



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ANÁLISIS DE LA GEOMORFOLOGÍA Y SEDIMENTOLOGÍA
DE LA QUEBRADA LOS CHOROS, REGIONES DE ATACAMA Y
COQUIMBO, CHILE (29°09' Y 29°33'S)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

TANIA RAYÉN OCAMPO PAINEPÁN

**PROFESOR GUÍA:
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LUISA PINTO LINCOÑIR
MARÍA VICTORIA SOTO BÄUERLE**

SANTIAGO DE CHILE

2015

ANÁLISIS DE LA GEOMORFOLOGÍA Y SEDIMENTOLOGÍA DE LA QUEBRADA LOS CHOROS, REGIONES DE ATACAMA Y COQUIMBO, CHILE (29°09' Y 29°33'S).

La cuenca de drenaje Los Choros se encuentra inserta en el semiárido de Chile, es una cuenca costera que tiene un área 3.838 km², razón por la cual califica como una cuenca grande, a pesar de que, en el presente, exhibe escorrentía superficial solo en eventos tormentosos, como los producidos durante el año 1997 y en marzo del 2015, y presenta un aporte nival despreciable.

En el presente trabajo se estudia la morfometría y geomorfología de la cuenca de drenaje Los Choros, además de la sedimentología, granulometría y proveniencia de sedimentos de tamaño arena a lo largo de la quebrada principal, homónima, con el objeto de ser comparados con sedimentos del manto arenoso en los sectores de Choros Bajos y Punta de Choros. Todo lo anterior, tiene el fin de aportar en el estudio de la evolución geomorfológica de la cuenca Los Choros, caracterizar sus crecidas, y estudiar el movimiento de material fino dentro de la quebrada en períodos de sequía, además de su posible aporte de material sedimentario a mantos arenosos costeros de la zona.

La morfometría actual de la cuenca Los Choros indica que durante eventos de crecida, el o los flujos, se generaría una respuesta gradual en el hidrograma de la desembocadura, a pesar de poseer un gran poder erosivo.

Se interpreta que la cuenca de drenaje Los Choros tiene una actividad fluvio-aluvial de tipo costera desde el Mioceno, desde cuando ha sido afectada por varios eventos de alzamiento producto de la aceleración de la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana, formando al menos 4 niveles de terrazas (T1, T2, T3, y T4), con diferencias métricas de altura, a los ~480, ~430, ~330 y 6 ka; mientras que los eventos recientes sólo habrían producido incisión centimétrica a lo largo de la quebrada (t' y t''), registrada en zonas altas de la misma.

Mediante el análisis macro-granulométrico y sedimentológico de cuatro calicatas desarrolladas a lo largo de la Quebrada Los Choros, se estima que los tamaños que dividen el transporte por tracción-saltación y saltación-suspensión, dentro del flujo de crecida, serían de 24,9 mm y 2 mm, respectivamente. Sin embargo, estos tramos se superpondrían, y serían relativamente constantes a lo largo de la quebrada principal. Otra observación importante, es que, dada sus características sedimentológicas y de distribución granulométrica, se deduce que los flujos serían del tipo hiperconcentrados, el cual, con una altura hidráulica de 50 cm, tendría una velocidad teórica de 1,3 m/s, valor cercano al observado en el evento de marzo del 2015.

Finalmente, mediante el estudio de proveniencia, se interpreta que existen dos tipos de fuentes de sedimentos en la Quebrada Los Choros: la primera, de mayor aporte, lejana, donde los sedimentos recorrerían cerca de 23 km, transportados por un medio fluvio-aluvial, y la segunda, de menor aporte, cercana, con un recorrido de 13 km (o mucho menor), transportados por un medio aluvio-coluvial.

La cuenca Los Choros se encuentra en una fase agradacional, con transporte de sedimento despreciable, sin embargo presenta la capacidad de transportar grande volúmenes de sedimentos hacia el mar durante eventos de crecida.

Quiero, puedo, entonces debo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al proyecto FONDECYT 1120234 “Geodinámica y tendencia evolutiva del sistema litoral de la mega ensenada de Coquimbo: hacia una prognosis de amenazas naturales para escenarios de cambios endógenos y exógenos” por el financiamiento a este trabajo.

Le agradezco infinitamente a mi profesor guía, Sergio Sepúlveda, por su infinita paciencia, comprensión, disponibilidad y apoyo. Gracias también a los miembros de mi comisión: Luisa Pinto por su buena disposición, sus comentarios y correcciones que ayudaron a mejorar este trabajo, y a María Victoria Soto por sus comentarios, y complemento al trabajo realizado.

Agradezco a quienes me acompañaron durante mi campaña de terreno, Misael Cabellos por su incondicional ayuda, durante y después del terreno. Álvaro Gallardo, Óscar y Don Pedro, funcionarios del IDIEM, por su compañía y trabajo realizado. Gracias también a aquellos funcionarios me ayudaron durante el desarrollo del trabajo en gabinete; Gracias Blanquita, y muchas gracias Carolina y Myriam, funcionarias de gestión docente, por el último empuje cuando creía que nada se solucionaría.

A todos los que me prestaron su ayuda y me dieron la mano en este duro e intenso periodo de auto-conocimiento, les estoy eternamente agradecida.

Gracias Lady y Julieta 🐾, por ser únicas, buenas compañeras, irremplazables y tenerme tanta fe día a día.

A mis amigos de la vida Belén, Vicky, Gaby y Seba, por su compañía durante tantísimos años, los adoro ❤️.

A los amigos que hice durante mi larga estadía en la Universidad de Chile, tanto a los que conocí por mi paso esporádico en arquitectura: Dani, Iván, Paulástica, como a los que conocí posteriormente en plan común: Romi, Pipe, Pastor, Cimmi, Ilo y Rurik, que me acompañaron durante largas tardes de estudio (?) y pérdida de tiempo. Y a los que posteriormente conocí en geología, entre los que destaco a mi curso: Gracias Gaby, Ale, Churrines, Salo, Fabi, Saúl (este es geólogo?), Clau, Flop, Menares, Aralo, Chino, Javi, Oliverito, Curotto, Vale, Caro, Feñi, Villedita, Pillina, Panchita, Cheketere, Roxi, Fel, Seba, Gordo, Papaya, Panchito C, Bobadilla, Chewi, Luquitas, Gato, Dani, Chumis, Venao, Katy, Iván, Laurita, Pancho Parra, Tito, Juanfi, Éxito, Babi, Pau y Pipe Lagos. Mención honrosa a Lea Israel por acompañarme en estos últimos pasos (¡lo hicimos! ¡Yeyyy!). Gracias a todos aquellos que me sacaron una sonrisa, y a que confiaron en mí en algún momento. Espero que todos sepan que se ganaron un pedacito de mi corazón.

Gracias Mauricio por tu compañía, amor y por enseñarme a ocuparme antes de preocuparme, gracias por tu sabiduría y cariño, te amo con todo mi corazón. Gracias también a tu familia, familia Jofré Manríquez más Carlitos, por su alegría y confianza. Han abierto mis ojos con sus palabras y calidez, los quiero un montón.

Gracias a mi familia, por todo el amor y apoyo que me han dado durante todos mis años de vida. Madre mía, eres la más grande de todas! gracias por los abrazos, por el ánimo, cariño, calidez y todo TODO lo que me has dado, gracias por hacerme una mejor persona y quererme tantísimo.

Estoy agradecida de la vida que se me ha concebido, con ella todas las personas que he conocido, experiencias que he vivido y lugares que he visto. Espero poder retribuir alguna vez todo lo recibido.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Formulación de estudio	1
1.2	Objetivos.....	4
1.2.1	Objetivo general	4
1.2.2	Objetivos específicos	4
1.3	Metodología.....	4
1.4	Ubicación.....	5
1.5	Vías de acceso.....	5
2	Marco Regional.....	7
2.1	Marco Geológico	7
2.1.1	Estratigrafía.....	8
2.1.2	Estructuras	18
2.2	Marco Geomorfológico	18
2.2.1	Cordillera Principal Oriental	18
2.2.2	Cordillera Principal Occidental	19
2.2.3	Depresión de Domeyko.....	19
2.2.4	Cordillera de la Costa.....	19
2.2.5	Franja Litoral	19
2.3	Hidrología de la cuenca.....	21
2.4	Clima	22
2.4.1	Pluviometría	23
2.4.2	Temperatura.....	25
3	Metodologías	26
3.1	Geomorfología.....	26

3.1.1	Morfometría	26
3.1.2	Mapeo geomorfológico.....	27
3.2	Sedimentología.....	28
3.3	Proveniencia de la porción fina de la Quebrada Los Choros y manto arenosos Choros Bajos y Punta de Choros	33
3.3.1	Composición petrográfica-mineralógica de los sedimentos: conteos modales	34
3.3.2	Determinación de fuente de sedimentos: Método de G. Vezzoli (2007)	35
4	Relieve local y Morfología	39
4.1	Relieve local.....	41
4.2	Parámetros morfométricos	42
4.3	Red de drenaje.....	45
4.4	Unidades geomorfológicas.....	47
4.4.1	Formas de ladera.....	50
4.4.2	Formas y depósitos coluviales	51
4.4.3	Formas y depósitos del sistema fluvial.....	52
4.4.4	Formas y depósitos aluviales	57
4.4.5	Formas de remoción en masa.....	59
4.4.6	Formas y depósitos marinos.....	60
4.4.7	Depósitos eólicos.....	62
4.4.8	Pediplanicie Domeyko	62
4.4.9	Depósitos antropogénicos.....	63
4.5	Discusiones relieve local y morfología.....	64
4.5.1	Interpretación de los parámetros morfométricos.....	64
4.5.2	Posibles controles en la red de drenaje de la cuenca Los Choros.	66
4.5.3	Edad terraza abrasión marina	73

4.5.4	Relleno del valle en un contexto de aridez intermitente.	74
4.5.5	Evolución geomorfológica	75
5	Sedimentología y estratigrafía de la Quebrada Los Choros.....	80
5.1	Sedimentología superficial a lo largo de la Quebrada Los Choros.....	80
5.2	Macro-granulometría de la Quebrada Los Choros.....	84
5.3	Estratigrafía de calicatas	88
5.4	Discusiones	90
5.4.1	Aislamiento de laderas al fondo del valle.....	90
5.4.2	Capacidad de transporte por tracción de la Quebrada Los Choros.....	91
5.4.3	Diferencias entre análisis superficial y macro-granulométrico.	93
5.4.4	Fuentes de incertidumbre del análisis macro-granulométrico	94
5.4.5	Rangos transportados por el flujo	95
5.4.6	Tipo de flujo	97
5.4.7	Velocidad y Caudal.....	98
5.4.8	Velocidad horizontal del flujo en evento 2015.....	101
6	Composición petrográfica-mineralógica de las arenas de la cuenca de drenaje Los Choros y costa arenosa	102
6.1	Mineralogía y petrografía de depósitos actuales: asociación de minerales en sedimentos cuaternarios.....	102
6.1.1	Petrografía y mineralogía de la Quebrada Los Choros	102
6.1.2	Línea de costa arenosa sector Punta de Choros – Choros Bajos.....	105
6.2	Fuente de sedimentos más probables.....	108
6.2.1	Quebrada Los Choros-Romero.....	108
6.2.2	Línea de costa arenosa.....	116
6.3	Discusiones	118
6.3.1	Fuentes de incertidumbre de los resultados obtenidos.....	118

6.3.2	Control del sustrato en la mineralogía y petrografía de las arenas de Quebrada Los Choros.	120
6.3.3	Homogeneización de los sedimentos aguas abajo	123
6.3.4	Poblaciones de proveniencia	123
6.3.5	Disminución de movilidad de sedimentos aguas abajo.....	125
6.3.6	Diferencias con resultados de sedimentología superficial	126
6.3.7	Contribución a manto arenoso	127
7	Conclusiones generales	128
8	Recomendaciones.....	131
9	Bibliografía	132
	ANEXOS.....	1
	ANEXO A: Resumen paradas en trabajo de terreno.....	1
	ANEXO B: Granulometría superficial detalle de paradas	4
	ANEXO C: Informe técnico IDIEM	15
	ANEXO D: Tabla de valores obtenidos por macro-granulometría	29
	ANEXO E: Análisis macro-granulométrico	30
	ANEXO F: Fotomicrografías cortes.....	41
	ANEXO G: Descripción de los tipos de fragmentos detríticos	50
	ANEXO H: Mineralogía y petrografía miembros terminales.....	47
	ANEXO I: Resultados conteos modales	48
	ANEXO J: Limitaciones método Vezzoli (2007)	49
	ANEXO K: Posible aporte acumulativo en cada subcuenca	50
	ANEXO L: Método De Cowan-Strickler (Chow, 1959)	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación zona de estudio.....	1
Figura 1.2 Quebrada Los Choros con escorrentía superficial el 31 de marzo del 2015.....	3
Figura 1.3 Vías de acceso a la zona de estudio.....	6
Figura 2.1 Sección del Mapa Geológico de Chile, escala 1:1.000.000	7
Figura 2.2 Rasgos morfológicos regionales	20
Figura 2.3 Clima Regional.....	23
Figura 2.4 Distribución de precipitaciones anuales dentro de la Cuenca Los Choros	24
Figura 2.5 Relación entre elevación y precipitaciones.....	24
Figura 2.6 Relación entre elevación y temperatura.	25
Figura 3.1 Ubicación de puntos de control realizados en terreno	29
Figura 3.2 Diferentes tipos de gráficos para análisis granulométrico.....	30
Figura 3.3 Curva de frecuencia acumulativa destacando el agente transportador de los sedimentos.	31
Figura 3.4 Ubicación de las muestras de arenas extraídas en terreno para realizar cortes transparentes	33
Figura 4.1 Principales puntos de referencia	40
Figura 4.2 Mapa de pendientes de la cuenca de drenaje Los Choros.....	41
Figura 4.3 Variación de la pendiente del <i>thalweg</i> de la Quebrada los Choros	43
Figura 4.4 Formas fluviales.....	46
Figura 4.5 Geomorfología y litoestratigrafía de la cuenca Los Choros.....	48
Figura 4.6 Leyenda del mapa geomorfológico de la cuenca de drenaje Los Choros.	49
Figura 4.7 Formas de ladera.....	50
Figura 4.8 Formas coluviales	52
Figura 4.9 Terrazas de agradación recientes.....	54
Figura 4.10 Vistas en planta de terrazas fluviales	55
Figura 4.11 Llanura de inundación	56
Figura 4.12 Formas aluviales	57
Figura 4.13 Depósitos aluviales y fluviales antiguos	59
Figura 4.14 Depósitos de remoción en masa de caída de rocas	59
Figura 4.15 Formas marinas	61

Figura 4.16 Manto arenoso sector Choros Bajos	62
Figura 4.17 Pediplanicie Domeyko.....	63
Figura 4.18 Principales estructuras de la zona (en rojo).....	68
Figura 4.19. Morfologías con control estructural	70
Figura 4.20 Variación de pendiente a lo largo del <i>thalweg</i> de la Quebrada Los Choros, donde se indica el <i>kinckpoint</i>	71
Figura 4.21 Distintos niveles de terrazas marinas presentes en Carrizalillo.	72
Figura 4.22 Variación de las precipitaciones en la alta cordillera de los Andes semiáridos durante los últimos 30 ka.....	76
Figura 4.23 Superficies aterrazadas y sus edades	79
Figura 5.1 Puntos de control sedimentológico.	80
Figura 5.2 Fotografías tomadas durante campaña de terreno	81
Figura 5.3 Variación de diámetro máximo de fragmentos a lo largo de la Quebrada Los Choros	82
Figura 5.4 Fotografías de la Parada 8	83
Figura 5.5 Variación de rango de tamaño moda dentro de la matriz de los depósitos analizados superficialmente.....	84
Figura 5.6 Ubicación de calicatas.....	85
Figura 5.7. Parámetros granulométricos dimensionales	86
Figura 5.8 Parámetros estadísticos adimensionales	86
Figura 5.9. Curvas de frecuencia acumulativa.....	87
Figura 5.10 Columnas estratigráficas de calicatas estudiadas	89
Figura 5.11 Modos de transporte de bloques mayores a lo largo de la Quebrada Los Choros	91
Figura 5.12 Fotografía fragmentos presentes en Parada 7 y fotografía de fragmento mayor ubicado en la desembocadura de la Quebrada Los Choros.....	92
Figura 5.13 Trayecto recorrido por fragmento mayor encontrado en desembocadura....	93
Figura 5.14 Histograma de rango de tamaños en escala de Φ	95
Figura 5.15 Curvas de frecuencia unimodales de material transportado en saltación y material transportado en suspensión	97
Figura 5.16 Ubicación y orientación de perfiles para cálculo de velocidades y caudales .	99

Figura 5.17 Perfiles del valle para cada calicata con velocidad (V) y caudal (Q) teóricos del flujo, estimados según la ecuación de Manning (1889).....	100
Figura 5.18 Captura de video donde se observa el avance del flujo registrado el 25 de marzo del 2015	101
Figura 6.1 Mineralogía y petrografía de los puntos estudiados a lo largo de la Quebrada Los Choros	103
Figura 6.2 Mineralogía y petrografía de los puntos estudiados en los campos arenosos Choros Bajos y en el sector Punta de Choros.....	106
Figura 6.3 Unidades geológicas de la zona y límites de las sub-cuencas	108
Figura 6.4 Probables fuentes de sedimentos subcuenca 2 y subcuenca 5.....	110
Figura 6.5 Probables fuentes de sedimentos subcuenca 6 y subcuenca 9.....	112
Figura 6.6 Probables fuentes de sedimentos subcuenca 11 y subcuenca 22	113
Figura 6.7 Probables fuente de sedimentos subcuenca 12 y subcuenca 18	114
Figura 6.8 Probables fuente de sedimentos de la desembocadura de la cuenca de drenaje Los Choros	115
Figura 6.9 Probable aporte del total de los miembros terminales a la desembocadura..	116
Figura 6.10 Gráfico de porcentaje de minerales y líticos de mayor abundancia versus litología del substrato	121
Figura 6.11 Gráfico distancia a la desembocadura versus distancia a probable fuente de sedimentos	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Escala de tamaño de granos (Wentworth, 1922), mostrando la correlación entre ϕ y d.	31
Tabla 3.2. Escala de valores para la escala de selección (Modificada de Folk y Ward, 1957)	34
Tabla 3.3. Escala de valores del grado de asimetría (Modificado de Folk y Ward, 1957)....	34
Tabla 3.4. Escala de valores del grado de curtosis (Modificado de Folk y Ward, 1957) ..	35
Tabla 4.1 Características geométricas de la Cuenca de drenaje Los Choros	44
Tabla 4.2 Pendiente de quebradas principales.....	44
Tabla 4.3 Parámetros morfométricos de la cuenca de drenaje Los Choros	45
Tabla 4.4 Formas de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad, tomado de Campos (1992)	46
Tabla 4.5 Clases de cuencas según el Factor de Forma, tomado del instituto nacional de Ecología, México, 2012.....	46
Tabla 5.1. Valores de percentiles para calicata 1.....	87
Tabla 5.2. Valores de coeficientes estadísticos de Folk (1974) para el análisis granulométrico de la calicata 1.....	87
Tabla 5.3. Valores de percentiles para calicata 2.....	89
Tabla 5.4. Valores de coeficientes estadísticos de Folk (1974) para el análisis granulométrico de la calicata 2.	89
Tabla 5.5. Valores de percentiles para calicata 3.....	91
Tabla 5.6. Valores de coeficientes estadísticos de Folk (1974) para el análisis granulométrico de la calicata 3.	91
Tabla 5.7 Valores de percentiles para calicata 4.....	93
Tabla 5.8 Valores de coeficientes estadísticos de Folk (1974) para el análisis granulométrico de la calicata 4.	94
Tabla 6.1 Coeficientes de ajuste (R^2 y s) para los puntos de control correspondientes al manto arenoso costero, determinados según su similitud a los sedimentos pertenecientes a la desembocadura de la Quebrada Los Choros (punto de control 16)	115

1 Introducción

1.1 Formulación de estudio

La cuenca Los Choros (Ver Figura 1.1) se encuentra entre las coordenadas $29^{\circ}09'S$ y $29^{\circ}33'S$, y $71^{\circ}18'W$ y $70^{\circ}34'W$, a aproximadamente 80 km hacia el norte de La Serena, inserta en el semiárido chileno, zona en que las lluvias anuales están entre los 200 y 400 mm (Verheye, 2006), en el sector administrativo de La Higuera. Según datos de los últimos 35 años, obtenidos de la base de datos de la Dirección General de Aguas en la estación meteorológica El Trapiche, ubicada en el sector centro-norte de la zona de estudio, la precipitación media anual en la zona es de 46 mm (sitio web: snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes).



Figura 1.1 Ubicación zona de estudio. B y C corresponden al zoom de las zonas enmarcadas en A y B, respectivamente.

La cuenca de drenaje Los Choros nace desde la Cordillera Principal Oriental, y presenta una orientación principalmente Este-Oeste (Ver Figura 1.1). Posee un aporte de aguas principalmente pluvial, donde el aporte nival es despreciable, siendo una de las razones por la cual no presenta escurrimiento continuo durante los últimos años (Departamento de estudios y planificación de los recursos hídricos, 2004).

García-Huidobro (2007) señala que la Quebrada Los Choros, aguas abajo de Junta de Chingoles (aproximadamente 66 km aguas arriba desde la desembocadura de la quebrada principal), es, en su mayor parte, un arroyo efímero que presenta flujo superficial solo en aquellas ocasiones en que las lluvias invernales son muy grandes, y que revisten carácter catastrófico. Por lo anterior, se presume que en presencia del fenómeno de El Niño, período en el cual se registran intensas lluvias, esta se pudiese reactivar, adquiriendo cierta dinámica, la cual se pretende estudiar. Este tipo de situación se presentó el año 1997, año en el cual se alcanzaron los 178,5 mm anuales de precipitaciones en la estación El Trapiche (a 600 m s.n.m.), pero que alcanzó los 250,5 mm en la estación meteorológica El Corral (1820 m s.n.m.), concentrados entre los días 10 y 12 de junio (79,5 mm en El Trapiche, y 70 mm en El Corral) y el 16 y 17 de agosto (71,5 y 75 mm en El Trapiche y El Corral, respectivamente), y el año 2015, donde solo entre el 23 y 25 de marzo se registraron 21 mm en la estación El Trapiche y 62 mm en la estación El Corral (información obtenida a partir de sitio web: snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes). En ambos casos la Quebrada Los Choros presentó escorrentía superficial, la cual llegó hasta el mar (Ver Figura 1.2).



Figura 1.2 Quebrada Los Choros con escorrentía superficial el 31 de marzo del 2015. Fuente: <https://www.facebook.com/1497578313816553/photos/a.1598519473722436.1073741859.1497578313816553/1598519940389056/?type=3&theater>. Facebook oficial de la Municipalidad de La Higuera.

Su relleno está constituido por sedimentos fluviales, aluviales y coluviales de edad holocena no consolidados, los cuales podrían ser removidos y transportados frente a eventos pluviométricos de características catastróficas en la zona como las señaladas anteriormente.

En el presente estudio, se pretende caracterizar geomorfológica y morfométricamente la cuenca de drenaje Los Choros, además de caracterizar los sedimentos que la constituyen, en el marco del proyecto FONDECYT 112023, “Geodinámica y tendencia evolutiva del sistema litoral de la mega ensenada de Coquimbo: hacia una prognosis de amenazas naturales para escenarios de cambios ambientales endógenos y exógenos”, analizando los procesos superficiales que afectan a la quebrada y a la cuenca en general, complementado esta información con estudios sedimentológicos, granulométricos y de proveniencia de material tamaño arena. Para luego constreñir el aporte de la misma a los mantos arenosos presentes en la ensenada Los Choros.

En resumen, el presente estudio, mediante un análisis geomorfológico, morfométrico, sedimentológico y estudio de proveniencia, procura aportar en el estudio de la dinámica de quebradas aluviales en el semiárido chileno, en especial de la Quebrada Los Choros, tanto en eventos de altas precipitaciones, como en períodos de sequía.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar la geomorfología y sedimentología de la Quebrada Los Choros, e interpretar su nivel de aporte de sedimentos al litoral asociado, en un contexto de clima árido y de las potenciales crecidas del valle.

1.2.2 Objetivos específicos

- I. Acotar características, de modo cualitativo, de los flujos que se desarrollarían en la cuenca de drenaje Los Choros.
- II. Establecer una posible evolución geomorfológica de la cuenca Los Choros.
- III. Acotar cuantitativamente las características de los flujos presentes en la quebrada principal, Quebrada Los Choros.
- IV. Verificar fiabilidad de resultados obtenidos para la Quebrada Los Choros.
- V. Acotar fuentes de proveniencia de sedimentos presentes en el *thalweg*.
- VI. Determinar el aporte sedimentológico desde la quebrada Los Choros al manto arenoso asociado.

1.3 Metodología

A continuación se enumeran y describen, en forma general, las metodologías utilizadas para alcanzar los objetivos específicos planteados en la sección 1.2, las cuales serán detalladas en la sección 3.

- I.** Cálculo y evaluación de parámetros morfométricos de la cuenca de drenaje Los Choros, en base al modelo de elevación digital, el cual es manejado con el *software ArcGis 10.1*.
- II.** Desarrollo de un mapa geomorfológico a escala 1:100.000 de la cuenca de drenaje Los Choros, utilizando imágenes satelitales, además de observaciones de terreno, e integrando la información obtenida en el *software ArcGis 10.1*.
- III.** Establecer el tipo de flujo que se presentaría en la quebrada principal a través de características sedimentológicas y macro-granulométricas de los flujos que ha presentado la misma, mediante la confección de 4 calicatas ubicadas a lo largo de la quebrada principal, con ello estimar velocidad y caudal del flujo.

- IV. Comparar resultados con el registro de videos del evento de crecida durante marzo del 2015.
- V. Realizar conteos modales de la porción fina de los sedimentos presentes en el *thalweg*, y posteriormente aplicar metodología de Vezzoli (2007) a cada punto de control de sedimentos para determinar las fuentes de sedimentos más probables.
- VI. Con la misma metodología mencionada en el punto anterior, comparar sedimentos presentes en la desembocadura de la Quebrada Los Choros con los presentes en el manto arenoso costero.

1.4 Ubicación

La zona de estudio corresponde a la cuenca de la Quebrada Los Choros, la cual se encuentra ubicada en el extremo norte de la región de Coquimbo, $29^{\circ}09'$ y los $29^{\circ}33'$ latitud Sur, y los $70^{\circ}28'$ y los $71^{\circ}21'$ de longitud Oeste (Ver Figura 1.1). La zona pertenece administrativamente a la comuna de La Higuera.

1.5 Vías de acceso

En la Figura 1.3 se pueden observar las principales rutas de la zona, a la cual se puede acceder por la Ruta 5 Norte, recorriendo aproximadamente 80 km desde La Serena hacia el Norte.

La Quebrada Los Choros se puede recorrer en gran parte por caminos en buen estado, y, en algunos sectores, por huellas. La quebrada principal se puede recorrer de Este a Oeste siguiendo el camino a Punta de Choros, al llegar a la confluencia de las quebradas Choros Altos y Los Choros, se puede seguir por la carretera Panamericana hasta llegar a localidad Llano de las Perdices, luego de la confluencia con la Quebrada Pelicano, donde se debe tomar el desvío hecho por la empresa *Barrick Gold Corporation* hacia sus instalaciones del proyecto Pascua Lama.

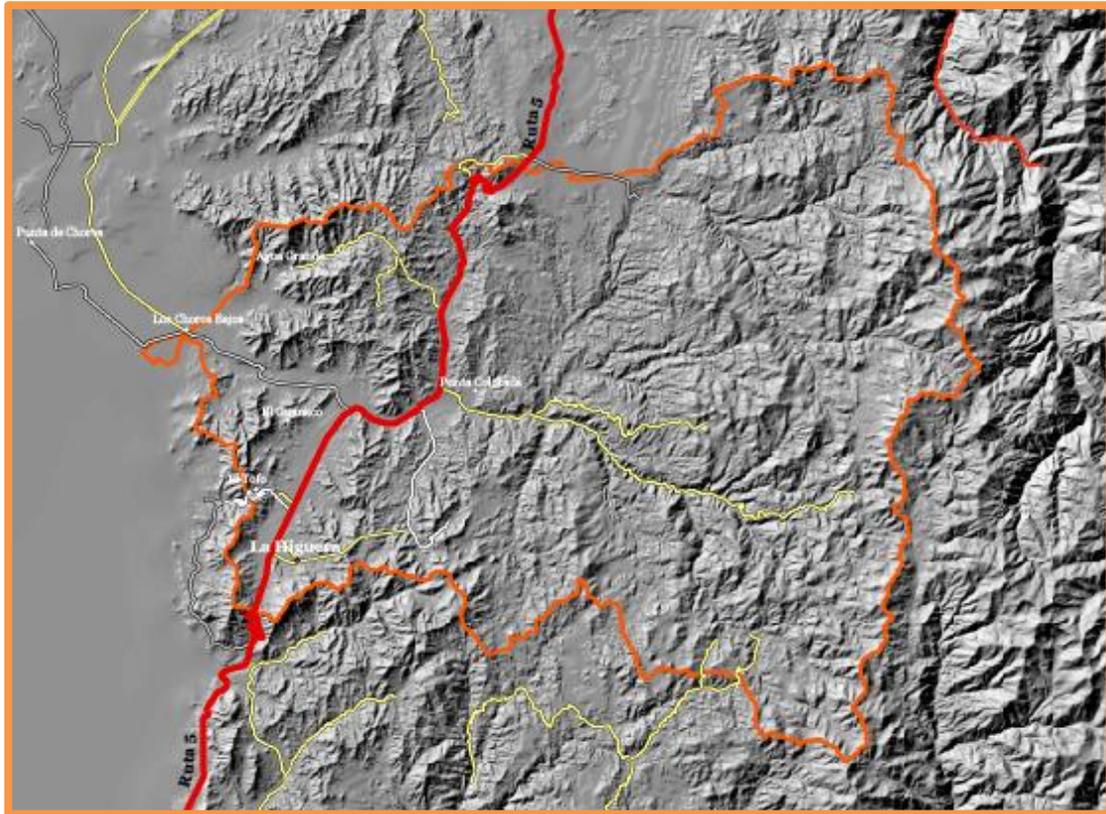


Figura 1.3 Vías de acceso a la zona de estudio. Enmarcada en naranja la cuenca de drenaje Los Choros, en rojo la Ruta 5 Norte.

2 Marco Regional

2.1 Marco Geológico

En la Figura 2.1 se muestra una sección del Mapa Geológico de Chile, donde se enmarca con azul la cuenca hidrográfica Los Choros, la zona de estudio correspondiente.

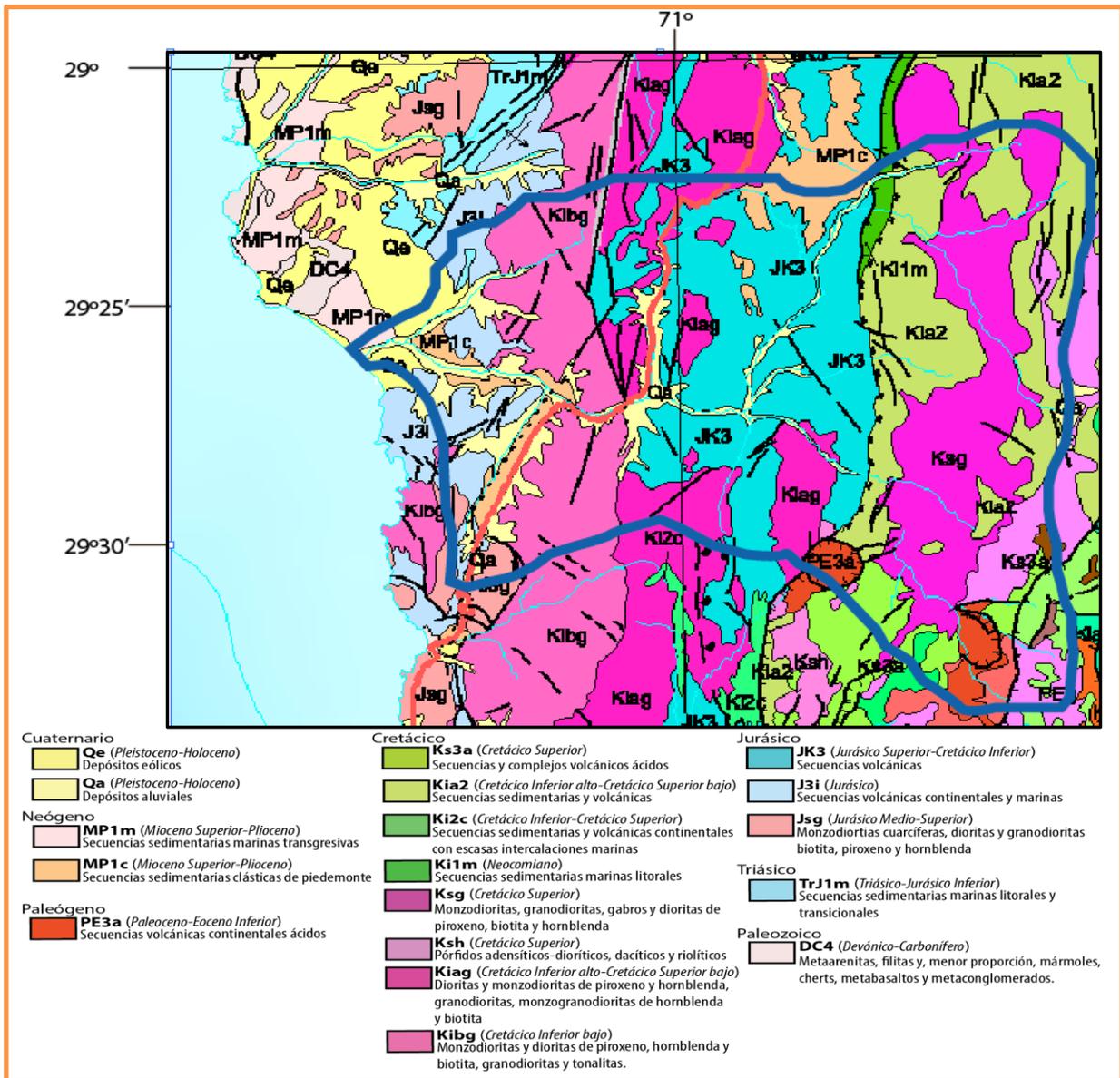


Figura 2.1 Sección del Mapa Geológico de Chile, escala 1:1.000.000, SERNAGEOMIN (2003). Enmarcada en azul se encuentra la cuenca Los Choros.

El marco geológico de la cuenca Los Choros se basa en los trabajos de Moscoso *et al.* (1982), la carta Geología del área Carrizalillo–El Tofo realizada por el SERNAGEOMIN (Creixell *et al.*, 2012), y la carta geológica del área Estación Chañar-Junta de Chingoles, realizada por el SERNAGEOMIN (Creixell *et al.*, 2013). Además se tomaron en cuenta los datos registrados por Saenz (2004), donde se describen a mayor detalle los depósitos no consolidados. Se incluye la abreviación de las unidades que aparecen en el mapa geológico y geomorfológico de la zona de estudio (mapa fuera de texto y Figura 4.5, leyenda en Figura 4.6).

2.1.1 Estratigrafía

2.1.1.1 Paleozoico

2.1.1.1.1 Complejo Metamórfico Punta de Choros (Carbonífero-Pérmico)

Dentro de la superunidad, definida por Moscoso *et al.* (1982), Metamorfitas de la Costa, DC4 en Figura 2.1, esta unidad es redefinida por Creixell *et al.* (2012), como un complejo de rocas metamórficas conformado principalmente por esquistos micáceos, esquistos verdes y anfibolitas, asociadas íntimamente a rocas meta-sedimentarias de menor grado metamórfico, afloran de buena forma a lo largo de la costa entre el poblado de Punta de Choros y Chañaral de Aceituno. También conforman la mayor parte de las islas aledañas a la zona, tales como, Gaviota, Choros, Damas y Chañaral (Aguirre, 1967).

2.1.1.1.2 Estratos del Llano de Chocolate (Pérmico)

Esta unidad fue definida por Welkner *et al.* (2006) como una secuencia clástica y carbonatada marina, en parte fosilífera (fauna pérmica). Suprayace a la Formación Canto del Agua.

2.1.1.2 Triásico

2.1.1.2.1 Formación Canto del Agua (Triásico Inferior-Jurásico Inferior)

Corresponde a Trj1m en la Figura 2.1. Fue definida por Moscoso *et al.* (1982), corresponde a una secuencia sedimentaria clástica de origen principalmente marino, compuesta primordialmente por areniscas y conglomerados cuarcíferos, además de brechas, lutitas, calizas brechosas, calcarenitas y tobas, portadoras de fauna fósil. La

Formación Canto del Agua sobreyace en discordancia angular y de erosión al Complejo Metamórfico Punta de Choros e infrayace en discordancia angular al Grupo Bandurrias, y se yuxtapone en contacto por falla (Falla Las Leñas) sobre la Formación Punta del Cobre.

2.1.1.3 *Jurásico*

2.1.1.3.1 Franja Intrusiva Occidental o Costera.

Plutones que intruyen rocas triásicas y paleozoicas. En la zona de estudio, destaca la Tonalita de Quebrada la Vaca (Creixell *et al.*, 2012), la cual intruye al Complejo Metamórfico Punta de Choros. En la Figura 2.1 corresponden a la unidad Jsg.

2.1.1.4 *Jurásico Superior- Cretácico Inferior*

2.1.1.4.1 Formación Punta del Cobre (JKpc) (Jurásico Superior-Huateriviano)

Se dispone, por encima de la Formación Canto de Agua, en contacto por falla. Sobreyace a la Formación La Negra (Welkner *et al.*, 2006). Definida en primera instancia por Segerstrom y Ruiz (1962), corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria heterogénea, formada, en orden decreciente de abundancia, por lavas, brechas, tobas, areniscas y calizas. Aflora en la mayor parte de la zona, desde la costa hasta los 71°45'W. La secuencia está constituida por 6 miembros definidos por Creixell *et al.* (2012), los cuales son: Unidad basal (JKpc1) de areniscas y brechas de composición volcánica ácida, brechas epiclásticas de estratificación gruesa (JKpc2), andesitas ocoíticas vesiculares (JKpc3), secuencia sedimentaria de brechas, areniscas y calcilutitas (JKpc4), andesitas porfídicas con intercalaciones de tobas (JKpc5), y coladas de lavas andesíticas rojas alternadas con brechas epiclásticas rojizas e intercaladas con areniscas lenticulares (JKpc6). Los primero tres miembros son representados por J3i en la Figura 2.1, mientras que el segundo grupo, por JK3.

2.1.1.5 *Cretácico inferior*

2.1.1.5.1 Grupo Chañarcillo (Kic) (Hauteriviano-Barremiano, probablemente Aptiano)

Definida por Segerstrom y Parker (1959), Kilm en Figura 2.1, aflora en la parte nor-oriental de la zona de estudio. Se encuentra constituida por una secuencia de rocas

sedimentarias marinas, que agrupa de base a techo, las siguientes formaciones: Abundancia, Nantoco, Totoralillo y Pabellón. Las rocas calcáreas del Grupo Chañarcillo engranan, hacia el oeste y hacia el sur, con rocas volcánicas del Grupo Bandurrias.

2.1.1.5.2 Formación Bandurrias (Kib) (Hauteriviano- Albiano)

Ki2c en la Figura 2.1, fue definido en primera instancia por Segerstrom (1960), la cual corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria que yace sobre la Formación Punta del Cobre y está cubierta en discordancia, por la Formación Cerrillos. Compuesta por una sección inferior sedimentaria, una media volcánica andesítica y una superior de areniscas rojas, con intercalación de lavas andesíticas.

2.1.1.5.3 Franja Intrusiva Central

Kiag y Kibg en la Figura 2.1. Está conformada por extensos plutones, de forma elongada en dirección NS a NNE, que incluyen desde granitos hasta gabros. Intruye a la Formación Canto del Agua. Creixell *et al.* (2012) distinguen once unidades intrusivas que afloran en la zona de estudio, de los cuales la distribución, características litológicas generales, se describen a continuación.

2.1.1.5.3.1 Monzodiorita Cruz Grande

Aflora en las cercanías de la localidad de Chungungo, corresponde a una monzodiorita de anfíbola y biotita, presenta estructuras de deformación dúctil y recristalización. Además, se pueden reconocer zonas de mezcla parcial de magma (*mingling*).

2.1.1.5.3.2 Complejo Plutónico El Tofo (Kito)

Intruye a la Formación Punta del Cobre y a la Monzodiorita Cruz Grande. De composición que va diorítica a tonalítica de anfíbola y clinopiroxeno.

2.1.1.5.3.3 Intrusivos hipabisales Las Gualtatas (Kihlg)

Aflora entre las quebradas Los Choros y Cruz Grande, de dimensiones muy reducidas. Intruyen rocas estratificadas de la Formación Punta del Cobre, en cuyo contacto la roca

caja presenta alteración hidrotermal albítica, de epidota y sílicea. Se compone de microdioritas, localmente cuarcíferas de clinopiroxeno.

2.1.1.5.3.4 Complejo Plutónico Las Docas (Kild)

Compuesto por un cuerpo principal de dioritas cuarcíferas, las que sobreyacen a una subunidad de tonalitas, además de cuerpos menores de leucotonalitas y enjambres menores de diques riolíticos y daciandesíticos. Intruye a la Formación Punta del Cobre. En zonas de contacto entre la diorita y la leucotonalita se observa localmente un área de textura gnéisica.

2.1.1.5.3.5 Complejo Plutónico Retamilla

Descrito por Arévalo *et al.* (2003), está compuesto por compuesto por 3 subunidades tabulares. La subunidad inferior la constituyen granodioritas y tonalitas; la subunidad intermedia, por dioritas y la superior, por microgranitos.

2.1.1.5.3.6 Complejo Plutónico La Higuera (Kilh)

Descrito por Arévalo *et al.* (2003), este cuerpo se distribuye en una dirección NNE-SSW. La litología dominante son tonalitas y dioritas. El contacto occidental de este complejo plutónico corresponde a una franja milonítica de la Zona de Cizalle Algarrobo (ZCA).

2.1.1.5.3.7 Complejo Plutónico El Trapiche (Kiet)

Descrito por Creixell *et al.* (2012), el complejo plutónico se encuentra constituido por una subunidad superior de monzodioritas, una subunidad media de dioritas y bajo estas últimas, un nivel de monzodioritas cuarcíferas a granodioritas. Todas ellas localizadas directamente al este de la Zona de Cizalle La Higuera (ZCLH). La unidad superior aflora mayoritariamente en zonas topográficamente elevadas (e.g., cerro Cachiyuyo).

2.1.1.5.3.8 Diorita Zapallar (Kidz)

Descrito por Creixell *et al.* (2012) constituido por dioritas, las cuales están emplazadas en niveles estratificados de la Formación Punta del Cobre.

2.1.1.5.3.9 Intrusivos hipabisales dacíticos (Kihd)

Sus componentes varían de composición dacítica a riolítica, cuyos afloramientos discontinuos se distribuyen a lo largo de la Quebrada Agua Grande por el sur y la cabecera de la Quebrada Desvío Los Choros, por el norte. La mayor parte de estos intrusivos se presentan como diques o stocks. Intruyen rocas de la Formación Punta del Cobre y también a dioritas del Complejo Plutónico El Trapiche.

2.1.1.6 Cretácico Inferior-Superior.

2.1.1.6.1 Formación Cerrillos (Ksc)

Secuencia sedimentaria y volcánica, definida originalmente por Segerstrom y Parker (1959). Se representa como Kia2 (en conjunto con la Formación Viñita) en la Figura 2.1. Esta superunidad fue dividida en dos miembros por Creixell *et al.* (2013). EL Miembro Inferior (Ksc1), compuesto por areniscas y conglomerados tobáceos, y en menor proporción areniscas y lutitas calcáreas. El Miembro Superior (Ksc2), dispuesto concordantemente sobre el Miembro Inferior, es de carácter volcánico y se compone principalmente de tobas y brechas.

2.1.1.7 Cretácico Superior

2.1.1.7.1 Formación Pucalume

Definida originalmente por Dediós (1967), como una secuencia de origen continental, constituida principalmente por rocas sedimentarias clásticas y subordinadamente depósitos piroclásticos y lavas andesíticas. La cual se dispone sobre la Formación Algarrobal de manera discordante, en discordancia angular con la Formación Cerrillos, cubierta concordantemente por la Formación Viñita (Emparán y Pineda, 1999).

2.1.1.7.2 Formación Viñita (Ksv) (Santoniano-Campaniano)

Fue definida originalmente por Aguirre y Egert (1962), y redefinida por Emperán y Pineda (1999), como una secuencia volcánica con intercalaciones sedimentarias continentales, dispuesta concordantemente sobre los Estratos de Quebrada la Totora, por el oeste, y discordante por sobre la Formación Pucalume. En la Figura 2.1 es representada por las unidades Kia₂ y Ks_{3a}.

2.1.1.7.3 Franja plutónica Oriental

Franja compuesta por rocas intrusivas de disposición NS-NNE, se representa por las unidades Ksh y Ksg en la Figura 2.1, en la zona de estudio intruyen principalmente a la Formación Vicuña y Cerrillos. En la cuenca de drenaje los Choros se observan cuatro constituyentes de esta franja cuya definición fue presentada por Creixell *et al.* (2013).

2.1.1.7.3.1 Complejo Plutónico Agua Grande (Ksag)

Formado por dos subunidades intrusivas, una unidad inferior diorítica y una superior granodiorítica que se distribuye a lo largo del Cordón Chinchillón y en la localidad de Tres Cruces, donde fue descrita por Arévalo y Creixell (2010). Ambas unidades intruyen al Complejo plutónico El Trapiche, y de forma discordante a niveles altos de la Formación Punta del Cobre.

2.1.1.7.3.2 Complejo Plutónico Las Cabras (Kslc)

Definido por Creixell *et al.* (2013), constituye un cuerpo intrusivo macizo, principalmente granodiorítico y monzodiorítico. Intruye de forma discordante a la Formación Cerrillos.

2.1.1.7.3.3 Complejo Plutónico El Tabaco (Kset)

Formó parte de la unidad terciara de granodioritas definida por Mocosó *et al.* (1982), y fue dividida por Creixell *et al.* (2013). Está constituido por monzodioritas y localmente granodioritas. Intruye a la Formación Cerrillos y a la Formación Viñita. Su límite oriental

corresponde al sistema de fallas inversas (falla Vicuña y Chacay), la cual lo yuxtapone lateralmente con el Complejo Plutónico Peralta y rocas de la Formación Viñita.

2.1.1.7.3.4 Diorita Las Campanas (Ksdlc)

Definida por Creixell *et al.* (2013), intruye a la Formación Viñita por el este, a la Formación Cerrillos por el norte y rocas del Grupo Chañarcillo por el oeste, en este último contacto presenta una franja milonítica, desarrollado en las dioritas.

2.1.1.8 Paleoceno-Eoceno

2.1.1.8.1 Complejo Plutónico Los Morros (Pallm)

Constituido por Granodioritas y dioritas, fue definido por Creixell *et al.* (2013). Por el oeste intruye a la Formación Cerrillos, mientras que por el norte y por el este, intruye a la Formación Vicuña y al Complejo Plutónico El Tabaco. Constituye parte de la franja intrusiva Oriental, y por su distribución espacial estaría limitada por la unidad Ksh en la Figura 2.1.

2.1.1.8.2 Estratos de Quebrada El Calvario (PalEqc)

Esta unidad fue descrita por Emperán y Pineda (1999) como un conjunto de depósitos piroclásticos, andesitas de olivino y clinopiroxeno, e ignimbritas. Se encuentra en discordancia sobre la Formaciones Pucalume y Viñita, y su techo corresponde a la superficie de erosión actual En la figura 2.1 estaría representado por la unidad PE3a.

2.1.1.9 Eoceno

2.1.1.9.1 Complejo Plutónico Peralta (Ep)

También forma parte de la franja intrusiva oriental, y en la Figura 2.1 sería representado por la unidad Ksh, solo por su distribución espacial. Se encuentra formado por monzodioritas a grandioritas, el cual aflora a lo largo de una franja de dirección Norte-Sur. El oeste está limitado por la Falla Vicuña, que la pone en contacto tectónico con el Complejo Plutónico El Tabaco, al cual intruye en las cercanías de dicha estructura. Intruye a la Formación Viñita por el norte, la cual constituiría su techo.

2.1.1.10 Mioceno

2.1.1.10.1 Gravas de Domeyko (Mioceno medio).

Definida por Moscoso *et al.* (1982) como gravas de Atacama, renombradas como gravas de Domeyko por Arévalo *et al.* (2009), corresponde a un depósito de gravas polimícticas conformados por niveles aterrizados subhorizontales. Aflora en la parte norte-centro de la zona de estudio, de forma muy localizada. Se distribuyen a lo largo de la vertiente occidental de la Quebrada Almireces. Hacia el norte del área de estudio, esta unidad presenta un amplio desarrollo en la depresión homónima. Formación agrupada junto a formaciones Miocenas-Pleistocenas bajo el nombre MP1c en Figura 2.1.

2.1.1.11 Mioceno-Pleistoceno

En Figura 2.1, formaciones agrupadas junto a Gravas de Domeyko en Figura 2.1.

2.1.1.11.1 Formación Coquimbo (MPc_q) (Mioceno Medio – Pleistoceno Inferior)

Moscoso *et al.* (1982) agrupan de manera genérica todos los sedimentos marinos costeros ubicados entre los 28° y 30°S, lo cuales se encuentran restringidos a las zonas próximas a la costa, en especial, a los escarpes de quebradas costeras y al interior de las quebradas costeras. Yace sobre el Complejo Metamórfico Punta de Choros en discordancia angular.

Compuesta principalmente de areniscas macizas o con estratificación cruzada planar y tienen, en general, un color pardo amarillento muy característico, poseyendo cantidades variable de macro y micro fauna marina.

2.1.1.11.2 Formación Confluencia (MPc) (Mioceno Superior-Plioceno Inferior)

Corresponde a gravas, arenas y limos, semiconsolidados, continentales, de origen fluvio-aluvial, los cuales se interdigitan con la Formación Coquimbo (Rivano y Sepúlveda, 1991). A lo largo de la Quebrada Los Choros, entre la localidad de Choros Bajos y la desembocadura de la Quebrada Agua Grande, afloran depósitos de gravas equivalentes a esta unidad, los que corresponden a la facies fluvial, mientras que a lo largo de la Quebrada

Choros Altos, se encuentran facies aluviales correspondientes a la misma unidad. La facies fluviales, por su lado, engranan lateralmente con areniscas de la Formación Coquimbo.

2.1.1.11.3 Estratos de Quebrada El Jote (Plioceno Superior)

Depósitos de color amarillento a rojizo, ubicadas en la Quebrada El Jote, en discordancia angular sobre depósitos de la Formación Punta del Cobre (JKpc3) y en concordancia sobre gravas fluviales de la Formación Confluencia.

Compuesto de arenas y gravas matriz soportados, hacia el este de la Quebrada El Jote, contiene *oogonia* de carófitas.

2.1.1.12 Pleistoceno Holoceno

Depósitos no consolidados a semiconsolidados, descritos a mayor detalle por Saenz (2004).

2.1.1.12.1 Depósitos Aluviales

Están constituidos por gravas y arenas, con estratificación y selección. Se distribuye en toda la cuenca en forma de llanuras y abanicos aluviales, rellenando el fondo de las quebradas de mayor desarrollo.

En el sector alto de la Quebrada Los Choros la fracción clástica mayor (40%) puede presentar clastos de hasta 80 cm de diámetro, con valores de redondeamiento y esfericidad cercanos a 0,7. Su composición petrográfica corresponde a rocas volcánicas andesíticas e intrusivos dioríticos y granodioríticos en una matriz francamente arenosa (60%) con fracciones de sedimentos finos muy escasos.

En el tramo medio de la quebrada, los sedimentos muestran una granulometría donde la fracción mayor (20%) alcanza en promedio unos 40 cm en una matriz arenosa abundante (80%), con fracciones subordinadas de arenas finas y muy finas y con muy escaso limo y arcillas. En la zona distal, la pendiente del *thalweg* decrece considerablemente. Esto último controla la capacidad de transporte de material y genera una depósito donde los clastos mayores (<10%) no superan los 10 cm y presentan valores

de esfericidad y redondeamiento de 0,9 y 0,8, respectivamente. La matriz es muy abundante (90% o más) y está constituida por arena fina con fracciones subordinadas de arenas medias y muy finas.

2.1.1.12.2 Depósitos Coluviales

Corresponden a acumulaciones de materiales originados al pie de afloramientos rocosos y en zonas de fuertes pendientes. Forman conos gravitacionales cuyos extremos apicales presentan pendientes cercanas a 36°.

Estos depósitos son activos, ya que el material se encuentra en continua y lenta removilización, constantemente alimentado por desprendimiento de bloques y detritos de laderas. Están constituidos principalmente por material grueso (bloques angulosos, ripios y gravas) en una matriz que varía de arenosa gruesa a media, con escaso contenido de finos. Los coeficientes de redondeamiento y esfericidad no sobrepasan los valores de 0,5 y 0,6, respectivamente. Los materiales presentan una distribución caótica y su composición litológica consiste, principalmente en rocas volcánicas andesíticas y rocas intrusivas de composición diorítica, granodiorítica y granítica.

2.1.1.12.3 Depósitos Eólicos

Corresponden a mantos eólicos y campos de dunas, ampliamente distribuidos en la zona costera y también en algunos sectores del Llano Los Choros. El tamaño de las partículas se encuentra en el rango 1/2 a 1/16 mm. Se disponen, generalmente, sobre los sedimentos marinos de la Formación Coquimbo.

2.1.1.12.4 Depósitos Litorales

Descritos por Creixell *et al.* (2012) como limos, arenas y gravas que cubren terrazas de abrasión marinas y zonas litorales. Los cuales se han dividido entre subunidades activas e inactivas, donde los activos se encuentran restringidos a las playas actuales y se encuentran constituidos por arenas de grano medio, con buena selección y sin consolidación y limos evaporíticos depositados en ambiente lagunar. Por otro lado, la subunidad inactiva, son aquellos que cubren terrazas de abrasión marina, los cuales se

distribuyen en los llanos de Chañaral, Carrizalillo y Choros, incluyen cordones litorales que se orientan casi paralelos a la línea de costa actual; compuestos por depósitos subhorizontales, consistente en cantos rodados medios a gruesos, matriz soportados, localmente coquináceos, con matriz de grava fina a arena fina y abundante cemento calcáreo blanquecino. Contiene restos de gastrópodos y bivalvos marinos.

2.1.1.12.5 Depósitos Antrópicos

Plantas de beneficio, tortas de relave o botaderos estériles de yacimientos minerales.

2.1.2 Estructuras

Como se puede ver en la Figura 2.1, entre los 29° y 30°S existe una gran cantidad de lineamientos que siguen una orientación dominante NNE-SSW a NE-SW, las cuales corresponderían a la continuación del tramo El Salado-Vallenar del Sistema de Fallas de Atacama (Naranjo, 1987; Thiele y Pincheira, 1987; Welkner *et al.*, 2006). Dentro de este conjunto se encuentran estructuras nombradas en la sección anterior, tales como Zona de Cizalle Algarrobo, Sistema de Fallas El Tofo, Zona de Cizalle La Higuera y la Zona de Cizalle Apollillado (Creixell *et al.*, 2012).

2.2 Marco Geomorfológico

Paskoff (1970) describe tres grandes unidades de relieve en el segmento comprendido entre los 30° y 33°S Cordillera Principal Oriental, Cordillera Principal Occidental y Cordillera de la Costa, lo que para la zona de estudio es una generalización, desarrollándose además Planicie Litoral y Depresión Central, que en el sector recibe el nombre de Depresión de Domeyko, como se puede ver en la Figura 2.2. A continuación se presenta la descripción de dichas unidades geomorfológicas.

2.2.1 Cordillera Principal Oriental

Como es posible apreciar en la Figura 2.2, se encuentra conformada por cordones de tendencia Norte-Sur, elevada y maciza, cuyas cumbres sobrepasan los 4.000 m s.n.m. con alturas máximas que superan los 6.000 m s.n.m. En dicha unidad se presentan vestigios de acción glacial.

2.2.2 Cordillera Principal Occidental

Cadena discontinua, donde se observan depresiones relacionadas con los tributarios de las quebradas principales, la que se presentan limitadas por cordones montañosos de orientación Este-Oeste, que, a su vez, actúan como las divisorias de las redes de drenaje que se desarrollan en el área (ver Figura 2.2). Esta unidad alcanza cumbres de entre 1.000 y 3.000 m s.n.m. y como se observar en la Figura 2.2 se encuentra limitada por la Cordillera Principal Oriental hacia el Este.

2.2.3 Depresión de Domeyko

Esta depresión tiene un ancho máximo es 25 km y un largo de aproximadamente 100 km. Constituida por una superficie plana compuesta de sedimentos aluviales y roca, donde los primeros generan una carpeta sobre el sustrato rocoso estratificado (Urresty, 2009). Esta superficie se encuentra levemente inclinada hacia el Oeste y su altura varía desde los 900 m s.n.m. a los 1.300 m s.n.m. Se encuentra limitada por el oriente por la Cordillera Principal Occidental y por el occidente por la Cordillera de la Costa (Ver Figura 2.2).

2.2.4 Cordillera de la Costa

Cordones montañosos discontinuos de orientación aproximada N-S (Ver Figura 2.2), con alturas entre los 500 y 1.500 m s.n.m., interrumpidos por la incisión de valles.

2.2.5 Franja Litoral

Unidad de altura y ancho variable (Ver Figura 2.2). En la cual Moscoso (1979) distinguen el desarrollo de al menos cuatro niveles de terraza de abrasión, las cuales se encuentran incididas por las quebradas actuales, existe alta presencia de depósitos eólicos.

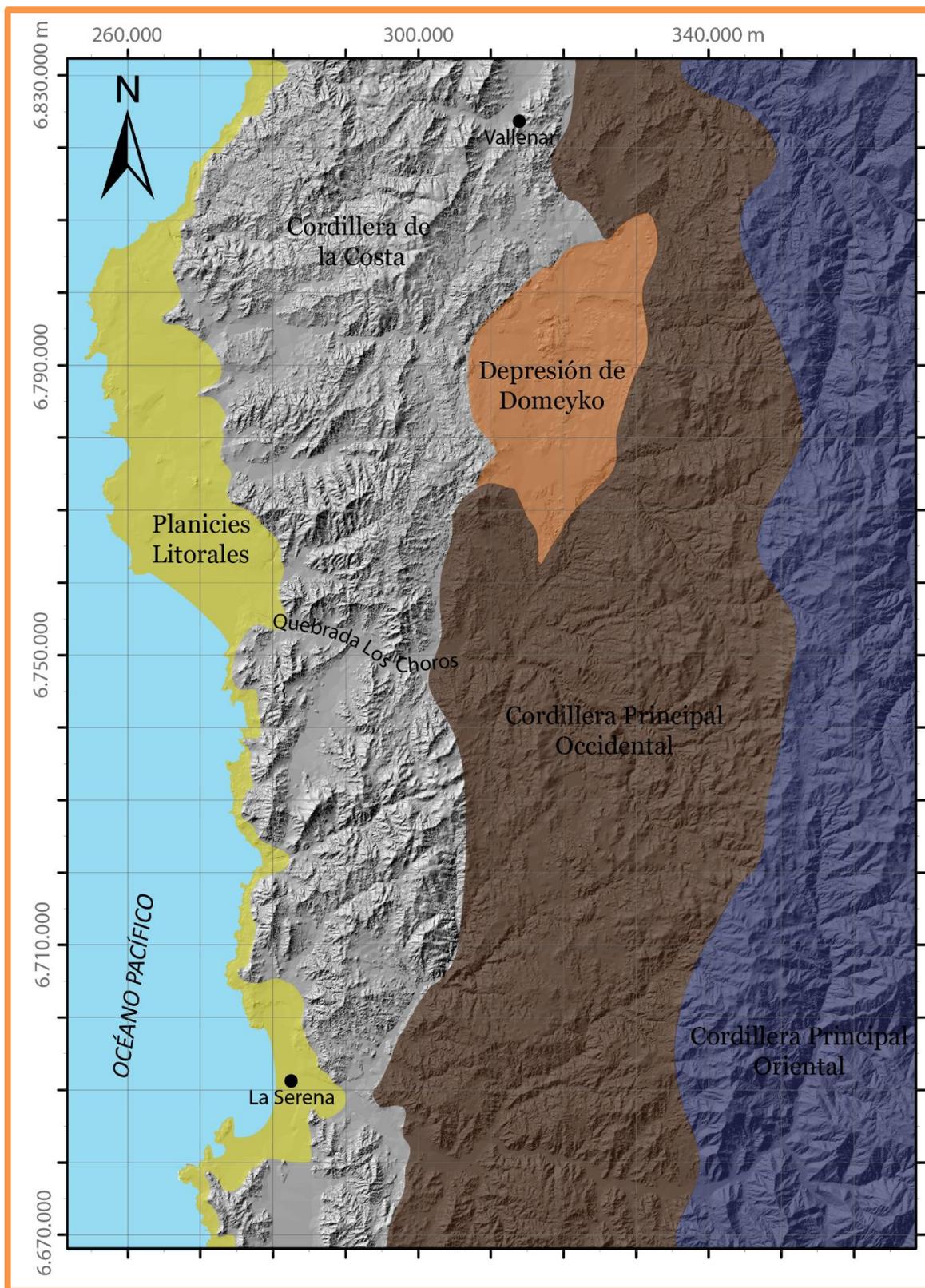


Figura 2.2 Rasgos morfológicos regionales. En la figura se señala la distribución de las unidades geomorfológicas regionales, además de la ubicación de la Quebrada Los Choros, (zona de estudio) y localidades principales aledañas. Modificado de Creixell *et al.* (2013).

