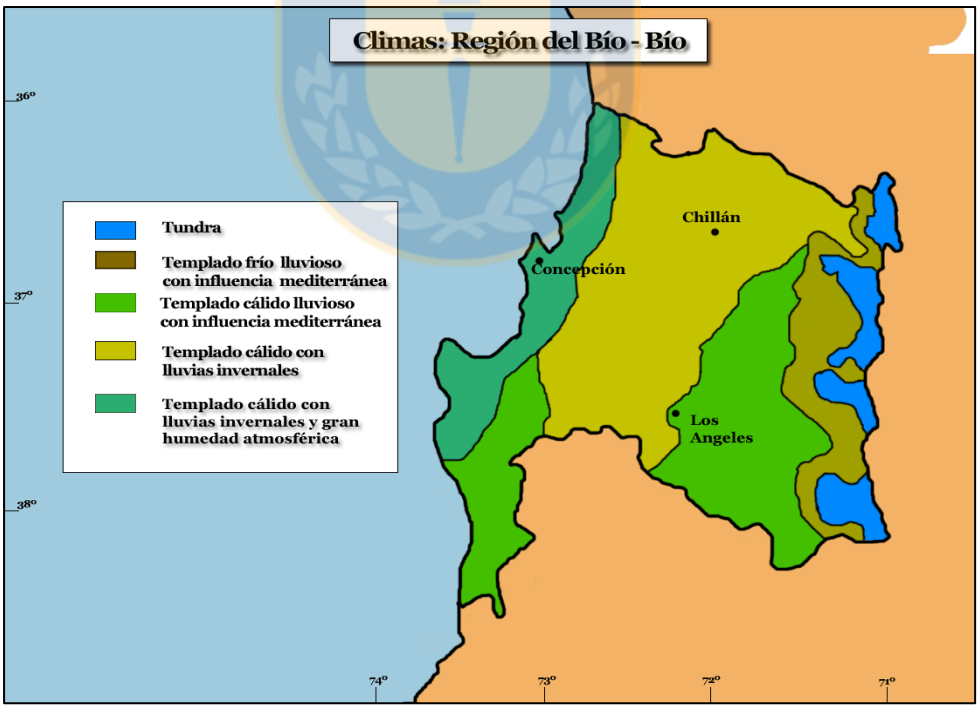

Figura 1.9 Mapa de los diferentes tipos de clima que imperan en la región del Biobío. Tomado de Geología de Campo 2015.

1.7. Drenaje

El drenaje de la zona de estudio (Figura 1.10) corresponde a aguas que bajan desde la Cordillera de Nahuelbuta y se unen al río Butamalal en pleno valle, formando un afluente de 22 km aproximadamente de largo que va en dirección oeste y entre 1-20 m de ancho, con decenas de meandros con depósitos de arena y barras entre 1-30m. En invierno el caudal aumenta considerablemente por los riachuelos, vertientes y bajadas de aguas aledañas que alimentan al río Cayucupil producto de las incesantes lluvias provocando serios problemas en la zona circundante. Posee una gran energía con numerosos rápidos y movimientos constantes de bolones.

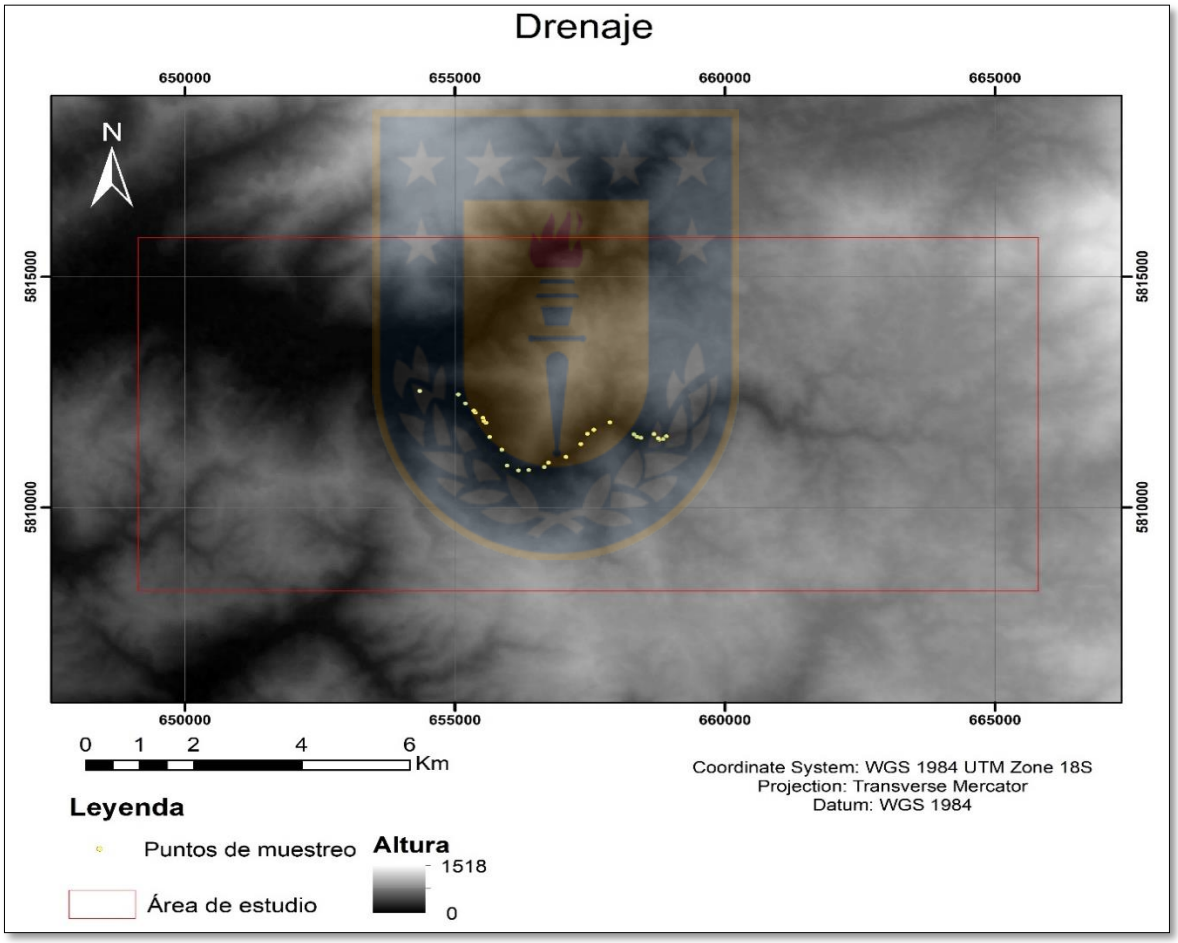

Figura 1.10. Imagen DEM, drenaje del sector Cayucupil.

1.8. Agradecimientos

Agradezco a la Empresa Nacional de Minería y al personal a cargo por darme todas las herramientas necesarias para permitir desarrollar mi Memoria de Título.

Agradezco al departamento de Ciencias de la Tierra por todos los conocimientos entregados a través del personal docente y no docente, en forma especial a los profesores Luis Arturo Quinzio, Abraham González y Luis Vásquez por su humanidad y vocación más allá de la academia. A mi profesora guía Fernanda Álvarez Amado por su apoyo, paciencia, eficiencia y conocimientos entregados dentro y fuera del aula.

Agradezco a la persona que me apoyó en todas las instancias de mi existir, sean buenas como no tan buenas, la que ayudó e impulsó mis ideas al límite. A la maestra por vocación, artífice de cada meta lograda, a ella, a mi madre, la persona más importante de mi vida, sinónimo de Amor, la que hizo posible llegar hasta este punto suspensivo.

A mi padre, que cultivó y perpetuó el deseo y amor hacia la tierra, hacia la contemplación de la naturaleza, haciéndome pensar que las montañas eran mi hogar y no mi casa.

Agradezco a Javiera por su amor, apoyo y energía.

A mi hermano Luciano, por sus preguntas y respuestas de vida.

A mi compañero de vida universitaria Manuel Faundes, por su amistad incondicional, por el trabajo en equipo durante los años de carrera y por forjar lazos dentro y fuera de la casa de estudios.

Agradezco a mi compañera incondicional María-Fernanda Freedman por hacer este camino más ameno y aportar a mi crecimiento académico y personal.

Agradezco a la naturaleza el privilegio de poder contar sus historias, sus misterios y ayudar a expandir mi conciencia-mente.

Agradezco a Dios, al creador, Alfa y Omega, por permitir estudiar su creación y dedicarme a ello y a través de su palabra guiarme en momentos de duda.

2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1. Generalidades

En la región estudiada han sido reconocidas unidades metamórficas paleozoicas, rocas sedimentarias (continentales y marinas) y volcánicas de edades Triásico a Cuaternario (Ferraris, 1981), así como rocas intrusivas representadas por granitos, granodioritas y dioritas del Paleozoico que constituyen el Batolito Costero del Sur (Figura 2.1).

Las rocas más antiguas corresponden a rocas metamórficas de la Serie Oriental depositadas durante el Paleozoico (Hervé, 1977), que constituyen, junto a la Serie Occidental, el Basamento Cristalino o Metamórfico (González-Bonorino, 1970). Asociado al mismo período, e intruyendo al Basamento Metamórfico, aflora la unidad Batolito Costero del Sur (Hervé, 1976), la cual a su vez infrayace a las rocas sedimentarias continentales y marinas de la Formación Santa Juana depositada durante el Triásico (Tavera, 1960). Posterior a ello, ocurre la deposición de los estratos de la Formación Quiriquina (Biró, 1982), que infrayacen a las rocas terciarias. Finalmente, procesos eólicos y fluviales determinaron la acumulación y erosión de los Sedimentos de Valles Actuales y de Terrazas Fluviales depositados en el cauce del río Biobío hasta conformar la morfología actual (Ferraris, 1981).

Las estructuras de la zona son plegamientos en la Serie Oriental del Basamento Metamórfico y en las rocas de la Formación Santa Juana, mientras que las unidades sedimentarias terciarias y pleisto-holocenas están sub-horizontales o suavemente basculadas (Ferraris, 1981). El control estructural está, además, caracterizado por la presencia de fallas y diaclasas que representan distintos eventos tectónicos.

2.2. Rocas metamórficas

Las rocas que constituyen el Basamento Metamórfico corresponden a las más antiguas que afloran en el área, dispuestas como franjas paralelas de orientación NNE-SSW (Gajardo, 1981).

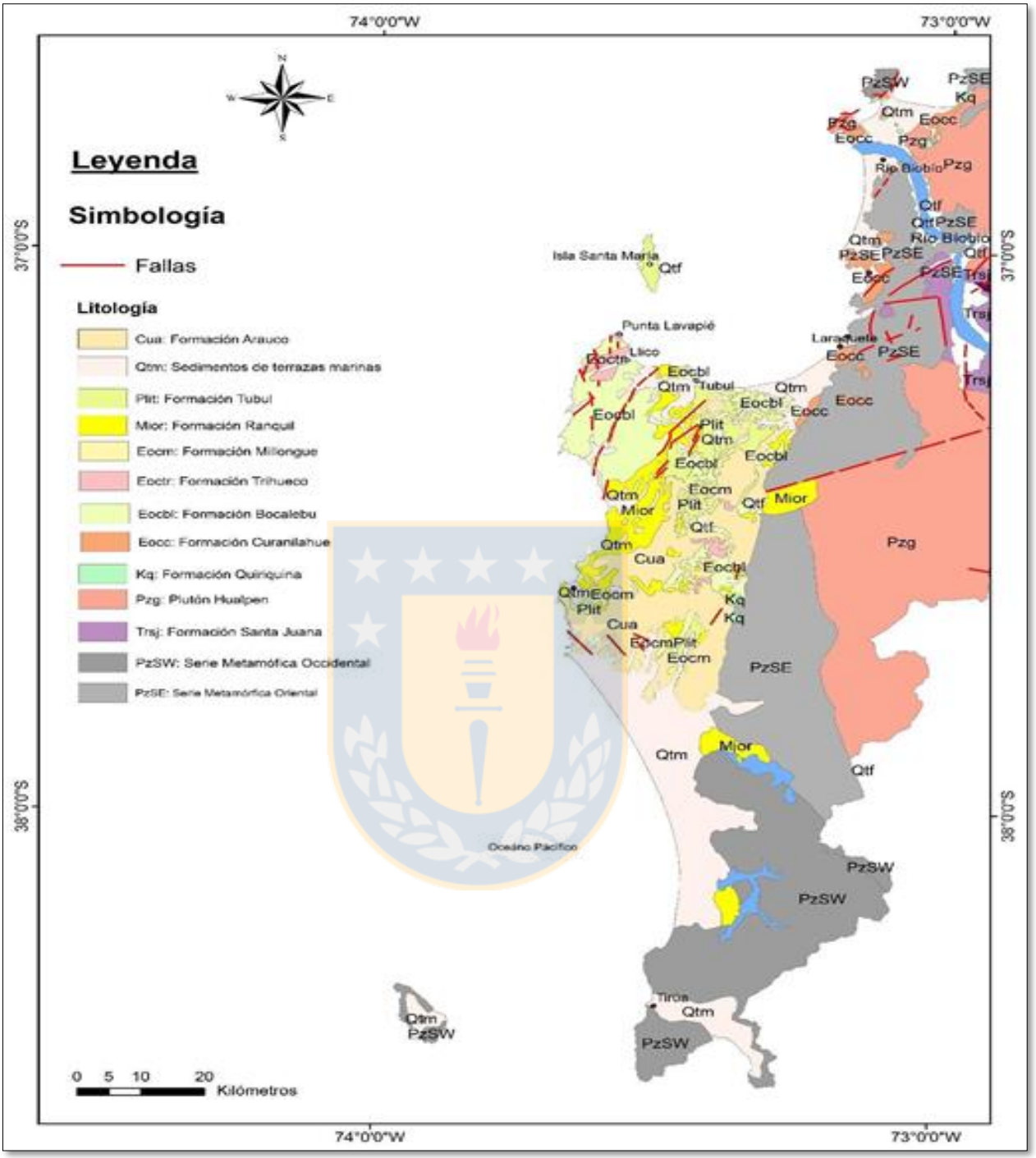

Figura 2.1. Mapa geológico regional modificado de Laboratorio Geomática Universidad de Concepción.

Los complejos metamórficos y rocas intrusivas, de edad Paleozoico Superior, han sido interpretados como un complejo de subducción, acrecionado al margen occidental de Gondwana durante el Carbonífero-Pérmico (González-Bonorino, 1971; Hervé, 1977).

Las rocas metamórficas que afloran en el área de estudio constituyen el basamento de las rocas expuestas y pertenecen al Cinturón Metamórfico Pareado de Chile Central, que corresponde a dos franjas paralelas, la Serie Occidental (de alto P/T) y la Serie Oriental (de bajo P/T) (Willner y otros, 2005). Afloran a lo largo de la Cordillera de la Costa, entre Chañaral (26ºS) y Puerto Williams (55ºS) y constituyen prismas acrecionarios fósiles (González Bonorino y Aguirre, 1970; en Willner 2005). Estas dos series muestran diferencias notables en relación con sus litologías, asociaciones mineralógicas, protolitos y condiciones de metamorfismo (González Bonorino y Aguirre, 1970; Hervé, 1977; Glodny y otros, 2005; en Willner, 2005). Cabe destacar que mientras la Serie Occidental representa un prisma acrecionario paleozoico, la Serie Oriental representa el retro-wedge (retro cuña de subducción), menos deformado (Vásquez, 2001).

Las rocas de la Serie Oriental son extremadamente homogéneas, compuesta por pizarras, filitas y metapsamitas, correspondiendo a una secuencia metasedimentaria clástica de grano fino, que conforma una secuencia turbidítica que incluye alternancias de pelitas y metagrauvacas de muy bajo grado ± rocas calcosilicatadas (Hervé, 1988). Se encuentran intruidas en su parte oriental por granitoides calcoalcalinos (Hervé, 1977; Creixell, 2001) del Carbonífero Superior (~300 Ma), perteneciente al Batolito Costero del Sur (Hervé y otros, 1987 en Vásquez, 2001) que representarían el arco magmático. Ellos presentan una fuerte componente cortical (Lucassen et al., 2004, en Vásquez, 2001). Los intrusivos generan en las rocas metamórficas un metamorfismo regional de contacto que se expresa en 3 zonas de metamorfismo creciente hacia el batolito: zona de biotita, zona de andalusita y zona de silimanita (Vásquez, 2001).

La Serie Occidental, está constituida por esquistos de cuarzo feldespático, micaesquistos y esquistos anfibolíticos, cuarcitas, metabasitas y metacherts ferruginosos, con un grado de metamorfismo casi exclusivamente de la facies esquistos verdes, de presión intermedia a alta, de 4 a 9 kbar (Collao y otros, 1982) y con temperaturas que alcanzaron casi los 500 °C, junto a estas rocas aparecen intrusivos máficos y ultramáficos, intensamente serpentinizados (Collao, 2000).

En relación con el contacto entre ambas series, Hervé (1977) señala que a lo largo del margen occidental de la Cordillera de Nahuelbuta (entre las ciudades de Concepción y Cañete) la Serie Oriental y la Serie Occidental se ponen en contacto mediante una falla de carácter regional de rumbo N-S, la cual presenta un gran desplazamiento vertical. Por otra parte, Glodny y otros (2008),

propone que el contacto entre ambas series se desarrollaría a lo largo de una zona de cizallamiento transcontinental de dirección NW-SE, denominada Zona de Falla Lanalhue y estaría ubicada entre el S de Purén y Contulmo.

2.3. Rocas intrusivas

En la región del Biobío, las rocas intrusivas paleozoicas afloran a lo largo de la Cordillera de la Costa, desde el límite regional con la región del Maule por el norte, hasta el Sistema de Falla Lanalhue al sur, y son conocidas bajo el nombre del Batolito Costero del Centro Sur de Chile. En el área de estudio, estas rocas son agrupadas en el Complejo Nahuelbuta, donde predominan granitoides, seguidos de dioritas. Las litologías más abundantes dentro de los granitoides son tonalitas y granodioritas, esencialmente con cuarzo, microclina, plagioclasa, hornblenda y biotita, mientras que las dioritas poseen clinopiroxeno parcialmente alterado a hornblenda. Las edades de las rocas intrusivas reconocidas en el sector han sido obtenidas por diversos autores (Hervé y otros, 1976; Hervé y otros, 1988; Lucassen y otros, 2004) y arrojan un rango de 305-295 Ma, aproximadamente; éstas serían las edades de cristalización del batolito (Hervé y otros, 1976) y corresponderían al remanente del arco magmático del Carbonífero Superior-Pérmico (Glodny y otros, 2008). Los magmas que dieron origen a estos batolitos son del tipo calcoalcalinos, cercanos al manto superior y/o corteza inferior, con contaminación de corteza similar en composición a las rocas metamórficas que hospedan al batolito según razones de $^{87}Sr/^{86}Sr$ entre 0,705 y 0,715 (Hervé y otros, 1976; Creixell, 2001; Parada y otros, 2007). Pueden ser clasificados como granitoides tipo I peraluminosos. Los intrusivos mesozoicos corresponden a monzogranitos y monzonitas asociados a diques porfídicos de composición granodiorítica a tonalítica.

