



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

LÍNEA DE BASE Y VARIABILIDAD AMBIENTAL A PARTIR DE SEDIMENTOS MARINOS DE LA BAHÍA DE PISAGUA, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

GABRIELA ALEJANDRA GONZÁLEZ AGUILERA

PROFESOR GUÍA:
GABRIEL EASTON VARGAS

PROFESORA CO-GUÍA:
CRISTINA ORTEGA CAURAPÁN

COMISIÓN:
VALENTINA FLORES AQUEVEQUE

FONDECYT N°1161547

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: GEÓLOGA

POR: GABRIELA ALEJANDRA GONZÁLEZ
AGUILERA

FECHA: 25/07/2021

PROFESOR GUÍA: GABRIEL EASTON
VARGAS

**LÍNEA DE BASE Y VARIABILIDAD AMBIENTAL A PARTIR DE SEDIMENTOS MARINOS
DE LA BAHÍA DE PISAGUA, CHILE**

El presente trabajo de memoria abordó la reconstrucción de variaciones ambientales durante el Holoceno tardío y la definición de la línea de base del suelo marino en la bahía de Pisagua. Para esto se sometió a análisis granulométricos y geoquímicos tanto a los sedimentos superficiales de la bahía, como al registro de sedimentos laminados y deformados en profundidad.

La metodología consideró la toma de 25 muestras superficiales y 10 testigos sobre la línea este-oeste del segmento central de la bahía. De estos últimos se obtuvieron tomografías que permitieron su caracterización estratigráfica mediante mapeo de sus laminaciones y estructuras proceso en el que se selecciona el testigo para apertura y submuestra. Estas muestras fueron procesadas por granulometría láser y fluorescencia de rayos X. Estos datos se trabajaron a través de análisis estadístico (ACP) e interpretación de indicadores geoquímicos y granulométricos paleoambientales.

Los resultados obtenidos muestran que en relación a la distribución superficial, hay correlaciones directas en el tamaño de grano y el sedimento de carácter biogénico calcáreo. El sílice biogénico es mayor en proporción hacia el sur de la bahía, mostrando la fuerte influencia terrígena desde la quebrada Tiliviche, la que aporta mayores concentraciones de hierro y titanio. Se concluye que la línea de base está fuertemente determinada por la geomorfología y geoquímica de la zona.

En relación a la variabilidad estratigráfica, mediante el ACP se establecen correlaciones, dando lugar a 4 tipos de muestras que presentan tendencias claras en cuanto a su composición geoquímica. Sólo puede ser bien definida esta variabilidad en los sedimentos no deformados, mientras que para los deformados se requieren más análisis. En este sentido, los factores condicionantes comprenden tanto las variaciones atmosféricas y oceanográficas a escala planetaria, como los procesos locales deformativos tales como corrientes de turbidez y sismos.

Agradecimientos

El presente trabajo no podría haberse realizado sin el apoyo incondicional de mi madre y mi padre quienes motivaron la obtención de este grado académico, a pesar de las dificultades presentadas en el proceso. Gracias por no dejar de creen mí ni en mis capacidades.

Agradezco a mi profesor Gabriel Easton y a la maravillosa secretaria docente, Blanquita, quiénes me brindaron su apoyo y comprensión y tuvieron la paciencia para esperar el tiempo suficiente para que pudiese realizar un buen trabajo dentro de las condiciones adversas que se fueron presentando.

Quiero agradecer a mis amistades incondicionales que me brindaron un soporte fundamental, que son tantas que no cabrían en esta página, pero a cada una de ellas, he podido agradecer en persona.

Quiero agradecer también a la revuelta que me devolvió las esperanzas de hacer de este un lugar digno de vivir, para todos, todas y todes.

También quisiera darme la oportunidad de de dedicar un no-agradecimiento tanto al sistema que me baleó el rostro, así como las pésimas gestiones realizadas por un gobierno nefasto y criminal, que no ha dudado en acriminarse contra el pueblo que lo sostiene. A pesar de ellos, y gracias a mi perseverancia este trabajo pudo realizarse.

Gracias, gracias, gracias.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Formulación del estudio propuesto	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo General.....	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Hipótesis.....	3
1.4	Antecedentes Generales	3
1.4.1	Relevancia histórica de Pisagua	3
1.4.2	Contexto regional morfotectónico	4
1.4.3	Sismotectónica	6
1.4.4	Antecedentes geoquímicos de la zona	18
1.4.5	Contexto oceanográfico.....	19
2	Metodología.....	26
2.1	Revisión de antecedentes.....	26
2.2	Campaña de terreno para recuperación de muestras de fondo marino.....	26
2.2.1	Primera etapa: Draga	26
2.2.2	Segunda etapa: Rumöhr.....	26
2.2.3	Recolección de datos batimétricos	27
2.3	Análisis de la estratigrafía y estructura de los sedimentos marinos por Rayos X28	
2.4	Submuestreo del testigo PR1805	29
2.5	Análisis de Muestras Superficiales y Sub-Muestras del Testigo PR1805.....	30
2.5.1	Análisis granulométrico.....	30
2.5.2	Análisis geoquímico.....	30
2.5.3	Tratamiento de datos.....	31
3	Batimetría y facies superficiales de la bahía de Pisagua.....	34

3.1	Batimetría.....	34
3.2	Facies granulométricas.....	35
3.3	Facies geoquímicas de elementos superficiales	37
3.3.1	Elementos mayores.....	38
3.3.2	Elementos menores.....	44
3.3.3	Elementos traza.....	47
3.4	ACP Superficial	51
4	Estratigrafía	53
4.1	ACP	56
4.1.1	Correlación elementos.....	58
4.1.2	Caracterización de las muestras.....	58
4.2	Granulometría.....	75
5	Discusión.....	77
5.1	Factores condicionantes de distribución granulométrica y geoquímica en la superficie marina de la bahía de Pisagua.....	77
5.2	Variabilidad sedimentaria y reconstrucción paleoambiental	80
6	Conclusión.....	95
6.1	Perspectivas y recomendaciones	96
7	Bibliografía.....	97
8	Anexos	115
8.1	Estratigrafía, geoquímica y granulometría detallada según definición inicial de unidades	115
8.1.1	Unidad I.....	115
8.1.2	Unidad II	120
8.1.3	Unidad III.....	124
8.1.4	Unidad IV.....	125
8.1.5	Unidad V.....	127
8.1.6	Unidad VI.....	129

8.1.7	Unidad VII.....	131
8.1.8	Unidad VIII.....	133
8.1.9	Unidad IX.....	136
8.1.10	Unidad X.....	138
8.1.11	Unidad XI.....	141
8.1.12	Unidad XII.....	143
8.1.13	Unidad XIII.....	149
8.1.14	Unidad XIV	151
8.1.15	Unidad XV	153
8.1.16	Unidad XVI	154
8.1.17	Unidad XVII	157
8.1.18	Unidad XVIII	158
8.1.19	Unidad XIX	160
8.1.20	Unidad XX	161
8.1.21	Unidad XXI	166
8.2	Muestras superficiales de la bahía próximas al litoral. En las imágenes se destaca el contenido de bióclastos presentes en ellas.....	169
8.3	Muestras representativas del sector central de la bahía. En ellas se destaca la baja a nula presencia de bióclastos	170

Índice de Figuras

Figura 1-1 Imagen referencial obtenida a través de Google Earth Pro.	2
Figura 1-2 Extraída de Valenzuela (2015). Contexto geodinámico de la convergencia oblicua a lo largo del margen del norte de Chile y su segmentación morfotectónica. Relieve sobre el nivel del mar obtenido a partir de Aster GDEM-30m. ZA: Zona del Arco, ZAA: Zona del Antearco, CC: Cordillera de la Costa, DC: Depresión Central, PC: Precordillera, CO: Cordillera Occidental, SFA: Sistema de Fallas de Atacama. Cuadro rojo representa el área de estudio. PN: Placa de Nazca, PSA: Placa Sudamericana.	4
Figura 1-3 Extraída de Valenzuela (2015). Diagrama esquemático de los dominios morfoestructurales en el antearco externo del norte de Chile. Mosaico de relieve sombreado con batimetría (Von Huene y Ranero, 2003) y topografía (SRTM90m) correspondiente a la región de Antofagasta (Modificado de Carrizo et al., 2008).	5
Figura 1-4 Largos de ruptura de terremotos históricos interplaca en la zona de estudio, extraído de Marquardt (2005).	8
Figura 1-5 Bahía de Pisagua. Se observa el confinamiento por los dos cabos: Punta Pisagua al Norte y Punta Pichalo hacia el Sur. Las morfologías de carácter regional corresponden al Acantilado Costero (naranja) y la Cordillera de la Costa (celeste). Imagen satelital Landsat.	8
Figura 1-6 Mapa morfotectónico desde la bahía de Pisagua hasta la cordillera de la Costa. Enmarca las principales unidades geológicas y morfológicas del sector. Hacia la Costa se destacan los depósitos cuaternarios asociados a terrazas marinas en la cara sur de Punta Pichalo, además de depósitos de abanicos aluviales, por su parte hacia el Oriente se destacan el intrusivo Pisagua y la Formación oficina Viz que conforman la Cordillera de la Costa. Las morfologías destacadas en este mapa son los pedimentos S2. S3. S4 pertenecientes a las Gravas de alto Hospicio y que se encuentran delimitadas por el Acantilado costero y los escarpes Pisagua y Tiliviche (Tomado de Valenzuela, 2015).	9
Figura 1-7 Esquema morfotectónico de la evolución del margen oeste de los Andes Centrales durante los últimos 10 Ma (esquema superior). Se muestra la topografía actual, la geología y el Pediplano de Atacama y una propuesta de reconstrucción topográfica hace 10 Ma (esquema inferior). Notar que el Pediplano de Atacama representa una superficie continua (en equilibrio) que conecta el frente cordillerano y el nivel del mar (Extraído de Coudurier et al., 2015).	10
Figura 1-8 Imagen esquemática que ilustra un típico sistema de pliegues y fallas relacionado con los slumps sobre imponiéndose a los lechos horizontales pre-slumps sin deformar. La	

masa deformada se traslada cuesta abajo a lo largo de un desprendimiento basal y está marcada por la extensión en la cabeza (superior) del slump y la contracción asociada con pliegues y empujes en el sector frontal del plegamiento. Los pliegues se aprietan progresivamente al aumentar la deformación en el sistema de slump, mientras que sus planos axiales y las direcciones de orientación asociadas rotan y se aplanan secuencialmente, lo que finalmente resulta en pliegues curvilíneos reclinados (Tomado de Alsop et al., 2012)..... 13

Figura 1-9 Imagen ilustrativa de las variaciones en las estructuras de plegamiento de sedimento suave (slumps), conforme aumenta la intensidad de la deformación. A) Slump de baja deformación, con pliegues simétricos de forma ondulada y sin fallamiento; B) Slump de deformación intermedia, con pliegues con forma de ola o recumbente, en esta etapa los slumps exhiben cabalgamiento entre las capas y fallamiento, como síntoma del aumento en la deformación; C) Slump a cuasi turbidita, etapa de deformación intensa donde se percibe una deformación turbulenta, de capas mezcladas y brechizadas/fragmentadas (Tomada de Heifetz et al., 2005)..... 14

Figura 1-10 Bosquejo de los principales tipos de estructuras de deformación de sedimentos blandos por efectos de la licuefacción y/o fluidización. A la izquierda está la columna sedimentaria inicial. A la derecha están las características de licuefacción y/o fluidización percibidas por las distintas capas de sedimento después del evento sísmico. A) Representa las estructuras de escape de fluidos, puntualmente las estructuras de pilas. B) Ilustra las estructuras de sobre carga la figura superior simboliza la deformación frente un caso de gradiente de densidades invertido y la figura inferior uno asociado a una carga desigual (Tomado de Moretti, 1999)..... 16

Figura 1-11 Distribución de las muestras asociadas a los distintos nodos y sus elementos característicos. Extraída de Astudillo et al. (2015). 18

Figura 1-12 Colores indican la cantidad de precipitaciones, mientras las flechas son indicadores de la dirección de los vientos en la costa occidental de Sudamérica. (JJA: Junio-Julio-Agosto; SON: Septiembre-Octubre-Noviembre; DEF: Diciembre-Enero-Febrero; MAM: Marzo-Abril-Mayo) La letra “A” indica centros de los principales anticiclones, siendo la que se encuentra al oeste de Sudamérica el correspondiente al Anticiclón del Pacífico Suroriental. Extraído de Garreaud (2011). 21

Figura 1-13 Ilustración representativa de la dirección de los vientos superficiales y el transporte de Ekman. Extraída desde https://www.steamcanarias.com/recursos/nuestromar/corrientes_marinas.html..... 21

Figura 1-14 A) Corrientes en el borde oeste de Sudamérica durante el invierno (izquierda) y verano (derecha). WWD: West Wind Drift; PCCC: Perú-Chile Countercurrent; PUC: Perú Undercurrent; PCC: Perú-Chile Current; CCC: Chile Coastal Current; CHC: Cape Horn Current. Modificado de Strub et al. (1998). Extraído de León (2015). B) Componentes y circulación de la corriente de Humbolt. Extraído de Strub et al. (1998).	23
Figura 1-15 Circulación de Walker durante las fases positivas (La Niña, arriba) y negativas (El niño, abajo) de la Oscilación del Sur. Extraído de Barry & Chorley (1998).....	24
Figura 1-16 Estructura del océano ecuatorial para condiciones medias (a) La Niña, (b) El Niño. (c) Notar los cambios en la profundidad de la termoclina y del nivel del mar. Extraído de Barry & Chorley (1998).	25
Figura 2-1 A) Draga. B) Muestra obtenida con draga. C) Rumöhr con testigo adosado saliendo del agua. D) Testigo PR1810. E) Testigo PR1809.	27
Figura 2-2 Mapa de puntos donde se obtuvieron muestras y datos.	28
Figura 3-1 Mapa de interpolación batimétrica, obtenida a partir de ArcGIS.....	34
Figura 3-2 Perfiles Norte-Sur y Este-Oeste de la profundidad del suelo marino.....	35
Figura 3-3 Mapa de interpolación del tamaño medio de grano.....	36
Figura 3-4 Mapa de interpolación de la desviación estándar de los datos granulométricos por muestra.	36
Figura 3-5 Distribuciones Norte-Sur y Este-Oeste de la selección del grano	37
Figura 3-6 Distribuciones Norte-Sur y Este-Oeste del tamaño medio del grano.....	37
Figura 3-7 Mapa de interpolación de Silicio	38
Figura 3-8 Mapa de interpolación de Potasio.....	39
Figura 3-9 Mapa de interpolación de Aluminio	40
Figura 3-10 Mapa de interpolación de Calcio.....	41
Figura 3-11 Mapa de interpolación de hierro.....	42
Figura 3-12 Mapa de interpolación de azufre.....	43
Figura 3-13 Mapa de interpolación de Titanio	44
Figura 3-14 Mapa de interpolación de Manganeseo	45
Figura 3-15 Mapa de Interpolación de Estroncio.....	46
Figura 3-16 Mapa de interpolación de bromo.....	47
Figura 3-17 Mapa de interpolación de Vanadio.....	48
Figura 3-18 Mapa de interpolación de Rubidio.....	49
Figura 3-19 Mapa de interpolación de Zinc	50
Figura 4-1 Correlación del total de testigos extraídos	55