2.3 Hidrología de la cuenca

Según Peralta *et al.* (1971), la cuenca hidrográfica de la Quebrada Los Choros tiene una superficie de 4.058 km², y corresponde a la hoya N°213 del grupo de Hoyas Pre andinas, la cual nace en el margen occidental de la Cordillera Principal Oriental, debido a que se ve interrumpida por el desarrollo de cuencas andinas, o bien, de cuencas cerradas transversales a la analizada en el presente estudio.

Los principales afluentes de la Quebrada Los Choros nacen en la Cordillera Principal Oriental, y corresponden a las quebradas Pedernales y Las Chacras. Aguas abajo, recibe los aportes de las quebradas Totorá, Pelicano, Chañar, Desvío Los Choros, Choros Altos y Romero de las cuales estas tres últimas se desarrollan en la Cordillera de la Costa, además de una serie de quebradas menores.

Antes de 1947 había arroyos perennes alimentados por manantiales permanentes, con flujos superficiales que alcanzaban decenas de litros por segundo, los cuales se vieron interrumpidos por el descenso del nivel estático del acuífero. Por tanto, en la actualidad, estos manantiales no existen (Peralta *et al.*, 1971). De este modo, la Quebrada Los Choros presenta escurrimiento superficial solo cuando las lluvias invernales son de carácter catastrófico, lo que ha ocurrido en 1997 y en marzo del 2015.

El agua subterránea se presenta a profundidades entre 18 y 65 m, con gastos específicos cercanos a los 0,8 l/s/m. En el pueblo Los Choros se ha reconocido un espesor de 22 m de relleno, donde el nivel freático está a 14 m de profundidad, con un gasto específico de 0,5 l/s/m (Peralta *et al.*, 1971). El año 2007 se realizaron estudios donde el gasto específico calculado fue entre 2 y 1,6 l/s/m y el flujo subterráneo hacia la desembocadura de la Quebrada Los Choros se estimó aproximadamente 80,6 l/s (García-Huidobro, 2007).

Según cálculos hechos por Saenz 2004, siguiendo metodología de Custodio y Lamas (1996), en el caso de eventos torrenciales (42 mm en 48 horas, la cual es la media durante los últimos 35 años) la escorrentía sería de 3,17 mm, si es que la precipitación llegase a los 63mm, la escorrentía alcanzaría valores de 11,33 mm.

2.4 Clima

Hacia el Norte de los 33° de latitud Sur, el sello dominante del clima en Chile es la aridez, determinado por la subsidencia subtropical. La corriente de Humbolt, fría, se desplaza hacia el Ecuador, ejerciendo un efecto en las temperaturas y la humedad de la zona, produciendo, por una parte, anomalías térmicas negativas, y por otra, neblina y nubosidad nocturna y matinal (Antonioletti *et al.*, 1972).

El semiárido de Chile, entre los 27° y 32°S, yace a lo largo de una zona de transición entre la hiper aridez del Desierto de Atacama, hacia el norte, y el clima mediterráneo, característico de la zona central de Chile, hacia el sur (Antonioletti *et al.*, 1972).

Según Antonioletti *et al.* (1972), la insignia climática de la zona es la componente desértica. Aquí, describe 3 tipos de climas cuya distribución espacial se muestra en la Figura 2.3, y cuyas características generales se presentan a continuación:

Desierto Costero con nubosidad abundante: Se caracteriza por la abundante nubosidad y neblinas litorales, especialmente durante la noche, las que desaparecen gradualmente hacia el mediodía. Estas ejercen cierta influencia hacia el interior al ingresar preferentemente por las quebradas transversales (Ver Figura 2.3).

Desértico transicional: Se desarrolla entre el límite de la influencia de la nubosidad costera y los 1.500 m s.n.m. (Ver Figura 2.3), caracterizándose por un aumento progresivo de la sequedad del aire con la altura.

Desértico frío de montaña: se encuentra entre los 1.500 y los 4.000 m s.n.m. (Ver Figura 2.3), y se caracteriza por una gran sequedad del aire y un alto contraste entre las temperaturas del día y la noche, con cielos permanentemente despejados.

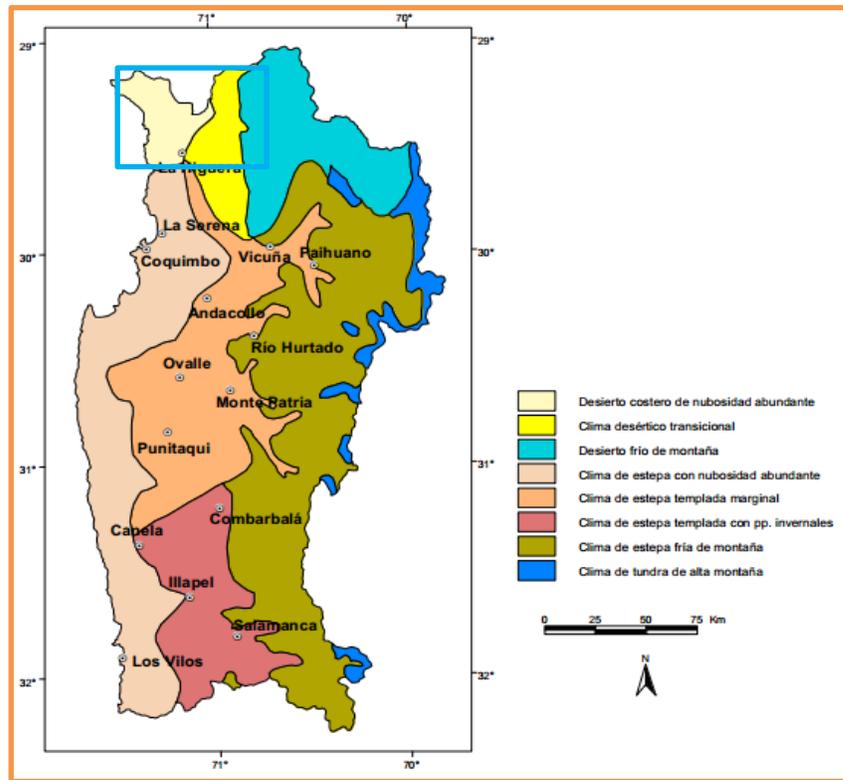


Figura 2.3 Clima Regional. El rectángulo celeste enmarca aproximadamente la zona de estudio (modificado de Romero *et al.*, 1988).

2.4.1 Pluviometría

La Dirección General de Aguas, el año 2004, genera un mapa con la variación de las precipitaciones a lo largo y ancho de la cuenca de drenaje Los Choros (Figura 2.4), donde se observa un paso de 35 mm en el sector costero, áreas bajas y medias, a un campo de mayor en precipitaciones a los pies de la Cordillera Principal Oriental, llegando a los 310 mm en la parte más alta (~4.000 m s.n.m.).

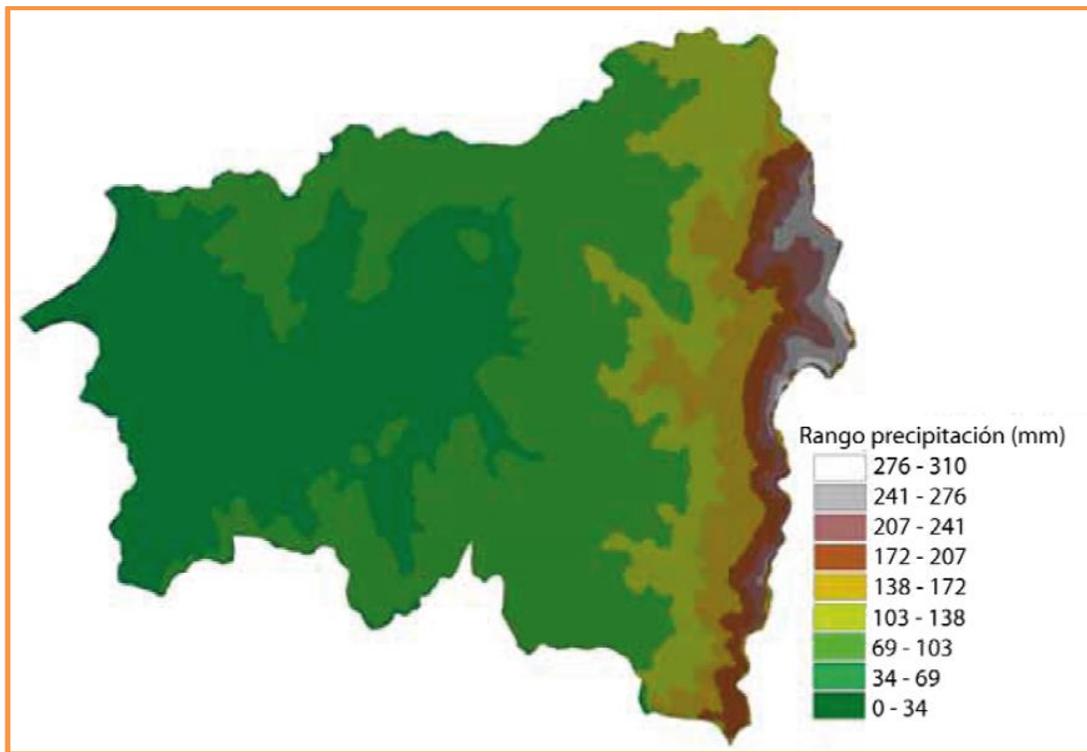


Figura 2.4 Distribución de precipitaciones anuales dentro de la Cuenca Los Choros. Tomado de DGA (2004).

Luego, Ayala *et al.* (2006) realizaron una recopilación de datos para conocer la distribución espacial de las precipitaciones en torno al área de la cuenca Los Choros. En la Figura 2.5 se puede observar la relación de las precipitaciones medias con la altura, observándose una relación polinómica de segundo grado entre ambas variables.

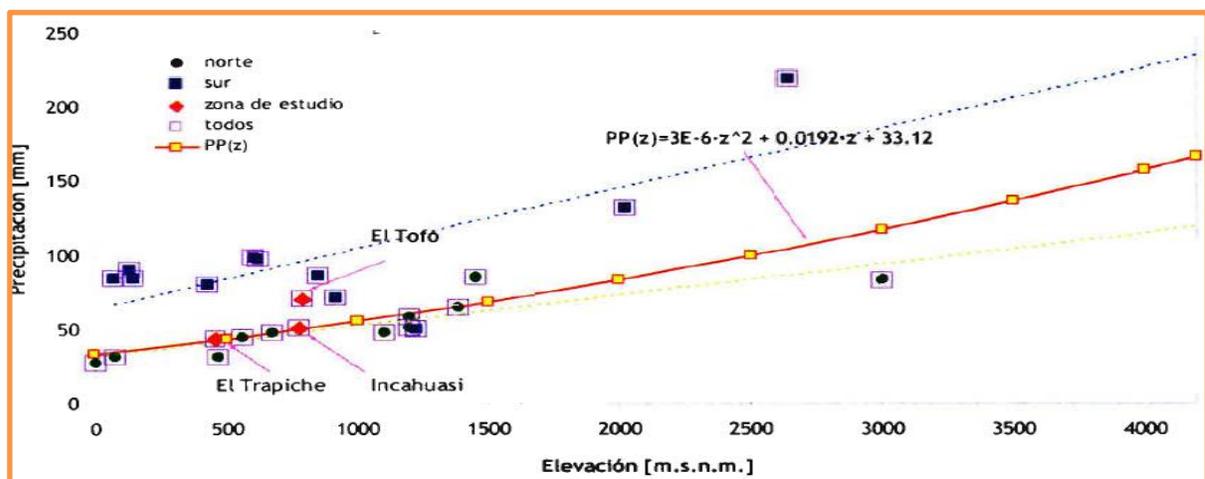


Figura 2.5 Relación obtenida por Ayala *et al.* (2006) entre elevación y precipitaciones.

2.4.2 Temperatura

De la misma forma, Ayala *et al.* (2006) estudiaron la distribución espacial de la Temperatura media anual, en función de la elevación, de donde obtuvo una relación polinómica de tercer grado entre ambas variables. En la Figura 2.6 se puede observar la relación obtenida.

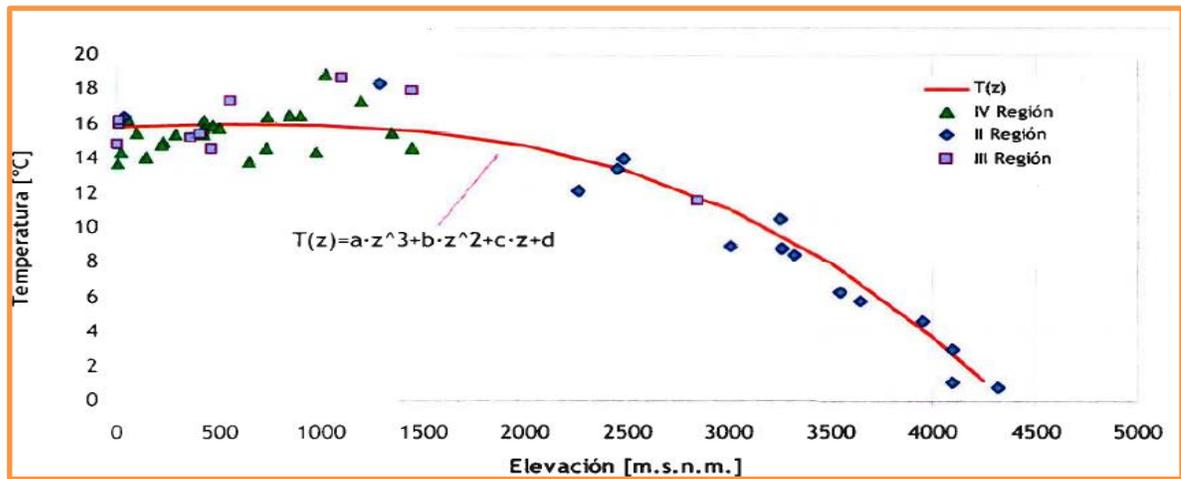


Figura 2.6 Relación obtenida por Ayala *et al.* (2006) entre elevación y temperatura.

3 Metodologías

3.1 Geomorfología

Utilizando el *Software ArcGis 10.1* con un modelo de elevación digital (DEM), generado a partir de imágenes satelitales tipo ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) de la cuarta región se limita la cuenca a estudiar. Este tipo de imágenes tiene una precisión horizontal de 30 m (1arc-segundos), con los cuales se desarrollan mapas de pendientes, red de drenaje y se realiza un mapeo geomorfológico de la zona de estudio.

3.1.1 Morfometría

Se realizan cálculos y evaluación de parámetros morfométricos de la cuenca de drenaje Los Choros, en base al modelo de elevación digital, apoyada del programa *ArcMap 10.1*, se obtienen parámetros geométricos de la cuenca, como son el área (A_c), perímetro (P_c), longitud máxima (L_c) y elevación media de la cuenca de drenaje Los Choros. Con estos parámetros se procede a caracterizar geométricamente la cuenca.

3.1.1.1 **Parámetros de forma:**

3.1.1.1.1 Tamaño de la cuenca

Clasificación basada en la superficie total de la cuenca.

3.1.1.1.2 Coeficiente de Compacidad (C_c)

Relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia de área igual a la de la cuenca.

$$A_c = \pi r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{A_c}{\pi}}$$

$$Cc = \frac{P_c}{2\sqrt{A_c\pi}}$$

3.1.1.1.3 Razón de elongación (Re)

Relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la cuenca y la longitud máxima de la misma.

$$d = 2\sqrt{\frac{A_c}{\pi}}$$

$$Re = \frac{2}{L_c}\sqrt{\frac{A_c}{\pi}}$$

3.1.1.1.4 Factor de forma (F)

Relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de lado igual a L_c circunscrito.

$$F = \frac{A_c}{L_c^2}$$

3.1.1.2 **Red de drenaje**

3.1.1.2.1 Densidad de drenaje (Dd)

Longitud media de curso por unidad de superficie

$$Dd = \frac{\sum L}{A_c}$$

ΣL : Suma de las longitudes de los cursos que integran la red de drenaje.

3.1.2 Mapeo geomorfológico

A través de la foto interpretación de imágenes satelitales brindadas en forma gratuita por las plataformas *Bing* y *Google Earth*, se discriminan las morfologías y depósitos observados, y se categorizan en el *software ArcGis 10.1*, posteriormente esta información

se rectificó en terreno, donde se estudiaron las morfologías a lo largo de la Quebrada Los Choros (Resumen de paradas en ANEXO A).

Las categorías morfológicas fueron: formas de ladera, coluviales, del sistema de drenaje, aluviales, de remoción en masa, marinas, eólicas, pediplanicies y antropogénicas. La cuales se describen en la sección 4.4.

Con toda esta información se construye un mapa que incluye información tanto litológica, tomada a partir de las cartas de Creixell *et al.*, 2012 y 2013, y geomorfológica, a partir de los datos obtenidos en este trabajo, a una escala de 1:100.000, el cual se puede observar en el mapa fuera de texto y en la sección 4.4.

3.2 Sedimentología

Una de las características más estudiadas de un depósito sedimentario es la dimensión de las partículas que lo componen, y en particular la distribución de los tamaños de las partículas que lo componen, en un análisis denominado granulométrico. Durante el trabajo de terreno y toma de datos, realizado entre los días 20 a 29 de agosto del año 2013, se hizo un seguimiento de los depósitos de fondo a lo largo de la Quebrada Los Choros. Además se tomaron muestras para desarrollar un análisis de distribución macrogranulométrica para lo cual se contrató al IDIEM (cuyo informe técnico se presenta en el ANEXO C). En la Figura 3.1 se muestran los puntos de control sedimentológico realizados durante dicha campaña, y los puntos seleccionados para realizar calicatas de macrogranulometría.

En cada uno de los puntos de control (mostrados en la Figura 3.1) se describe la distribución de tamaños de grano de forma cualitativa. Mientras que en cuatro puntos, señalados con flechas en la Figura 3.1, se realizan calicatas de 1 m³ de los depósitos pertenecientes al *thalweg* para analizar la distribución cuantitativa de los tamaños de los fragmentos.

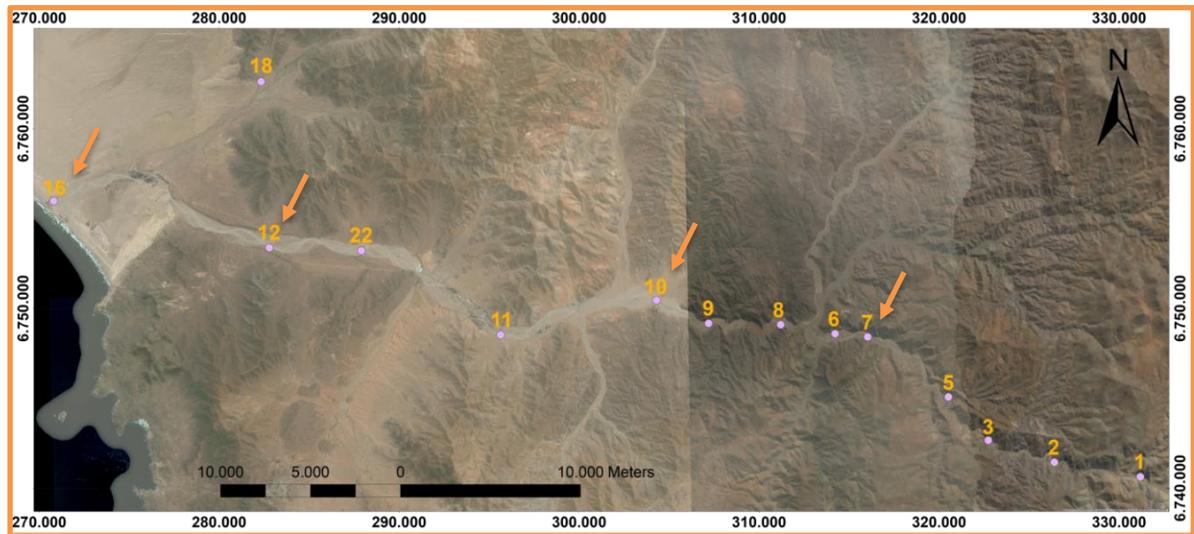


Figura 3.1 Ubicación de puntos de control realizados en terreno. Los puntos señalados con flechas corresponden a puntos donde se realizaron calicatas, para analizar la distribución de tamaños de grano.

En este estudio se clasificará los tamaños de granos según la escala de Wentworth (1922), la cual establece rangos de diámetro en milímetros (d). En la Tabla 3.1 se muestra la escala de Wentworth, junto con la escala de phi (ϕ), propuesta por Krumbein (1934), donde se cumple la siguiente relación.

$$\phi = -\log_2 d$$

Una evaluación cuantitativa del porcentaje de diferentes tamaños de granos de sedimentos y rocas sedimentarias clásticas es lo que se realiza en un estudio de granulometría acabado. El método más utilizado y común es el tamizaje, que consiste en hacer pasar los granos por una pila de varios tamices estandarizados y numerados de distinto ancho de malla, dispuestos a un ancho determinado, de forma que los granos quedarán retenidos según su tamaño. Al pesar el contenido de cada malla, puede ser determinada la distribución de los distintos tamaños de grano considerando dichas variables.

Tabla 3.1 Escala de tamaño de granos (Wentworth, 1922), mostrando la correlación entre ϕ y d.

Valores de ϕ	Diámetro de la partícula (d) [mm]	Tipo de partícula
-8	256	Bolones
-6	64	Guijarro
-4	16	Grava Gruesa
-2	4	Grava Fina
-1	2	Grava Gruesa
1	0,5	Arena Media
4	0,0625	Arena Fina
8	0,00390625	Limo
		Arcilla

El resultado del tamizaje es trazado en gráficos de tres formas distintas: un histograma de barra que muestra el porcentaje del peso de cada fracción de tamaño, una curva de frecuencia y una curva de frecuencia acumulativa. Todas estas se ilustran en la Figura 3.2.

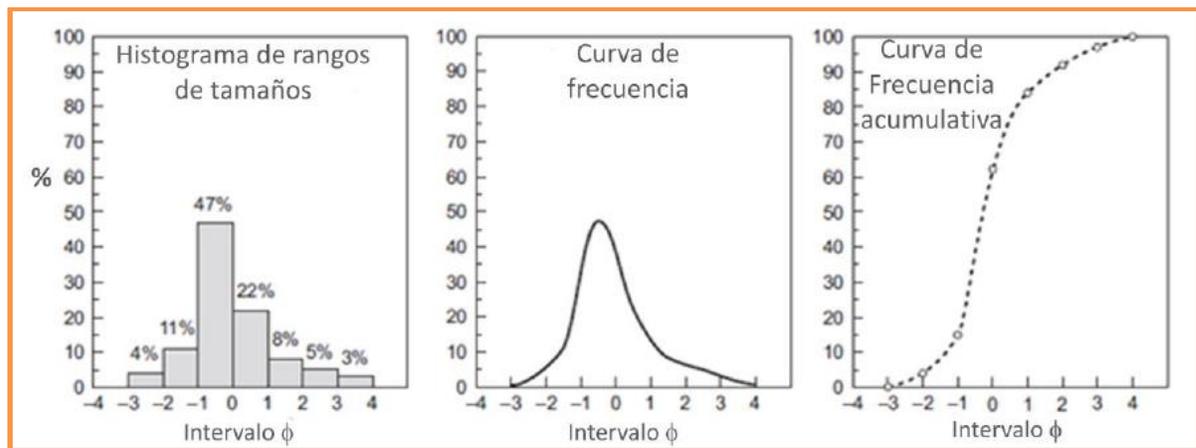


Figura 3.2 Diferentes tipos de gráficos para análisis granulométrico. (Modificado de Folk, 1974).

Por último, la curva de frecuencia acumulativa, dependiendo de su forma, entregará información acerca del grado de concentración de partículas que fueron transportadas y depositadas, tanto por medios de tracción, saltación y de suspensión, dependiendo de la energía del agente transportador (Figura 3.3).

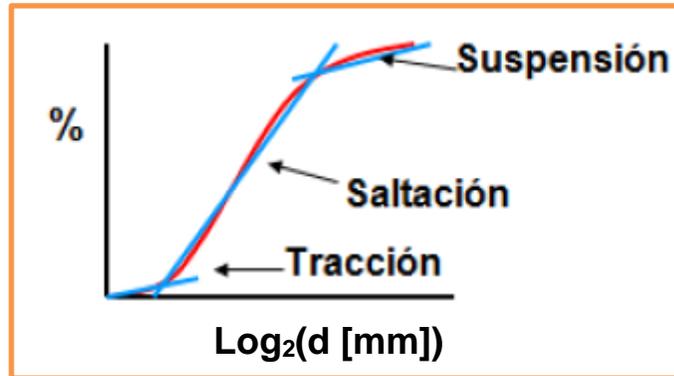


Figura 3.3 Curva de frecuencia acumulativa destacando el agente transportador de los sedimentos.

El grado de selección de una muestra de sedimentos puede ser expresado por varios parámetros estadísticos. El más simple de estos es la medida de la tendencia central, del cual hay tres versiones comúnmente usadas: La mediana, la moda, y la media. La mediana es la que separa el 50% (ϕ_{50}) de la muestra de la otra mitad. La moda es la clase con mayor frecuencia. La media ha sido definida varias veces, pero la fórmula más común (tomada de Folk y Ward, 1957) es:

$$\text{Media} = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

El segundo aspecto importante de los análisis granulométricos es la selección o el grado de dispersión, la cual es la tendencia para todos los granos de estar en cierta clase de tamaño de partícula. Este valor puede ser calculado para ser interpretado y clasificado como se muestra en la Tabla 3.2. (Folk, 1974). Este valor se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$$

Tabla 3.2. Escala de valores para la escala de selección (Modificada de Folk y Ward, 1957)

	Selección (σ)
Muy buena	<0,35
Buena	0,35-0,50
Moderada	0,5-0,71
Mediana	0,71-1,00
Mala	1,00-2,00
Muy mala	2,00-4,00
Extremadamente mala	>4,00

El grado de asimetría (*skewness*) o grado de desequilibrio, se muestra en la escala de Folk y Ward (1957) de la Tabla 3.3. Este valor es calculado por la siguiente ecuación:

$$Sk = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$$

Tabla 3.3. Escala de valores del grado de asimetría (Modificado de Folk y Ward, 1957)

	Asimetría (Sk)
Muy negativa	-1,0 a -0,3
Negativa	-0,3 a -0,1
Simétrica	-0,1 a 0,1
Positiva	0,1 a 0,3
Muy positiva	0,3 a 1,0

El grado de curtosis (*kurtosis*) indica que tan marcado es un *peak* de cierto valor de Φ , o si existe un rango mayor de valores predominantes. El rango de valores se muestra en la Tabla 3.4., y este valor viene dado por la siguiente ecuación:

$$K = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2,44(\Phi_{75} - \Phi_{25})}$$

Tabla 3.4. Escala de valores del grado de curtosis (Modificado de Folk y Ward, 1957)

	Curtosis (K)
Muy platicurto	<0,67
Platicurto	0,67-0,90
Mesocurto	0,90-1,11
Leptocurto	1,11-1,50
Muy Leptocurto	1,50-3,00
Extremadamente Leptocurto	>3,00

Los análisis granulométricos proveen información cuantitativa, en particular para análisis y cuantificación de los procesos de transporte y de depósito. A su vez, pueden llevar a errores si el material pertenece a sedimentos retrabajados provenientes de antiguos sedimentos.

3.3 Proveniencia de la porción fina de la Quebrada Los Choros y manto arenosos Choros Bajos y Punta de Choros

Se observa la composición petrográfica y mineralógica de las arenas constituyentes de la Quebrada Los Choros, y del total de las arenas que constituyen a los mantos arenosos en los sectores Choros Bajos y Punta de Choros. Para lo cual se aglutinan las muestras de arena en pegamento *epoxy*, y se hacen láminas delgadas. Estas láminas serán analizadas bajo el microscopio óptico (fotomicrografías de los cortes en ANEXO F). La ubicación de las muestras, se puede observar en la Figura 3.4.

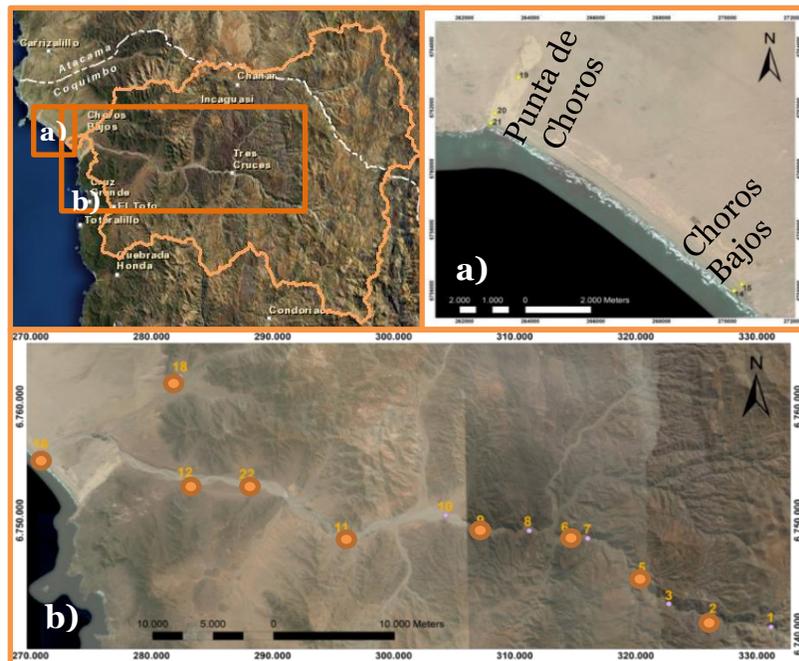


Figura 3.4 Ubicación de las muestras de arenas extraídas en terreno para realizar cortes transparentes. La Figura superior izquierda muestra una contextualización de las muestras tomadas en a) y en b). a) Muestras tomadas en mantos arenosos, señaladas con puntos amarillos, al sureste, muestras correspondientes al manto arenoso Choros Bajos, y al noroeste muestras correspondientes al manto arenoso Punta de Choros. b) Muestras recolectadas a lo largo de la Quebrada Los Choros. Las enmarcadas con círculos naranjos, son las muestras a las que se les hizo conteos modales. Muestra 18 en Quebrada El Romero.

3.3.1 Composición petrográfica-mineralógica de los sedimentos: conteos modales

Dada la complejidad que implica la determinación de la composición de sedimentos, se deben aplicar diversas técnicas, ya sean petrográficas o geoquímicas. En este estudio, se ha optado por la primera técnica.

La petrografía es una de las herramientas más utilizadas para estudios de proveniencia sedimentaria, la cual sirve como una primera aproximación para conocer la naturaleza de la fuente de sedimentos. Además, características texturales, como el hábito, esfericidad y grado de redondeamiento de cada especie mineral y fragmento lítico, pueden ser indicadores del tipo de roca fuente, la cercanía a la fuente y el tipo de transporte asociado al depósito.

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

Para realizar un conteo modal con resultados estadísticamente fiables para todos los parámetros registrados, se deben contar 300 o más puntos por muestra (Van der Plas y Tobi, 1965). De este modo, los valores obtenidos varían menos de un 5% respecto a los reales (Ingersoll *et al.*, 1984).

Las arenas son los sedimentos detríticos más utilizados en estudios de procedencia, ya que se originan como partículas sólidas que se desprenden de la roca, pero, a la vez, son lo suficientemente pequeñas como para observar una muestra considerable de granos en una sola lámina delgada. La ventaja de las partículas tamaño arena es que conservan la composición y textura original cuando están formadas por fragmentos líticos, a pesar del transporte y de los procesos diagenéticos estos están casi inalterados, además de que

guardan información sobre la roca que derivaron. Las características texturales (tamaño y forma de grano, entre otras) permiten determinar la madurez del sedimento original (Ingersoll *et al.*, 1984).

En el presente estudio se decidió hacer un conteo modal del tipo tradicional, en el cual se hace mayor distinción en la proveniencia de distintos fragmentos, y se mantiene un registro de las texturas presentes en estos, lo que da indicaciones más claras sobre la fuente de sedimentos. Con el efecto de hacer una mayor distinción entre fragmentos provenientes de las distintas formaciones presentes en la zona, donde se distingue entre fragmentos mono minerales y fragmentos ígneos plutónicos, ígneos extrusivos, sedimentarios marinos y continentales, metamórficos, etc. El ANEXO G presenta la descripción de los fragmentos detríticos estudiados.

En el presente estudio no fueron considerados los filosilicatos, ya que el hábito hojoso que estos presentan hace que floten, en vez de decantar, pudiendo provenir de fuentes muy lejanas.

3.3.2 Determinación de fuente de sedimentos: Método de G. Vezzoli (2007)

3.3.2.1 *Modelo de mezcla lineal*

Los modelos lineales son fundamentales en el análisis de información con múltiples variables. Cuando se formula un modelo lineal, uno observa un fenómeno representado por un vector de información obtenida a partir de distintos análisis y la relaciona con un set de información de variables fijas linealmente independientes (Timm, 2002). Según Weltje (1997), la composición petrográfica de las arenas que constituyen el fondo de una quebrada puede ser expresada por una mezcla de un número fijo de miembros terminales (*end-members*), la cual puede ser representada usando un análisis de regresión (Draper y Smith, 1981). Por definición, los análisis de regresión predicen una variable continua dependiente desde un número de variables independientes:

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

El objetivo principal de los métodos de regresión es la descripción de cómo uno o más atributos que caracterizan cierta entidad en cierto set de datos dependen de un atributo de destino elegido. Esta dependencia funcional puede ser lineal o no lineal.

Siendo y el vector fila que contiene la información porcentual de los p distintos fragmentos detríticos en sus p columnas, X una matriz que contiene la información composicional de los n miembros terminales (Matriz X en ANEXO H) en sus filas $y p$ columnas en las que se representa la composición porcentual de los mismos p fragmentos detríticos con los que se representa el vector y , además b un vector columna con n columnas que representan la contribución de cada uno de los miembros terminales a y . En una notación matricial, un modelo de regresión lineal puede ser expresada como:

$$y = bX + e \quad (1)$$

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

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

Este tipo de análisis tiene cierto tipo de limitaciones indicadas en el ANEXO J.

3.3.2.2 Diagnóstico de los parámetros para evaluar el modelo de mezcla lineal

El buen ajuste del modelo una regresión lineal es evaluada por medio de diferentes parámetros (Timm, 2002).

3.3.2.2.1 Similaridad y distancia de Camberra

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

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

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

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

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

3.3.2.2.2 Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis ANOVA es una herramienta útil para evaluar buenos ajustes. Varios parámetros son calculados:

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

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

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

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

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

- Coeficiente de determinación

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

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

La composición de los miembros terminales que componen la matriz X se encuentran en el ANEXO H, la cual fue determinada a partir de la información obtenida de las cartas Carrizalillo-El Tofo y Estación Chañar-Junta de Chingoles (Creixell *et al.*, 2012 y 2013, respectivamente).

4 Relieve local y Morfología

La cuenca de la Quebrada Los Choros drena un área de 3.837,91 km² y posee un perímetro de 374,12 km, abarca alturas entre el nivel del mar y los 4.243 m s.n.m., y constituye una de las cuencas costeras más importantes de la zona donde se encuentra.

La cuenca de drenaje Los Choros no presenta flujos superficiales permanentes, sólo se producen escorrentías esporádicas durante eventos torrenciales de corta duración, pero de alta intensidad. Eventos en los cuales se han visto corrientes continuas desde la cabecera hasta la desembocadura, como en los casos de 1997 y marzo del 2015.

Los afluentes principales nacen en la Cordillera Principal Oriental: las quebradas Puquitos, Pedernales y El Tabaco, entre otras menores. Luego, en la Cordillera Principal Occidental, recibe los aportes de las quebradas Las Chacras, La Totorá, del Carrizo, Pelicano y Grande. Finalmente, en la Cordillera de la Costa, recoge las contribuciones de las quebradas Agua Grande, Choros Altos, Desvió Los Choros y Romero (Figura 4.1) además de una serie de quebradas menores.

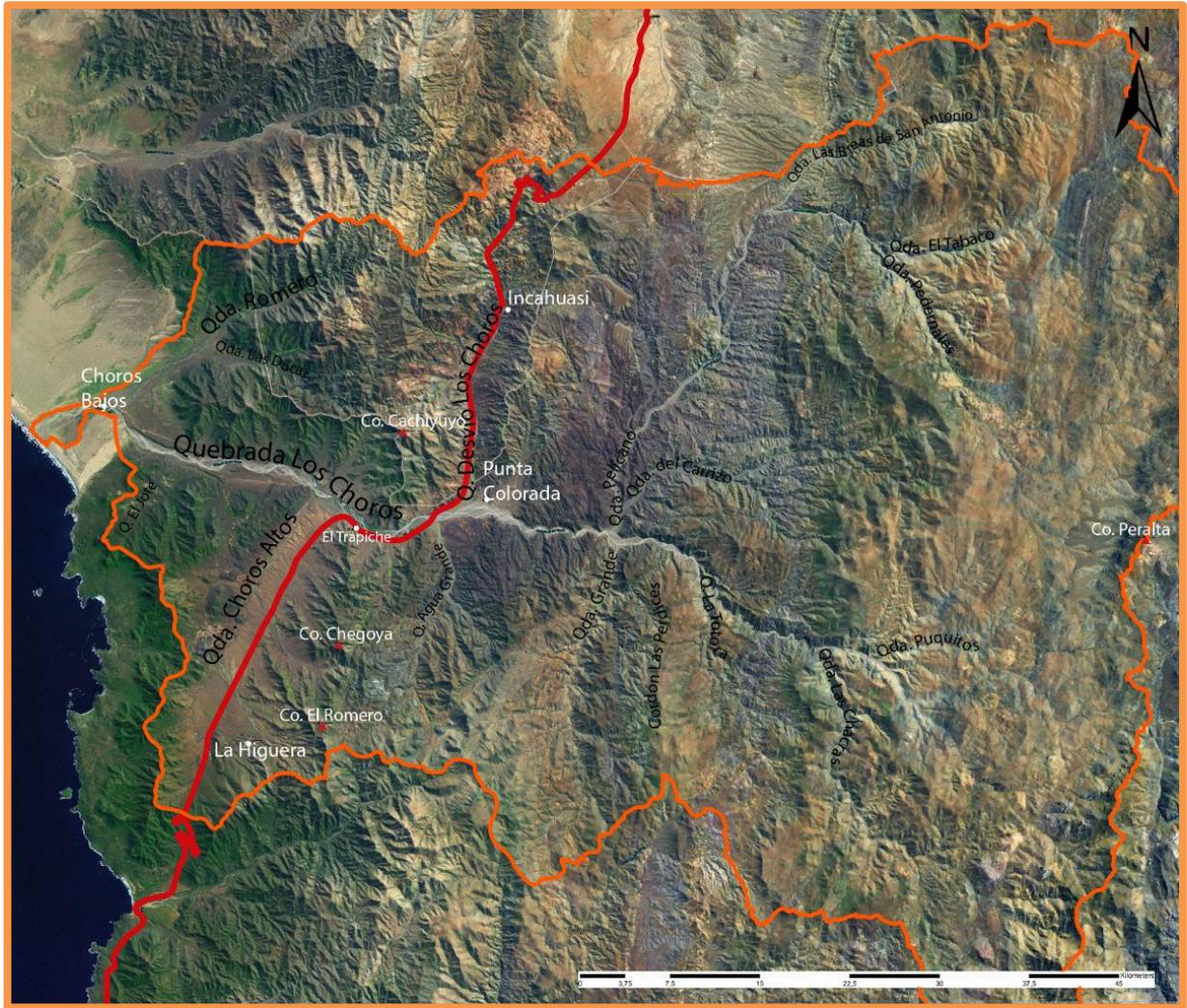
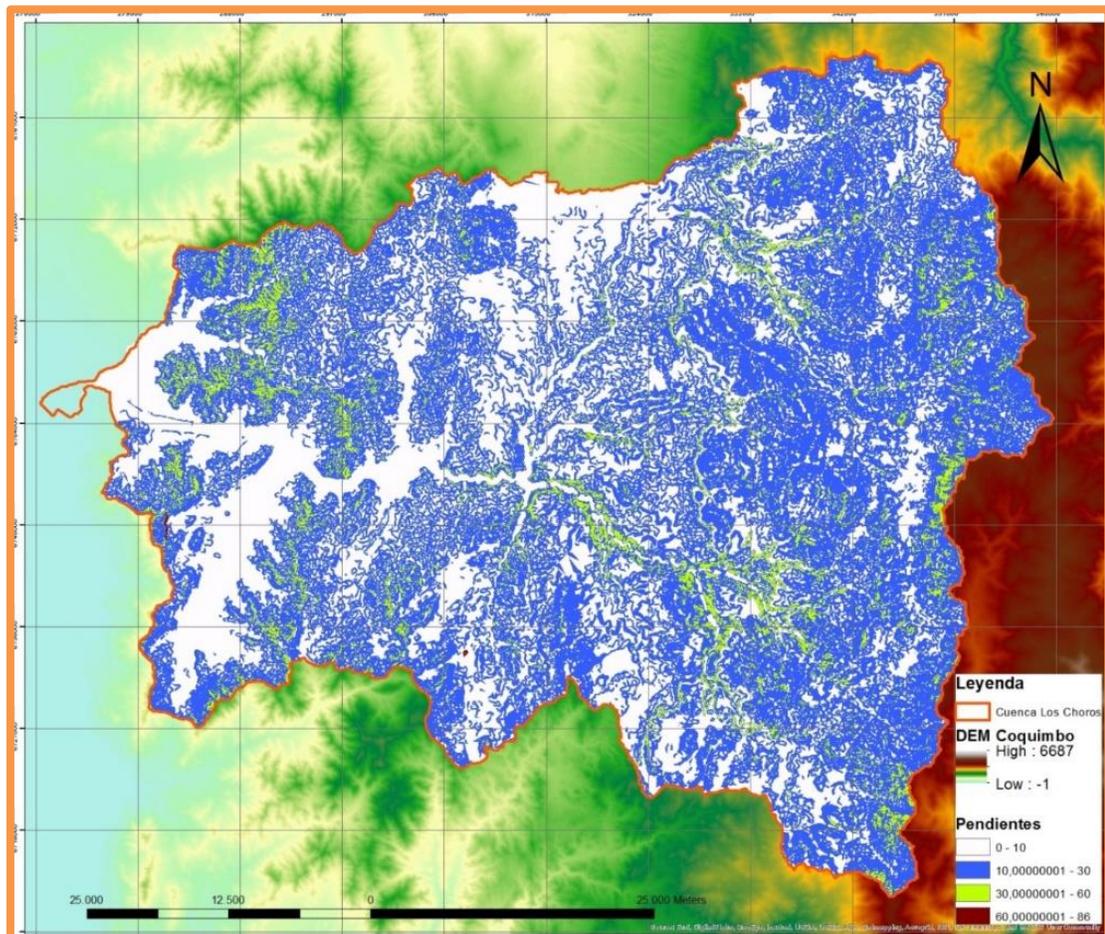


Figura 4.1 Principales puntos de referencia con sus nombres, en azul se observa la carretera Panamericana, y en naranja el límite de la Cuenca Los Choros.

4.1 Relieve local

La zona de estudio se caracteriza por presentar valles en forma de “v”, en algunos casos con lechos planos y amplios, lo que da indicios de un estado avanzado de erosión aluvial. Las pendientes varían mayormente entre los 10° y 30° (Figura 4.2), con el desarrollo de extensas zonas de pendientes menores a 10° , donde se destaca el área ubicada al centro norte de la zona de estudio, el cual corresponde a dos superficies de erosión. Estas superficies de bajo ángulo, entre otras comprendidas en la parte alta de la presente cuenca, fueron estudiadas a detalle por Urresty (2009). Por otro lado, las cumbres alcanzan alturas de 4.148 m s.n.m. en el Cerro Peralta, dentro de la Cordillera Principal Occidental, donde el relieve se caracteriza por presentar altas cumbres, incididas por vertientes con forma de V marcada, y 1.438 m s.n.m. en el Cerro Cachiyuyo, perteneciente a la Cordillera de la Costa.



4.2 Parámetros morfométricos

A partir de un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 30 m, se obtienen las características geométricas de la Cuenca de drenaje Los Choros. Obteniéndose un área 3.837,9 km², perímetro de 374 km, largo máximo es de 89,2 km, ancho máximo de 74,3 km, y la altura máxima es de 4.148 m s.n.m. en el Cerro Peralta. Los cuales se resumen en la Tabla 4.1

Tabla 4.1 Características geométricas de la Cuenca de drenaje Los Choros

Parámetro geométrico	
Área	3.837,9 km ²
Perímetro	374 km
Altura máxima	4.148 m s.n.m.
Largo máximo	89,2 km
Ancho máximo	74,3 km

Las pendientes de las quebradas, por lo general son bastante llanas. Analizando la pendiente media para los principales tributarios, la de mayor pendiente corresponde a la Quebrada Las Chacras (12,1%), seguido por La Totorá (7,9%), Romero (4,8%), y luego las quebradas Grande, Pelicano, Desvío Los Choros y Choros Altos con pendientes que van desde (1,1 a 3,5%), en la Tabla 4.2 se presenta un resumen de las pendientes obtenidas para los afluentes principales.

Tabla 4.2 Pendiente de quebradas tributarias principales.

Quebrada	Pendiente (%)
<i>Las Chacras</i>	12,1
<i>La Totorá</i>	7,9
<i>Grande</i>	3,2
<i>Pelicano</i>	2,3
<i>Desvío Los Choros</i>	3,5
<i>Choros Altos</i>	1,1
<i>Romero</i>	4,8

La Quebrada Los Choros presenta una escasa pendiente de 0,8% hacia su desembocadura, sin embargo esta aumenta fuertemente hacia la cabecera, alcanzando pendientes de 12,21%, sin embargo aumento no es constante, presentando una leve

disminución hacia el Este de la confluencia con la Quebrada Puquitos (Figura 4.3), en el margen oriental de la Cordillera Principal Occidental.

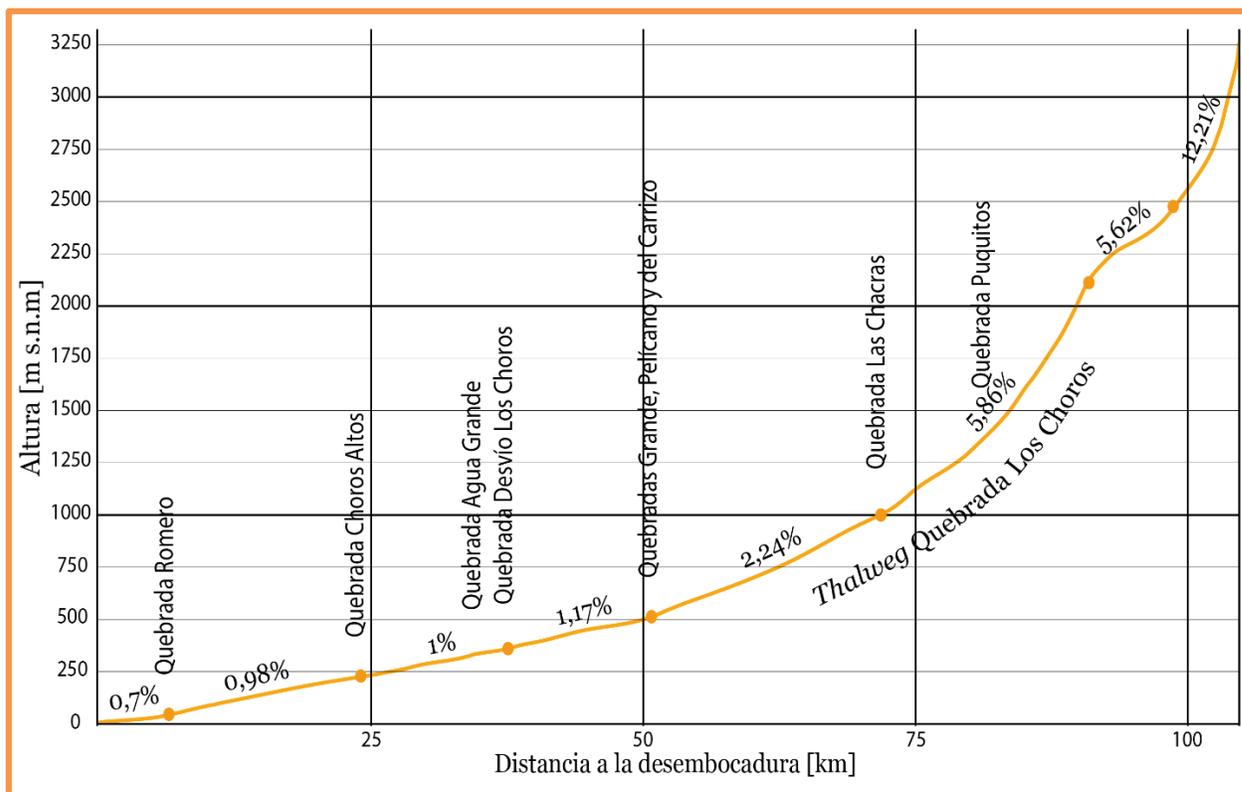


Figura 4.3 Variación de la pendiente del *thalweg* de la Quebrada los Choros a lo largo de la misma, se señala los puntos de confluencia con los tributarios principales, y con puntos naranjos los límites de las distintas pendientes

La forma de la cuenca de drenaje Los Choros se ha comparado, por diversos métodos a una circunferencia con características similares a ella para el cálculo de diversos parámetros morfométricos (Para cálculo ver sección 3.1.1).

Gregory y Walling (1973) señalaron que cuanto más circular es una cuenca más retardo existe entre el momento de precipitación y el momento de crecida en la desembocadura, pero, al mismo tiempo, más acusada y súbita es la misma crecida, y por tanto más alto es el riesgo de que se produzcan inundaciones (Sala y Gay, 1981).

En la Tabla 4.3 se muestra un resumen de los parámetros morfométricos aquí calculados.

Tabla 4.3 Parámetros morfométricos de la cuenca de drenaje Los Choros

Coefficiente de compacidad		
<i>Gravelius (1914)</i>	Radio circunferencia=A [km]	34,95
	Perímetro circunferencia [km]	219,60
	Cc	1,70
Razón de elongación		
<i>Schumm (1956)</i>	Radio circunferencia =A [km]	34,95
	Diámetro [km]	69,90
	Re	0,78
Factor de forma		
<i>Horton (1945)</i>	Área del cuadrado circunscrito [km ²]	7992,07
	F	0,48
Densidad de drenaje		
	Largo total [km]	9673,20
	Dd [km/km ²]	2,52

El coeficiente de compacidad (Cc), definido por Gravelius (1914), compara el perímetro de la cuenca con el de una circunferencia de igual área. Cuanto más cercano sea este valor a la unidad, la cuenca será más circular y, por lo tanto, más compacta, a mayor Cc, la cuenca adquiere mayor forma oval. En la Tabla 4.4 se establecen las distintas clases de cuenca según su valor de compacidad. En el caso de la cuenca los Choros, posee un índice de Gravelius de 1,7.

Tabla 4.4 Formas de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad, tomado de Campos (1992)

<i>Clase de forma</i>	<i>Índice de Compacidad (Cc)</i>	<i>Forma de la cuenca</i>
<i>Clase I</i>	1,0 a 1,25	Casi redonda a oval-redonda
<i>Clase II</i>	1,26 a 1,50	Oval-redonda a oval oblonga
<i>Clase III</i>	1,51 a más de 2	Oval-oblonga a rectangular-oblonga

La razón de Elongación (Re), para el caso de la cuenca Los Choros es de 0,78. Este parámetro es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma. La fórmula aquí ocupada es la más extendida para calcular este índice debido a la alta correlación que guarda con la hidrología de la cuenca. Valores cercanos a la unidad implican formas redondeadas, y en cuanto menor sea, será más achatada.

El factor de forma (F, ver Tabla 4.5), propuesto por Horton (1945), se relaciona el área de la cuenca y la longitud de la misma. En ese sentido, valores inferiores a la unidad indican cuencas alargadas y aquellos cercanos a uno son redondeadas. En el caso de la cuenca de drenaje Los Choros, éste factor tomó un valor de 0,48.

Tabla 4.5 Clases de cuencas según el Factor de Forma, tomado del instituto nacional de Ecología, México, 2012.

Rangos de F	Clase de forma
0,01-0,18	Muy poco alargada
0,19-0,36	Ligeramente alargada
0,37-0,54	Moderadamente alargada

La densidad de drenaje (Dd) es otra propiedad fundamental de una cuenca, que controla la eficiencia del drenaje (Jones, 1997), relaciona la longitud total de cauces de la cuenca con la superficie de esta última. El valor obtenido es de 2,52 km/km², lo cual es muy bajo. Este tipo de resultados se da en suelos permeables, en clima desértico, registrándose altas tasas de infiltración y alimentación del flujo subsuperficial.

4.3 Red de drenaje

Siguiendo la clasificación de la red de drenaje, según Twidale (2004), y como se muestra en la Figura 4.4 a), la zona de estudio correspondería a un patrón dendrítico rectangular. Con un patrón de valle por lo general meándrico y trenzados, a menor medida anastomosada, lo cual varía según el tramo (Figura 4.4 b)).

Vista en planta la cuenca presenta una forma levemente alargada en dirección aproximada E-W y, en general, su ancho aumenta progresivamente al avanzar hacia el este (Figura 4.4 a)).

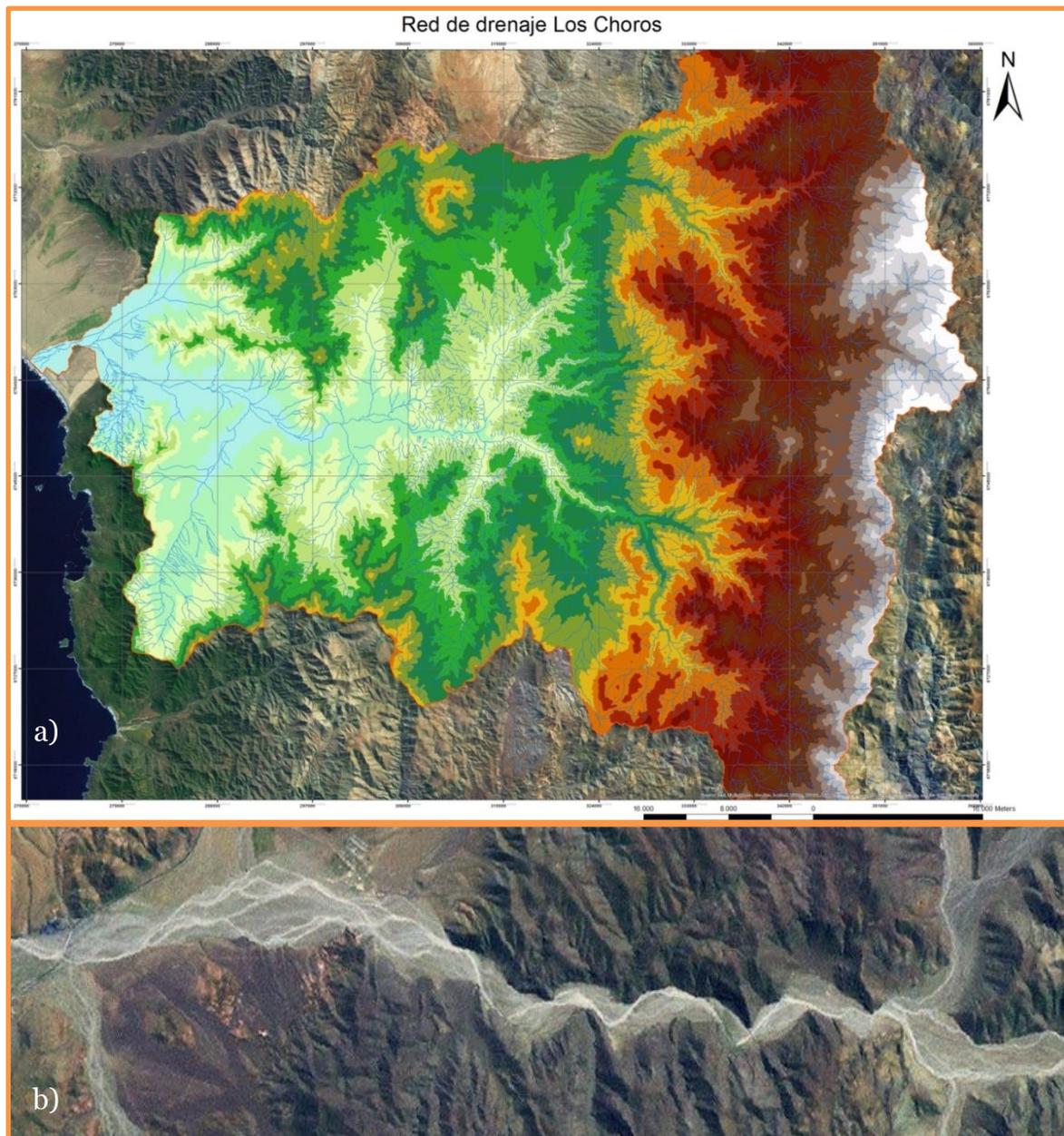


Figura 4.4 Formas fluviales. a) Se observa el patrón dendrítico a gran escala que tiene la cuenca. Donde con azul se muestra la red de drenaje, de fondo el DEM de 30 m de precisión. b) muestra el carácter meándrico con componente trenzado y en menor medida anastomosado.

Siguiendo el método de jerarquización propuesto por Strahler (1964), donde una corriente de segundo orden es aquella donde se reúnen 2 corrientes de primer orden, uno de tercer orden, donde confluyen dos de segundo orden, indicando el grado de estructura de la red de drenaje, y así sucesivamente, el resultado para la cuenca Los Choros es de un valor máximo de 9,0, mientras que las quebradas Pelicano, Grande Las Chacras y

Pedernales tienen índice 8, y las quebradas Los Choros Altos, Desvío Los Choros, Pique, Del Carrizo y Tabaco, poseen un índice 7.