2.4. Rocas estratificadas

2.4.1. Rocas mesozoicas

Las rocas mesozoicas que afloran en las regiones corresponden a secuencias sedimentarias del Cretácico Superior, pertenecientes a la Formación Quiriquina.

2.4.1.1 Formación Quiriquina (Maastrichtiano Superior)

Definida formalmente por Biró (1982) cuya localidad tipo se encuentra en La Bahía las Tablas ubicada al NW de la isla Quiriquina. Esta unidad se encuentra formada por un conglomerado basal con clastos de rocas metamórficas y fósiles, seguido de areniscas verdes glauconíticas que presentan localmente fósiles y concreciones. En la provincia de Arauco aflora en varios puntos al norte y sur de Curanilahue y correspondería a la base de las secuencias terciarias.

La edad de esta formación correspondería al Maastrichtiano Superior, de acuerdo con el contenido de fósiles marinos presente en sus estratos mientras que el ambiente depositacional de esta formación corresponde a un ambiente marino costero, probablemente de la zona intermareal (Stinnesbeck 1986 en Salazar, 2004).

2.4.2. Rocas cenozoicas

2.4.2.1. Formación Pilpilco (Eoceno Inferior)

Definida formalmente por Muñoz Cristi (1968) en el río Pilpilco ubicado a 15 km al sur de Curanilahue, está representada por una secuencia de areniscas verdes de grano medio a grueso de carácter marino litoral. En algunos sectores presenta características continentales en la base, con brechas, conglomerados y areniscas conglomerádicas, las que pasan gradualmente a arcillas límnicas y posteriormente a areniscas verdes. Esta formación ha sido reconocida como una franja que se extiende al oeste de los afloramientos cretácicos (Pineda, 1983). Se dispone en inconformidad sobre el basamento paleozoico y/o en paraconformidad con las rocas cretácicas, hacia el sector occidental de la provincia de Arauco engranan lateralmente con la Formación Boca Lebu (Pineda, 1983). El espesor de la Formación Pilpilco es de 150 m, el cual disminuye hacia el sur (Muñoz Cristi, 1946).

2.4.2.2. Formación Curanilahue (Eoceno Inferior)

Definida por Muñoz Cristi (1946) tiene su localidad tipo en el área de Curanilahue, en la provincia de Arauco. Está compuesta de tres miembros: ***Miembro Lota, Miembro Intercalación y Miembro Colico.***

Miembro Lota: Es el miembro basal de esta formación, tiene una potencia de 175 m y se compone de areniscas de grano fino a grueso en parte conglomerádicas, conglomerados finos e intercalaciones de arcillolitas, además este miembro posee 9 mantos de carbón cuya potencia va de centímetros hasta 3 metros.

Miembro Intercalación: Ubicado entre el Miembro Lota y el Miembro Colico, tiene una potencia de 70 m y consta de areniscas verdes marinas, algo calcáreas, con escasos bivalvos mal conservados, de carácter litoral costanero.

Miembro Colico: Corresponde al nivel superior de esta formación, es de origen continental y presenta 5 mantos de carbón. Constituido por areniscas gruesas y conglomerados en la base, seguidos de areniscas finas y gruesas y lutitas lacustres, donde se intercalan los mantos de carbón, en la parte superior presenta areniscas de grano fino a grueso. La potencia de este miembro varía entre 90 y 110 m. Muñoz Cristi (1946).

2.4.2.3. Formación Boca Lebu (Eoceno Inferior)

Definida por Muñoz Cristi (1956) en el sector de Boca Lebu, donde aflora su sección superior con limolitas y areniscas muy finas, arcillosas y fosilíferas, que contienen niveles de concreciones calcáreas. La sección principal consiste en areniscas gris verdosas con contenidos moderados de fósiles marinos, mientras que la base está compuesta de areniscas cenicientas con guías de arcillas. Ha sido reconocida en subsuperficie en sondajes realizados por el comité de carbones de CORFO en Hintze y otros (1981) con 400 m de areniscas finas y lutitas, relativamente homogéneas, glauconíticas de color gris medio verdoso con contenido fosilífero, aunque según García (1968) el espesor total de la Formación Boca Lebu es de 650 m.

Esta Formación se distribuye en toda la zona de Arauco. En el sector oriental los afloramientos se disponen al oeste de la Formación Curanilahue y se observan desde el río Carampangue hasta el río Trongol. En el sector occidental afloran en la costa sur de Lebu y al sur de Punta Lavapié (Pineda, 1983). Esta formación se encuentra concordantemente sobre la Formación Curanilahue e infrayace de igual forma a la Formación Trihueco, además engrana lateralmente con las formaciones Pilpilco y Curanilahue (Pineda, 1983).

La edad de esta formación ha sido asignada al Eoceno Inferior en base a la presencia de los fósiles: *Nassa araucana, Tellina carbonaria* var *complanata, Turritella landbecki* y *Mytilus striatus* (Tavera, 1942).

2.4.2.4. Formación Trihueco (Eoceno Medio)

Definida por Muñoz Cristi (1956) su localidad tipo se encuentra en los alrededores de las minas de Trihueco al sur de Los Álamos. Se caracteriza por presentar areniscas de grano medio-grueso en parte conglomerádicas y arcillosas, con intercalaciones de lutitas y mantos de carbón. Además, presenta algunas intercalaciones marinas (Pineda, 1983). Esta formación se dispone concordantemente sobre la Formación Boca Lebu e infrayace en concordancia a la Formación Millongue, ambos contactos son transicionales.

Los afloramientos más orientales conforman una franja paralela al oeste de la Formación Boca Lebu que se extiende a través de El Huacho, el río Curanilahue, Estero Paso Hondo, río Trongol, río Pilpilco y Estero Cuyinco. En el sector occidental aflora en varios sectores a lo largo de la Costa entre Punta Lavapié y Punta Chicaucura. Hacia el sur aflora entre Boca Lebu y Punta Bocarripe, entre las Cuevas y Punta Millongue y en el curso inferior del río Lebu. Más al sur aflora en Punta Lorcura.

Hintze y otros (1981) en base a sondajes realizados en el área, divide esta formación en tres zonas:

Areniscas piríticas basales: Caracterizada por rocas sedimentarias cuarcíferas de grano medio a grueso de color gris claro con nódulos de pirita y laminaciones de arcillolitas, las cuales disminuyen hacia la base.

Areniscas y lutitas con mantos de carbón: Esta sección de carácter predominantemente continental está constituida por areniscas cuarcíferas de color gris claro con frecuentes laminaciones de arcillolitas y limolitas de color gris oliva, presenta además arcillolitas carbonosas con restos vegetales y pirita diseminados. El rasgo más importante de esta sección es la presencia de ocho mantos de carbón: ***Huitrero, Bronciento, Pequeño, Sin nombre, Ratón, Chiflón, Chico y Alto***, los que se agrupan en tres conjuntos estratigráficos nombrados de techo a base: Conjunto Huitrero - Bronciento, Conjunto intermedio y Conjunto Chico- Alto, este último es el que se

explota actualmente en la mina Fortuna (Muñoz Cristi, 1956). En el piso del manto Alto aparece una arenisca blanquecina, pirítica y caolinítica que indica el comienzo del tramo de areniscas piríticas basales de la Formación Trihueco. La distancia vertical entre el primer manto (Huitrero) y el último (Alto) es de aproximadamente 150 m.

Areniscas Superiores o transicionales: Constituidas por areniscas de grano grueso a conglomerádicas con clastos de cuarzo y pirita en regular cantidad, ocasionalmente disminuye su granulometría hasta alcanzar el rango de areniscas finas y limolitas. La mitad superior está caracterizada por laminaciones limo-arcillosas que señalan el cambio gradual a la Formación Millongue. La potencia de esta sección varía desde 40 m hacia el oeste a 120 m hacia el norte.

La potencia de esta formación ha sido medida en afloramientos ubicados entre las Cuevas y Punta Millongue al norte de Lebu con un espesor de 290 m entre base y techo (Hintze y otros, 1981). La edad ha sido asignada al Eoceno Medio de acuerdo al contenido fosílifero en las intercalaciones marinas. Los fósiles característicos son: *Turritella landbecki, Hercoglossa* cf. *peruviana, Pseudoliva retusa, Eucrassatella ponderosa, Mytilus striatus, oxyrrhyncha, Mactra* sp. (Tavera, 1942).

2.4.2.5. Formación Millongue (Eoceno Medio- Eoceno Superior)

Definida por Muñoz Cristi (1956) como una secuencia transgresiva constituida por un conglomerado basal, areniscas de grano grueso a fino, limolitas, lutitas o arcillolitas. Su localidad tipo se ubica en la costa al norte de Lebu, en la zona norte de Punta Millongue, donde aflora con un espesor de 500 m aproximadamente (Muñoz Cristi, 1946). Según Hintze y otros (1981) la potencia máxima reconocida en sondajes en el área de Lebu es de 325 m y consiste en areniscas glauconíticas de color gris verdoso con macro y microfauna, la cual es abundante en algunos niveles y con ocurrencia ocasional de pirita. La granulometría de estas rocas puede disminuir hasta llegar a areniscas finas a limosas, diferenciándose dos tramos:

Superior: Constituido de limonitas glauconíticas con macro y micro fauna.

Inferior: Compuesto por areniscas finas cuarcíferas algo arcillosas.

Los afloramientos de la Formación Millongue se distribuyen en dos franjas paralelas: una oriental, que aflora en el valle del río Pilpilco, en Trongol, Curanilahue, estero Chupalla, río Cupaño y quebrada Ranquilco; y una occidental que corresponde a afloramientos costeros en Punta Lavapié, Punta Carnero, Caleta Viel, Punta Millongue, Punta Bocarripe, Chimpel y Punta Morguilla (Gallardo, 1995).

Tavera (1942) asigna a esta formación una edad Eoceno Medio Superior y Eoceno Superior, por su contenido de macrofauna, cuyos fósiles característicos son: *Turritella landbecki* var *angusta Phil*, *Cancer araucanus*, *Hercoglossa* cf. *peruviana*, *Pinna Wenzeli* sp., *Fusas foncki Phil*.

2.4.2.6. Formación Ranquil (Mioceno)

Definida por García (1968) posee su localidad tipo en la costa de Arauco, en Caleta Ranquil, a 11 km al norte de Lebu, donde tiene aproximadamente 100 m de potencia. Está constituida de conglomerados fino-arenosos de color gris claro, tobáceos, que se alternan con areniscas finas y gruesas de color verde que gradan hacia la parte superior a areniscas finas, limolitas y lutitas tobáceas con niveles fosilíferos.

Se distribuye principalmente en la parte occidental de la Provincia de Arauco, en las cercanías de Lebu, en los esteros el Manzano y Guellaco, entre Caleta Ranquil y Quiapo y hacia el oriente cerca de Los Álamos. Esta formación se encuentra en paraconformidad con las formaciones del Eoceno e infrayace en discordancia angular a la Formación Tubul. (Pineda, 1983).

Hintze y otros (1981) han determinado mediante sondajes un espesor máximo de 688 m de areniscas marinas de grano fino y arcillolitas con glauconita y abundante microfauna; las que pueden tener clastos monominerales de cuarzo y ocasionalmente pirita.

Tavera (1942) asigna a la Formación Ranquil una edad Mioceno, por la presencia de los siguientes fósiles**:** *Dentalium lebuensis*, *Venus volckmanni*, *Tellina lebuensis y Anatina araunana*, *Hemychenopus* cf. *araunanus Steinm y wilck.*, *Dentalium sulcosum Sow y Micraster valdivianum.*

2.4.2.7. Formación Tubul (Plioceno)

Definida por García (1968) su localidad tipo se encuentra en la costa al oeste de la ciudad de Arauco, cerca de la desembocadura del río Tubul, donde aflora con un espesor de 100 m de areniscas arcillosas y limolitas generalmente fosilíferas. Tiene una disposición subhorizontal sobreyaciendo a las formaciones del Eoceno y Mioceno en discordancia angular, además infrayace a los depósitos de edad Pleistoceno.

Los afloramientos de la Formación Tubul se distribuyen en dos sectores: el sector norte desde Punta Pichicui y alrededores de Arauco hasta la latitud del estero La Chupalla y Villa Alegre. Luego los afloramientos se interrumpen y reaparecen en el sector sur, al sur de los Álamos, a lo largo de las quebradas Ranquilco y el Tique, del Estero Licauquén y áreas de las minas de Trihueco.

2.4.2.8. Depósitos de areniscas y arcillolitas marinas (Plioceno)

Los depósitos de areniscas y arcillolitas marinas fueron definidos informalmente por Ferraris y Bonilla (1981). Consisten en areniscas y arcillolitas, las que se distribuyen ampliamente en la península de Arauco, donde la base corresponde a la Formación Tubul y el techo a la superficie actual y depósitos de dunas y playas del Pleistoceno- Holoceno.

2.4.2.9. Depósitos del Pleistoceno – Holoceno

Los depósitos de esta edad han sido definidos informalmente por Ferraris y Bonilla (1981) como "**depósitos de dunas y playas**" los que consisten en arenas poco cementadas que sobreyacen a todas las unidades más antiguas. Sin embargo, Veyl (1961 en Mendoza, 2001) agrupa estos depósitos en litorales y continentales, donde los depósitos litorales conforman varios niveles de terrazas marinas, dunas y arenas de playa, mientras que los depósitos continentales forman terrazas aluviales y depósitos aluviales recientes, que se ubican en los lechos de los ríos, esteros y cauces menores.

2.5. Marco tectónico

La zona de estudio presenta el desarrollo de megaestructuras regionales que controlan la tectónica en estas latitudes. En el arco volcánico se presenta una transición entre el término del Sistema de Falla de Liquiñe Ofqui (SFLO), dominada por una ceinemática dextral y el comienzo de fallamiento imbricado compresional hacia el norte de los 38°S (Folguera et al., 2002). El antearco está marcadamente cortado por estructuras NW-SE. Estas estructuras están muy bien expuestas en la Cordillera de la Costa y en las cercanías de la fosa (Figura 2.2). Los Lineamientos Bío-Bío (LBB), la Zona de Falla Lanalhue (ZFL) y la Zona de Falla Mocha Villarrica (ZFMV) son las principales estructuras que afectan y controlan la dinámica del Bloque de Arauco (Moreno, 2004). Estas estructuras corticales han sido interpretadas como zonas de debilidades de una tectónica pre-andina, las cuales han influenciado la segmentación del ante-arco en estas latitudes (Echtler et al., 2003). Además, las estructuras NW-SE tienen una excelente expresión fisiográfica en el talud continental creando verdaderos surcos en el talud, los cuales son aprovechadas por los cañones de los ríos principales en la zona, como los ríos Calle-Calle, Imperial y Bío-Bío, los cuales transportan una gran cantidad de sedimentos al canal axial de la fosa (Figura 2.2). Según Moreno (2004), la morfología de la plataforma continental coincide con la extensión hacia el oeste de la forma de la actual línea de costa, es decir, el alzamiento de la plataforma continental controla directamente las planicies litorales, observándose que las zonas alzadas (Península de Arauco e Isla Mocha) tienen una continuación en la plataforma continental actualmente sumergida.

2.5.1. Zona de Falla Lanalhue (ZFL)

La ZFL (Melnick y otros, 2003) constituye uno de los rasgos estructurales mayores en el área de estudio (Figuras. 2.1 y 2.2) presentando un rumbo preferencial NW-SE, semejante a otras estructuras del Paleozoico Superior–Triásico (Echtler et al., 2003). La ZFL se extendería desde la zona de acople a 20 km de profundidad hasta aproximadamente 3-5 km de la superficie (Moreno, 2004) y coloca en contacto la Serie Occidental con la Serie Oriental del basamento metamórfico de la Cordillera de Nahuelbuta (Hervé, 1977; Glodny, 2002). Se extiende desde Punta Morguilla al oeste, hacia el sureste por el Lago Lanalhue hasta las cercanías de Temuco. En el Valle Central no se observan rasgos morfológicos de la falla debido a la cobertura cuaternaria. Al norte de esta zona de falla la Cordillera de Nahuelbuta se comporta como un bloque que alcanza alturas de 1.530

m. s n m, el cual disminuye continuamente hacia el norte y que limita la Península de Arauco por el sur. Esta estructura estaría ligada al anómalo alzamiento del Bloque de Arauco (Moreno, 2004). De esta manera, las estructuras NW-SE son un rasgo común en la Cordillera de Nahuelbuta, donde el drenaje que afecta a la cordillera se inscribe en esta dirección, así como también las máximas cumbres.

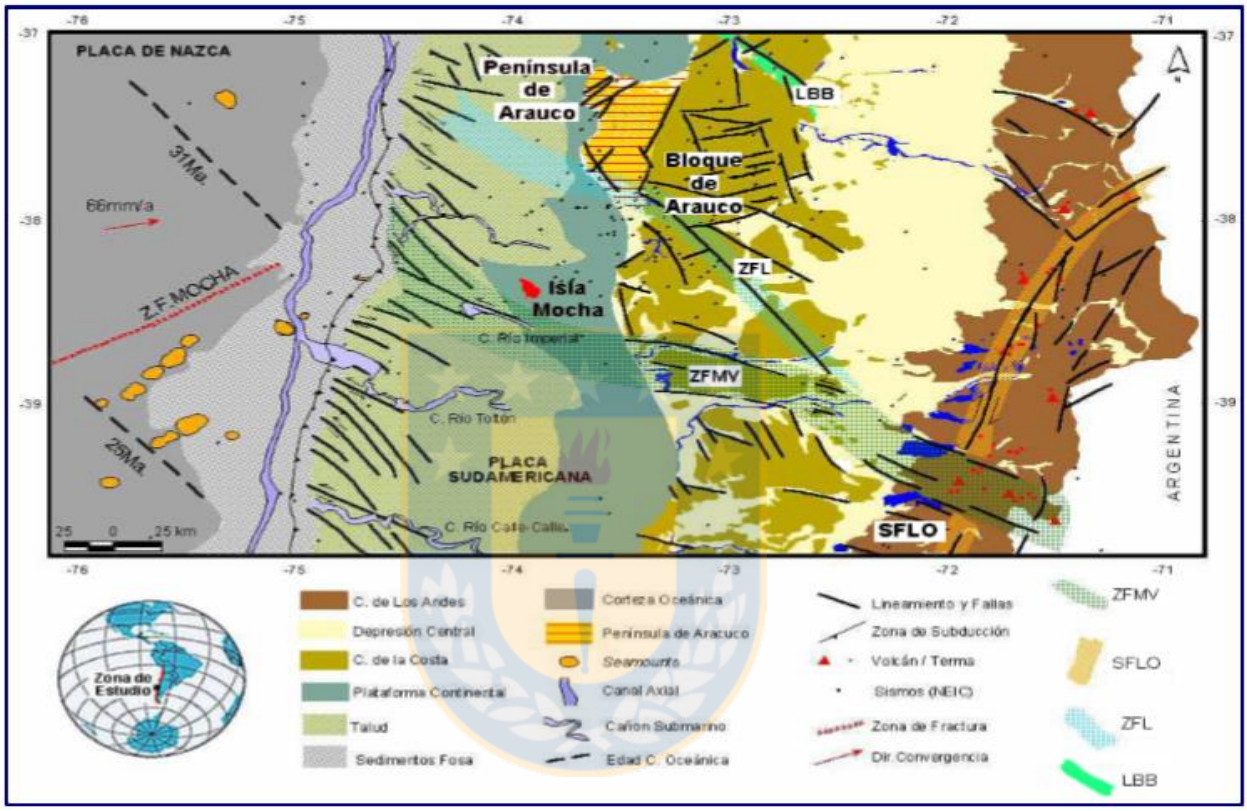

Figura 2.2. Síntesis tectónica regional del área de estudio. Se observa la configuración de las principales estructuras y unidades tectónicas. En la cordillera de los Andes el SFLO se alinea con el arco volcánico. Estructuras corticales NW-SE cortan la Cordillera de la Costa; ZFMV; ZFL. El talud continental y la fosa están muy disectadas por estructuras NW-SE. Modificado de Sánchez (2004) en Moreno (2004).