Figura 4-2 Distribución de muestras entre 126 y 111 cm de profundidad.....	61
Figura 4-3 Distribución de muestras entre 111 y 103 cm de profundidad.....	63
Figura 4-4 Distribución de muestras entre 103 y 96 cm de profundidad.....	64
Figura 4-5 Distribución de muestras entre 96 y 89 cm de profundidad.....	65
Figura 4-6 Distribución de muestras entre 88 y 83 cm de profundidad.....	67
Figura 4-7 Distribución de muestras entre 82 y 76 cm de profundidad.....	68
Figura 4-8 Distribución de muestras entre 77 y 68 cm de profundidad.....	69
Figura 4-9 Distribución de muestras entre 67 y 51 cm de profundidad.....	70
Figura 4-10 Distribución de muestras entre 52 y 45 cm de profundidad.....	71
Figura 4-11 Distribución de muestras entre 45 y 35 cm de profundidad.....	72
Figura 4-12 Distribución de muestras entre 34 y 30 cm de profundidad.....	73
Figura 4-13 Distribución de muestras entre 30 y 19 cm de profundidad.....	74
Figura 4-14 Distribución de muestras desde 19 cm de profundidad hasta la superficie. ..	75
Figura 4-15 Granulometría testigo PR1805.....	76
Figura 5-1 Distribución de la razón Ca/Ti.....	78
Figura 5-2 Distribución de la razón Si/Ti	78
Figura 5-3 Distribución de la razón Fe/Ti	79
Figura 5-4 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad I	81
Figura 5-5 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad I	81
Figura 5-6 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad II	82
Figura 5-7 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad II	82
Figura 5-8 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad III	83
Figura 5-9 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad III	83
Figura 5-10 Comportamiento granulométrico y estructural en turbiditas de alta densidad (Nichols, 2009).....	84
Figura 5-11 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad IV	84
Figura 5-12 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad IV	85
Figura 5-13 Estructuras por oleaje y corriente. Extraído de Nichols (2009).....	85
Figura 5-14 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad V	86
Figura 5-15 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad V	86
Figura 5-16 Principales nodos geoquímicos de Pisagua. Extraído de Astudillo (2015)	87
Figura 5-17 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad VI	87
Figura 5-18 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad VI	88
Figura 5-19 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad VII	88

Figura 5-20 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad VII	88
Figura 5-21 Comportamiento granulométrico y estructural en turbiditas de baja densidad (Nichols, 2009).....	89
Figura 5-22 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad VIII	89
Figura 5-23 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad VIII	90
Figura 5-24 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad IX	90
Figura 5-25 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad IX	91
Figura 5-26 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad X	91
Figura 5-27 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad X	91
Figura 5-28 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad XI	92
Figura 5-29 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad XI	92
Figura 5-30 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad XII y XIII	93
Figura 5-31 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad XII y XIII	93
Figura 5-32 Efecto de choques sísmicos en sedimentos marinos laminados no consolidados.....	94

Introducción

1.1 Formulación del estudio propuesto

La costa al sureste del Océano Pacífico se encuentra fuertemente influenciada por variaciones océano-climáticas que pueden tener ciclicidades desde anuales a seculares. Las condiciones de las variaciones interanuales hasta interdecadales, se presentan de manera similar al fenómeno “El Niño y la Oscilación del Sur” (ENOS), y juegan un rol fundamental en la dinámica oceánica costera. (Carr et al., 2002; Zhang et al. 1997; Garreaud and Battisti, 1999).

A pesar de su importancia, las implicancias de la variabilidad interdecadal del ENOS en la retroalimentación física océano-atmósfera y su impacto en los procesos biogeoquímicos en los sistemas de afloramiento costero, así como su relación con el calentamiento global, siguen siendo poco comprendidas, aun cuando registros paleoceanográficos de alta resolución temporal de la bahía de Mejillones muestran cambios a escalas interdecadales y seculares (e.g.: Vargas, et al., 2007).

En este marco, definir la variabilidad química en el suelo oceánico costero resulta significativa para dilucidar el impacto de los ciclos oceánicos y fenómenos atmosféricos, sobre la sedimentación marina. Lo que, además, sienta una base para estudios posteriores que puedan indicar efectos de las variaciones océano-atmosféricas producto del calentamiento global, o incluso actividades antropogénicas, sobre la geología marina.

La determinación de esta variabilidad requiere de registros sedimentológicos bien preservados, que permitan una reconstrucción paleoceanográfica de alta resolución, en este sentido los sedimentos laminados son considerados un registro infrecuente y excepcional. En márgenes continentales, este tipo de sedimentación ocurre en zonas caracterizadas por altas tasas de productividad primaria, normalmente asociadas con variaciones ecológicas e hidrológicas estacionales (e.g., Hughen et al., 1996; Bull and Kemp, 1996; Grimm et al., 1997; Staubwasser and Sirocko, 2001).

Según Berger (1988), las corrientes oceánicas del límite oriental del Pacífico constituyen regiones de alta productividad debido a las interacciones entre el aire, la tierra y el océano, que conducen a la generación del fenómeno de surgencia. A partir de esto, el sistema de la corriente de Humboldt junto al fenómeno de surgencia costera producido en las costas Perú-Chile, a lo largo del margen árido del oeste de Sudamérica, sustenta una de las áreas más productivas de los océanos alrededor del mundo.

Los vientos que favorecen la surgencia impulsan a las aguas enriquecidas en nutrientes desde las Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (Equatorial Subsurface Waters, ESSW) hacia la zona eufótica, comprendida en el área costera del Norte Grande de Chile, aumentando así la producción primaria en esta zona (Strub et al., 1998).

La bahía de Pisagua (Figura 1-1), se ubica en un área de alta productividad primaria en el norte de Chile, y además presenta condiciones geomorfológicas similares a las observadas en Mejillones, aunque a una escala más pequeña, donde ya se ha podido observar la presencia de sedimentos laminados (e.g. Vargas et al., 2007). De esta forma, el área de investigación se justifica plenamente para los objetivos que persiguen este estudio, como es el de reconstruir la variabilidad ambiental de la bahía de Pisagua a partir del estudio de sedimentos laminados en la misma.

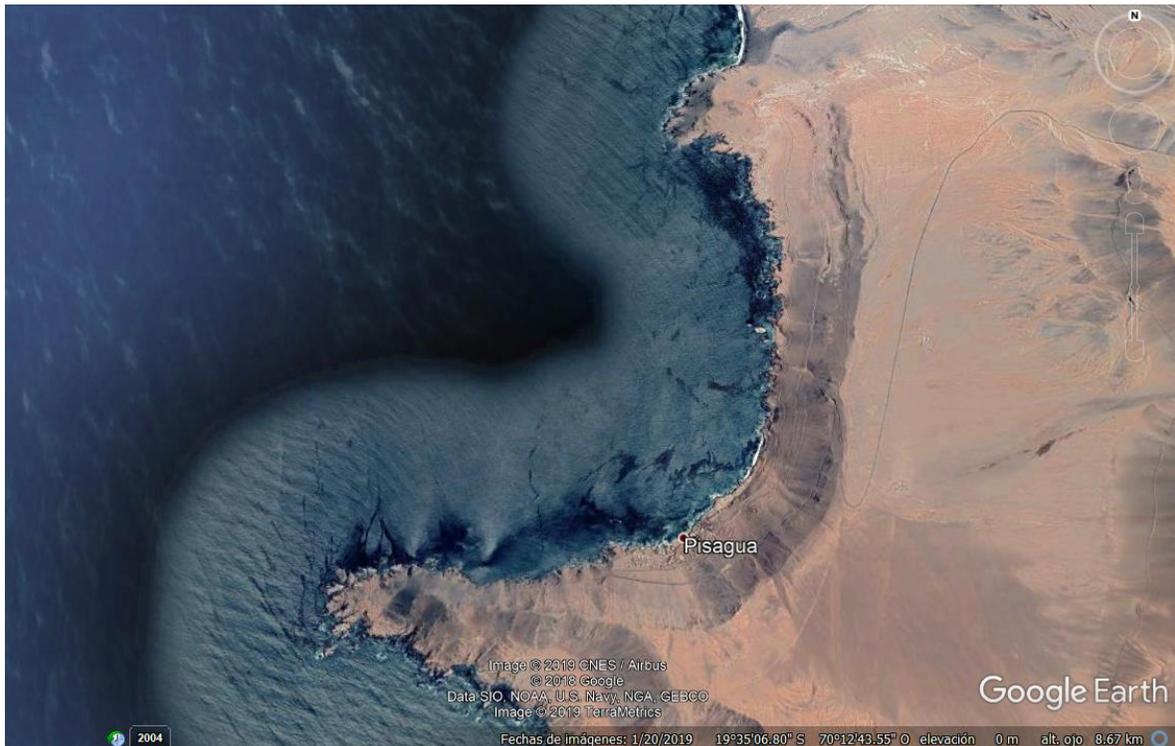


Figura 0-1 Imagen referencial obtenida a través de Google Earth Pro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Reconstruir variaciones ambientales durante el Holoceno tardío y definir la línea de base del suelo marino en la bahía de Pisagua, a través de su caracterización geoquímica y sedimentológica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la línea de base de granulometría y concentraciones geoquímicas en los sedimentos superficiales de la bahía.
- Determinar la variabilidad ambiental a partir del registro de sedimentos laminados en la bahía.

1.3 Hipótesis

Las concentraciones geoquímicas y granulometría, de los sedimentos laminados de la bahía de Pisagua, están condicionadas por factores oceanográficos y geomorfológicos, cuya variabilidad refleja variaciones medioambientales asociadas a variabilidad océano-climática, el contexto geológico y eventos tectónicos.

1.4 Antecedentes Generales

1.4.1 Relevancia histórica de Pisagua

Esta zona ha sido principalmente reconocida por la carga histórica, social y política. En sus inicios fue considerada una comuna próspera, sobre todo durante el siglo 19 a causa de las explotaciones de nitrato, que con el tiempo fue decayendo debido a que existe un único acceso, que separa a Pisagua de Iquique en una hora, además de falta de movimiento económico en la zona.

Sin embargo, la marca más fuerte con la que cuenta Pisagua es la de haber sido utilizada como emplazamiento de fosa para ejecutados políticos durante la dictadura en Chile entre los años 1973 y 1990.

En la actualidad, la actividad económica consiste fundamentalmente en la pesca artesanal, y el turismo, principalmente por la historia del puerto junto con actividades como buceo, y observación submarina de ruinas de antiguos naufragios.

1.4.2 Contexto regional morfotectónico

La bahía de Pisagua se sitúa en la I Región de Tarapacá, en la costa hiperárida del Norte Grande de Chile, en uno de los márgenes tectónicos más activos del planeta. En éste, la placa oceánica de Nazca subduce bajo la placa continental Sudamericana, lo que da lugar al segundo cordón montañoso más grande del mundo, la Cordillera de Los Andes, definido por provincias morfotectónicas características, siguiendo ejes paralelos a la fosa, dominados por estructuras orogénicas, que evidencian su génesis en la subducción (Figura 1-2) (e.g. Reutter et al., 1988).

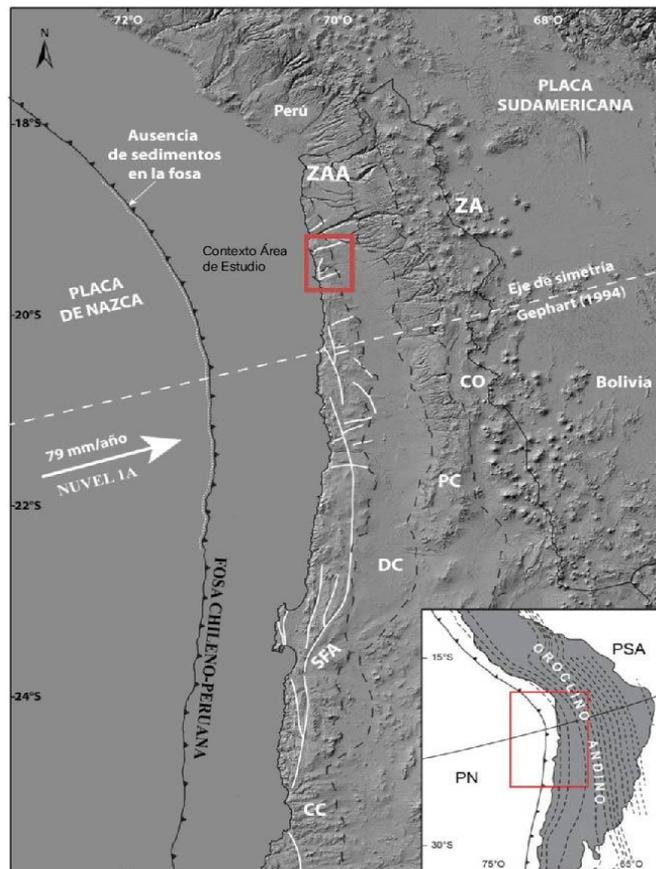


Figura 0-2 Extraída de Valenzuela (2015). Contexto geodinámico de la convergencia oblicua a lo largo del margen del norte de Chile y su segmentación morfotectónica. Relieve sobre el nivel del mar obtenido a partir de Aster GDEM-30m. ZA: Zona del Arco, ZAA: Zona del Antearco, CC: Cordillera de la Costa, DC: Depresión Central, PC: Precordillera, CO: Cordillera Occidental, SFA: Sistema de Fallas de Atacama. Cuadro rojo representa el área de estudio. PN: Placa de Nazca, PSA: Placa Sudamericana.

El contexto del área de estudio corresponde a la zona occidental de los Andes, llamada antearco (~450 km de ancho), la que se define entre el arco volcánico activo y la fosa

(Reutter et al., 1988). Esta porción de la placa continental se ubica sobre la zona de acoplamiento (Figura 1-2) (Allmendinger et al., 2005; Carrizo et al., 2008).

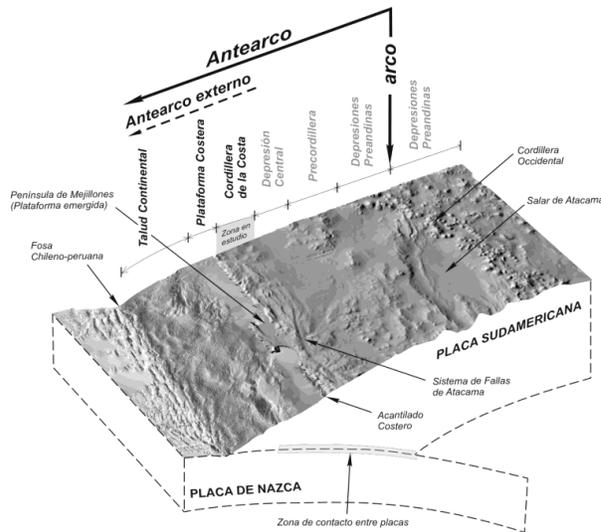


Figura 0-3 Extraída de Valenzuela (2015). Diagrama esquemático de los dominios morfoestructurales en el antearco externo del norte de Chile. Mosaico de relieve sombreado con batimetría (Von Huene y Ranero, 2003) y topografía (SRTM90m) correspondiente a la región de Antofagasta (Modificado de Carrizo et al., 2008).