4.4 Unidades geomorfológicas

En la zona de estudio han sido identificadas numerosas morfologías, las cuales fueron clasificadas según características geométricas y evidencias sedimentológicas, relaciones de contacto entre depósitos, además de su ubicación geográfica.

A continuación se muestra una descripción de cada una de estas morfologías identificadas durante trabajo de terreno (Resumen de paradas en ANEXO A) y análisis de gabinete mediante imágenes satelitales (Figura 4.5, leyenda en Figura 4.6). Para mayor detalle se adjunta una versión impresa del mapa “Geomorfología y litoestratigrafía de la Cuenca Los Choros” fuera del texto.

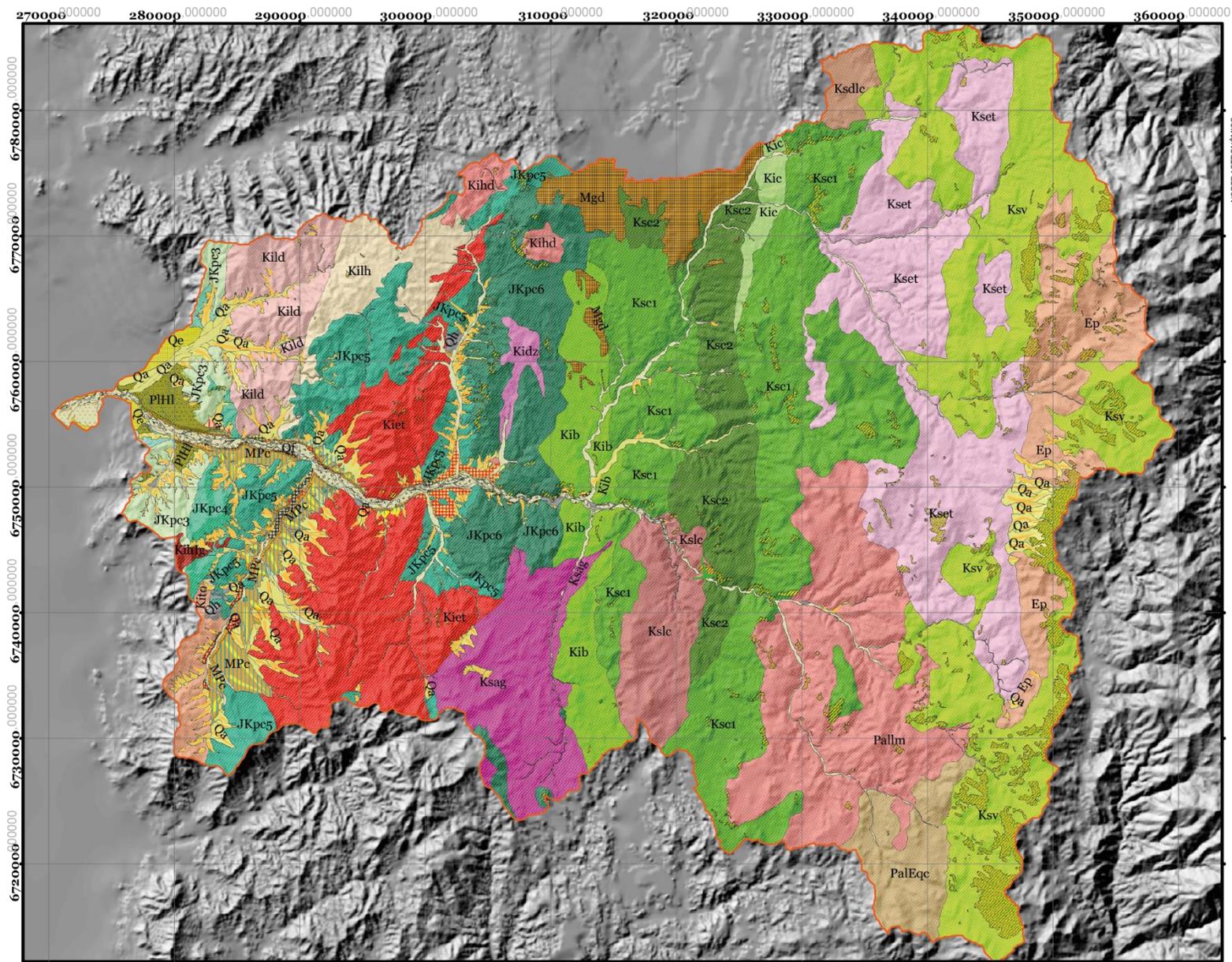


Figura 4.5
Geomorfología y
litoestratigrafía de
la cuenca Los
Choros. Leyenda
en página siguiente
(Figura 4.6). Para
mayor detalle ver
mapa fuera de
texto.



Figura 4.6 Continuación Figura 4.5 Leyenda del mapa geomorfológico de la cuenca de drenaje Los Choros.

4.4.1 Formas de ladera

Las laderas constituyen el área más amplia de la zona de estudio, con un porcentaje cercano al 90% del total del área de estudio (Ver mapa fuera de texto).

Con el fin de identificar las principales fuentes de material al cauce de la cuenca, se han distinguido dos tipos de laderas, las cuales se diferencian en las características físicas del material que las compone, siendo clasificadas entre ladera rocosa y ladera cubierta de suelo residual, además de ser identificadas según la litología que las constituyen, en la Figura 4.7, se pueden observar las diferencias gráficas entre cada tipo de ladera.



Figura 4.7 Formas de ladera. Diferencias entre ladera rocosa y ladera cubierta con suelo residual. A la izquierda, foto tomada en terreno y a la derecha vista en planta. Las líneas azules marcan la diferencia entre cada tipo de ladera, la línea roja en la imagen derecha, marca el límite oriente de la cuenca Los Choros.

4.4.1.1 Ladera Rocosa

Aquella que, independientemente de su litología, está constituida en su mayor parte por afloramientos de roca (Figura 4.7). Corresponden a superficies con baja a nula meteorización *in situ* (Figura 4.7).

Laderas de este tipo se encuentran con mayor frecuencia en la Cordillera Principal Oriental, no mostrando ningún patrón según la litología que involucran (Figura 4.5 y mapa fuera de texto para mayor detalle).

4.4.1.2 Ladera cubierta con suelo residual

Según Blight (2012) el suelo residual es aquel formado por material proveniente de procesos de meteorización *in situ*, y, consecuentemente, ha sufrido muy poco a nulo transporte, por tanto se acumula en el lugar de origen. Este tipo de laderas presentan un recubrimiento compuesto por este tipo de suelos (Figura 4.7).

Este tipo constituye aproximadamente el 96% de las laderas observadas en el área de estudio, y esporádicamente presentan escarpes producto de la incisión fluvial. En el mapa fuera de texto se puede observar su amplia distribución en la zona de estudio

4.4.2 Formas y depósitos coluviales

Pedraza *et al.* (1996) define dichas formas, como masas de roca y detritos no consolidados en la base de acantilados y laderas, depositados por lavado de superficies, particularmente por efectos gravitatorios, en ocasiones asistido por la presencia de agua. Durante la campaña de terreno se identificaron conos gravitacionales, un ejemplo de los cuales se muestra en la Figura 4.8 (Ver mapa fuera de texto).

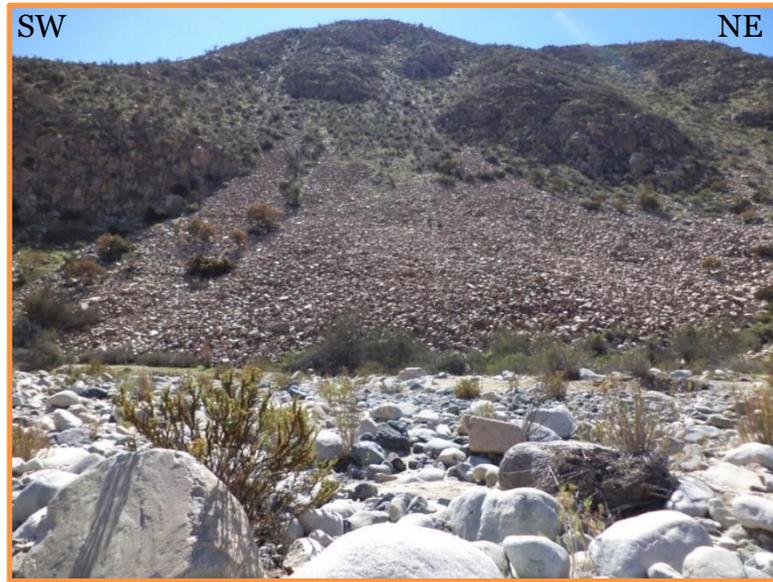


Figura 4.8 Formas coluviales. Coalescencia de conos gravitacionales.

4.4.2.1 Conos gravitacionales

En general, corresponden a depósitos de alta pendiente, formados por sedimentos con granulometría variable entre arena y grava gruesa, cuyo volumen, en especial en la zona de estudio, es muy inferior a los $0,1 \text{ km}^3$, por lo tanto en su mayoría no es posible representarlos en el mapa fuera de texto. Se localizan adjuntos a laderas de alta pendiente, que cuentan con material no consolidado (Figura 4.8).

Los conos gravitacionales con área tal que facilita su delineamiento en el mapa se encuentran localizados sobre la terraza de abrasión marina, cercanos a la localidad de Choros Bajos (Ver mapa fuera de texto).

4.4.3 Formas y depósitos del sistema fluvial

Haciendo una clasificación según lecho, siguiendo los parámetros definidos por Howard (1980) y Howard *et al.* (1994), el cauce principal de la cuenca Los Choros corresponde a un lecho rocoso (*bedrock channel*) en la Cordillera Principal Occidental, mientras que, aguas abajo, pasaría a conformar un lecho transitorio aluvial-rocoso (*mixed bedrock-alluvial*), con mayor componente de lecho vivo de grava y arena (*live bed gravel-sand alluvial channel*), los cuales se producen en zonas montañosas, áridas o árticas, donde la producción de sedimento es alta y la meteorización física predomina sobre la

química. En canales de esas características, se transporta una amplia gama de familia de granos, los cuales, en su mayoría son movilizados en estados de flujo cercano (concepto de “igual movilidad” acuñado por Parker y Kingeman en 1982).

4.4.3.1 *Cauce actual*

Superficie de inundación actual.

4.4.3.2 *Terrazas fluviales*

Superficies subparalelas al valle actual, las cuales coinciden con antiguas superficies de inundación, la cual se forma por la agradación de un flujo, y su posterior incisión vertical o por la erosión de unidades previamente existentes.

En el presente trabajo se dividen en recientes y antiguas. Donde las recientes dada su baja diferencia de altura (Ver sección 4.4.3.1.1), la baja resolución del modelo de elevación digital utilizado, y la escala de observación, no pudieron ser registradas en el mapa fuera de texto (Geomorfología y litoestratigrafía de la cuenca Los Choros), y, en consecuencia, fueron agrupadas junto a las barras bajo el nombre de “barras y terrazas recientes” en mapa fuera de texto.

4.4.3.2.1 Terrazas de agradación recientes

Aquellas producidas por flujos recientes, donde la diferencia de altura no es mayor de 50 cm (Figura 4.9), como t' y t'' al oeste de la confluencia de la quebrada principal con la Quebrada Pelicano (ver mapa en Figura 4.10 a)).



Figura 4.9 Terrazas fluviales. Arriba: Fotografía terrazas de agradación reciente (t_0 , t' y t'') presentes en la zona de estudio. Abajo: Fotografía de terrazas fluviales antiguas.

4.4.3.2.2 Terrazas fluviales antiguas

Producto de la actividad fluvial antigua, la cual cesó en 1947 (Peralta *et al.*, 1971), se producen distintos niveles de terraza, algunas agradacionales (T_4 , T_2 y T_1) y otras erosionando unidades inferiores (T_3 , desarrollada en su mayor parte sobre Formación Confluencia). Hoy se reflejan superficies subparalelas al valle actual, donde las diferencias de alturas entre ellas van de 40 a 10 m, la cual va disminuyendo desde la T_4 hacia T_1 . Donde T_4 (Figura 4.9) se encuentra a 95 ± 5 m s.n.v.a. (metros sobre el nivel del valle actual); T_3 (Figura 4.9), a 57 ± 5 m s.n.v.a.; T_2 (Figura 4.9), a 19 ± 4 m s.n.v.a.; y T_1 , a $10,5 \pm 0,5$ m s.n.v.a. Para su distribución ver Figura 4.10 b) y mapa fuera de texto.

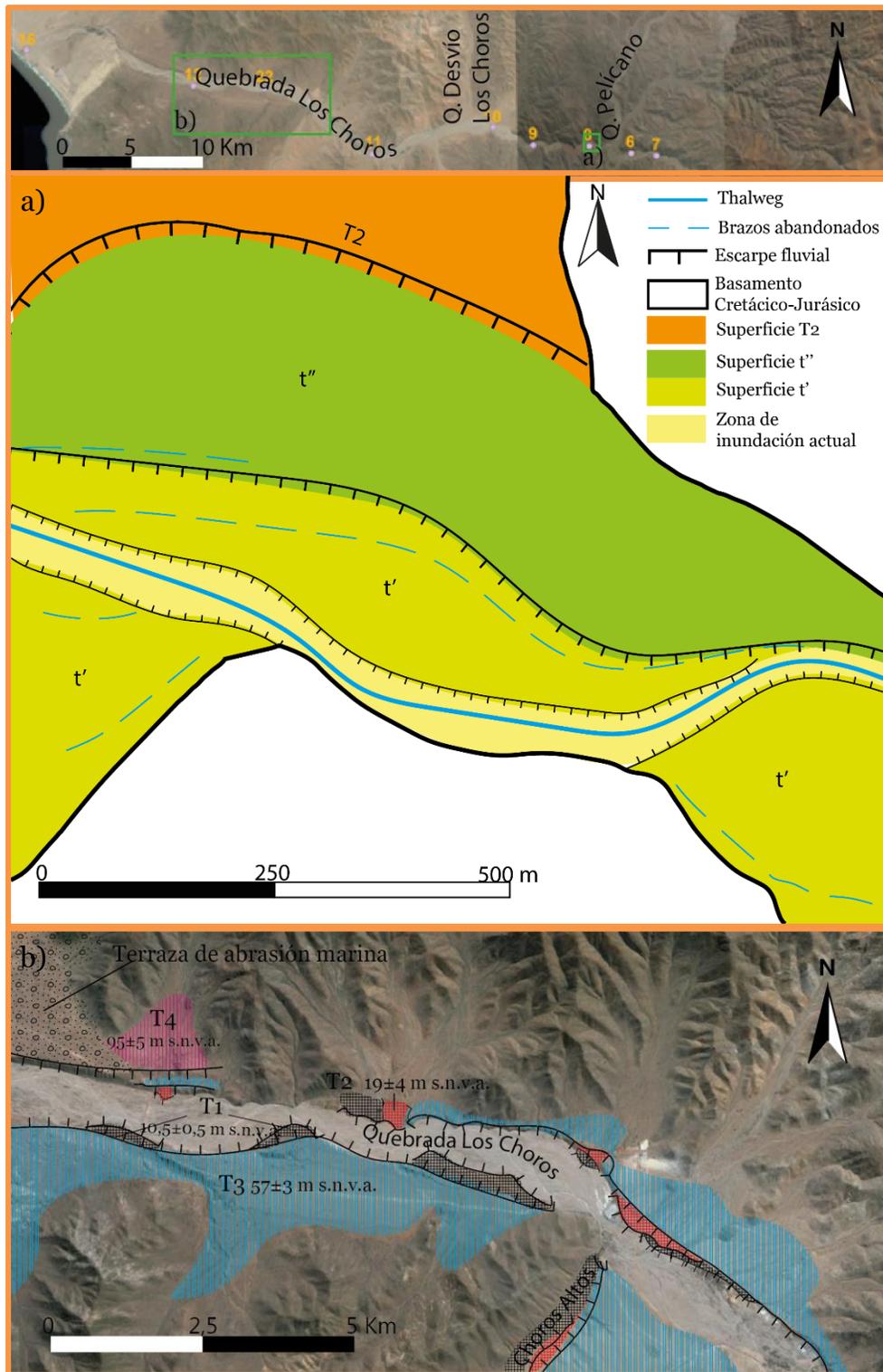


Figura 4.10 Vistas en planta de terrazas fluviales. Figura superior, es la contextualización de las figuras siguientes, donde los rectángulos corresponden a las zonas donde se desarrollan las cartografías de las imágenes inferiores, el rectángulo izquierdo corresponde a la imagen b) y la derecha a la imagen a). a) terrazas agradacionales recientes. b) terrazas erosionales y agradacionales antiguas, donde se muestra el rango de altura sobre el valle en la cual se desarrollan.

4.4.3.3 *Escarpe fluvial*

Superficies de alta pendiente que separan las terrazas fluviales señaladas en la sección anterior, ver en Figura 4.10.

4.4.3.4 *Llanura de inundación*

Creixell *et al.* (2012), identificó llanuras de inundación inactivas, compuestas principalmente por arena y limo dispuestas en bancos métricos, los cuales conforman terrazas fluviales hacia el sur de la desembocadura de la Quebrada Los Choros al mar (Figura 4.11, mapa fuera de texto).



Figura 4.11 Llanuras de inundación. En negro se demarca los límites de las llanuras de inundación. En amarillo el manto arenoso. Imagen tomada de *Google Earth*.

4.4.3.5 *Depósitos fluviales antiguos*

Acotadas estrictamente a las quebradas Los Choros y Choros Altos, corresponden a los afloramientos topográficamente más bajos de la Formación Confluencia. Las cuales constituyen superficies sub-horizontales, escasamente erosionados por el sistema de drenaje actual y de textura suave (T1 en Figura 4.10). Las cuales según Creixell *et al.* (2012) corresponde a depósitos de gravas, medianamente compactados, poseen estratificación bien marcada, planar y cruzada. Para su distribución ver mapa fuera de texto.

4.4.4 Formas y depósitos aluviales

Depósitos de granulometría muy variable entre arena y grava, ocasionalmente bloques, inmersos en una matriz fina. Corresponden a depósitos producidos por flujos esporádicos y de volumen variable.

En el presente trabajo se distingue entre abanicos y planicies aluviales actuales, las cuales se diferencian por su ángulo y disposición, y depósitos aluviales antiguos.

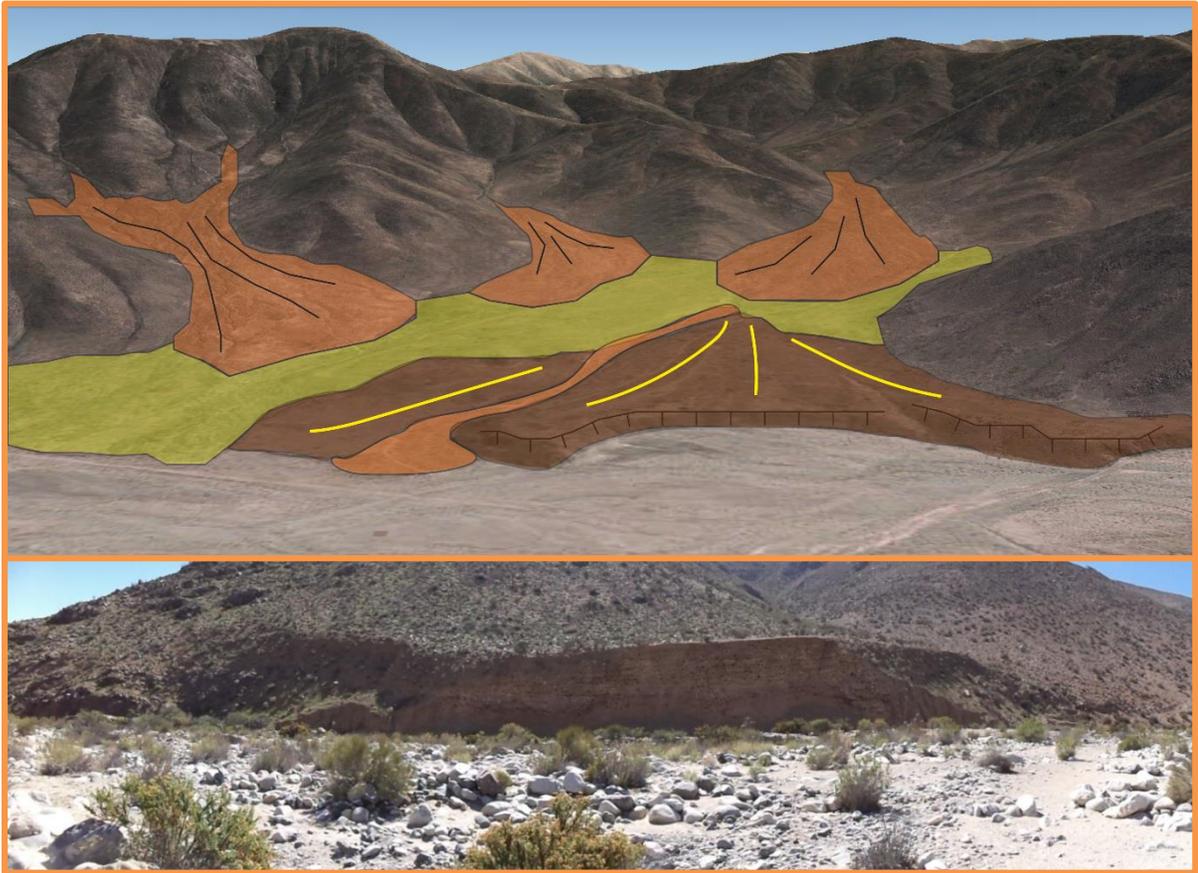


Figura 4.12 Formas aluviales. Arriba: En naranja se marcan los abanicos aluviales, mientras que en amarillo se destaca la planicie aluvial, y en café depósitos aluviales antiguos. Abajo: efectos de la incisión fluvial en un abanico aluvial.

4.4.4.1 *Abanicos aluviales actuales*

Ubicados en las partes distales o niveles base de gran parte de las quebradas generan superficies abultadas, alargadas longitudinalmente (Figura 4.12), alimentados por flujos

de detritos menores. Presentes en la mayor parte de la zona, especialmente en desembocaduras de quebradas, relativamente encajonadas.

Gran parte de ellos se encuentran erosionados debido a la acción de la red de drenaje mayor (Figura 4.12), lo que implica que son una importante fuente de sedimentos a los cauces. Lo que produce que, a lo largo de la Quebrada Los Choros, se presenten como formas laterales de abanico-terrazza (ver sección 4.4.3.1).

Frecuentes en toda la zona de estudio, pero se desarrollan con mayor expresión areal desde la Quebrada Desvío los Choros, hacia el Oeste. A lo Largo de la quebrada principal, Quebrada Choros Altos, El Boquerón, Las Docas y Romero.

4.4.4.2 Planicies aluviales actuales

Son formas con superficies amplias y subhorizontales que se ubican rellenando el valle, actualmente colgadas, debido a la incisión del cauce principal (Figura 4.12). Los más importantes se encuentran ubicados colgados en el valle de la Quebrada Los Choros, justo al este de la confluencia con la Quebrada Choros Altos. Además conforma el relleno de las quebradas Romero y Los Pozos, las cuales no fueron incluidas en la red de drenaje debido a que presentan abundante vegetación, por lo que se puede deducir que se han mostrado inactivas por un período más prolongado que la red de drenaje principal.

4.4.4.3 Depósitos aluviales antiguos

Constituyen planicies formadas por la coalescencia de numerosos abanicos aluviales, que actualmente se encuentran parcialmente cubiertos por el sistema aluvial actual. Presentes en las quebradas Los Choros, Choros Altos y Desvío Los Choros (Ver mapa fuera de texto y Figura 4.13).

Los depósitos aluviales antiguos se encuentran en parte disectados por pequeños tributarios, y constituyen una superficie de bajo ángulo paralela al valle actual, limitadas por formas de ladera y del sistema fluvial actuales, y en parte por escarpes que ponen en contacto lateral las formas aluviales y fluviales también antiguas (Figura 4.13 y mapa fuera de texto).



Figura 4.13 Depósitos aluviales y fluviales antiguos. Se distinguen formas aluviales (destacadas en color naranja) y fluviales (destacadas en color amarillo), además de los escarpes producidos por la erosión presente principalmente en depósitos aluviales.

4.4.5 Formas de remoción en masa

En terreno sólo fue identificada una zona donde se visualizaban depósitos de remoción en masa, el cual es de volumen muy reducido. Ubicado en la Quebrada Los Choros, hacia el Este de la confluencia con la Quebrada La Totora, el cual corresponde el depósito de caída de rocas (Figura 4.14).



Figura 4.14 Depósitos de remoción en masa de caída de rocas. En ambas figuras se muestra el escarpe en ladera rocosa y dirección de transporte del material. Las fotos fueron sacadas al Este de la confluencia con Quebrada La Totora.

4.4.5.1 Caídas de rocas

Formados por el desplazamiento netamente vertical de grandes bloques, asociadas a laderas rocosas de alta pendiente, lo que implica que estos fenómenos son procesos muy rápidos. En el caso del área de estudio, se observa una zona donde se han producido estos eventos con más frecuencia, ubicado entre las quebradas Las Chacras y Puquios (Ver en mapa fuera de texto).

A lo largo de la Quebrada Los Choros, este tipo de depósito corresponde a caída de rocas individuales, donde el bloque de mayores dimensiones observado es aproximadamente de 4 m³, y de geometría bastante cúbica, probablemente provocado por movimientos sísmicos que desestabilizan la roca previamente meteorizada. Aporta material de gran tamaño a quebradas, relativamente estrechas, las cuales posteriormente pueden llegar a movilizar la carga, debido a un evento pluvial catastrófico.

4.4.6 Formas y depósitos marinos

Dentro de las muchas morfologías que se pueden producir en un ambiente litoral, en la zona de estudio se identificaron 4 principalmente: terrazas de abrasión marina, cordones litorales y líneas de costa (Figura 4.15), la cuales se detallan a continuación.

4.4.6.1 Terraza de abrasión marina

Ubicada en la confluencia entre las quebradas Los Choros y El Romero (Figura 4.5 y mapa fuera de texto), poseen un área de 14.37 km², con hasta 192 m s.n.m. de altura. Labrada en conglomerados, que localmente pueden ser coquináceos, con gastrópodos y bivalvos marinos (Figura 4.15 b)) los cuales sobreyacen a la Formación Coquimbo, fuertemente cementados por carbonatos. Su superficie está levemente inclinadas hacia el mar, 1° en promedio (Gómez, 2003).

4.4.6.2 Cordones litorales

Cordones que se observan sobre la terraza de abrasión litoral que se desarrollan sub-paralelos a la línea de costa (Figura 4.15), que se pueden alzar 3 metros sobre la

anteriormente mencionada superficie, son notorios en imágenes aéreas, pero no reconocibles en trabajo de terreno.

4.4.6.3 *Línea de costa*

La playa corresponde a una playa disipativa (Villagrán, 2007), la cual es principalmente arenosa, con una población de clastos mayores (hasta 15 cm), redondeados y aplanados (Figura 4.15 c)). Desde la costa, los primeros 36 metros tienen un perfil cóncavo, punto de inflexión, desde donde adquiere una geometría, convexa (Figura 4.15 c)). Esta separación marca el límite de la zona de procesos erosivos producto del oleaje a procesos acrecionales.

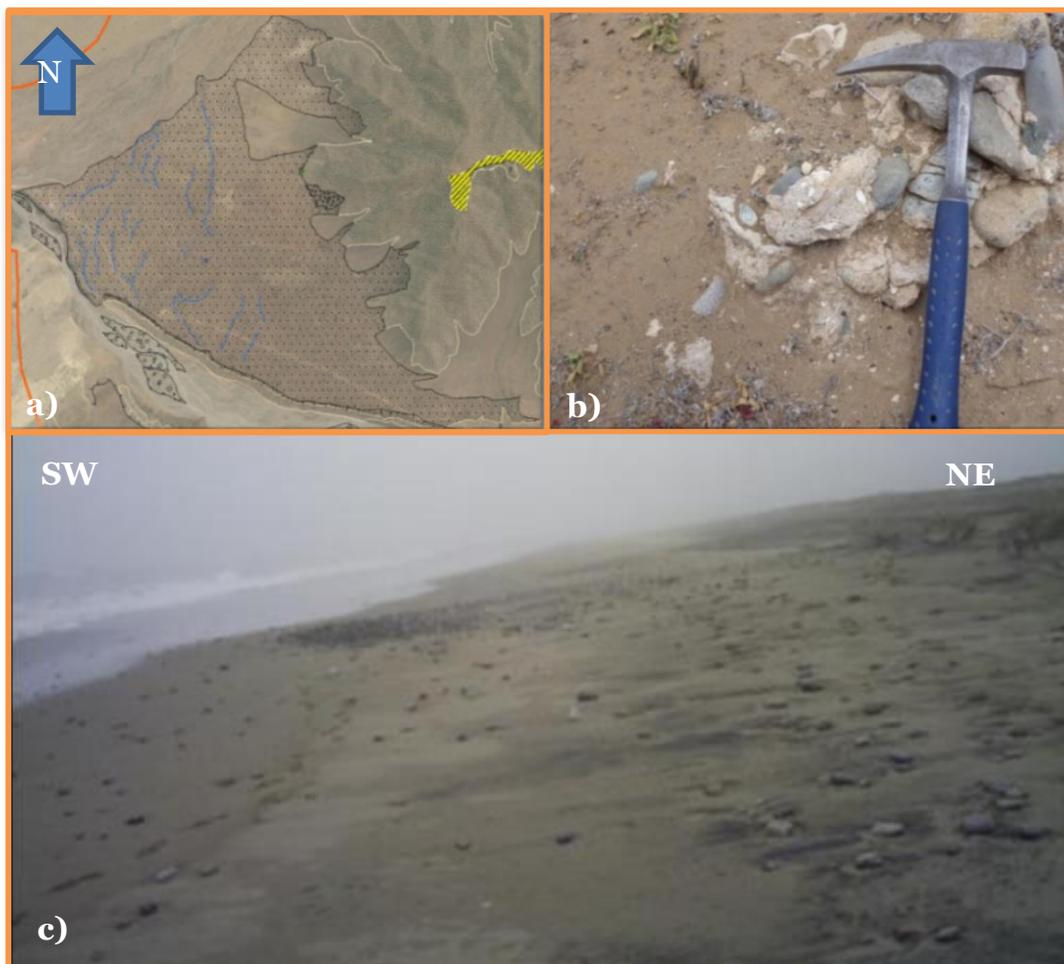


Figura 4.15 Formas marinas. a) Achurada se muestra la terraza de abrasión marina, mientras que en color azul se muestran paleocordones litorales. B) Detalle de conglomerado coquináceo que aflora en la superficie de la terraza mostrada en a). c) vista en perfil de la línea de costa, modificada de Villagrán, 2007.

4.4.7 Depósitos eólicos

Constituidas por arenas bien seleccionadas de grano medio a muy fino, con nulo grado de consolidación (Figura 4.16), se distribuyen ampliamente en la zona costera (Creixell *et al.*, 2012), y se originan a partir de transporte de partículas por el viento. Corresponden a complejos de campos de dunas que en el presente trabajo no han sido estudiados a detalle, por lo que se agrupan bajo el nombre de Manto Arenoso.



Figura 4.16 Manto arenoso del sector Choros Bajos, ubicado al norte de la desembocadura de la quebrada Los Choros.

4.4.8 Pediplanicie Domeyko

La Pediplanicie Domeyko (Figura 4.17) fue estudiada por Garrido (2009) y Urresty (2009), se encuentra compuesta por cinco superficies de bajo relieve las cuales son, de este a oeste: Superficie de Erosión San Félix (3.400 – 4.100 m s.n.m.), Superficie de

Erosión La Silla (2.300-2.800 m s.n.m.), Superficie de Pedimentación Corredores (1.499-2.700 m s.n.m.), Superficie de Erosión Algarrobillo (800-1.400 m s.n.m.) y Superficie de Pedimentación-Deposición Las Lagunitas (820-1.350 m s.n.m.), las cuales no fueron diferenciadas en el presente trabajo.



Figura 4.17 Pediplanicie Domeyko, ubicada, en parte, en la zona centro norte de la cuenca de drenaje Los Choros

4.4.9 Depósitos antropogénicos

Depósitos de escorias producto de la actividad de plantas de beneficio, tortas de relave o botaderos de estériles de yacimientos mineral (Creixell *et al.*, 2012).

4.5 Discusiones relieve local y morfología

4.5.1 Interpretación de los parámetros morfométricos

Haciendo un supuesto en el que se presenta un evento de precipitaciones abundantes y durante un periodo considerable de tiempo (2 o 3 días), luego de que se supera la capacidad infiltración del relleno sedimentario de las cuenca de drenaje Los Choros, saturando la primera capa de los depósitos, se realiza el siguiente análisis de los datos obtenidos a partir de parámetros morfométricos. Los cuales hay que interpretar con discreción, ya que dependen mucho de la resolución con la que sean determinados los parámetros geométricos de esta (Barrera *et al*, [s.a.]). Tomando esto en cuenta, los parámetros morfométricos calculados a una escala 1:50.000, pueden ser de unas décimas de diferencia a los obtenidos en una escala real. Esta discrepancia podría cambiar completamente la interpretación de estos índices.

La cuenca de drenaje Los Choros es, dada su extensión areal, una cuenca intermedia a grande. Las cuencas de gran tamaño tienen la capacidad de recoger mayor cantidad de precipitaciones que las pequeñas, por lo que, en un principio, las crecidas tenderán a ser más voluminosas; sin embargo, el tiempo de respuesta entre la precipitación y el *peak* de crecida, será más lento, y la duración del alto caudal producto de la tormenta es más largo. Por otra parte, si es que la tormenta llega a precipitar solo en una parte de la cuenca, la atenuación en el hidrograma de crecida resultante es mayor, a medida que se mueve a través de la red de drenaje hacia la sección de cierre, en una cuenca amplia que en una pequeña (González de Matauco, 2004). Este, eventualmente, podría ser es el caso de la zona estudiada, ya que, como fue revisado en la sección 2.4 (Clima), las precipitaciones orográficas tienen una gran importancia en la zona, observándose mayor concentración de lluvias en la cabecera, que en las partes bajas de la quebrada.

Gracias a los parámetros de forma calculados en la sección anterior, se puede describir la cuenca de drenaje Los Choros como una cuenca moderadamente achatada, oval-oblonga a rectangular-oblonga. Teniendo en cuenta que cuanto más redondeada es una cuenca, más tarda en llegar la onda de crecida a la desembocadura, pero, al mismo tiempo, más acusado es el caudal punta (Gregory y Walling, 1973), esto permitiría deducir, que ante eventos pluviométricos mayores, en la cuenca Los Choros apenas se darían crecidas

repentinas, y, por tanto, predominarían las crecidas de tipo valle, las cuales presentan un *peak* atenuado en el histograma de la desembocadura, y son bastante previsibles (González de Matauco, 2004).

Otra variable no considerada al estimar parámetros morfométricos, es el grado de sinuosidad, anastomosamiento o simplemente la curvatura que puede tener el valle (Jardí, 1985). Estas características aumentarán los tiempos de viaje de una gota que cae en la cabecera de la cuenca, y, por otro lado, la cuenca presentará un largo máximo que puede ser órdenes de magnitud inferior al verdadero trayecto del caudal. La Quebrada Los Choros, presenta un patrón de drenaje principalmente de tipo trezado, pero, a la vez, el canal principal genera un patrón meándrico en ciertos sectores, el que se superpone al patrón general. De este modo, los efectos de las crecidas serían amortiguados, al llegar a las partes bajas de la quebrada.

La densidad de drenaje es relativamente baja, por lo tanto muestra una textura gruesa. Este tipo de textura, según las descripciones de Strahler (1964) y Senciales (1999), se da en localidades de alta vegetación, y rocas altamente permeables. Por otro lado, Morisawa (1985) describe a las cuencas con este rango de densidades, como cuencas permeables, en clima lluvioso con una cobertura importante de vegetación. Sabemos, por lo descrito en las secciones 2.1 y 2.4, marco geológico y clima, respectivamente, que estas afirmaciones no son correctas, ya que el sustrato de la zona de estudio es mayoritariamente cristalino y estamos en presencia de un clima semiárido. En este trabajo este valor será atribuido a la edad de la cuenca, la cual presenta rasgos de estar activa desde el Mioceno, según la morfología, facies y edades de las formaciones Coquimbo y Confluencia, y al clima que se ha vuelto cada vez más árido en la zona.

Por otro lado, los valores de D_d (densidad de drenaje) afectan a la esorrentía Chorley (1969) y Carlston (1963), donde en zonas con alta densidad la esorrentía recorre la superficie rápidamente, rebajando el tiempo de concentración e incrementando el *peak* de crecida, al haber menor infiltración. De manera que, en el caso de Los Choros sucede exactamente lo contrario, se registran altas tasas de infiltración en el relleno no consolidado del valle y alimentación del flujo subsuperficial, lo cual hace suponer un atenuamiento del caudal punta. A ello contribuye de manera importante las escasas pendientes de una buena parte de la cuenca.

4.5.2 Posibles controles en la red de drenaje de la cuenca Los Choros.

4.5.2.1 Litología del substrato

Las variaciones en la resistencia litológica pueden ejercer un fuerte control en la pendiente y en la morfología de los canales (Moglen y Bras, 1995; Tucker y Slingerland, 1996; Tooth *et al.*, 2004). Esto se debe a las grandes diferencias en los coeficientes de erosión que pueden existir entre las litologías. A pesar de que el coeficiente de erosión puede variar además por diferencias climáticas, es claro que la calidad del substrato puede influenciar significativamente la incisión fluvial (Sklar y Diertrich, 1998).

De acuerdo a observaciones en terreno, las diferencias principales se encuentran entre, unidades de roca y depósitos semiconsolidados. Los primeros, por lo general, correspondiendo a cerros o cordones montañosos más altos y pendientes relativamente mayores, a veces con morfologías abruptas, mientras que los segundos por lo general muestran alturas menores y con morfologías aterrazadas. A pesar de que, en términos de distribución la red de drenaje, esta se encuentra ampliamente desarrollada a lo largo y ancho de toda la zona de estudio, morfológicamente sí existen diferencias en el desarrollo del valle entre estos grupos.

La diferencia principal entre unidades de roca estratificadas e intrusivas, radica en que sobre las primeras es más frecuente el desarrollo de planicies aluviales, al igual que sobre depósitos semiconsolidados. No pudiéndose encontrar diferencias significativas entre el patrón de erosión de unidades compuestas por rocas estratificadas y las compuestas por unidades intrusivas. Por otro lado, la diferencia más notoria es con las unidades semi-consolidadas, pues en zonas donde afloran las formaciones Confluencia y Coquimbo, de dichas características, estas se encuentran fuertemente incididas por la red fluvial, presentando escarpes de aproximadamente 150 m. Adicionalmente, antes de llegar a la desembocadura, a los ~276300 m E (ver mapa fuera de texto), hacia el occidente de la confluencia de la quebrada principal con la Quebrada Romero, el valle evade la sucesión de rocas estratificadas, Formación Punta del Cobre, desarrollándose hacia el norte, erosionando la Formación Coquimbo, para luego seguir su curso Este-Oeste.

Por lo tanto, las diferencias litológicas sería un factor de control determinante, solo en las diferencias entre unidades de roca y semiconsolidadas.

4.5.2.2 Precipitaciones

Como se mostró en la sección 2.4 (Clima), la pluviometría presenta una relación fuerte con la altura en esta zona. De esta forma, al concentrarse las precipitaciones en las partes altas de la cuenca, en este sector deberían encontrarse las afluentes de menor pendiente, debido a la fuerte erosión (Roe *et al.*, 2002; Whipple y Tucker, 1999). En consecuencia de esto, hacia el oeste se deberían encontrar pendientes más empinadas, lo que como se vio en la sección 4.2 (Parámetros morfométricos) no ocurre.

4.5.2.3 Estructuras

Al superponer el modelo de elevación digital con una simbología que evidencia la red de drenaje, con las principales fallas presentes en la zona (Figura 4.18), es posible notar ciertas características.

1.- Sistema de Fallas Vicuña-San Félix, este conjunto de estructuras corta secuencias volcánicas de edad Cretácico Superior–Paleógeno y cuerpos intrusivos Paleoceno–Eoceno, lo que según las edades de las rocas afectadas por la falla, indican que estas estuvieron activas durante el Oligoceno, período el cual se atribuye el inicio del alzamiento de la Cordillera Principal (e.g. Cembrano *et al.*, 2003; Charrier *et al.*, 2005). Además, en la zona de estudio mostraría señales de actividad reciente, debido a la formación de abanicos aluviales en zona marcada por un rectángulo celeste en la Figura 4.18 (Figura 4.19.a)).

Otra de las aparentes consecuencias de este sistema de fallas, es que estaría bloqueando el avance de la cabecera de la cuenca hacia el este (Figura 4.18). Esto se puede ver, producto de cese de la red de drenaje inmediatamente al Este del sistema de falla Vicuña-San Félix, donde el bloque oriental se ve levemente incidido por la red de drenaje.

cuales se desarrollarían fallas, las cuales bajarían la erodabilidad de la roca, facilitando el avance de los cauces.

Por otro lado, el Sistema de Falla El Tofo, sería la responsable de que en esta quebrada se produzca otra particularidad, el desarrollo preferente de abanicos aluviales en la ladera de roca intrusiva, Complejo Plutónico El Trapiche, a su desarrollo en laderas estratificadas, y por ende de mayor erodabilidad, del quinto miembro de la Formación Punta del Cobre. El movimiento relativo que genera la falla produce un gradiente, que favorece la transferencia de masa desde las laderas de roca intrusiva, hacia el fondo de la quebrada (Figura 4.19 c)). Lo que ha ocurrido, en períodos intermitentes desde el Mioceno, y actualmente sigue favoreciendo la generación de abanicos aluviales sobre la Formación Confluencia, tanto en el valle de la Quebrada Choros Altos, como desde la cabecera de las facies aluviales de la Formación Confluencia. Todo lo anteriormente dicho, se corrobora por el perfil hecho para la carta geológica Carrizalillo-El Tofo, donde Creixell *et al.* (2012), la porción de este perfil que cruza la Quebrada Choros Altos se encuentra en la Figura 4.19 c), cuya traza se evidencia en la Figura 4.18 (verde). Este tipo de procesos, estaría produciendo un ensanchamiento del valle Los Choros Altos.

Existe un gap de información estructural entre El Sistema de Falla Pajonales y El Sistema de Falla Vicuña-San Félix (Figura 4.18), pero se postula, que existe igual control estructural para emplazamiento los demás valles, dada la situación de paralelismo que existe entre quebradas y, consecuentemente, con los posibles sistemas de falla.

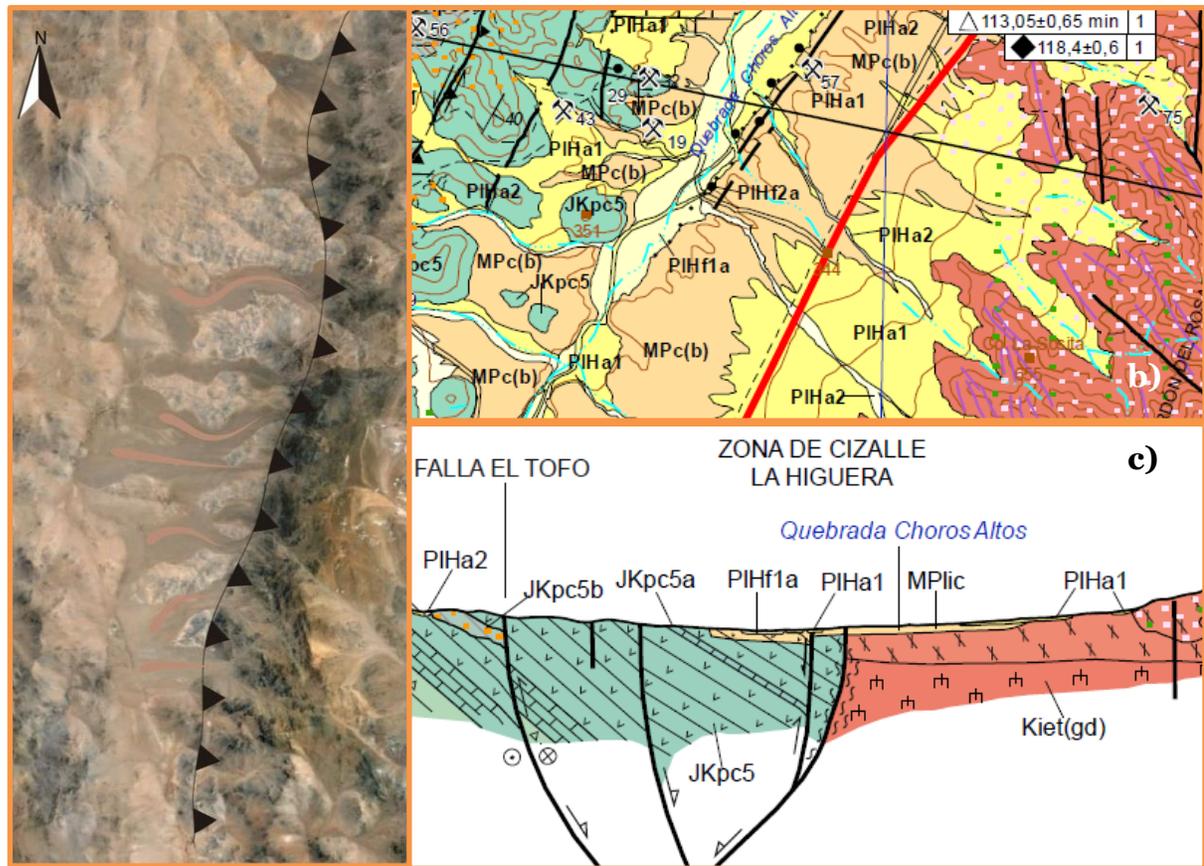


Figura 4.19. Morfologías con control estructural. a) Abanicos producto de la actividad holocena del sistema de falla Vicuña-San Félix. b) Sección de la geología del área Carrizalillo-El Tofo (tomado Creixell *et al.*, 2012), donde se obtiene el perfil que se observa en c).

4.5.2.4 Tectónica

Como se puede observar en el perfil de pendientes a lo largo de la Quebrada Los Choros esta disminuye notoriamente en su último tramo (Figura 4.20), esto se repite, según Urresty (2009), en todas las cuencas que alimentan la quebrada principal y que presenta sus cabeceras en la Cordillera Principal Oriental, las cuales presentan menores pendientes hacia el Este, el punto de variación de pendientes se denomina *kinckpoint*. Lo anteriormente señalado se debería a una respuesta transitoria que se propaga aguas arriba, producto de un evento de alzamiento tectónico, esto último se podría afirmar dado que no existen evidencias estructurales post-incisión (Urresty, 2009).

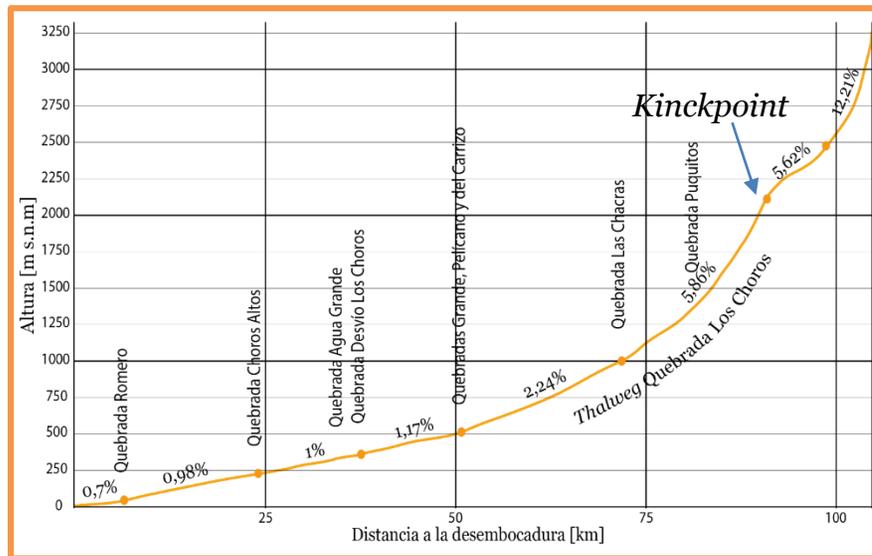


Figura 4.20 Variación de pendiente a lo largo del thalweg de la Quebrada Los Choros, donde se indica el kinckpoint. La presente figura se puede ver con mayor claridad en la sección 4.1

La onda incisiva que habría originada la diferencia de pendientes debería ser, entonces, producto de la caída del nivel base, que podría ser una combinación entre la variación del mismo, sumado a un origen tectónico, pero como la incisión es superior a los 150 m, como se puede observar en la diferencia entre el nivel de terraza de abrasión marina y la superficie de incisión, se descartaría la variación producto exclusivamente de la caída del nivel base. Este evento tectónico podría tener relación con un evento rápido de alzamiento del Plioceno Superior y que ha sido identificado en secuencias marinas que afloran justo al oeste del sector de Carrizalillo (Le Roux *et al.*, 2005a), y en este trabajo reconoce producto del alzamiento de la terraza de abrasión marina (ver mapa fuera de texto, sección 4.4.6) la que se encuentra en hacia el oriente de la confluencia de la Quebrada Los Choros con la Quebrada Romero. En primera instancia, como el nivel del mar no ha ascendido en forma importante más allá del nivel actual desde el Pleistoceno hasta ahora (Gómez, 2003, Marquadt *et al.*, 2004), la exposición tierra adentro de estos depósitos y plataformas marino-litorales es explicable, únicamente, por sucesivos solevantamientos del borde costero en la región durante el período Pleistoceno-Holoceno. Estos alzamientos habrían quedado registrados, además, en el continente, por la formación de terrazas fluviales en depósitos fluviales y aluviales antiguos y actuales, ubicada por sobre los escarpes laterales del curso fluvial actual de la Quebrada Los Choros.

El último evento de alzamiento, es aquel que exhumó la Formación Coquimbo y facies subacuáticas pleistocenas, que en la zona de estudio se vería reflejado por la terraza de abrasión marina (ver mapa fuera de texto), pero que en la Quebrada Carrizalillo, más de 20 km al norte de la zona de estudio, este se vería reflejado por la existencia de 4 niveles de terrazas marinas (Figura 4.21, Le Roux *et al.*, 2005a), donde la más baja y más joven tiene una altura de 3 ± 1 m s.n.m.; la segunda entre los 47 ± 5 y 50 ± 10 m s.n.m., labrada en la Formación Coquimbo hacia el norte de Carrizalillo, y directamente sobre basamento metamórfico hacia el sur de dicha localidad; la tercera, paralela a la línea de costa, cubierta por conglomerados polimícticos, pobremente consolidados con fragmentos de hasta tamaño bloque, tiene una altura de 105 ± 2 m s.n.m.; mientras que la más alta 225 m s.n.m., presenta cordones litorales reconocibles sólo en fotografías aéreas y se presenta labrada sobre depósitos que sobreyacen a la Formación Coquimbo.

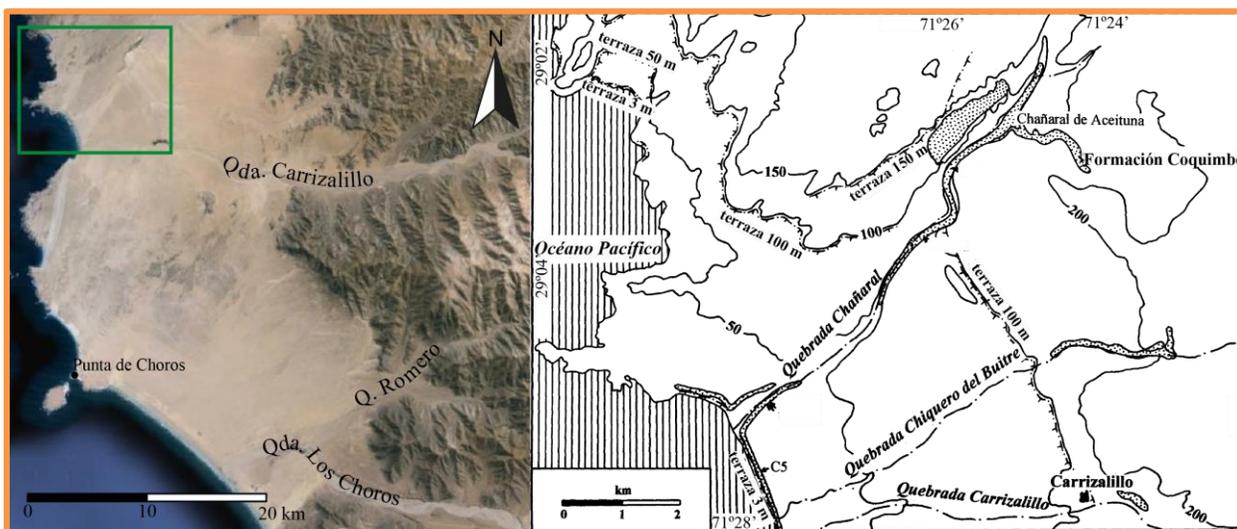


Figura 4.21 A la Izquierda un contexto de la ubicación de la figura derecha. Esta última, modificada de Le Roux *et al.* (2005a) muestra los distintos niveles de terrazas marinas encontradas en el sector de Carrizalillo.

Existen al menos tres teorías que explicarían el alzamiento de facies marinas en este período. Le Roux *et al.* (2005a, b) establecen este sería producto de la reaceleración de la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana, luego de la subducción de una dorsal hipotética, oblicua margen, que sería paralela y ubicada hacia el oeste de la Dorsal de Juan Fernández. Otras propuestas fue planteada por Delouis *et al.* (1998) quienes propusieron que el alzamiento se produjo por una flexura regional del antearco producto de erosión por subducción, debido a la subducción de material de baja densidad bajo el continente, y

Marquardt *et al.* (2004) consideran que el alzamiento es consecuencia de la extensión cosísmica durante grandes terremotos.

Le Roux *et al.* (2005a) asignaron edades a las terrazas marinas anteriormente señaladas presentes en Carrizalillo, esto según comparación con terrazas datadas en Talinay (Benado, 2000; Ota y Paskoff, 1993), por tanto las edades de las terrazas presentes en Carrizalillo serían las que siguen, la terraza más joven (3 m s.n.m. en Figura 4.21) tendría una edad máxima de ~6 ka; la siguiente terraza (50 m s.n.m. en Figura 4.21), una edad de ~330 ka; el siguiente nivel (100 m s.n.m. en Figura 4.21), una edad tentativa de ~430 ka; y la más alta (150 m s.n.m. en Figura 4.21), ~480 ka.

Cada uno de estos eventos de rápido alzamiento, registrado en cada uno de estos niveles de terrazas, habría producido una onda incisiva que se habría propagado a lo largo de la Quebrada Los Choros, donde la que se observa hoy en el sector Oriente sería producto del último evento de alzamiento a los 6 ka, esta sucesión de eventos de alzamiento, aparte de explicar la diferencia de empinamientos también explicaría el aumento progresivo del ancho del valle aguas arriba, donde aún se encontraría en una fase incisiva, mientras que en las zonas bajas de la cuenca esta se encontraría en una fase agradacional. Por otro lado, estos eventos producirían en consecuencia un descenso del nivel estático, sumado a las condiciones de aridez de la zona, producto del cual se produciría un abandono de los valles presentes en las zonas baja de la cuenca (e.g. quebrada Romero, quebrada Choros Altos), los cuales en la actualidad presentan escarpes en la confluencia con la quebrada principal (ver mapa fuera de texto).

Por lo tanto, es posible notar que existe un fuerte control de la tectónica en la morfología de la cuenca Los Choros.

4.5.3 Edad terraza abrasión marina

A continuación se compara las características de las terrazas estudiadas por Le Roux *et al.* (2005a) en el sector de Carrizalillo con la encontrada en la presente área de estudio (ver Sección 4.4.6), para acotar la edad de esta última morfología.

Como fue señalado en la sección 4.4.6 la terraza de abrasión marina presente en la zona de estudio, presenta cordones litorales, difícilmente visible en terreno, pero visibles

en imágenes aéreas, y se encuentra labrada en depósitos que sobreyacen la Formación Coquimbo, presenta una altura entre 100 y 220 m s.n.m., todas estas características, según lo señalado en la sección 4.5.2, nos permiten hacer una correlación con el nivel aterrazado de mayor altura y edad presente en la zona de Carrizalillo, por tanto, la terraza de abrasión marina, presente en la zona de estudio hacia el oriente de la confluencia de las quebradas Romero y Los Choros, tendría una edad de ~480 ka.

4.5.4 Relleno del valle en un contexto de aridez intermitente.

Diversos autores han generado modelos para variadas cuencas donde se explicarían los ciclos de agradación e incisión del Pleistoceno-Holoceno, dado los cambios climáticos (Ver Macklin *et al.*, 2002; Gao Cunchai, 2004; Raj, 2007). Aunque este modelo fue concebido para áreas con cobertura vegetal importante, se podría afirmar que el patrón general de agradación e incisión es esencialmente controlado por la variación de la escorrentía y el aporte de sedimentos (Riquelme *et al.*, 2011), y donde el contexto de la cuenca ya sea tectónica, alto relieve o glacial juegan un rol secundario, favoreciendo la creación y preservación de depósitos, debido a las respuestas del valle ante cambios climáticos (Macklin *et al.*, 2002).

En este modelo la fase agradacional del río ocurre durante períodos fríos y secos, cuando la vegetación se vuelve más superficial, favoreciendo la erosión de las laderas de los cerros, resultando en un aumento de la tasa de aporte sedimentario desde las laderas, que haciendo analogía con los procesos registrados en el presente estudio, en esta etapa se favorecería la formación de laderas con recubrimiento de suelo residual, y posterior aporte del material suelto hacia los cursos del valle en procesos aluviales menores. A la inversa, en períodos cálidos y húmedos, volvería la cobertura vegetal abundante en respuesta al aumento de las temperaturas, y se produciría una consecuente disminución de los aportes vertidos desde las laderas de los cerros hacia el cauce, y, por tanto, un mayor transporte y erosión de los sedimentos previamente aportados desde las laderas, disponibles en el lecho del río, dicho en otras palabras, se produciría la incisión del lecho del valle.

En el valle de la Quebrada Los Choros, se exponen al menos dos niveles aterrazados holocenos, fácilmente reconocibles en ciertos puntos ubicados en la parte alta de la cuenca

de drenaje, sumado a relleno de depósitos aluviales y menor relleno coluvial (Ver sección 4.4). La cobertura vegetal es casi ausente, lo que favorece la producción de suelo residual durante todo el período, y, probablemente, durante el Pleistoceno no haya sido muy distinto, ya que las condiciones paleoclimáticas no serían muy disímiles a las actuales a lo largo del semiárido chileno (Villagrán y Varela, 1990; Veit, 1996; Grosjean, 2001; Maldonado *et al.*, 2005, Maldonado y Villagrán, 2006). Así, en períodos de aridez se produciría la fase agradacional, donde se produciría un aumento de laderas con suelo residual, pues aumenta la meteorización en ellas, incipiente aporte desde las laderas a través depósitos aluviales de menor magnitud, coluvios y material proveniente directamente desde las laderas, el cual se conservaría pobremente consolidado, y luego un posterior evento de incisión, donde los sedimentos serían re-transportado aguas abajo en la quebrada por la acción fluvial, y se produciría abanicos aluviales de mayor envergadura. Este ciclo se habría repetido al menos dos veces durante el presente cercano, formándose las terrazas fluviales reconocidas como t' y t'' (Ver sección 4.4.3.1.1).

4.5.5 Evolución geomorfológica

Mioceno Superior-Plioceno Inferior: Los continuos procesos de sedimentación, los que podrían estar relacionados con una renovada subsidencia producto del paso de la traza SE de la dorsal de Juan Fernández, generados por rápidas crecidas de las cuales se destaca una a los 3,9 Ma (Le Roux *et al.*, 2005a), conllevaría la generación de amplios depósitos aluviales y fluviales en las quebradas Los Choros, Choros Altos y Desvío Los Choros (ver mapa fuera de texto). Estos depósitos corresponden a la Formación Confluencia (definida por Creixell *et al.*, 2012), cuyos niveles inferiores estarían interdigitados con los niveles superiores de la Formación Coquimbo, dando señales que desde sus inicios, la cuenca Los Choros, sería una cuenca costera.