Diversos autores plantean que la ZFL correspondería a una estructura heredada de la tectónica permo-triásica (Echtler y otros, 2003), la que habría controlado el comportamiento tectónico del Cenozoico, donde las secuencias de la plataforma habrían sido continuamente alzadas a través de la reactivación de estas estructuras. En la actualidad, se registra actividad sísmica anómala en el Bloque de Arauco, la cual es manifestada por una concentración de eventos sísmicos de intraplaca que permiten definir esta falla (Melnick y otros, 2003).

2.5.2. Zona de Falla Mocha-Villarrica (ZFMV)

La ZFMV (Melnick y otros, 2003) une el lineamiento volcánico Villarrica-Quetrupillan-Lanín con el cañón del río Imperial, con una posible continuación hasta la fosa. Esta estructura se une en el Valle Central con la ZFL. La ZFMV probablemente controla el alzamiento diferencial de la plataforma continental y la Cordillera de Nahuelbuta, observándose un bloque alzado hacia el norte y una depresión al sur. Además, limita el bloque de Isla Mocha (Sánchez, 2004) y es en el antearco donde se encuentra el límite sur del Bloque de Arauco. De similar manera que la ZFL, la ZFMV es probablemente una estructura heredada del basamento permo-triásico, así como la serie de lineamientos de dirección NW-SE que poseen envergaduras continentales. En base al desplazamiento en el talud continental, la asimetría y el acomodo de la rotación de la Península de Arauco, se evidencia un desplazamiento de rumbo sinestral de esta estructura al menos en el ante-arco (Sánchez, 2004; Melnick y otros, 2003).

2.5.3. Lineamiento Bío-Bío (LBB)

La zona de Lineamientos Bío-Bío posee rumbo NW-SE similar a la ZFL, se extiende desde la Península de Tumbes hasta el Valle Central. Aunque otros trabajos han interpretado estos lineamientos como una estructura que se extiende hasta la Cordillera Principal (Bohm y otros, 2002), o hasta el ante-arco (Moreno 2004). Se caracteriza por una fuerte densidad de lineamientos en la Cordillera de la Costa y por ser responsable del cauce principal NW-SE del río Bíobío en la zona costera.

Esta estructura marca el límite norte del Bloque de Arauco. Esta zona de lineamientos de dirección NW-SE fue afectada por la tectónica extensional triásica, por lo que las reactivaciones posteriores han producido de esta estructura una debilidad cortical mayor, así es posible que el LBB corresponda a una zona de falla con desarrollo en el basamento (Echtler y otros, 2003).

2.5.4. Tectónica de la Península de Arauco

La Península de Arauco es un relieve emergido situado a sólo 85 km de la fosa y constituye una prolongación de 35 km hacia el W del litoral medio en la región del Biobío. Tiene una longitud de 85 km entre los 31,15ºS y 37,9ºS. Por el norte y sur, la Península de Arauco es flanqueada por las

islas Santa María y Mocha, localizadas a 10 y 60 km de ella respectivamente. Geomorfológicamente, está conformada por una terraza marina pleistocena y otra holocena y un relieve acolinado más elevado en su parte occidental. Geológicamente, está constituida por rocas sedimentarias terciarias y cuaternarias, afectadas por fallas normales de rumbo NE-SW (Quezada, 2009) La Zona de Fractura de Mocha, es una falla transformante, tiene rumbo N60ºE y su traza intersecta la fosa a los 38,2ºS/75ºW y la prolongación de ella hacia el NE, intersecta el litoral de la Península de Arauco al sur de la ciudad de Lebu, a los 37,66ºS/73,66ºW (Quezada, 2009). Debido a su cercanía con la fosa, esta zona ha experimentado un importante alzamiento cosísmico durante los terremotos de 1835, 1960 y 2010. El principal evento sísmico del siglo XX comenzó el 21 de mayo de 1960 con un sismo Mw=8,1, siendo el primer evento de la gran ruptura sísmica Mw=9,5 que culminó al día siguiente (Quezada, 2009).

3. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

Los depósitos de placer pertenecientes al rio Butamalal en el sector de Cayucupil se encuentran en la Cordillera de Nahuelbuta, formada por rocas del Basamento Metamórfico de edad Paleozoico Superior, intruídas por granitoides (Figura 3.1) del Batolito Costero del Sur de edad Carbonífero-Pérmico (Hervé et al., 1979).

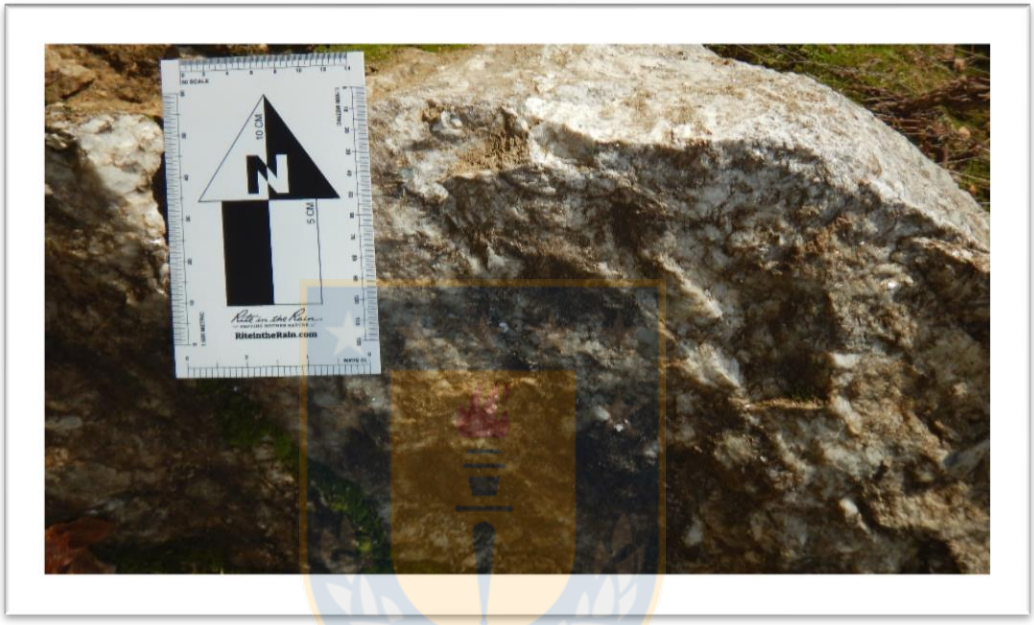

Figura 3.1. Afloramiento de roca ígnea batolito Nahuelbuta.

3.1. Basamento Metamórfico (Serie Occidental)

En la zona de estudio no aflora la Serie Occidental, pero si es posible encontrarla en el subsuelo (Pineda, 1983) y en zonas erosionadas o meteorizadas, se dispone al sur de la Serie Oriental, posiblemente por los efectos de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (Moreno 2004). La serie occidental se constituye por esquistos micáceos, metabasitas (esquistos verdes) y, en menor cantidad, cuerpos serpentiníticos y metagabros, todos los cuales están afectados por un metamorfismo de la facies esquistos verdes. A orillas del río Butamalal, producto del metamorfismo regional, se encuentran esquistos de mica con cuarzos recristalizados (Figura 3.2). Éstos fueron formados producto de un metamorfismo de contacto de baja presión y alta temperatura (Vásquez 2001).

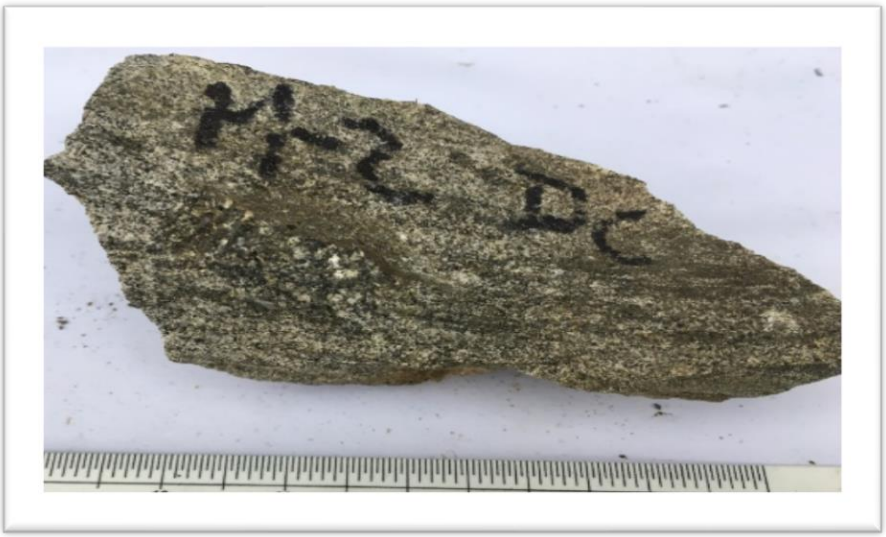

Figura 3.2. Esquisto de micas Unidad Nahuelbuta.

3.2. Unidad Nahuelbuta

En la región del Biobío, las rocas intrusivas paleozoicas afloran a lo largo de la Cordillera de la Costa, desde el límite regional con la región del Maule por el norte, hasta el Sistema de Falla Lanalhue al sur, y son conocidas bajo el nombre del Batolito Costero del Centro Sur de Chile (Hervé y otros, 1976; Hervé y otros, 1987; Creixell, 2001; Glodny y otros, 2008). En el área de estudio, estas rocas son agrupadas en el Complejo Nahuelbuta, donde predominan granitoides. Las litologías más abundantes dentro de los granitoides son tonalitas y granodioritas (figura 3.3), esencialmente con cuarzo, microclina, plagioclasa, hornblenda, biotita y escaso granate (Hervé y otros, 1976).

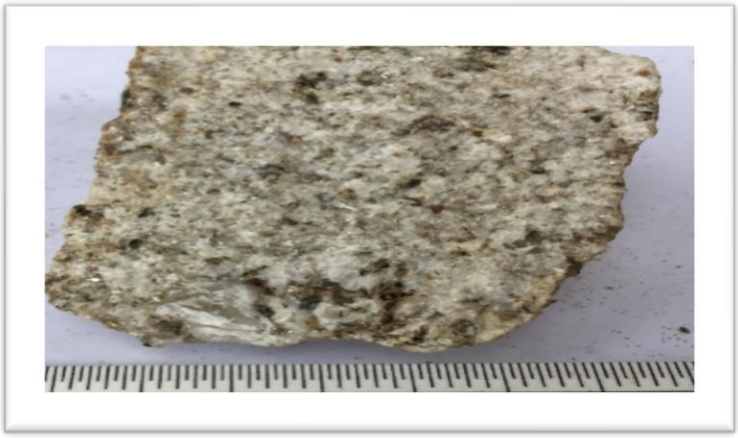

Figura 3.3. Granodiorita de biotita con granate Unidad Nahuelbuta

4. MARCO METALOGÉNICO

4.1. Generalidades

Los recursos de la zona se deben al desarrollo de distintos procesos ígneos, tectónicos, metamórficos y sedimentarios en conjunto con factores geomorfológicos y climáticos, a lo largo del tiempo geológico, desde el Paleozoico al Reciente.

La región del Biobío se divide en tres franjas mayores de mineralización, tanto metálica como no metálica que corresponde de este a oeste a: la Franja Oriental que abraca a la Cordillera de los Andes y la Precordillera; la Franja Central constituida por la Depresión Central y la Franja Occidental que incluye a la Cordillera de la Costa y a las Planicies Litorales (Alfaro y Gajardo, 1980).

El área de estudio se caracteriza por presentar minerales económicos usados en la construcción y en la industria como: arcillas, arenas silíceas, canteras tonalíticas, pegmatitas. Además, posee mantos de carbón de pequeño tamaño de extracción no rentables y minerales metálicos (Figura 4.1). La mineralización metálica, consiste en depósitos de arenas con titanio, cuya mena principal es la ilmenita, además contiene titanomagnetita, rutilo, esfeno, hematita y magnetita (Bonilla, 1990). Estos depósitos no son explotados, debido a que las leyes medias de titanio poseen un carácter económico menor a lo estimado rentable.

4.2. Minerales metálicos

La mineralización presente en la región es el resultado de una larga historia geológica, la que ha sido desigual en lo extenso del territorio. Los principales procesos que dominan la mineralización se distribuyen de manera heterogénea en la demarcación. Los recursos metálicos de la región del Biobío suelen encontrarse a lo largo de dos áreas bien definidas dentro de la Franja Oriental. En ella se encuentra la Unidad Nahuelbuta, ubicada en la parte más oriental, caracterizada por la mineralización de hierro bandeado, donde existen potentes afloramientos de esquistos micáceos con intercalaciones menores de metachert, metacherts ferruginosos (BIF) y cuerpos serpentiníticos con depósitos podiformes de cromitita. Las leyes bordean el 39% en Fe y en los depósitos de cromitita van de los 7% al 39% de Cr_2O_3 (Collao y otros, 1982).

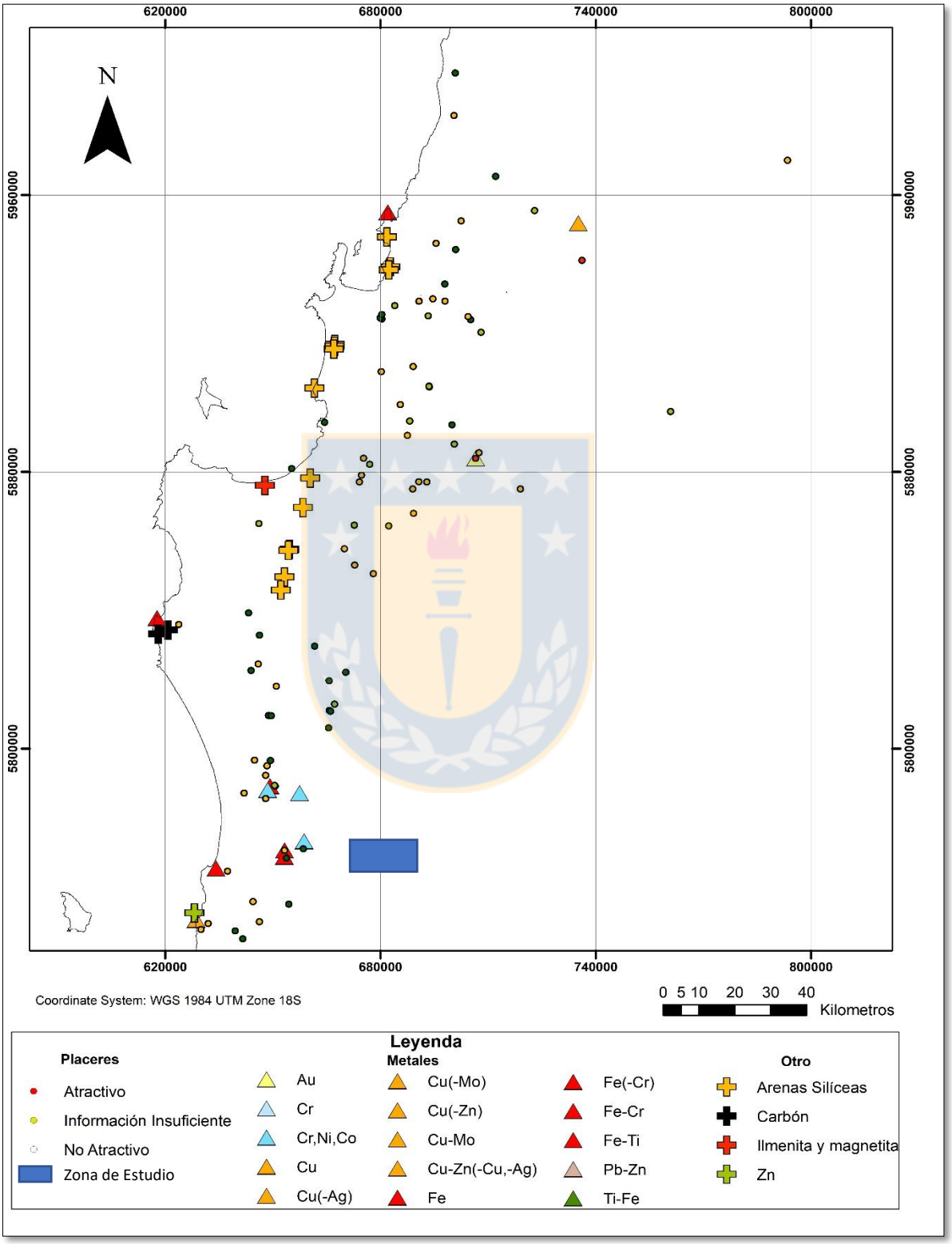

Figura 4.1. Catastro de recursos económicos de la región del Bíobío.

Dentro de la Franja Occidental, hacia el oeste, se sitúa la unidad Tirúa, que corresponde a una extensa serie rocosa con dominio de esquistos verdes, con contenidos promedios de 0,12% de Cu, 19% de Fe y 245 ppm de Zn (Collao y otros, 1982).

En el sector costero de la provincia de Concepción, al sur del río Biobío y provincia de Arauco, es posible analizar extensas áreas de depósitos de arenas negras, constituidas de minerales metálicos pesados, con altas concentraciones de hierro y titanio, entre otros elementos.