La región de Tarapacá está dividida en 6 provincias morfotéctónicas, definidas desde Oeste a Este como:

- (i) Talud Continental: Con 80 km de ancho, y definida desde los 8000 m b.n.m. hasta los 200 m.b.n.m. Esta zona está marcada por una alta pendiente batimétrica (Niemeyer et al., 1996). Debido a su morfología, no existe mayor relleno de sedimentos.
- (ii) Plataforma Costera: Se extiende, inmediatamente luego del talud, desde los 200 m.b.n.m., hasta el acantilado costero. El ancho promedio entre ambas cotas corresponde a 5 km aproximadamente (Niemeyer et al., 1996). La Península de Mejillones corresponde a la manifestación más importante de una plataforma costera emergida.
- (iii) Cordillera de la Costa: Este cordón montañoso, está distribuido en una franja subparalela a la fosa, con un promedio de 40 km de ancho y 950 m de altura, alcanzando en sectores alturas máximas del orden de 2.000 m.s.n.m. (Paskoff, 1979; Carrizo et al., 2008 entre otros). Está compuesta por intrusivos jurásico-cretácicos y rocas volcánicas jurásicas, remanentes de un arco magmático mesozoico (Mpodozis y Ramos, 1990). En estas rocas se encuentra trabajado un paleo relieve de edad oligocena-miocena (Dunai et al., 2005; Quezada et al., 2010).
- (iv) Depresión Central: Esta unidad representa la actual cuenca tectónica de los Andes Centrales, con un ancho promedio de 50 km y una altura promedio que varía entre 1100 - 1900 m s.n.m. Se caracteriza por depósitos correspondientes, en su mayoría, a facies

de abanicos aluviales y lacustres, producidos por la erosión originada en la Precordillera. Es destacable en el área, la vasta superficie de pedimentación, llamada Pediplano de Atacama (Naranjo y Paskoff, 1985).

- (v) Precordillera: Esta provincia, que a escala geomorfológica consiste en un gran peldaño, tiene un ancho de extensión de entre 20 y 35 km, y una altura que varía entre los 1.500 y 3.600 m.s.n.m. Se relaciona al escarpe del frente de propagación del Sistema de Fallas de Domeyko (Charrier et al., 2014; Armijo et al., 2015).
- (vi) Cordillera Occidental: Ubicado al occidente del Altiplano, este rasgo, está caracterizado por un arco volcánico cuyos edificios corresponden a edades miocena-holocenas, que se ubican en conjunto con secuencias sedimentarias y volcánicas deformadas de edad miocena-pliocena. Presenta amplitudes de entre 50 y 100 km, y su altitud aumenta desde los 3.300 m al Oeste, hasta los 4.800 m al Este. Resaltan estratovolcanes de edad miocena-holocena que alcanzan alturas entre los 3.800 y 6.350 m s.n.m., ubicados sobre las sucesiones neógenas deformadas (García et al., 2011).

1.4.3 Sismotectónica

Está establecido que la costa oeste de Sudamérica corresponde a uno de los márgenes con mayor actividad sísmica en el mundo. Esta actividad se encuentra dominada por procesos de subducción, en la que se reconocen tres fuentes sísmicas principales, correspondientes a sismos interplaca, además de intraplaca profunda y superficial. Cada una de estas fuentes se diferencian en tasas de sismicidad, mecanismos focales, y diferentes calidades de información histórica.

La superficie de contacto entre las placas contempla una vasta área de ruptura, la que proyectándose en superficie está definida entre la zona costera y la fosa. Esta superficie de ruptura se encuentra entre los 40 y 60 km de profundidad. Esta dinámica provoca un acoplamiento entre las placas, consistente en deformaciones elásticas y permanentes que abarcan centenares de kilómetros (Ruff y Kanamori, 1983; Comte y Suárez, 1995). El tipo de movimientos generados en esta zona sismogénica son los principales causantes de movimientos de grandes masas de agua, como el ocurrido el 1° de abril de 2014 (Mw=8,2). Los sismos intraplaca de profundidad intermedia corresponden a aquellos ocurridos debido a una ruptura al interior de la placa oceánica, por lo que sus profundidades varían entre los 90 y 115 km (Delouis y Legrand, 2007). Estos ocurren bajo la placa Sudamericana, aspecto que los hace terremotos no generadores de tsunamis. Éstos son equivalentes al sismo de 1950 ocurrido bajo la ciudad de Calama; o como el ocurrido el 13 de junio de 2005 (Mw=7,8)

en la región de Tarapacá, conocido como el sismo de Huara, debido a los graves daños generados en esa comuna.

Luego, los sismos intraplaca superficiales son aquellos que se asocian a sistemas de fallas en la placa continental. El terremoto de Aroma 2001 ($MW=6,2$) es un ejemplo de este tipo de sismo, el que estuvo vinculado a esfuerzos regionales provocados por el terremoto de Arequipa en 2001 ($Mw=8,4$). Producto de este último terremoto se originó un tsunami, ocurrido durante período de marea baja por lo que alcanzó a afectar una pequeña porción continental, en el sur de Perú, reportándose en Chile con variaciones en la altura del mar de entre 5 y 20 cm.

1.4.3.1 Historia sísmica de los Andes Centrales

Es posible identificar una serie de terremotos interplaca que indican un alto grado de acoplamiento sísmico en la zona (Ruff y Kanamori, 1983; Cahill y Isacks, 1992; Delouis et al., 1997), y que, por ende, han podido dejar registros sedimentológicos en la bahía de Pisagua.

El sismo más reciente que afecta el área de estudio corresponde al ocurrido el 1° de abril de 2014. $Mw=8,2$; este sismo ocurrió en la parte central de la brecha sísmica del norte de Chile (Figura 1.4-3). El terremoto de 1877 había sido el último gran sismo en afectar directamente a las zonas costeras del Norte Grande de Chile. Tuvo una magnitud 8,5-8,8 Richter, y la zona de ruptura tuvo una extensión que abarcó 500 km aproximadamente, desde el Sur de Arica hasta el Norte de Antofagasta.

Le preceden los terremotos de 1543 del que no existe mayor registro; el sismo de Arica en septiembre de 1615 cuyos registros indicarían una gran ruina en las regiones de Arica, Tacna y La Puna, a raíz de un fuerte movimiento y gran maremoto; y el de 1768 del que tampoco existe mayor registro histórico.

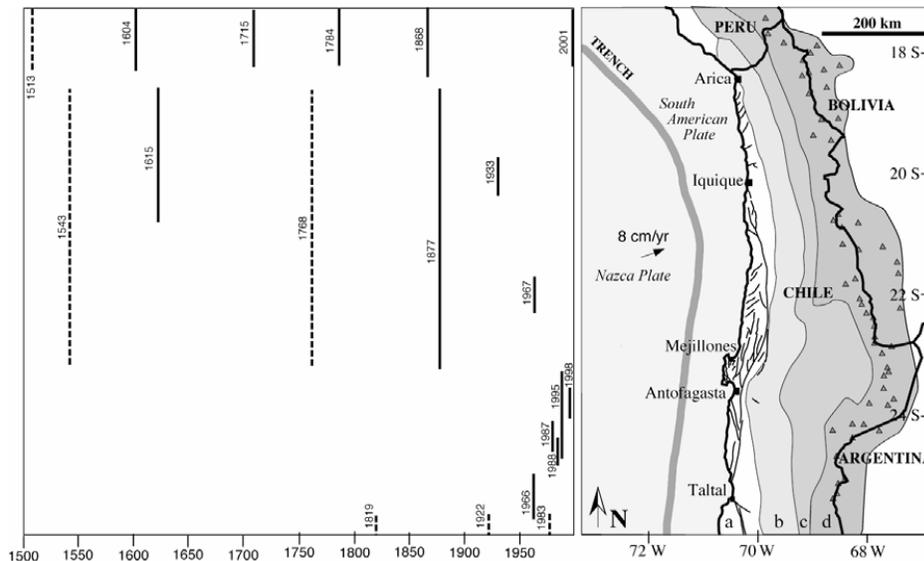


Figura 0-4 Largos de ruptura de terremotos históricos interplaca en la zona de estudio, extraído de Marquardt (2005).

1.4.3.2 Geología y geomorfología de la bahía de Pisagua

La bahía de Pisagua está conformada por dos morfologías en particular: Punta Pichalo correspondiente al brazo sur y Punta Pisagua, de menor envergadura, hacia el norte y que colinda con la quebrada Tiliviche (Figura 1-5), correspondiente a una de las principales redes de drenaje exorreicas de la zona.

La bahía se caracteriza por una longitud de 3,5 km y un ancho de 4 km aproximadamente. Respecto a la geomorfología, el área de estudio exhibe tres unidades de importancia, definidas por Valenzuela (2015), y según características previamente descritas por Ritter et al. (2002).

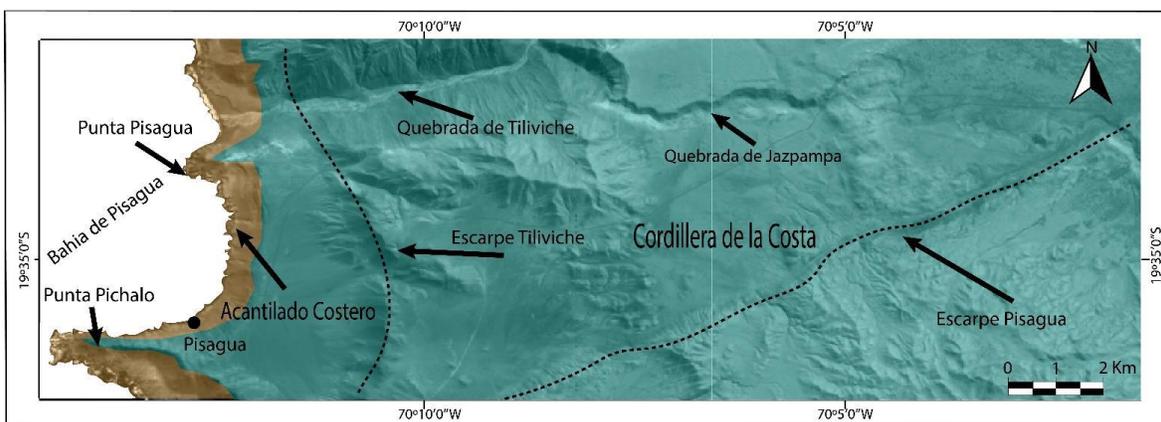


Figura 0-5 Bahía de Pisagua. Se observa el confinamiento por los dos cabos: Punta Pisagua al Norte y Punta Pichalo hacia el Sur. Las morfologías de carácter regional corresponden al Acantilado Costero (naranja) y la Cordillera de la Costa (celeste). Imagen satelital Landsat.

Las unidades antes mencionadas corresponden a tres pediplanos ubicados entre el acantilado costero y la Cordillera de la Costa. Los pedimentos delimitan la deformación de los escarpes posterior al Mioceno, además de la deformación del pediplano más occidental (Figura 1-6), evidenciando actividad durante el Pleistoceno.

En complemento a lo anterior, la deformación de las superficies mencionadas se asocia a la construcción tectónica-erosiva del acantilado costero y el alzamiento marginal de los Andes, mientras que su preservación estaría controlada por la acentuación de la aridez del Desierto de Atacama durante los últimos 10 Ma (Valenzuela, 2015).

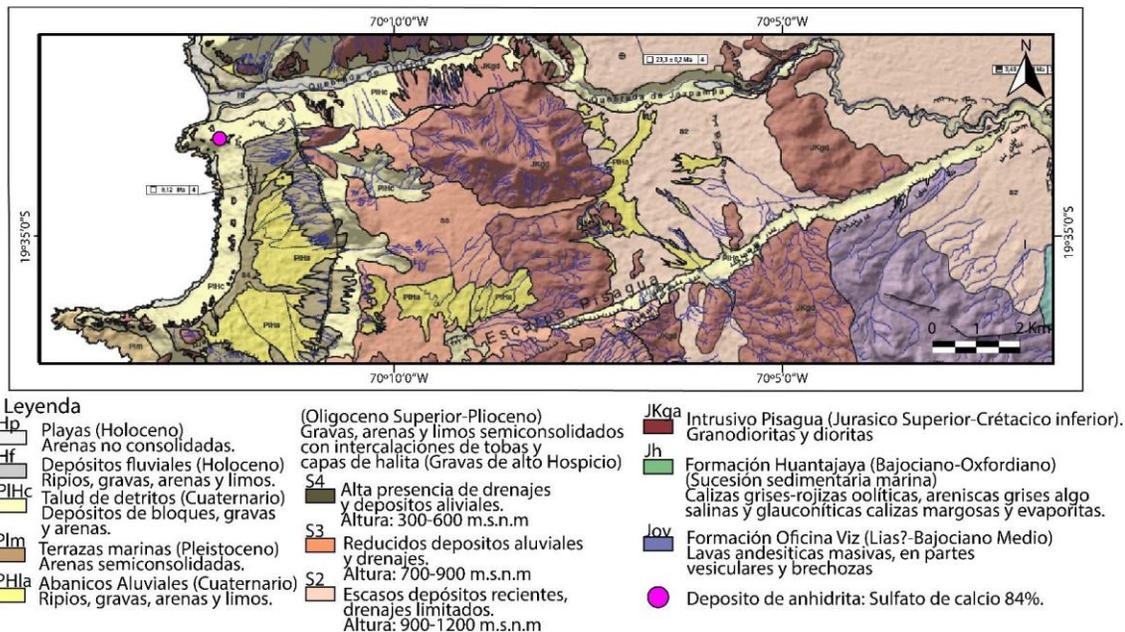


Figura 0-6 Mapa morfotectónico desde la bahía de Pisagua hasta la cordillera de la Costa. Enmarca las principales unidades geológicas y morfológicas del sector. Hacia la Costa se destacan los depósitos cuaternarios asociados a terrazas marinas en la cara sur de Punta Pichalo, además de depósitos de abanicos aluviales, por su parte hacia el Oriente se destacan el intrusivo Pisagua y la Formación oficina Viz que conforman la Cordillera de la Costa. Las morfologías destacadas en este mapa son los pedimentos S2. S3. S4 pertenecientes a las Gravas de alto Hospicio y que se encuentran delimitadas por el Acantilado costero y los escarpes Pisagua y Tiliviche (Tomado de Valenzuela, 2015).

Se ha considerado que el alzamiento de la región costera en el norte de Chile sería mucho más antiguo que las incisiones de las quebradas mayores (~<10 Ma) (Mortimer & Saric, 1976; Farías et al., 2005; García et al., 2011), sugiriendo que la superficie superior de la Depresión Central se habría encontrado “represada” por el relieve preexistente de la Cordillera de la Costa y se mantuvo por mucho tiempo como un nivel base elevado, no conectado al mar (Mortimer & Saric, 1976; García et al., 2011).

Las incisiones de las quebradas y la eventual conexión del drenaje con el océano habrían sido provocadas en el tiempo reciente, a través de un aumento de la escorrentía asociada

a pulsos hipotéticos semi-áridos, interrumpiendo el régimen hiper-árido predominante (Mortimer & Saric, 1976; Farías et al., 2005; García et al., 2011).

De este modo, el alzamiento costero es más antiguo que los procesos de incisión. Sin embargo, no existen evidencias geológicas convincentes para este complejo escenario, y la noción de un antiguo alzamiento ($\sim \geq 25$ Ma) sin correlación con la incisión pareciera ser controversial (Kober et al., 2006; Schildgen et al., 2007; Schlunegger et al., 2006; 2010; Hoke et al., 2007; Jordan et al., 2010; Kirk-Lawlor et al., 2013).

Otra visión es la presentada por Courdurier et al. (2014), quienes proponen una hipótesis más simple: en primer lugar, consideran un contexto de hiperaridez relativamente estable desde hace ~ 15 Ma, luego plantean que la parte plana occidental del Pediplano de Atacama se encontraba inicialmente formando el piedemonte Andino con nivel base en el océano (Figura 1-7) y que la elevación general de este piedemonte, en relación con el océano, desencadenó el retroceso de cabecera de las quebradas desde hace $\sim < 10$ Ma (García & Hérail, 2005; Schildgen et al., 2007; Schlunegger et al., 2006. 2010; Kirk-Lawlor et al., 2013). De esta manera el inicio de las incisiones de las quebradas mayores coincidiría con el alzamiento de la región costera en el norte de Chile.