Luego del paso de la dorsal de Juan Fernández, cerca de los 2,6 Ma (Le Roux *et al.*, 2005a), se habría producido alzamiento rápido, el cual habría generado 4 niveles aterrizados marinos en la zona de Carrizalillo (Le Roux *et al.*, 2005a) como fue detallado en la sección 4.5.2.1, las cuales también fueron registrados en el relleno del valle, tanto en depósitos fluviales y aluviales, antiguos y actuales, aguas adentro en la Quebrada Los Choros. Sin embargo, no se descarta que alguna de estas sea producto de procesos de

agradación e incisión debido a periodos intermitentes de eventos pluviométricos mayores y relativa sequía entre los ~25 ka y los ~13 ka (en base a información recopilada por Aguilar, 2010), ver Figura 4.22, o que estos mismos eventos hayan producido otros niveles de aterrizados entre medio no registrados en el presente trabajo, como también se puede producir la situación en que algunos de los niveles aterrizados, presentes en los depósitos fluviales y aluviales tanto antiguas como actuales, sean producto de la propagación de los eventos de alzamiento, y otros sean producto de la incisión de eventos de mayor pluviometría (Figura 4.22).

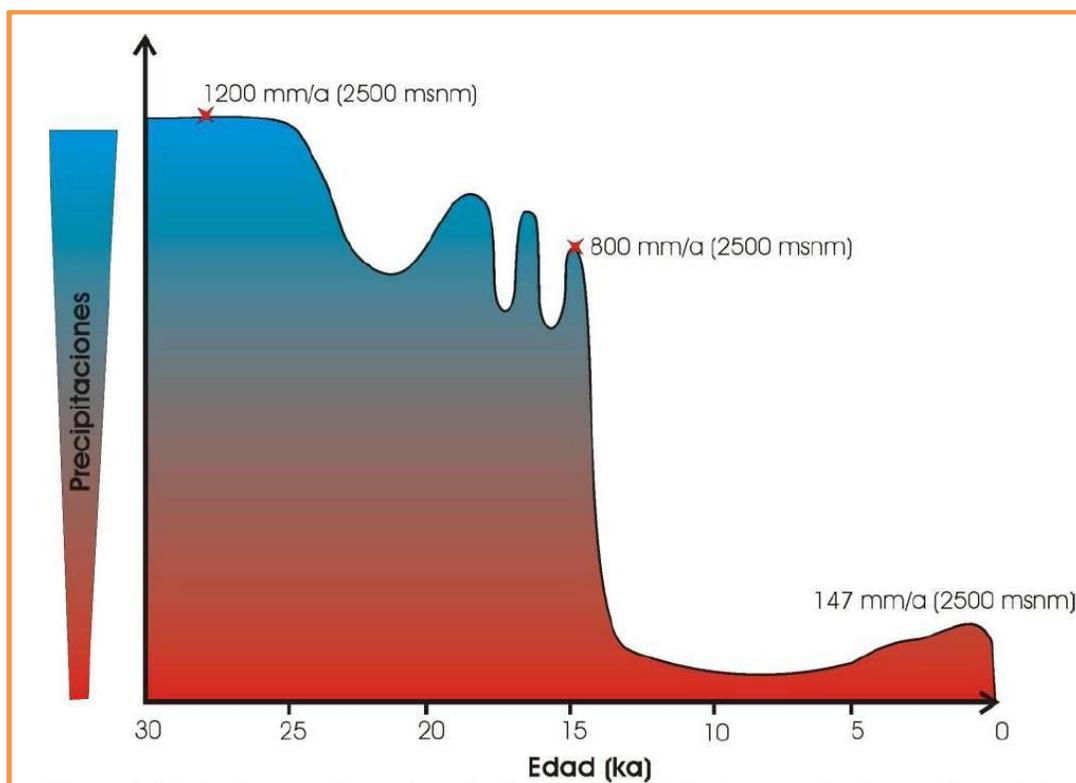


Figura 4.22 Gráfico que ilustra la variación de las precipitaciones en la alta cordillera de los Andes semiáridos durante los últimos 30 ka. Los valores marcados con estrellas rojas, corresponden a valores de precipitación a los 2500 m s.n.m., calculadas a través de la línea de equilibrio glacial. Además de la actual tasa de precipitación a los 2500 m s.n.m. (DGA, 2007). Tomado de Aguilar (2010).

Plioceno Superior: Como señalan Alpers y Brimhall (1988) y Hartley (2003) este período el clima se vuelve hiperárido, por lo tanto habría bajado la densidad de vegetación con respecto al período anterior, se habría favorecido la formación de laderas cubiertas por suelo residual, y el aporte de material hacia el valle sería a través de procesos aluviales menores y coluviales. En este período no se habrían producido cambios destacables en la geomorfología de la zona de estudio.

Pleistoceno: Según lo señalado por Zech *et al.* (2006) y Riquelme *et al.* (2011), este período se caracteriza por presentar un clima templado y húmedo, donde se habría producido un nuevo período de gran aporte de material hacia el valle y una posible incisión en él, como se detalla a continuación.

~480 ka: Primer evento de alzamiento, producto de la aceleración de convergencia entre las placas Sudamericana y de Nazca (Le Roux *et al.*, 2005a, b), el cual genera el solevantamiento de terrazas de abrasión marina y depósitos fluvio-aluviales presentes en las cercanías del sector costero, generados en período anterior, esta superficie subhorizontal lleva el nombre de T4 en el presente trabajo (ver mapa fuera de texto y Figura 4.23). Durante la regresión marina, generada por el alzamiento tectónico, se produciría una regresión del mar del nivel del mar, proceso por el cual se podrían haber formado cordones litorales que representarían líneas de costa abandonadas (e.g. Quezada *et al.*, 2007).

~480-~430 ka: Incisión de los depósitos previamente alzados, producto del clima húmedo presente en el período y del descenso del nivel basal, el previo evento de alzamiento habría generado una onda de incisión a lo largo de la Quebrada Los Choros, la cual también se habría propagado a lo largo de las quebradas Choros Altos y Desvío los Choros, donde la cuenca de drenaje Los Choros estaría incipientemente formada. Se habría generado el escarpe de incisión de 95 m s.n.v.a. en la Formación Confluencia y depósitos fluvio-aluviales cuaternarios.

~430 ka: Nuevo evento de alzamiento que se habría registrado en un nuevo nivel aterrizado, con una diferencia de altura de 50 metros respecto al anterior en el sector de Carrizalillo, dicha magnitud de desnivel no se ha observado en el presente estudio, sin embargo, existe un nivel aterrizado en la Quebrada Los Choros, que tiene una diferencia de altura con el anterior cercana a los 40 m (T3 en mapa fuera de texto y Figura 4.23), la cual se postula que estaría relacionada con este evento de alzamiento.

~430-~330 ka: Aún con un clima de relativamente altas precipitaciones y cálido se habría producido una nueva onda de incisión en la superficie señalada anteriormente, cuyo escarpe también se registra en la Quebrada Choros Altos.

~330 ka: Nuevo pulso de alzamiento genera un nuevo nivel de terraza marina, 50 m bajo el nivel de terraza anterior, nuevamente, en este caso, la diferencia es menor aguas adentro, donde el siguiente nivel aterrazado presenta una diferencia de altura de 40 m, dicha superficie se nombre T2 en el presente trabajo (ver mapa fuera de texto y Figura 4.23).

~330-~6 ka: El clima varía, en este período se registran *peaks* de episodios pluviométricos, seguidos de períodos de relativa sequía, con ciclos de repetición con períodos de 3 ka como se puede ver en la Figura 4.22, para que finalmente a los ~13 ka, las precipitaciones anuales bajen abruptamente a menos de 147 mm/año, como se muestra la Figura 4.22 (Aguilar, 2010), esta situación de aridez, generaría una disminución en la vegetación, mayor producción de suelo residual en las laderas, y el descenso sistemático del nivel freático. En este período se genera una nueva onda incisiva, aunque de menor magnitud, debido a lo anterior, que se trasladaría de forma más lenta, producto de la baja del poder erosivo del flujo de la cuenca de drenaje Los Choros.

~6 ka se observa un nuevo evento de alzamiento, donde en las costas de Carrizalillo se forma una superficie a unos 44 m bajo el nivel de la superficie formada anteriormente; aguas adentro se observa una superficie bajo unos 24 m de la anterior, en este período se habría formado la superficie T1 (ver mapa fuera de texto y Figura 4.23).

~6 ka al presente, aumenta relativamente las precipitaciones, pero el descenso de estas en el período anterior sería irreparable, lo cual terminaría, finalmente, con el descenso del nivel estático hacia 1947 (Peralta *et al.*, 1971), desde cuando al quebrada solo presentaría escorrentía superficial en eventos tormentosos esporádicos. Debido a esto la Quebrada Choros Altos, cuya cabecera se encuentra en la Cordillera de la Costa, desarrollaría un escarpe en la confluencia con la Quebrada Los Choros, debido a su inactividad casi permanente; sumado a esto, se formaría una barrera frontal, debido a la baja acción fluvial hacia el mar, producto de lo cual se favorecería la formación del humedal Laguna Boca Los Choros. Dicha barrera ha sido erosionada durante inviernos de alto nivel pluviométrico, donde se han formado superficies de inundación hacia el sur de la desembocadura, período en los cuales la quebrada vacía su flujo al mar. En este período se habría formado el escarpe fluvial $4,5 \pm 2,5$ m s.n.v.a., y, en consecuencia, el nivel de incisión actual (Figura 4.23).



Figura 4.23 Superficies aterrazadas y sus edades correlativas.

Período reciente: Solo durante períodos de tormentos se habrían generado terrazas de incisión menores como las descritas en la sección 4.4.3.1 (t' y t''), producto de crecidas esporádicas, donde se desarrollan escarpes menores de 50 cm, donde la más baja de ellas se podría haber formado durante la crecida de 1997.

Dos eventos pluviométricos mayores han generado flujos en la quebradas Los Choros durante los últimos 20 años, el primero en 1997 el cual Jan Van Dijk, describe en su artículo “Santuario de la naturaleza desierto costero de los Choros” hecho el año 2011, como “... un acontecimiento inolvidable e impresionante... el temporal de 1997 cuando el río desenterró olivos en Los Choros para vararlos después en la playa...”. El año 1997, ha sido uno de los inviernos más crudos en la etapa actual de la zona de estudio, registrándose hasta 180 mm en el año distribuidos entre los meses de junio, agosto y octubre, (información obtenida a partir de estadísticas hidrológicas en línea del DGA, sitio web: snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes); y el segundo durante marzo del 2015, donde solo entre los días 23 y 25 de dicho mes, se registraron 21 mm (fuente: snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes), donde el flujo se registró a partir del día 24 en la tarde hasta el día 31 de marzo.

5 Sedimentología y estratigrafía de la Quebrada Los Choros

5.1 Sedimentología superficial a lo largo de la Quebrada Los Choros

En el marco de la campaña de terreno entre los días 20 a 29 de agosto del año 2013, se realizó una descripción superficial de puntos de observación, distribuidos a lo largo de la Quebrada Los Choros como se puede ver en la Figura 5.1, a continuación se muestra la variación de tamaños máximos y moda a lo largo de la quebrada, además de la variación mineralógica de los fragmentos, el ANEXO A al resumen de las paradas realizadas durante la campaña de terreno, en el ANEXO B se detalla la información sedimentológica superficial de cada parada.

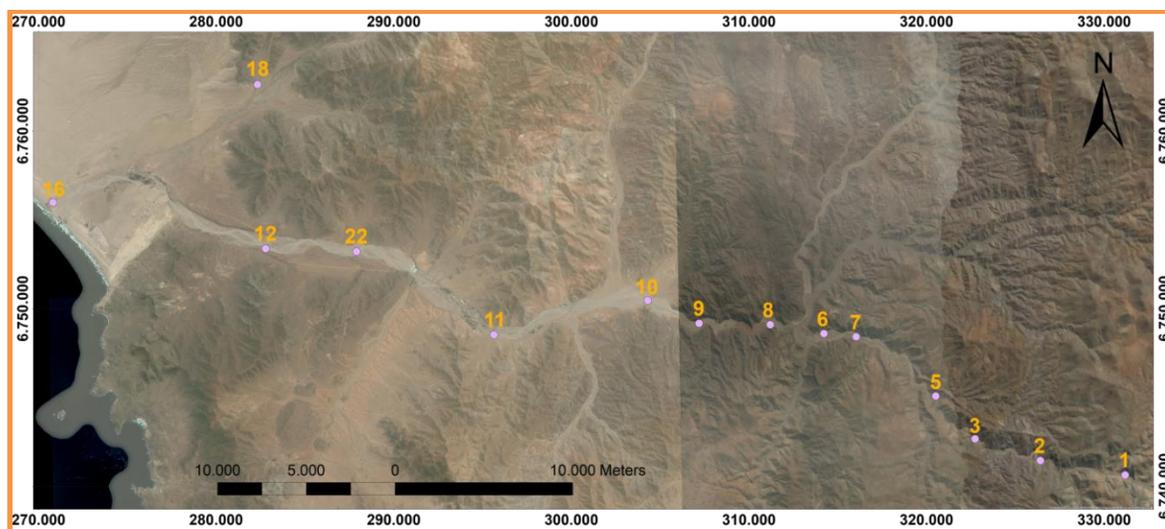


Figura 5.1 Puntos de control sedimentológico.

Algunas fotografías de las paradas realizadas durante la campaña de terreno se encuentran en la Figura 5.2. Donde se puede notar que los bloques mayores por lo general son de origen ígneo intrusivo, lo que se puede ver por sus colores blanquecinos; además, muestran una disminución de tamaño hacia la desembocadura (Complementar Figura 5.2 con Figura 5.1 para ubicación geográfica de los puntos); y, que estos presentan cantos subredondeados y esfericidad baja.



Figura 5.2 Fotografías tomadas durante campaña de terreno de algunos de los puntos de observación que durante esta se hicieron, cada fotografía presenta en la parte superior su orientación, y en la esquina inferior izquierda, el número de la parada, cuya ubicación se puede observar en la Figura 5.1.

En base a la información recopilada en cada uno de los puntos de observación (Figura 5.1) se construye un gráfico de las variaciones de los fragmentos de tamaño máximos versus la distancia a la desembocadura (Figura 5.3), en el cual se añade la observación de

fragmentos con un diámetro de unos 20 cm en el litoral justo frente a la desembocadura de la quebrada, los cuales sólo pueden provenir de la quebrada misma, dado que la formaciones aledañas al sector corresponden a depósitos eólicos finos no consolidados. La estimación de errores se hace a partir del grado de enterramiento que presentan estos clastos durante el terreno.

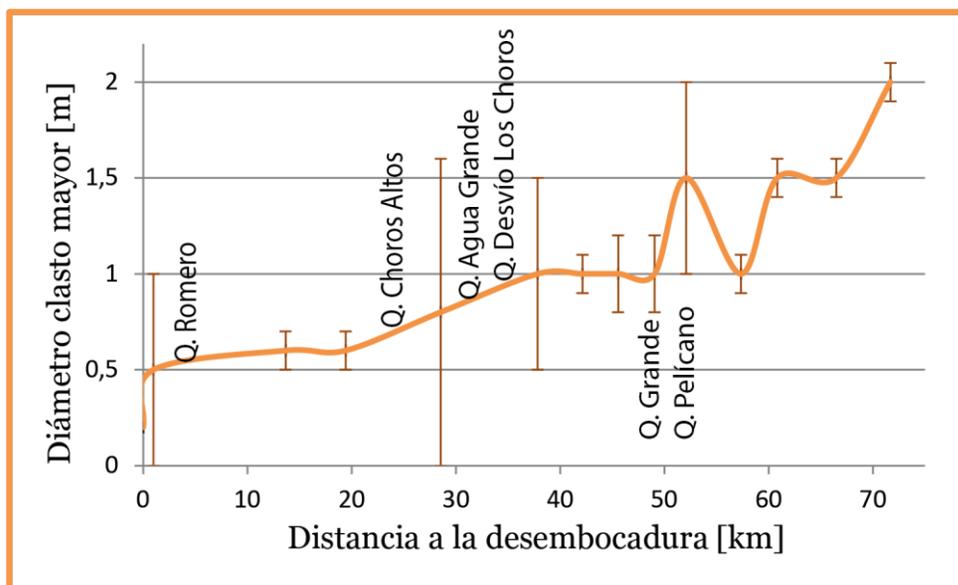


Figura 5.3 Variación de diámetro máximo de fragmentos a lo largo de la Quebrada Los Choros, margen de error calculado en base a enterramiento que presenta fragmento en cuestión. En la Figura también se señalan los lugares donde confluyen los tributarios principales a la Quebrada Los Choros.

En esta curva es posible observar que existe una tendencia clara en la disminución de tamaños hacia la desembocadura, sin embargo esta no es uniforme, y es más persistente hacia la desembocadura desde la confluencia de la quebrada principal con la Quebrada Desvío Los Choros, desde parada 10 en Figura 5.1, inclusive también desde la parada 9 (Figura 5.1).

Los fragmentos mayores son, por lo general de origen ígneo, ya sea plutónico o volcánico, los primeros con mayor presencia, mientras que solo se observó un fragmento mayor de origen sedimentario en la parada 8, cómo se muestra en a Figura 5.4, seguido por una serie de bloques menores hacia la desembocadura, los cuales por lo general no pasaban de un diámetro de 20 cm.



Figura 5.4 Fotografías de la Parada 8 (Ver ubicación en Figura 5.1) a la izquierda, vista panorámica del punto de observación. A La derecha, fauna fósil presente en bloque mayor.

Los fragmentos mayores de origen ígneo, por lo general muestran superficies lisas, son sub-redondeamiento y con baja esfericidad, en cambio los fragmentos de origen ígneo volcánico se muestran sub-redondeados, con superficies rugosas, y esfericidad relativamente parecida a la de los fragmentos de origen intrusivo. Por otro lado, el bloque mayor de origen sedimentario, se presenta sub-anguloso y con mayor esfericidad que los fragmentos anteriores. Composicionalmente, los fragmentos mayores corresponden a unidades aledañas o cercanas a los puntos de observación, aunque en el caso de la Parada 16, donde no existen formaciones de roca en sus alrededores, la fuente de proveniencia del fragmento mayor se estima que es el Complejo Plutónico Las Cabras, dado que tiene características petrográficas macroscópicas similares a fragmentos presentes en las cercanías de dicha unidad.

Además de la variación de los fragmentos de mayor diámetro, también se estima la moda de la matriz en cada una de las paradas donde también se añade la información de depósitos encontrados frente a la barrera frontal de la quebrada. En el presente estudio, todo fragmento menor que tamaño guijarro, es decir menor a 64 mm, es considerado como componente de la matriz. Los resultados obtenidos a partir de la información recopilada en campaña de terreno se presentan en la Figura 5.5.

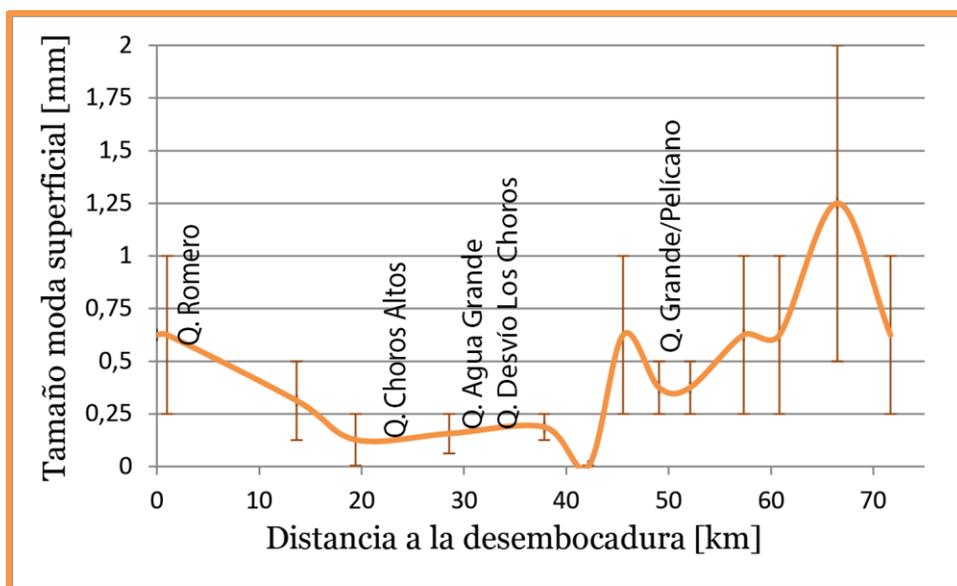


Figura 5.5 Variación de rango de tamaño moda dentro de la matriz de los depósitos analizados superficialmente, la matriz se considera fragmentos menores a tamaño Guijarro (menor a 64 mm). En la Figura también se señalan los lugares donde confluyen los tributarios principales a la Quebrada Los Choros.

Como se puede observar en la Figura 5.5, los valores de la moda de la matriz, fluctúan irregularmente entre arena media y arena fina, sin embargo la Parada 9 se sale de este rango, cuya superficie es de carácter limo-arcilloso. Composicionalmente, la matriz es polimícticas, no pudiendo a primera instancia diferenciar una fuente principal de sedimentos de este rango de tamaños, dicha diferenciación se hace a partir de la manufacturación de láminas delgadas y posterior análisis bajo microscopio como se explicará en la próxima sección (Sección 6).

5.2 Macro-granulometría de la Quebrada Los Choros

Se contrató al IDIEM para la realización de 4 calicatas en el lecho del valle a lo largo de la Quebrada Los Choros (informe técnico en ANEXO C), con el fin de obtener información granulométrica de los depósitos de fondo del valle (resultados tamizaje en ANEXO D). Este control consistió en la excavación de 4 calicatas de 1 m³ (ubicación en la Figura 5.6) durante una campaña que se realizó entre los días 26 y 29 de agosto del 2013, donde, además, se hizo una descripción estratigráfica de las mismas por parte de los mismos trabajadores.

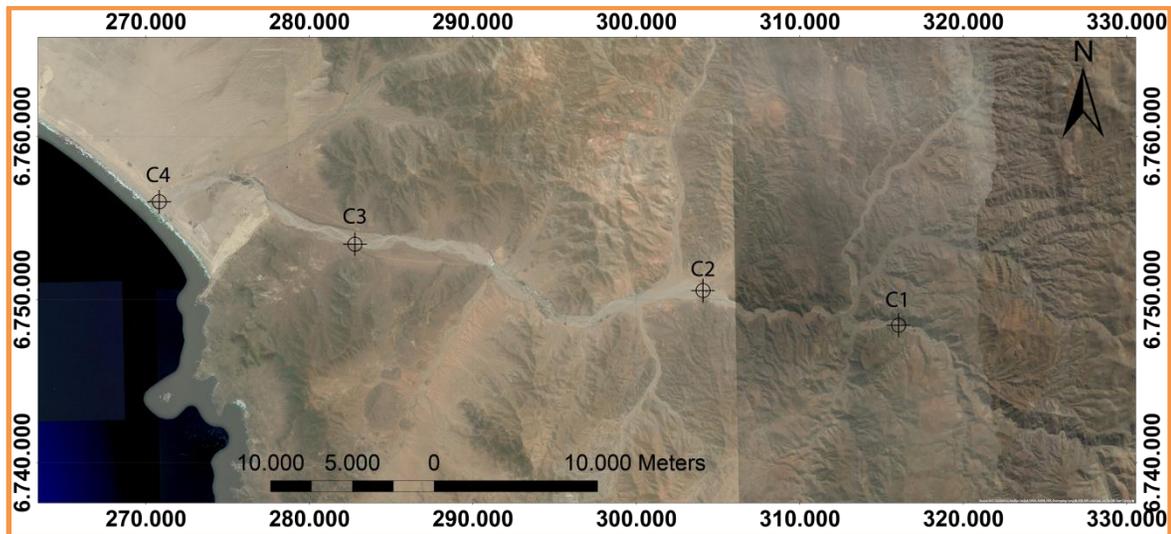


Figura 5.6 Ubicación de calicatas donde se hicieron los estudios de macro-granulometría

En general, es posible observar una distribución polimodal, con una moda que aumenta progresivamente de $-2,25 \Phi$ (4,76 mm), en la calicata 1 (C1 en la Figura 5.6), a $2,25 \Phi$ (76,11 mm) en la calicata 4 (C4 en la Figura 5.6), como se puede observar en la Figura 5.7. Por otro lado, la media y mediana disminuyen ligeramente hacia la desembocadura (Figura 5.7) con valores que fluctúan entre $-3,38 \Phi$ (10,39 mm) y $-4,88 \Phi$ (29,45 mm), y entre $-5,3 \Phi$ (39,4mm) y -4Φ (16 mm), respectivamente, por lo que predomina el tamaño grava gruesa. El tamaño máximo es de $-7,66 \Phi$ (202,25 mm) en la mayoría de las calicatas, exceptuando la calicata 4 (C4 en la Figura 5.6 y Figura 5.7), donde el valor máximo es de $-7,84 \Phi$ (229,13 mm).

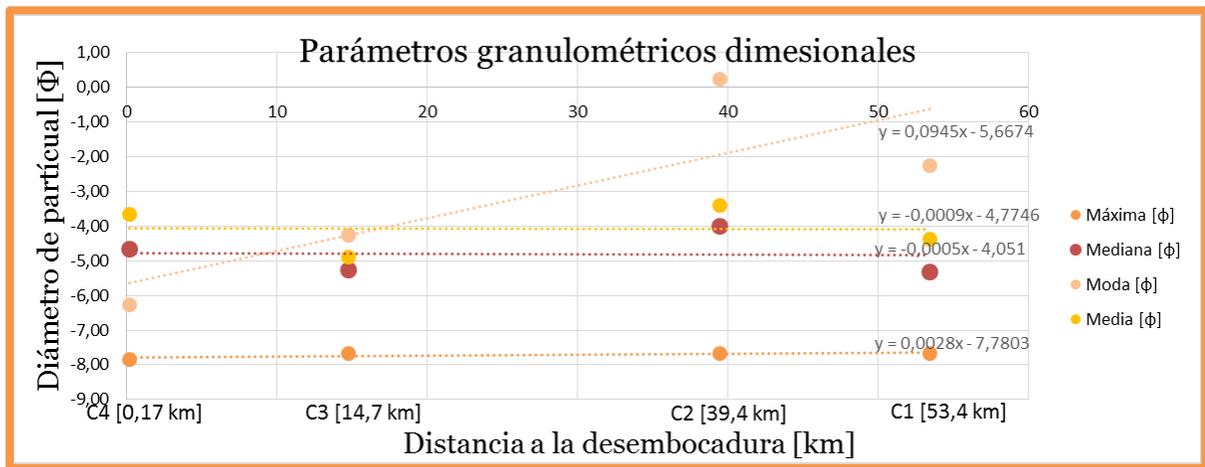


Figura 5.7. Parámetros granulométricos dimensionales (máximo, mediana, moda y media, todos en valores de Φ) con los que se caracterizan la distribución de tamaños de las distintas calicatas (Ubicación de las calicatas en Figura 5.16).

Los parámetros granulométricos adimensionales (Figura 5.8), tienden a aumentar de forma casi imperceptible hacia la desembocadura de la Quebrada Los Choros, son depósitos con muy mala selección, con valores que fluctúan entre 2,26 y 3,27; tienen una asimetría muy positiva, cuyos valores están en un rango entre 0,5 y 0,32, finalmente la distribución granulométrica tiene una geometría media platicurta, aunque en su rango también tiene geometría leptocurta (C3 en Figura 5.8) y mesocurta (C1 y C4 en Figura 5.8), con valores que varían entre 0,77 y 1,4.

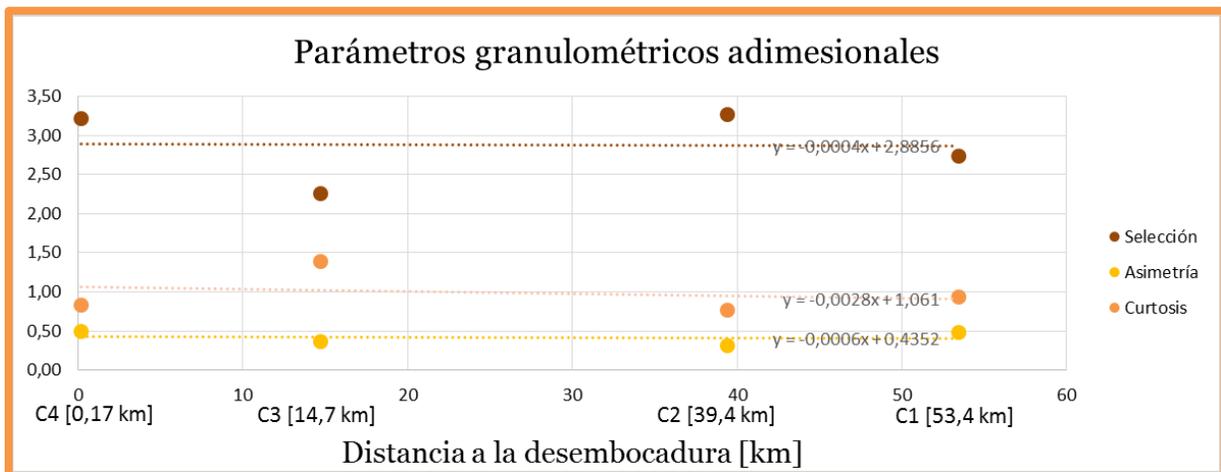


Figura 5.8 Parámetros estadísticos adimensionales (grado de selección, asimetría (*Skewness*) y curtosis, con los que se caracterizan la distribución de tamaños de las distintas calicatas (Ubicación de las calicatas en Figura 5.16).

Las curvas de frecuencia acumulativa de cada calicata muestran geometrías bastante dispares a lo largo de la quebrada, como se puede observar en la Figura 5.9, sin embargo, se pueden identificar puntos de quiebre de pendiente bastante marcados en cada una de ellas, que además coinciden entre las mismas. El primero de ellos, no muy claro es entre $-5,25 \phi$ (38,05 mm) y $-4,25 \phi$ (19,03 mm), y el segundo bastante marcado en 2ϕ (0,25 mm), estos puntos, o sectores, corresponderían, como se señaló en la Sección 3.2, a la separación entre modos de transporte de material dentro del mismo flujo, es decir, por tracción, saltación y suspensión.

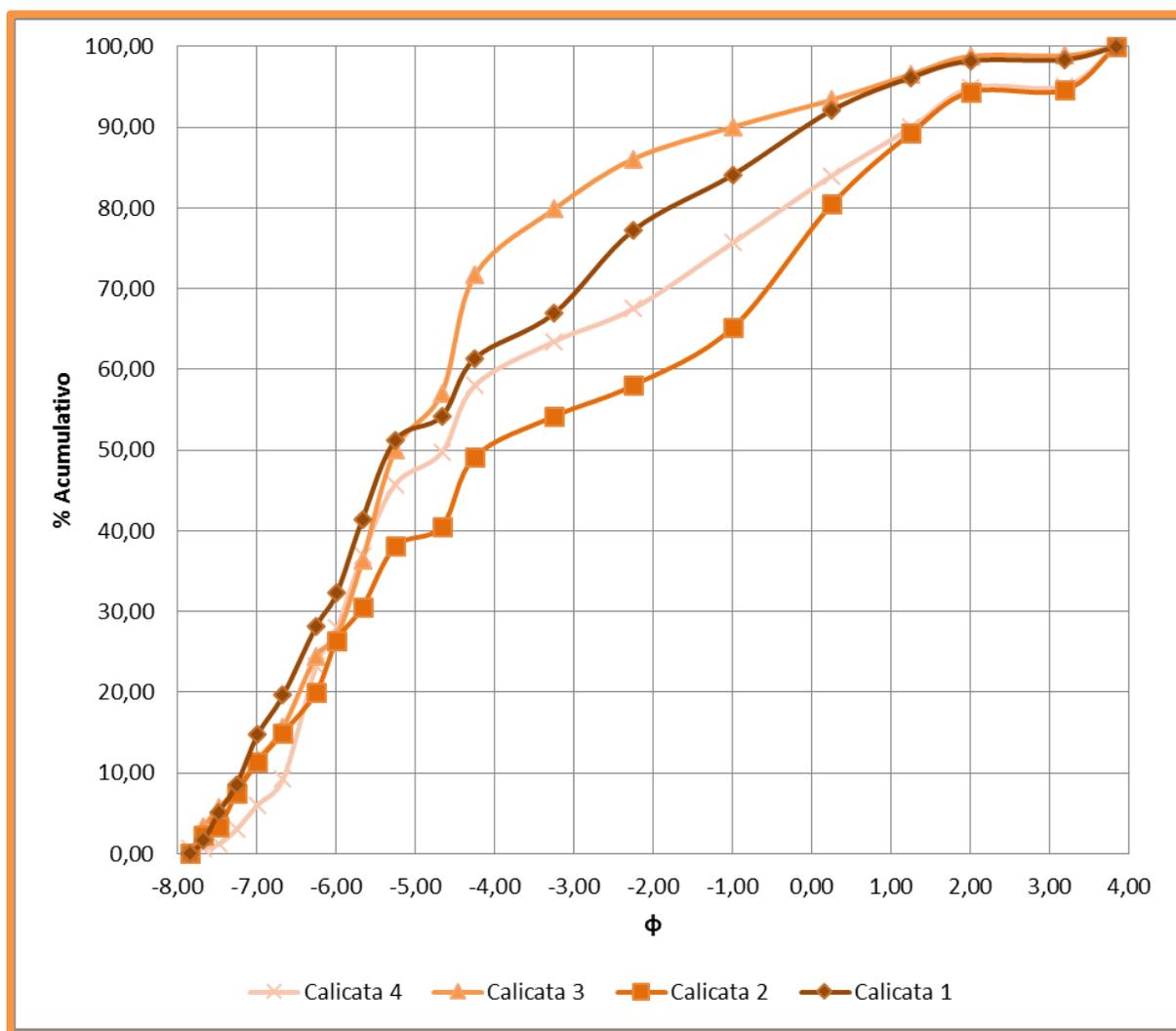


Figura 5.9. Curvas de frecuencia acumulativa para todas las calicatas.

El análisis de la distribución granulométrica para cada una de las calicatas por separado, se encuentra en el ANEXO E.

5.3 Estratigrafía de calicatas

La estratigrafía de las calicatas se hizo a partir de descripción hecho por IDIEM (informe técnico en ANEXO C), complementado con análisis fotográfico de las mismas.

En el siguiente acápite se referirá a matriz, como todos los fragmentos que constituyen el depósito con tamaño menor a guijarro, es decir menor a 64 mm.

Los depósitos de los flujos presentes en la Quebrada Los Choros, estudiado a partir de la confección de calicatas de 1 m³, son matriz soportados, donde esta constituye entre el 60 y el 80% del volumen total de los sectores estudiados, compuesta principalmente por fragmentos de tamaño grava, y menor arena, aunque también se observan niveles compuestos exclusivamente por arena o limo-arcillas en la calicata 4 (Figura 5.10). Presentan, por lo general, estratificación débil a masiva, localmente se puede encontrar, gradación normal de bloques (Calicata 1, en Figura 5.10), lentes de limo color café (Calicata 2, en Figura 5.10). Todas presentan raicillas en el techo de los depósitos, aunque, además, la Calicata 4 también presenta raicillas en la cota 0,3 m (Ver Calicata 4 en Figura 5.10).

Texturalmente los depósitos tienen muy mala selección, con clastos subredondeados a redondeados, donde los fragmentos de origen ígneo intrusivo son los que presentan mayor redondeamiento, además presentan baja esfericidad, la cual aumenta a menor diámetro de las partículas.

A medida que se avanza hacia la desembocadura los miembros tendrían menor proporción en volumen de grava, aumentando proporcionalmente la cantidad de arena, pasando de una matriz de grava arenosa a una matriz de arena gravosa. En la calicata 4 (C4 en la Figura 5.10).

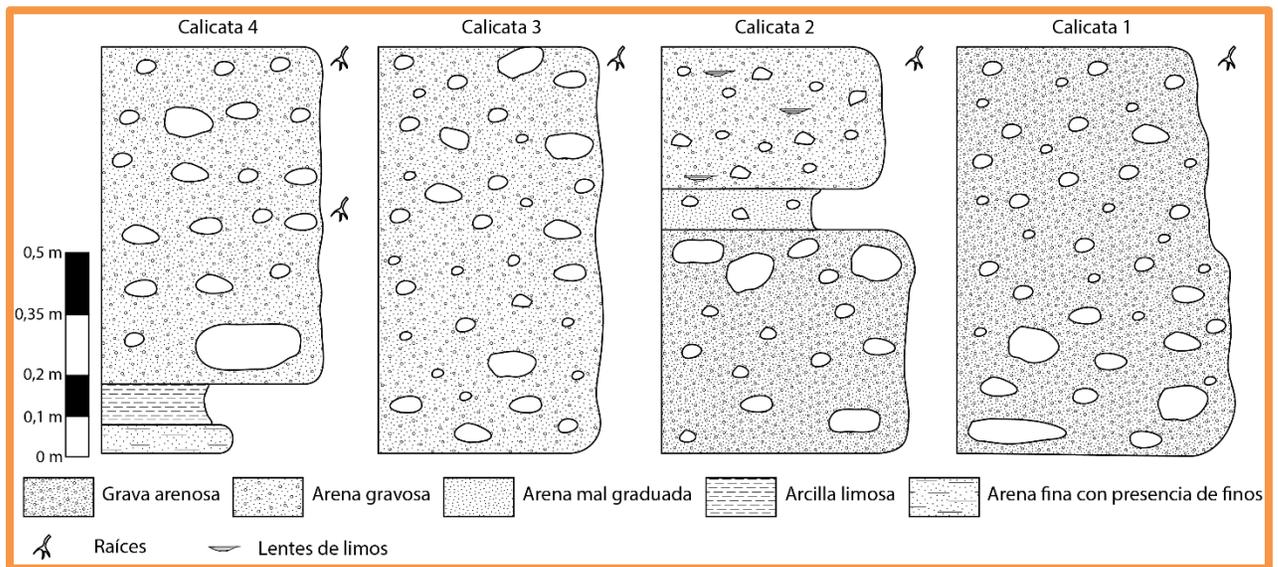


Figura 5.10 Columnas estratigráficas de calicatas estudiadas. Dentro de las columnas se muestra la distribución esquemática de fragmentos mayores a 7,62 mm (3”) que hacen notar la estratificación débil.

5.4 Discusiones

5.4.1 Aislamiento de laderas al fondo del valle

Como se ha hecho notar en la sección 5.1, la curva de bloques mayores, disminuye de forma irregular desde la cabecera hacia la desembocadura, situación que cambia desde la confluencia con la Quebrada Desvío Los Choros, punto desde el cual el diámetro de estos fragmentos disminuye de forma regular (Figura 5.11). Además, tomando en cuenta que en la mayor parte del trayecto, o por lo menos desde la cabecera de la Quebrada Los Choros hasta el sector en cuestión, los fragmentos tienen relativamente la misma composición que las formaciones aledañas, sería posible que estos, en dicho sector, serían transportados ya sea por procesos coluviales y/o aluviales menores recientes que, posteriormente, quizás tengan cierto movimiento a lo largo del valle durante el período de crecida hacia el poniente de dicho punto. Por otro lado, desde la confluencia entre las quebradas Los Choros y Desvío Los Choros hacia el occidente, es más difícil determinar la proveniencia de los fragmentos mayores, ya que son en su mayoría rocas intrusivas granodioríticas, composición de la mayoría de los complejos plutónicos que afloran en la zona, con pocas características con las cuales hacer distinción de la unidad de proveniencia, exceptuando el fragmento mayor ubicado en la desembocadura, parada 16, cuyo caso será tratado en la sección posterior (Ver sección 5.4.2).

Desde la confluencia de la Quebrada Los Choros con la Quebrada Desvío Los Choros, existen ciertos cambios en la morfología y en el relleno del valle, donde el ancho de este pasa de menor a 543 m al este de la confluencia y mayor a 650 m al oeste de la misma, y, por otro lado, es cada vez más frecuentes la presencia de depósitos aterrazados semiconsolidados, los cuales están constituidos por fragmentos de tamaño máximo grava, adyacentes a las laderas, correspondientes a las formas y depósitos aluviales y fluviales tanto actuales como antiguos (Ver mapa fuera de texto).

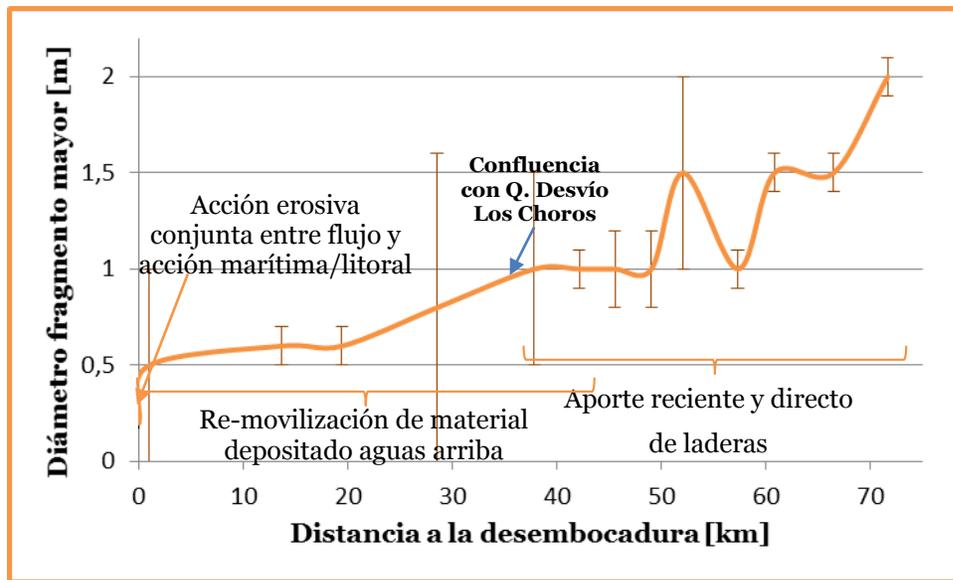


Figura 5.11 Modos de transporte de bloques mayores a lo largo de la Quebrada Los Choros. La línea naranaja gruesa muestra la variación de tamaños de fragmentos mayores a lo largo del *thalweg* de la Quebrada Los Choros, donde además se señalan las zonas de aporte directo desde laderas, zona de re-movilización de material depositado, y zonas de acción conjunta entre erosión del crecidas y marítima/litoral.

Tomando en cuenta los cambios que se producen en la Quebrada Los Choros, en la confluencia con la Quebrada Desvío Los Choros, es posible notar que hacia el oeste de esta, hacia la desembocadura de la quebrada, existiría cierto nivel de aislamiento de las laderas hacia el valle, el cual no permitiría la llegada de bloques de mayor tamaño al *thalweg* de la quebrada principal, como sí se los encuentra hacia la cabecera, esto sería producto del conjunto de características anteriormente expuestas, lo cual haría posible que estos se depositen sobre los niveles aterrizados, o bien sobre el valle, pero en zonas a lejanas al *thalweg*. Por tanto la disminución de tamaño de los fragmentos mayores, aquí presente, sería producto de la re-movilización de los clastos mayores depositados aguas arriba durante algún evento de crecida. Por último, la disminución abrupta de tamaños en la desembocadura de la quebrada, sería por la acción conjunta de la fragmentación dentro de un flujo de crecida, y la erosión litoral sobre ellos (Figura 5.11).

5.4.2 Capacidad de transporte por tracción de la Quebrada Los Choros

Como fue señalado en la sección 5.1 y 5.4.1 se notó la presencia de fragmentos mayores de similares características macroscópicas, tanto en la parada 16, como en la parada 7 (Figura 5.12, ubicación en Figura 5.13), en ambas cosas corresponde a una granodiorita

leucocrática de grano medio con enclaves melanocráticos de composición diorítica. Dado que este tipo de fragmentos no se observó en otras paradas más que en la parada 7, y como este fragmento, en la misma, se observa con bajo redondeamiento y elongado (Figura 5.12), se asume que la fuente de sedimentos sería una cercana a este último, la cual sería el Complejo Plutónico Las Cabras.

Por lo tanto, un bloque de estas características, habría recorriendo aproximadamente 46 km en alguna de las crecidas, o en más de una crecida, que haya ocurrido en la Quebrada Los Choros, la cual habría vuelto a transportar el fragmento (Figura 5.13). Teniendo en cuenta que el fragmento presente en la parada 16 posee un volumen aproximado de $0,125 \text{ m}^3$, considerando una densidad aproximada de 2700 kg/m^3 (Kormar, 1987), este tendría un peso aproximado de $337,50 \text{ kg}$, el cual habría sido mayor aguas arriba. Estas características permiten deducir un gran potencial de transporte en tracción de las crecidas holocenas producidas en la zona de estudio, con un gran aporte sedimentario durante los eventos de crecida hacia el mar.



Figura 5.12 Fotografía fragmentos presentes en Parada 7 y fotografía de fragmento mayor ubicado en la desembocadura de la Quebrada Los Choros (parada 16). Ubicación en Figura 5.11.

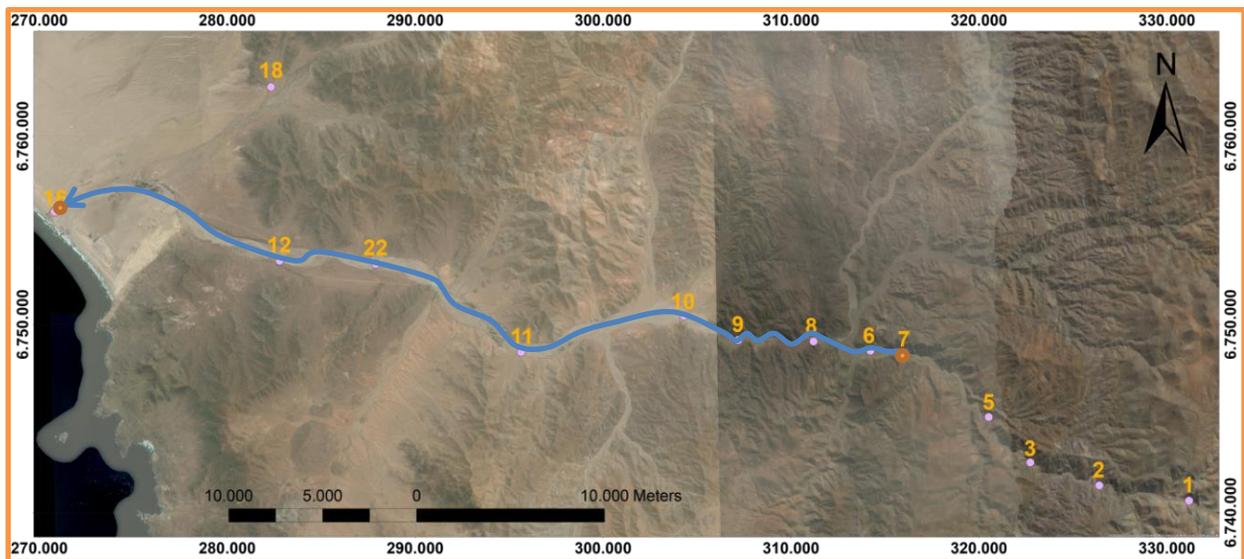


Figura 5.13 Trayecto recorrido por fragmento mayor encontrado en Parada 16, marcado con flecha azul. Puntos naranjas, marcan puntos de control donde se encontraron bloques de similares características macroscópicas (Paradas 16 y 7).

5.4.3 Diferencias entre análisis superficial y macro-granulométrico.

La Tabla 5.1 muestra los valores obtenidos a partir de análisis macro-granulométricos en cada una de las calicatas, y la información superficial que se recopilada durante la campaña de terreno en paradas correspondientes al sector donde se realizaron las primeras. Por lo general los bloques máximos observados en la superficie fueron de mayor tamaño que los analizados durante la realización de calicatas, mientras que los valores de la moda fueron por lo general menores, llegando a ser tres órdenes de magnitud menor.

Tabla 5.1. Diferencias entre datos obtenidos a partir de análisis macro-granulométrico y análisis sedimentológico superficial, se comparan calicatas con paradas correspondientes al punto donde se desarrollaron las primeras. En la tabla se compara diámetro de fragmento mayor y moda.

	Calicata 1	Parada 7
Máximo	203,2 mm	500 mm
Moda	4,76 mm	0,38±0,13 mm
	Calicata 2	Parada 10
Máximo	203,2 mm	450 mm
Moda	0,84 mm	0,19±0,06 mm
	Calicata 3	Parada 12
Máximo	203,2 mm	300 mm
Moda	19,03 mm	0,19±0,06 mm
	Calicata 4	Parada 16
Máximo	228,6 mm	250 mm
Moda	76,11 mm	0,38±0,13 mm

Es importante hacer notar en este punto que, mientras en el análisis macro-granulométrico (información de las calicatas en Tabla 5.1) se toman resultados obtenidos a partir del estudio del total de la muestra, tanto para máximo como para moda, en el análisis superficial la moda es solo correspondiente a la matriz de los punto de control, la cual se establece que la componen todos los fragmentos menores a 64 mm, por tanto no serían datos comparables. Por otro lado, los datos de fragmentos máximos del análisis superficial, no corresponden a los presentes en el *thalweg*, si no que a fragmentos que se encontraban en las cercanías de este, por lo que nuevamente no serían datos comparables.

5.4.4 Fuentes de incertidumbre del análisis macro-granulométrico

5.4.4.1 Método de toma de muestra

Al tomarse las muestra desde calicatas de 1 m³, sin distinguir entre distintos eventos de deposición, se debe tener en cuenta que los resultados reflejarían el promedio del medio de transporte de sedimentos a lo largo de la Quebrada Los Choros, más que una selección según modo de sedimentación de un flujo (Emery, 1978).

Un ejemplo de ello se produce en la calicata 4, donde en la cota 0,3 m se encuentran raicillas, lo que indicaría un incipiente desarrollo de suelo entre flujos, sin embargo, no se separó la muestra para hacer el análisis de macro-granulometría. Por otro lado, sí se separaron los últimos niveles, desde 0,8 m en adelante, los cuales están constituidos por

una capa de arcillas limosas, y finalmente por una capa de arena fina con arcillas y limo, cuyas características dan a entender que pertenecerían a otro tipo de ambiente, no correspondiente a los depósitos del flujo en evento de crecidas.

5.4.4.2 *Possible mal estado de las rejillas de tamizaje*

Al ver el histograma de rangos de tamaños, ver Figura 5.14, es fácil notar la ausencia de clastos en el rango de arena muy fina ($3,18 \Phi$ o $0,11 \text{ mm}$), a expensas de una concentración considerable en los rangos de tamaño aledaños, esto se podría deber a errores de arrastre producidos durante la toma de muestra o en el tratamiento de ellas, lo que conllevaría una menor precisión en los resultados obtenidos. Por lo que se recomienda tener precaución al considerar los datos expuestos en el presente análisis, produciéndose un punto de máxima curvatura erróneo en la curva de frecuencia acumulativa, con respecto al real, además de una sobre estimación de componentes de tamaño menor a $3,18 \Phi$, en este caso una mayor concentración, que la real de componentes de tamaño $3,84 \Phi$ ($0,07 \text{ mm}$ y menor).

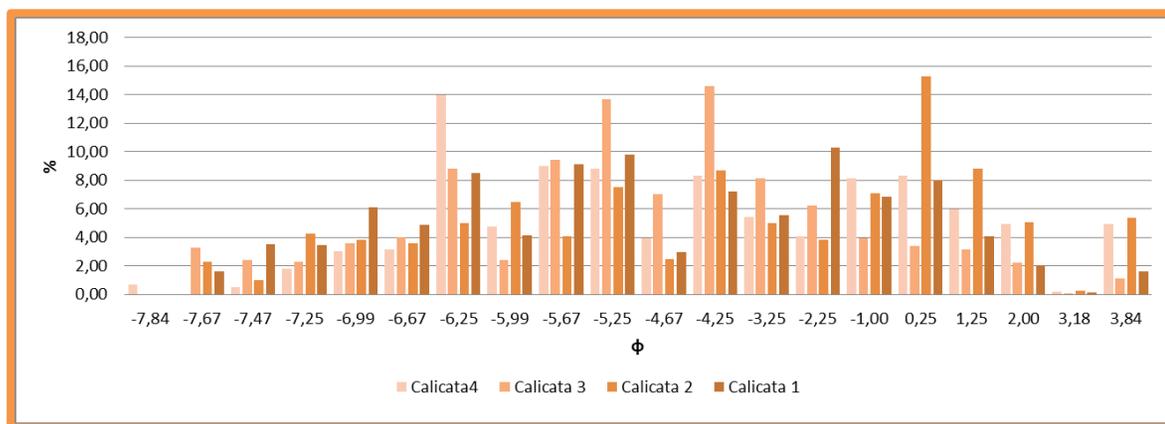


Figura 5.14 Histograma de rango de tamaños en escala de Φ , donde se puede notar la baja proporción en el tamaño $3,18 \Phi$, a expensas de la proporción en tamaños aledaños.

5.4.5 Rangos transportados por el flujo

Como se vio en la sección 3.2, se podría saber el modo de transporte, dentro de un flujo, de un cierto rango de tamaños, dependiendo de la geometría de la curva de frecuencia acumulativa, donde los puntos de mayor curvatura, en dichos gráficos, serán los límites de los tramos transportados por distintos modos, donde el material más grueso

será transportado por tracción, y el más fino en suspensión, entre medio, los fragmentos serán transportados en saltación.

Los límites de máxima curvatura fueron señalados en la sección 5.2, el primero no muy marcado cercano a $-5,25 \phi$ (38,05 mm), y el segundo marcado en 2ϕ (0,25 mm), lo que determinaría material compuesto principalmente por guijarros, transportados en tracción, un amplio rango de tamaños transportados en saltación, y material desde arena fina transportados en suspensión. Sin embargo, como se hizo notar en la sección 5.2 el comportamiento de las curvas de frecuencia acumulativa es bastante dispar a partir de $-4,25 \phi$, por tanto queda la duda si es que efectivamente son estos los rangos de transporte en saltación y suspensión, para despejar estas dudas se analiza según metodología de Sengupta *et al.* (1999) y Chatanantavet *et al.* (2013).

Según Sengupta *et al.* (1999) y Chatanantavet *et al.* (2013), las partículas transportadas por saltación y/o suspensión dentro de un flujo, constituyen histogramas unimodales, los cuales tienen *peaks* corridos uno respecto a otro, siendo el constituido por material de menor diámetro el transportado por suspensión, además señalan que estos histogramas se podrían superponer generando posibles *peaks* en tamaños donde el material es tanto transportado en suspensión, como en saltación. En la Figura 5.15 se muestra las posibles curvas de frecuencia para cada calicata y cada tipo de transporte (corrigiendo el potencial error según lo señalado en la sección 5.4.4.2), es así como se puede ver que las partículas transportadas en saltación tendrían una moda cercana a los $-4,25 \Phi$ (19,03 mm), constituida por grava fina, y material transportado en suspensión tendría una moda de $0,25 \Phi$ (0,84 mm), compuesto por arena media, entre ambas curvas existirían una superposición la cual sería variable a lo largo de la Quebrada Los Choros. Además existiría la posibilidad de que material mayor de $-5,25 \Phi$ haya sido transportado por saltación dentro del flujo.

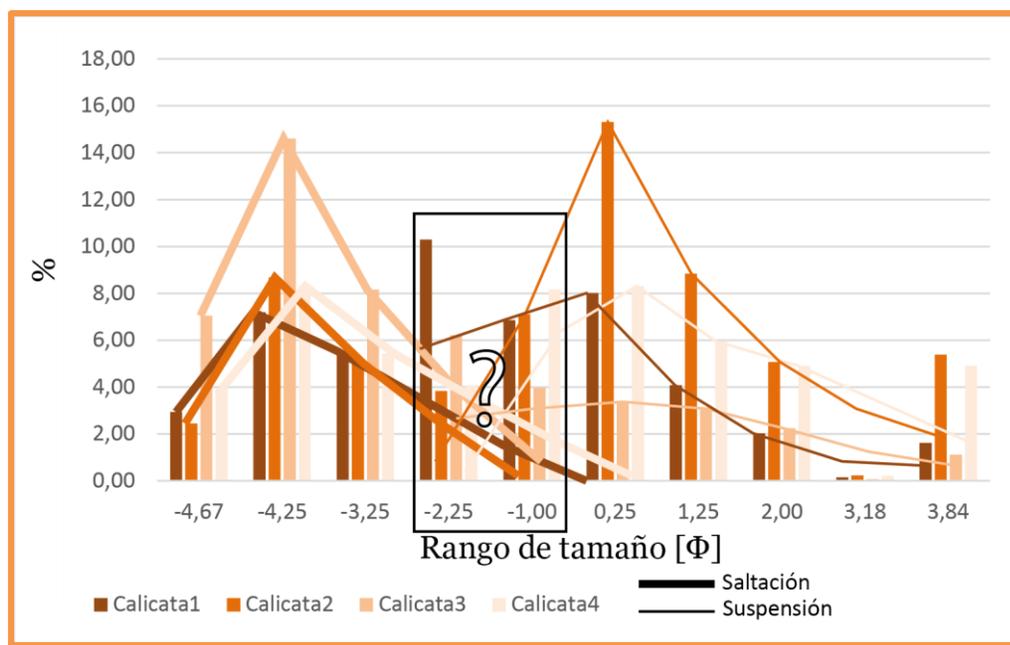


Figura 5.15 Histograma de material menor a $-4,67 \Phi$ (25,45 mm) de cada una de las calicatas. Se señalan las curvas de frecuencia unimodales, en línea gruesa, material transportado en saltación y en línea fina, material transportado en suspensión. Además se estimó cierto rango de material que pertenecería a $3,18 \Phi$, que no fue retenido en dicho tamiz.

Por lo tanto, el material transportado por suspensión, sería relativamente más grueso según lo estimado a través de la geometría de la curva de frecuencia acumulativa.

Según lo señalado en el presente apartado, el flujo que transporta el material, tendría una concentración relativamente alta debido a su capacidad para transportar guijarros, sin embargo esta no sería muy alta, la cual tendría una capacidad transportar un amplio rango de bloques mediante el choque entre partículas, según lo señalado por Inverson (1997). Por lo que los flujos que presenta la Quebrada Los Choros serían flujos dominados por la fase líquida.

5.4.6 Tipo de flujo

Dado que el flujo tendría una capacidad relativamente alta de transporte de sedimento, por tanto una densidad de sedimento relativamente alta, pero aún con una dinámica dominada por la fase líquida, en este caso agua, sumado a que el flujo no tendría un *peak* en el histograma demasiado grande, aunque con alta capacidad de arrastre, según lo estimado a partir de parámetros morfométricos (Ver sección 4.5.1). Además, dadas las características sedimentológicas de los depósitos, los cuales presentan estratificación

suave a masiva, con fragmentos subredondeados, conjuntamente una selección muy mala, sin cambios texturales abruptos, y dado que los depósitos se hacen relativamente más gruesos hacia la desembocadura, aumentando la moda a expensas de la media y mediana (ver sección 5.2). Se reunirían las características tanto texturales, (Suarez, 2009; USGS, 2005) como de densidad de partículas en el flujo (Suarez, 2009, Inverson 1997; Lavigne y Suwa, 2004) para ser catalogado como flujo hiperconcentrado granular, el cual, dada la baja proporción de material fino (menor al 20% del total de cada una de las muestras) sería no viscoso.

Los flujos hiperconcentrados, según lo descrito por Suarez (2009) poseen concentraciones entre 5 y 70 % de sedimentos, la cual es inferior a los flujos de detritos, pero superior al de una inundación. En este tipo de flujos el comportamiento está controlado por el agua, donde a mayor turbulencia hay mayor transporte de material grueso, que conforman depósitos con selección mala a muy mala, cambios texturales no abruptos, estratificación suave a masiva y material semi-consolidado.