Los recursos minerales de la zona de estudio tienen un origen predominantemente metamórfico y sedimentario.

4.3. Oro

La existencia de placeres auríferos en Chile se conoce desde que los conquistadores españoles llegaron por primera vez al país, estableciéndose la llamada “Ruta del oro”, nombrada así, por ser utilizada para el traslado del oro extraído en la zona durante la conquista, y que comprendía las localidades de Concepción, Chiguayante, Hualqui, Quilacoya, Unihue, Talcamávida, Rere, Yumbel, Cabrero y Copiulemu. (Olivares, 2010).

En la década de los años ’80 la VIII Región aporta al país más de 60 kg de Au fino al año, época en la que registra la mayor producción de este mineral en la historia de la región. Coincide exactamente en el periodo 1985-1988, con la puesta en marcha del Plan Aurífero Nacional implementado por ENAMI en esa década (Figura 4.2). La mayor parte de este oro lo proporcionaba el distrito Minas del Prado en la provincia de Ñuble. El aporte de oro por parte de la región disminuye considerablemente en la década de los ’90, hasta llegar a una producción nula a finales del siglo XX (Stange, 2011).

De acuerdo con el origen del Au, según Stange (2011) los placeres auríferos asociados a la Cordillera de la Costa de la región del Biobío corresponden a placeres relacionados con esquistos micáceos y/o cuerpos intrusivos graníticos paleozoicos, acorde con la clasificación de Greiner (1991). La cual no es definitiva, ya que por ejemplo los depósitos de playas oceánicas existen a lo largo de todo el litoral, independiente de la edad de las rocas donde se ubican o del mecanismo de transporte del oro, sin embargo, es un aporte ante la necesidad de ordenar y racionalizar la

explotación de nuevos yacimientos. Del mismo modo, Pincheira y otros (1991) relacionan genéticamente los placeres auríferos de la región del Biobío con afloramientos de rocas graníticas que componen el basamento paleozoico. El Au está presente principalmente en yacimientos de tipo placer, formados por acumulación de sedimentos tanto fluviales como aluviales del Cuaternario. Los principales lavaderos de Auestán depositados en terrazas fluviales y son originados por el material arrastrado desde la zona de contacto entre el Batolito Costero Paleozoico y la formación de esquistos micáceos del basamento cristalino del Paleozoico Superior (Greiner, 1990). En esta zona de contacto, abundan vetas y vetillas de cuarzo aurífero, ya sean inyectadas en los planos de exfoliación de los esquistos o en las rocas ígneas, estas últimas son rocas graníticas de textura gruesa, las que contendrían la mayor cantidad de sílice aurífera de cuya denudación provendría el Au detrítico (Macdonald, E. K. 1983).

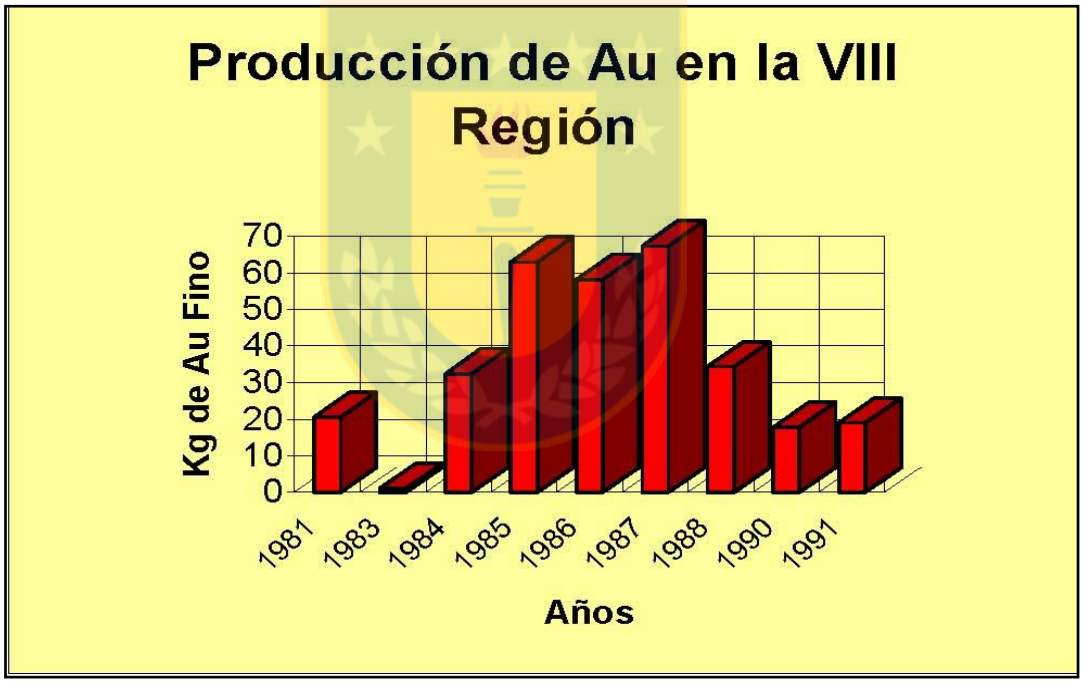

Figura 4.2. Producción de Au en la región del Bíobío (Stange, 2011).

Estos depósitos están distribuidos en los esteros y ríos de la región, principalmente en la Cordillera de la Costa, entre los 36°15’ S y 38°15’ S, y también en la Cordillera Andina al este de Chillán (Collao y otros, 2000). Actualmente, la actividad productiva es muy limitada y está restringida a la extracción artesanal, con expectativas que no superan los 0,2 a 0,5 gr/m^3.

Los principales placeres de la zona están presentes en el estero Quilacoya y los ríos Hualqui, Rere y Gomero (Alfaro y Gajardo, 1978). Según Ferraris (1981), las leyes de oro encontradas en estos lavaderos tienen un promedio de 0,1 gr/m^3.

Los sedimentos auríferos de Hualqui corresponden a arenas actuales de los sistemas de drenaje de los ríos Araucana y Hualqui, desarrollados sobre rocas graníticas del Batolito de la Costa. Estos cauces pasan localmente sobre rocas triásicas en su curso superior. Sus concentraciones son inferiores a 0,2 gr/m^3 (Collao y otros, 2000).

En la zona de Quilacoya afloran rocas graníticas del Batolito de la Costa, correspondientes a granitos de biotita en contacto por falla con rocas sedimentarias triásicas de la Formación Santa Juana. Esta zona presenta gran cantidad de vetas de cuarzo que rellenan fracturas. No se han realizado estudios más acabados de la ley mineral en estos depósitos (Stange, 2011).

Collao y otros (2000) clasifican a estos yacimientos en 3 categorías:

- Atractivos: Son aquellos donde la concentración o ley media es superior a 0,5 gr/m^3.
- No atractivos: los cuales tienen una concentración o ley media es inferior a 0,5 gr/m^3.
- Insuficiente información: pertenecen a esta división los yacimientos donde no existe información necesaria para realizar una evaluación.

4.4. Tierras raras

Las tierras raras (REE) son elementos químicos del bloque "f" de la tabla periódica de los elementos, abarcando desde el lantano a lutecio, además de escandio e itrio. Estos elementos tienen radios iónicos muy parecidos y muestran comportamientos geoquímicos similares, lo que hace difícil su separación. El principal estado de oxidación de estos elementos es +3. Son poco abundantes y están como trazas en la mayoría de los sistemas. Algunos elementos, como el cerio, el itrio y el neodimio son más abundantes que el plomo. El tulio (el más escaso) es aún más abundante que el oro o el platino (Elements, 2012).

En los depósitos de placeres puede concentrarse monazita ((Ce,La,Nd,Th,Y)PO_4), que corresponde a un mineral accesorio con REE, puede estar presente en rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias. Por lo tanto, podría estar asociado al área de estudio de esta memoria.

En la región del Bíobío, en la localidad de Penco se encuentra la empresa Biolantanidos, la trabaja conla explotación de tierras raras en arcillas iónicas. Este tipo de arcillas corresponden a grandes depósitos con bajas concentraciones de REE (0,04-0,25%REOs) que se forman en zonas tropicales con precipitaciones medias a altas. El proceso de formación de estos yacimientos comienza con la meteorización de granitos, dando origen a suelos ricos en arcillas sobre el granito. A la vez, las aguas subterráneas lixivian los elementos de tierras raras de las rocas graníticas, las movilizan, hasta que se fijan débilmente, por adsorción iónica, a las arcillas formadas (Cochilco, 2016).

4.5. Arenas Titaníferas

Chile tiene una costa de unos 4.300 km de longitud N-S en la que aparecen playas y dunas que casi sin excepción tienen contenidos de hierro y titanio en variadas proporciones. Estas proporciones son generalmente bajas y son consideradas, en los casos donde el mineral se encuentra económicamente atractivo, como los yacimientos secundarios de titanio en el país. Dentro de este tipo de yacimientos, los que están en la provincia de Concepción destacan como posibles yacimientos económicamente rentables. Estos depósitos están conformados tanto por arenas blanco-amarillentas como oscuras, donde éstas últimas son las que contienen las concentraciones más altas de titanio en forma de magnetita-ilmenita. El origen de estos sedimentos está asociado a los ríos Biobío e Itata. Las arenas negras provendrían del transporte de material basáltico rico en olivino e hipersteno procedente de rocas básicas y ultrabásicas de la Cordillera Andina (erupción Volcán Antuco), mientras que las arenas blanco-amarillentas provendrían de la erosión y arrastre de material del Batolito Costero, de carácter granítico y más local (Vásquez, 2001). Sin embargo, otros autores proponen un origen más local para estos sedimentos, donde la génesis estría relacionada, en mayor medida, a la meteorización de las rocas metamórficas costeras (Collao y otros, 1982) o a algún cuerpo ferro-titanífero no identificado (D'Aubarede, 1968).

Pese a que el área de estudio se enmarca en la zona entre los ríos Biobío e Itata, los depósitos de titanio están en la costa, específicamente en las penínsulas de Coliumo y Arauco (Collao y otros, 1982), donde destaca el yacimiento de mayor producción en Playa Blanca, actualmente sin labores.

La única ubicación posible donde podría encontrarse este recurso es en las terrazas del río Biobío, formadas en su totalidad por arenas negras, coloración que proviene de los minerales ferromagnesianos que componen estos sedimentos y que, en caso de ser ilmenita o titano-magnetita, podrían ser las menas aportadoras de titanio (Vásquez 2001).

4.6. Depósitos tipo placer

Se aplica esta denominación a los yacimientos formados por la concentración de minerales en la arena de ríos, torrentes o playas como consecuencia de su elevada densidad, además de ser estables en condiciones superficiales y, en general, poseer una elevada dureza (Mego, 2017). Se trata de yacimientos secundarios formados por concentración mecánica de ciertos minerales tras la denudación de los yacimientos primarios. El mineral ha sido removido de su lugar de origen y aparece asociado a otros materiales diferentes a los que componían la roca madre. Los placeres auríferos son quizás los más conocidos entre este tipo de depósitos, pero existen otros minerales que cumplen las condiciones mencionadas en distintos grados, como, por ejemplo: casiterita, cromita, columbita, cobre, diamantes, granate, oro, ilmenita, magnetita, monazita, platino, rubí, rutilo, safiro, xenotima y circón. Las fórmulas químicas de estos minerales (Tabla 2.1).

El modelo genético de los placeres es un modelo sedimentario convencional, con la existencia de un área fuente, donde existen, más o menos diseminados, los minerales que tienen interés económico, la acción de mecanismos de transporte (agua, hielo, aire, gravedad) moviliza estos minerales útiles, que han sido previamente liberados en las rocas del área fuente por acciones climáticas y biológicas. La acción del transporte provoca: un efecto de desgaste que hace que sólo los minerales de mayor dureza superficial pueden resistir su acción, un efecto de acción química, responsable de la alteración o disolución de los minerales inestables y un efecto de selección en función de la densidad, forma y propiedades de superficie, responsable de la concentración de los minerales útiles (Azcárate Marín, 1972). Existen numerosas clasificaciones de placeres

dependiendo del clima. En climas fríos se forman los placeres de glaciar, en climas húmedos habrá placeres fluviales, aluviales, lacustres y marinos, los climas secos darán forma a placeres eólicos. Esta memoria trata sobre placeres en climas húmedos, entre el cual destaca placeres residuales que resultan de la acumulación *in situ* durante la meteorización, placeres eluviales dónde la acumulación se produce en un medio sólido en movimiento y placeres aluviales con concentración en un medio líquido (agua), otros tipos de placeres se describen en el Anexo 2.

Tabla 2.1. Fórmula de minerales característicos de depósitos de placeres

SnO_2	Casiterita (mena de estaño)
$FeCr_2O_4$	Cromita (mena de cromo)
$(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$	Columbita
C	Diamante
$FeTiO_3$	Ilmenita
Fe_3O_4	Magnetita
$(Ce,La,Y,Th)PO_4$	Monazita (mineral portador de tierras raras)
Al_2O_3	Corindón – Rubí (con Cr; rojo) – Zafiro (con Co, Cr, Ti; azul)
YPO_4	Xenotima
$ZrSiO_4$	Circón

4.6.1. Placeres Residuales

Se forman inmediatamente sobre rocas madres o por descomposición y remoción de materiales más livianos de la roca; estos pueden gradar hacia abajo a vetas meteorizadas. La Figura 4.3.. muestra la meteorizacion de vetas formando placeres residuales.

4.6.2. Placeres Eluviales

Formados en pendientes de montañas en “acarreos” e incluyen minerales liberados de la roca fuente cercana (Figura 4.3), además de la mineralización (Maksaev, 2001). Los placeres eluviales tienen un carácter previo para cualquier otro tipo de placer, es decir, cualquier depósito placer pasa por dicha etapa, si bien en ella se encuentran minerales no transportables, que no aparecerán en otros tipos de placeres. Básicamente un placer eluvial es un yacimiento generado por alteración, sin erosión posterior, de un yacimiento primario diseminado, que presenta, respecto al yacimiento primario, la ventaja de tener los minerales útiles liberados, es decir como granos puros, y que es fácilmente extraíble sin la utilización de explosivos (Macdonald, 1983).

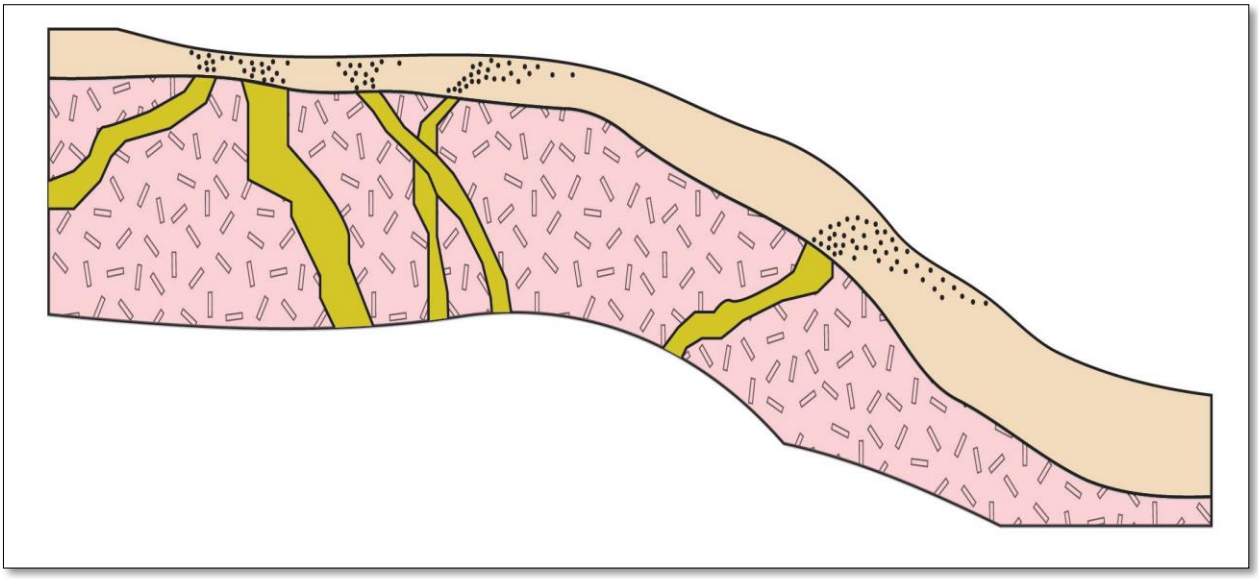

Figura 4.3. Formación de placeres residuales (izquierda) y eluviales (derecha) por la meteorización de vetas con casiterita. Modificado de Maksaev 2001.

4.6.3. Placeres Aluviales

Los depósitos aluviales ocurren relacionados a una corriente de agua en ambientes continentales. Cuando las corrientes de agua discurren todo el año se les denomina río, pero cuando solamente ocurren en determinadas épocas del año son torrentes. Las corrientes de agua discurren sobre canales definidos denominados canales aluviales, los canales aluviales pueden ser rectos, sinuosos o meandriformes y anastomosados. La concentración de minerales densos se realiza a través del flujo del canal, y por tanto su fuerza de cizalla está relacionada con la pendiente, con la forma del canal y con el régimen del agua en el canal (Macdonald, 1983). En un perfil transversal de un río puede observarse un lecho mayor, menor y de inundación (Figura 4.4). El lecho menor es el canal aluvial donde discurren las aguas, este lecho menor presenta arcillas abruptas que lo delimitan. El fondo del lecho menor presenta una alternancia de pendientes cuando los materiales transportados son heterogéneos. El lecho de inundación es el canal aluvial donde discurren las aguas esporádicas y el lecho menor, separado por una barra de acrecentamiento, presenta un perfil transversal en badén. La línea de fondo que corre sobre el canal aluvial se le denomina talweg.

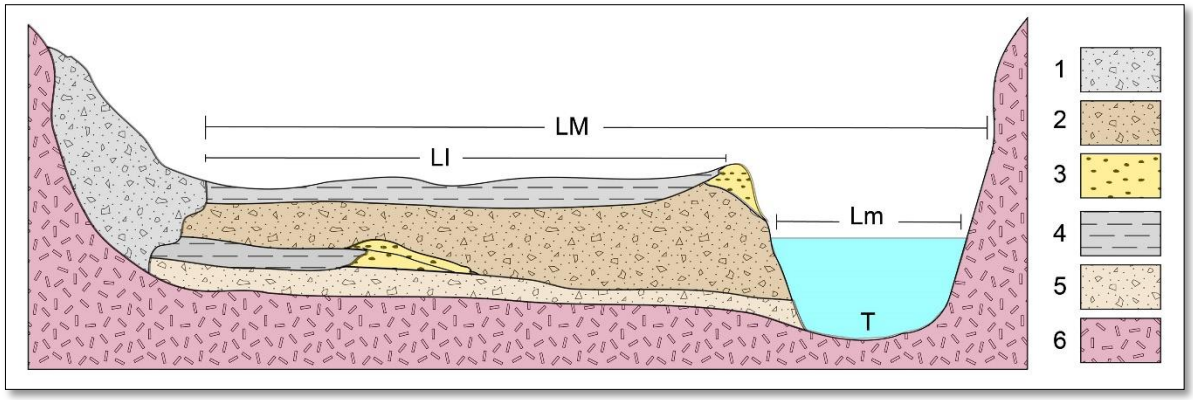

Figura 4.4 Perfil transversal de un río. 1) Depósito coluvial, 2) Horizonte aluvial superior, 3) Barra de acumulación, 4) Depósito de inundación, 5) Horizonte aluvial inferior, 6) Lecho rocoso. LI: Lecho de inundación, LM: Lecho Mayor, Lm: Lecho menor, T: Talweg o fondo.