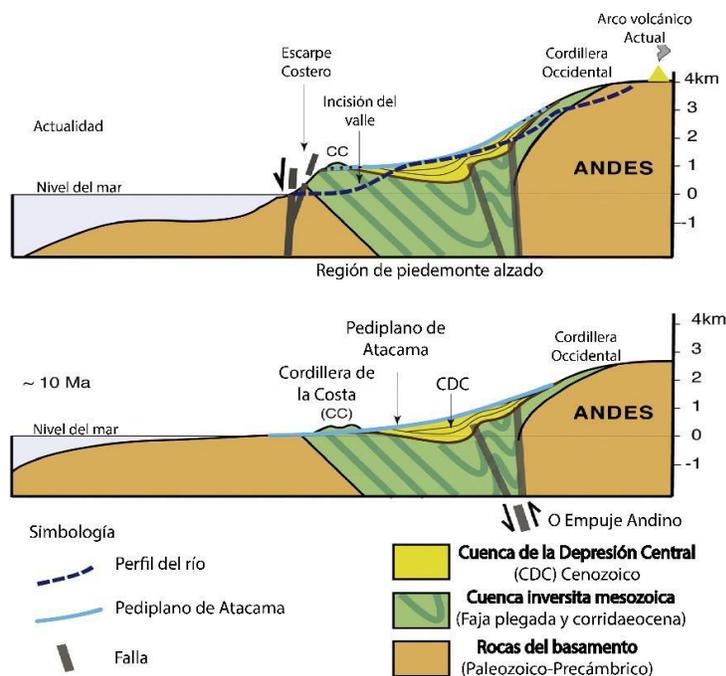


Figura 0-7 Esquema morfotectónico de la evolución del margen oeste de los Andes Centrales durante los últimos 10 Ma (esquema superior). Se muestra la topografía actual, la geología y el Pediplano de Atacama y una propuesta de reconstrucción topográfica hace 10 Ma (esquema inferior). Notar que el Pediplano de Atacama representa una superficie continua (en equilibrio) que conecta el frente cordillerano y el nivel del mar (Extraído de Courdurier et al., 2015).

Como complemento a lo anterior, en la Quebrada de Tiliviche, Hoek et al. (2007) realizaron una datación en circones, a través del método de U-Pb, en ceniza volcánica intercalada en una terraza fluvial dentro de la parte superior de la quebrada, que arrojó una edad aproximada de 6,4 Ma.

Los resultados de la datación pueden ser utilizados para determinar una edad máxima del comienzo de la incisión de la Quebrada de Tiliviche, así como para aceptar la hipótesis propuesta por Courdurier et al. (2014), donde se plantea que esta edad podría ser considerada como la edad máxima del alzamiento del sector costero del norte de Chile.

En la Cordillera de la Costa afloran lavas y brechas de composición andesítica (Silva, 1972) asociadas a la Formación Oficina Viz, que subyacen una secuencia sedimentaria marina, constituida por calizas, calizas oolíticas, lutitas y areniscas glauconíticas de edad Jurásica inferior a superior (Silva, 1972). Estos depósitos, a su vez, se encuentran intruidos por plutones dioríticos y granodioríticos correspondientes al intrusivo Pisagua (Figura 1-6).

En el eje central y hacia el Occidente de la Cordillera de la Costa se aprecian las Gravas de alto Hospicio, que conforman los tres niveles de pedimentos antes mencionados y que se encuentran separados por los escarpes de Tiliviche y Pisagua (Valenzuela, 2015) y que según García-Perez et al. (2018) consisten principalmente en una secuencia de grava soportada, cuya matriz es de arena gruesa, cementada por halita con limos intercalados, arcillas y algunos depósitos de cenizas.

En los pedimentos occidentales es posible reconocer abanicos aluviales inactivos que serían un indicativo que estas morfologías presentan rasgos de actividad (erosión-sedimentación) posterior a 8-10 Ma (Valenzuela, 2015).

En el sector correspondiente a Punta Pisagua y la quebrada Tiliviche, Silva (1972) define los depósitos intermontanos, compuestos por depósitos lagunares de diatomitas e intercalaciones de limos claros y conglomerados finos. Estos sedimentos fueron interpretados por Valenzuela (2015) como un talud de detritos compuesto por arena, gravas y bloques (Figura 1-6). En este sector resalta además la presencia de depósitos de anhidrita con un 84% de sulfato de calcio (Silva, 1972).

Finalmente, cabe destacar, que la buena preservación de las morfologías y los pedimentos, en la cara sur de Punta Pichalo, permiten corroborar el fuerte levantamiento al que está sujeta esta región (Quezada et al., 2010), así como el grado de aridez predominante durante todo el Cuaternario (Vargas, 1996; Vargas y Ortlieb, 1998).

1.4.3.3 Estructuras sedimentarias

Los terremotos pueden dejar varios tipos de marcas en lechos laminados suaves en donde se destacan fallas, plegamiento y fragmentación. Los depósitos de flujo por gravedad provocados por terremotos se han utilizado como herramienta en la paleosismología subacuática para desentrañar los ciclos de terremotos adyacentes a los límites de placas y regiones con alta actividad sísmica.

El término "sismoturbidita" implica la activación del flujo de masa por un terremoto en lugar de otros posibles mecanismos como: olas de tormenta, flujos hiperpícnicos, disociación de hidratos de gas, sobrecarga de sedimentos, erupciones volcánicas e inundaciones (Postma et al., 1988; Prior et al., 1989; Nemec, 1990; Mulder & Syvitski, 1995; Beck et al., 1996; 2007; Chapron et al., 1999; Cita & Aloisi, 2000; Nakajima & Kanai, 2000; Shiki et al., 2000; Arnaud et al., 2002; Goldfinger et al., 2003; Schnellmann et al., 2005; Carrillo et al., 2008). Mientras que el término "sismita" fue introducido por Seilacher (1969) para describir capas que estaban deformadas por procesos inducidos por terremotos. Por consiguiente, la distinción entre ambas terminologías radica en el hecho que una sismita es un término más general que describe toda aquella estructura o deformación producto de un terremoto incluyendo a las sismoturbiditas.

El recuento de láminas (que se cree que representan depósitos estacionales) proporciona una resolución cercana al año que recientemente permitió la asociación de láminas deformadas con terremotos documentados históricamente (Heifetz et al., 2005); en concordancia con lo anterior un gran número de autores han informado sobre estructuras de deformación de sedimento blando interpretadas como inducidas por terremotos (por ejemplo: Seilacher, 1969; 1984; 1991; Vargas et al., 2005) en estudios sedimentológicos y paleosísmicos.

1.4.3.3.1 Estructuras de plegamiento de sedimento suave o Slumps

El plegamiento es considerado la estructura más obvia asociada con la deformación de sedimentos pobremente consolidados (Woodcock, 1976a; 1976b; 1979; Maltman, 1984; 1994a; 1994b; Elliot & Williams, 1988; Collinson, 1994). Es sabido que un aumento general en la presión de poros de agua reduce drásticamente la resistencia al corte de los sedimentos, facilitando la deformación de los sedimentos blandos (Maltman, 1994a; 1994b). Diversos mecanismos, incluida la sismicidad, pueden provocar aumentos locales en la presión del fluido de los poros, pudiendo desencadenar slumps (Alsop y Marco, 2011).

Se cree que el plegamiento resultante está vinculado intuitivamente a procesos de slump impulsados por la gravedad a lo largo de un desprendimiento basal, con la expectativa de que las geometrías de los pliegues reflejarán la paleosuperficie sobre el que se crearon (Farrell y Eaton, 1987; 1988; Martinsen, 1989; Martinsen y Bakken, 1990; Bradley y Hanson, 1998; Debacker et al., 2001; 2006; Alsop y Marco, 2012; Figura 1-8).

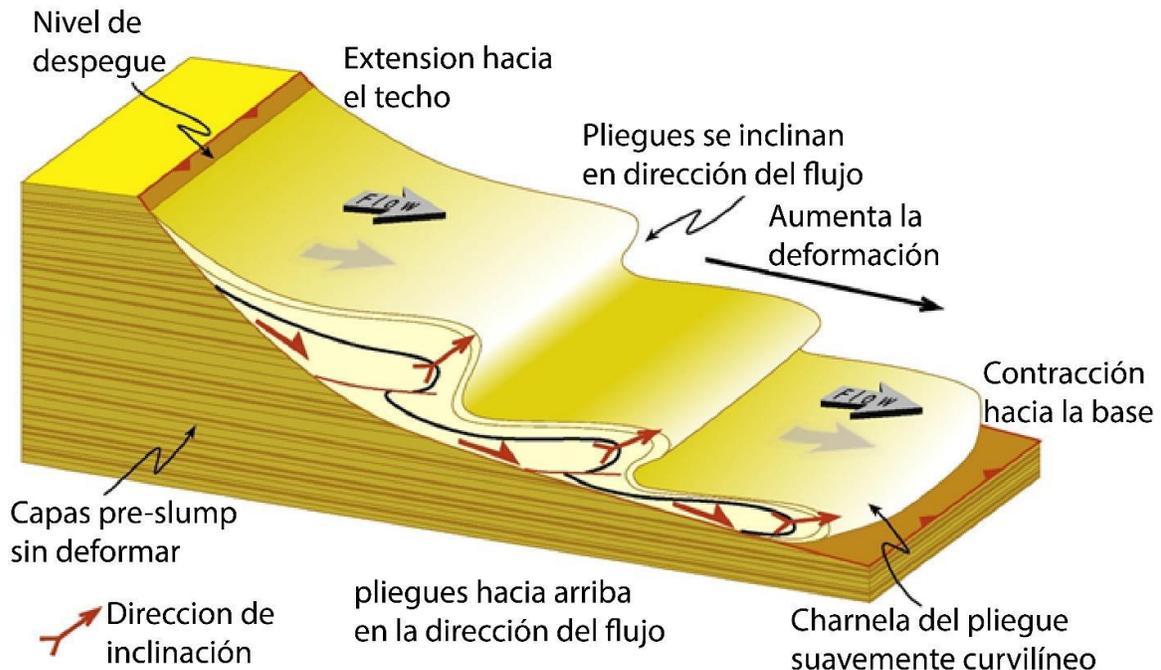


Figura 0-8 Imagen esquemática que ilustra un típico sistema de pliegues y fallas relacionado con los slumps sobre imponiéndose a los lechos horizontales pre-slumps sin deformar. La masa deformada se traslada cuesta abajo a lo largo de un desprendimiento basal y está marcada por la extensión en la cabeza (superior) del slump y la contracción asociada con pliegues y empujes en el sector frontal del plegamiento. Los pliegues se aprietan progresivamente al aumentar la deformación en el sistema de slump, mientras que sus planos axiales y las direcciones de orientación asociadas rotan y se aplanan secuencialmente, lo que finalmente resulta en pliegues curvilíneos reclinados (Tomado de Alsop et al., 2012).

El plegamiento de sedimentos blandos aparece con diferentes intensidades, aparentemente indicando varias etapas de la deformación. La deformación puede evolucionar desde un slump de forma ondulada (Figura 1-9a) que puede distorsionarse aún más a una forma de ola o recumbente (Figura 1-9b). Al aumentar esta deformación, la estructura puede volverse turbulenta, creando una capa de brecha completamente mezclada con fragmentos de las láminas originales (Figura 1-9c).

Este último estado de deformación puede ser considerado como una cuasi turbidita, o bien desencadenarse en una. La transformación de un slump en una corriente de turbidez es un proceso frecuente que generalmente se asocia con una erosión intensa del suelo del submarino (Mulder et al., 2009).

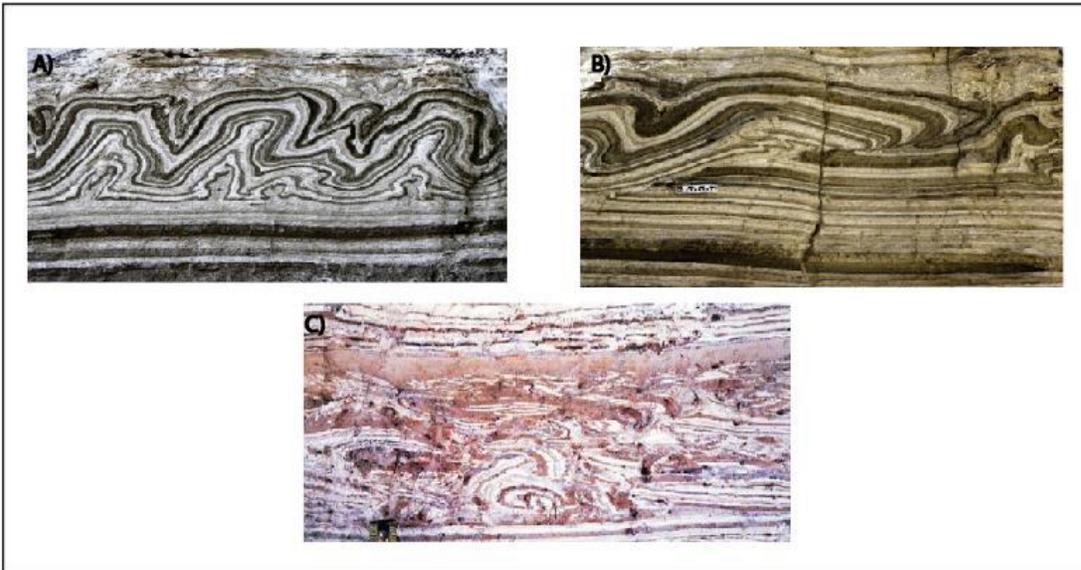


Figura 0-9 Imagen ilustrativa de las variaciones en las estructuras de plegamiento de sedimento suave (slumps), conforme aumenta la intensidad de la deformación. A) Slump de baja deformación, con pliegues simétricos de forma ondulada y sin fallamiento; B) Slump de deformación intermedia, con pliegues con forma de ola o recumbente, en esta etapa los slumps exhiben cabalgamiento entre las capas y fallamiento, como síntoma del aumento en la deformación; C) Slump a cuasi turbidita, etapa de deformación intensa donde se percibe una deformación turbulenta, de capas mezcladas y brechizadas/fragmentadas (Tomada de Heifetz et al., 2005).

1.4.3.3.2 Estructuras sedimentarias por licuación y/o fluidización

Los terremotos pueden causar estructuras de extensa deformación relacionadas con la licuación y la fluidización (Marco et al., 1996). La licuación es un fenómeno producido por la pérdida de resistencia al corte de sedimentos granulares saturados con agua (Owen, 1996), mientras que la fluidización es la condición en la que el componente ascendente de la resistencia al arrastre de un fluido iguala o excede el peso del grano (Lowe, 1975), permitiendo de este modo el ascenso del sedimento.

Se ha supuesto una relación genética entre los sismos y procesos de licuación en sedimentos antiguos y recientes. Se han reportado sismitas en sedimentos que varían en edad desde el Meso-Neoproterozoico (Pratt, 1994; Owen, 1995) hasta la actualidad.

Se han realizado estudios paleosísmicos en sucesiones sedimentarias del Holoceno mediante el análisis de estructuras de licuefacción y fluidización relacionadas con eventos históricos (área de Charleston: Obermeier et al., 1985; 1990; Talwani y Cox, 1985; Rajendran y Talwani, 1993; Rajendran et al., 1993; zona sísmica de nueva Madrid: Russ, 1979; Saucier, 1989; Obermeier et al., 1990; Saucier, 1991; Wesnousky y Leffer, 1992; Rodbell y Schweig, 1993). Dentro de las estructuras de deformación asociadas a la

licuefacción y fluidización, se destacan dos de ellas: estructuras de escape de fluidos y aquellas asociadas a la sobrecarga.