5.4.7 Velocidad y Caudal

Dado que el flujo que transporta los sedimentos sería un flujo hiperconcentrado no viscoso, como fue analizado en la sección anterior (ver sección 5.4.6), se podría calcular su dinámica utilizando el modelo de Manning (Suarez, 2009), esta ecuación (Ver ecuación 2), permite estimar a velocidad de flujo o, en su defecto, el orden de magnitud del mismo, con este resultado se calcula posteriormente el caudal según la ecuación 3.

$$V = \frac{1}{n} \left(\frac{A}{P_h} \right)^{2/3} S^{1/2} \quad (2)$$

$$Q = VA \quad (3)$$

Donde,

V: Velocidad horizontal del flujo [m/s]

n: Número de rugosidad de Manning

A: Área de la sección [m²]

P_h: Perímetro húmedo [m]

S: Pendiente del *thalweg* [m/m]

Q: Caudal [m³/s]

Para calcular el número de rugosidad de Manning se ocupó la fórmula Cowan-Strickler (Chow, 1959), explicado en ANEXO L.

En La Figura 5.16 se muestra la ubicación de cada uno de los perfiles realizados para el cálculo de velocidad horizontal y caudal, estos perfiles son perpendiculares al *thalweg* y contienen los puntos donde se realizaron las calicatas; donde el perfil A corresponde a la calicata 4; perfil B, a la calicata 3; perfil C, a la calicata 2, y perfil D, a la calicata 1. En cada uno de estos perfiles se calcula la velocidad y caudal para tres niveles de agua, 0,5 m, la cual es cercana a la observada en marzo del 2015, 1 m y 2 m, los resultados obtenidos según la metodología previamente detallada se ilustran en la Figura 5.17.



Figura 5.16 Ubicación y orientación de perfiles para cálculo de velocidades y caudales ilustrados en la Figura 5.17

Los valores obtenidos tanto para la velocidad como para el caudal, serían valores mínimos, aunque de magnitud comparable, dado que el perímetro real sería mayor al obtenido mediante la imagen ASTER utilizada en el presente documento, de precisión de 30 m, además se utilizan valores conservadores en el cálculo de parámetros de rugosidad.

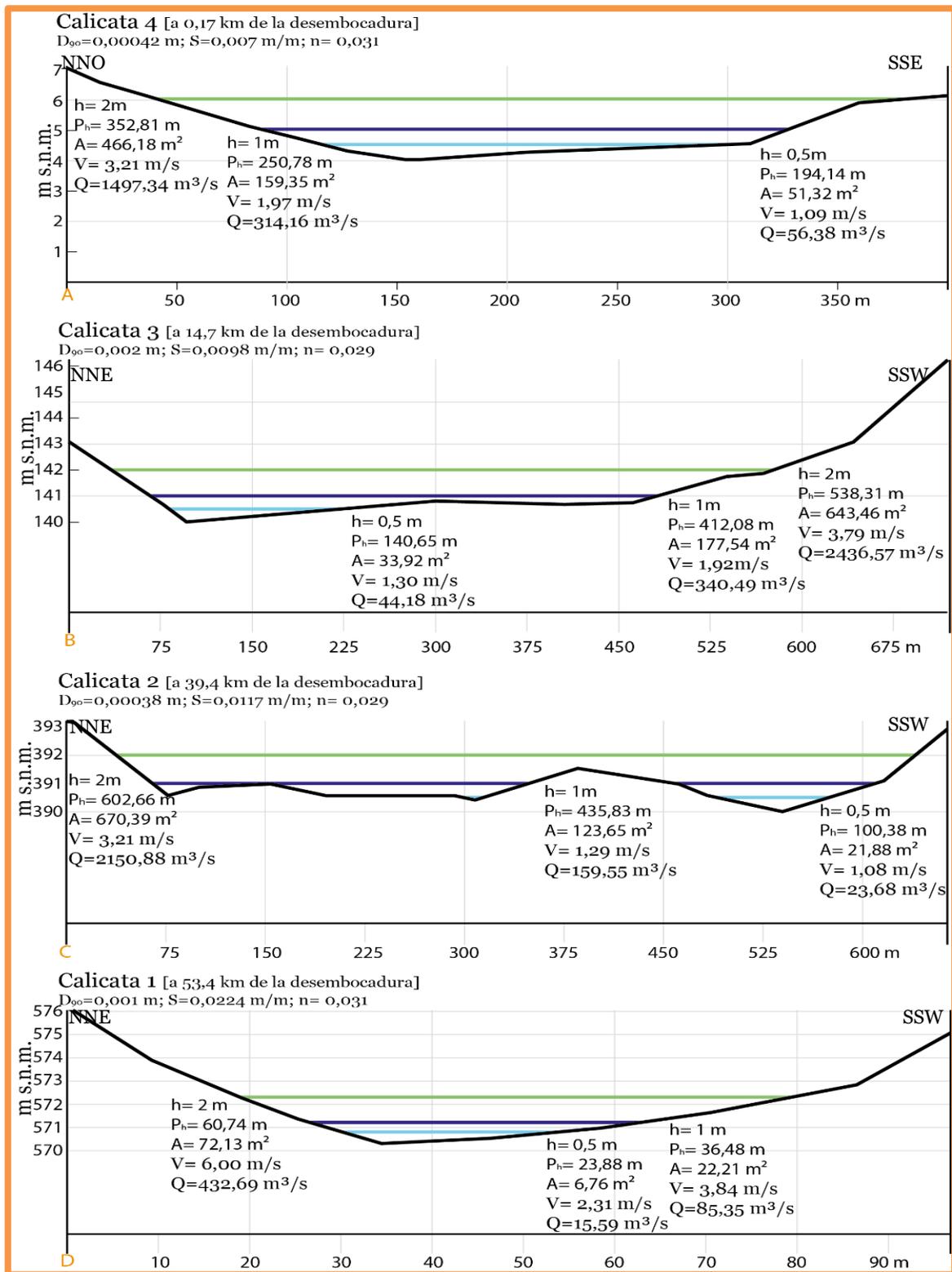


Figura 5.17 Perfiles del valle para cada calicata (número de la calicata se señala en la parte superior izquierda), para cada uno de los perfiles se señala su orientación, letra correspondiente en Figura 5.16, distancia de la calicata a la desembocadura, el valor de la rugosidad de Manning (n) y la pendiente (S), y para cada valor de nivel de agua (h), se señala el valor del perímetro húmedo (Ph), área (A), velocidad (V) y caudal (Q) estimados según la ecuación de Manning (1889).

5.4.8 Velocidad horizontal del flujo en evento 2015

Un video tomado por trabajadores del proyecto minero Dominga, cuya planta se encuentra en las cercanías de la confluencia de la Quebrada Choros Altos con la Quebrada Los Choros, muestra el movimiento del flujo registrado en marzo del 2015, el cual presenta una altura de agua de unos 45 cm, según lo analizado por el mismo video, este video fue tomado en el sector en que el camino que une la Ruta 5 con la localidad de Choros Bajos cruza la Quebrada Los Choros, siendo el mismo sector donde se realizó la calicata número 3 (perfil B en Figura 5.16 y Figura 5.17), el cual se puede encontrar en la cuenta de *Twitter* @ConoceDominga en la entrada del 25 de marzo del 2015, en la Figura 5.18 se puede observar una captura del mencionado video.

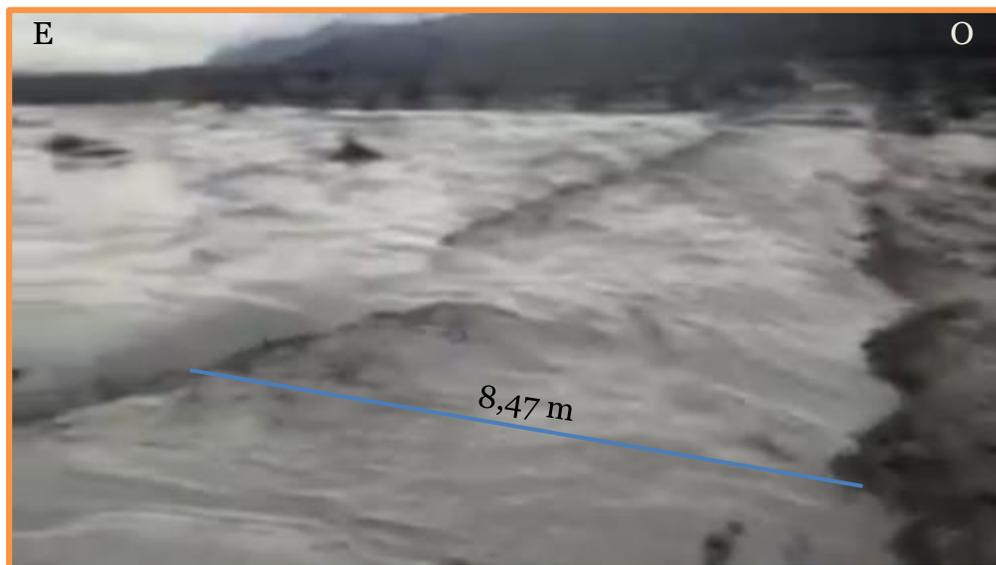


Figura 5.18 Captura de video donde se observa el avance del flujo registrado el 25 de marzo del 2015. Se muestra como el paso del flujo bloquea el camino que une la Ruta 5 Norte con la localidad de Choros Bajos, cuya medida se señala en la imagen. Fuente: cuenta *Twitter* @ConoceDomiga, entrada del 25 de marzo del 2015.

A partir del análisis digital de dicho video se estima una velocidad horizontal del flujo de $2,00 \pm 0,70$ m/s, calculado a partir del tiempo transcurrido en que un punto perteneciente al flujo recorre cierta distancia. Lo que probaría que los resultados obtenidos a partir de la ecuación de Manning, señalados en el apartado anterior (sección 5.4.7) son efectivamente comparables a los reales, donde se obtuvo un valor mínimo de 1,30 m/s, en el mismo sector, pero con una altura de agua de 0,5 m.

6 Composición petrográfica-mineralógica de las arenas de la cuenca de drenaje Los Choros y costa arenosa

6.1 Mineralogía y petrografía de depósitos actuales: asociación de minerales en sedimentos cuaternarios

Con el fin de establecer la dinámica de la porción fina de los sedimentos generados, se recolectaron trece muestras a lo largo de la Quebrada Los Choros, Quebrada Romero y complejos arenosos Choros Bajos y Punta de Choros, como fue señalado en la sección 3.3, de los cuales se seleccionaron nueve con el fin de homogeneizar la grilla de control a lo largo de la quebrada. Los resultados de los conteos modales se encuentran en el ANEXO I y sus fotomicrografías en el ANEXO F.

6.1.1 Petrografía y mineralogía de la Quebrada Los Choros

Como se puede observar en la Figura 6.1 los fragmentos monominerales de mayor abundancia a lo largo de la Quebrada Los Choros son el cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa, seguidos en menor medida por anfíbola. Mientras los fragmentos líticos de mayor abundancia son los graníticos, seguidos por los fragmentos constituidos por vidrio volcánico alterado a minerales opacos u opacos posiblemente monominerales, fragmentos dioríticos y fragmentos feldespáticos con alteración pervasiva a arcillas y micas blancas. Cabe señalar que a esta escala los clastos que se observan no muestran la totalidad de los cristales que lo componen, por tanto no es posible definir una clasificación certera dada una proporción inexacta de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa.

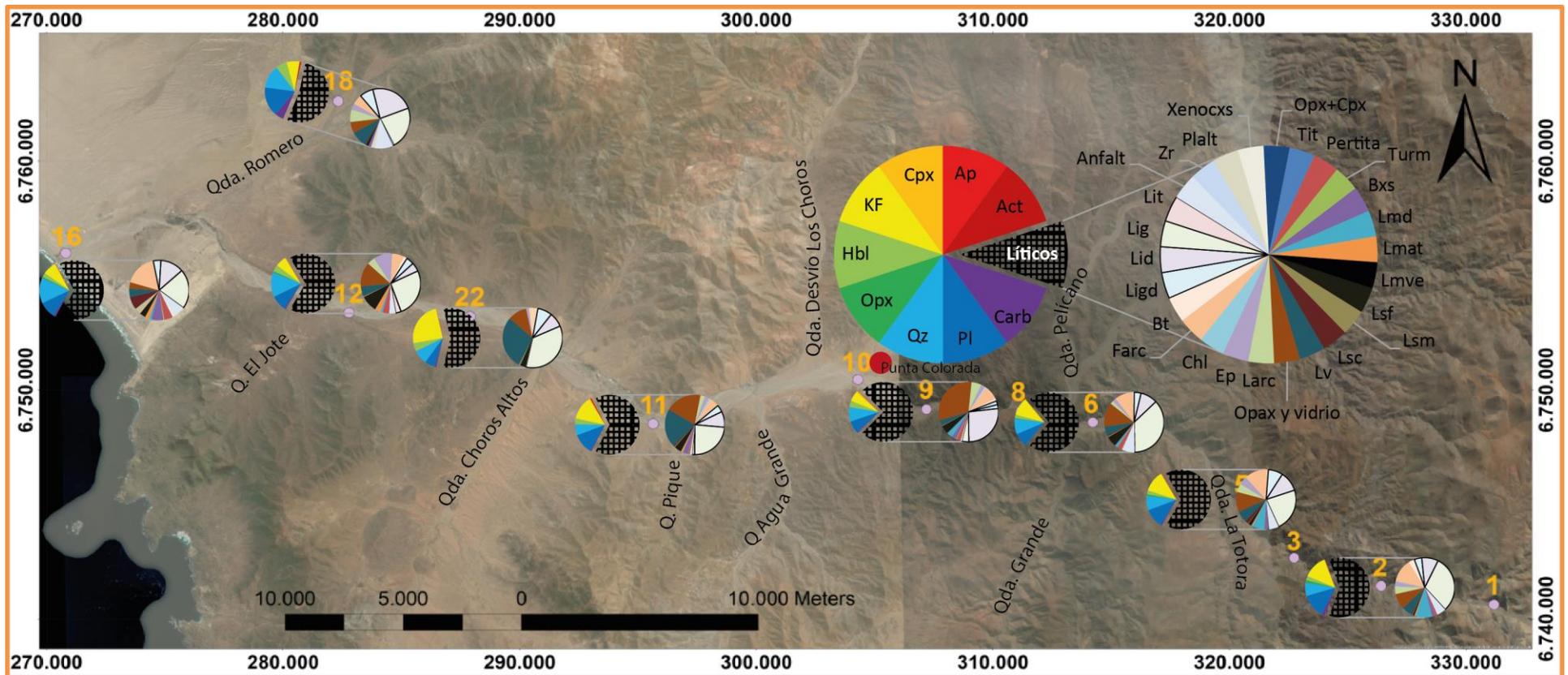


Figura 6.1 Mineralogía y petrografía de los puntos estudiados a lo largo de la Quebrada Los Choros. Arriba a la derecha junto con la orientación de la imagen satelital, se encuentra la simbología general. Carb: carbonatos, Pl: Plagioclasa, Qz: Cuarzo, Opx: ortopiroxeno, Hbl: anfíboles, KF: Feldespato potásico, Cpx: clinopiroxeno, Ap: apatito, Act: actinolita, Ligd: granodiorita, Lid: diorita, Lig: granito, Lit: tonalita, Anfalt: anfíbol alterado a opacos, Plalt: plagioclasas alteradas, Xenocxs: Xenocristales, Opax+Cpx: clinopiroxeno con lamelas de ortopiroxeno (o viceversa), tit: minerales alterados a titanita, Pertita, Turm: fragmentos alterados a turmalina, Bxs: textura brechosa, Lmd: fragmentos metamorfismo dinámico, Lmat: fragmentos metamorfismo de alta temperatura, Lmve: fragmentos metamorfismo facies esquistos verdes, Lsf: líticos sedimentarios finos, Lsm: líticos sedimentarios marinos, Lsc: líticos sedimentarios continentales, Lv: líticos volcánicos, Opaxyvidrio: fragmentos de minerales opacos reemplazando vidrio volcánico, Larc: arcillas, Ep: alteración epidótica, Chl: alteración clorítica, Farc: feldespatos alterados a arcillas, Bt: alteración biotítica. Detalle de la descripción de los distintos fragmentos detríticos en ANEXO G.

De oriente a poniente la abundancia relativa de estos fragmentos varía de la siguiente forma:

- Feldespato potásico disminuye su abundancia desde la cabecera hasta pasado la Quebrada Pelicano (punto de control 9 en Figura 6.1), donde tiene un aumento explosivo hacia la confluencia con la Quebrada Choros Altos, donde vuelve a disminuir y aumentar progresivamente hasta la desembocadura (Figura 6.1).
- Cuarzo, aumenta progresivamente a lo largo de la quebrada, aunque presenta un leve descenso entre las quebradas Pelicano y Choros Altos (Figura 6.1).
- Los cristales monocristalinos de plagioclasa, al igual que el feldespato potásico, presentan una disminución progresiva hasta pasada la confluencia de la con la quebrada Pelicano para luego presentar un *peak* en la confluencia con la Quebrada Choros Altos, y posteriormente volver a aumentar progresivamente hacia la desembocadura del sistema de drenaje (Figura 6.1).
- La anfíbola presenta un aumento progresivo hacia la confluencia con la Quebrada Choros Altos, donde presenta un *peak* y disminuye hacia la desembocadura (Figura 6.1).
- La epidota disminuye constantemente, exceptuando en el punto de control 12, pasada la confluencia con la Quebrada Choros Altos, donde luego disminuye hasta conformar un elemento traza dentro de la muestra de la desembocadura (Figura 6.1).
- Los fragmentos graníticos disminuyen hacia la confluencia con la Quebrada La Totorá para luego presentar un *peak* en las cercanías de la confluencia con las quebradas Grande y Pelicano, donde desciende su valor para luego mostrar un *peak* relativo en las cercanías a la confluencia con la Quebrada Choros Altos, desde donde disminuyen nuevamente (Figura 6.1).
- Los fragmentos de vidrio volcánico y opacos aumentan exponencialmente hasta las cercanías de la confluencia con la Quebrada Desvío los Choros (punto de muestro 9), para luego disminuir progresivamente hacia la desembocadura (Figura 6.1).

- La proporción de los líticos de composición diorítica no presentan un comportamiento continuo, si no que más bien varían su abundancia a lo largo de toda la quebrada (Figura 6.1).
- Los fragmentos extrusivos presentan una disminución relativa hacia la confluencia con la Quebrada Desvío Los Choros, para luego presentar un aumento abrupto entre la quebrada recién mencionada y Quebrada El Jote, donde nuevamente disminuye hacia la desembocadura (Figura 6.1).
- Por último, la abundancia de los fragmentos de feldespatos (indiferenciados entre plagioclasa y feldespato potásico) alterados a arcillas y micas blancas, presenta un comportamiento sinusoidal de baja amplitud a lo largo de la quebrada, aumentando relativamente hacia la confluencia con la quebrada La Totorá, para luego disminuir hacia la confluencia con la Quebrada Choros Altos, para volver a aumentar hacia la desembocadura, donde presenta su mayor concentración (Figura 6.1).

6.1.2 Línea de costa arenosa sector Punta de Choros – Choros Bajos

Junto a la desembocadura de la Quebrada Los Choros se encuentra una unidad de planicies litorales, definida por Castro y Brignardello (2005), las cuales se presentan antecedidas por una unidad de costa arenosa, descrita por el mismo autor, la cual cubre una superficie de 15 km de longitud y cerca de 800 m de ancho, compuesta por un litoral arenoso y campos de dunas.

Las dunas corresponden a depósitos clásticos de arena formados por la acción del viento que transporta el material y que moldea su forma. Estas arenas eólicas se acumulan en desiertos, líneas de costa y sobre planicies costeras dependiendo del suministro de arena y abundancia de vegetación de la cual se aferran. En el caso de dunas costeras, la parte más alejada del nivel supra mareal se puede cubrir con vegetación y constituir el núcleo de una acumulación de arena soplada por el viento desde el resto del supramareal, y así ir constituyendo un pequeño cordón dunar que, si sobrevive al próximo temporal, se irá afianzando. (Boggs, 2006; Nichols, 2009; Le Roux, 2012).

En la zona se tomaron cinco muestras de arenas correspondientes a la costa arenosa, dos en el sector Choros Bajos y tres en el sector Punta de Choros, tal como fue señalado en

la sección 3.3 (Figura 6.2). Los resultados de los conteos modales realizados a estas muestras se pueden observar en la Figura 6.2 (Resultado numérico en ANEXO I). Es importante mencionar, que el estudio de estos sedimentos se lleva a cabo con el único propósito de acotar el aporte de sedimentos desde la Quebrada Los Choros a ambos sectores del manto arenoso.

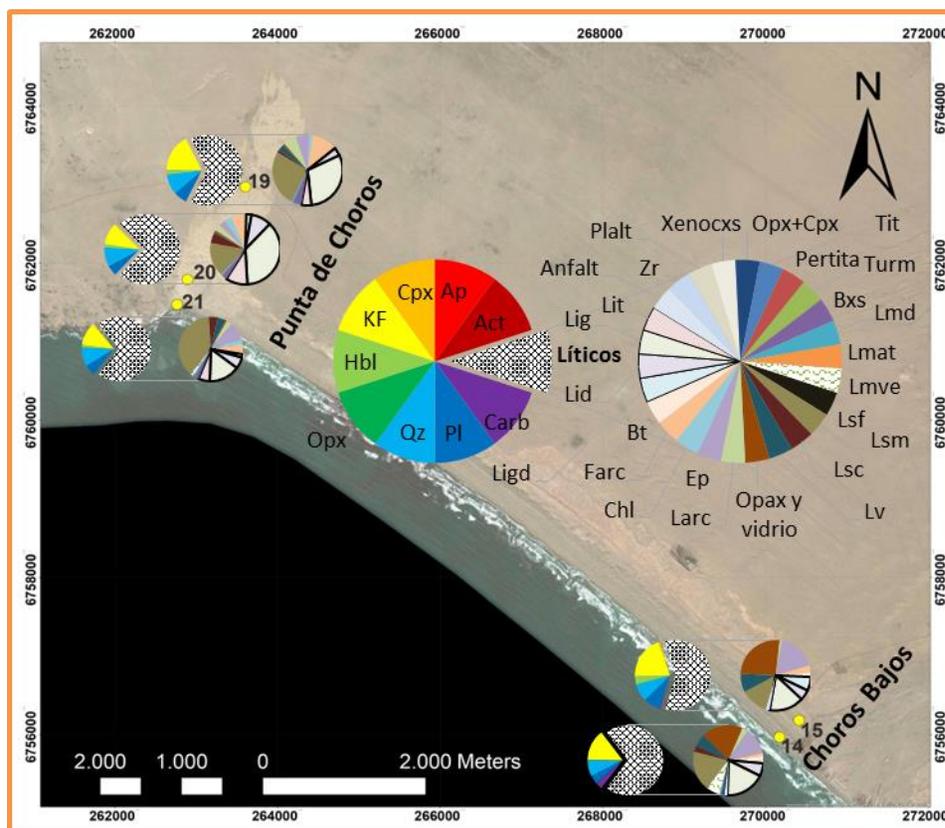


Figura 6.2 Mineralogía y petrografía de los puntos estudiados en los campos arenosos Choros Bajos (abajo a la derecha), y en el sector Punta de Choros (arriba a la izquierda). En la parte central se muestra la simbología, la cual es análoga a la de la Figura 6.3. Cpx: clinopiroxeno, Ap: apatito, Act: actinolita, Ligd: granodiorita, Lid: diorita, Lig: granito, Lit: tonalita, Anfalt: anfíbol alterado a opacos, Plalt: plagioclasas alteradas, Xenocxs: Xenocristales, Opx+Cpx: clinopiroxeno con lamelas de ortopiroxeno (o viceversa), tit: minerales alterados a titanita, Pertita, Turm: fragmentos alterados a turmalina, Bxs: textura brechosa, Lmd: fragmentos metamorfismo dinámico, Lmat: fragmentos metamorfismo de alta temperatura, Lmve: fragmentos metamorfismo facies esquistos verdes, Lsf: líticos sedimentarios finos, Lsm: líticos sedimentarios marinos, Lsc: líticos sedimentarios continentales, Lv: líticos volcánicos, Opaxyvidrio: fragmentos de minerales opacos reemplazando vidrio volcánico, Larc: arcillas, Ep: alteración epidótica, Chl: alteración clorítica, Farc: feldespatos alterados a arcillas, Bt: alteración biotítica. Detalle de la descripción de los distintos fragmentos detríticos en ANEXO G.

6.1.2.1 Manto arenoso sector Choros Bajos

Como se observa en la Figura 6.2, en este sector los fragmentos monominerales más abundantes corresponden al feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa y en menor proporción carbonatos, mientras que los fragmentos detríticos líticos (poliminerálico), corresponden a los fragmentos de minerales de óxido y hierros con vidrio volcánico, aunque en esta oportunidad, son principalmente de los primeros, seguido de los fragmentos graníticos, luego los líticos sedimentarios marinos, y por último los fragmentos con alteración epidótica, donde se incluye además la epidota policristalina. En menor proporción, se observan líticos volcánicos y dioríticos.

Mientras en su mayoría los fragmentos monomineralicos disminuyen hacia la costa, a expensas de los carbonatos. Los fragmentos líticos tienden a disminuir hacia el continente. Lo que no se cumple en el caso de los feldespatos alterados a arcillas, líticos con alteración epidótica, óxidos de Hierro y Titanio, y fragmentos volcánicos (Figura 6.2).

6.1.2.2 Manto arenoso sector Punta de Choros

Por otra parte, en el sector Punta de Choros (Figura 6.2), se cumple el mismo dominio de los minerales antes señalados, en orden de abundancia análogo. Los fragmentos líticos más abundante, esta vez son los líticos de composición granítica, seguido por los líticos sedimentarios marinos, con menor presencia de los líticos tonalíticos, dioríticos, feldespatos con alteración fuerte a arcillas y fragmentos con alteración epidótica, donde nuevamente abundan los fragmentos de epidota policristalina (Figura 6.2).

Los fragmentos monomineralicos tienen una ligera tendencia positiva, previa a una pequeña disminución en el punto de control 20, esto no se cumple para el caso del cuarzo y de la anfíbola, que disminuyen hacia el continente (Figura 6.2). Por su parte, los fragmentos líticos, de origen sedimentario, y plutónicos, tanto dioríticos como tonalíticos, tienen una tendencia a disminuir hacia el continente, mientras que los fragmentos graníticos, de alteración epidótica y feldespatos alterados, presentan un notorio aumento, donde se observan anomalías ya sean positivas o negativas en el punto 22 (Figura 6.2).

En las Figuras 6.4, 6.5 y 6.6, 6.7 se muestran los resultados de la metodología propuesta por Vezzoli (2007), con los respectivos valores del coeficiente de determinación (R^2) y similaridad (s).

En el punto de control 2, como se puede observar en la Figura 6.4 a) el mayor aporte de sedimentos provendría de la Formación El Peralta (Ep, en Figura 6.3), cercano al ~83,04%. Además de posibles aportes menores desde las formaciones Cerrillos miembro 1 (Ksc1 en Figura 6.3) y Complejo Plutónico Los Morros (Pallm en Figura 6.3), las cuales corresponderían a un 5,82% y 11,14%, respectivamente.

La posible proveniencia de sedimentos en el punto de control 5 (Figura 6.4 b)), sería mayoritariamente del punto de control 2, antes señalado, la que sería cercana al 84%, mientras que la Formación Cerrillos (Ksc1 y Ksc2 en Figura 6.3) y Complejo Plutónicos Las Cabras (Kslc, en Figura 6.3), tienen aportes del 3% y del 10%, respectivamente.

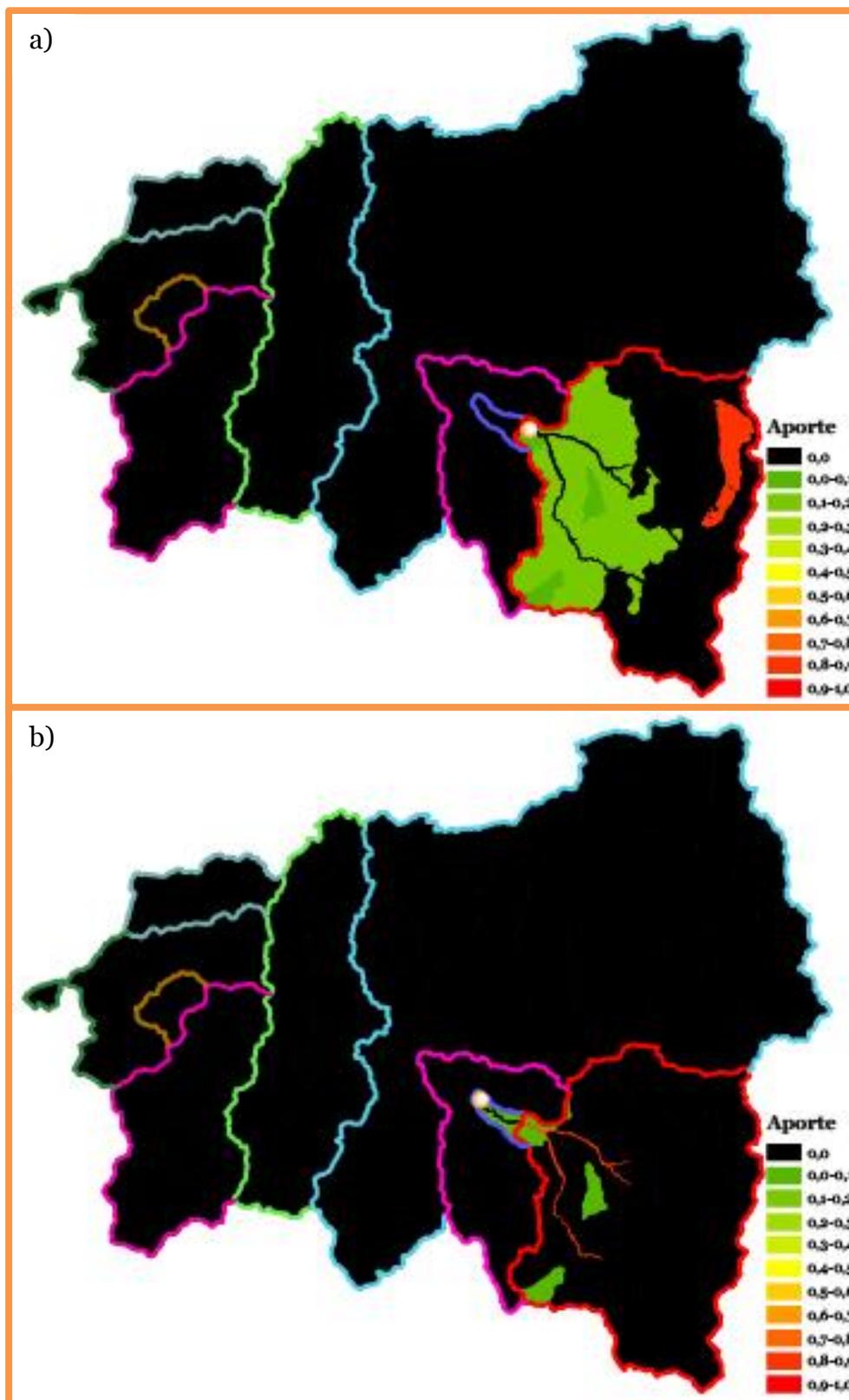


Figura 6.4 Probables fuentes de sedimentos a) Subcuenca 2 en Figura 6.3 (punto de control 2 en Figura 6.1); Factores de correlación: $R^2=41,25\%$ y $s=0,43$. b) Subcuenca 5 en Figura 6.3 (punto de control 5 en Figura 6.1); Factores de correlación: $R^2=95,17\%$, $s=0,73$.

Hacia el oriente de la confluencia con la Quebrada Pelicano, en el punto de control 6 (Figura 6.5 a)) el 100% de los sedimentos que lo constituyen provendría de aguas arriba desde el punto de control 2.

Luego, en el punto de control 9 (Figura 6.5 b)), hacia el este de la localidad de Punta Colorada, el 87% del aporte proviene posiblemente desde aguas arriba, principalmente desde el punto de control 6, seguida de un menor aporte probable de un 13% desde el sexto miembro de la Formación Punta del Cobre (JKpc6 en mapa fuera de texto).

En el punto de control 11 (Figura 6.6 a)), el 69% provendría de aguas arriba (de los cuales el 28% posiblemente proviene desde el punto de control 2, un 18%, desde el punto 9, un 17% desde el punto 5, y solo un 6% desde el punto 6), Mientras que el sexto miembro de la Formación Punta del Cobre 5 (JKpc6, en mapa fuera de texto) aportaría un 15%, los intrusivos hipabisales dacíticos (Kihd, en mapa fuera de texto), aportarían con un 8%, el quinto miembro de la Formación Punta del Cobre (JKpc5, en mapa fuera de texto) aportaría cerca de un 5%, la diorita Zapallar y (Kidz, en mapa fuera de texto) en conjunto con el Complejo Plutónico El Trapiche (Kiet), el 3% restante.

Aguas abajo, luego de la confluencia con la Quebrada Choros Altos, en el punto de control 22 (Figura 6.6 b)), el 100% de la fuente de sedimentos provendría de aguas arriba, donde probablemente el 91% proviene desde el punto 11, y un 9% provendría desde el punto 6.

Al Oriente de la confluencia de la quebrada principal con la Quebrada El Jote, en el punto de control 12 (Figura 6.7 a)), el 79% correspondería a sedimentos provenientes aguas arriba (42% desde el punto de control 9; 14%, desde el punto 6; 13% desde el punto 22, y un 10% desde el punto 5), el 14% corresponderían a fragmentos del Complejo Plutónico La Higuera, y el 6% desde el cuarto miembro de la Formación Punta del Cobre (JKpc4 en mapa fuera de texto)

Los sedimentos de la Quebrada Romero (Figura 6.7 b)), provendrían principalmente del Complejo Plutónico La Higuera (Kilh, en Figura 6.3), correspondiente al 83%, mientras que el 11% correspondería al quinto miembro de la Formación Punta del Cobre (JKpc5, en mapa fuera de texto), y el 7% corresponde al aporte del segundo y el tercer miembro de la Formación Punta del Cobre.

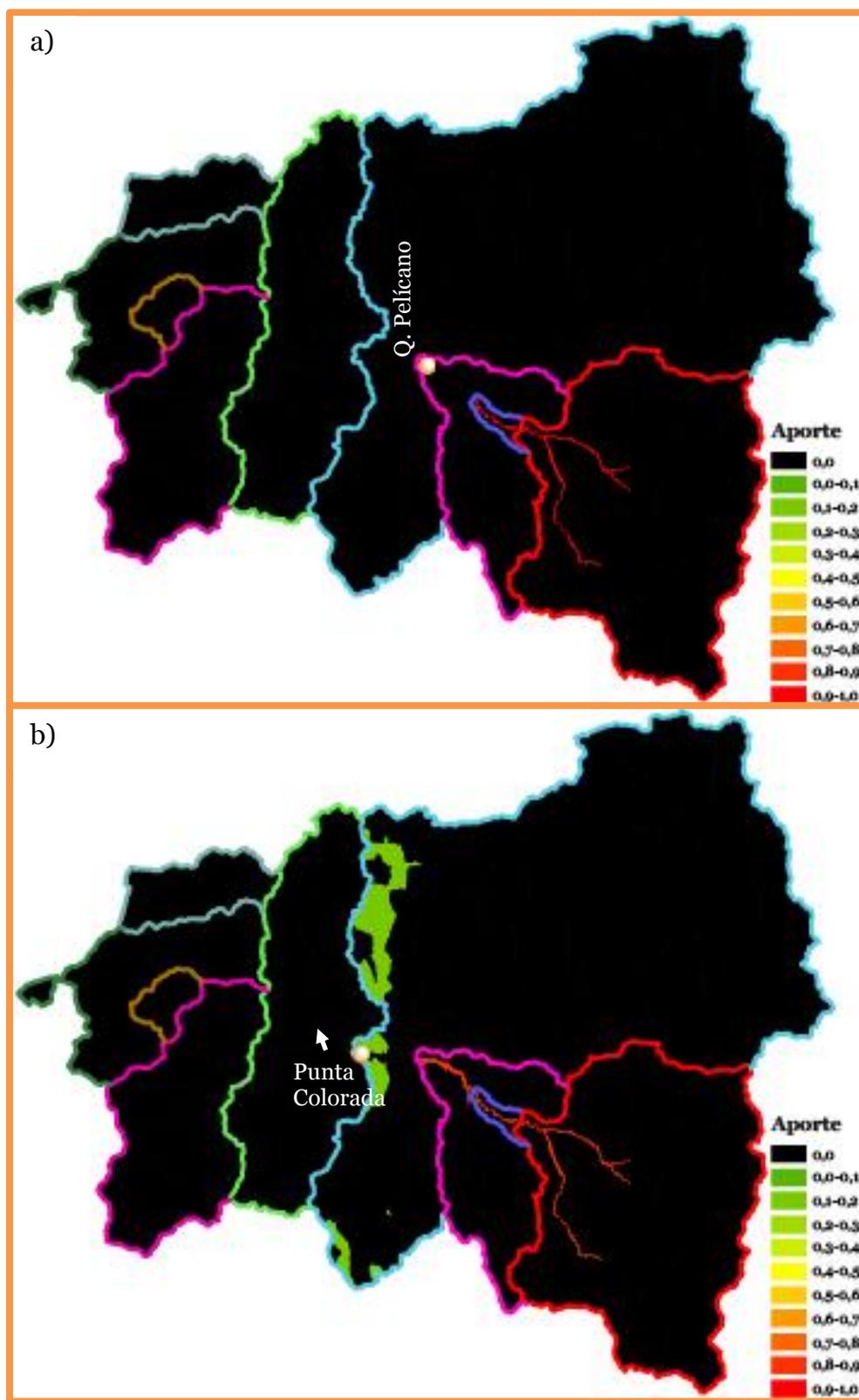


Figura 6.5 Probables fuentes de sedimentos a) Subcuenca 6 en Figura 6.3 (punto de control 6 en Figura 6.1); Factores de correlación: $R^2=75,1\%$ y $s= 0,35$. b) Subcuenca 9 en Figura 6.3 (punto de control 9 en Figura 6.1); Factores de correlación: $R^2 =65,52\%$, $s=0,61$.

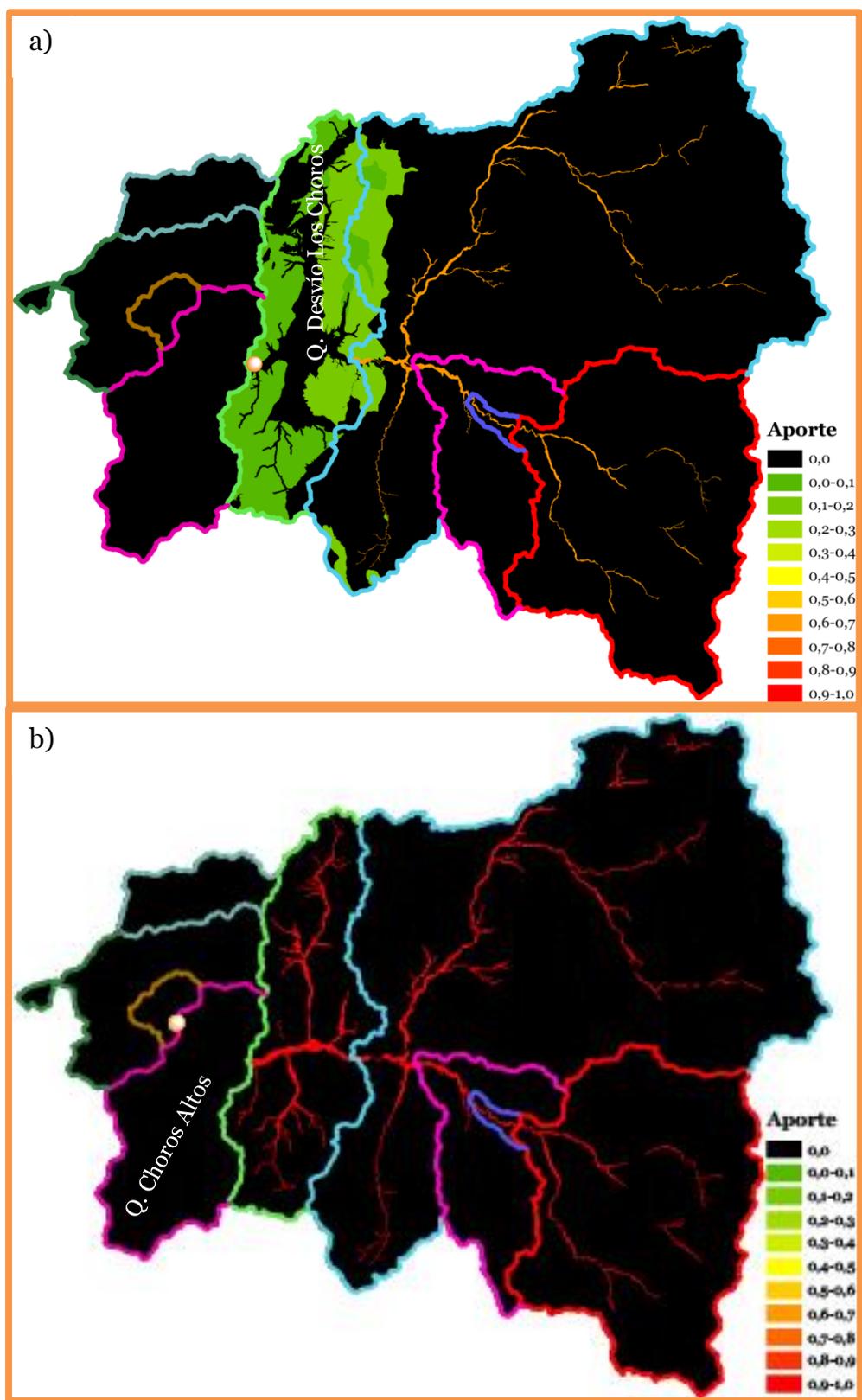


Figura 6.6 Probables fuentes de sedimentos. a) Subcuenca 11 en Figura 6.3 (punto de control 11 en Figura 6.1); Factores de correlación: $R^2 = 90,84\%$, $s=0,71$. b) Subcuenca 22 en Figura 6.3 (punto de control 22 en Figura 6.1); Factores de correlación: $R^2=62,38\%$, $s=0,45$.

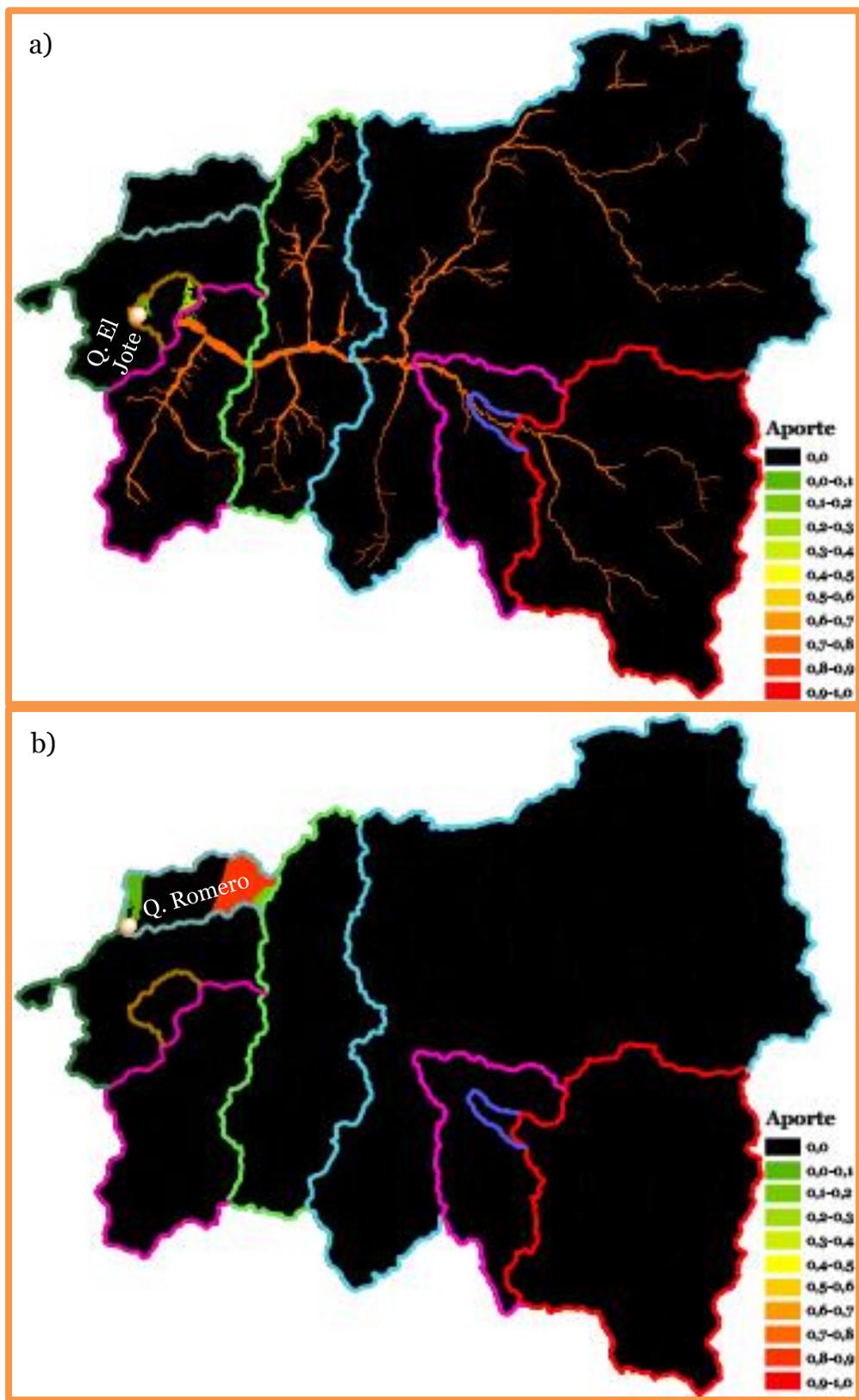


Figura 6.7 Probables fuente de sedimentos a) Subcuenca 12 en Figura 6.3 (punto de control 12 en Figura 6.1); Factores de correlación: $R^2 = 81,47\%$, $s=0,58$. b) Subcuenca 18 en Figura 6.3 (punto de control 18 en Figura 6.1); Factores de correlación: $R^2=64,66\%$, $s=0,54$.

En el punto de control 16 (Figura 6.8), correspondiente a los sedimentos de la desembocadura de la Quebrada Los Choros, el 24% de los sedimentos correspondería a los provenientes desde la Quebrada Romero, un 33%, los de aguas arriba desde el punto de control 12 y un 15% desde el punto 22, un 18% aportaría el Complejo Plutónico La Higuera (Kilh, en mapa fuera de texto), y el 11% correspondientes a los del primer miembro de la Formación Punta del Cobre (JKpc6, en mapa fuera de texto).

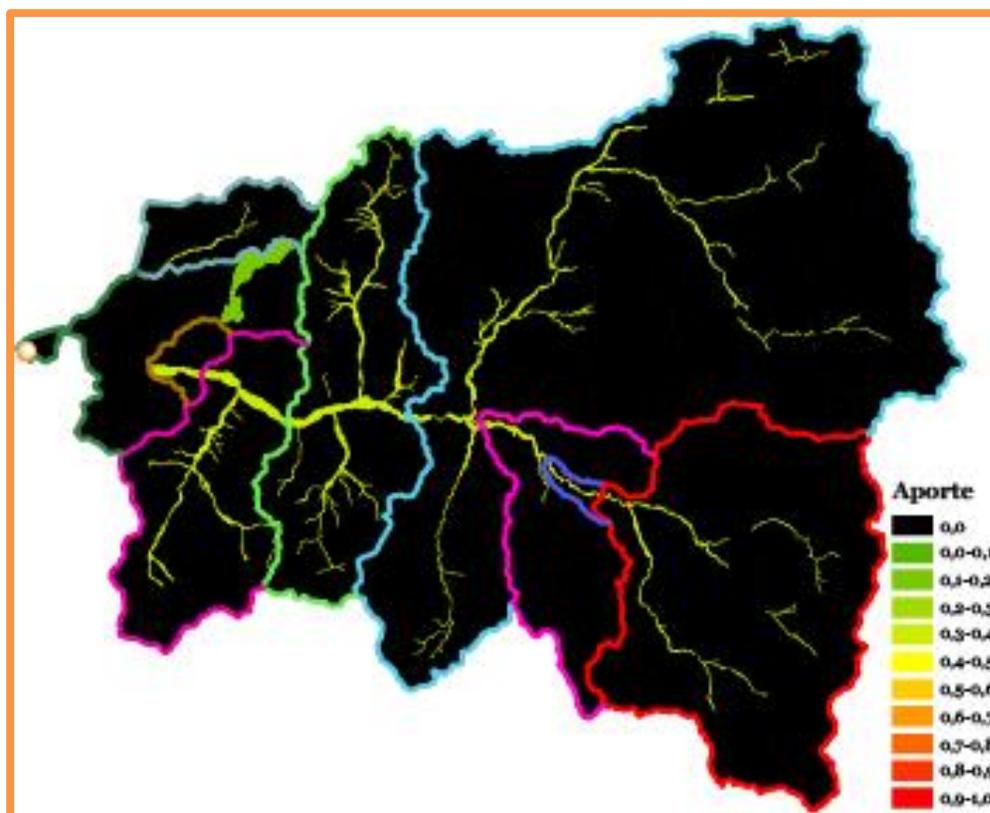


Figura 6.8 Probables fuente de sedimentos en el punto de control 16, desembocadura de la cuenca de drenaje Los Choros ($R^2=71,15\%$, $s=0,58$).

En la Figura 6.9 se muestra el aporte total más probable de todos los miembros terminales en la desembocadura (punto de control 16), donde se puede observar que todas las unidades anteriormente señaladas tendrían un aporte relativamente similar en la desembocadura. La situación generalizada para los puntos de control anteriores se encuentra en el ANEXO K.

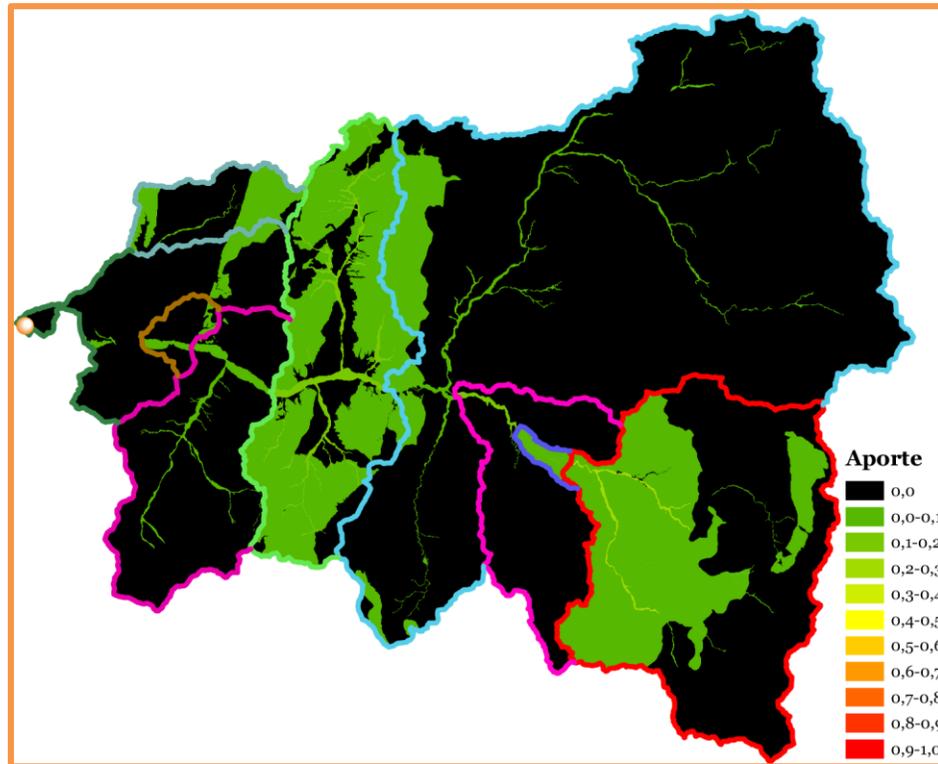


Figura 6.9 Probable aporte del total de los miembros terminales presentes en la cuenca de drenaje Los Choros a la desembocadura (punto de control 16).

6.2.2 Línea de costa arenosa

Se aplica la metodología de Vezzoli (2007), no para determinar las fuentes de sedimento, si no que para medir el aporte sedimentario desde la Quebrada Los Choros (medidos a partir de los sedimentos encontrados en la desembocadura), hacia los campos arenosos de los sectores Choros Bajos y Punta de Choros (Tabla 6.1).

Sin embargo, para ambos casos, tanto el coeficiente de determinación (R^2) y el de similitud (s), dan valores negativos, lo que no permite entregar un resultado certero. En la Tabla 6.1 se muestran los coeficientes de ajuste obtenidos para cada punto de control.

Tabla 6.1 Coeficientes de ajuste (R^2 y s) para los puntos de control correspondientes al manto arenoso costero, determinados según su similitud a los sedimentos pertenecientes a la desembocadura de la Quebrada Los Choros (punto de control 16)

Sector	Con respecto al punto de control 16	Coeficiente de determinación (R^2)	Coeficiente de Similitud (s)
<i>Choros</i>	Punto de control 14	-31,13%	-22,50
<i>Bajos</i>	Punto de muestreo 15	-10,91%	-19,13
<i>Punta</i>	Punto de control 19	-26,24	-24,19
<i>de</i>	Punto de control 20	-34,51	-21,46
<i>Choros</i>	Punto de control 21	-7,44	-24,28

6.3 Discusiones

6.3.1 Fuentes de incertidumbre de los resultados obtenidos

6.3.1.1 *Degradación de granos inestables*

En cuencas de alto relieve, se asume generalmente que la composición de los sedimentos corresponde fidedignamente a la mineralogía de las rocas parentales (Garzanti *et al.*, 2005). Sin embargo, la presencia de litologías de alta erodabilidad (e.g. rocas carbonatadas) y minerales inestables (e.g. feldespatos, calcita) dificultan su detección en los sedimentos a lo largo de la quebrada.

Prueba de la destrucción selectiva es la baja a nula proporción que existe en la parte alta de la Quebrada Los Choros de litologías como calizas, calcilutitas y lutitas, que provendrían del grupo Chañarcillo y de la Formación Bandurrias, esto a pesar de su alta presencia en el sector, aunque sí se encuentran sedimentos de estas características en la desembocadura del sistema de drenaje, los cuales se presume que provendrían del primer miembro de la Formación Punta del Cobre (JKpc1 en mapa fuera de texto), cuyos afloramientos se encuentran relativamente cercanos al punto de control petrográfico, recién señalado. Por lo que el aporte de estas unidades estaría subestimado.

Por otro lado, se utilizaron técnicas de reconocimiento minerales primarios ya alterados, con lo que se disminuiría el efecto de la alteración en silicatos.

6.3.1.2 *Distribución del tamaño de grano y selección*

Una fuente de incertidumbre importante en los cálculos de proveniencia es potencialmente causado tanto por el fraccionamiento de los granos, como por los procesos hidráulicos, tales como la concentración de minerales pesados en depósitos tipo placer o de micas en ambientes de baja energía (Morton y Hallsworth, 1999; Garzanti *et al.*, 2007).

La Quebrada Los Choros, presenta un fuerte carácter meándrico y trezado, como fue visto en la sección 4.3, producto de lo cual se podría producir una selección de minerales en la parte interna de los meandros, para evitar este tipo de problemas se tomaron muestras en la parte central del *thalweg*, sin embargo esto no garantiza la liberación de este tipo de incertidumbre. Por lo que podrían estar sobreestimados las

concentraciones de minerales pesados (como epidota, anfíboles, piroxenos y otros) aunque tiene menor presencia en la mayoría de las muestras.

6.3.1.3 Efecto de los cambios de transporte de sedimentos en temporadas de mayor escorrentía.

Como las muestras recolectadas fueron tomadas el 2013, luego de un largo período de sequía en la zona, y solo tomados desde la porción superficial del *thalweg*, los resultados no serían aplicables para eventos de crecida (Garzanti *et al.*, 2007) como los ocurridos en años en que se presenta el fenómeno “El Niño”.

6.3.1.4 Geología y topografía de la zona

Los problemas causados por las proyecciones topográficas en mapas geológicos, o por ambigüedades locales a la hora de definir la cuenca correspondiente a cada punto de control, pueden causar diferencias en la interpretación de los datos obtenidos (Amidon *et al.*, 2005, Garzanti *et al.*, 2007). En este estudio se eligen las cartas Estación Chañar-Junta de Chingoles y Carrizalillo- El Tofo (Creixell *et al.*, 2012 y 2013, respectivamente), ambas en escala 1:100.000, por el nivel de detalle, mucho más exhaustivos que otros mapas de la zona (Ej.: Moscoso *et al.*, 1982), y por complementar sus descripciones de unidades con descripciones petrográficas, que fueron utilizadas para establecer la composición de los miembros terminales (composición de miembros terminales en ANEXO H). Sin embargo, estas descripciones nunca comprenderán la amplia gama mineralógica y petrográfica que existe en cada formación. En este estudio, este punto genera alto nivel de incertidumbre sobre los resultados obtenidos.

6.3.1.5 Reciclaje de formas neógenas y terrazas marinas

Dada la presencia de formas neógenas se genera una incertidumbre producto de que no se tiene un registro de la mineralogía presente en estas unidades, por lo tanto no se tiene un catastro de las arenas producidas por este tipo de unidades, y no se cuantifican las arenas derivadas por la abrasión de las mismas.

Por ejemplo, luego de la erosión de la terraza marina y Formación Coquimbo presentes en la confluencia de la Quebrada Los Choros con la Quebrada Romero, produciría un aumento en el material calcáreo presente en las arenas aguas abajo, el cual se observa en el punto 16, pero en este caso se atribuyen a la contribución a la unidad rocosa con estas características presente en el sector, el primer miembro de la Formación Punta del Cobre (JKpc1 en mapa fuera de texto).

6.3.2 Control del substrato en la mineralogía y petrografía de las arenas de Quebrada Los Choros.

En la Figura 6.10 se muestra la variación de los porcentajes relativos de minerales en las diversas muestras tomadas en terreno, sobre una proyección horizontal de la Quebrada Los Choros, donde se extrapolan las diversas unidades correspondientes al substrato de la quebrada recién mencionada.