5. RESULTADOS

5.1. Petrografía de depósitos aluviales

A partir del análisis de microscopia de corte transparente (Anexo 4) se pudo determinar la petrografía en detalle de los depósitos aluviales del Prospecto Cayucupil. Se identifican granodioritas de biotita, con textura fanerítica de grano medio, con sectores en donde el tamaño de grano varía a muy fino; posee cuarzo (23%) con forma anhedral y subhedral, plagioclasas (35%) subhedrales y euhedrales alteradas a arcillas, biotitas (19%) subhedrales alteradas a cloritas, feldespato K (microclina y ortoclasa) (12%), granate (≤5%) euhedrales, sericita (≤5%) con forma subhedral, y muscovita (≤10%) subhedrales.. En pulido transparente no fue apreciable la existencia de minerales metálicos.

5.2. Morfología del depósito

Los depósitos en la zona de estudio corresponden a la erosión, meteorización y posterior transporte de las rocas pertenecientes a la Cordillera de Nahuelbuta, cuyo agente activo de transporte es el río Butamalal que nace en las entrañas del denso bosque de El Natri en plena Cordillera de Nahuelbuta y baja por el Valle de Butamalal donde posteriormente alimenta el cauce del río Cayucupil al unirse con él en la Villa de Cayucupil. Este río tiene un ancho promedio de 15-20 m (Figura 5.1), presenta meandros de diversa geometría y energía, con trampas de variada dimensión (1-14 m) y pozos de distinta profundidad (5-50 cm). En invierno su cauce se incrementa, donde las lluvias y riachuelos aumentan en consideración el agua transportada por el río, llegando incluso a producir desastres en pueblos aledaños, puentes, caminos, senderos, entre otros.

Figura 5.1. Fotografía del cauce río Cayucupil.

A lo largo del río Cayucupil hay sectores que actúan como trampas para se acumulación de sedimentos con minerales pesados, meandros, caídas de agua sobre roca, barras y lugares en donde en los laterales del rio hay un cambio de pendiente lo que provoca un desborde y posterior sedimentación (Figura 5.2). Estas barras tienen dimensiones entre 2-18 m con 5 m como promedio.

Figura 5.2. Fotografías de puntos de interés; A) caída de rocas, B) barras, C) trampas.

5.3. Descripción de sedimentos

En el sector muestreado es posible observar homogeneidad en casi todos los depósitos en el curso del río en barras, pozos y meandros, además de las terrazas. Partículas de sílice, plagioclasas, micas (muscovita y biotitas levemente alteradas a clorita) y minerales opacos (Figura 5.3). Hay excepciones en donde la granulometría de los depósitos varía a lo largo del río Cayucupil, predominan clastos de mayor tamaño y bien seleccionados con el aumento de pendiente y cause y material más fino tipo fango en zonas de con abundante vegetación a orillas del río (Anexo 5). Se observan partículas con dimensiones desde los 2 mm hasta 2 cm, las cuales presentan gran esfericidad y mediana redondez, producto del transporte desde su proveniencia a través del río, por lo que se infiere una fuente cercana. Presentan buena a media selección, se depositan bolones de varias decenas de centímetros en partes centrales del río, decreciendo granulométricamente hacia los laterales. En las terrazas fue posible observar granulometría distinta producto de diferentes momentos de depositación, destacan clastos de más de 70 cm de diámetro, en columnas con diferentes niveles de eventos de tormenta o aluviones (Figura 5.4). Adicionalmente, se observan niveles de óxidos e hidróxidos, ambos de granulometría fina, son ricos en limolitas presentes en capas intermedias de terrazas y escaso o nulo cuarzo.

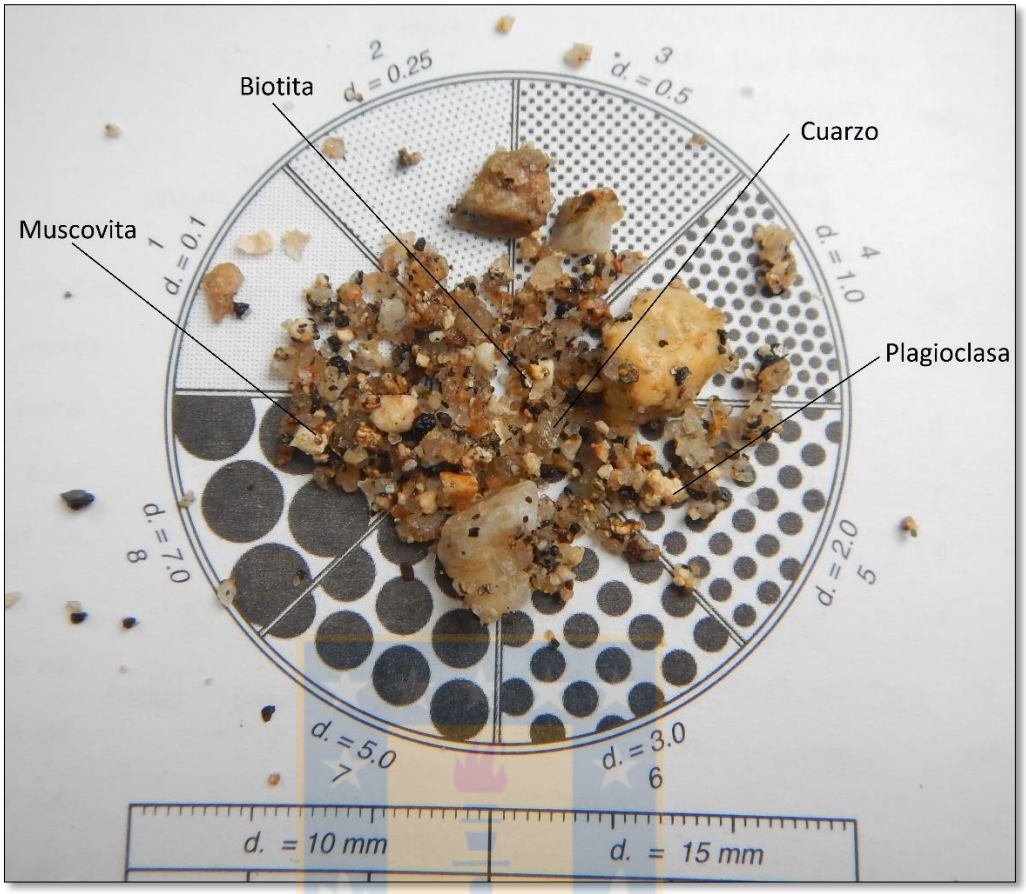

Figura 5.3. Fotografía de los depósitos muestreados.

5.4. Resultados de laboratorio

Los análisis de las muestras realizados por ALS Santiago (contratado por ENAMI) y por el Instituto de Geología Económica de la Universidad de Concepción en la zona de estudio arrojaron resultados que permiten agrupar la interpretación en: concentración de Au, elementos mayores y menores, elementos trazas en sedimentos y tierras raras.

5.4.1. Concentraciones de Au y Ag

El oro y la plata son elementos clasificados como metales pesados, es decir que se encuentran directamente como mena (no mezclado con otros metales). Los valores de las concentraciones son determinados a través de ensayos al fuego (Anexo 1), éstos fueron realizados por el laboratorio ALS en Santiago, Chile y los resultados se aprecian en la Tabla 5.1.

El muestreo se realizó aguas abajo del río Cayucupil, en pozos, trampas y columna del sector (Figura 5.5).

Figura 5.4. Fotografía muestreo en terraza, donde se aprecian gravas polimícticas de diferente granulometría.

Como se puede observar en la Tabla 5.1, la mayoría de las concentraciones de Au está bajo el límite de detección (<0.005 ppm) y todas las muestras de Ag también (< 0.2 ppm). Previamente, la abundancia de oro en las rocas ígneas y sedimentarias fue reportada con un promedio de 0,005 ppm (*Flores y otros*, 2002), por lo que se considera una baja o nula concentración económica de Au en la mayoría de los sedimentos extraídos. Siete muestras presentan concentraciones de Au levemente superiores al límite de detección y corresponden a *point bars* en meandros de flujo de poca energía. Se observa un aumento de la concentración de Au con respecto al tamaño de clastos de cuarzo redondeados y clastos de plagioclasa y micas de tamaño 2-8 cm y aumento de minerales opacos (posible asociación con arcillas).

Tabla 5.1. Concentraciones de Au y Ag en el prospecto Cayucupil.

Muestra	Au ppm	Ag ppm	Muestra	Au ppm	Ag ppm
15601	<0.005		15626	0.005	
15602	0.005		15627	<0.005	
15603	0.005		15628	<0.005	
15604	<0.005		15629	<0.005	
15605	<0.005	<0.2	15630	<0.005	
15606	0.068		15631	<0.005	
15607	0.062		15632	<0.005	
15608	<0.005		15633	0.012	
15609	<0.005		15634	<0.005	
15610	<0.005	<0.2	15635	<0.005	<0.2
15611	<0.005	<0.2	15636	<0.005	
15612	0.106		15637	<0.005	
15613	<0.005		15639	<0.005	
15614	<0.005	<0.2	15640	<0.005	
15615	0.026		15641	0.005	
15616	0.057		15642	<0.005	
15617	<0.005		15644	<0.005	
15619	0.005		15645	<0.005	
15620	<0.005		15646	<0.005	
15621	<0.005		15647	<0.005	
15622	<0.005		15648	<0.005	
15623	0.1		15649	<0.005	
15624	<0.005		15650	0.196	
15625	0.225		15651	<0.005	<0.2

A partir de los resultados de concentraciones de Au obtenidos, se calcula la ley media del prospecto y el promedio de las leyes tanto en g/m^3 como en g/ton (Anexo 1) estás corresponden a 0.01367 g/m^3 y 0.0054 g/ton. (tabla 5.2).

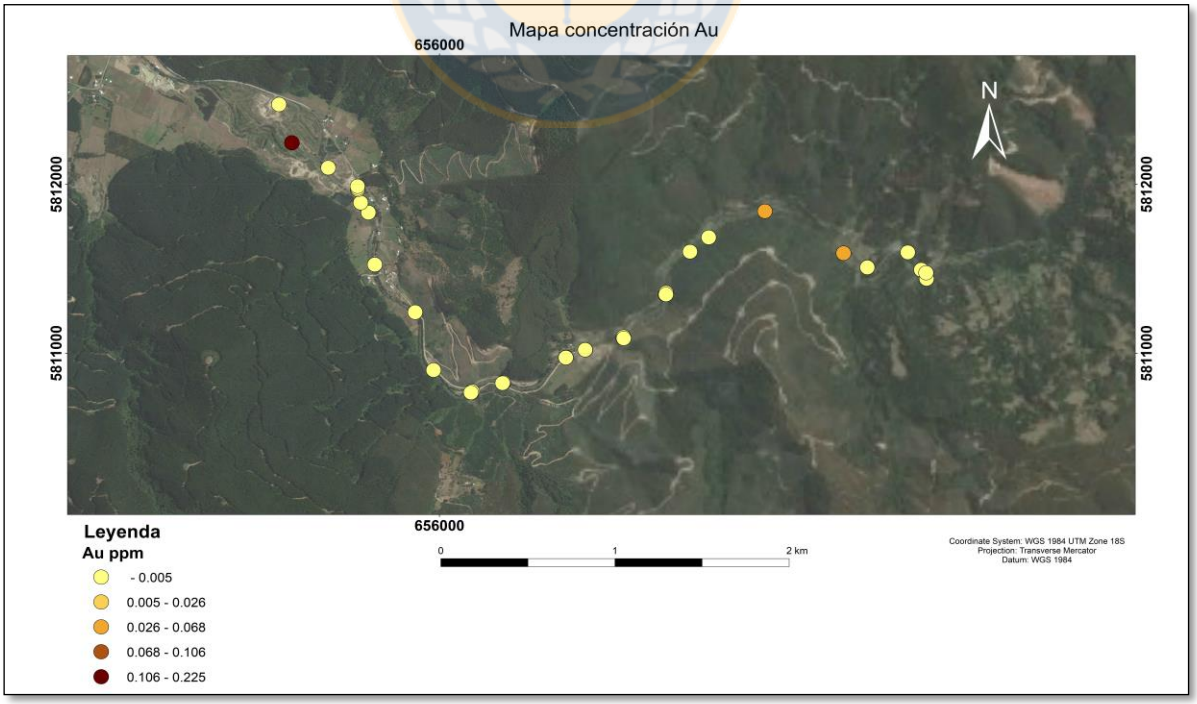

Figura 5.5. Mapa concentración de Au en prospecto Cayucupil

Tabla 5.2. Contenido de ley en trampas del prospecto Cayucupil.

Trampa	Muestra	Volumen Trampa (m3)	Volumen Muestra (m3)	Volumen Muestras (m3)	Densidad muestra (ton/m3)	Concentración Au (ppm)	Concentración Au (g/m3)	Concentración Au Trampa (g/m3)	Au Muestras (g)	Peso Muestras (ton)	Au Trampa (g/ton)
1	15601	3.213	0.0037	0.0037	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00002	0.00937	0.00198
2	19602	4	0.0037	0.0037	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00002	0.00937	0.00198
3	19603	1.84	0.0037	0.0037	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00002	0.00937	0.00198
4	15604	0.81	0.0037	0.0037	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00002	0.00937	0.00198
5	15605	16	0.0037	0.0037	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00002	0.00937	0.00198
6	15606	3	0.0037	0.0037	2.53125	0.068	0.068	0.068	0.00025	0.00937	0.02686
7	15607	55.2	0.0037	0.0037	2.53125	0.062	0.062	0.062	0.00023	0.00937	0.02449
8	15608	17.25	0.0037	0.0037	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00002	0.00937	0.00198
9	15609	0.51	0.0037	0.0037	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00002	0.00937	0.00198
10	15610	33	0.0037	0.0148	2.53125	0.005	0.005	0.03025	0.00045	0.03746	0.01195
	15611		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
	15612		0.0037		2.53125	0.106	0.106				
	15613		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
11	15614	32	0.0037	0.0111	2.53125	0.005	0.005	0.02933333	0.00033	0.02810	0.01159
	15615		0.0037		2.53125	0.026	0.026				
	15616		0.0037		2.53125	0.057	0.057				
12	15619	14.5	0.0037	0.0074	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00004	0.01873	0.00198
	15620		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
13	15621	45	0.0037	0.0111	2.53125	0.005	0.005	0.03666667	0.00041	0.02810	0.01449
	15622		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
	15623		0.0037		2.53125	0.1	0.1				
14	15626	34	0.0037	0.0111	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00006	0.02810	0.00198
	15627		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
	15628		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
15	15629	15	0.0037	0.0074	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00004	0.01873	0.00198
	15630		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
16	15631	0.6	0.0037	0.0037	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00002	0.00937	0.00198
17	15632	7.5	0.0037	0.0037	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00002	0.00937	0.00198
18	15633	2	0.0037	0.0037	2.53125	0.012	0.012	0.012	0.00004	0.00937	0.00474
19	15634	33	0.0037	0.0148	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00007	0.03746	0.00198
	15635		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
	15636		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
	15639		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
20	15640	31.5	0.0037	0.0037	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00002	0.00937	0.00198
21	15641	280	0.0037	0.0111	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00006	0.02810	0.00198
	15642		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
	15643		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
22	15644	280	0.0037	0.0148	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00007	0.03746	0.00198
	15645		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
	15646		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
	15647		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
23	15648	70	0.0037	0.0037	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00002	0.00937	0.00198
24	15648	301	0.0037	0.0148	2.53125	0.005	0.005	0.005	0.00007	0.03746	0.00198
	15649		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
	15650		0.0037		2.53125	0.005	0.005				
	15651		0.0037		2.53125	0.005	0.005				

Volumen medido (m^3)	Ley media medida (g/m^3)	Ley media medida (g/ton)
1280.923	0.013677083	0.005403292

5.4.2. Elementos mayores y menores

Se denominan elementos mayores a los elementos químicos presentes en altas concentraciones y que controlan en gran medida la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas. Los

elementos son separados en mayores y menores. Los límites entre los grupos son arbitrarios, pero los más aceptados son: elementos mayores >1,0% peso, elementos menores 0,1 – 1,0% peso (Wilson, 1989). Si llegan a estar en concentraciones suficientemente altas pueden llegar a formar minerales independientes, que se denominan minerales accesorios. A partir del análisis semicuantitativo de FRX, junto con la descripción macroscópica se logra generar una base de datos útiles para interpretar la proveniencia y estado de los sedimentos *in situ* como también una relación con el agua circundante del río.

Del total de muestras estudiadas, cuatro fueron seleccionadas para el análisis de FRX, estas muestras fueron elegidas en base a su caracterización macroscópica textural y mineralógica en los pozos y trampas en relación con el total del área de estudio (Figura 5.6). En la Tabla 5.3 se presentan los resultados obtenidos.