Lowe (1975), define a las estructuras de escape de fluidos, como estructuras deformativas dominadas por procesos de expulsión de fluidos (Moretti et al., 1999). Dentro de este tipo de configuración se destacan las de tipo pilar (Figura 1-10a); consistentes en deformación de sedimentos blandos, típicos en los procesos de fluidización relacionados con sobrecargas y eventos de sedimentación masiva (Lowe y Lo Piccolo, 1974; Lowe, 1975; Ricci Lucchi, 1980; Allen, 1982).

En lo que respecta a las estructuras por sobrecarga estos sistemas forman morfologías fácilmente reconocibles (Kelling y Walton, 1957) caracterizados por la deformación de la interfaz entre las diferentes capas en una serie de anticlinales y sinclinales de varias formas (Moretti et al., 1999).

Dentro de estas morfologías se destacan aquellas que derivan de gradientes de densidad inestables (Anketell et al., 1970) y carga desigual (Allen, 1982; Figura 1-10b). Experimentos realizados por Moretti et al. (1999) por medio de una mesa de vibración empleando sedimentos granulados (arcilla, limo y arena), muestran que la deformación se genera luego del choque sísmico. Mientras, la licuación, se produce cuando hay una disminución drástica de la resistencia de corte, derivando en una deformación impulsada por una carga o gradiente de densidad desigual.

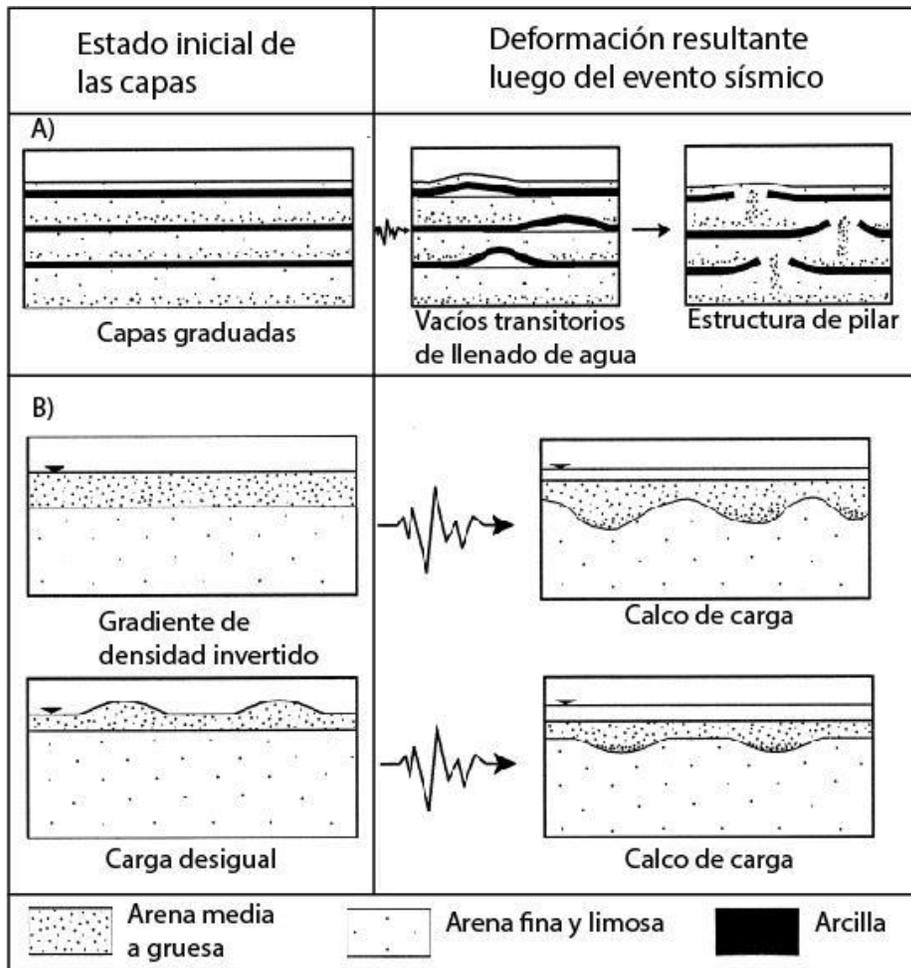


Figura 0-10 Bosquejo de los principales tipos de estructuras de deformación de sedimentos blandos por efectos de la licuefacción y/o fluidización. A la izquierda está la columna sedimentaria inicial. A la derecha están las características de licuefacción y/o fluidización percibidas por las distintas capas de sedimento después del evento sísmico. A) Representa las estructuras de escape de fluidos, puntualmente las estructuras de pilas. B) Ilustra las estructuras de sobre carga la figura superior simboliza la deformación frente un caso de gradiente de densidades invertido y la figura inferior uno asociado a una carga desigual (Tomado de Moretti, 1999).

1.4.3.3 Homogenitas

En lo profundo del Mediterráneo central-oriental, potentes unidades homogéneas han sido denominadas como homogenitas por Kastens & Cita (1981), o unifitas por Stanley (1981). Estas unidades usualmente rellenan bajos topográficos y están relacionadas a erupciones volcánicas (por ejemplo, Santorini; Cita & Aloisi, 2000) o terremotos (sismoturbiditas; Mutti et al, 1984).

"Homogenita" es un término descriptivo utilizado para indicar las lutitas aparentemente homogéneas y sin estructura que forman la parte más alta de una "megaturbidita" o "sismoturbiditas" (Polonia et al., 2013). Las megaturbiditas o sismoturbiditas pueden ser

productos de flujos de gravedad de sedimentos a gran escala provocados por eventos catastróficos (Mutti et al., 1984; Mulder et al., 2009; Polonia et al., 2013).

Cita et al. (1996) y Reeder et al. (1998) detallan dos tipos de homogenitas: el tipo (A) que puede tener varios decímetros a varios metros de espesor con una capa fina de limo arenoso que se superpone a un contacto basal agudo. El sedimento desde el lecho se hace rápidamente más fino llegando a ser de arcilla sin estructura sedimentaria. El tipo (B) tiene un grosor que varía desde unos pocos centímetros hasta aproximadamente 20 m. Se parece al tipo (A), excepto que la base arenosa está más desarrollada y el contacto basal es erosivo.

La descripción de Reeder et al. (1998) sugiere que las homogenitas no tienen una textura homogénea, que ya había sido señalado por Cita et al. (1996). Para estos autores, el término "homogenita" implica solo una naturaleza homogénea de los depósitos y se mantiene para mantener la coherencia con sus trabajos anteriores. Proponen referir "homogenita" a la expresión en un evento único con una posición estratigráfica definida (Cita et al., 1996). Esta definición se ajusta a la definición de "megaturbidita" de Bouma (1987).

Algunas homogenitas se consideran tsunamigénicas (Kastens y Cita, 1981; Cita et al., 1996; Cita y Rimoldi, 1997; Cita y Aloisi, 2000) por el retrabajo de un volumen considerable de sedimentos y, a veces, porque los depósitos costeros de tsunami podrían estar relacionados a los depósitos de aguas profundas. Los efectos del tsunami en entornos de aguas más profundas generalmente se consideran marcados por una capa de arena y barro clasificados como una homogenita que puede estar vinculada a un único evento de tsunami (Cita et al., 1996).

Las homogenitas se caracterizan por la aparición de tres unidades distintas en los perfiles de tamaño de grano (una base de grano grueso comúnmente de tamaño arena, a la cual sobreyace una unidad homogénea gruesa y en la cima una capa delgada de sedimento muy fino), y por la distribución típica de los parámetros de tamaño de grano en diagramas de simetría-clasificación (Bertrand et al., 2008). Mientras que su clasificación se basa en sus características sedimentarias y composiciones minerales, que difieren según los diferentes entornos sedimentarios y los mecanismos de formación (Cita et al., 1996; Cita y Aloisi, 2000; Beck, 2009; 2011; Morellón et al, 2014).

1.4.4 Antecedentes geoquímicos de la zona

Para el análisis geoquímico continental de la zona realizado por Astudillo (2015), se recolectaron muestras siguiendo una grilla regular (ajustada a la red de drenaje en el entorno del punto de muestreo), con una densidad de 1 muestra cada 20km² en toda la Hoja, a excepción de los alrededores de Pisagua donde se cuenta con una densidad de una muestra cada 4 km².

Se obtuvieron las concentraciones de 59 elementos y compuestos, que revelaron la existencia de patrones geoquímicos regionales, que se traducen en 6 nodos:

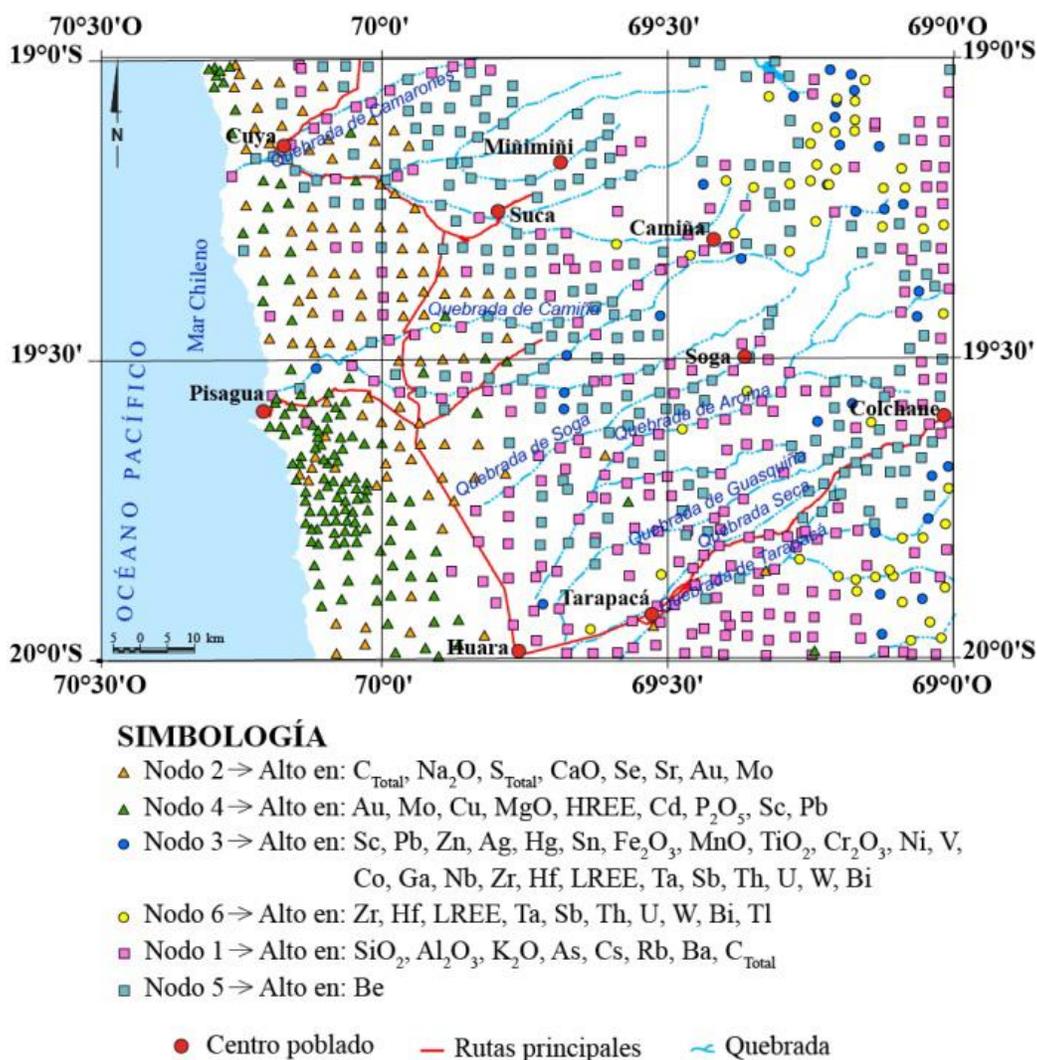


Figura 0-11 Distribución de las muestras asociadas a los distintos nodos y sus elementos característicos. Extraída de Astudillo et al. (2015).

Astudillo (2015), concluye que los patrones geoquímicos generales, como las anomalías puntuales detectadas en la Hoja, obedecen principalmente a factores naturales:

En primer lugar, se tiene a la cordillera de la Costa, con altos valores de S_{Total} , Na_2O , Ca , Sr y Se . Estos valores, son el reflejo de la abundancia de costras salinas, cuyo desarrollo estaría fuertemente influenciado por la camanchaca. Las principales anomalías metálicas son de Cu y Au , presentándose en fuerte coincidencia con cuerpos intrusivos.

La depresión Central, está caracterizada por altos valores de SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Rb , Ba , As , Cs y Sb . Estas concentraciones indican que existe un transporte de detritos, ricos en estos elementos, desde la precordillera y cordillera de los Andes, hasta la depresión Central. En particular, el transporte de detritos ricos en As , Cs y Sb ocurriría a través de las quebradas Aroma, Camarones y Camiña, desde zonas mineralizadas o alteradas, ubicadas en las cabeceras de estos drenajes. La ocurrencia de anomalías de Au , Pb , Hg , Zn , Bi y Cu en las pampas refleja un proceso de concentración de las fases minerales más densas como consecuencia del accionar erosivo del viento.

La cordillera de los Andes está enriquecida en Fe_2O_3 , MnO , TiO_2 , Cr_2O_3 , Ni , V , Co , Ga y Sc . Este patrón refleja la presencia de detritos derivados de fuentes de máficas, las que se asocian a rocas volcánicas de composiciones basálticas a andesíticas, de común distribución en la cordillera de los Andes.

Hacia el sureste de la Hoja, se presentan altos valores de Ag , Pb , Zn , Hg y Sn los cuales se correlacionan con zonas mineralizadas o alteradas, asociadas a cuerpos intrusivos que contienen depósitos del tipo pórfido cuprífero, vetiforme, y de relleno de fracturas.

1.4.5 Contexto oceanográfico

El clima marino, costa afuera al oeste de Sudamérica, resulta de la interacción de sistemas atmosféricos a escala de cuenca, combinado con los efectos regionales causados por el límite océano-continente. De estos sistemas, el más influyente es el Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental (APSO), que condiciona a los vientos a lo largo de las costas de Chile y Perú (Strub et al., 1998).

El APSO, está limitado en el norte por la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ; su sigla en inglés) y por el sur por el frente polar y perturbaciones en la zona frontal de éste. Asociado con el anticiclón, está la inversión térmica de subsidencia, que ocurre debido a que esta zona de alta presión arrastra los vientos ecuatoriales a Perú y el Norte de Chile, lo que genera un gradiente, donde se ubican los vientos cálidos y húmedos por sobre los vientos fríos del océano (Strub et al., 1998).

La intersección entre la inversión térmica y las montañas costeras provoca la propagación de las ondas atmosféricas costeras a lo largo del límite océano-continente (Figura 1-12). Este movimiento de masas de aire puede ser modificado por efectos regionales tal como la ubicación de la baroclina generada por los gradientes de temperatura horizontales. O bien, puede verse alterado, por efectos locales tales como una bahía abierta hacia el norte o promontorios (Strub et al., 1998).

En Pisagua, puede observarse un promontorio de mayor tamaño, que protege a la bahía de los vientos, permitiendo únicamente la entrada de los vientos del oeste. Los que, además, ven restringidos la propagación de las perturbaciones frontales hacia el norte, debido a la influencia del APSO, constante a lo largo del año.