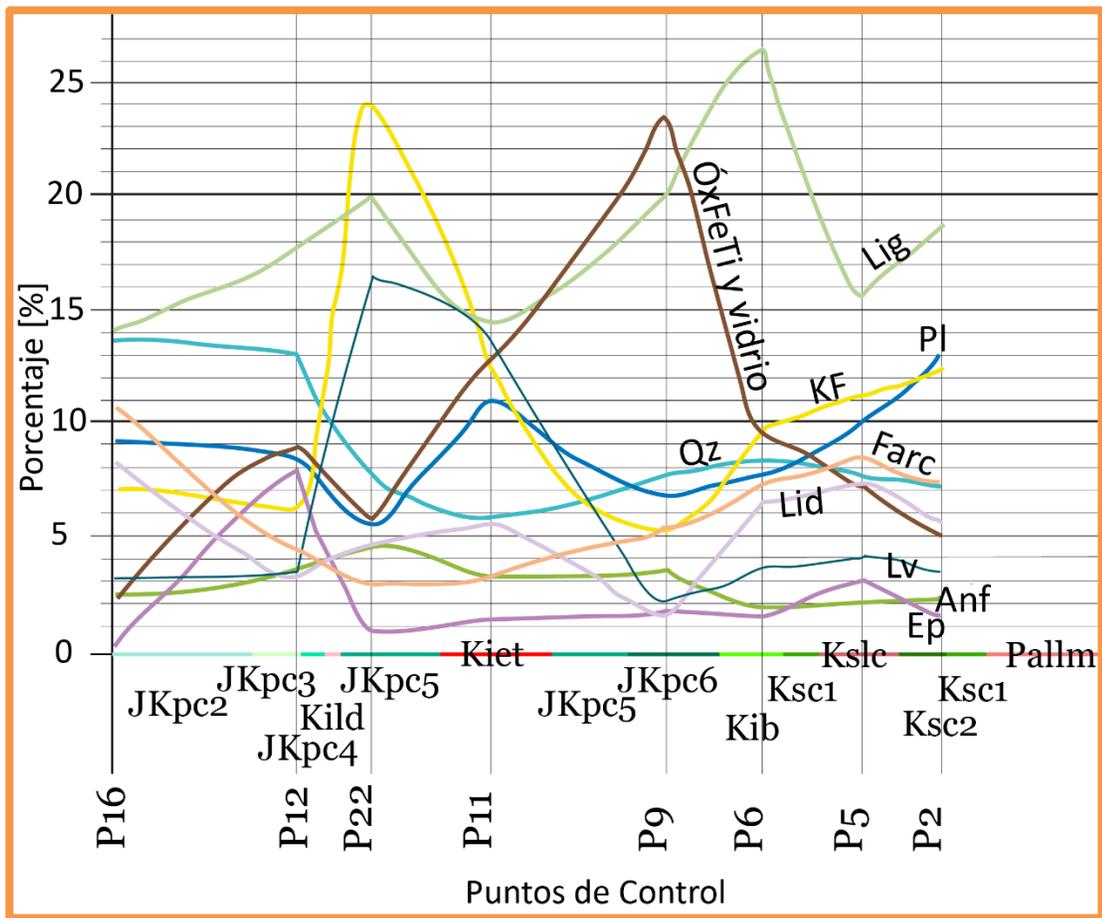


Figura 6.10 Gráfico de porcentaje de minerales y líticos de mayor abundancia versus litología del sustrato. El eje X corresponde a la proyección horizontal en dirección E – O, de la Quebrada Los Choros, donde se proyectaron los puntos de control, y las unidades del sustrato. La simbología de los fragmentos detríticos es análogo a la 6.1. Mientras que la simbología perteneciente a las litologías es análogo al mapa fuera de texto.

De la Figura 6.10, se puede observar que los líticos con mayor preponderancia en las arenas que constituyen el fondo de la Quebrada Los Choros son los líticos graníticos (Lig en Figura 6.10). Aquella misma figura (Figura 6.10) da cuenta de una notoria relación que existe entre el porcentaje relativo de los fragmentos graníticos, con la erosión de unidades intrusivas, donde existen aumentos importantes de concentración, una vez erodados los Complejos Plutónicos Las Cabras (Kslc en Figura 6.10 y mapa fuera de texto) y El Trapiche (Kiet en Figura 6.10 y mapa fuera de texto), y posiblemente se produce la misma situación luego de la erosión del Complejo Plutónico Los Morros (Pallm en Figura 6.10 y mapa fuera de texto). Además de esto, se puede observar como la concentración de estos elementos baja abruptamente, luego de estos *peaks*, lo que puede ser producto tanto de la

incorporación de nuevas litologías, como de la rápida fragmentación de estos líticos en los minerales que los componen.

La rápida fragmentación de los líticos graníticos (Lig en Figura 6.10), produciría un aumento considerable en las concentraciones de sus constituyentes (cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa; Qz, KF y Pl, respectivamente en Figura 6.10), como se puede observar en la Figura 6.10. Sin embargo, esta condición es poco notoria, para el cuarzo que muestra una depresión de concentración, luego del primer *peak* de líticos graníticos (aguas abajo de la erosión a Kslc en Figura 6.10 y mapa fuera de texto), donde se produce un claro aumento en las concentraciones de feldespato potásico y plagioclasa. El aumento notorio de cuarzo, sería aguas abajo de estos puntos, posterior (en sentido E-O) a la *peak* de concentración de los fragmentos graníticos, luego de erosionar Kiet (Figura 6.10).

Otra relación interesante de observar en la Figura 6.10 es la que existe entre los fragmentos detríticos ígneos extrusivos (Lv en Figura 6.10), con los compuestos por vidrio volcánico y óxido de hierro y titanio (ÓxFeTi y vidrio en Figura 6.10), la cual es inversa, donde un aumento de los últimos se genera junto a un disminución de los primeros, y viceversa. Hay que tener en cuenta que esta correlación podría estar sobrestimada producto de minerales opacos (óxidos de hierro y titanio) que no necesariamente se encuentran reemplazando vidrio volcánico, y que pueden estar alterados producto de la alta actividad minera que existente en el sector. Aun así, la relación es clara.

En la zona de estudio existen una serie de formaciones de origen principalmente volcánico, entre las cuales están la Formación Viñita (Ksv, aflora al este de Pallm como se puede ver en mapa fuera de texto), Formación Cerrillos (Ksc1 y Ksc2 en Figura 6.10), además del tercer y sexto miembro de la Formación Punta del Cobre (JKpc3, y JKpc6, respectivamente en Figura 6.10). La erosión de las formaciones Ksv y Ksc, aparentemente causarían un fuerte aumento del porcentaje relativo de los fragmentos compuestos por óxidos de hierro y titanio y vidrio volcánico, a expensas de los fragmentos extrusivos. Por otra parte, la erosión de unidades de la Formación Punta del Cobre, aportaría una mayor proporción de fragmentos extrusivos (Figura 6.10).

Los fragmentos con alteración epidótica (que incluyen fragmentos de epidota policristalina y monocristalina) tienen un comportamiento general al descenso, el cual

aumenta abruptamente, y de forma local, al interceptar con el tercer y cuarto miembro Formación Punta del Cobre (JKpc3 y JKpc4, respectivamente en Figura 6.10) unidades que presentan alteración epidótica, la que se observa de forma generalizada en la zona de estudio), pero en particular JKpc4 presenta abundantes skarns de epidota, en rocas que están principalmente constituidas por calcilutitas, por tanto tienen alta erodabilidad, y en consecuencia habría una mayor liberación de estos minerales (Figura 6.10). Por lo que provendrían principalmente de esta última unidad, la cual se encuentra en el mismo sector que el punto analizado. Lo que, además, implicaría una baja movilidad de sedimentos a estas alturas de la cuenca.

Por último, es importante notar el aumento que existe hacia la desembocadura, de los fragmentos detríticos constituidos por feldespatos indiferenciados alterados a arcillas (Farc en Figura 6.10), esto se podría deber a lo inestable que son estos minerales ante las condiciones ambiente, así un fragmento de feldespato potásico, que es liberado fresco desde la fuente de sedimentos, va alterándose progresivamente en el camino, llegando a ser indiferenciables en algún punto.

6.3.3 Homogeneización de los sedimentos aguas abajo

Muchos autores, entre ellos Ingersoll (1990), postulan que hay una homogeneización de los sedimentos aguas abajo, relacionado con la mezcla continua de sedimentos de diferentes proveniencias río abajo.

En la Quebrada Los Choros, esto solo se nota en las leves diferencias que existen entre los porcentajes de los distintos fragmentos detríticos entre el punto control en la desembocadura, y el punto de control inmediatamente al Este, punto 12 (Figura 6.10).

6.3.4 Poblaciones de proveniencia

Como se puede observar en las figuras obtenidas por la metodología de Vezzoli (2007), en la sección 6.2.1 (Figuras 6.4, 6.5, 6.6, 6.7 y 6,8), existen dos poblaciones de fuentes de sedimentos, una cercana, que por lo general tiene aportes menores al 10%, y otra lejana con aportes mayores al 25% (Figura 6.11).

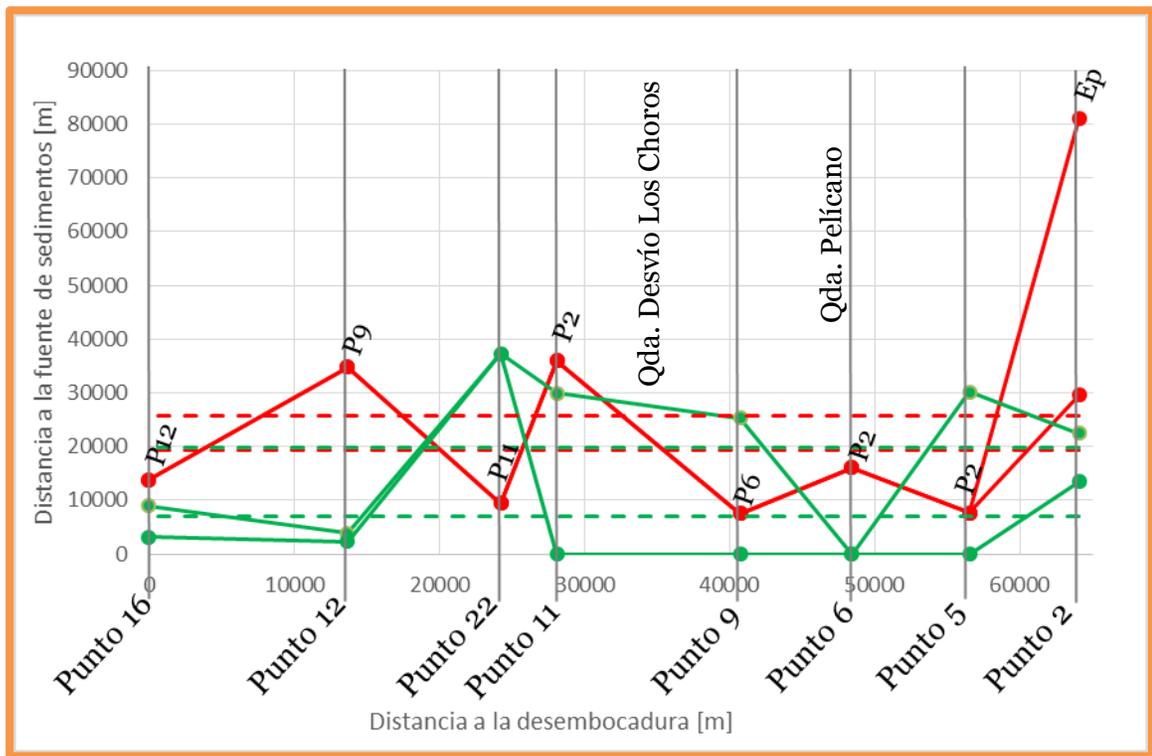


Figura 6.11 Gráfico distancia a la desembocadura versus distancia a la probable fuente de sedimentos. Se grafica la distancia mínima y máxima tanto para la fuente de mayor aporte sedimentario (en color rojo), como para la de menor (color verde). Con líneas delgadas se muestran las medias aritméticas para cada serie de datos. Se indica los puntos de confluencia de la quebrada principal con las quebradas Desvío Los Choros y Pelicano.

La primera población de posibles fuentes de sedimentos la constituyen rocas que afloran alrededor de los puntos de control, con la excepción del punto 22 la cual se compondría enteramente por sedimentos pertenecientes a la quebrada principal desde aguas arriba. La segunda población, la constituyen puntos de control aguas arriba (exceptuando el caso del punto de control 2, desde el cual no se analizaron sedimentos aguas arriba), por lo tanto sedimentos que desde un principio constituyen los sedimentos de fondo del valle.

Estas dos poblaciones de fragmentos detríticos constituirían fracciones transportadas por distintos ambientes; la primera de ellas sería de menor transporte, ya sea con o sin presencia de agua, el cual sería conformado por meteorización de roca *in situ*, o de muy baja movilización de sedimentos, donde no se descartaría que esta población de sedimentos fuese producida por la fragmentación de bloques mayores que se observan en el fondo de la quebrada, y que tendrían la misma composición que formaciones que circundan el punto de control (Ver sección 5.1). El segundo grupo estaría

conformado por fragmentos transportados desde aguas arriba a través del sistema fluvio-aluvial.

Esta situación se repite para puntos donde no se estudiaron sedimentos agua arriba, como son el punto 18 y punto 2, donde los mayores aportes de sedimentos son producto de la erosión y posterior transporte en un sistema fluvial de las unidades más orientales pertenecientes a estas sub-cuencas, y los aportes menores son producto de la meteorización de unidades cercanas, o la fragmentación de bloques presentes en el fondo.

A partir de la Figura 6.11 se puede notar que, los fragmentos que han sufrido poco transporte, se trasladarían en promedio unos 13 ± 6 km, aunque como es mencionado anteriormente, no se descarta que sean producto de la meteorización *in situ* tanto de fragmentos mayores presentes en el fondo de la quebrada, como de laderas aledañas a el punto de control, por lo que este número sería una distancia de transporte máxima. Por otro lado, los sedimentos transportados por el sistema fluvial, a través de la quebrada principal recorrerían una distancia mínima media de 23 ± 3 km, casi el doble de los primeros, aunque mucho menor al largo total de la Quebrada Los Choros.

6.3.5 Disminución de movilidad de sedimentos aguas abajo.

Como se puede observar en la Figura 6.11, desde el punto 11 y en dirección aguas arriba, el mayor aporte provendría desde el punto de control 2, lo que no sería el caso del punto 9 donde la mayor fuente de sedimentos provendrían desde el punto 6, sin embargo estos a su vez estarían compuestos en un 100% por arenas que transportadas desde el punto 2 (Ver sección 6.2.1). No obstante, aguas abajo ya no se observa esta situación, y la fuente principal de sedimentos sería los puntos de control anteriores a cada sector analizado, caso que no se repite para el punto de control 12. Esto implicaría una posible pérdida de movilidad de los sedimentos, donde la fuente de sedimentos pasa de ser una fuente “lejana” en la parte alta de la cuenca, a fuentes cercanas en partes bajas de la cuenca.

Esto estaría fuertemente regulado por la geomorfología del sector, como se señala en la sección 4.2 (Parámetros morfométricos), la pendiente pasa de 3,5% hacia el este de la Quebrada Pelicano a 2,5% hasta la Quebrada Desvío Los Choros, bajando a una media de

0,8% al oeste de la quebrada anteriormente señalada (ver ubicación de confluencias en Figura 6.11). Donde la disminución de la pendiente, implicaría una disminución de la energía cinética de los fragmentos transportados aguas abajo, favoreciéndose la deposición de la carga, sumado a una disminución del confinamiento donde el ancho de la quebrada aumenta de 307 m hacia el oriente de la confluencia con Quebrada Desvío Los Choros a 901 m inmediatamente al occidente de esta. Esta pérdida de movilidad, también se vería reflejada en la mayor presencia de formas aluviales desde Quebrada Pelicano hacia el oeste (ver mapa fuera de texto).

Sumado a lo anterior, esta situación se podría ver afectada por el aumento de las lluvias con la altura, lo que significaría un aumento de 0-34 mm de precipitación en un año promedio al occidente de la Quebrada Desvío Los Choros, a estar en un rango de 34-68mm al oriente de la misma (DGA, 2004).

6.3.6 Diferencias con resultados de sedimentología superficial

En la sección 5.4.2, se analiza el caso de un fragmento de tamaño bolón, el cual habría recorrido 46 km hasta el lugar donde se encuentra actualmente, este resultado contrasta fuertemente con los obtenidos por la presente metodología, donde los fragmentos de tamaño arena con mayor transporte recorrerían una distancia media de 23 km. Un flujo que tiene la capacidad de transportar en tracción un bolón dicha distancia, debería tener un gran potencial para transportar, tanto en suspensión como en saltación, fragmentos de tamaño arena, por lo que se deduce que ambas fracciones serían transportadas por distintos medios.

Mientras que el bolón presente en la desembocadura habría sido transportado por los distintos eventos de crecida, uno o más eventos, las arenas aquí estudiadas serían transportadas por evento fluvio-aluviales menores, característicos del gran período de relativa sequía que existió entre los años 1997 y 2014, la recolección de muestras fue realizada durante el año 2013. Por lo tanto, reflejarían el transporte de sedimentos durante épocas de aridez.

6.3.7 Contribución a manto arenoso

Como se ve en la sección 6.3.6, los parámetros de correlación para ambos sectores dan valores negativos, lo que en términos técnicos implicaría una relación inversa, entre las arenas presentes en la desembocadura de la quebrada, y los presentes en el manto arenosos. Sin embargo, para efectos prácticos esto sólo implicaría que dichos sedimentos no guardarían relación con los presentes tanto en el sector Choros Bajos, como en el sector Punta de Choros, por tanto el aporte de esta sería marginal o inexistente.

Otra opción posible, es que el aporte de la Quebrada Los Choros al manto arenoso costero no fuese homologable a una regresión lineal, como es la utilizada en el presente estudio.

7 Conclusiones generales

La cuenca de drenaje Los Choros se encuentra inserta en el sistema climático semiárido de Chile, presentando evidencias de acción fluvial y aluvial desde el Mioceno–Pleistoceno. Sus laderas están compuestas tanto por formaciones cristalinas como por secuencias volcánico-sedimentarias, las cuales se encuentran profusamente cubiertas por suelo residual, y solo en las cumbres más altas se observan laderas rocosas, debido a la mayor intensidad de procesos erosivos que allí se presentan.

Dados los parámetros morfométricos calculados en el presente trabajo, se puede concluir que la cuenca de drenaje Los Choros tiende a presentar crecidas de tipo valle, las cuales pueden ser lentas y continuas, teniendo la capacidad de concentrar un gran volumen de escurrimiento, por tanto tiene un alto potencial de erosión de sus laderas, si es que las condiciones ambientales son apropiadas. Esto último, a su vez, se ha visto reflejado en el registro geomorfológico, dada la presencia de distintos niveles aterrazados y disección de abanicos aluviales, los que también presentan incisión frontal.

Se han analizado los tipos de controles presentes en la zona de estudio, de lo cual se ha deducido que esta posee un control principalmente tectónico donde los distintos episodios de alzamiento han producido ondas de incisión, aumentando el ancho del valle de forma progresiva, donde la última onda de incisión se encuentra avanzando aún hacia el Oriente de la Quebrada Puquitos; seguido por un control estructural, encauzando los afluentes principales, además de limitar el avance de la cabecera hacia el Oriente, y por último un control litológico, el cual ha obligado a deformar la morfología idealmente recta del cauce principal, produciendo torsiones, siguiendo zonas de mayor erodabilidad, constituida por depósitos semiconsolidados.

Se ha determinado que la cuenca hidrográfica Los Choros estaría activa al menos desde el Mioceno Superior, en condiciones geométricas relativamente parecidas a las actuales, existiendo una herencia geomorfológica, dada la presencia de las formas neógenas, correspondientes a la Formación Confluencia, con sus facies aluvial y fluvial, y la Formación Coquimbo, en su interacción de la cuenca con el mar, reflejando que la cuenca de drenaje ha tenido una relación con el océano desde el Mioceno. Además, se

puede observar que se está produciendo un ensanchamiento de la Quebrada Los Choros Altos, donde, debido al control estructural, facies aluviales se han generado cada vez más hacia el Este.

Se establece que durante el Pleistoceno y Holoceno existieron al menos 4 eventos de alzamiento, a los ~480, ~430, ~330 y ~6 ka, estudiados por Le Roux *et al.* (2005a), formando respectivamente los niveles de terraza T4, T3, T2 y T1. En los últimos ~13 ka se registra un período de extrema sequía con respecto al período anterior, producto de lo cual se formaría la extensa cobertura de suelo residual presente en las laderas, la formación de una barrera frontal y la Laguna Boca Los Choros, y, producto de esta misma situación, baja progresivamente el nivel freático que alimentaba la cuenca Los Choros. En la historia reciente se tiene registro que en 1947 la Quebrada Los Choros deja de tener escorrentía superficial permanente, momento desde el cual solo presenta flujos durante eventos pluviométricos de características torrenciales, donde el registrado durante el año 1997 habría generado el nivel de incisión t_0 , y los escarpes que lo separan de t' . El último evento producido durante el mes de marzo del presente año, habría generado un nuevo nivel de incisión, el cual no se registró en el presente estudio, debido a que la salida a terreno fue previa a dicho evento.

Mediante curvas macro-granulométricas y análisis de variación de tamaños máximos a lo largo del valle principal de la zona de estudio, enfocándose en el estudio del valle principal, la Quebrada Los Choros, se estableció que durante los eventos de crecida, existe una carga en tracción que, en general, abarca tamaños mayores a 25,9 mm; luego, la carga en suspensión sería entre valores cercanos a este y aproximadamente 2 mm, partículas menores se trasladarán en suspensión. En consecuencia de esto, se deduce que el flujo que transportaría los sedimentos durante eventos pluviométricos mayores poseería una concentración de sedimentos relativamente alta, esto sumado a que los depósitos se hacen relativamente más gruesos hacia la desembocadura y que los depósitos tienen una estructura más bien homogénea y de mala selección, se deduce que los flujos responsables del transporte de sedimentos sería del tipo hiperconcentrado, a partir de lo cual se pudo calcular las posibles velocidades de los flujos, según distintas alturas de agua, las cuales coinciden con las registradas durante el evento de marzo del 2015.

Dadas las observaciones sedimentológicas, la Quebrada Los Choros poseería un gran potencial de transporte en tracción de material, durante las crecidas holocenas, debido a esto se estima, a su vez, una gran potencial de transporte en saltación y suspensión hacia la desembocadura de la quebrada, aportando un gran volumen de sedimento hacia el mar.

Y, por último, a partir de los resultados de proveniencia, se determina que existen dos tipos de fuentes de sedimentos en cada punto analizado, una cercana, donde el transporte sería incipiente de carácter coluvial o aluvial, y otro lejano, donde el transporte promedio sería de unos 20 km, el cual sería principalmente en un medio fluvio-aluvial, dadas las características holocenas de la Quebrada Los Choros, estos resultados no serían homologables a un evento de crecida, esto explicaría las diferencias encontradas por este método y a través de herramientas sedimentológicas de fragmentos mayores.

Existiría una disminución de la movilidad de sedimentos finos aguas abajo, donde la confluencia con la Quebrada Desvío Los Choros, sería un punto de inflexión entre transporte de mayor y menor alcance. Esto estaría regulado por la disminución de pendiente, el ensanchamiento de la quebrada y el aumento precipitaciones con la altura. A partir de la misma, también se producirían diferencia encontradas en el registro de sedimentos de mayor tamaño, puntos desde el cual los bloques mayores presentes en el valle disminuirían su tamaño progresivamente.

No existiría correlación entre los sedimentos producidos a lo largo de la quebrada, con los presentes en el manto arenoso, tanto en el sector Choros Bajos, como en el sector Punta de Choros.

8 Recomendaciones

- Hacer un estudio estratigráfico y sedimentológico acabado de las terrazas presentes al este de la confluencia con las quebradas Pelicano y Agua Grande, encontrar superficies correlacionables con estas hacia el oeste de dicha confluencia y hacer dataciones en los depósitos, para correlacionar de mejor manera con eventos de concentración pluvial. Con estos resultados, también sería posible correlacionar estos eventos con los eventos de avance glacial estudiados para el río Huasco y Elqui (Aguilar, 2010).
- Generar curvas granulométricas que diferencien el material de la coraza con el material que se presenta bajo de él, así como hacer un estudio sedimentológico a detalle para evaluar los depósitos de las distintas crecidas, y determinar los tramos para los distintos tipos de transporte, respectivos a cada flujo de escorrentía.
- Tener precaución al considerar los datos obtenidos dados los factores de incertidumbre detallados en cada sección.
- Generar transectas de alta resolución del valle para encontrar superficies correlacionables a lo largo de la quebrada.
- Estudiar la mineralogía de la porción fina de niveles donde se haya explícitamente diferenciado los depósitos de crecidas mayores, para así acotar con precisión la dinámica de los sedimentos finos en este tipo de eventos. Así como estudiar los sedimentos transportados durante el evento de escorrentía del presente año.
- Hacer un estudio petrográfico detallado del fragmento ubicado en la parada 16, con posible proveniencia de las cercanías de la parada 7 para corroborar dicho supuesto.

9 Bibliografía

- Aguilar, A. 2010. Erosión y transporte de materia en la vertiente occidental de los Andes semiáridos del Norte de Chile (27°-32°S): desde un enfoque a gran escala temporal y espacial, hasta la evolución cuaternaria de un sistema fluvial. *Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias de la Tierra y el grado de Doctor en Ciencias, mención Geología, Université de Toulouse Paul Sabatier ; Universidad Católica del Norte.* p.
- Aguirre, L., Egert, E. 1962. Las formaciones manganesíferas de la región de Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo. *Minerales.* N°76, p. 25-37.
- Aguirre, L. 1967. Geología de las islas Choros y Damas y de Punta de Choros, Provincia de Coquimbo. *Minerales,* Vol. 22, N° 96-97, p. 73-83.
- Alpers, C., Brimhal, G. 1988. Middle Miocene climatic change in the Atacama Desert, northern Chile: Evidence from supergene mineralization at La Escondida. *Geological Society of America Bulletin.* Vol. 100, N° 10, p. 1640-1656.
- Amidon, W., Burbank, D., Gehrels, G. 2005. Construction of detrital mineral populations: insights from mixing of U-Pb zircon ages in Himalayan Rivers. *Basin Research.* N° 17, p. 463-485.
- Antonioletti, R., Schneider, H., Borcosque, J.L., Zarate, E. 1972. Características climáticas del Norte Chico (26° a 33° latitud sur). Instituto de Investigación de Recursos Naturales. p. 102.
- Arévalo, C., Creixell, C. 2010. Geología del área Cruz Grande-Junta de Chingoles. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-10-40: p. 133, 6 mapas escala 1:50.000.
- Arévalo, C, Grocott, J, Welkner, D. 2003. The Atacama Fault System in the Huasco Province, Southern Atacama Desert, Chile. En: Congreso Geológico Chileno, N°10, Actas, CD-ROM.
- Arévalo, C., Mourgues, F.A., Chávez, R. 2009. Carta Vallenar-Domeyko. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Básica 120: 64p, 1 mapa escala 1:100.000.
- Ayala, Cabrera y Asociado LTDA. 2006. Análisis y evaluación de acuíferos de las cuencas de los ríos Los Choros y Huatulame. Dirección General de Aguas.
- Barrera, D., Presutti, M., Rosatto, H. [s.a.]. El perímetro de una cuenca hídrica: su tratamiento objetivo en la definición de índices geomorfológicos. Universidad de Buenos Aires.

- Benado, D.E. 2000. Estructuras y estratigrafía básica de terrazas marinas en sector costero de Altos de Talinay y Bahía Tongoy: Implicancia neotectónica. *Memoria, Universidad de Chile*. p. 78.
- Blight G.E. 2012. Mechanics of residual soils. Ed: Leong, E. *CRC Press*, p. 237.
- Boggs, S. 2006. Principles of Sedimentology and Stratigraphy (Cuarta Edición). Newsey: Prentice Hall.
- Campos, A. 1992. Proceso del Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 2ª. Ed. San Luis Potosí, México. p. 33-34.
- Carlston, C. W. 1963. Drainage Density and Streamflow. *U.S. Geology Survey Professional Paper*. 442C.
- Castro, C., Brignardello, L. 2005. Geomorfología aplicada a la ordenación territorial de litorales arenosos. Orientaciones para la protección, usos y aprovechamiento sustentables del sector de Los Choros, comuna de La Higuera, IV Región.
- Cembrano, J., Zentilli, M., Grist, A., Yáñez, G. 2003. Nuevas edades de trazas de fisión para Chile Central (30°-34°S): Implicancias en el alzamiento y exhumación de los Andes desde el Cretácico. En: Congreso Geológico Chileno, N°10, CD ROM. Concepción.
- Charrier, R., Bustamante, M., Comte, D., Elgueta, S., Flynn, J., Iturra, N., Muñoz, N., Pardo, M., Thiele, R., Wyss, A.R. 2005. The Abanico Extensional Basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion, and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abh.* N° 236 (1-2), p. 43-77.
- Chatanantavet, P., Whipple, K. X., Adams, M. A., Lamb, M.P. 2013. Experimental study on coarse grain saltation dynamics in bedrocks channels. *Journal of geophysical research: Earth surface*, V° 118, p. 1-16.
- Chorley, R.J. 1969. The drainage basin as the fundamental geomorphic unit. En: Chorley, R.J. (Ed.). *Introduction to Physical Hydrology*, Londres, Methuen, p. 37-59.
- ConoceDominga. 2015. Video crecida de Quebrada Los Choros [video digital]. [En línea] <https://twitter.com/conocedominga> [consulta: 25 marzo 2015]. Choros Bajos, Chile. 20 seg. , sonido, color. 13,15 x 7,36 cm.
- Creixell, C., Labbé, M., Arévalo, C., Salazar, E. 2013. Geología del área Estación Chañar-Junta de Chingoles, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica N°. 150, 1 mapa escala 1:100000.

- Creixell, C., Ortiz, M., Arévalo, C. 2012. Geología del área Carrizalillo-El Tofo, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica Nos. 133 y 134, 1 mapa escala 1:100000.
- Custodio, E.; Lamás, M. 1996. Hidrología subterránea. Ediciones Omega S.A., Segunda edición Barcelona, España.
- Dediós, P. 1967. Cuadrángulo Vicuña, Provincia de Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas. Carta Geológica de Chile, N°16, p. 65.
- Delouis, B., Philip, H., Dorbath, L., Cisternas, A. 1998. Recent crustal deformation in the Antofagasta region (northern Chile) and the subduction process. *Geophysical Journal International*. N°132, p. 302-338.
- Departamento de estudios y planificación de los recursos hídrico. 2004. Evaluación de los Recursos Hídricos en el Quebrada Los Choros, IV región de Coquimbo. Informe técnico. Dirección General de Aguas. Gobierno de Chile.
- Dickinson, W. 1970. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*. N° 40.p. 695-707.
- Dirección General de Aguas. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea [en línea] <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes> reporte meteorológico > precipitaciones diarias > Región de Coquimbo > Cuenca Hidrográfica o Nombre Estación > Río Los Choros > El Trapiche> 1-31 de marzo del 2015.
- Dirección General de Aguas. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea [en línea] <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes> > reporte meteorológico > precipitaciones mensuales > Región de Coquimbo> Cuenca Hidrográfica o Nombre Estación>Río Los Choros>El Trapiche> 1 de enero y 31 de diciembre del 1997.
- Dirección General de Aguas. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea [en línea] <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes> > reporte meteorológico > precipitaciones anuales > Región de Coquimbo> Cuenca Hidrográfica o Nombre Estación>Río Los Choros>El Trapiche> 1 de enero del 1980 y 25 marzo del 2015.
- Draper, N. y Smith, H. 1981. Applied regression analysis. 2^{nda} Edición.
- Emery, K.O. 1978. Grain size in laminae of beach sand. *Journal of Sedimentary Petrology*. N°48, p. 1203-1212.
- Emparán, C., Pineda, G. 1999. Área Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, 12, 1 mapa escala 1:100.000.

- Folk, R. 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Co. Austin, Texas.
- Folk, R., Ward, W. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*. N°27, p. 3-26.
- Gao Cunchai. 2004. Sedimentary facies changes and climate-tectonic control in a foreland basin, the Urumqi River, Tian Shan, northwest China. *Sedimentary Geology*. N° 169, p. 29-46.
- García-Huidobro, F. 2007. Modelación numérica preliminar del acuífero costero de la Quebrada Los Choros (IV Región). *Tesis de magíster en ciencias de la ingeniería. Memoria de título. Universidad de Chile*.
- Garrido, G. 2009. Evolución morfológica de la Depresión de Domeyko entre los 28°45'-29°00' durante el Neógeno. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 123p, 1 mapa*.
- Garzanti, E., Vezzoli, G., Andò, S., Lavé, J., Attal, M., France-Lanord, C., DeCelles, P. 2007. Quantifying sand provenance and erosion (Marsyandi River, Nepal Himalaya), *Earth and Planetary Science Letters*. N°258, p. 500-515.
- Garzanti, E., Vezzoli, G., Paparella, P., Clift, P.D. 2005. Petrology of Indus River sands: a key to interpret erosion history of the Western Himalayan Syntaxis, *Earth and Planetary Science Letters*. N°229, p. 287-302.
- Gómez, C. 2003. Cambios relativos del nivel del mar durante el Cenozoico Tardío, en la zona de Carrizalillo, III Región, Chile. *Tesis de Magíster en Ciencias, Universidad de Chile*.
- González de Matauco, A. 2004. Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la A.G.E.* N°38, p. 311-329.
- Gravelius, H. 1914. *Flusskunde: Grundriss des gesamten Gewässerkunde*. Goschenesche Verlagshandlung, Berlin, En: Munguía, S.I. y Campos, A.M. 2003. Características hidrogeomorfológicas de la Cuenca del arroyo Pescado Castigado, Buenos Aires, Argentina. *Papeles de Geografía*. N°38, pp. 137-150.
- Gregory, K.J., Walling, D.E. 1973. "Drainage basin form and processes. A geomorphological approach". London. Arnold, p. 472.
- Grosjean, M. 2001. Mid-Holocene climate in the south-central Andes: Humid or dry? *Science*. N° 292, p. 2391.
- Hartley, A. 2003. Andean uplift and climate change. *Journal of the Geological Society*. Londres. N° 160, p. 7-10.

- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*. N°56, p. 275-370.
- Howard., A.D. 1980. Thresholds in river regimes. In *Thresholds in Geomorphology*, ed. DR Coates, JD Vitek, p. 227-58.
- Howard, A.D., Dietrich, W.E., and Seidl, M. A. 1994. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. *Journal of Geophysical Research*, N° 99, 13.971- 13.986.
- Ingersoll, R. 1990. Actualistic sandstone petrofacies: discriminating modern and ancient source rocks. *Geology*. N°18, p. 733-736.
- Ingersoll, R., Bullard, T., Ford, R., Grimm, J., Pickle, J., Sares, S. 1984. The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi - Dickinson point - counting method. *Journal of sedimentary Petrology*, Vol. 54, N° 1, p. 103-116.
- Inverson, R. 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*. Vol. 35, N° 3, p. 245-296.
- Jardí, M. 1985. Forma de una Cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*. N°19, p. 41-68.
- Jones, J.A. 1997. *Global hydrology: processes, resources and environmental management*. Londres, Addison-Wesley, p. 399.
- Kormar, P.D. 1987. Selective grain entrainment by a current from a bed mixed and the choice of particle size for flow competence evaluations. *Sedimentology*. N°38, p. 489-502.
- Krumbein, W. 1934. Size frequency distributions of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*. N°4, p. 65-77.
- Lance, G.N., Williams, W.T. 1966. Computer programs for classification. In *Proceedings of the ANCCAC Conference*, Canberra, Australia (Paper 12/3).
- Lavigne, F., Suwa, H. 2004. Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia. *Geomorphology*. N° 61, p. 41-48.
- Le Roux, J. 2012. *Apuntes de Sedimentología*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Le Roux, J.; Gómez, C; Olivares, D.; Middleton, H. 2005b. Determining the Neogene behavior of the Nazca plate by geohistory analysis. *Geology*. N°33, p. 165-168.

- Le Roux, J., Gómez, C., Venegas, C., Fenner, J., Middleton, H., Marchant, M., Buchbinder, B., Frassinetti, D., Marquardt, C., Gregory-Wodzicki, K.M., Lavenu, A. 2005a. Neogene-Quaternary coastal and offshore sedimentation in north central Chile: Record of sea-level changes and implication for Andean tectonism. *Journal of South American Earth Sciences*. N°19, p. 83-98.
- Macklin, M.G., Fuller, I.C., Lewin, J., Maas, G.S., Pasmore, D.G., Rose, J., Woodward, J.C., Black, S., Hamlin, R.H.B., Rowan, J.S. 2002. Correlation of fluvial sequences in the Mediterranean basin over the last 200ka and their relationship to climate change. *Quaternary Science Reviews*. N°21, p. 1633-1641.
- Maldonado, A., Betancourt, J.L., Latorre, C., Villagran, C. 2005. Pollen analyses from a 50,000-yr rodent middle series in the southern Atacama Desert (25°30 S). *Journal of Quaternary Science*. N°20, p. 493-507.
- Maldonado, A., Villagrán, C. 2006. Climate variability over the last 9900 cal yr BP from a swamp forest pollen record along the semiarid coast of Chile. *Quaternary Research*. N°66, p. 246-258.
- Manning, C. 1889. Comparative Cost of steam and water power. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. N° 10, p. 499-508.
- Marquadt, C., Lavenu, A., Ortlieb, L., Godoy, E., Comte, D. 2004. Coastal neotectonics in Southern Central Andes: uplift and deformation of marine terraces in northern Chile (27°S). *Tectonophysics*, n°394 (3-4), p. 193-219.
- Moglen, G., Bras, R. 1995. The importance of spatially heterogeneous erosivity and the cumulative area distribution within a basin evolution model. *Geomorphology*. N°12, p. 173-185.
- Morisawa, M.E. 1985. Rivers: forms and process. Londres, Longman, n° 222.
- Morton, A., Hallsworth, C. 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sediment Geology*. N°124, 3-29.
- Moscoso, R. 1979. Geología de una franja transversal a la Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes a la latitud de Domeyko (29°S), Región de Atacama. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología*.
- Moscoso, R., Nasi, C., Salinas, P. 1982. Hoja Vallenar y parte norte de La Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N° 55, 1 mapa escala 1:250000. Santiago.
- Muni La Higuera. 2015. Fotografía crecida Los Choros [fotografía digital]. [En línea] <https://www.facebook.com/1497578313816553/photos/a.1598519473722436.10737>

[41859.1497578313816553/1598519940389056/?type=3&theater](https://doi.org/10.41859.1497578313816553/1598519940389056/?type=3&theater) [consulta: 31 marzo 2015]. La Higuera, Chile. Color, 1024 x 639 px.

- Naranjo, J.A. 1987. Interpretación de la actividad cenozoica superior a lo largo de la Zona de Falla de Atacama, norte de Chile. *Revista Geológica de Chile*. N°31, p. 43-55.
- Nichols, G. 2009. *Sedimentology and Stratigraphy* (Segunda Edición). Chichester: Wiley-Blackwell.
- Ota, Y., Paskoff, R. 1993. Holocene deposits on the coast of north-central Chile: Radiocarbon ages and implications for coastal changes. *Revista Geológica de Chile* N°20, p 25-32.
- Parker, G., Klingeman, P.C. 1982. On why gravel rivers are paved. *Water Resource Research*, p. 18.
- Paskoff, R. 1970. Recherches géomorphologiques dans le Chili semi-aride. Biscaye Frères, Bordeaux, France. p. 420.
- Pedraza, J., Carrasco, R.M., Díez, A., Martín Duque, J.F., Martín Ridaura, A., Sanz, M.A. 1996. Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones. p. 414.
- Peralta, F., Díaz, G., Wood, G. 1971. Hidrogeología de la Quebrada de Los Choros: informe preliminar. CORFO. 39p. de mapas plegables.
- Quezada, J., González, G., Dunai, T., Jensen, A., Juez-Larré, J. 2007. Alzamiento litoral Pleistoceno del norte de Chile: edades ²¹Ne de la terraza costera más alta del área de Caldera-Bahía Inglesa. *Revista Geológica de Chile*. Vol. 34, N° 1, p. 81-96.
- Raj, R. 2007. Late Pleistocene fluvial sedimentary facies, the Dhadhar River basin, Western India. *Quaternary International*. N°159, p. 93-101.
- Riquelme, R., Rojas, C., Aguilar, G., Flores, P. 2011. Late Pleistocene- early Holocene paraglacial and fluvial sediment history in the Turbio valley, semiarid Chilean Andes. *Quaternary Research*. N°75, p. 166-175.
- Rivano, S., Sepúlveda, P. 1991. Hoja Illapel, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N° 69: 132p, 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.
- Roe, G.H., Montgomery, D.R., Hallet, B. 2002. Effects of orographic precipitation on the concavity of steady-state river profiles. *Geology*. N°33, p.143-146.
- Romero, H., Rovira, A., Véliz, G. 1988. Geografía IV Región de Coquimbo. Instituto Geográfico Militar, Santiago, p. 425.

- Saenz, M. 2004. Hidrogeología sector medio Quebrada Los Choros y su tributario Quebrada Los Choros altos, Comuna de La Higuera, IV Región. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología*. 98p, 4 mapas.
- Sala, M., Gay, R. 1981. Algunos datos morfométricos de la cuenca del Isábena. *Notas de Geografía Física*. N°4, p. 41-65.
- Schumm, S.A. 1956. The evolution of drainage systems and slopes in badlands at Pearth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society*. N°67, p 597-646.
- Segerstrom, K. 1960. Cuadrángulo Quebrada Paipote, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 3: 55 p., escala 1:50.000.
- Segerstrom, K, Parker, R. 1959. Cuadrángulo Cerrillos. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas. Carta Geológica de Chile. Vol. 1, N°2, 33p., 1 mapa escala 1:50.000.
- Segerstrom, K., Ruiz, C. 1962. Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N°6: 115 p., 1 mapa escala 1:50.000.
- Senciales, J.M. 1999. Redes fluviales. Metodología de Análisis. Estudios y Ensayos, 34. Universidad de Málaga, pp. 337.
- Sengupta, S., Sakar, S., Maji, A.K. 1999. Sediment transportation and sorting processes in streams. *PINSA*. N°65, pp. 167-206.
- SERNAGEOMIN, 2003. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Carta Geológica de Chile, escala 1:1.000.000.
- Sklar, L., Dietrich, W. E. 1998. River longitudinal profiles and bedrock incision models: Stream power and the influence of sediment supply, in *Rivers over Rock: Fluvial Processes in Bedrock Channels*. *Geophysical Monograph*. Ser., vol. 107, edited by K. J. Tinkler and E. E. Wohl, p. 237– 260, AGU, Washington, D. C.
- Strahler, A.N. 1964. “Quantitative geomorphology od drainage basins and channel networks”. En: Chow, V.T. (Ed.): *Handbook of applied hydrology*. 4-39/4-76.
- Suarez, J. 2009. Deslizamientos. Tomo I: Análisis geotectónico. Cap. 5: Los Flujos. Bucaramanga. Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda., p. 173-208.
- Thiele, R., Pincheira, M. 1987. Tectónica transpresiva y movimiento de desgarre en el segmento sur de la Falla de Atacama, Chile. *Revista Geológica de Chile*., N°31, p. 77-94.
- Timm, N. 2002. *Applied Multivariate Analysis*. *Spreinger Werlag*. Nueva York p. 693.

- Tooth, S., Brandt, D., Hancox, P.J., McCarthy, T.S. 2004. Geological controls on alluvial river behavior: a comparative study of three rivers on the South African Highbush. *Journal of African Earth Sciences*. N°38, p.79-97.
- Tucker, G.E., Slingerland, R. 1996. Predicting sediment flux from flood and thrust belts. *Basin*, N°8, p. 329-349.
- Twidale, C. R. 2004. River patterns and their meaning. *Earth-Science Reviews*. N°67, p. 159–218.
- United States Geological Survey. 2005. Distinguishing between Debris Flows and Floods from Field Evidence in Small Watersheds. *Fact Sheet*. N° 2004-3142, p. 1-4.
- Urresty, C. 2009. Evolución geomorfológica de la parte sur de la Depresión de Domeyko (29°00'-29°40' S) durante el Neógeno. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*. 95p, 1 mapa.
- Van der Plas, L., Tobi, A. 1965. A chart for judging the reliability of point counting results. *American Journal of Science*. N° 263, pp. 87-90.
- Van Dijk, J. 2011. Santuario de la naturaleza desierto costero Los Choros. Testimonio escrito. Recuperado del sitio Web de Incide Poder Ciudadano de: <http://www.incide.cl/13/04/2011/santuario-de-la-naturaleza-desierto-costero-de-los-choros>.
- Veit, H. 1996. Southern Westerlies during the Holocene deduced from Geomorphological and Pedological Studies in the Norte Chico, Northern Chile (27-33°S) *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. N°123, p. 107 119.
- Verheye, W. 2006. Dry lands and desertification. *Land use, land cover and soil sciences*. Vol. 5.
- Vezzoli, G. 2007. Calculated end-member contributions and analysis of variance for the Marsyandi river catchment. En: Garzanti, E., Vezzoli, G., Andò, S., Lavé, J., Attal, M., France-Lanord, C., DeCelles, P. 2007, Quantifying sand provenance and erosion (Marsyandi River, Nepal Himalaya). *Earth and Planetary Science Letters*. N°258, p. 500-515.
- Villagrán, C. 2007. Dinámica costera en el Sistema de bahías comprendidas entre Ensenada Los Choros y Bahía Tongoy. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Escuela de Geografía*. 120p.
- Villagrán, C., Varela, J. 1990. Palynological evidence for increased aridity on the Central Chilean Coast during the Holocene. *Quaternary Research*. N°34, p. 198-207.

- Welkner, D., Arévalo, C., Godoy, E. 2006. Geología del área Freirina-El Morado, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N° 100, 1 mapa escala 1:100.000.
- Weltje, g. 1997. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problema. *Journal of Mathematical Geology*. N° 29, p. 503-549.
- Wentworth, C. 1922. A scale of grade class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*. N°30, p. 377-392.
- Whipple, K.X., Tucker, G.E. 1999. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research*. N°107. pp. 3-20.
- Zech, R., Kull, C., Veit, H. 2006. Late Quaternary glacial history in the Encierro Valley, northern Chile (29°S), deduced from ^{10}Be surface exposure dating. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, N° 234, p. 277-286.

ANEXOS

ANEXO A: Resumen paradas en trabajo de terreno

Parada	Coord. X	Coord. Y	h [m]	Ang; esf	Frag. de V. máx [m ³]	Moda [cm]	Composición relleno	Geología local	Muestras
1	331.182	6.740.634	110 2	red-subred; elong	2	15-20	Componentes intrusivos, y en menor % extrusivas andesíticas. Bloques mayores corresponden a intrusivos	Kgd y Ksc (Moscoso <i>et al.</i> , 1982)	
2	326.409	6.741.446	931	subred-subang; elong	1-1,5	10-20	Composición polimíctica, mayor % intrusivo, y andesitas. (Afanítica a ocoítica). Algunos clastos de intrusivo tienen alteración Hem. Sil, y en andesitas, alteración propilítica.	Ksc, subhor, leve manto hacia el norte	Muestra parada 2
3	322.731	6.742.669	820	subred-subang	1 – 1,5	10-15	Polimíctica Mayor % Intrusivos, algunos con mayor porcentaje de máficos; enclaves melanocráticos; Lavas andesíticas a dacíticas (Porf, Af) as de color rojizo; Brechas volcánicas.	Ksc (Moscoso <i>et al.</i> , 1982)	Muestra parada 3
4	321.787	6.743.202	Control geomorfológico		Laderas con suelo residual v/s Ladera Rocosa		Kgd fuertemente diaclasada		
5	320.517	6.745.079	715	subred-red; elong	1,5	10-15	Duomíctico Mayor % volcánico (60%); intrusivos	Kgd (Moscoso <i>et al.</i> , 1982)	Muestra parada 5

								fuertemente diacclasada	
5*	316.910	6.748.054	Control geomorfología		Zona de caída de bloques		Kgd		
6	314.222	6.748.596	539	Red; elong	1	arena		Ksc	Muestra parada 6
7	316.033	6.748.420	569	Red Tamaño interme dio, elong y extremo s + esf.	1,5	arena	Polimíctica; Mayor % volcánico andesítico; intrusivo y rocas sedimentarias (areniscas verdes fossilíferas)	JKpc	Muestra parada 7
8	311.201	6.749.101	487	subred- red; esf med	1	grava	(idéntico al anterior)	Grupo Bandurria s (Moscoso <i>et al.</i> , 1982)	Muestra Parada 8
9	307.193	6.749.177	438	subred- red; esf. media	1	grava	(idéntico al anterior)	Grupo Bandurria s (Moscoso <i>et al.</i> , 1982)	Muestra parada 9
10	304.303	6.750.462	395	subred- red; esf media	1	gravilla	Polimíctica volcánica, intrusivo, sedimentaria finas	JKpc	
10*	295.643	6.748.535	395	subred- red; esf media	1	gravilla	(idéntico al anterior)	JKpc, MPc	Muestra parada 10
12	282.788	6.753.384	141	red- subred; esf media	1,5	arena- grava	(idéntico al anterior)	MPcq, JKpc	Muestra parada 12
13	270.415	6.756.182	25	Dunas	(10 cm largo)		Tamaño máx, intrusivo redondeado, Mx. Angulosos a sub redondeados		
14	270.287	6.756.066	16	Dunas			Tamaño máx, intrusivo redondeado, Mx. Angulosos a sub redondeados, baja esfericidad		Muestra parada 14
15	270.176	6.755.968	11	Dunas					Muestra parada 15

16	270.815	6.755.986	8	Subred; esf. / 10 cm más elong.	0,125	2cm-arena	Domina levemente los clastos volcánicos. Polimictico. Clastos sedimentarios tamaño gravilla	MPc	Muestra parada 16
17	278.641	6.758.102	Control geomorfología		Terraza marina de abrasión; conchillas cemento calcáreo; conglomerado coquináceo				
18	279.418	6.758.870	Control geomorfología		Coalescencia de abanicos aluviales				
19	282.332	6.762.623	18	Sub ang a sub red; elong	0,7	gravilla	Máx. intrusivo, predominan rocas volcánicas	JKpc, Kild	Muestra parada 18
20	263.609	6.762.969	24	Dunas					Muestra parada 19
21	262.896	6.761.790	18	Dunas					Muestra parada 20
21*	262.767	6.761.473	10	Dunas					Muestra parada 21
22	283.848	6.753.832	144	Red a subred, elong	0,216	Arena fina	Intrusivos Lavas andesíticas a dacíticas de texturas Porfídica, afanítica.	JKpc	Muestra parada 22

TABLA RESUMEN DE PUNTOS DE CONTROL.

Coord. X, es la Coordenada Este; Coord. Y, Coordenada Norte, usando datum WGS84; h= altura; Ang= anguloso, Subang= subanguloso, Sub red.= sub redondeado, red= redondeado; elong= elongado, Esf. Med.= esfericidad media= esf alt= Esfericidad alta; Frag. de V. máx= Fragmento de volumen máximo. En color aguamarina, puntos de control geomorfológico; en púrpura, puntos donde además si hicieron análisis macrogranulométricos. En amarillos, puntos de control de arenas de dunas.

ANEXO B: Granulometría superficial detalle de paradas

Parada 1

Este corresponde al punto más oriental de los sitios seleccionados de control, aguas arriba de la confluencia con la Quebrada Las Chacras.

El cauce principal es bastante trezado, en este punto los brazos tienen un ancho de 7 m aproximadamente, dejando barreras alargadas. A ambos costados se observa el desarrollo de un nivel aterrizado, el cual presenta importante aporte desde las laderas de los cerros circundantes.

El cauce principal está constituido primariamente por clastos de tamaño arena gruesa a media, redondeados y de alta esfericidad, mientras que los depósitos de crecidas, por gravilla fina a arena muy gruesa, redondeados a subredondeados, con una geometría elongada (Figura 0.1). Además, la población de clastos mayores (tamaño máximo de 2 m³) corresponde a rocas intrusivas que afloran en la zona, especialmente rocas pertenecientes al Complejo Plutónico Los Morros.

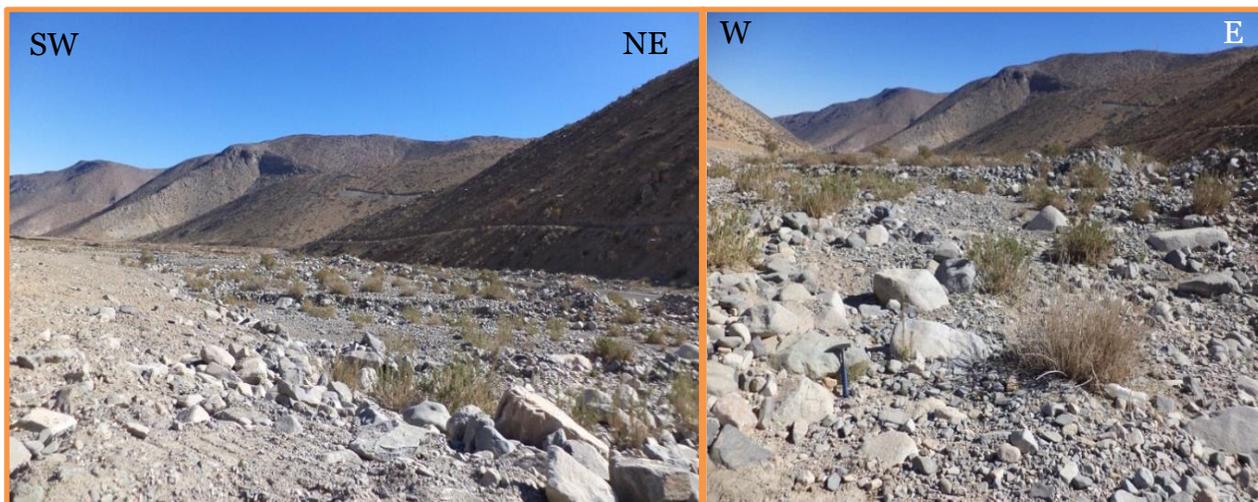


Figura 0.1 Fotografías tomadas de la parada 1.

Parada 2

La Figura 0.2 corresponde la fotografía sacada en el segundo sitio de estudio, en esta sección el tramo del cauce es principalmente meándrico, con cierto componente de trezado.

En este punto de control se puede observar el desarrollo de al menos 3 niveles de terraza, donde los cauces principales, posee clastos de tamaño arena gruesa a muy gruesa, de geometría bastante esférica, subredondeados a angulosos. Las barras poseen una coraza de material mayoritariamente gravilla a grava, de esfericidad baja y subredondeados a redondeados. Los bloques son más esféricos que la parada anterior, con un tamaño máximo 1-1,5 m³ compuesto principalmente por rocas intrusivas del Complejo Plutónico Los Morros, y una población menor lávico de la Formación Cerrillos.



Figura 0.2 Fotografía parada 2. Escala martillo geológico.

Parada 3

Al este de la confluencia con la Quebrada La Totorá. El cauce presenta un carácter principalmente trezado, con un leve componente meándrico, con desarrollo de amplias barras.

El cauce se encuentra compuesto principalmente por clastos tamaño arena media a gruesa, de alta esfericidad y subredondeados a subangulosos. El tamaño máximo observado es de 1,5 m³ (Ver Figura 0.3) los cuales corresponden principalmente a lava de la Formación Cerrillos. Además, existe otra población de fragmentos mayores, con un

largo máximo de 45 cm, los cuales están constituidos principalmente por clastos de intrusivos granodioríticos del Complejo Plutónico Los Morros.



Figura 0.3 Fotografía de la parada 3. Escala martillo geológico.

Parada 5

Frente al cordón de Las Perdices, el valle se amplía, tomando forma de una v extendida, llegando a un ancho, entre ladera y ladera, de 400 m. En esta zona el cauce vuelve a ser preferentemente trenzado, ahora con ciertas características de anastomosado. Los brazos tienen un ancho de aproximadamente 15 m.

El cauce presenta clastos entre arena gruesa a media subredondeados a subangulosos con buena esfericidad. Los clastos mayores se observan principalmente en la coraza de las barras, con tamaños que van de 15 cm a 1 m³ (Ver Figura 0.4). Los cuales se constituyen por fragmentos ocoíticos de la Formación Cerrillos, como de intrusivos pertenecientes principalmente a la diorita Las Cabras.



Figura 0.4 Fotografía parada 5, escala martillo geológico.

Parada 7

Antes de la confluencia de la Quebrada los Choros con la Quebrada Grande y Pelicano, junto al cordón de las Perdices.

Se observan bloques semi enterrados de un largo máximo de 1,5 m, la moda sería compuesta por arena media, seguido de una población de gravilla. Los bloques de mayor tamaño corresponden fragmentos de cuerpos intrusivos dioríticos con enclaves melanocráticos (Ver Figura 0.5) que pertenecerían a la diorita Las Cabras.



Figura 0.5 Fotografías de la parada 7. A la izquierda una vista panorámica de la parada 4. Intrusivo diorítico, con enclaves melanocráticos.

Parada 6

Hacia el Este de la localidad de Tres Cruces, antes de la confluencia de la Quebrada Los Choros con la Quebrada Grande y Quebrada Pelicano. El cauce es preferentemente trezado, y anastomosado. Los brazos tienen un ancho aproximado de 15 m.

Como se observa en la Figura 0.6 los cantos de los bloques se observan más redondeados, con un tamaño máximo de 1 m³. En una estimación visual, se piensa que la moda en el cauce correspondería a tamaño arena media, seguida por una población de 20 cm de largo máximo, por último una población de tamaño bloque.



Figura 0.6 Fotografía del punto de control 6, escala mapera.

Parada 8

En la Figura 0.7, se pueden observar características de la parada 8, hacia el Oeste de la confluencia de la quebrada principal con los afluentes Pelicano y Grande, el valle se amplía ligeramente, y se observa la generación de niveles de terraza (Ver sección unidades geomorfológicas). El cauce principal es primordialmente meándrico.

El fragmento mayor tiene un volumen aproximado de 1 m³, donde la moda es tamaño grava (cerca de 10 cm), los líticos son principalmente volcánicos lávicos, seguido por intrusivos leucocráticos, y rocas sedimentarias con mayor o menor contenido fósil, dada la mayor presencia de arcillas, en esta parada. Dada la composición de los clastos mayores, el relleno pertenecería principalmente al Grupo Bandurrias.



Figura 0.7 Fotografías de la parada 8, a la izquierda, vista panorámica del punto de muestreo. A La derecha, fauna fósil presente en bloque mayor.

Parada 9

Hacia el Este de la confluencia de la quebrada principal con la Quebrada Desvío Los Choros y la Quebrada Agua Grande. El valle se amplía ligeramente, sobre pasando los 400 m de ancho entre ladera y ladera. Con características principalmente meándricas, en este punto numerosas obras civiles interfieren el lecho de la quebrada, donde no se han tomado las medidas necesarias ante una eventual crecida.

Por los numerosos represamientos que han sufrido cuerpos de agua, debido a las obras civiles, la presencia de arcillas es muy importante, seguido por una población de arena fina, y luego bloques de un metro de largo (Ver Figura 0.8). Además se puede observar que los fragmentos correspondientes a fragmentos sedimentarios han disminuido considerablemente su tamaño (Figura 0.8), donde el más grande que ahora se presenta, tiene un largo máximo de 30 cm. Predominando los fragmentos de lava e intrusivo.



Figura 0.8 Fotografías de la parada 9 a la izquierda vista panorámica del punto de muestreo. A la derecha fragmento más grande encontrado de roca sedimentaria (coquina).

Parada 10

Justo al Este de la confluencia con las quebradas Agua Grande y Desvío Los Choros, se encuentra en las cercanías de la localidad de Punta Colorada. La quebrada presenta un ancho muy variable con un máximo de aproximadamente 1.300 m y un mínimo de 300 m, primordialmente trezado.

En la Figura 0.9 se puede observar una fotografía de la parada 10. Los clastos son de fragmentos intrusivos y de rocas volcánicas lávicas, principalmente andesitas y, en menor proporción, rocas sedimentarias. Mientras que los primeros dos tipos de clastos presentan una geometría más bien elongada y sub redondeada, los terceros son casi esféricos y redondeados. El fragmento de mayor tamaño presenta un largo máximo de 1 m³, y la moda del cauce sería de arena fina.



Figura 0.9 Fotografía panorámica parada 10.

Parada 11

Hacia el Oeste de la confluencia de la quebrada principal con la Quebrada Agua Grande, y hacia el Este la confluencia con la Quebrada Los Choros Altos. El valle se extiende llegando a un ancho de 720 m aproximadamente. El cauce se presenta principalmente trenzado.

Los bloques mayores, ahora son menores a 1 m³, presentándose principalmente enterrados, el lecho tiene una moda de arena fina o menor granulometría, y los fragmentos mayores son principalmente intrusivos y lavas, sub angulosos a subredondeados (Ver Figura 0.10).



Figura 0.10 Fotografía panorámica de la parada 11. Martillo geológico de escala.