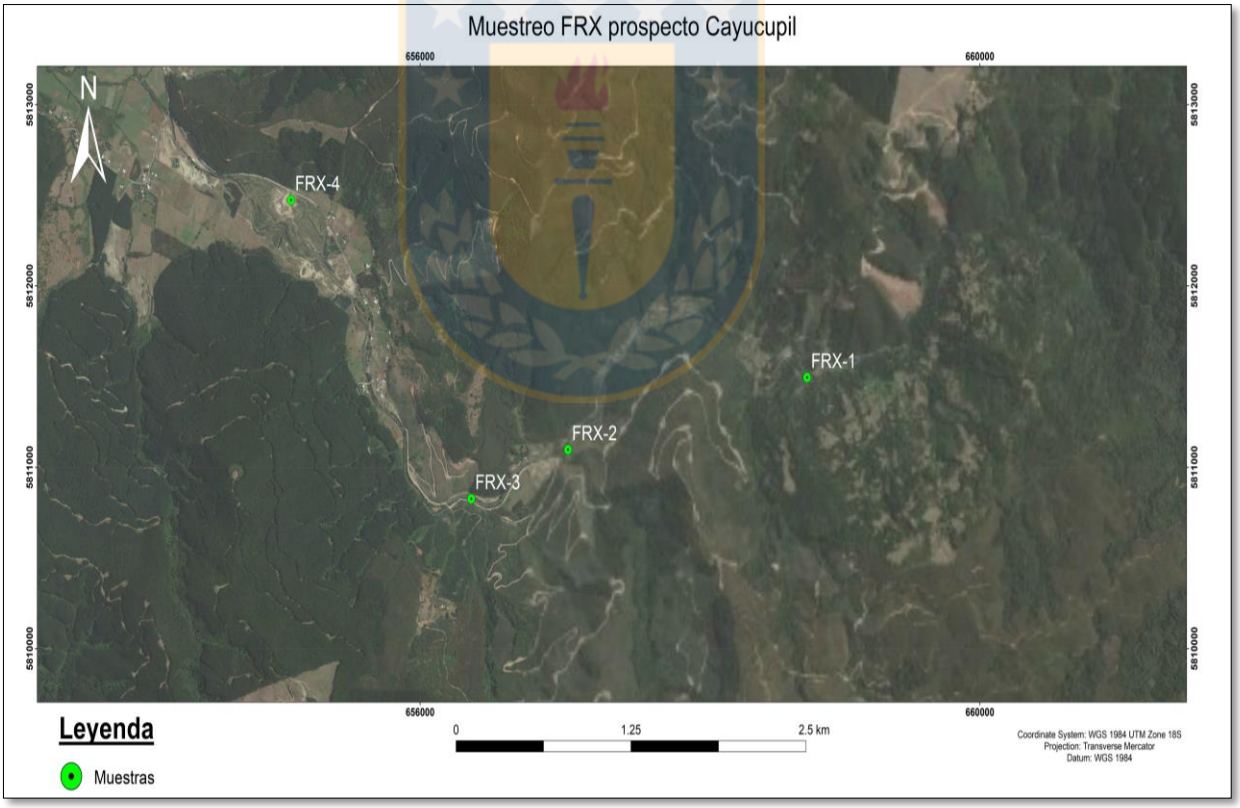

Figura 5.6. Muestreo FRX

Tabla 5.3. Resultados de FRX de elementos mayores y menores en % peso. El símbolo * representa que el peak en las muestras fue muy pequeño y se recomienda la determinación mediante otro tipo de análisis.

% en peso	FRX-1 CYP	FRX-2 CYP	FRX-3 CYP	FRX-4 CYP
F	-	-	0,05	-
Na_2O	2,50	2,15	1,68	13,87
MgO	0,65	1,46	1,82	3,14
Al_2O_3	13,25	14,72	15,62	0
SiO_2	74.08	68,89	66,72	0
P_2O_5	0,08	0,14	0,12	0,15
SO_3	0,02	0,04	0,04	0,55
Cl	0,01	0,02	0,02	0,72
K_2O	3,28	2,40	2,77	1,50
CaO	2,31	3,17	2,22	0,62
TiO_2	0,34	0,79	0,97	4,90
V_2O_5	-	*	0,03	-
MnO	0,05	0,09	0,10	1,79
Fe_2O_3	3,01	5,88	7,63	63,04
Co_2O_3	*	*	*	0,15
NiO	-	-	*	0,10
ZnO	*	*	*	0,30
Ga_2O_3	*	-	*	0,15
As_2O_3	-	-	-	0,10
Br	-	-	-	-
Rb_2O	*	*	0,02	0,63
SrO	0,02	0,02	0,02	1,34
ZrO_2	*	0,06	0,04	0,74
Nb_2O_5	-	*	*	-
BaO	0,07	0,07	0,05	0,69
WO_3	0,26	0,07	0,05	5,53

Se realiza una clasificación de rocas sedimentarias de las muestras con respecto a su contenido en relación de Fe_2O_3/K_2O y SiO_2/Al_2O_3. En este sentido la relación SiO_2/Al_2O_3, fue utilizada como de madurez mineralógica en las areniscas y como una señal del tamaño de grano de los sedimentos (Pettijohn y otros, 1987 y Herron, 1988). La relación Fe_2O_3/K_2O (Herron, 1988), puede ser interpretada como un indicador de estabilidad mineralógica, en donde se ve representada el vínculo existente entre los fragmentos líticos y los feldespatos. Este hecho radica en que el cuarzo, los feldespatos potásicos y las micas (en especial la muscovita), son los minerales más estables en el ambiente sedimentario, mientras que los fragmentos líticos conteniendo minerales de Fe y Mg son los menos estables bajo dichas condiciones. La Figura 5.7 muestra que tres de las cuatro muestras quedan clasificadas como lutitas ricas en Fe y la otra restante en el campo de arcosa por su gran cantidad de cuarzo. La muestra número 4, obtenida en una columna de la sección con más óxidos, se relaciona con uno de los mayores contenidos de tierras raras totales.

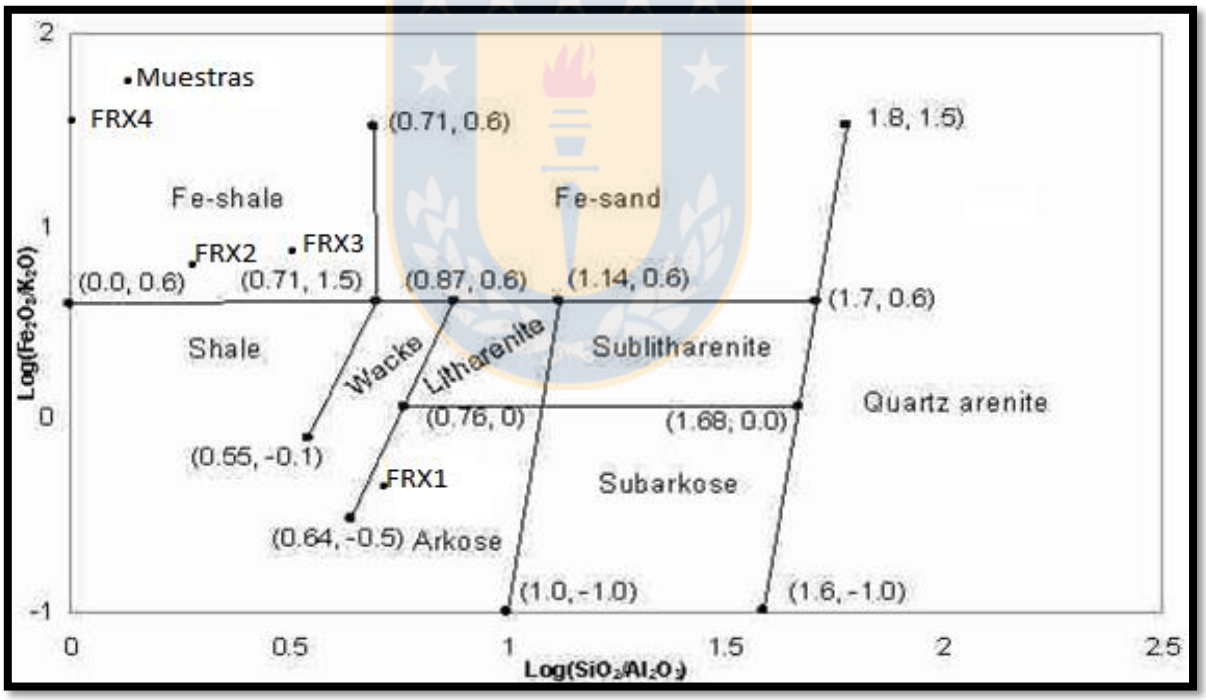

Figura 5.7. Clasificación de sedimento. Diagrama de Herron (1988).

5.4.3. Elementos traza

Un elemento traza se define como un elemento que está presente en una roca en concentraciones menores al 0.1% (1.000 ppm). La mayoría de los elementos traza si bien no forman especies minerales por si solos, son capaces de sustituir a los elementos mayores en los minerales

formadores de roca. Los elementos traza son importantes en estudios petrológicos ya que son mejores discriminantes entre procesos petrológicos que los elementos mayores (López, 2006). El estudio de estos elementos se realizó mediante ICP-AES en el laboratorio ALS en Santiago contratado por ENAMI (Tabla 5.4). El análisis se hizo a 6 muestras tomadas a lo largo del río Cayucupil con orden aguas abajo (Figura 5.8), a modo de abarcar toda la zona de estudio e interpretar resultados a lo largo del muestreo.

Tabla 5.4. Concentraciones de elementos traza.

		Muestras					
Elemento	**Unidad**	**15605**	**15610**	**15611**	**15614**	**15635**	**15651**
Au	ppm	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Ag	ppm	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Al	%	3,69	3,65	3,38	2,64	3,28	3,38
As	ppm	2	2	4	2	113	11
B	ppm	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Ba	ppm	220	200	200	140	240	280
Be	ppm	1,1	1,1	1,1	0,7	1,9	1,4
Bi	ppm	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Ca	%	0,28	0,16	0,17	0,2	0,26	0,34
Cd	ppm	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Co	ppm	12	10	10	6	44	15
Cr	ppm	17	19	19	11	34	30
Cu	ppm	13	10	10	9	23	20
Fe	%	3,42	3,79	3,68	1,98	11,05	4,33
Ga	ppm	10	10	10	10	10	10
Hg	ppm	<1	<1	1	1	<1	<1
K	%	0,59	0,58	0,6	0,3	0,5	0,63
Mg	%	0,65	0,73	0,72	0,42	0,58	0,74
Mn	ppm	635	376	416	187	5980	617
Mo	ppm	<1	<1	<1	<1	3	<1
Na	%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ni	ppm	6	7	8	4	17	15
P	ppm	720	290	330	570	1960	1270
Pb	ppm	10	9	7	6	15	10
S	%	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01
Sb	ppm	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Sc	ppm	9	9	9	6	11	11
Sr	ppm	17	15	15	8	20	13
Th	ppm	<20	<20	<20	<20	<20	20

Continuación Tabla **5.4.**

Ti	%	0,27	0,29	0,29	0,19	0,2	0,28
Tl	ppm	<10	<10	<10	<10	<10	<10
U	ppm	<10	<10	<10	<10	<10	<10
V	ppm	79	79	77	52	128	78
W	ppm	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Zn	ppm	63	71	70	42	67	91
Nb	ppm	13	15	15	23	13	21
Rb	ppm	96	106	108	68	89	98
Sn	ppm	5	<5	5	6	5	11
Ta	ppm	1	1,3	1,3	2,5	1,1	1,9
Th	ppm	21,4	17	11,3	27,4	16,6	27,1
U	ppm	4,6	4,8	4,7	9,9	4,7	5,4
W	ppm	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Zr	ppm	1260	1390	1500	4240	890	1030

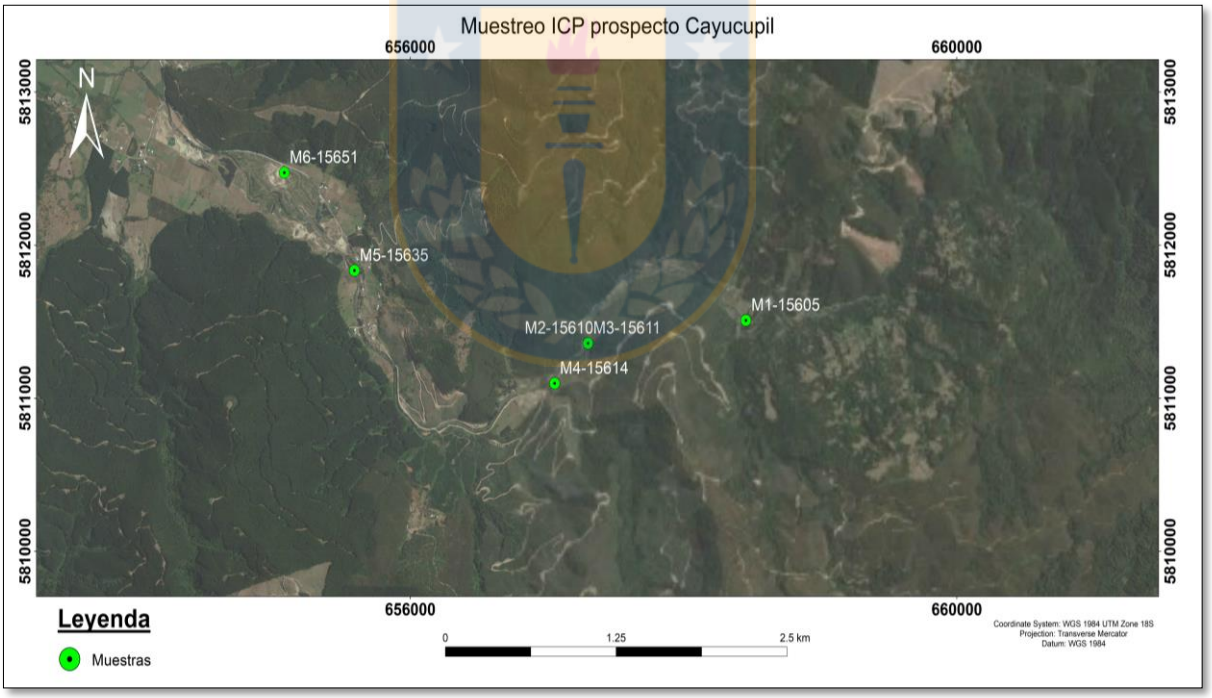

Figura 5.8. Ubicación de muestras analizadas por ICP-AES.

Los resultados no pueden relacionarse con la cantidad de Au, debido a que en la zona de estudio la mayoría de las muestras tomadas arrojan valores por debajo del límite de detección, no obstante, cabe mencionar la cantidad elevada de As en la muestra 15635 en comparación con las demás.

5.4.4. Tierras raras

Se realizó un estudio de concentraciones de REE a 6 o seis muestras en el Prospecto Cayucupil (Tabla 5.5). En la Figura 5.9 se observa la variación de concentración según la ubicación de cada muestra, a lo largo del río Cayucupil.

También se realizó una comparación de la concentración medida y los promedios corticales, regionales de cada elemento (Tabla 5.6). Los valores en ppm del prospecto Cayucupil se encuentra por sobre el promedio de los valores de rocas en la región y basamento (Creixell 2001; Gromet, y otros 1984; Taylor, S.R. & McLennan S.M.1985) por lo que destaca como zona de interés.

Tabla 5.5. Contenido de tierras raras.

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	
Muestra	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Total
M-1	50	131	12.5	50.4	12	1.8	9.4	1.42	7.8	1.54	4.8	0.68	6	0.8	42	332.14
M-2	46	106	11.5	46.1	10.6	1.5	9.7	1.38	8.1	1.71	5.3	0.8	6.5	0.9	47	303.09
M-3	31	75	8.4	36.3	8.5	1.6	8.4	1.35	7.9	1.73	5.2	0.77	6.7	0.89	46	239.74
M-4	58	145	16	63.3	15.9	1.9	15.5	2.39	13.1	2.82	9.5	1.43	12.2	1.83	77	435.87
M-5	69	254	19.8	75.9	16.6	3.1	14.5	2.35	12.8	2.79	7.9	1.08	9.2	1.2	71	561.22
M-6	56	142	15.2	58.6	13.7	2.3	13.7	2.1	11.9	2.4	7.6	0.99	8.5	1.15	64	400.14
Total	310	853	83.4	330.6	77.3	12.2	71.2	10.99	61.6	12.99	40.3	5.75	49.1	6.77	347	2272.2
LIVIANAS	PESADAS															
1666.5	605.7															

Tabla 5.6. Comparación de valores en ppm de tierras raras en rocas de la región.

Elemento	Basamento	Granodioritas	Upper crust	Granitos Concepción	Hipoabisales	Plutón Santa Juana	Plutón Hualpén	Leucocráticos	Cayucupil
La	36.1	24.5	30.0	41.4	16.2	18.6	9.9	18.0	51.7
Ce	62.5	51.1	64.0	89.8	35.5	41.7	21.2	39.8	142.2
Pr	8.9	6.0	7.1	10.9	4.5	5.6	2.4	4.9	13.9
Nd	34.0	22.4	26.0	42.3	18.8	25.2	8.7	18.5	55.1
Sm	7.0	4.7	4.5	9.3	4.4	6.5	2.4	4.5	12.9
Eu	1.3	1.1	0.9	1.3	1.2	1.5	0.2	0.7	2.0
Gd	6.1	4.1	3.8	7.5	4.2	6.4	2.6	3.9	11.9
Tb	0.9	0.6	0.6	1.0	0.7	0.9	0.5	0.5	1.8
Dy	5.4	3.5	3.5	5.2	4.1	5.3	3.2	2.9	10.3
Ho	1.0	0.7	0.8	0.9	0.8	1.0	0.6	0.5	2.2
Er	3.0	2.0	2.3	2.3	2.4	2.8	1.9	1.3	6.7
Tm	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	1.0
Yb	2.8	1.8	2.2	1.8	2.2	2.2	2.1	1.1	8.2
Lu	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	1.1
Pomedio	169.8	122.9	146.4	214.4	95.7	118.4	56.4	97.0	320.9