Con la atenuación del movimiento de las perturbaciones, se originan celdas anticiclónicas superficiales, las que se encuentran en contacto con la capa límite marina, impulsando la corriente de Humboldt, la que genera movimientos verticales de masas de aguas como upwelling (surgencia) y downwelling (subsistencia). Este fenómeno ocurre principalmente en el límite este de las cuencas oceánicas, en las regiones subtropicales donde el viento dirige masas de agua en dirección al océano como efecto de la "Deriva de Ekman" (Figura 1-6). La continuidad de masa promueve la circulación de aguas profundas desde profundidades de 200-400 m hacia la superficie, enfriándola, dando lugar a un mayor gradiente térmico que favorece la circulación a lo largo de la línea de costa, cerrando el ciclo.

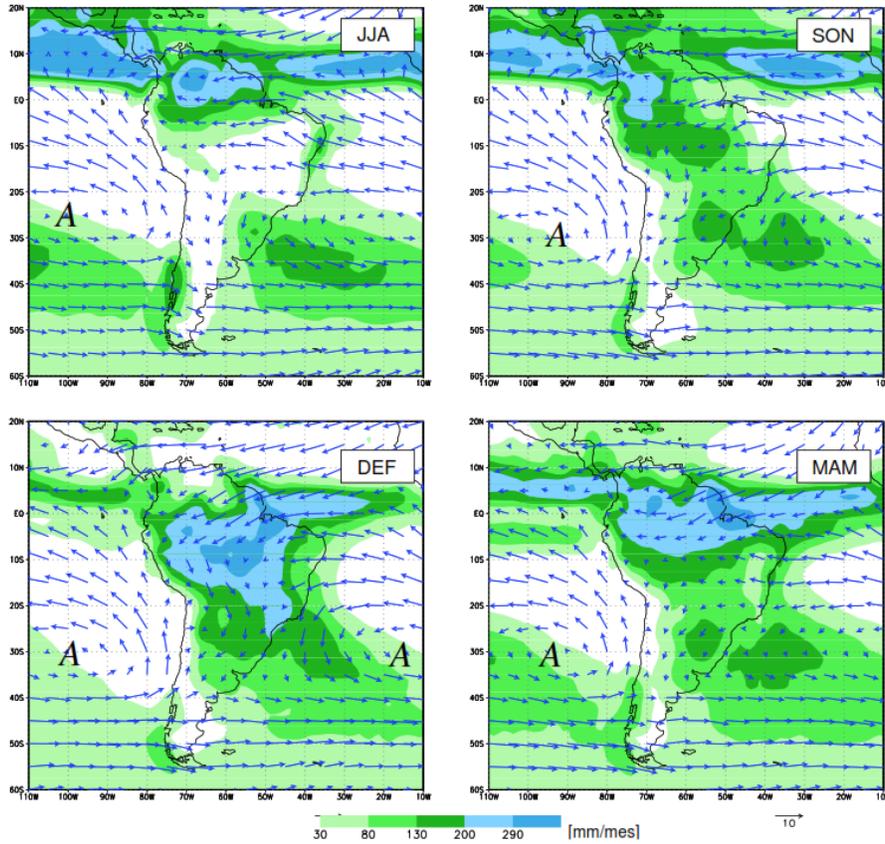


Figura 0-12 Colores indican la cantidad de precipitaciones, mientras las flechas son indicadores de la dirección de los vientos en la costa occidental de Sudamérica. (JJA: Junio-Julio-Agosto; SON: Septiembre-Octubre-Noviembre; DEF: Diciembre-Enero-Febrero; MAM: Marzo-Abril-Mayo) La letra "A" indica centros de los principales anticiclones, siendo la que se encuentra al oeste de Sudamérica el correspondiente al Anticiclón del Pacífico Suroriental. Extraído de Garreaud (2011).

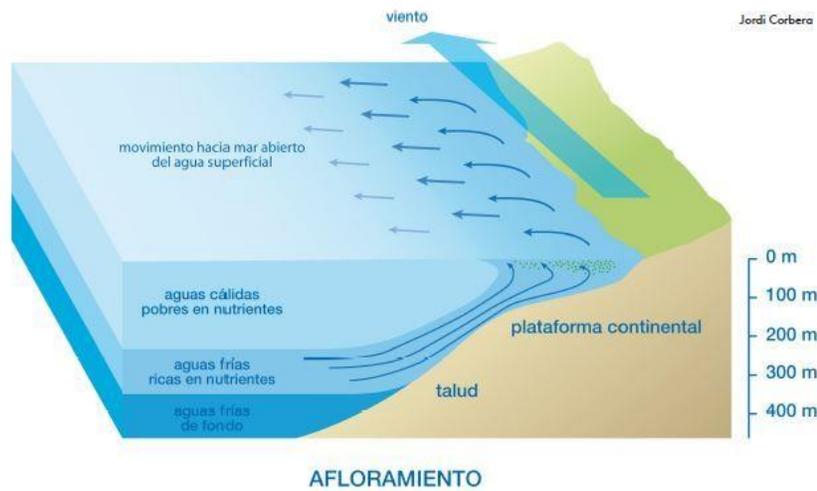


Figura 0-13 Ilustración representativa de la dirección de los vientos superficiales y el transporte de Ekman. Extraída desde https://www.steamcanarias.com/recursos/nuestromar/corrientes_marinas.html

1.4.5.1 Corriente de Humboldt

La Corriente Circumpolar Antártica o “Deriva de Vientos del Oeste” (West-Wind Drift; WWD) da origen a todas las corrientes paralelas a la línea de costa de Sudamérica en su borde occidental. De ésta surge una corriente que se dirige hacia el sur, denominada Corriente del Cabo de Hornos (*Cape Horn Current*; CHC). A su vez, también da origen a la Corriente de Humboldt, o Corriente Perú-Chile (*Peru-Chile Current*; PCC), la principal responsable de adveccionar aguas frías hacia zonas tropicales (Figura 1.4-6 A).

Según Strub et al., (1998), la circulación regional en las costas del norte de Chile es dominada por la Corriente de Humboldt, a través de la que fluyen las Aguas Antárticas Intermedias ($T_a \sim 5.5-8^\circ\text{C}$, $34.3 < S < 34.5$), bajo los 500 m de profundidad, hacia el Ecuador. Esta corriente se bifurca, dando lugar a dos brazos que se dividen en PCC y CCC (Corriente Costera Chilena: *Chilean Coastal Current*). La primera fluye varios kilómetros costa afuera, por lo que no tiene mayores efectos sobre los fenómenos ocurridos en la costa. La segunda, más cercana al continente, se asocia a los fenómenos de surgencia.

Estos eventos de surgencia son guiados por ciclos de relajación y esfuerzo (4-15 días) debido a la tensión generada por vientos provenientes del suroeste asociados a la propagación hacia los polos de los mínimos atmosféricos costeros (Rodríguez et al., 1991; Marín et al., 1993; Rutllant et al., 1998).

Así como se observan corrientes que se dirigen hacia el norte, también están las que avanzan hacia el sur, siendo una de las más relevantes: la contracorriente Perú-Chile (*Perú-Chile Countercurrent*; PCCC) que está asociada con las Aguas Subtropicales Superficiales (Subtropical Surface Water; STW; $T^a > 18,5^\circ\text{C}$; $S > 34,9$).

La corriente profunda paralela a la línea de costa (*Poleward Undercurrent*; PUC), subyace a la corriente de Humboldt y PCCC, circulando sobre el talud y la plataforma exterior. Exhibe variaciones en su velocidad, detectándose puntos máximos sobre la plataforma continental a 150-200 m de profundidad a los 10°S , y a 40 km de la costa a los 30°S . Esta corriente transporta Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (*Equatorial Subsurface Water*; ESSW) hacia el sur. ESSW está caracterizada por bajas concentraciones de oxígeno ($[\text{O}_2] < 0,25-0,5 \text{ ml l}^{-1}$), definiendo la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) entre los 50 y 300 m de profundidad (Brandhors, 1971; Morales et al., 1996).

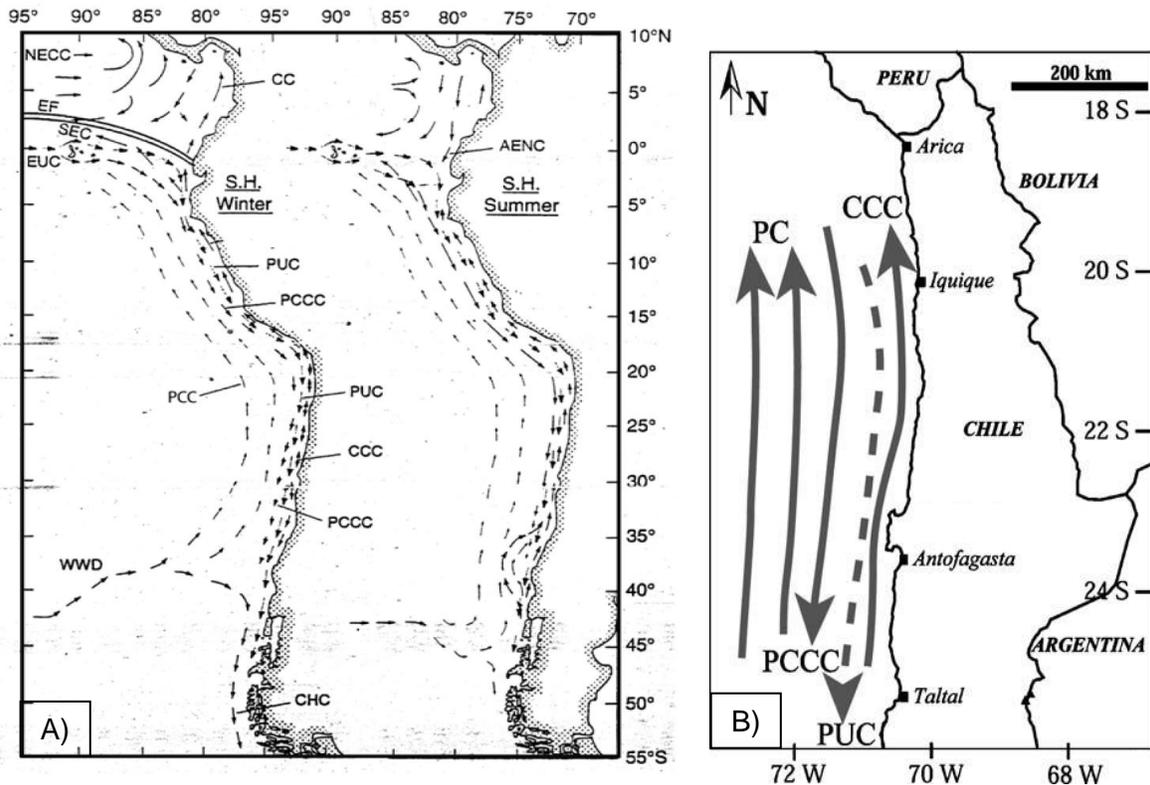


Figura 0-14 A) Corrientes en el borde oeste de Sudamérica durante el invierno (izquierda) y verano (derecha). WWD: West Wind Drift; PCCC: Perú-Chile Countercurrent; PUC: Perú Undercurrent; PCC: Perú-Chile Current; CCC: Chile Coastal Current; CHC: Cape Horn Current. Modificado de Strub et al. (1998). Extraído de León (2015). B) Componentes y circulación de la corriente de Humbolt. Extraído de Strub et al. (1998).

1.4.5.2 El Niño – Oscilación del Sur

Como fue mencionado anteriormente la interacción océano-atmósfera es el principal factor de variaciones en las circulaciones atmosféricas. Walker (1924), fue el primero en caracterizar el flujo de las masas de aire de este a oeste en la zona ecuatorial (vientos alisios), como un aumento de aire cálido y húmedo en la costa oeste del océano Pacífico tropical (sur de Indonesia), y la subsidencia del aire seco del este del mismo océano. Las variaciones Este-Oeste de la presión atmosférica a través del océano Pacífico caracterizan la Oscilación del Sur.

La intensidad de la circulación de Walker asocia las variaciones entre la temperatura de la superficie del océano Pacífico Este y Oeste, sugiriendo un fuerte acoplamiento océano-atmósfera para las transferencias de calor del océano en formas de anomalías de la presión atmosférica.

Los eventos tipo ENSO, están caracterizados por la diferencia estandarizada entre la presión atmosférica medida en Tahití (17.5°S, 149.6°W) y Darwin (12.4°S, 130.9°E). Esta diferencia es conocida como el Índice de la Oscilación del Sur (Southern Oscillation Index; SOI). Los valores del SOI, están asociados a las anomalías positivas (negativas) de presión en Tahití, caracterizando el reforzamiento de la subsidencia del aire seco y frío, y al mismo tiempo las anomalías de presión negativa (positiva) en Darwin. Las situaciones extremas, asociadas con negativos fuertes (positivos) de SOI, caracterizan los eventos de El Niño (La Niña) (Barry & Chorley, 1998; Figura 1-15).

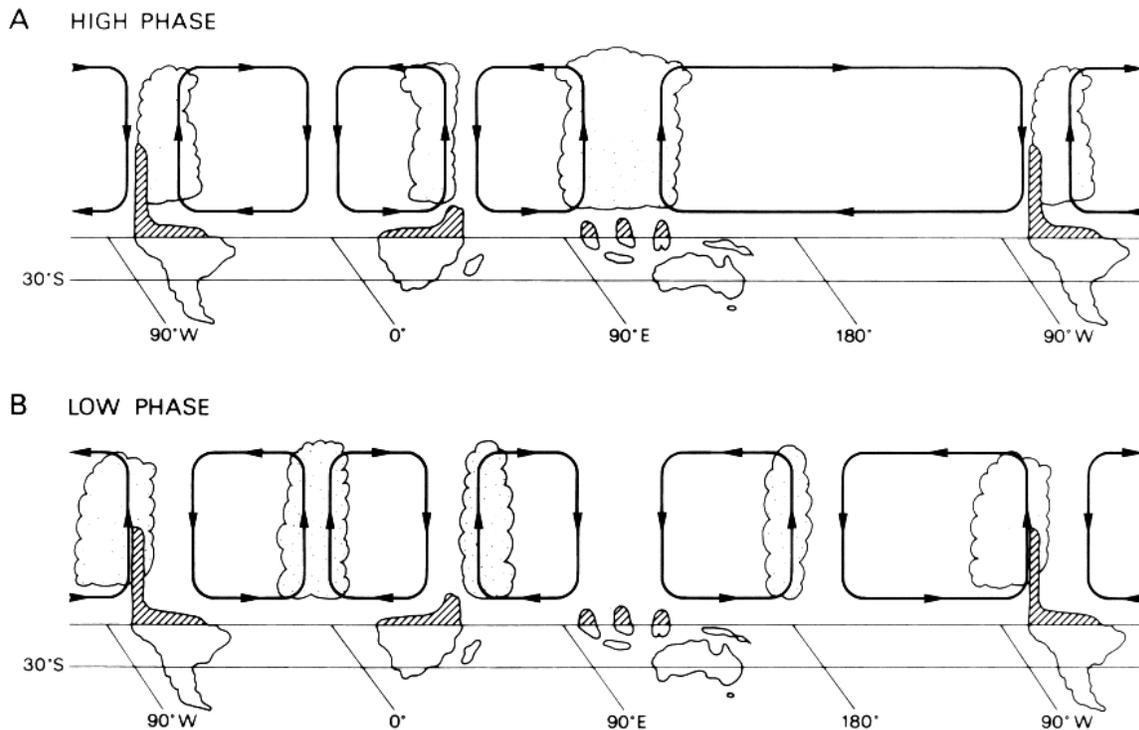


Figura 0-15 Circulación de Walker durante las fases positivas (La Niña, arriba) y negativas (El niño, abajo) de la Oscilación del Sur. Extraído de Barry & Chorley (1998).