Parada 22

Hacia el Oeste de la confluencia con la Quebrada Los Choros Altos, el cauce se presenta trezado a anastomosado, llegando a un ancho cercano a los 770 m.

El bloque de largo máximo (60 cm) es de origen intrusivo de composición diorítica. Se presenta una coraza donde predomina los clastos de tamaño grava gravilla, los cuales son principalmente de origen volcánico lávico, bajo de la cual el lecho está compuesto principalmente de partículas tamaño arena fina-arcilla (Ver Figura 0.11).



Figura 0.11 Fotografía panorámica parada 22.

Parada 12

En la intersección entre la Quebrada Los Choros y el camino a Punto de Choros, hacia el Oeste de la confluencia con la Quebrada Los Choros Altos. En este punto es difícil encontrar un cauce principal, ya que los eventos de incisión han formado amplias llanuras, el valle tiene un ancho de aproximadamente 730 m. El valle es principalmente recto, con una morfología trezada.

El relleno del valle está constituido principalmente por rocas intrusivas dioríticas, donde el bloque de tamaño máximo tiene 60 cm de largo, posee una coraza de clastos tamaño gravilla, luego el relleno está compuesto esencialmente por arena fina. En la se muestran fotografías de la parada (Ver Figura 0.12).

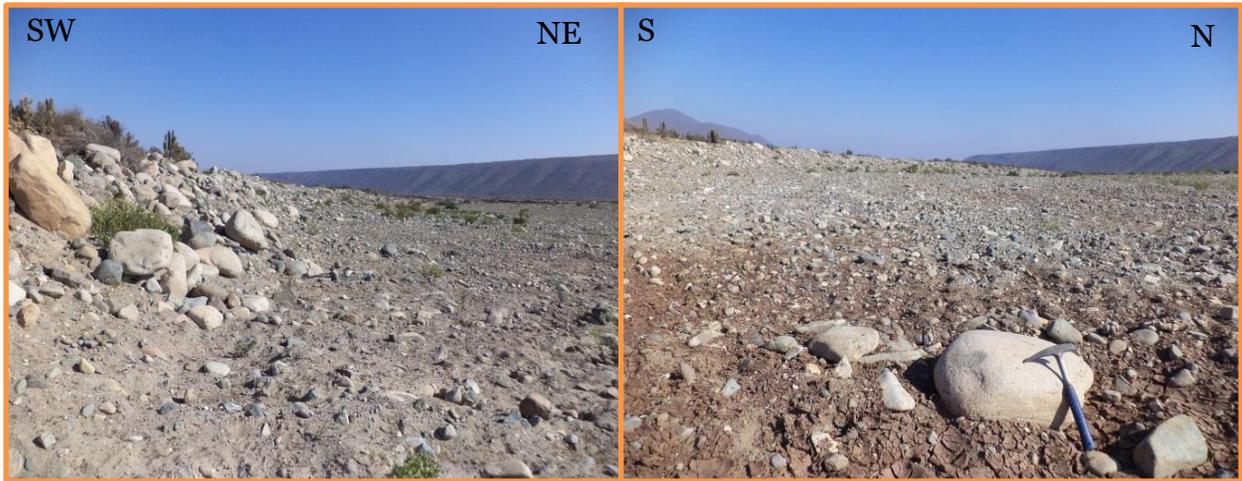


Figura 0.12 Fotografías parada 12.

Parada 18

En la Quebrada Romero, en la confluencia con la Quebrada Las Docas, aguas arriba de la confluencia con la Quebrada Los Choros. Presenta mayor desarrollo de vegetación, y los clastos son más angulosos. (Ver Figura 0.13). Presenta una morfología recta y trenzada.

Los bloques de tamaño más grande son dioritas, con volumen máximo de $0,7 \text{ m}^3$, la moda esta constituidas por fragmentos entre 5 y 15 cm, donde predominan las rocas de composición volcánica.



Figura 0.13 Fotografía panorámica de la parada 18.

Parada 16

Hacia el Este de la Laguna Boca Los Choros, casi en la desembocadura de la quebrada en estudio. El valle se encuentra encajonado por formaciones no consolidadas, y presentando una morfología trezada.

Como se puede observar en la Figura 0.14, aquí los fragmentos son bastante redondeados, donde el de tamaño máximo es de un volumen de $0,125 \text{ m}^3$, correspondiendo a una granodiorita con enclaves melanocráticos, de composición diorítica. Se observa una moda tamaño arena media-gruesa, y una población polimíctica de unos 10 cm de largo máximo con una geometría elongada, clastos sedimentarios presentan geometría más bien esférica.



Figura 0.14 Fotografía parada 16.

ANEXO C: Informe técnico IDIEM



INFORME N° 854.997

CAMPAÑA DE PROSPECCIONES MEDIANTE CALICATAS – PROYECTO FONDECYT 1120234, GEODINÁMICA Y TENDENCIA EVOLUTIVA DEL SISTEMA LITORAL DE KA MEGA ENSENADA DE COQUIMBO.

INFORME TÉCNICO: CALICATAS, ENSAYOS DE TERRENO Y LABORATORIO

SECCIÓN PROSPECCIONES GEOTECNICAS		EJEMPLAR N°: 1	N° DE PÁGINAS: 16
ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:	DESTINATARIO:
Alvaro Gallardo A.	Marcelo Paredes P.	Iván Bejarano B.	Sergio Sepúlveda
FECHA : 25/10/2013	FECHA: 25/10/2013	FECHA: 25/10/2013	FECHA: 25/10/2013

INDICE DE CONTENIDOS

1. ALCANCE	3
2. ANTECEDENTES	3
3. INTRODUCCIÓN	3
4. RESULTADOS ENSAYOS DE TERRENO Y LABORATORIO	5
5.1. PROPIEDADES ÍNDICES DE SUELOS	5
5.2. GRÁFICOS CON LAS CURVAS DE LAS MACRO GRANULOMETRÍAS.....	6
5. DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA Y REGISTRO FOTOGRÁFICO	8
6.1. CALICATA C – 1. ESTRATIGRAFÍA Y FOTOGRAFÍAS.....	8
6.2. CALICATA C - 2. ESTRATIGRAFÍA Y FOTOGRAFÍAS.	10
6.3. CALICATA C - 3. ESTRATIGRAFÍA Y FOTOGRAFÍAS.	12
6.4. CALICATA C - 4. ESTRATIGRAFÍA Y FOTOGRAFÍAS.	14
6.5. REGISTRO DE TOMA DE MUESTRAS DE TERRENO	16

ANEXOS

Anexo A: Certificado con resultados de los ensayos de laboratorio de geotecnia.



FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



1. ALCANCE

Como parte del proyecto “Punta Choros”, la Sra (ta). Maria Victoria Soto a través del Sr. Sergio Sepúlveda ha solicitado la realización de 4 ensayos de Macro Granulometría en 4 calicatas de 1,00 m. de profundidad respectivamente, más la obtención de muestras para ensayos de laboratorio.

Cabe destacar que todos los puntos de exploración se encuentran en lo que fue el cauce del río Quebrada Choros, ubicado en la provincia del Elqui, IV Región de Coquimbo, Chile (ver Figura N°1).

En este informe se presenta lo siguiente:

- Descripción estratigráfica de calicatas y pozo de áridos para rellenos.
- Registro fotográfico de calicatas.
- Resultados de ensayos de laboratorio y muestras extraídas por IDIEM.

Además, se incluyen los siguientes anexos:

- Anexo A: Informe con certificado y resultados de los ensayos de laboratorio de geotecnia.

2. ANTECEDENTES

Los principales antecedentes utilizados en la elaboración de este informe son:

- Solicitud de cotización vía correo electrónico día jueves 30 de julio con Asunto: Cotización Macro Granulometrías.
- Presupuesto IDIEM - SIP. PRE 2349.2013.07 - 5 Calicatas (enviado el 06-08-2013)

3. INTRODUCCIÓN

Para el proyecto Punta Choros, como parte del análisis sedimentológico para estudio geomorfológico y análisis de crecidas, el mandante ha solicitado a IDIEM la ejecución de 4 calicatas de 1,00 m. de profundidad con el objetivo de realizar 1 ensayo de macro granulometría por calicata y la obtención de muestras para ensayos de laboratorio.



La ubicación de las calicatas se muestra en la siguiente figura..



Figura N°1: Ubicación general de calicatas geotécnicas.

Los trabajos de terreno fueron desarrollados entre las fechas 26 de Agosto y 29 de agosto de 2013.

En la siguiente tabla se muestran las coordenadas geográficas finales, junto a la profundidad final de las calicatas.

Tabla N°1: Ubicación en coordenadas UTM y profundidad final de las calicatas

Sector	Calicatas	Coordenadas			Profundidad final [m]
		(Datum WGS84)			
		Huso	Este [m]	Norte [m]	
Quebrada Choros	C - 1	19 J	316.033	6.748.420	1,00
	C - 2	19 J	304.060	6.750.550	1,00
	C - 3	19 J	282.788	6.753.384	1,00
	C - 4	19 J	270.815	6.755.986	1,00



fcfm

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

ldiem[®]
UN SIGLO DE CONFIANZA Y RESPALDO

4. RESULTADOS ENSAYOS DE TERRENO Y LABORATORIO

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio, cuyo detalle puede ser consultado en Anexo A.

5.1. Propiedades índices de suelos

De los estratos de cada calicata se extrajeron muestras alteradas para ensayos de clasificación completa según USCS, granulometría, límites de Atterberg y gravedad específica de los sólidos, (Gs), cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla N°2: Muestras extraídas para ensayos de clasificación USCS.

Ubicación	Calicata	Cotas de Ensayos [m]	LL	LP	IP	USCS	Gs
Quebrada Choros	C - 1	0,00 - 1,00	--	--	NP	GP	2,80
	C - 2	0,00 - 1,00	--	--	NP	SP	3,05
	C - 3	0,00 - 1,00	--	--	NP	GP	2,77
	C - 4	0,00 - 0,83	--	--	NP	GP	2,85
	C - 4	0,83 - 0,93	39	25	14	CL	2,74
	C - 4	0,93 - 1,00	28	25	3	ML	2,76



5.2. Gráficos de Macro Granulometrías

En los siguientes gráficos se presentan las curvas granulométricas de las muestras extraídas en calicatas geotécnicas.

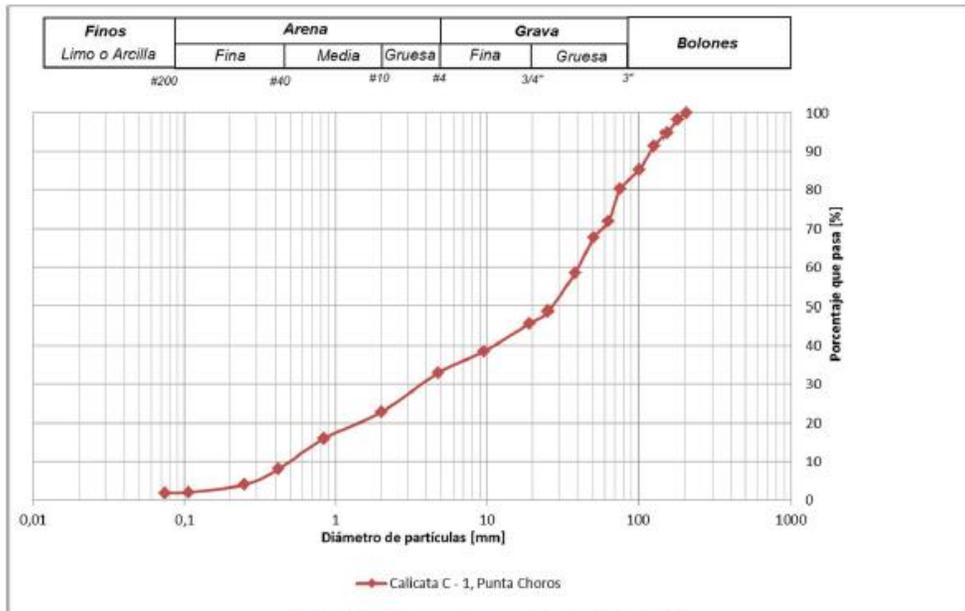


Figura N°2: Curva granulométrica, calicata C-1.

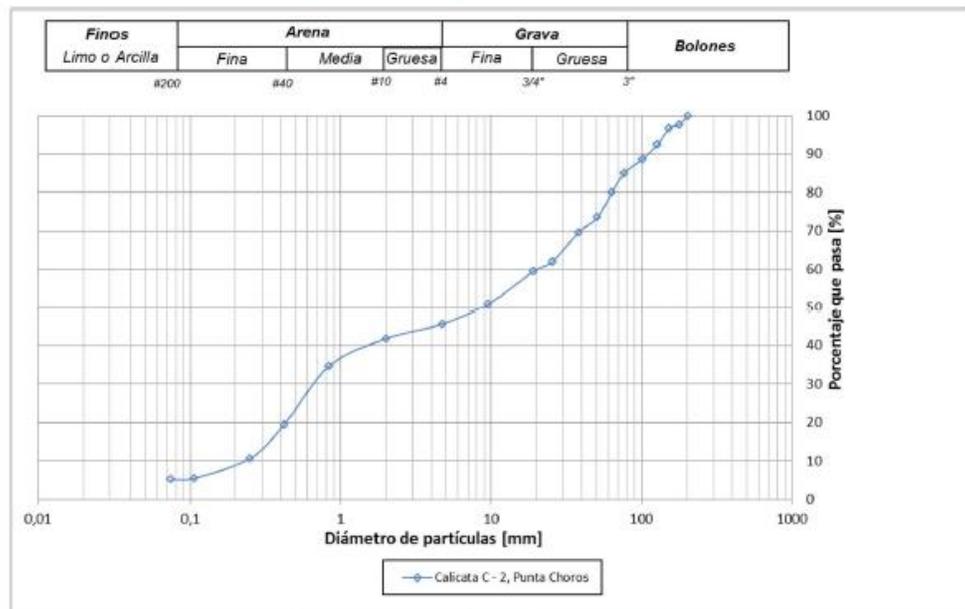


Figura N°3: Curva granulométrica, calicata C-2.

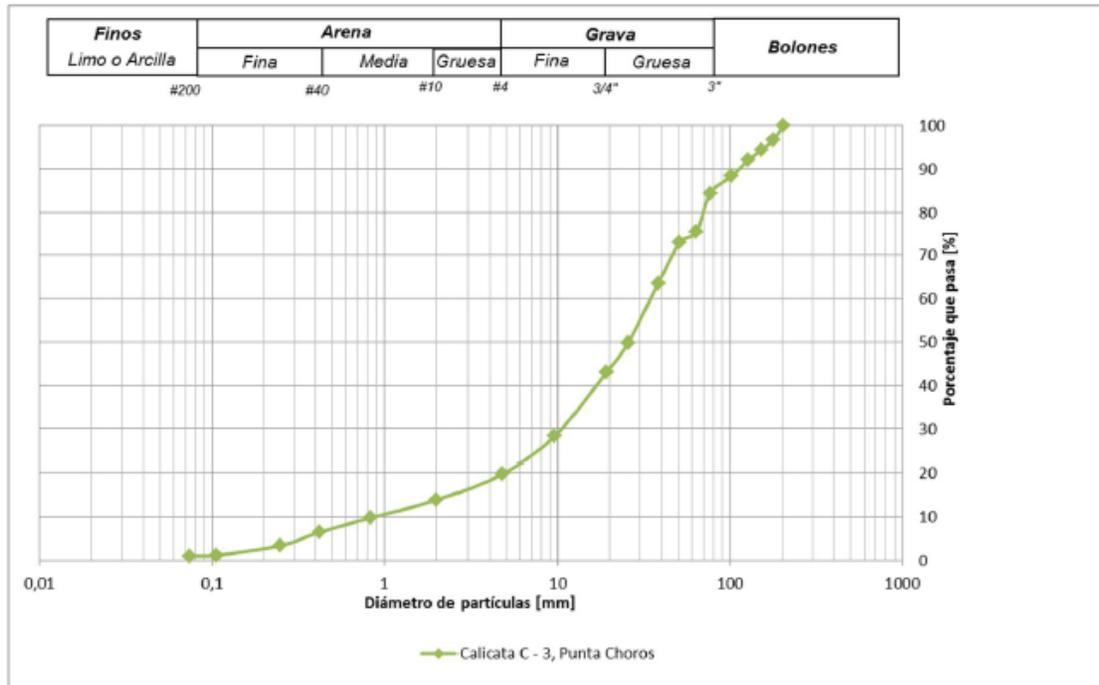


Figura N°4: Curva granulométrica, calicata C-3

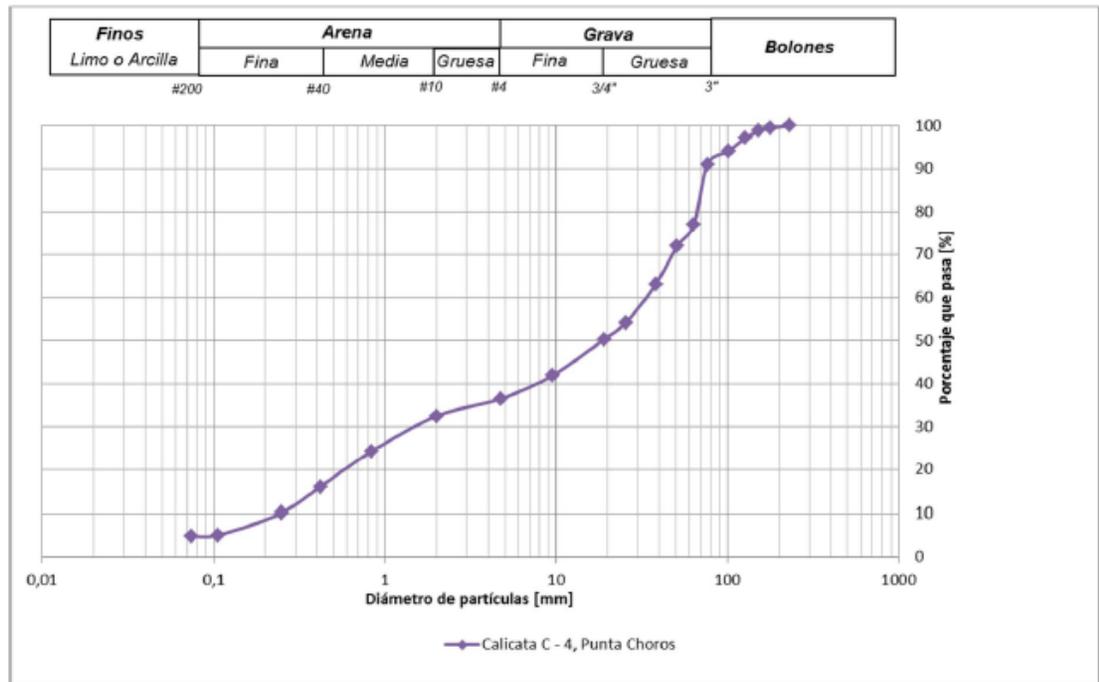


Figura N°5: Curva granulométrica, calicata C-4.



5. DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA Y REGISTRO FOTOGRÁFICO

A continuación se presenta la descripción estratigráfica y el registro fotográfico de cada una de las calicatas geotécnicas.

5.1. Calicata C – 1. Estratigrafía y Fotografías.

Proyecto : Punta Choros
 Ingorme N° : 854.997
 Fecha de Exploración : 26-08-2013
 Calicata N° : C - 1
 Coordenadas : 316.033 E - 6.748.420 N.
 Ciudad : Caquimbo

Horizonte	Cotas Límites		Espesor (m)	Descripción estratigráfica
	(m)	- (m)		
H1	0,00	- 1,00	1,00	Grava arenosa con bolones dispersos de tamaño máximo 8" de cantos sub-redondeados, color gris, humedad baja a media, compacidad media, estructura homogénea. En cota superior se observa presencia de raicillas.

* A la fecha de la exploración no se observó napa.

Registro Fotográfico





fcfm

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

ldiem[®]
UN SIGLO DE CONFIANZA Y RESPALDO



Vista General



Tapado de Calicata



5.2. Calicata C - 2. Estratigrafía y Fotografías.

Proyecto : Punta Choros
Ingorme N° : 854.997
Fecha de Exploración : 26-08-2013
Calicata N° : C - 2
Coordenadas : 304.060 E - 6.750.550 N
Ciudad : Caquimbo

Horizonte	Cotas Límites		Espesor (m)	Descripción estratigráfica
	(m)	- (m)		
H1	0,00	- 0,35	0,35	Arena gravosa de tamaño máximo 2 ½" de cantos sub-redondeados, con presencia de fino limoso de baja plasticidad, color predominante café claro, humedad baja, compacidad media, estructura homogénea.
H2	0,35	- 0,45	0,10	Arena mal graduada con gravas dispersas de tamaño máximo 2" de cantos sub-redondeados, color gris, humedad baja, compacidad suelta, estructura homogénea.
H3	0,45	- 1,00	0,55	Grava arenosa con bolones dispersos de tamaño máximo 8" de cantos sub-redondeados, color gris, humedad baja a media, compacidad media, estructura homogénea.

* A la fecha de la exploración no se observó napa.

Registro Fotográfico





fcfm

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

ldiem[®]
UN SIGLO DE CONFIANZA Y RESPALDO



Cota : 0,50 a 0,80 m.



Cota : 0,80 a 1,00 m.



Vista General



Tapado de Calicata



5.3. Calicata C - 3. Estratigrafía y Fotografías.

Proyecto : Punta Choros
Ingome N° : 854.997
Fecha de Exploración : 27-08-2013
Calicata N° : C - 3
Coordenadas : 282.788 E - 6.753.384 N
Ciudad : Caquimbo

Horizonte	Cotas Límites		Espesor (m)	Descripción estratigráfica
	(m)	- (m)		
H1	0,00	- 1,00	1,00	Grava arenosa con escaso contenido de fino, color gris, humedad baja a media, compactidad media, estructura homogénea. Se observan bolones dispersos de tamaño máximo 7" de cantos sub-redondeados.

* A la fecha de la exploración no se observó napa.

Registro Fotográfico





fcfm

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

ldiem[®]
UN SIGLO DE CONFIANZA Y RESPALDO



Cota : 0,60 a 1,00 m.



Calicata completa



Vista General



Tapado de Calicata



5.4. Calicata C - 4. Estratigrafía y Fotografías.

Proyecto : Punta Choros
Ingorme N° : 854.997
Fecha de Exploración : 27-08-2013
Calicata N° : C - 4
Coordenadas : 270.815 - 6.755.986
Ciudad : Caquimbo

Horizonte	Cotas Límites		Espesor (m)	Descripción estratigráfica
	(m)	- (m)		
H1	0,00	- 0,83	0,83	Arena gravosa con bolones dispersos de tamaño máximo 9" de cantos sub-redondeados, color gris, humedad baja a media, compacidad media, estructura homogénea. Se observan raicillas aisladas en cota media.
H2	0,83	- 0,93	0,10	Arcilla limosa de plasticidad media-alta, color café, humedad alta, estructura homogénea.
H3	0,93	- 1,00	0,07	Arena fina con presencia de fino arcilloso de baja plasticidad, color gris con manchas dispersas de café claro, humedad alta, compacidad media, estructura homogénea.

* A la fecha de la exploración no se observó napa.

Registro Fotográfico





fcfm

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

ldiem[®]
UN SIGLO DE CONFIANZA Y RESPALDO



Cota : 0,60 a 1,00 m.



Cota : 0,80 a 1,00 m.



Calicata Completa



Tapado de Calicata

ANEXO D: Tabla de valores obtenidos por macro-granulometría

Calicata 1			Calicata 2			Calicata 3			Calicata 4		
<i>phi</i>	% rango	% retenido									
-7,67	1,63	1,63	-7,67	2,29	2,29	-7,67	3,30	3,30	-7,84	0,68	0,68
-7,47	3,51	5,15	-7,47	0,98	3,27	-7,47	2,40	5,69	-7,47	0,53	1,21
-7,25	3,43	8,58	-7,25	4,26	7,53	-7,25	2,32	8,01	-7,25	1,81	3,02
-6,99	6,13	14,71	-6,99	3,85	11,38	-6,99	3,60	11,61	-6,99	3,02	6,04
-6,67	4,90	19,61	-6,67	3,60	14,98	-6,67	4,05	15,66	-6,67	3,17	9,21
-6,25	8,50	28,12	-6,25	4,99	19,97	-6,25	8,84	24,49	-6,25	13,97	23,19
-5,99	4,17	32,28	-5,99	6,47	26,44	-5,99	2,40	26,89	-5,99	4,76	27,95
-5,67	9,15	41,44	-5,67	4,09	30,53	-5,67	9,44	36,33	-5,67	8,99	36,93
-5,25	9,81	51,25	-5,25	7,53	38,06	-5,25	13,71	50,04	-5,25	8,84	45,77
-4,67	2,94	54,19	-4,67	2,45	40,52	-4,67	7,04	57,08	-4,67	3,93	49,70
-4,25	7,19	61,38	-4,25	8,68	49,19	-4,25	14,61	71,69	-4,25	8,31	58,01
-3,25	5,55	66,93	-3,25	4,99	54,18	-3,25	8,16	79,85	-3,25	5,44	63,44
-2,25	10,30	77,23	-2,25	3,84	58,03	-2,25	6,22	86,07	-2,25	4,08	67,52
-1,00	6,86	84,09	-1,00	7,12	65,15	-1,00	3,97	90,04	-1,00	8,16	75,68
0,25	8,01	92,10	0,25	15,31	80,45	0,25	3,37	93,41	0,25	8,31	83,99
1,25	4,08	96,18	1,25	8,84	89,30	1,25	3,15	96,55	1,25	5,97	89,95
2,00	2,04	98,22	2,00	5,07	94,37	2,00	2,25	98,80	2,00	4,91	94,86
3,18	0,16	98,38	3,18	0,24	94,61	3,18	0,07	98,88	3,18	0,23	95,09
3,84	1,62	100,00	3,84	5,39	100,00	3,84	1,12	100,00	3,84	4,91	100,00

ANEXO E: Análisis macro-granulométrico

Calicata 1

Se ubica inmediatamente al Este de la confluencia de la quebrada principal con Quebrada Grande y Quebrada Pelicano (ver mapa fuera de texto). Correspondiendo al punto de control 7, descrito en el ANEXO B (Ver Parada 7).

La moda presente en esta muestra, como se puede ver en la Figura 0.15, corresponde a un ϕ de -2,25 (4,76 mm), con una media de -4,37 ϕ , lo que correspondería a unos 20 mm. En dicha figura, se puede observar que el histograma presenta una tendencia bimodal, con un segundo *peak* entre los -5,67 y los 5,25 ϕ (50,8 y 38,1 mm, respectivamente), tamaño guijarro.

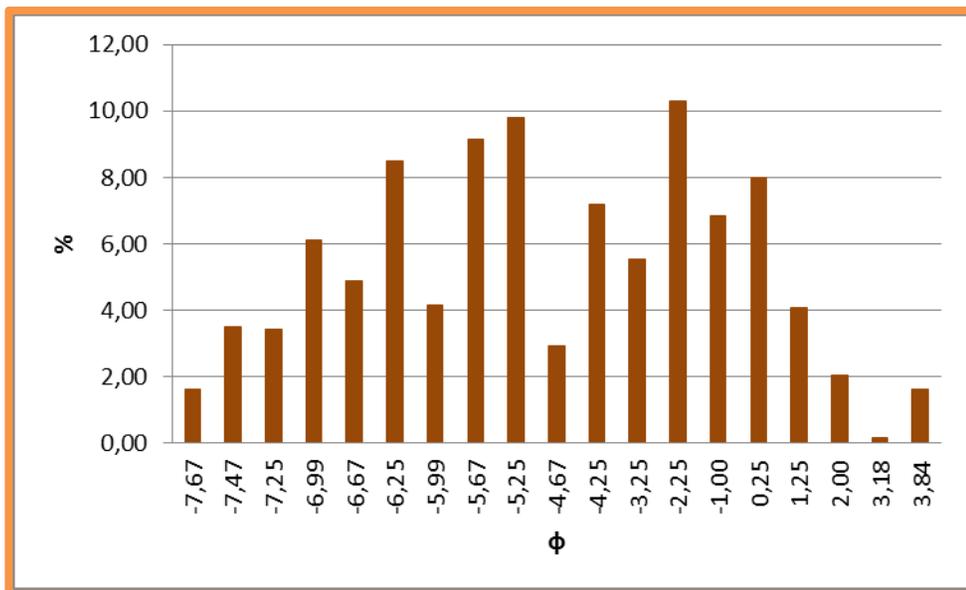


Figura 0.15 Histograma de rango en escala de ϕ , correspondiente a la muestra tomada en la calicata 1.

La curva de frecuencia acumulativa (Figura 0.16), posee una geometría cóncava, donde hasta ϕ igual a -5,25 presenta una trayectoria bastante recta, con un punto de inflexión local a los -4,67 ϕ , para continuar con menor pendiente, con un punto de mayor curvatura en 2 ϕ y un punto de inflexión relativo a los 3,18 ϕ .

En la Tabla 0.2 se muestran los valores de coeficientes estadísticos, obtenidos a partir de la interpolación de datos desde la curva acumulativa en escala de ϕ (Figura 0.16,

valores percentiles en Tabla 0.1), con los cuales se puede caracterizar la curva de frecuencia (Figura 0.16). De esta forma, se puede afirmar que esta muestra, posee una media de $-3,38 \phi$, lo que corresponde a 10,4 mm (grava), una muy mala selección, agrupando todo tipo de tamaños, una distribución con una marcada tendencia hacia los componentes gruesos, siendo la muestra con coeficiente de asimetría más marcado. La curva de frecuencia es mesocurta, mostrando una acumulación moderada en los componentes centrales.

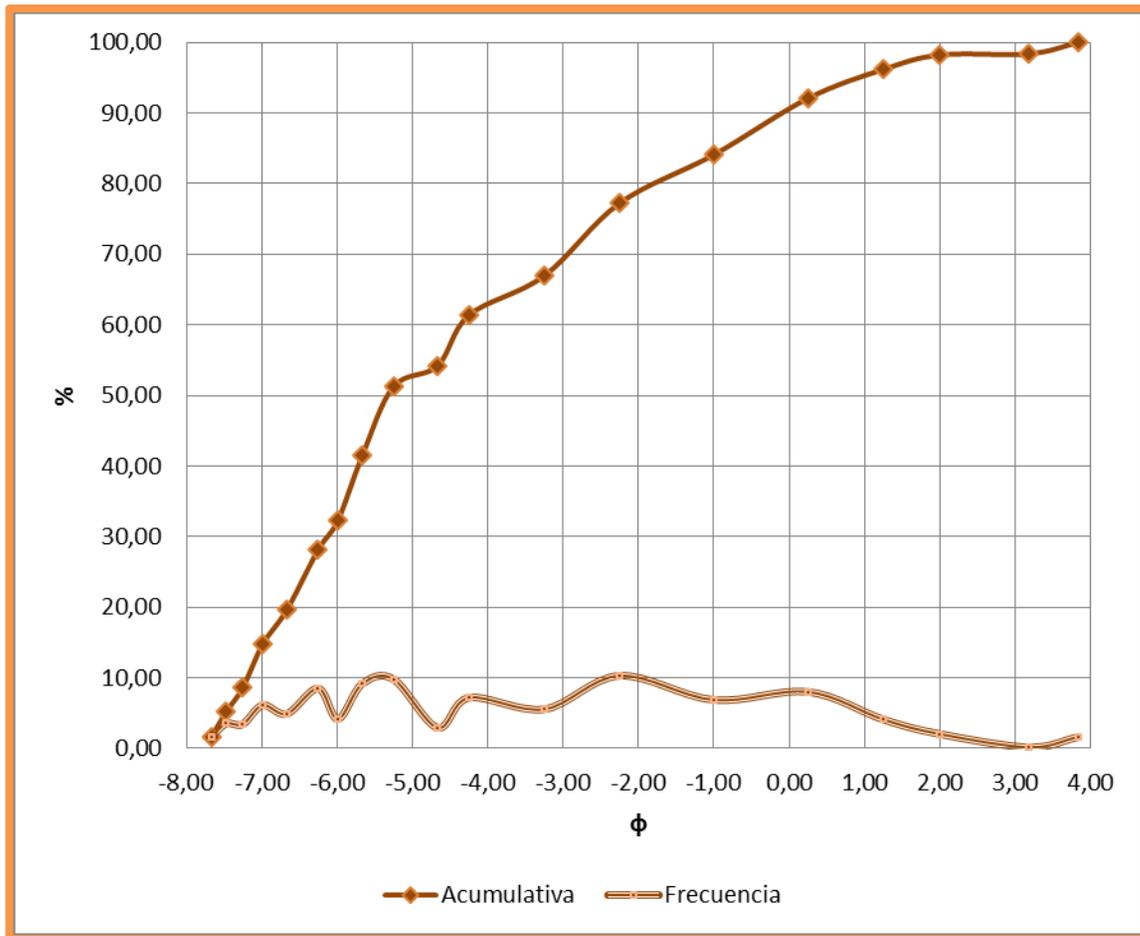


Figura 0.16 Curvas de frecuencia y frecuencia acumulativa en escala aritmética de calicata 1.

Tabla 0.1. Valores de percentiles para calicata 1.

ϕ_5	-7,50
ϕ_{16}	-6,80
ϕ_{25}	-6,46
ϕ_{50}	-5,30
ϕ_{75}	-2,75

ϕ_{84}	-1,00
ϕ_{95}	1,00

Tabla 0.2. Valores de coeficientes estadísticos de Folk (1974) para el análisis granulométrico de la calicata 1.

Máxima	-7,67 ϕ	203,20 mm
Mediana	-5,30 ϕ	39,40 mm
Moda	-2,25 ϕ	4,76 mm
Media	-4,37 ϕ	20,63 mm
Selección	2,74	
Sk	0,48	
K	0,94	

Calicata 2

Ubicada hacia el Oeste de la calicata 1, la calicata 2 se encuentra inmediatamente hacia el Este de la confluencia de la quebrada principal con la Quebrada Desvío Los Choros. Correspondiendo a la parada 10, descrita en la sección anterior (Ver ANEXO B, parada 10).

El histograma de rangos, que se muestra en la Figura 0.17, de esta calicata expone que la moda en $0,25\phi$ (0,84 mm). La concentración de es bastante difusa para los otros tamaños, observándose otros *peaks* relativos, mucho menos claros que en los casos anteriores, lo que indica una leve tendencia unimodal.

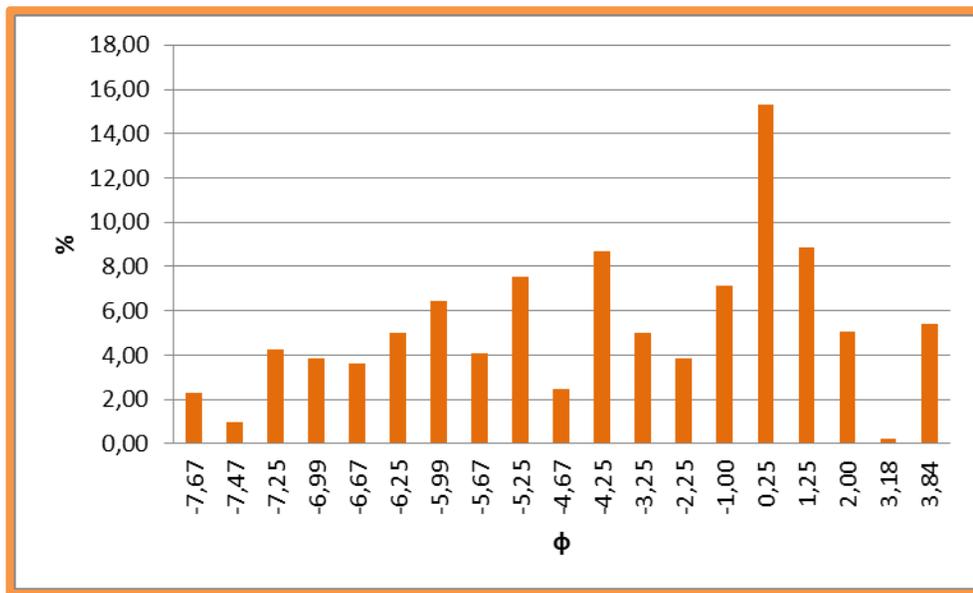


Figura 0.17 Histograma de rango en escala de ϕ , correspondiente a la muestra tomada en la calicata 2.

La curva de frecuencia acumulativa, presentada en la Figura 0.18, muestra una tendencia bastante recta para la calicata 2, presentando dos puntos de mayor convexidad a los $-4,67\phi$ y a los $3,18\phi$. Estos puntos dividen la curva en tres tramos: El primero con una clara tendencia recta de alta pendiente, y el segundo con una leve convexidad.

Los valores de los coeficientes estadísticos de la Tabla 0.4., obtenidos gracias a los valores percentiles de la Tabla 0.3, implican que la muestra de la calicata 2 presenta un tamaño medio de 10,1 mm (grava), una selección muy mala (con el valor de σ más alto de las muestras), agrupando todo tipo de tamaños, una distribución con una marcada tendencia hacia los componentes gruesos (Asimetría muy positiva), y una curva de frecuencia platicurta, lo que indica que presenta una sección central peor seleccionada que los extremos, presentando un *peak* más plano, y una peor selección.

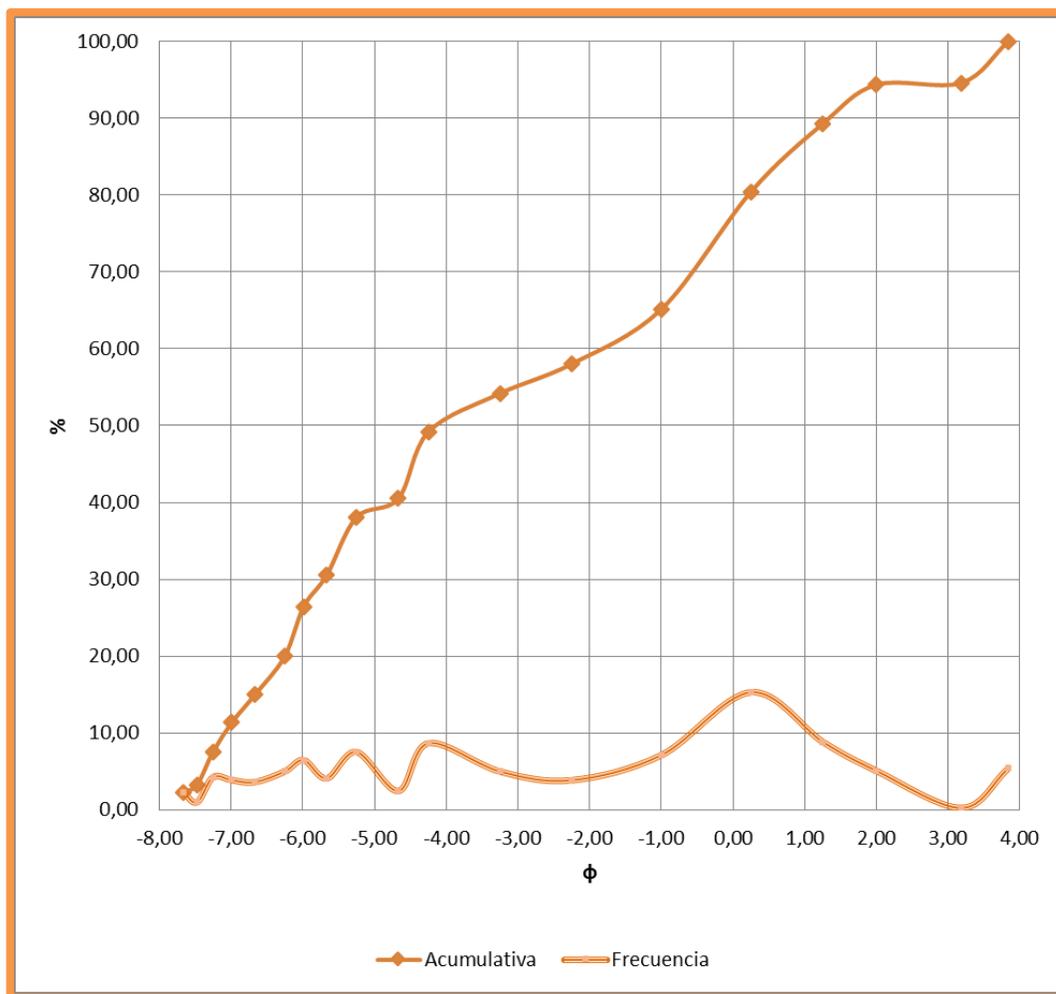


Figura 0.18 Curvas de frecuencia y frecuencia acumulativa en escala aritmética de calicata 2.

Tabla 0.3. Valores de percentiles para calicata 2

ϕ_5	-7,32
ϕ_{16}	-6,43
ϕ_{25}	-6,40
ϕ_{50}	-4,00
ϕ_{75}	-0,80
ϕ_{84}	0,30
ϕ_{95}	3,19

Tabla 0.4. Valores de coeficientes estadísticos de Folk (1974) para el análisis granulométrico de la calicata 2.

Máxima	-7,67 ϕ	203,20 mm
Mediana	-4,00 ϕ	16,00 mm
Moda	0,25 ϕ	0,84 mm

Media	-3,38 ϕ	10,39 mm
σ	3,27	
Sk	0,32	
K	0,77	

Calicata 3

Siguiendo hacia el Oeste, la calicata 3, fue realizada al oeste del camino a Los Choros en la intersección de éste con la quebrada principal, hacia el Oeste de la confluencia con la Quebrada Los Choros Altos. Correspondiendo al punto de control 12 descrito en el ANEXO B.

El histograma obtenido para esta calicata (Ver Figura 0.19) muestra un *peak* claro en $\phi = -4,25$ (19 mm). Además, de *peaks* relativos a los -5,67 y a los 6,25 ϕ , mostrando una distribución polimodal.

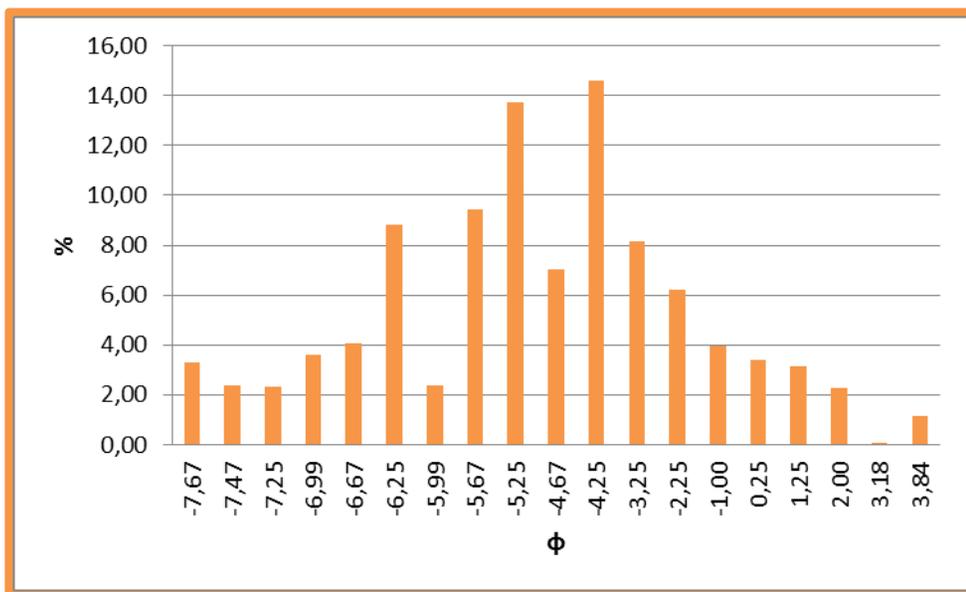


Figura 0.19 Histograma de rango en escala de ϕ , correspondiente a la muestra tomada en la calicata 3.

En la Figura 0.20 se muestra la curva de frecuencia acumulativa correspondiente a la presente parada, la cual presenta un carácter cóncavo, con leves puntos de inflexión en -5,99 y -4,67. Desde este último punto, la curva tiene una tendencia de menor pendiente que en el tramo más grueso, donde la pendiente es bastante alta. Además muestra un punto de cambio de curvatura a los 3,18 (en valor de ϕ).

Los valores de los coeficientes estadísticos, observados en la Tabla 0.6, (obtenidos gracias a los valores percentiles de la Tabla 0.7) se observa que la muestra de la calicata 3 presenta un tamaño medio de guijarro, una selección muy mala, agrupando todo tipo de tamaños, una distribución con una marcada tendencia hacia los componentes gruesos (Asimetría muy positiva) y una curva de frecuencia leptocurta, lo que indicaría una buena selección de la porción central, con respecto a los extremos.

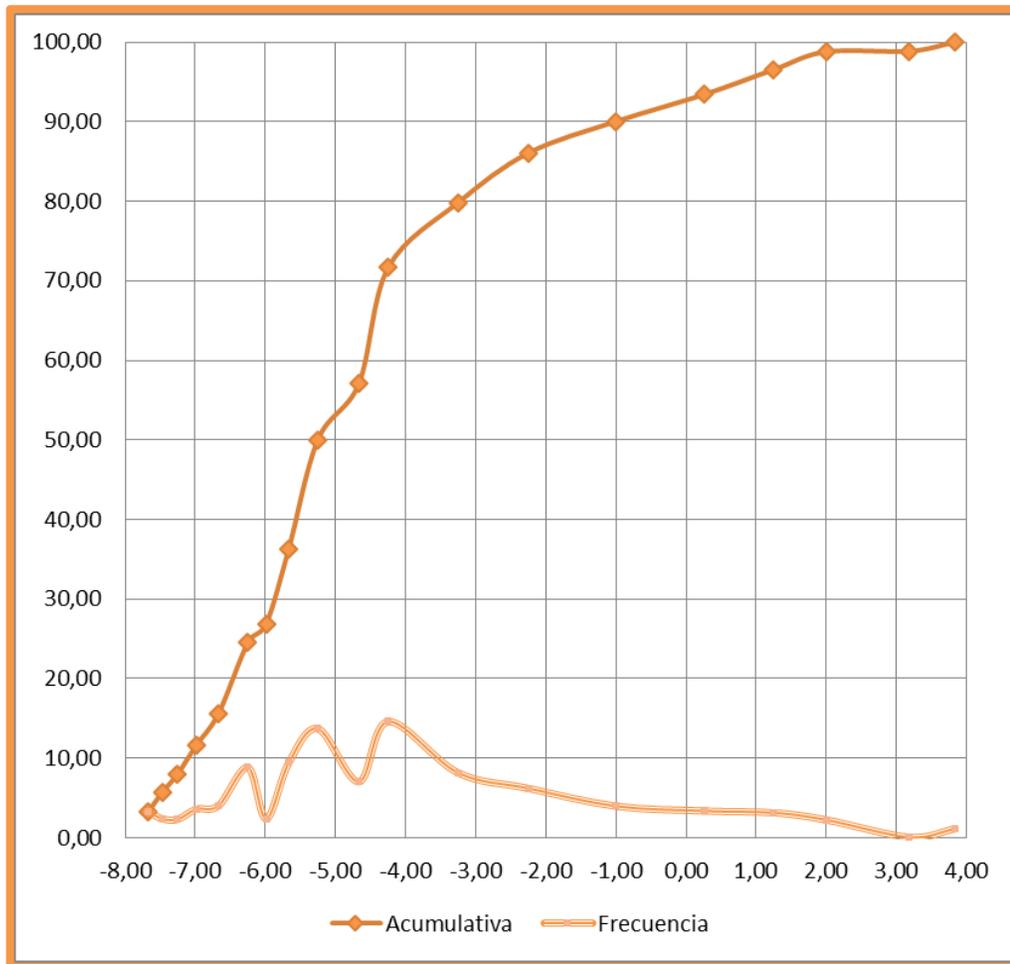


Figura 0.20 Curvas de frecuencia y frecuencia acumulativa en escala aritmética de calicata 3.

Tabla 0.5. Valores de percentiles para calicata 3

ϕ_5	-7,5
ϕ_{16}	-6,65
ϕ_{25}	-6,24
ϕ_{50}	-5,24
ϕ_{75}	-3,75
ϕ_{84}	-2,75

Φ_{95}	1
-------------	---

Tabla 0.6. Valores de coeficientes estadísticos de Folk (1974) para el análisis granulométrico de la calicata 3.

Máxima	-7,67 ϕ	203,20 mm
Mediana	-5,24 ϕ	37,79 mm
Moda	-4,25 ϕ	19,03 mm
Media	-4,88 ϕ	29,45 mm
σ	2,26	
Sk	0,37	
K	1,40	

Calicata 4

Ubicada a unos pocos metros de la desembocadura de la Quebrada Los Choros (Parada 16 en ANEXO B), a unos 2 km al Poniente de la localidad Choros Bajos, representa el relleno presente en los primeros 83 cm, ya que después de los cuales, se observaban depósitos propios de lagunas, principalmente conformado por arcillas limosas con plasticidad media-alta, hasta los 93 cm y, luego, hasta el metro de arena fina con presencia de fino arcilloso.

El histograma de rangos de esta calicata muestra un *peak* claro en -6,25 (76,2 mm). Donde la concentración de es bastante difusa para los otros tamaños, observándose otros *peaks* relativos entre los rangos -5,67 a los -5,35, -4,25 y entre los -1 y 0,25. Mostrando una clara tendencia polimodal, lo que se refleja en la Figura 0.21.

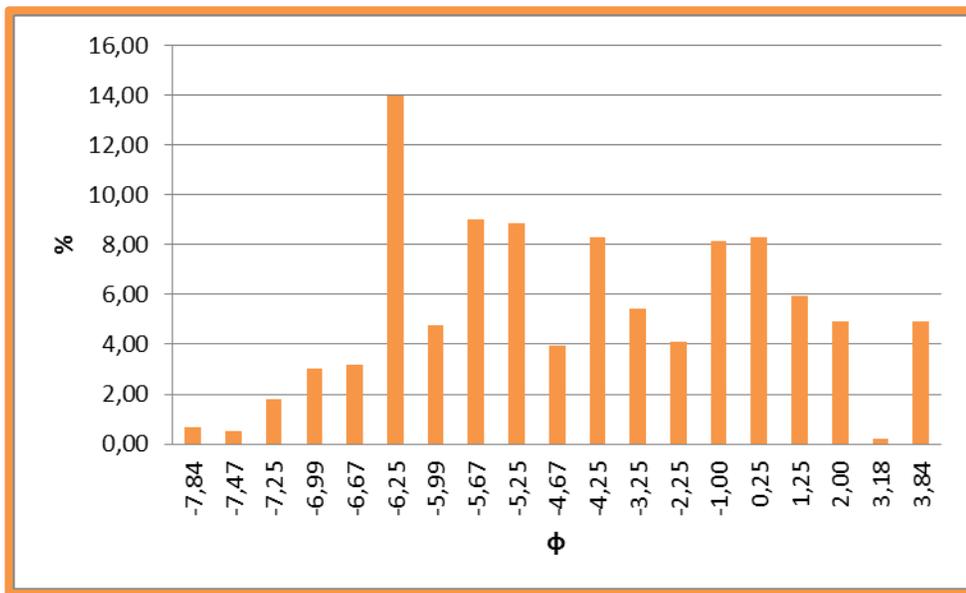


Figura 0.21 Histograma de rango en escala de ϕ , correspondiente a la muestra tomada en la calicata 4.

La curva de frecuencia acumulativa, presentada en el Figura 0.22, en primera instancia muestra una geometría bastante lineal, con cierta convexidad, con un punto de máxima curvatura en $-7,47\phi$, a partir $-5,25\phi$ muestra un carácter cóncavo, exceptuando la anomalía presente en el punto con phi igual a $-4,67\phi$, para continuar con una tendencia lineal de pendiente media a baja, y luego presentar un nuevo punto de máxima curvatura e inflexión en 2ϕ y $3,18\phi$, respectivamente.

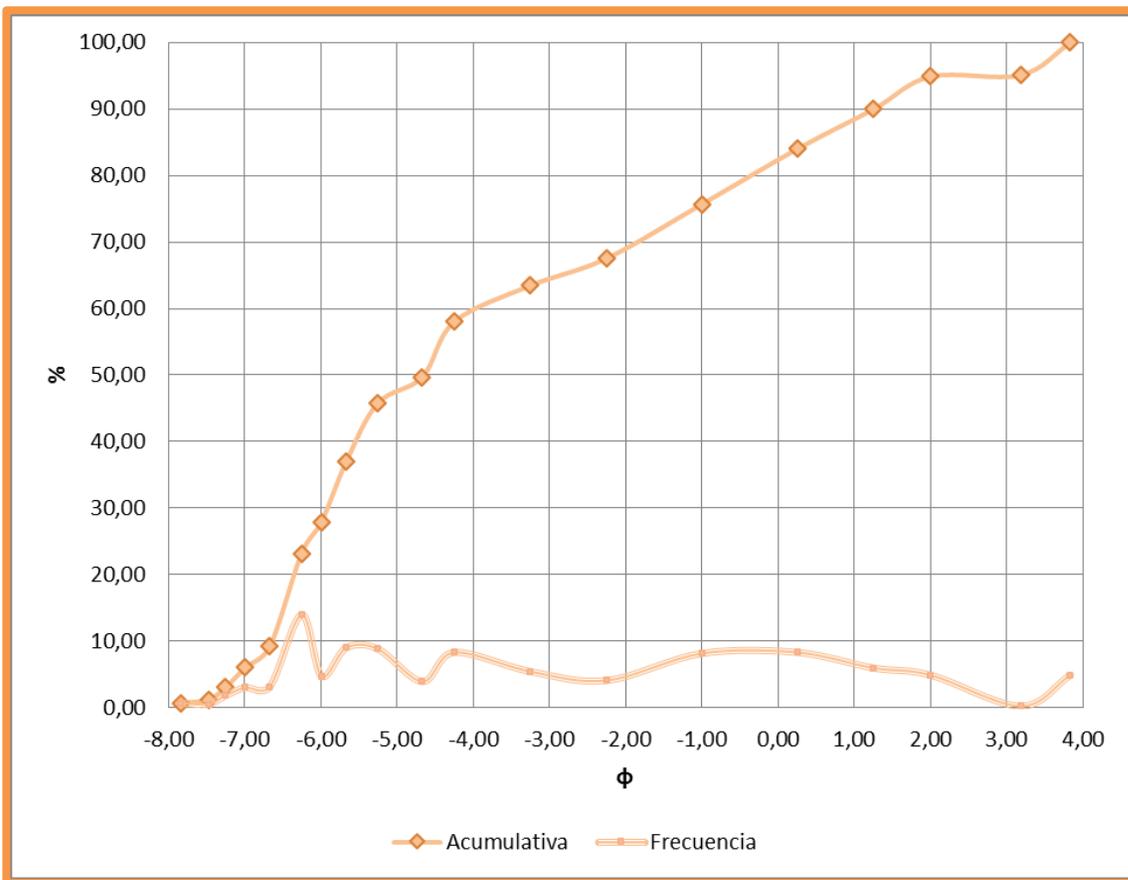


Figura 0.22 Curvas de frecuencia y frecuencia acumulativa en escala aritmética de calicata 4.

De los valores de los coeficientes estadísticos de la Tabla 0-8 (obtenidos gracias a los valores percentiles de la Tabla 0.7) se observa que la muestra de la calicata 4 presenta un tamaño medio de guijarro, una selección muy mala, agrupando todo tipo de tamaños, una distribución con una marcada tendencia hacia los componentes gruesos (Asimetría muy positiva) y una curva de frecuencia mesocorta, lo que indicaría que la muestra tiene una mala selección, mostrando gran distribución de tamaño de granos (gradada).

Tabla 0.7 Valores de percentiles para calicata 4

ϕ_5	-7,50
ϕ_{16}	-6,80
ϕ_{25}	-6,46
ϕ_{50}	-5,30
ϕ_{75}	-2,75
ϕ_{84}	-1,00
ϕ_{95}	1,00

Tabla 0.8 Valores de coeficientes estadísticos de Folk (1974) para el análisis granulométrico de la calicata 4.

Máxima	-7,84 ϕ	228,60 mm
Mediana	-5,30 ϕ	25,28 mm
Moda	-2,25 ϕ	76,11 mm
Media	-4,37 ϕ	12,44 mm
σ	2,74	
Sk	0,48	
K	0,94	

ANEXO F: Fotomicrografías cortes

Quebrada Los Choros

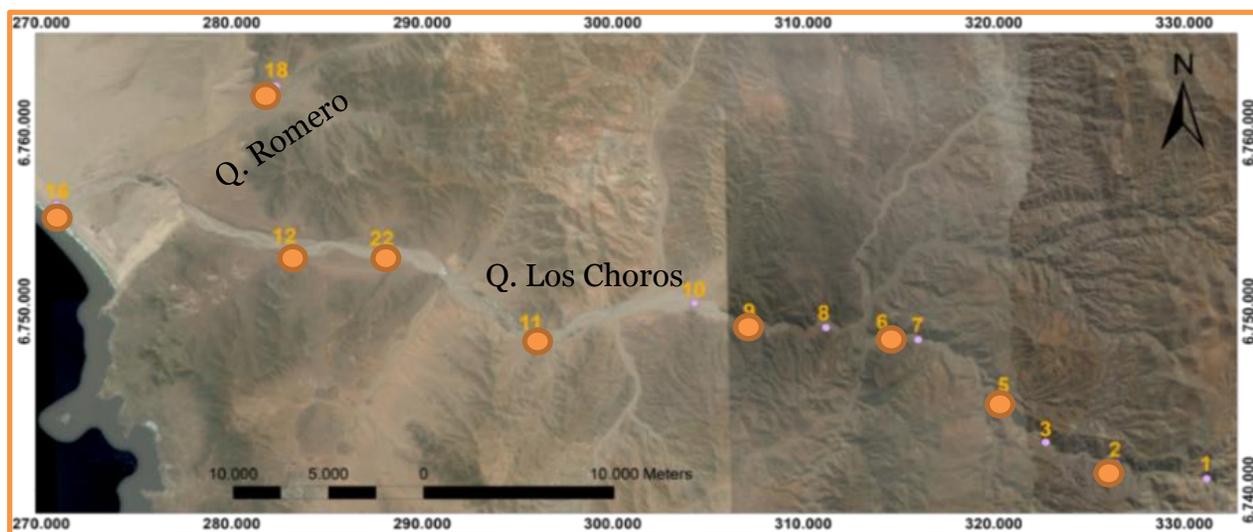


Figura 0.23 Ubicación de puntos de control en las quebradas Los Choros y Romero.

Punto de control 2

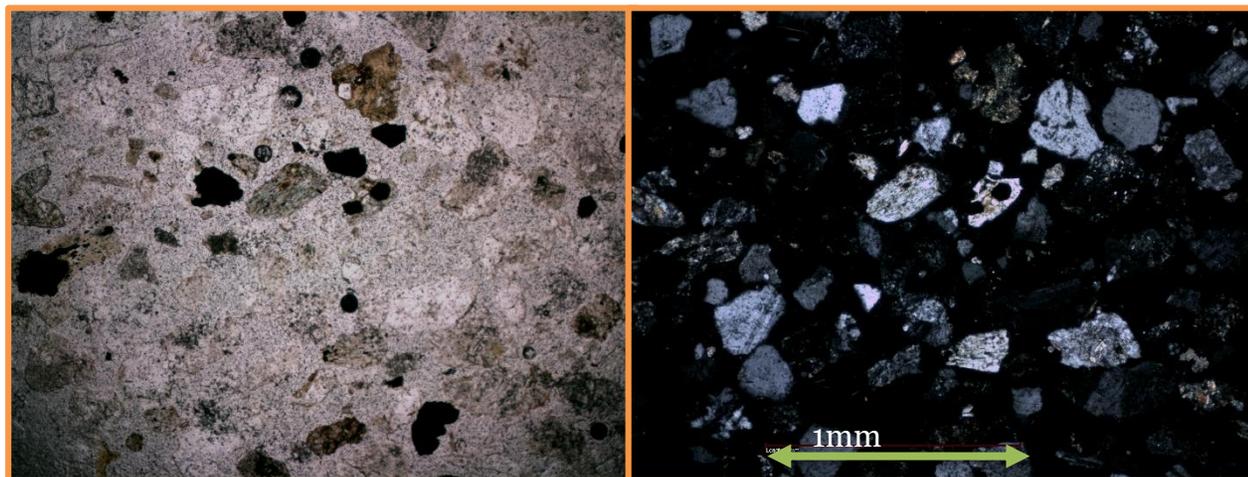


Figura 0.24 Fotomicrografía punto de control 2 a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.23.