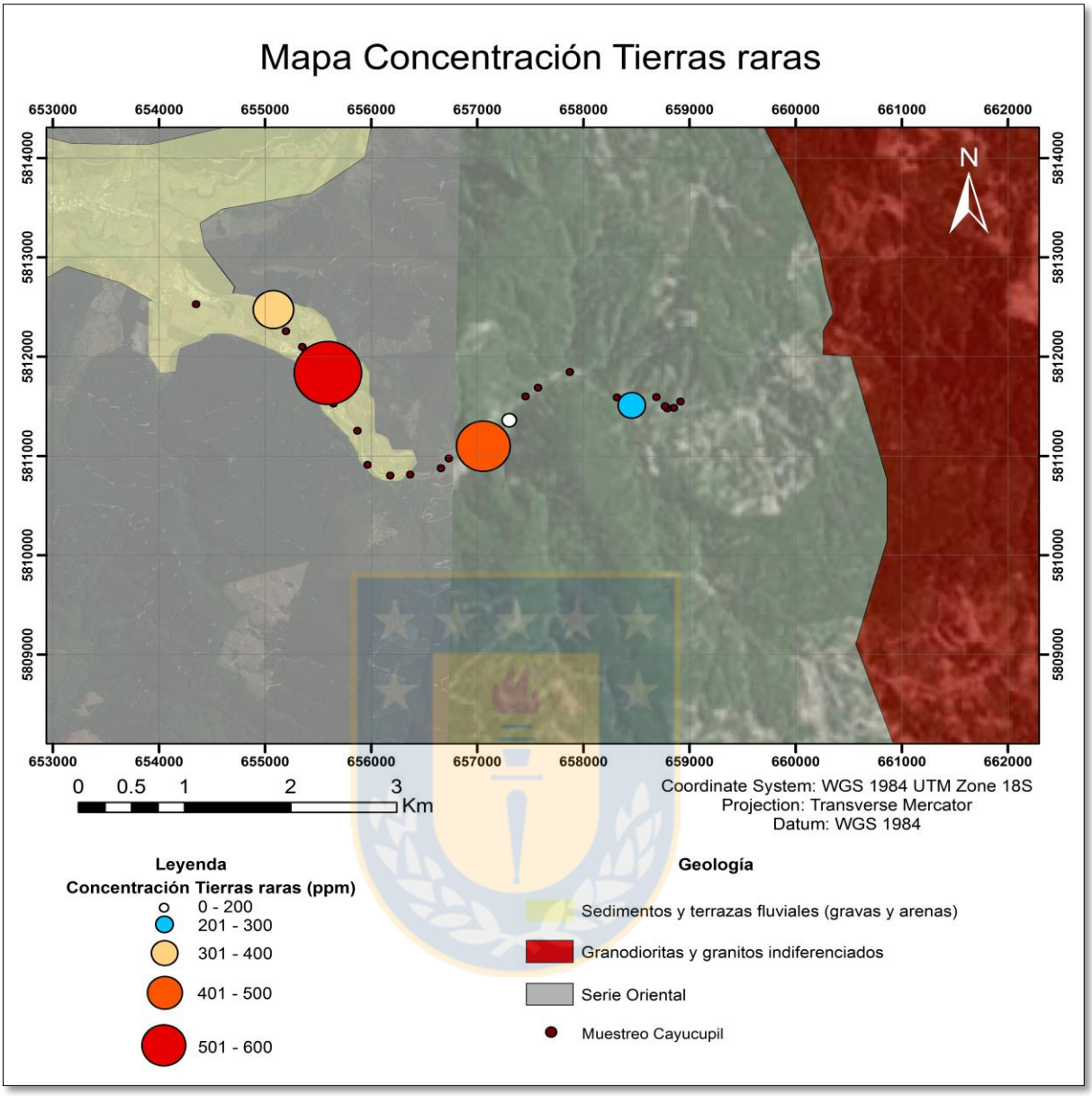

Figura 5.9. Mapa Concentración de tierras raras

6. DISCUSIÓN

En puntos estratégicos de muestreo, se obtubieron muestras desde trampas naturales recientes, las cuales fueron generadas post temporal (el que dejó evidencias claras de una crecida significante del río). Se observa que la concentración de Au aumenta en comparación al total de concentración del prospecto, lo que estaría indicando que aún existe transporte desde la zona de proveniencia y que aguas arriba aún está erosionando la fuente de Au. Esto fue demostrado en un 100 % en los puntos estratégicos analizados. En la zona de estudio las concentraciones de Au clasifican al prospecto Cayucupil dentro de las zonas no atractivas, por tener valores por debajo del rango 0,005–0,5 ppm según indican los resultados analíticos (Tabla 5.1). La existencia de oro en el sector está relacionada con un horizonte de gravas que constituyen la base de una extensa terraza de acumulación fluvial y en menor grado con los sedimentos actuales de arrastre aportados por las laderas de los cerros ubicados aguas arriba (Ilabaca, 1986). La fuerte meteorización y denudación que han sufrido las rocas de la Cordillera de Nahuelbuta durante el Cuaternario produjeron grandes volúmenes de sedimentos, los cuales al ser removidos por los ríos hacia el oeste repetidas veces formaron superposición de lavaderos, los mantos están compuestos por ripios graníticos con dimensiones que llegan a ser métricas, y poseen una matriz de gravilla y maicillo. El Au se presenta en forma de pepitas de pequeñas dimensiones, alcanzando cantidades poco atractivas desde un punto de vista económico (Gerhard, 1991).

6.1. Elementos mayores

Se observa que tres de las cuatro muestras analizadas presentan gran contenido de SiO_2 (Tabla 5.3). Por otro lado, la muestra CYP-4 está enriquecida en óxidos, por lo que su porcentaje de Fe aumenta considerablemente junto con el contenido de Na, lo que se debe a un alto contenido de suelo y/o arcillas en estas muestras. Debido a que no hay otra muestra de características similares en relación con el bajo contenido de SiO_2, no es posible establecer un patrón de relación.

La mayoría de las muestras contienen bastante contenido de Al lo que infiere y respalda la teoría que provienen de la erosión y meteorización de rocas ígneas de la Cordillera de Nahuelbuta.

Los óxidos de Fe aumentan aguas abajo junto con los óxidos de Mg, Al, Ti y Mn. No es posible realizar alguna asociación con el Au debido a que éste presenta valores por debajo al límite de

detección. Tal hecho puede vincularse con el decrecimiento en la proporción de granos detríticos como cuarzo y feldespato en los sedimentos de grano más fino, y un incremento en la concentración de componentes como argilominerales y óxidos e hidróxidos (Kiminami y Fujji, 2007).

6.2. Elementos trazas

Las concentraciones de As en las rocas ígneas son bajas, por lo general, inferiores a 5 ppm con pocas diferencias entre los distintos tipos litológicos. A pesar de la baja concentración de As, determinadas rocas muy reactivas, como cenizas volcánicas de grano fino, pueden liberar cantidades suficientemente altas de As, las que serían incorporadas en cursos de agua (Smedley y Kinniburgh, 2002), lo cual podría resultar en un potencial problema de contaminación para el ambiente. Las rocas metamórficas también muestran contenidos bajos de As, que no suelen superar los 5 ppm, excepto las metapelitas, que tienen un contenido medio de 18 ppm (Boyle y Jonasson, 1973). Por lo que este valor elevado de As (113 ppm) en la muestra 15365 puede tener relación a la contaminación provocada por algún agente externo vertidos al río (Escobar, 2012), gran cantidad de basura encontrada en las laderas del río, eliminación de aguas servidas por parte de lugareños o alguna anomalía geoquímica no descartando la presencia de oro en sectores aledaños.

Los resultados de concentraciones de elementos trazas en estos sedimentos muestran una asociación con su proveniencia, la cual coincide con la teoría de que los sedimentos y suelos provienen de la erosión y meteorización de rocas ígneas pertenecientes a la Unidad Nahuelbuta en la cordillera del mismo nombre. Esto queda evidenciado ya que los sedimentos están enriquecidos en elementos tales como Zr, Nb, Sr, Ba y REE. La importancia de estos análisis radica en que la concentración de ciertos elementos puede asociarse con el Au, actuando como trazadores. Algunos de los trazadores de oro más importantes son As, Sb, Hg, W, Cu y S. En los puntos en que se observó concentración de oro aluvial no hay un patrón decisivo en que se pueda asociar alguno de estos trazadores al metal precioso. Por otro lado, en los puntos que presentan mayor concentración de los trazadores tampoco se observa oro por lo que se descarta el uso de trazadores en el Prospecto Cayucupil

6.3. Tierras raras

Los elementos de tierras raras asociadas a depósitos son pocos, es por esto por lo que su clasificación se hace difícil y algunos tipos de yacimientos no tienen más que un ejemplo conocido, además, algunos yacimientos tienen sobreimposición de procesos, por lo que caben en más de una categoría. Existen yacimientos de tierras raras en vetas, arcillas iónicas, pegmatitas, rocas ígneas alcalinas, depósito de placer, carbonatitas, óxidos de hierro, depósitos residuales, entre otros. El prospecto Cayucupil es del tipo placer. Este fue el tipo de yacimientos de tierras raras más importante para la extracción económica hasta los años 60. Corresponden a depósitos de playa actuales o antiguos en los que los minerales pesados fueron mecánicamente separados y acumulados. Beihiai en China, Chavra en India y Buena en Brasil, todos tienen en común que destacan arenas de monacita, la monacita es un fosfato rico en Ce. Los resultados obtenidos en este estudio muestras concentraciones importantes de Ce, las que alcanzan 142 ppm.

Comparando nuestros resultados con las de concentraciones de elementos en la corteza terrestre según Wedepohl (1995) Figura 6.1, los valores de tierras raras sobrepasan en ppm tanto para las livianas como para las pesadas, lo que es un buen indicativo.

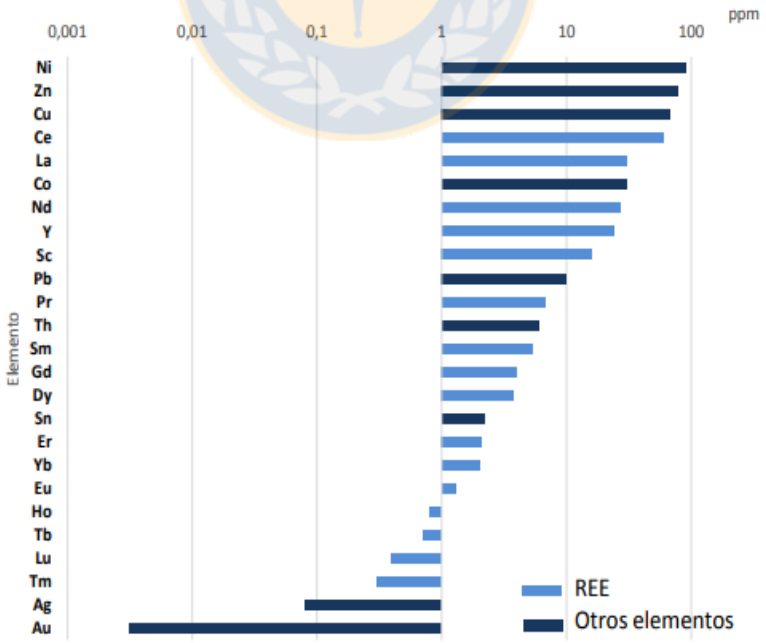

Figura 6.1. Concentraciones en la corteza terrestre según Wedepohl (1995).

Para REE los minerales de mena son la monacita y, en menor medida, xenotima ($(Y,Yb)PO_4$), los cuales generalmente se recuperan como subproducto de la extracción de minerales pesados como ilmenita ($FeTiO_3$), rutilo (TiO_2) y circón ($ZrSiO_4$) (Elements Vol. 8, 2012). En el sector hay gran contenido de Zr (promediando los 3000 ppm) y en los análisis de FRX se detecta presencia de rutilo con valores elevados (4 % en peso). En los sedimentos analizados vemos que hay mayor cantidad de tierras raras livianas (Tabla 5.4). El plan nacional de geología, impulsado por Sernageomin que contribuye a la exploración geoquímica, analizó diferentes prospectos del norte de chile y allí arrojó resultados que los clasifica como atractivos por su alto contenido de tierras raras. Ubicado en la vertiente occidental de la cuenca del río Lauca, entre el río Vizcachani, por el norte, hasta la pampa Citañane, En esta zona se detectaron altas concentraciones de LREE, con valores promedios de: La =74,8 ppm, Ce= 132,1 ppm, Pr= 13,66 ppm, Nd= 44,8 ppm y altas concentraciones de uranio y torio (promedio 3,63 y 25,43 ppm, respectivamente). Además, algunas muestras, presentan altas concentraciones de REE y LREE, con valores promedio de: Sm=6,2 ppm; Gd=4,1 ppm; Er=1,5 ppm. Comparando nuestros resultados (Sm=77,3 ppm; Gd=71,2 ppm; Er=40,3ppm), se evidencian concentraciones aún mayores sobre todo en tierras raras pesadas. También hay mayor cantidad de torio y uranio (ppm) en el prospecto Cayucupil.

En comparación a otras zonas como la hoja de Pisagua (Astudillo y otros, 2014) que clasifican según el estudio de COCHILCO también como atractivo donde Sm=14 ppm; Gd=11 ppm; Er=8 ppm y la hoja Iquique (Lacassie y otros, 2012) con valores en ppm de Sm=10; Gd=11; Er=5, los resultados de este estudio también son favorables, puesto que las concentraciones de REE en los sedimentos del sector Cayucupil están por sobre los resultados de éstas. Otra comparación, en este caso a cargo de la empresa Biolantánidos en la región del Biobío, en la localidad de Penco, corresponde a un yacimiento de arcillas iónicas con presencia de granate producto de la meteorización y erosión de rocas intrusivas aledañas (COCHILCO 2014). Los valores en este depósito varían entre 2.000 – 2.500 ppm de tierras raras. En la Figura 6.2 se observa un gráfico comparativo, elaborado en base a un catastro de análisis realizados a rocas en la región por diversos autores (Creixell 2001; Gromet, y otros 1984; Taylor, S.R. & McLennan S.M.1985) y los análisis de muestras del prospecto Cayucupil.

Tabla 6.1. Valores de tierras raras en ppm del prospecto Cayucupil en comparación a diversos estudios en la región.

	Nahuelbuta	Leucogranitos	Concepción	Sta. Juana	Hualpén	Cayucupil
mínimo	84.1	97	162.8	89	52.4	239.8
máximo	210.3	97	266	147.7	60.9	561.2
promedio	140.3	97	214.4	118.35	56.4	378.7

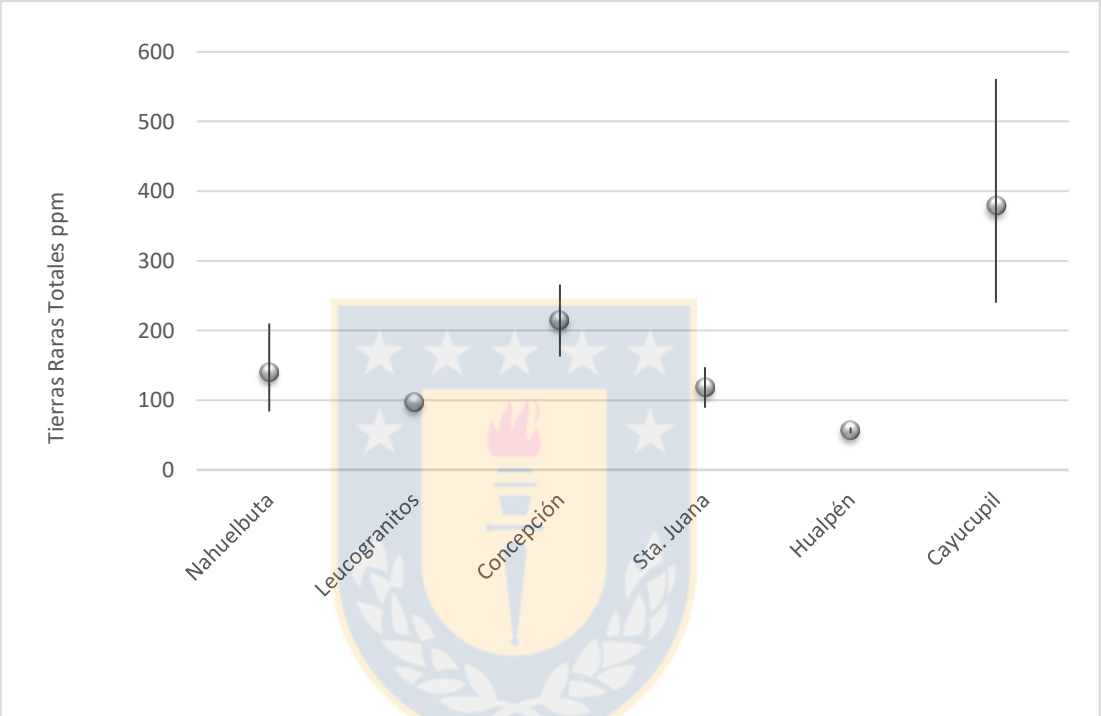

Figura 6.2. Diagrama comparativo de concentraciones de REE en la región del Bíobío.

En los mapas elementales de tierras raras (Anexo 2), se observa que la mayor concentración se localiza en la zona oeste del área de estudio, lo cual podría estar relacionado a la pendiente del río Cayucupil llegando al valle de Cayucupil. El origen de estas tierras raras tiene como fuente rocas ígneas alcalinas pertenecientes a la unidad Nahuelbuta, se forman a partir de procesos geológicos que extraen y concentran elementos que no encajan en las estructuras de los minerales comunes formadores de rocas (Cochilco 2014). Existen magmas alcalinos extraordinariamente raros y enriquecidos en elementos tales como Zr, Nb, Sr, Ba, Li (nuestros análisis coinciden con el enriquecimiento de estos elementos) y tierras raras. En su ascenso a través de la corteza sufren cambios adicionales, generándose una gran diversidad de rocas, algunas de ellas enriquecidas en elementos económicos que, por erosión, meteorización y un agente de transporte se concentran a

lo largo del rio Cayucupil acumulando mayor cantidad en los sectores cercanos al valle (Figura 6.3).

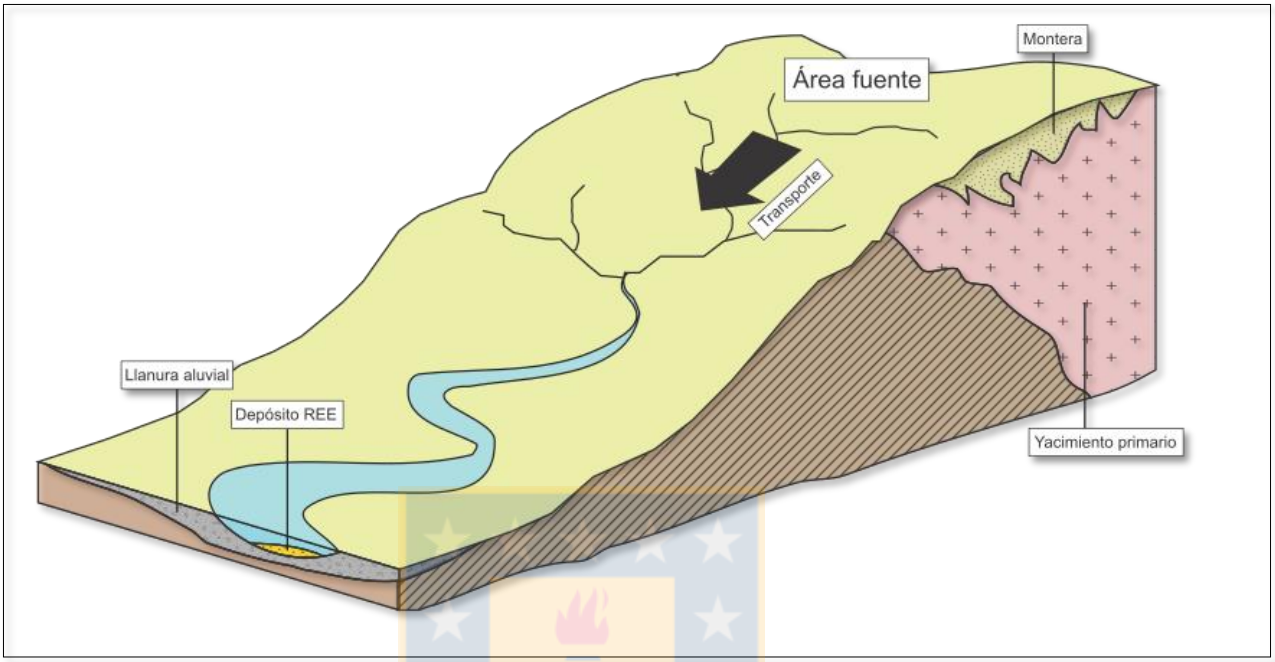

Figura 6.3. Fuente, transporte y depositación de tierras raras.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Los sedimentos analizados de la zona de estudio son transportados por los ríos Cayucupil y Butamalal ubicados 10 km al este de Cañete, luego los sedimentos son depositados en meandros, barras y trampas a lo largo de los 22 km de cauce entre ambos ríos, presentando granulometría media compuesta principalmente por cuarzo, feldespato, muscovita biotita y minerales opacos sin magnetismo.