De esta forma, el fenómeno del Niño ocurre cuando el transporte de este a oeste de aguas cálidas superficiales es invertido, transformándose en un flujo de oeste a este, causando que aguas cálidas se acumulen a lo largo de la corriente de Humboldt, y que la surgencia costera, y por lo tanto todo el ambiente bioquímico, cambie en el Pacífico Suroriental (Mörner, 1993).

Los principales impactos de los eventos de El Niño, al Norte de Chile, están asociados a la propagación hacia los polos de ondas de Kelvin, u oceánicas ecuatoriales cálidas, que corresponden a ondas de gravedad modificadas por la rotación de la tierra.

Según Mörner (1993), los eventos ENSO, tienen estrecha relación con la temperatura general y velocidad de rotación de la Tierra. Se ha estipulado que, durante las glaciaciones, con el nivel del mar 100 a 120 m más bajo, la rotación de la Tierra debió haber sido entre 1500-2000 ms^{-1} más rápida. En aquellos períodos, las corrientes ecuatoriales con sentido este-oeste, debieron haber sido mucho más fuertes y haber transportado masas de agua mucho más voluminosas.

Esto explica que aguas superficiales mucho más cálidas hayan sido encontradas en el lado oeste del océano Pacífico durante el máximo glacial de 18 ka. En estas ocasiones, se estima que apenas pudieron haber existido eventos tipo ENSO, y se predice que todos los períodos de glaciación están caracterizados por una falta de eventos tipo ENSO, mientras que estos eventos son comunes en condiciones interglaciares. En teoría se esperaría que una rotación más lenta, los eventos tipo ENSO, debieran tomar más fuerza y durar más tiempo.

Finalmente, las consecuencias que trae el fenómeno ENSO sobre las costas del norte chileno, y que pueden durar varios meses durante una temporada determinada son, (1) el refuerzo de las corrientes dirigidas a los polos (Huyer et al., 1991), (2) un aumento del nivel del mar (Fonseca, 1985; Bilbao, 1992; Ulloa et al., 2001), (3) un aumento de la temperatura superficial marina, profundización de la termoclina y aumento de la salinidad marina superficial (Thomas et al., 2001; Ulloa et al., 2001) (Figura 1.4-8), (4) oxigenación de la columna de agua (Ulloa et al., 2001), (5) aumento de la influencia de los sistemas ciclónicos desde las latitudes medias, en consistencia con la ocurrencia de la subsidencia de aire seco (Rutllant & Fuenzalida, 1991).

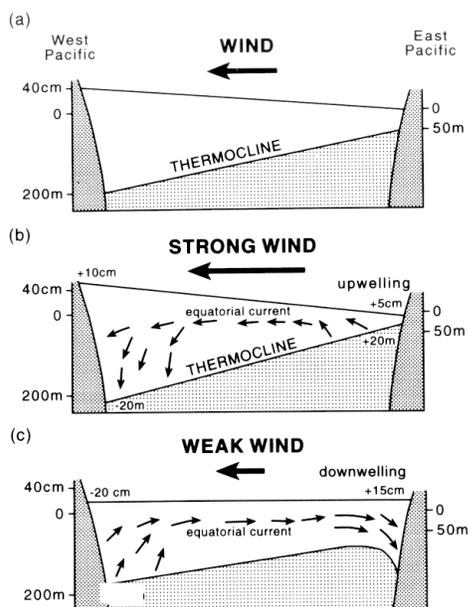


Figura 0-16 Estructura del océano ecuatorial para condiciones medias (a) La Niña, (b) El Niño. (c) Notar los cambios en la profundidad de la termoclina y del nivel del mar. Extraído de Barry & Chorley (1998).

2 Metodología

2.1 Revisión de antecedentes

Se realiza una recopilación de las publicaciones orientadas al análisis de la geología marina, en zonas sujetas a similares condiciones. Estos análisis son de carácter sedimentológico, estratigráfico, geoquímico y mineralógico.

Previo a la campaña de terreno, la investigación bibliográfica se centra en varios estudios realizados en la bahía de Mejillones, en la II Región de Antofagasta. En éstos se abordan los distintos análisis antes mencionados, aplicados a las áreas de paleosismología y geoquímica ambiental.

Posterior a la campaña de terreno, se realiza un estudio exhaustivo que aborda bibliografías más extensas, donde se busca la comprensión y correcto análisis de los resultados obtenidos a través de las distintas pruebas realizadas sobre las muestras obtenidas.

2.2 Campaña de terreno para recuperación de muestras de fondo marino

Para la obtención de las muestras superficiales, testigos y datos batimétricos, se realiza campaña de terreno llevada a cabo en 3 etapas, detalladas a continuación.

2.2.1 Primera etapa: Draga

En primer lugar, se realiza el proceso de obtención de muestras superficiales mediante draga a través de la que se recolecta un total de 25 muestras (Figura 2.2-1 (A- B)). Estas muestras se obtienen en puntos que fueron previamente definidos, con el fin de abarcar de forma homogénea la zona de estudio (Figura 2.2-2), lo que permitiría una correcta interpolación de los datos granulométricos y químicos, y así reconstituir las facies superficiales de la bahía, de manera fidedigna.

Por otra parte, esta etapa también hace posible determinar el área idónea para la recolección de testigos, puesto que a través de la observación de las muestras se pueden definir indicadores de un alto contenido de materia orgánica y signos de hipoxia, que conllevarían una correcta preservación de sedimentos laminados.

2.2.2 Segunda etapa: Rumöhr

La segunda fase de la campaña de terreno consistió en la obtención de testigos mediante Rumöhr. Este equipo consiste en un soporte metálico que sujeta a presión tubos de acrílico, sistema al que se le agrega un peso para facilitar el descenso y posterior entierro en el

suelo marino. Finalmente, este sistema se sella en el ascenso del tubo, mediante una escotilla que se activa debido a la diferencia de presión, impidiendo el escape del sedimento desde el fondo del tubo.

En esta etapa se recolectan 12 testigos, cuyos espesores van desde los 0,15 a 1,5 m, los que se utilizarán para análisis estratigráfico y geoquímico en profundidad (Figura 2-1).



Figura 2-1 A) Draga. B) Muestra obtenida con draga. C) Rumöhr con testigo adosado saliendo del agua. D) Testigo PR1810. E) Testigo PR1809.

2.2.3 Recolección de datos batimétricos

En esta etapa se utilizó un ecosonda, dispositivo que a través de un sonar, determina la profundidad a la que se encuentra el suelo marino. Debido a que el equipo no cuenta con un dispositivo que almacene los datos obtenidos, estos se fueron registrando manualmente en los mismos puntos en los que se sacaron las muestras con draga, con el fin de realizar posteriormente una correcta interpolación, permitiendo definir una adecuada batimetría del área (Figura 2-2).

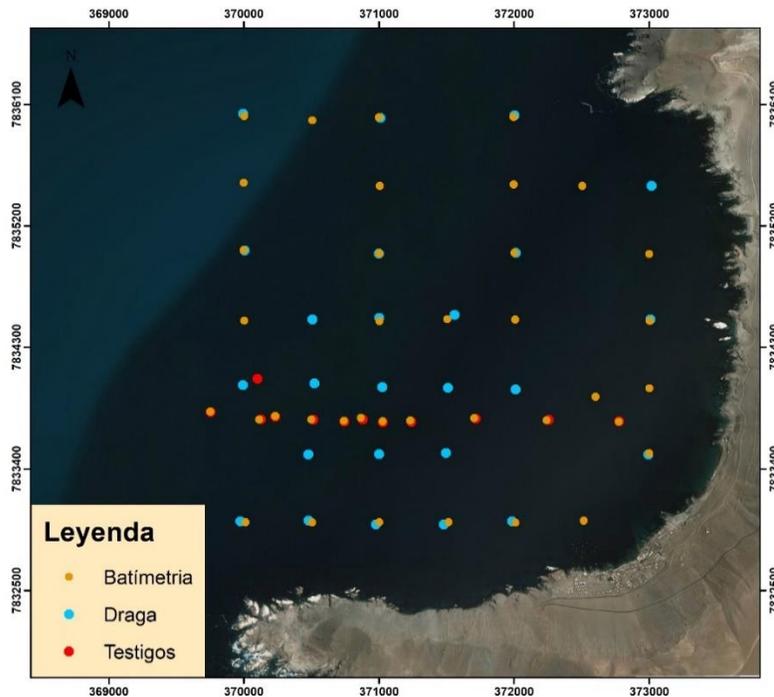


Figura 2-2 Mapa de puntos donde se obtuvieron muestras y datos.

2.3 Análisis de la estratigrafía y estructura de los sedimentos marinos por Rayos X

El análisis estratigráfico es realizado gracias a una tomografía computarizada de alta resolución, que permite la visualización de todas las capas presentes en los distintos testigos obtenidos en terreno.

El equipo utilizado para estos propósitos es principalmente para uso médico, y corresponde al Modelo SOMATOM Definition Edge, de la empresa Siemens.

El funcionamiento de este equipo se basa en la radiación de Rayos X. Se diferencia de una radiografía común, en que esta última utiliza un tubo fijo de rayos X, mientras el escáner utiliza una fuente motorizada de rayos X que gira alrededor de una abertura circular de una estructura en forma de dona llamada Gantry. Durante el escaneo de los testigos, éstos permanecen de forma horizontal, sobre una cama que se mueve lentamente a través del Gantry.

En este proceso, el equipo utiliza detectores digitales para recibir las señales de rayos X, para luego ser transmitidas a una computadora. Cada vez que la fuente de rayos X completa toda una rotación, la computadora realiza un procesamiento matemático de las señales para construir un corte de imagen 2D. Estas imágenes pueden ser desplegadas en formas

individuales o amontonadas, para generar una imagen 3D, y así obtener la reconstrucción de todo el testigo.

La escala de Hounsfield corresponde al valor que se le otorga al pixel en la imagen final de la tomografía, que es proporcional al grado en que cada material dentro del voxel (el término proviene de *volume element*, el que representa cada uno de los bloques de la imagen que constituyen la matriz a través de la cual es registrada y mostrada una imagen de tomografía computarizada) ha atenuado el haz de rayos X, es decir que representa las características de absorción o el coeficiente de atenuación lineal, de un volumen particular de tejido (SC & MJ, 2000).

Las unidades Hounsfield (UH; denominadas en honor al inventor Godfrey Hounsfield) van en un rango desde los -1000 a +1000, cada uno constituyendo un nivel diferente de densidad óptica. Esta escala de densidades relativas está basada en aire (-1000), agua (0) y metal (+1000).

De esta forma, para la visualización de las imágenes, se escoge un ancho de ventana (WW: *Window Width*), correspondiente a un rango de valores que se representan en tonos grises, y un nivel de ventana (WL: *Window Level*), que indica el valor medio de ese rango. En otras palabras, si se utiliza un WL= 500 y un WW=1000, entonces se apreciarán en tonos grises todos los elementos con UH entre 0 y 1000, en negro, todos los elementos con UH menor a 0 y en tonos blancos todos los elementos con UH mayor a 1000.

2.4 Submuestreo del testigo PR1805

Para determinar el testigo óptimo a ser estudiado, se utilizaron criterios de ubicación en el plano, respecto de las mejores condiciones granulométricas, además de cuán bien conservados se observan las láminas en las imágenes tomográficas.

El testigo PR1805 fue el que satisfizo mejor los criterios mencionados. Además, se tomó en cuenta la longitud del testigo, lo que proporcionará una mayor cantidad de información en el tiempo.

Paralelamente, se etiquetan y pesan las bolsas herméticas donde se guardarán las muestras del testigo, con el objetivo de definir la densidad, a través del cálculo que procede entre las masas tanto húmedas como secas de las capas.

Posteriormente, se realizaron marcas en el tubo con el fin de evitar alguna inclinación en el plano de apertura. Para esta última, se utilizaron una herramienta multipropósito Dremel y un hilo de pescar.

Consecuentemente, se realiza una caracterización estratigráfica mediante observación, para luego marcar los puntos que definirán las líneas límites de las láminas a muestrear. Una vez que se tienen definidas las capas que representarán cada muestra, se procede a extraer cada lámina y guardarla en bolsas herméticas para evitar la contaminación entre ellas.

Estas muestras deben ser analizadas en seco, por lo que pasan directamente al horno.

2.5 Análisis de Muestras Superficiales y Sub-Muestras del Testigo PR1805

2.5.1 Análisis granulométrico

El total de muestras superficiales fueron sometidas a análisis de granulometría láser. Para este proceso se utilizó el equipo Mastersizer 2000-Granulometría Láser del Laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile.

Este equipo consiste en un analizador de tamaño de partículas modular con tecnología de difracción láser diseñado para la medida de la distribución de tamaño de partículas de muestras en dispersión líquida y seca. Cuenta con un rango limitado de tamaño de partícula capaz de analizar que va desde 0,02 a 2000 micras (micrones).

Por este motivo, se inicia el proceso de análisis, haciendo pasar una cantidad pequeña de muestra a través de un tamiz de malla 80. Una vez que existe la certeza de que la muestra a analizar no sobrepasa las 2000 micras, ésta se agrega a un líquido no reactivo, que somete a la muestra a un rayo láser monocromático.

Según la teoría de Fraunhofer se origina una figura de difracción en el detector que se procesa como una distribución granulométrica de las muestras. De este modo, se obtienen datos como la media y la dispersión, que posteriormente serán interpretados en mapas de facies, en los que se pueden deducir zonas de mayor o menor tamaño, así como mejor o peor selección.

2.5.2 Análisis geoquímico

La técnica de fluorescencia de rayos X consiste en el procesamiento y análisis de las emisiones de luminiscencia generadas por la excitación de una muestra, que es sometida a radiación. Cada partícula emite un espectro característico, que se puede asociar a los diferentes elementos que la componen.

Para este análisis se utilizó al equipo EDX-720 asociado al Laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile. El equipo permite analizar muestras en estado líquido y sólido,

reconociendo concentraciones por sobre los 20 ppm, correspondiente al error analítico, que en se traduce en un 0,002%. Este equipo requiere una cantidad muy pequeña de muestra, que es dispuesta en pequeños tubos de no más de 5 milímetros de diámetro, y 1,5 centímetros de alto.

Las bases de estos pequeños tubos fueron selladas con un filme plástico, al que luego se le realizó una pequeña perforación con un alfiler, con el fin de que no hubiese sobrepresión en el interior del pequeño recipiente. Finalmente, las muestras son colocadas dentro del equipo, el que procesa los espectros gracias a un software integrado, entregando las proporciones de los elementos en estudio, con un error analítico diferente para cada elemento, en cada muestra, hasta el orden de la milésima.

Este análisis químico fue llevado a cabo tanto para definir la línea de base como para obtener comparaciones relativas de las concentraciones de los elementos en profundidad. A través de esto, se busca determinar si existen anomalías en las muestras, e identificar patrones que se correlacionen con eventos periódicos de distinta magnitud de tiempo, y que puedan relacionarse con eventos tipo ENSO.

Dentro de los elementos detectados, se discriminan entre los elementos mayores: Si, Al, Ca, Fe, K, S, Mg, Sc; elementos menores: Ti, Tm, Mn, Sr, Ba, Cs; y elementos traza: Br, Rb, Cu, Zn, Zr, V, Y, Mo.