Punto de control 5

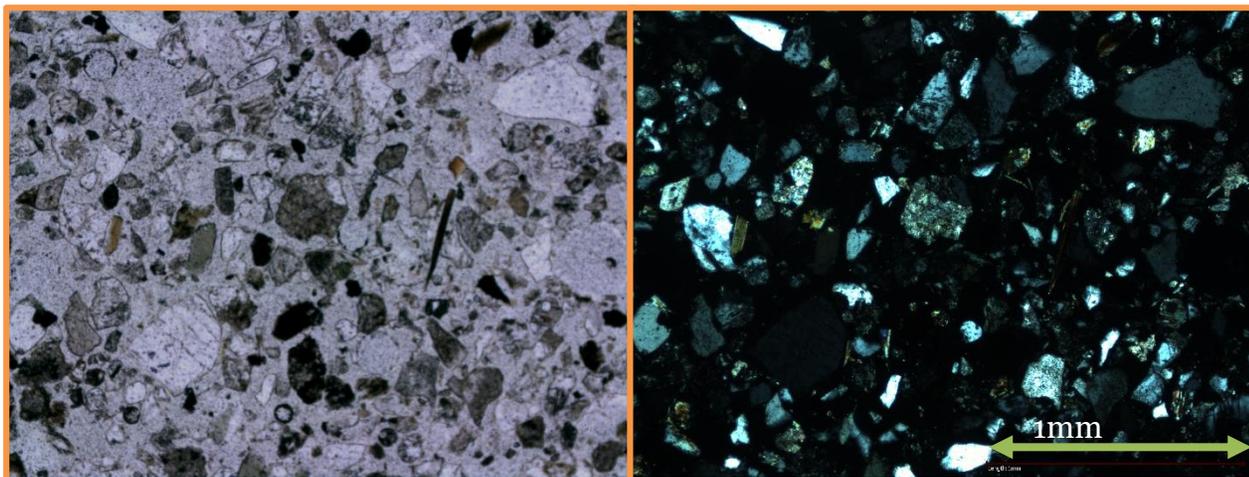


Figura 0.25 Fotomicrografía punto de control 5 a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.23.

Punto de control 6

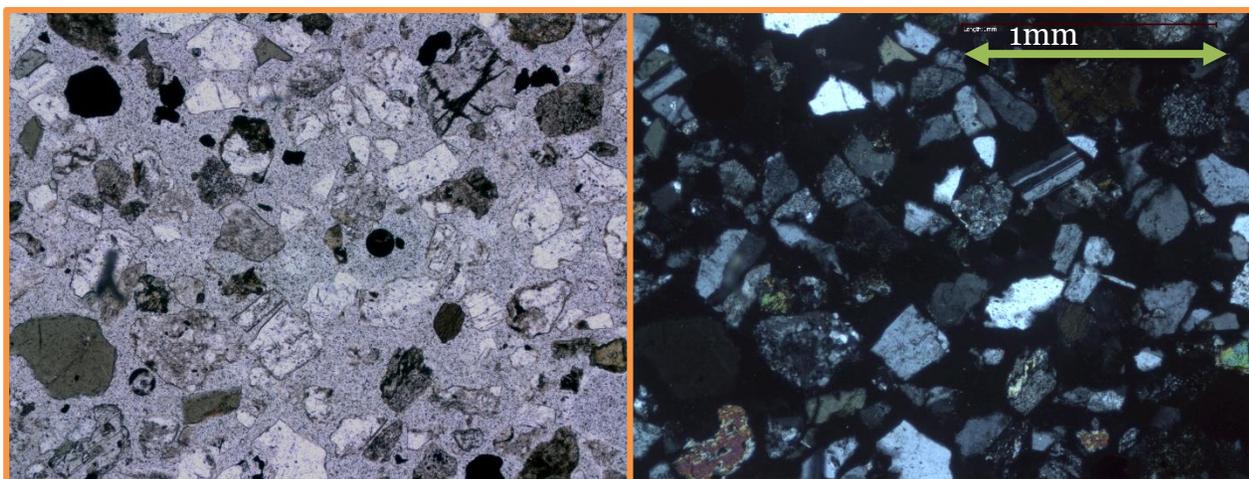


Figura 0.26 Fotomicrografía punto de control 6 a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.23.

Punto de control 9

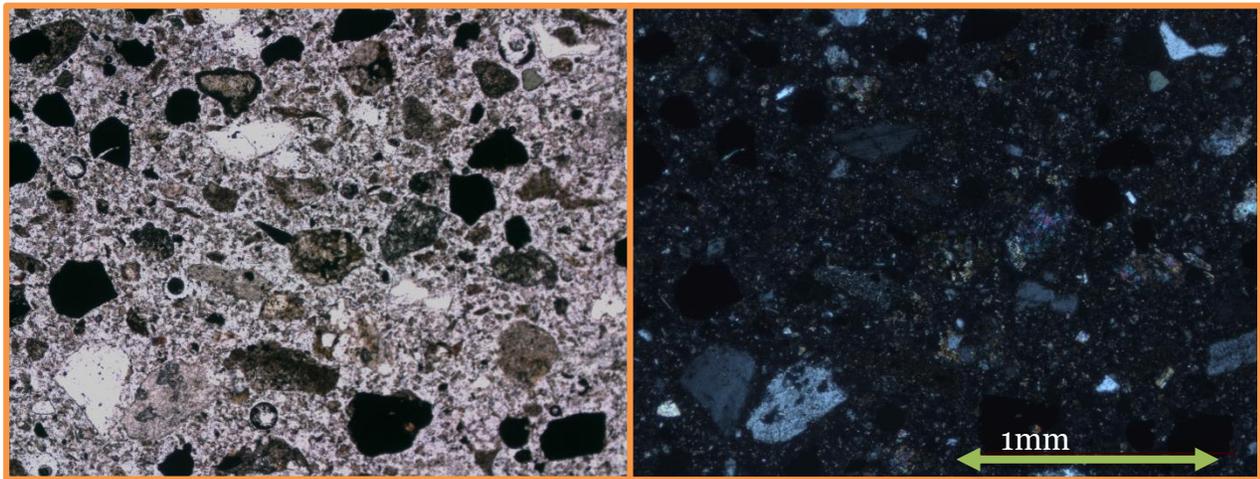


Figura 0.27 Fotomicrografía punto de control 9 a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.23.

Punto de control 11

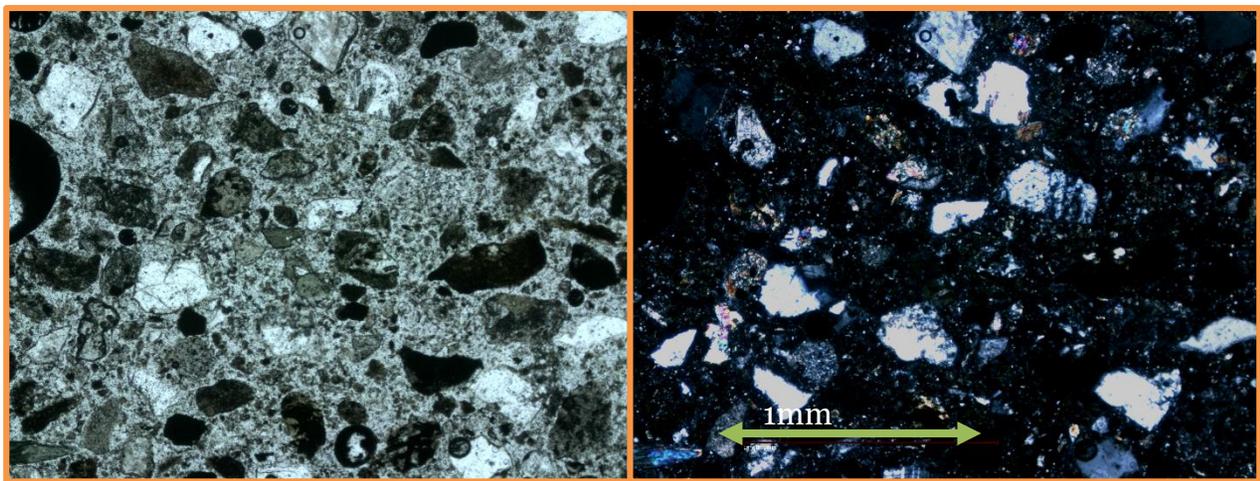


Figura 0.28 Fotomicrografía punto de control 11 a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.23.

Punto de control 22

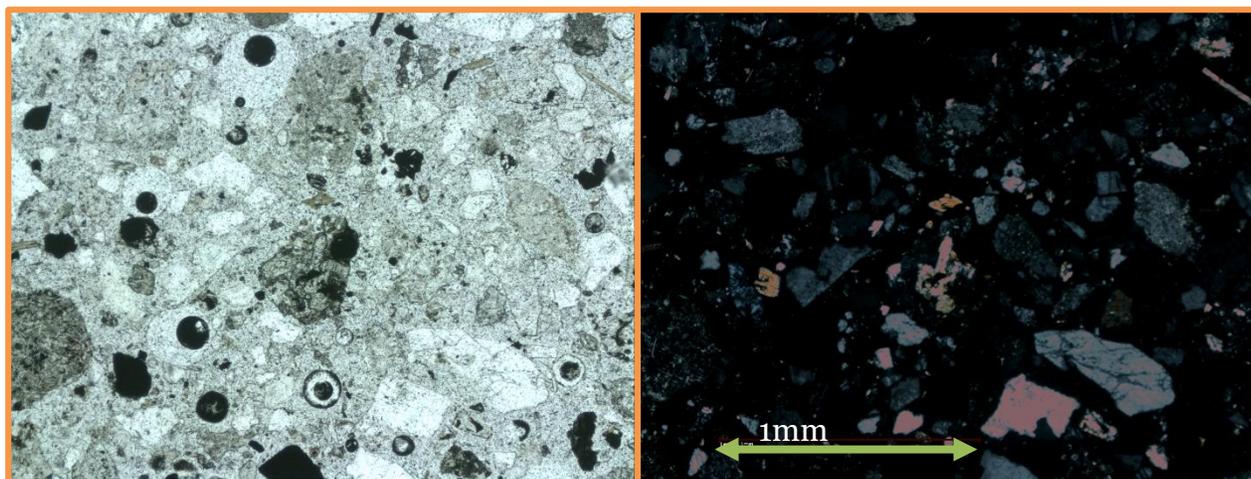


Figura 0.29 Fotomicrografía punto de control 22 a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.23.

Punto de control 12

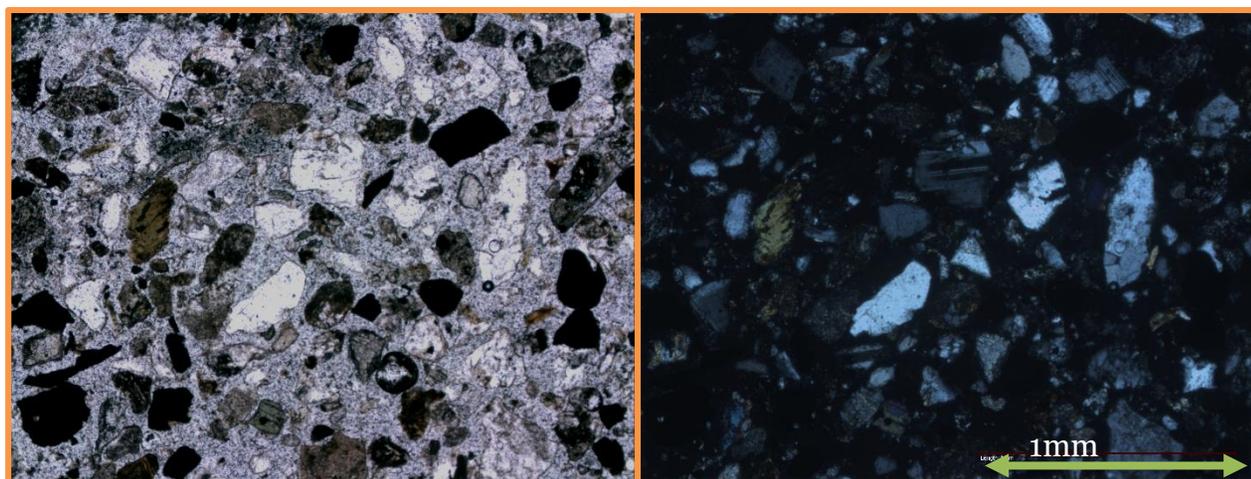


Figura 0.30 Fotomicrografía punto de control 12 a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.23.

Punto de control 16-desembocadura

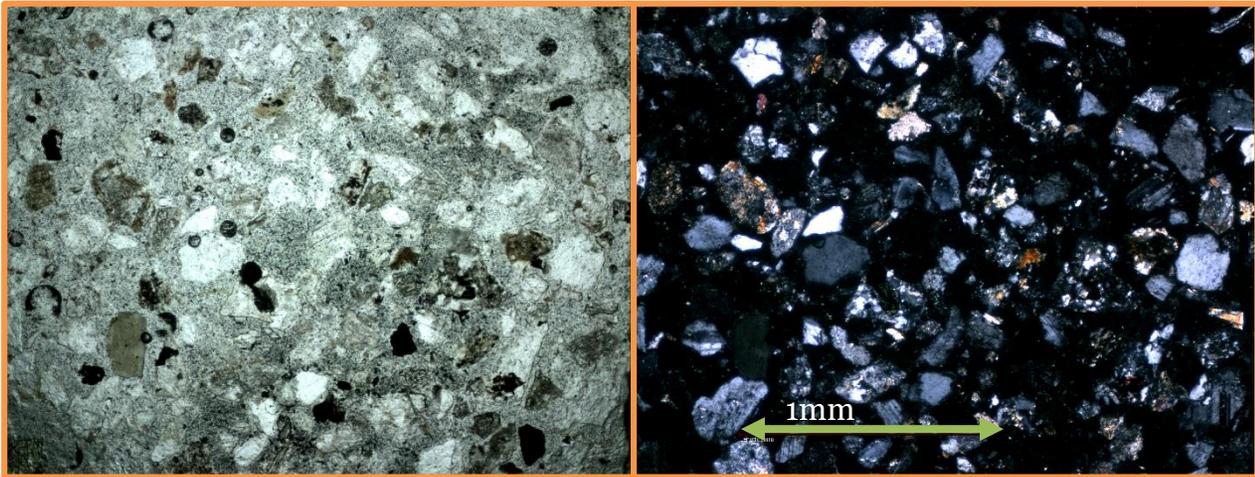


Figura 0.31 Fotomicrografía punto de control 16 a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.23.

Quebrada Romero

Punto de control 18

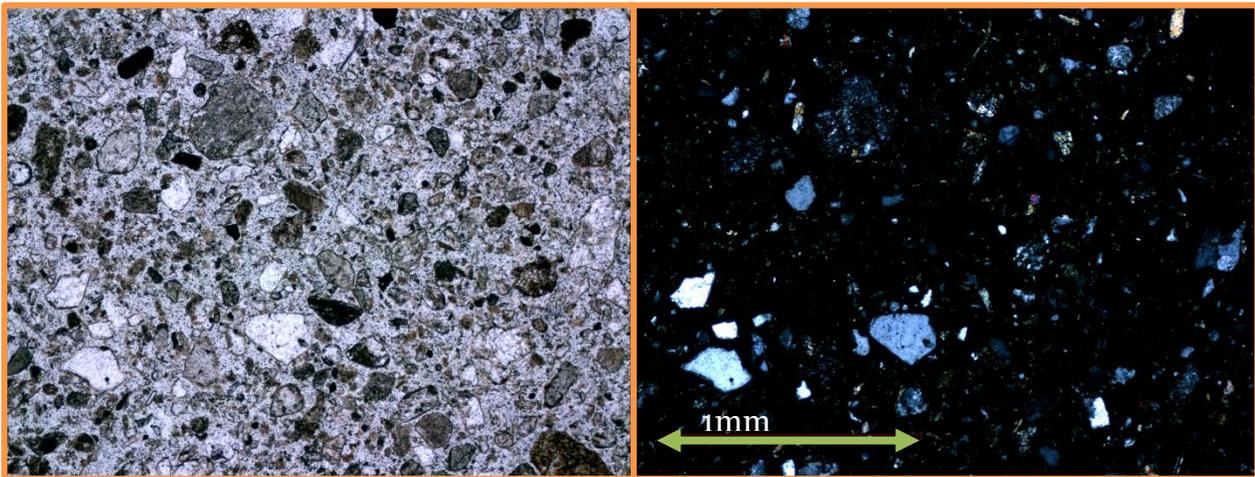


Figura 0.32 Fotomicrografía punto de control 18 a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.23.

Manto arenoso



Figura 0.33 Ubicación de puntos de control en mato arenoso, sectores Choros Bajos y Punta de Choros.

Sector Choros Bajos

Punto de control 14

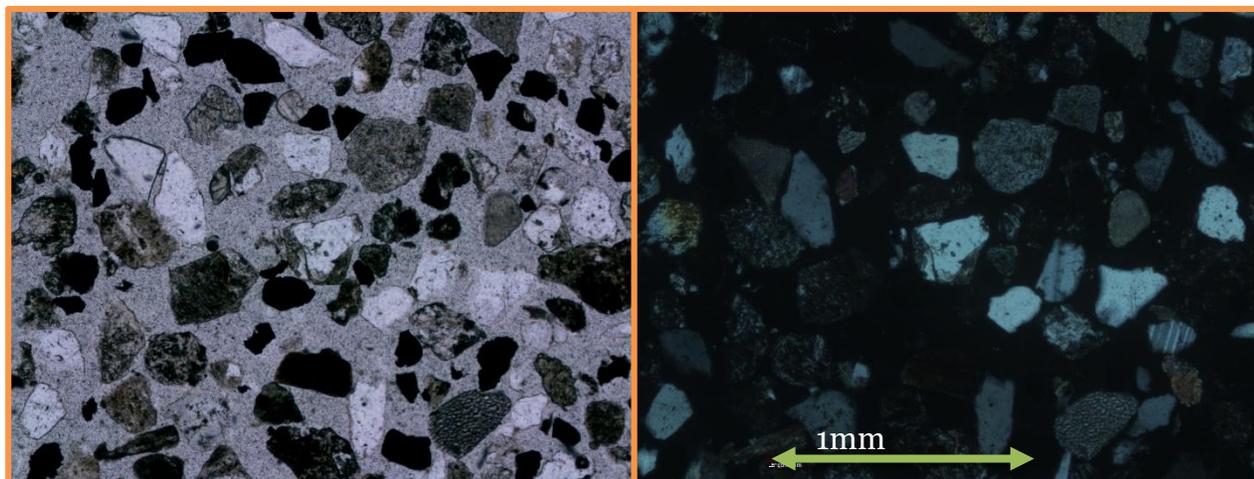


Figura 0.34 Fotomicrografía punto de control 14, sector Choros Bajos, a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.33.

Punto de control 15

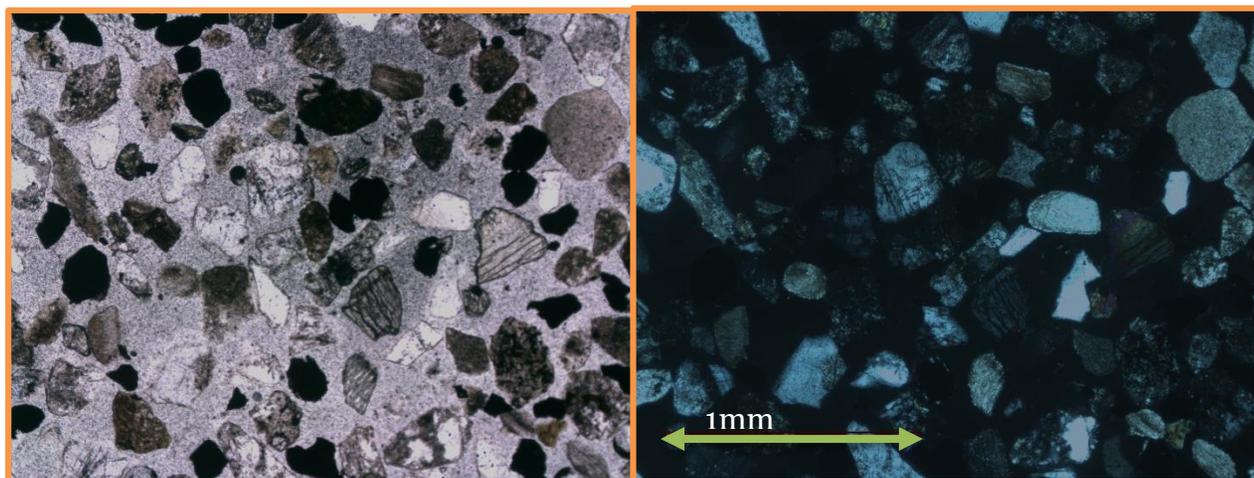


Figura 0.35 Fotomicrografía punto de control 15, sector Choros Bajos, a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.33.

Manto arenoso Punta de Choros

Punto de control 19

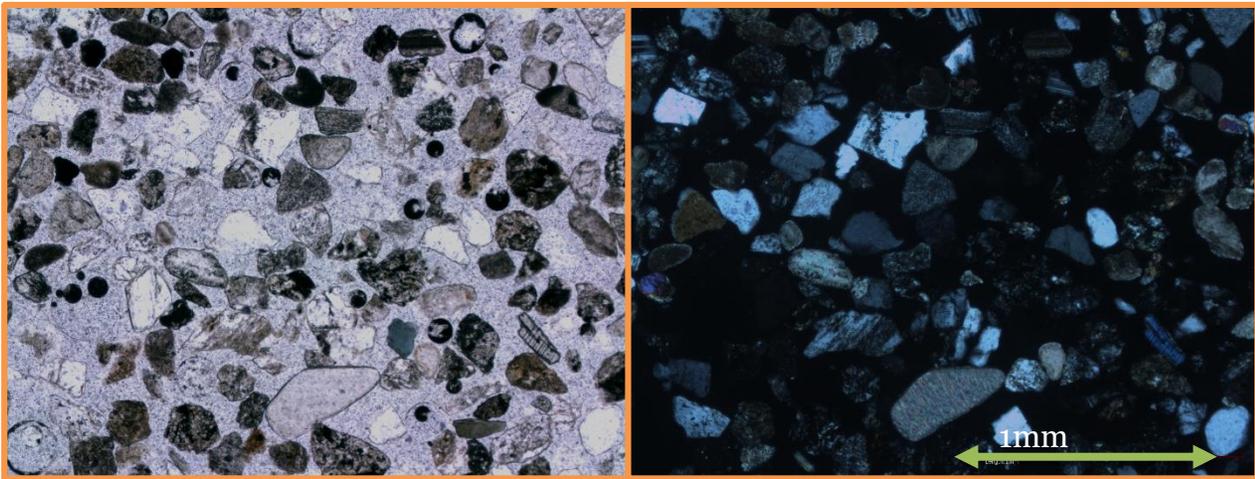


Figura 0.36 Fotomicrografía punto de control 19, sector Punta de Choros, a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.33.

Punto de control 20

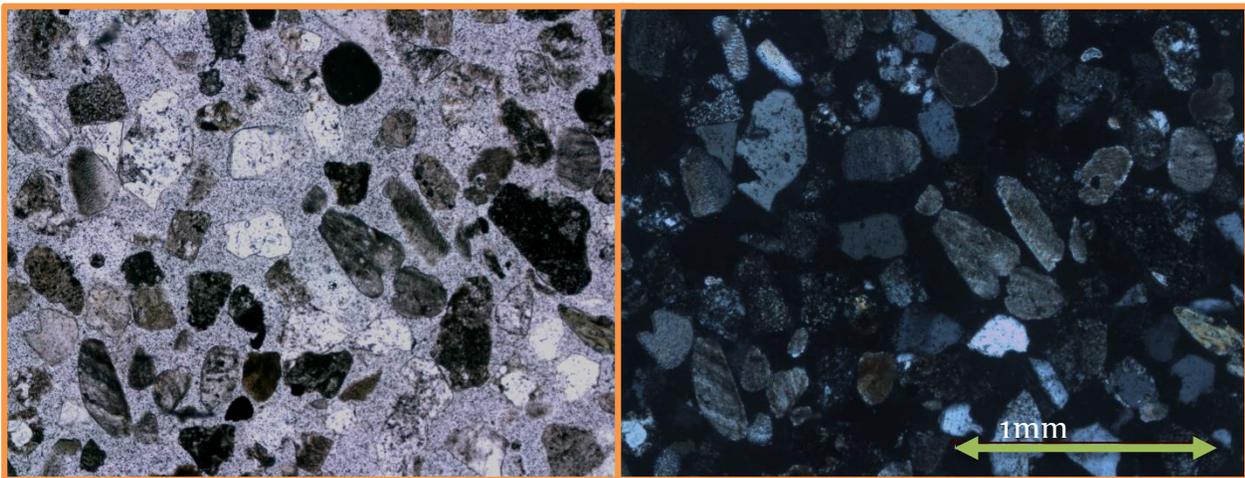


Figura 0.37 Fotomicrografía punto de control 20, sector Punta de Choros, a luz transmitida. Izq.: Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.33.

Punto de control 21

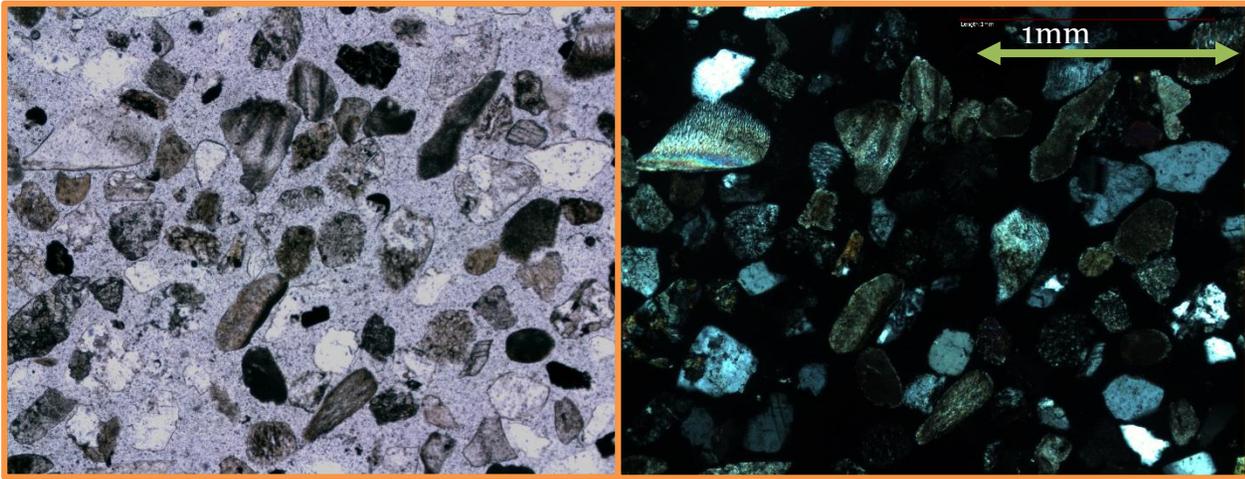


Figura 0.38 Fotomicrografía punto de control 21, sector Punta de Choros, a luz transmitida. Izq. Nícoles paralelo. Der.: Nícoles cruzado. Ver ubicación en Figura 0.33.

ANEXO G: Descripción de los tipos de fragmentos detríticos

<i>Fragmento detrítico</i>	<i>Descripción</i>
<i>Lsf</i>	Fragmentos sedimentarios finos, donde no se puede distinguir la mineralogía
<i>Lsm</i>	Líticos sedimentarios marinos, constituido por lutitas ricas en carbonatos, y fragmentos carbonáticos
<i>Lsc</i>	Lítico sedimentario continental, fragmento compuesto por cuarzo, plagioclasa, menor anfíbola. Con cemento presuntamente silíceo
<i>Lv</i>	Líticos volcánico e hipabisales, texturas porfídica, vitrofírica, felsítica, traquítica
<i>Carb</i>	Fragmentos monomineralicos de carbonatos
<i>Pl</i>	Fragmentos monominerálicos de plagioclasa, con macla albítica y en algunos casos con cierta zonación
<i>Qz</i>	Cuarzo monominerálico
<i>ÓxFeTi y vidrio</i>	Fragmentos de vidrio volcánico reemplazado completamente por óxidos de hierro y titanio, también se incluyen los fragmentos de óxidos de hierro y titanio
<i>Opx</i>	fragmentos monominerálicos de ortopiroxeno
<i>Anf</i>	Fragmentos monominerálicos de anfíbola (en su mayoría hornblenda)
<i>KF</i>	Fragmentos monominerálicos de feldespato potásico
<i>Larc</i>	Líticos compuestos exclusivamente por arcillas
<i>Cpx</i>	Fragmentos monominerálicos de Clinopiroxenos
<i>Ep</i>	Fragmentos de alteración epidótica, puede o no incluir fragmentos de epidota poli y mono cristalina
<i>Chl</i>	Fragmentos con alteración clorítica
<i>Farc</i>	Feldespatos indiferenciados alterados a arcillas
<i>Bt</i>	Fragmentos con alteración potásica, con presencia de biotita secundaria
<i>Ap</i>	Fragmentos monomineralicos de apatito
<i>Ligd</i>	Fragmentos granodioríticos, donde se observan mayor proporción de feldespato potásico y cantidades similares de plagioclasa y cuarzo
<i>Lid</i>	Fragmentos dioríticos con alta proporción de plagioclasa, cuarzo y feldespato potásicos casi inexistente
<i>Lig</i>	Fragmentos graníticos, muestra cantidades similares de cuarzo y feldespatos
<i>Act</i>	Fragmentos con alteración actinolítica, incluye fragmentos monomineralicos de actinolita
<i>Lit</i>	Fragmentos tonalíticos, con proporciones similares de plagioclasa y cuarzo, menor feldespato potásico

Anfalt	Fragmentos de anfíbola alteradas a óxidos de hierro y titanio y menor arcilla
Zr	Fragmentos monominerálicos de circones
Plalt	Plagioclasa alterada a arcillas y epidota
Xenocxs	Clinopiroxenos con coronas de hornblenda y clorita
Opx+Cpx	lamelas intercrecidas de ortopiroxeno y clinopiroxeno
Tit	Fragmentos monominerálicos de Esfeno
Pert	exsolución de feldespatos
Turm	fragmentos con alteración a turmalina
Bxs	Fragmentos brechizados, donde se ven minerales rotos en matriz de óxidos de hierro y titanio o de turmalina
Lmd	Líticos con indicios de metamorfismo dinámico, presencia de plagioclasas con macla aguja y cuarzos con extinción firmemente ondulosa
Lmag	Líticos con cuarzo poligonal
Grt	fragmentos monominerálicos de granate
Lmve	Líticos que presentan asociación mineral característica de facies esquistos verdes. Actinolita, Epidota, Clorita.

ANEXO H: Mineralogía y petrografía miembros terminales

Formación	Lsf	Lsm	Lsc	Lv	Carb	Pl	Qz	ÓxFeTi y vidrio	Opx	Hbl	KF	Larc	Cpx	Ep	Chl	Farc	Bt	Ap	Ligd	Lid	Lg	Act	Lit	Anfalc	Zr	Plait	Xenocxs	Opx+Cpx	Tit	Pert	Turm	Bxs	Lmd	Lmag	Grt	Total	
Fm Las Viñitas	12,00	0,00	30,00	18,00	0,00	15,10	4,25	1,25	0,00	1,50	4,15	0,00	4,75	5,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
CP El Peralta	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,95	9,95	0,77	0,00	2,92	8,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,61	0,00	12,00	20,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
CP El Tabaco	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,96	5,22	0,00	0,00	18,93	11,62	0,00	3,62	0,00	0,00	0,00	3,63	0,00	1,20	32,00	2,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
CP Los Morros	0,00	0,00	0,00	1,20	0,00	24,19	10,65	2,83	1,08	7,29	7,16	0,00	2,04	0,00	0,00	0,00	4,63	0,00	14,00	10,80	8,40	0,00	5,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Fm Cerrillos 1	2,45	0,82	6,37	34,39	1,00	11,64	6,27	14,70	0,78	1,55	1,43	0,00	7,85	0,00	0,00	4,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,28	0,00	0,00	3,50	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Fm Cerrillos 2	0,00	0,00	5,00	21,50	3,00	11,50	4,00	12,00	6,00	0,00	0,00	12,00	9,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
Fm Nantoco	82,76	3,57	3,57	3,57	2,57	2,57	0,36	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Fm Totoralillo	50,00	26,00	0,00	0,00	22,50	0,00	1,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Fm Pabellón	45,95	34,89	1,78	0,57	15,06	0,54	0,27	0,36	0,00	0,25	0,03	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Grupo Chañarcillo	59,57	21,49	1,78	1,38	13,38	1,04	0,54	0,63	0,00	0,08	0,01	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Fm Bandurrias	8,72	10,08	53,60	5,46	5,20	4,80	2,00	6,08	1,68	1,76	0,40	0,00	0,16	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Fm Punta del Cobre																																					0,00
Miembro 1	16,20	5,00	0,00	1,90	5,00	1,01	49,35	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	14,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,50	0,00	0,00	0,00	100,00	
Miembro 2	16,25	0,00	16,25	7,00	0,00	9,63	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
Miembro 3	1,80	0,00	1,40	41,38	0,00	10,61	5,45	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	6,80	1,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,99	0,00	0,00	0,00	26,43	0,00	0,00	0,00	0,60	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
Miembro 4	38,12	5,94	3,15	1,82	36,05	0,06	0,00	0,00	0,63	0,00	0,00	0,00	0,63	11,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,89	0,32	100,00	
Miembro 5	14,00	0,00	2,10	27,30	0,00	2,52	0,00	10,08	0,00	0,00	0,00	8,40	0,00	0,00	1,12	5,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,20	0,00	0,00	0,00	5,04	0,00	0,00	0,00	0,00	13,20	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
Miembro 6	0,00	0,00	2,63	43,00	0,00	4,00	0,00	25,50	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	4,50	4,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,38	0,00	0,00	0,00	4,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
CP Las Cabras	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,04	9,41	1,25	0,00	1,25	5,06	0,00	2,49	6,75	0,00	2,01	0,75	0,00	13,50	26,13	9,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
CP Agua Grande	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,74	5,65	0,00	0,00	7,76	6,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,53	0,00	16,82	20,00	8,24	0,00	8,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,35	1,18	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
CP Domeyko	0,00	0,00	0,00	7,00	0,00	30,95	10,88	1,80	0,00	8,80	4,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,80	0,01	5,47	2,40	14,32	0,00	3,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	2,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Int hip dactíco	0,00	0,00	0,00	34,90	0,00	20,00	8,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,99	0,00	0,00	2,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Dior Las Campanas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,73	10,45	2,10	0,00	4,20	3,82	0,00	7,35	0,00	0,00	0,00	7,35	0,00	12,00	16,00	8,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
CP Domeyko	0,00	0,00	0,00	7,00	0,00	30,95	10,88	1,80	0,00	8,80	4,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,80	0,01	5,47	2,40	14,32	0,00	3,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	2,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
C.P. El Trapiche	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	60,90	0,30	0,20	0,00	2,00	0,30	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,10	31,09	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
C.P. La Higuera	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,00	10,96	2,40	0,00	7,40	2,68	0,00	0,00	0,00	1,20	4,20	4,96	0,06	6,74	24,40	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
CP El Tofo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,20	10,59	1,75	0,00	10,47	5,16	12,25	4,90	3,50	4,38	5,25	3,12	0,00	4,50	5,25	4,50	5,25	5,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
CP Las Docas	0,00	0,00	0,00	1,50	0,00	29,35	12,00	0,00	0,00	7,28	2,46	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	8,08	0,00	3,12	27,16	0,00	2,02	1,60	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	4,60	0,38	0,00	0,00	100,00
Int Hip Las Gualtatas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	50,00	0,00	0,00	38,50	0,00	0,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Hipab rio y dac	0,00	0,00	0,00	14,48	0,00	9,32	20,92	0,72	0,00	2,64	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	1,68	0,72	0,00	8,40	0,00	34,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	6,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	

ANEXO I: Resultados conteos modales

RESULTADOS CONTEOS MODALES, EN AMARILLO MUESTRAS QUE CORRESPONDEN AL MANTO ARENOSO

Matrix X	Carb	Pl	Qz	Opx	Hbl	KF	Cpx	Ap	Act	Lsf	Lsm	Lsc	Lv	ÓxFeTi y vidrio	Larc	Ep	Chl	Farc	Bt	Ligd	Lid	Lig	Lit	Anf alt	Zr	Plait	Xeno cxs	Opx+ Cpx	Tit	Pert	Turm	Bxs	Lmd	Lmat	Lmve	Total
Punto Muestreo 2	1,80	13,00	7,10	1,50	2,20	12,60	0,40	0,00	0,00	0,60	0,20	0,30	3,40	5,20	2,60	1,50	0,20	7,70	2,00	2,50	5,50	18,90	0,00	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,00	1,10	5,50	0,40	0,00	100	
Punto Muestreo 5	0,70	10,30	7,69	0,90	2,10	11,30	0,40	0,10	0,00	1,20	0,20	1,20	4,10	7,19	3,00	3,00	0,00	8,50	0,20	5,23	7,23	15,41	0,00	3,53	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,30	0,00	1,00	4,50	0,40	0,00	100
Punto Muestreo 6	0,00	7,60	8,30	0,40	1,90	9,80	0,00	0,00	0,00	4,10	0,40	0,40	3,50	9,40	1,20	1,50	0,00	7,20	0,40	2,70	6,60	26,50	0,00	4,70	0,00	0,40	0,00	0,00	1,90	0,00	0,00	1,10	0,00	0,00	100	
Punto Muestreo 9	0,49	6,83	7,81	0,00	3,42	5,37	0,98	0,00	0,00	3,44	0,31	0,00	2,19	23,42	4,07	1,74	0,63	5,63	0,98	1,56	1,57	20,01	2,82	0,00	0,00	0,31	0,31	0,00	0,00	1,56	0,31	1,88	0,48	1,88	0,00	100
Punto Muestreo 11	0,55	11,14	5,84	0,05	3,25	12,49	0,79	0,00	0,56	2,54	0,32	0,37	13,70	12,76	1,64	1,38	0,65	3,16	0,29	2,50	5,61	15,50	0,85	0,00	0,00	0,80	0,09	0,00	0,00	0,47	0,09	1,92	0,14	0,56	0,00	100
Punto Muestreo 22	0,90	5,50	7,70	0,00	4,50	24,10	0,00	0,00	0,00	1,80	0,50	0,00	16,40	5,90	0,00	0,90	0,00	2,70	0,00	4,50	4,50	20,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
Punto Muestreo 12	0,80	8,40	13,20	0,80	3,60	6,00	0,00	0,00	0,00	6,00	0,40	0,00	3,60	8,80	2,80	6,80	0,00	4,40	1,20	2,80	3,20	17,60	2,00	2,40	0,00	0,00	0,00	0,00	2,40	0,00	0,00	0,80	2,00	0,00	100	
Punto Muestreo 18	4,63	16,06	12,49	0,00	6,06	6,78	0,35	0,00	0,70	0,70	0,00	0,35	4,63	3,20	3,56	1,78	0,00	2,85	0,00	3,92	12,35	12,13	0,35	5,35	0,00	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,00	0,00	0,00	100
Punto Muestreo 16	1,10	9,10	13,70	0,80	2,30	7,10	0,40	0,00	0,00	2,10	2,30	4,50	3,00	2,30	0,00	0,00	0,00	11,40	0,00	2,70	8,30	14,00	0,00	4,20	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00	3,00	0,40	4,20	0,80	1,50	0,00	100
Punto Muestreo 14	3,21	3,85	7,69	0,00	0,00	14,42	0,00	0,00	0,00	0,00	13,14	1,92	4,17	13,46	1,92	8,65	0,00	0,96	2,56	0,00	4,17	12,82	0,00	0,96	0,00	0,00	0,00	0,96	0,32	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	4,49	100
Punto Muestreo 15	0,63	7,53	8,15	0,00	3,76	20,06	0,94	0,00	0,00	0,00	7,52	0,00	5,02	15,36	0,63	10,35	0,00	1,88	1,25	3,76	2,82	9,40	0,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
Punto Muestreo 19	0,00	6,28	9,29	0,00	2,19	17,21	0,00	0,00	0,00	0,00	16,94	0,82	1,92	0,55	3,82	4,10	1,09	7,65	0,00	0,00	2,45	19,67	3,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	2,19	0,55	0,00	0,00	100	
Punto Muestreo 20	0,00	4,91	8,79	0,00	1,55	10,08	0,26	0,00	0,00	0,00	11,63	3,62	0,52	0,52	2,07	2,59	2,33	5,17	0,00	1,81	6,98	27,39	7,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,81	0,52	0,00	0,00	100	
Punto Muestreo 21	0,00	5,66	9,43	0,00	1,26	11,95	0,31	0,00	0,00	0,00	27,36	3,14	2,83	0,63	1,88	6,60	1,88	3,46	0,00	1,26	4,08	11,05	4,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	1,26	0,63	0,00	0,94	100	

ANEXO J: Limitaciones método Vezzoli (2007)

Por definición, las filas de y , b y X están sujetas a las siguientes limitaciones de no-negatividad y suma constante (la suma de los valores de las columnas de las matrices X e y son constante $c=100\%$)

$$\sum_{j=1}^p y_{1j} = c, \quad y_{1j} \geq 0$$

$$\sum_{k=1}^n b_{k1} = 1, \quad b_{1k} \geq 0$$

$$\sum_{j=1}^p x_{1j} = c, \quad x_{kj} \geq 0$$

La solución de la ecuación (1) consiste en el cálculo de los coeficientes b tal que:

$$\hat{y} = bX$$

Donde \hat{y} es un vector fila con información composicional calculada con p columnas representando las variables. Esta ecuación es un modelo de regresión lineal (o mezcla perfecta).

Para llegar a este modelo de mezcla se hace una serie de supuestos:

- El orden de variables composicionales o categorías es irrelevante
- La variación composicional observada refleja una mezcla lineal o un proceso análogo con una medida de error superpuesto
- La composición de los miembros terminales es fija
- La composición de los miembros terminales es cercana como sea posible a su composición real.
- La composición de los miembros terminales es linealmente independiente, esto quiere decir que ninguno de los miembros terminales puede ser representado como una mezcla de los otros miembros terminales.

ANEXO K: Posible aporte acumulativo en cada subcuenca

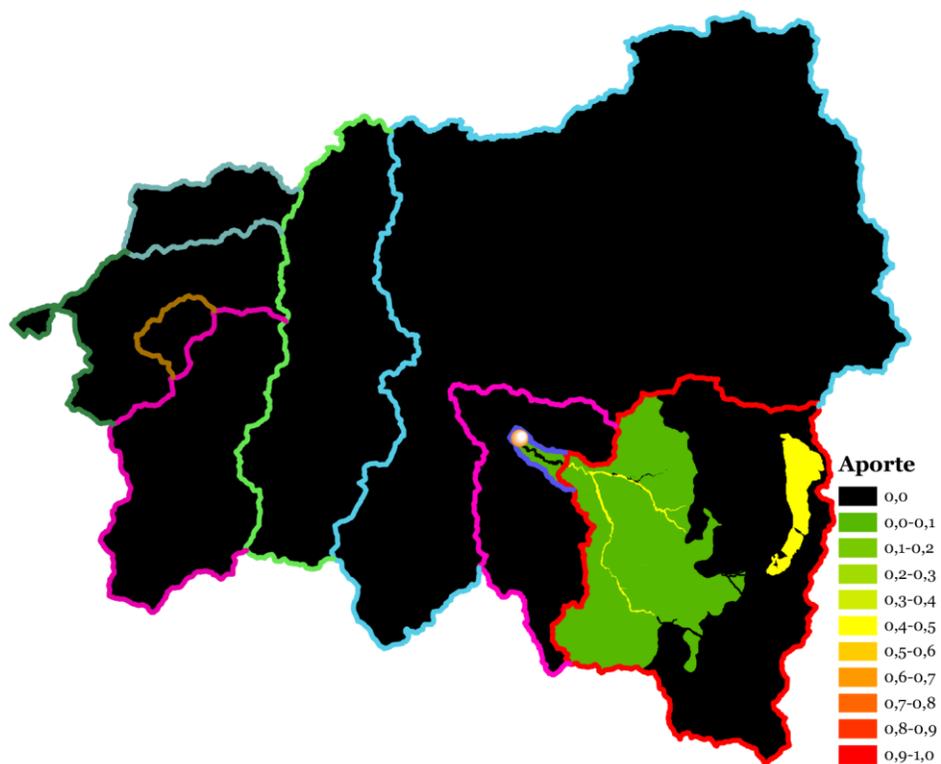


Figura 0.39 Probable aporte acumulativo subcuenca número 5.

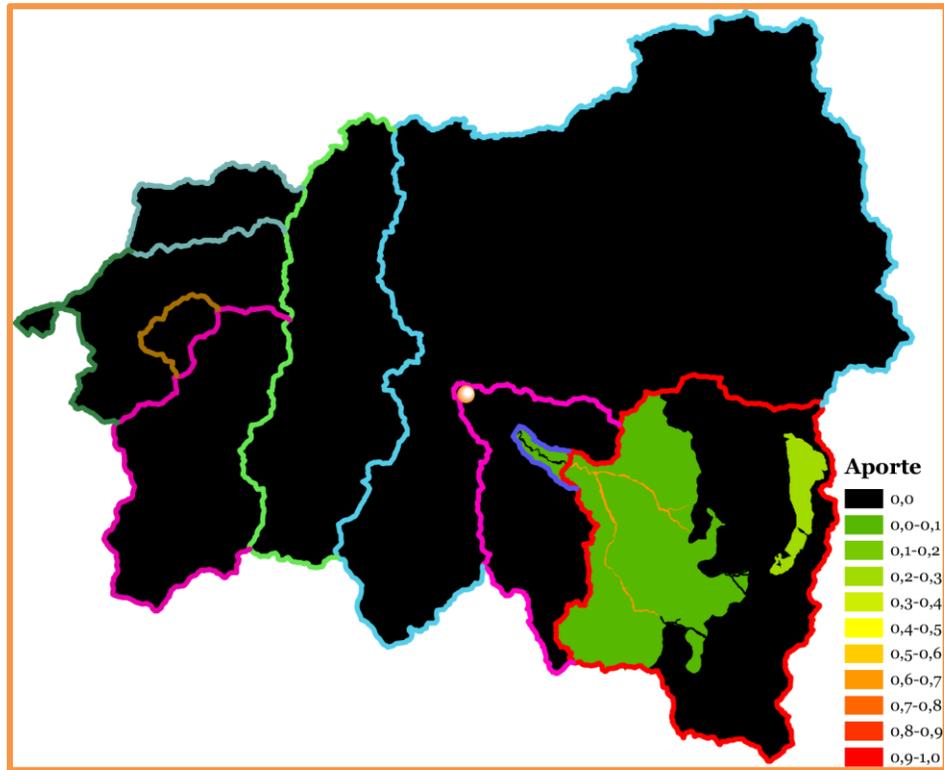


Figura 0.40 Probable aporte acumulativo subcuena número 6.

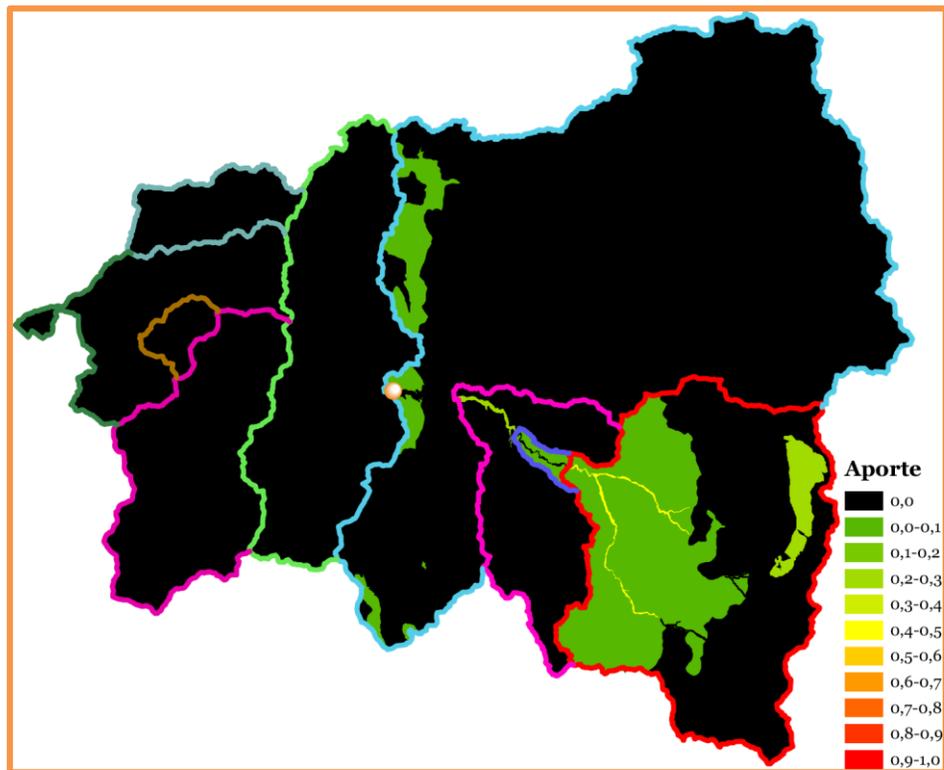


Figura 0.41 Probable aporte acumulativo subcuena número 9.

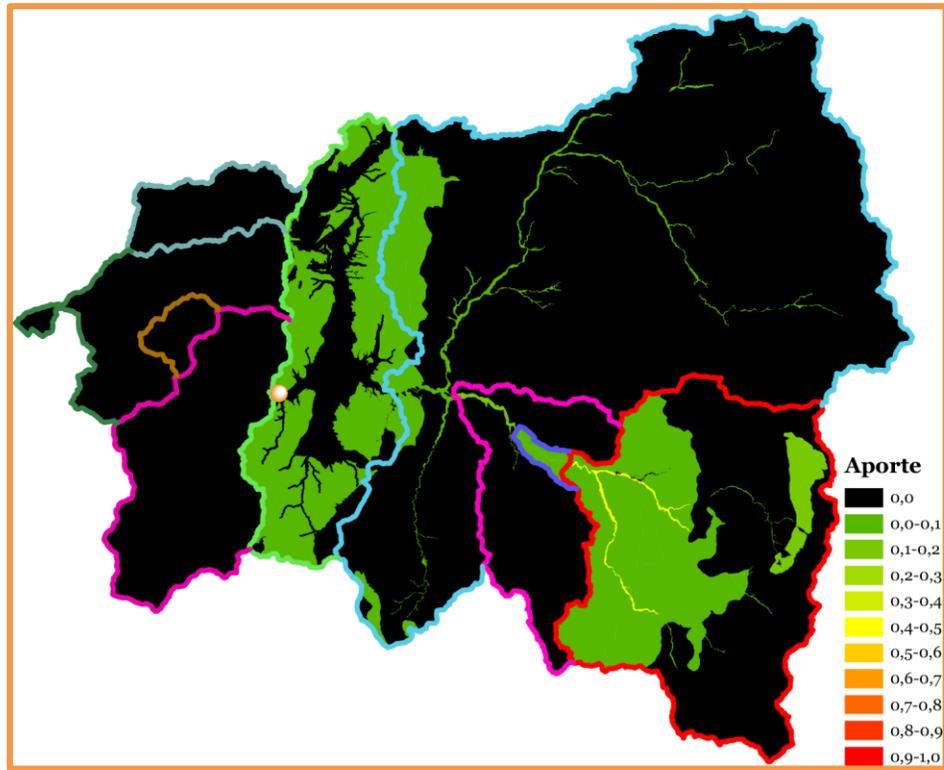


Figura 0.42 Probable aporte acumulativo subcuenca número 11.

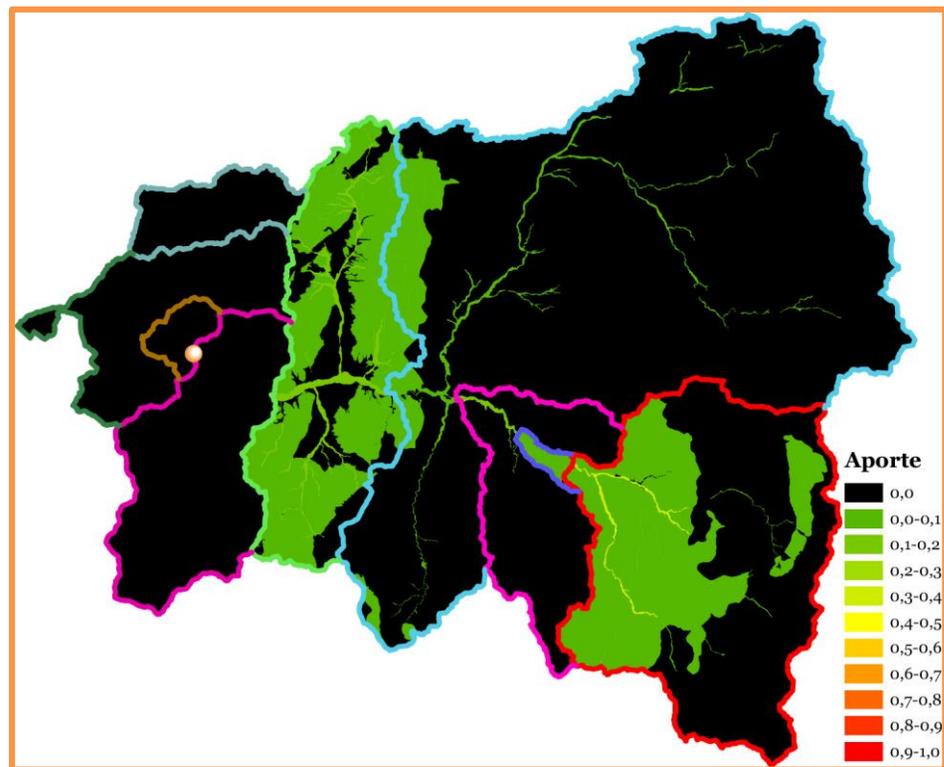


Figura 0.43 Probable aporte acumulativo subcuenca número 22.

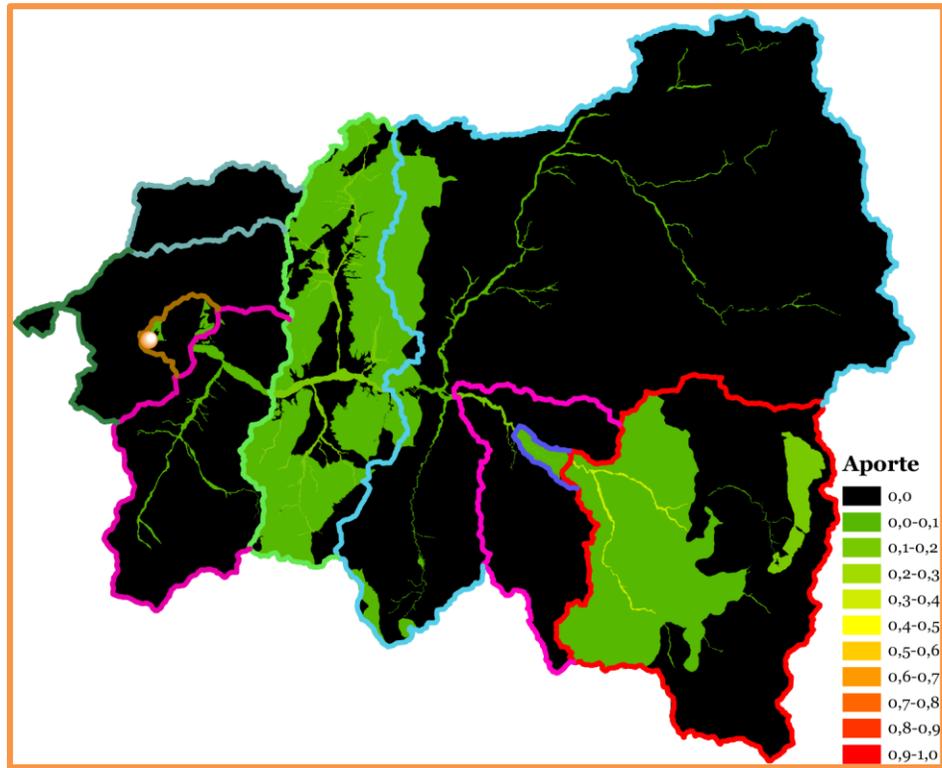


Figura 0.44 Probable aporte acumulativo subcuena número 12.

ANEXO L: Método De Cowan-Strickler (Chow, 1959)

Para realizar una estimación del coeficiente de rugosidad en cauces naturales deben tenerse en cuenta los siguientes factores:

- Aspereza del lecho y de las paredes.
- Presencia de vegetación y cambios estacionales de ésta.
- Irregularidad del cauce, principalmente en el perímetro mojado o variaciones de sección, forma, tamaño, etc. a lo largo del canal.
- Alineamiento del canal (curvas)
- Tendencia al embancamiento o a la socavación.
- Obstrucciones.
- Tamaño y forma del canal.
- Cambios de niveles y caudales que hacen participar riberas de inundación generalmente más rugosas que el canal principal.
- Presencia de material sólido en suspensión o arrastrado por el fondo.

Para tomar en cuenta el efecto provocado por estos factores Cowan propuso la siguiente ecuación:

$$n = m (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$$

Donde, n_0 : Valor de n para un canal recto, uniforme, prismático y con rugosidad homogénea.

n_1 : Corrección por irregularidades del perímetro mojado a lo largo del tramo estudiado.

n_2 : Corrección por variación de forma y de dimensiones de las secciones.

n_3 : Corrección por obstrucciones: troncos, rocas, etc.

n_4 : Corrección por presencia de vegetación.

m : Factor que mide la frecuencia de meandros o curvas.

Los valores de n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , m , recomendados por Chow (1959) son los mostrados en la Tabla:

Factores de corrección de Cowan

CORRECCION POR EFECTO DE :	CORRECCIÓN	LEVE O DESPRECIABLE	MODERADO	MARCADO	MUY MARCADO
1. Grado de Irregularidad	n_1	0,000	0,005	0,010	0,020
2. Cambios en las secciones	n_2	0,000	0,005	0,010	0,015
3. Obstrucciones	n_3	0,000	0,010-0,015	0,020-0,030	0,040-0,060
4. Vegetación	n_4	0,005-0,001	0,010-0,025	0,025-0,050	0,050-0,100
5. Meandros.	m	1,000	1,000	1,150	1,300

Para la elección de n_0 no se puede hacer uso de los valores dados en tablas por Chow (1959). Cuando el sedimento del lecho es granular, no puede ser estimado por la fórmula de Strickler.

METODO DE STRICKLER.

Esta relación se usa principalmente cuando las superficies de contacto o mojadas están constituidas por material granular. El valor que entrega es apto para evaluar el cálculo de n_0 de la fórmula de Cowan.

$$n_0 = 0,038D^{1/6} = \frac{D^{1/6}}{26,4}$$

n_0 = Coeficiente de rugosidad.

D = Diámetro representativo del sedimento [m]

Esta relación se aplica en canales constituidos por lechos pedregosos en las que el sedimento es caracterizado por un diámetro medio o representativo D. El diámetro de sedimento representativo de la rugosidad superficial que genera el sedimento corresponde, usualmente al rango entre D_{65} a D_{90} . Los diámetros más usados son D_{84} y D_{90} , aunque la fórmula de Strickler se basa en este último.