La zona de estudio esta geológicamente caracterizada por litología ígnea y metamórfica, la cual se clasifica en base a su petrografía como granodioritas de biotita y granate, y esquistos micáceos sin mineralogía metálica.

La ley de oro calculada del prospecto Cayucupil es de 0,01367 g/m^3 y 0,0054 g/ton. Lo que lo clasifica como un prospecto no atractivo.

Existe transporte activo de Au, esto queda evidenciado en las concentraciones de Au medidas en sedimentos recientes, depositados durante intensas lluvias en invierno de 2017. En estos puntos se obtuvieron las mayores concentraciones de Au con respecto al total analizado en el prospecto Cayucupil.

Resultados en sedimentos muestran una asociación con su proveniencia, que coincide con la teoría de que los sedimentos y suelos provienen de la erosión y meteorización de rocas ígneas ya que están enriquecidos en elementos tales como Zr, Nb, Sr, Ba, tierras raras contenido de Al en todas las muestras. Podrían corresponder a la meteorización de la Cordillera de Nahuelbuta.

Los óxidos de Fe aumentan aguas abajo junto con los óxidos de Mg, Al, Ti, Mn. Tal hecho puede vincularse con el decrecimiento en la proporción de granos detríticos como cuarzo y feldespato en los sedimentos de grano más fino, y un incremento en la concentración de componentes como argilominerales y óxidos e hidróxidos.

En base a la comparación de los resultados de concentraciones de REE de esta memoria con los de las hojas de Arica, Pisagua e Iquique, se concluye que en el prospecto Cayucupil existen valores mayores en REE (principalmente HREE). También hay se registran concentraciones mayores de

Th y U en el prospecto Cayucupil. La mayor concentración de REE ocurre en la zona oeste del área de estudio. Además, hay presencia de REE en lugares donde las cantidades de Au están por debajo del límite de detección. Por lo tanto, no existe una relación directa en el contenido de Au y REE, posiblemente a diferencias en la fuente o procesos de concentración.

El prospecto Cayucupil clasifica como interesante respecto a una futura evolución de explotación con referencia en tierras raras para la pequeña minería.

7.2 RECOMENDACIONES

1. Realizar una nueva etapa de exploración en el sector Cayucupil, con énfasis en tierras raras. Se recomienda trabajar con una malla de muestreo con el fin de tener un mejor control de la geoquímica de la zona. Este muestreo debiese realizarse en época de verano para evitar posible remoción de sedimentos o contaminación a lo largo del río Butamalal.

2. Se recomienda realizar una nueva etapa de exploración en placeres aluviales aguas arriba, ya que se propone que aún hay transporte de Au, el difícil acceso hace pensar en estrategias y logística de terreno más refinadas.

3. Llevar a cabo una etapa de exploración y análisis de las terrazas localizada en el valle de Cayucupil, puesto que se encuentran en zonas de antiguos lavaderos de oro, donde aún es posible ver los vestigios de explotaciones antiguas.

9. REFERENCIAS

ALFARO, G. y GUZMÁN, R. 1978. Antecedentes Geológicos favorables a la existencia de Concentraciones de Minerales Pesados en la Zona Litoral de la VIII Región., Concepción.

ALFARO, G. y GAJARDO, A. 1980. Carta Metalogénica de la VIII Región Administrativa de Chile y Provincia de Malleco, IX Región. Congreso Geológico Argentino Nº7. Vol. 1: 171-184 p. Neuquén.

ANTON, R. y WALL, F., 2012. Rare Earth Elements, Volumen 8.

ARCOS, R. y ELGUETA, S. 1993. Geología y modelo de sedimentación de la secuencia cretácico-terciaria de la cuenca de Arauco. Informe inédito ENAP. 34 pp.

AZCÁRATE MARÍN, J. E., 1972. Metodología y técnicas para la prospección y valoración de placeres aluviales con casiterita. I.N.I. Empresa Nacional de Investigaciones Mineras, S.A. 204 pp. Madrid.

BIRO, L. 1979. Contribución al conocimiento de la formación Tubul, Plioceno superior, provincia de Arauco (37º14' Lat. Sur), Chile. Congreso Geológico Chileno N°2. Tomo 3: H33-H44 p.

BIRÓ, L. 1982. Revisión y redefinición de los Estratos de Quiriquina, Campaniano-Maastrichtiano, en su localidad tipo, en la Isla Quiriquina a 36°27' Lat.Sur, Chile, Sudamérica, con su perfil complementario en Cocholgüe. Congreso Geológico Chileno N°3. Actas I: 29-64 p., Concepción.

BOHM, M.; LÜTH, S.; ECHTLER, H.; ASCH, G.; BATAILLE, K.; BRUHN, C.; RIETBROCK, A. y WIGGER, P., 2002. The Southern Andes between 36º and 40ºS latitude: seismicity and average seismic velocities: J. Tectonophysis, Vol. 356, 275-289 p.

BONILLA, R. 1990. Recursos y Reservas en la Cuenca Carbonífera Arauco Concepción. Congreso Nacional de Energia N°1. Facultad de Ciencias Fisicas y Matemáticas, Universidad de Chile: 41-45 p. Santiago.

BÖRGEL, J. 1983. Geomorfología y Geografía de Chile. Instituto Geográfico Militar: 373 pp. Santiago.

BOYLE, R.W. JONASSON, I.R. 1973. The geochemistry of arsenic and its use as an indicator element in geochemical prospecting. Journal of Geochemical Exploration Vol.2: 252-296 p.

COCHILCO, 2016. Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile. 80p.

COLLAO, S.; FRUTOS, J.; HELLE, S. y PINCHEIRA, M. 1982. Mineralogía y aspectos texturales de la fracción metálica de un paleoplacer y placer de playa Fe-Ti, Región del Bío-Bío, Chile. Congreso Geológico Chileno Nº3. Actas: E-101- E 134. Concepción.

COLLAO, S.; ALFARO, G.; CECIONI, A.; GONZÁLEZ, A. y QUINZIO, A. 2000. Evaluación de los recursos metálicos de la Región del Bío-Bío. *Proyecto Fondo Nacional de Desarrollo Regional. Concepción*. Vol. 1: 80 pp.

CREIXELL C. 2001. Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36º30' S y 38º00' S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 149 pp. Concepción.

DEVYNCK, J-L. (1970): Contribución al estudio de la circulación atmosférica en Chile y el clima de la región del Biobío. Universidad de Concepción, Depto. Geofísica, 132 p. Concepción.

D'AUBAREDE, G. 1968. Evaluación de los conocimientos existentes sobre: asbesto, bentonita, boratos, carbonato de sosa, diatomita, magnesio, sulfato de aluminio, sulfato sódico, titanio. Instituto de investigación de recursos naturales. – CORFO: 253 pp. Santiago.

ECHTLER, H.; GLODNY, J.; GRÄFE, K.; ROSENAU, M.; MELNICK, D.; SEIFERT, W. y VIETOR, T. 2003.Active tectonics controlled by inherited structures in the long-term stationary and non-plateu South-Central Andes. EGU/AGU Joint Assembly. Nice April 2003, EAE03-AA-10902.

FERRARIS, F. 1981. Hoja Los Ángeles-Angol, escala 1:250.000. *Mapas geológicos preliminares de Chile*. Instituto de Investigaciones Geológicas. 25 pp. Chile.

FOLGUERA, A.; YAGUPSKY, D. Y MELNICK, D., 2002. Formación de la cuenca de cola de zorro (5 MA). Cordillera Neuquina-X región. Origen y emplazamiento del volcanismo plioceno inferior entre 36º-39º S: Actas del XV Congreso Geológico Argentino. El Calafate, 2002.

GAJARDO, A. 1981. Hoja Concepción-Chillán, *Mapas geológicos preliminares de Chile*, escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas: 56 pp.

GALLARDO, A. 1995. Caracterización Petrográfica, Estructural y Análisis de Facies, Miembro Lota Formación Curanilahue, Mina Lota, Enacar, VIII Región del Bío- Bío. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción.115 pp.

GARCÍA, F. 1968. Estratigrafía del Terciario de Chile central. En: CECIONI, G. (Ed.), Simposio Terciario de Chile, Zona Central. Editorial Andrés Bello, Santiago, 25–58.

GERHARD., 1991. Características y distribución de los placeres auríferos de Chile, artículos de congresos. Publicado en: *Simposio Internacional sobre Yacimientos Aluviales de Oro*, La Paz, junio, pp. 65-66.

GLODNY, J., LOHRMAN, J., SEIFERT, W., GRÄEFE, K., ECHTLER, H. Y FIGUEROA, O., 2002. Geochronological constraints on material cycling velocities, structural evolution, and exhumation of a paleo – acretionary wedge: the Bahía Mansa complex, south central Chile: 5th Symposium of Andean Geodinamics, Toulouse, pp. 259 – 261.

GLODNY, J.; LOHRMANN, J.; ECHTLER, H.; GRÄFE, K.; SEIFERT, W.; COLLAO, S. y FIGUEROA, O. 2005. Internal dynamics of a paleoaccretionary wedge: insights from combined isotope tectonochronology and sandbox modelling of the South-Central Chilean forearc. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 231 (1-2): 23-39 p. Palo Alto.

GLODNY, J.; ARDILES, M.; BURÓN, P.; COLLAO, S.; ECHTLER, H. & FIGUEROA, O. 2008. Differential Late Paleozoic active margin evolution in south-central Chile (37°S– 40°S): the Lanalhue Fault Zone. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 26: 397–411 p.

GREINER, G. 1991. Características y distribución de los placeres auríferos de Chile. Empresa Nacional de Minería (ENAMI), Santiago, Chile. 14 pp.

GROMET, L.P.; DYMEK, R.F.; HASKIN, L.A. y KOROTER, R.L., 1984. The North American shale composite, its compilation, major and trace elements characteristics. Geoch. Cosmoch. Acta 48: 2469-2482p.

GONZÁLEZ-BONORINO, F. y AGUIRRE, L. 1970. Metamorphic facies series of the crystalline basement of Chile. *Geologische Rundschau*. Vol. 59: 979-994 p.

HERVÉ, F.; HERVÉ, M.; MANTOVANI, M. y MUNIZAGA, F. 1976. Edades Rb/Sr Neopaleozoicas del Basamento Cristalino de la Cordillera de Nauhuelbuta. Congreso Geológico Chileno Nº 1: 19-26 p. Santiago.

HERVÉ, F. 1977. Petrology of crystalline basement of the Nahuelbuta Mountains, south central Chile. En Comparative Studies on the Geology on the Circumpacific Orogenics Belts in Japan-Chile. (T. Ishikawa y L. Aguirre). *Japan Society for the Promotion of Science*: 1-51 p. Tokio.

HERVÉ, F. 1988. Late Paleozoic subduction and accretion in Southern Chile. *Episodes*. Vol. 11: 183–188 p.

HERRON, M., 1998. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from corco r log data. *Journal of sedimentary petrology*. Vol. 58: 820-829 p.

HINTZE, F.; ARÉVALO, A.; GUERRA, A. y PINTO, H. 1981. Prospección y estudio del yacimiento carbonífero del sector Los Pehuenches Concesión Lebu, Región de Bío-Bío. Evaluación Geológica. Corporación de Fomento de la Producción. Comité de Carbones. 90 pp. Santiago.

ILABACA U., ENAMI., 1986. Observaciones preliminares en los lavaderos de Pocuno y Antiquina, comuna de Contulmo. Publicado en: *Plan Aurífero Nacional*. 1986, v.29: 10 pp.

KAIZUKA, S.; MATSUDA, T.; NOGAMI, M. y YONEKURA, N. 1973. Quaternary tectonic and recent seismic cristal movements in the Arauco Peninsula and its environs, Central Chile. Geographical Reports Tokyo Metropolitan University 8: 1-49 p.

KIMINAMI, K y TODA, Y., 2007. The parentage of low-grade metasediments in the Sanbawa Metamorphic Belt, southern área of Mina City, Tokushima Prefecture, Japan.

LAGOS, G.; JARA, R.; MARQUARDT, C.; JARA, J. y PETERS, D. 2015. Proyecto "Identificación y valorización de recursos mineros aluviales de oro en Chile". Informe de avance. Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería de Minería (Inédito): 950 pp. Santiago.

LÓPEZ, V. 2006. Geoquímica de Elementos Traza. Using Geochemical Data. Rollinson. Chapter N°4.

LUCASSEN, F.; TRUMBULL, R.; FRANZ, G.; CREIXELL, C.; VÁSQUEZ, P.; ROMER, R. y FIGUEROA, O., 2004. Distinguishing crustal recycling and juvenile additions at active continental margins: the Paleozoic to recent compositional evolution of the Chilean Pacific margin (36–41º S). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 17 (2): 103–119 p.

MACDONALD, E. H. 1983.Alluvial Mining: the Geology, Technology and Economics of Placers. London and New York (Chapman and Hall), 508 pp.

MARDONES, M., 1999. Contribución al conocimiento geomorfológico de las cuencas hidrográficas de los lagos Lanalhue y Lleulleu. In: Revista Geográfica de Chile terra australis, 44. (1999), S. 87-106 p.

MEGO, C., 2017. Proyecto: diseño de pique para exploración minera en cerro poma 1.

MELNICK, D.; ECHTLER, H.; FOLGUERA, A.; BHOM, M., PINEDA, V.; MANZANARES, A. y ASCH, G., 2003. Quaternary tectonics of the Andean margin at 37ºS. Subduction Zone Processes in Souther Chile: International Workshop, Pucón – Chile.

MELNICK, D.; BOOKHAGEN, B.; STRECKER, M.R.y ECHTLER, H.P., 2009. Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of years, Arauco peninsula, Chile. Journal of Geophysical Research. Vol. 114.

MENDOZA, J.L, 2001. Distribución, caracterización, génesis y características tectónicas de los yacimientos de arenas silícias del área costera de la Octava Región, entre Coliumo y Los Álamos. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción (Inédito). 181 pp. Concepción.

MORENO, M.; MELNICK, D.; AGUILAR, G.; PINEDA, V. y ECHTLER, H., 2003. Análisis espacial de las terrazas marinas en la costa chilena entre los 37º-38ºS: Alzamiento Pleistoceno diferencial en bloques del ante-arco. X Congreso Chileno, Concepción, Chile.

MORENO, M. 2004. Dinámica del ante-arco externo en la zona del bloque de Arauco, VIII Región del Bio Bio. Chile. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 121pp. Concepción.

MUÑOZ, C., 1946. Estado Actual del conocimiento sobre la geología de la provincia de Arauco. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. *Anales.* Vol. 3: 63 pp. Santiago.

MUÑOZ, C., 1956. Chile. In Handbook of South American Geology. Geological Society American, Nº 65. 187 – 214 p.

MUÑOZ, C., 1968. Contribución al conocimiento geológico de la región situada al Sur de Arauco y partición del material volcánico en los sedimentos Eocenos. En Terciario de Arauco (G. Cecioni Ed). Ed. Andrés Bello. Santiago, 63-94 p.

PARADA, M.A.; LÓPEZ-ESCOBAR, L.; OLIVEROS, V.; FUENTES, F.; MORATA, D.; CALDERON, M.; AGUIRRE, L.; FÉRAUD, G.; ESPINOZA, F.; MORENO, H.; FIGUEROA, O.; MUÑOZ BRAVO, J.; TRONCOSO VÁSQUEZ, R. y STERN, CH.R. 2007. Andean Magmatism. En: The Geology of Chile. Moreno, T. & Gibons, W. (Eds.). The Geological Society of London: 115-146 p. Londres.

F. J. PETTIJOHN. y P. E. POTTER., 1987. Siever. Sand and sandstones, Springer-Verlag; New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo, 2nd ed., XVIII. 618 pp.

PINCHEIRA, M.; JARAMILLO, E. y BLANCO, N. 1991. Evaluación preliminar de los placeres auríferos de la VIII Región. Universidad de Concepción: 65 pp. Concepción.

PINEDA, V. 1983. Evolución Pelaogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior- Terciario. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile (Inédito): 268 pp. Santiago.

SALAZAR, C. 2004. Ammonites del Maastrichtiano de la Formación Quiriquina, VIII Región del Bío-Bío, Chile Sistemática, Bioestratigrafía y afinidades paleobiogeográficas. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 155 pp. Concepción.

SÁNCHEZ, M., 2004. Geología Estructural de la Isla Mocha, Memoria de Titulo de Geólogo, Universidad de Concepción. 146 pp.

SMEDLEY, P.L. y KINNIBURGH, D.G., 2002. A Review of the Source, Behavior and Distribution of Arsenic in Natural Waters. Applied Geochemistry, 17, 517-568 p.

STANGE, F. 2011. Posibles fuentes de los placeres auríferos en la Cordillera de la Costa, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 130 pp. Concepción.

STINNESBECK, W. 1986. Zu den faunistischen und palökologischen Verhältnissen in der Quriquina Formation (Maastrichtium) Zentral-Chiles. Palaeontographica, A194, 99- 237, plates 1-16.

TAVERA, J. 1942. Contribucion al estudio de la estratigrafía y paleontología del Terciario de Arauco. Congreso Panamericano de Ingeniería en Minas y Geología No 1. Actas 1-2: 580-632 p.

TAVERA, J. 1960. El Triásico del valle inferior del río Biobío. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, *Anales Univ. Chile*. Vol.17: 321-349.

TAYLOR, S.R. y MCLENNAN S.M., 1985. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 312 pp.

VÁSQUEZ, P. 2001. Petrología y geotermobarometría del basamento metamórfico de la Cordillera de La Costa de Chile entre los 36° 30’ y 38° 00’ S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 170 pp. Concepción.

VEYL, C. 1961. Los sismos y las erupciones de mayo de 1960 en el sur de Chile. *Sociedad Chilena de Química, Boletín,* Vol. 11, No. 1-2, 20-32 p.

WILLNER, A.; THOMSON, S.; KRÖNER, A.; WARTHO, J.; WIJBRANS, J. y HERVÉ, F. 2005. Time markers for the evolution and exhumation history of a late Paleozoic paired metamorphic belt in central Chile (34°–35°30′S). *Journal of Petrology*. Vol. 46 (9): 1835 – 1858 p.