2.5.3 Tratamiento de datos

Para el análisis del comportamiento de los datos obtenidos, se disponen diferentes visualizaciones en las que se agrupan los elementos detectados en tres grandes grupos, elementos mayores, menores y traza.

Posteriormente se identifican los elementos con comportamientos dependientes e independientes, y se procede a realizar análisis de vectores propios que se explica a continuación.

2.5.3.1 Análisis de componente principal (ACP) (Jolliffe & Cadima, 2016)

El contexto usual en el que se utiliza el análisis de componentes principales es aquél que involucra una base de datos con observaciones, de p variables numéricas, tal como la concentración de los elementos; por n entidades, que en este caso corresponden a las distintas muestras.

Estos valores definen una matriz de datos cuya dimensión corresponde a $p \times n$. Esta matriz X , cuya columna j , corresponde al vector x_j de observaciones en la variable j .

Luego, se busca una combinación lineal de columnas de la matriz X con máxima varianza. Estas combinaciones lineales están dadas por:

$$\sum_{j=1}^p a_j x_j = X_a$$

Ecuación (1)

Donde a es un vector de constantes a1. a2. ..., ap. La varianza de cualquier combinación lineal está dada por:

$$var(X_a) = a' S a$$

Ecuación (2)

Donde S es la matriz de covarianza asociada al conjunto de datos. Por tanto, identificar la combinación lineal donde se maximice la varianza es equivalente a obtener un vector de p dimensiones que maximiza la variable a'Sa. Para que este problema tenga una solución bien definida, debe imponerse una restricción adicional. La restricción más común implica trabajar con vectores normalizados a la unidad, en otras palabras, aplicar la condición a'a=1. El problema es equivalente a maximizar:

$$a' S a - \lambda (a' a - 1)$$

Donde λ corresponde al multiplicador de Lagrange.

Diferenciando respecto al vector a, e igualando esta expresión al vector nulo, se produce la expresión:

$$S a - \lambda a = 0 \Leftrightarrow S a = \lambda a$$

Ecuación (3)

Por lo tanto, a debe ser un vector unitario propio y λ su correspondiente valor propio, de la covarianza de la matriz S. En particular, se busca el mayor valor propio, λ_1 (y el correspondiente vector propio a1), debido que los valores propios son las varianzas de las combinaciones lineales definidas por el vector propio a:

$$var(X_a) = a' S a = \lambda a' a = \lambda$$

Ecuación (4)

La ecuación se mantiene válida si los vectores propios son multiplicados por -1. Por tanto, los signos de los valores son arbitrarios y sólo sus magnitudes relativas y patrones de signos son realmente significativos.

Cualquier matriz real simétrica de dimensiones “p x p”, como la matriz de covarianzas S, tiene exactamente p valores propios reales, λ_k ($k=1, \dots, p$), que, en conjunto con los vectores propios correspondientes, pueden definirse para formar un grupo ortonormal de vectores, es decir $a'ka_k=1$, si $k=k'$, o de lo contrario sería 0.

Una aproximación mediante multiplicadores Lagrangianos, con la restricción añadida de ortogonalidad de vectores con diferentes coeficientes, también puede usarse para mostrar que un conjunto completo de vectores propios de S son soluciones al problema de obtener hasta p combinaciones lineales nuevas de la forma:

$$Xa_k = \sum_{j=1}^p a_{jk}x_j$$

Ecuación (5)

Tal que maximice la varianza y que no se relacione con combinaciones lineales previas.

La no relación resulta del hecho que la covarianza de estas dos combinaciones lineales, Xa_k y $Xa_{k'}$, está dada por: $a'_{k'} \cdot Sa_k = \lambda_k \cdot a'_{k'}$. $a_k = 0$, sólo si: $k' \neq k$

Estas combinaciones lineales de Xa_k se llaman componentes principales del conjunto de datos. Los elementos de un vector propio a_k son llamados cargas CP y los elementos de la combinación lineal Xa_k son llamados puntajes CP, debido a que son los valores individuales que se le asocian a cada individuo en una CP dada.

Al momento de definir cuantas CP se deben utilizar, se utilizan por general una cantidad predefinida de varianza. Para términos de este trabajo, se utiliza una varianza de 70% máximo, esto indica que la representatividad promedio de las variables usadas en el grafico es de 70%. Esta varianza se alcanza utilizando siempre los dos primeros CP para cada combinación de grupos de datos. Hasta ahora se ha descrito el procedimiento básico utilizado para construcción de análisis ACP, dado que el procedimiento completo escapa de los alcances de este trabajo, para acceder al resto, referirse a la revisión realizada por Jolliffe & Cadima (2016).

3 Batimetría y facies superficiales de la bahía de Pisagua

3.1 Batimetría

Los datos batimétricos indican un aumento brusco en la batimetría cerca de la costa hacia el este, lo que puede explicarse debido al aporte sedimentario desde el continente que aumenta el nivel de profundidad de la bahía.

Hacia el sur, puede apreciarse igualmente un aumento brusco en la batimetría, en las cercanías del promontorio que da lugar a la bahía. Esta morfología al actuar como una barrera de los vientos desde el sur evita el arrastre de sedimentos de manera homogénea en la superficie marina, lo que provoca, que se produzca un aumento del nivel de la bahía, debido al aporte de sedimentos desde el promontorio (Figura 3-2).

Debido a la falta de datos, no pueden inferirse morfologías submarinas, pudiendo obtenerse únicamente una interpolación de los 25 datos medidos en terreno (Figura 3-1).

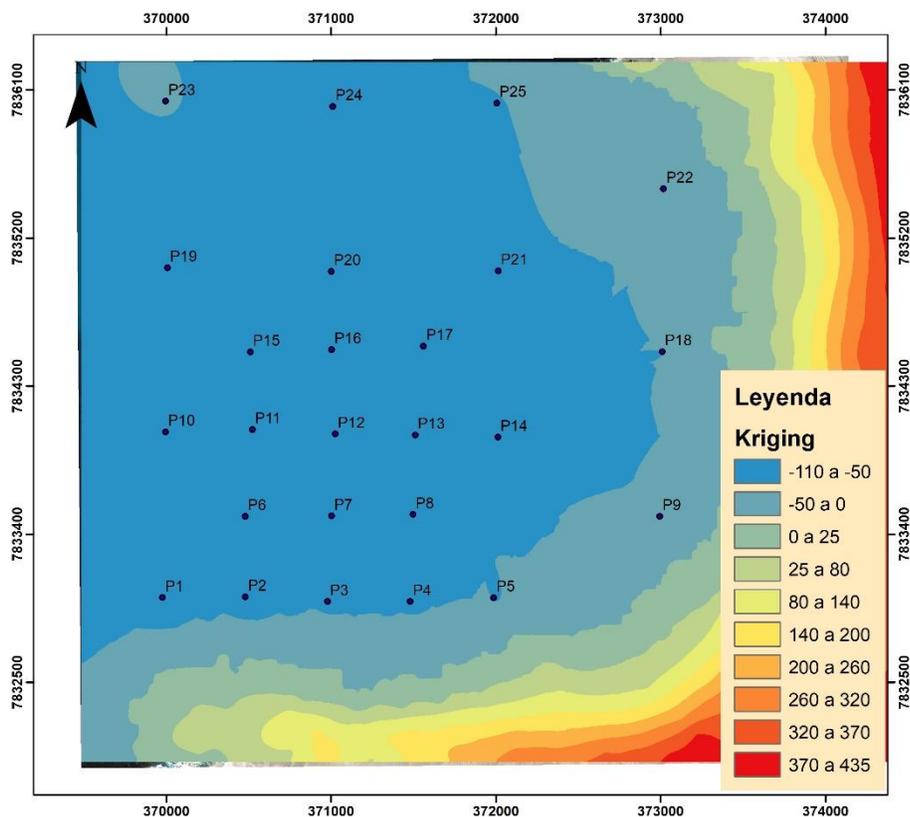


Figura 3-1 Mapa de interpolación batimétrica, obtenida a partir de ArcGIS.

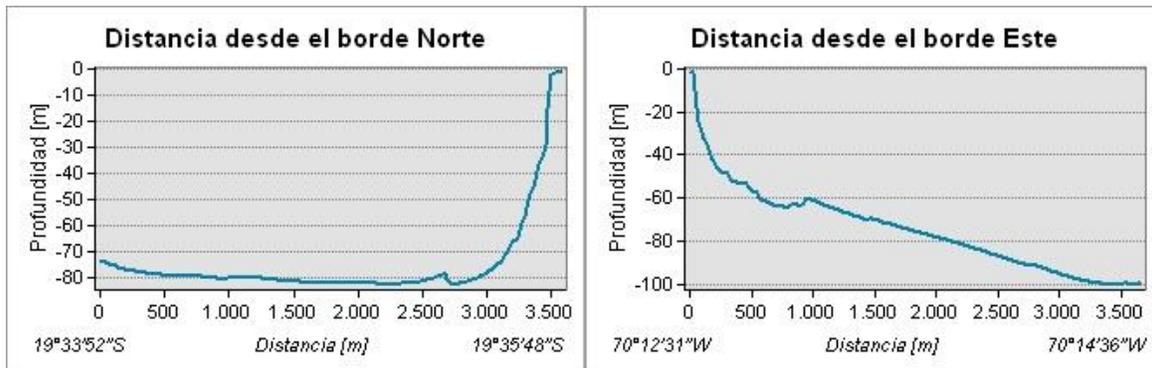


Figura 3-2 Perfiles Norte-Sur y Este-Oeste de la profundidad del suelo marino.

3.2 Facies granulométricas

El tamaño promedio del sedimento superficial de la bahía de Pisagua presenta una progresiva disminución de la zona intermareal a zonas más profundas (Figura 3.2-1). El sector litoral y la zona submareal somera están caracterizadas por la predominancia de arena fina a media y exhibe una regular a mala selección, siendo el sector nororiental el área con la selección más deficiente (Figura 3-3).

El sedimento de la zona submareal de profundidades sobre los 50 m es predominantemente limo fino y presenta una buena a muy buena selección hacia el centro de la bahía (Figura 3-3). El material de menor tamaño ($<50 \mu\text{m}$), está representado por arcilla graduando a limo fino, ubicándose a profundidades mayores a 70 m predominantemente en el sector central de la bahía. Este sector cuenta con una adecuada protección de los vientos que se dirigen hacia el norte (Figura 3-3), lo que implica una circulación más restrictiva en esta parte de la bahía, permitiendo así una muy buena selección del material.

A partir de las gráficas de profundidad, tamaño medio y dispersión se puede establecer una relación entre los tres parámetros. En primer lugar, es posible observar un comportamiento similar en el tamaño promedio de grano particularmente en la primera sección de los perfiles N-S y E-O (Figura 3-5), donde se tiene un decrecimiento del tamaño medio del grano, obteniéndose sedimento tipo limo grueso-arena muy fina en el sector central de la bahía, a profundidades superiores a los 70 m.

La morfología de la bahía no es el único factor influyente en la distribución de la granulometría, pues se aprecia que al extremo oeste del perfil E-O, la profundidad continúa aumentando y el tamaño de grano registra un marcado aumento al tomar distancia del centro de la bahía. Lo anterior sugiere que la disminución del tamaño del grano y la mejora

en la selección del sedimento (Figura 3-4; Figura 3-6) está asociada a un progresivo aumento en la profundidad en conjunto con la protección que ofrece la bahía respecto de los vientos del sur y el aporte de material asociado a estos, que se ven reflejados en el extremo Occidental del perfil E-O.

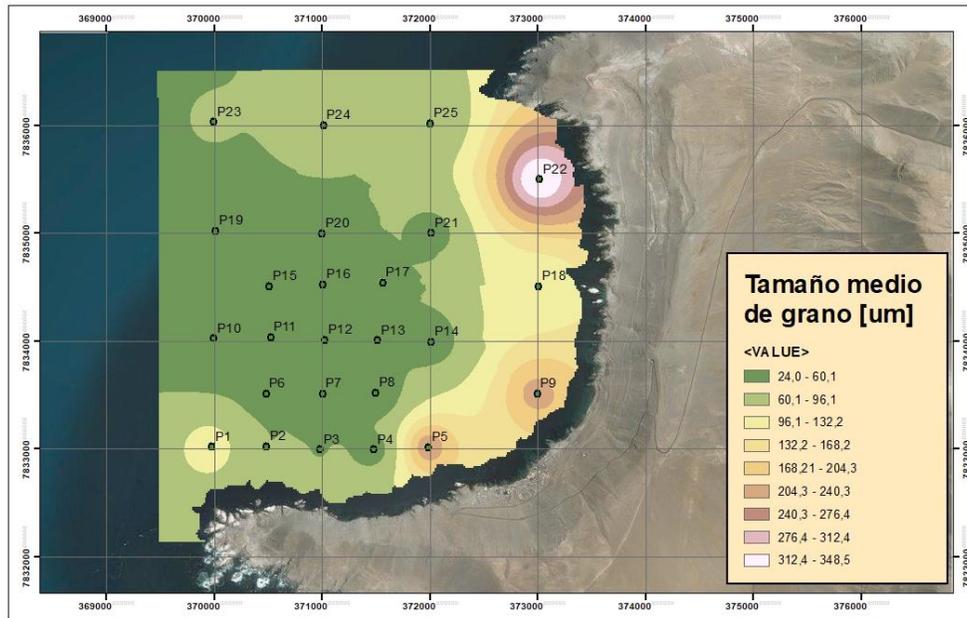


Figura 3-3 Mapa de interpolación del tamaño medio de grano.

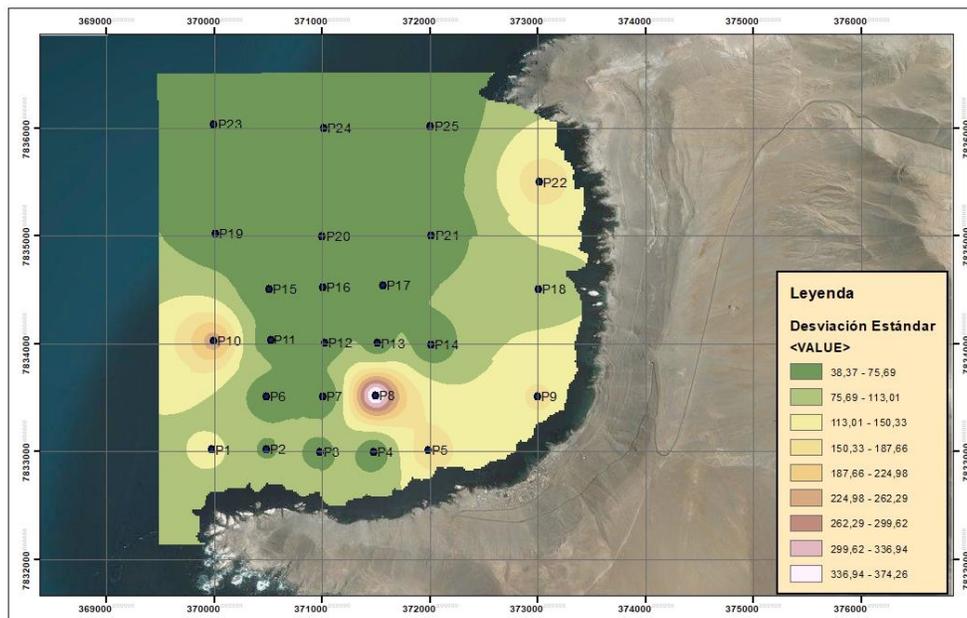


Figura 3-4 Mapa de interpolación de la desviación estándar de los datos granulométricos por muestra.

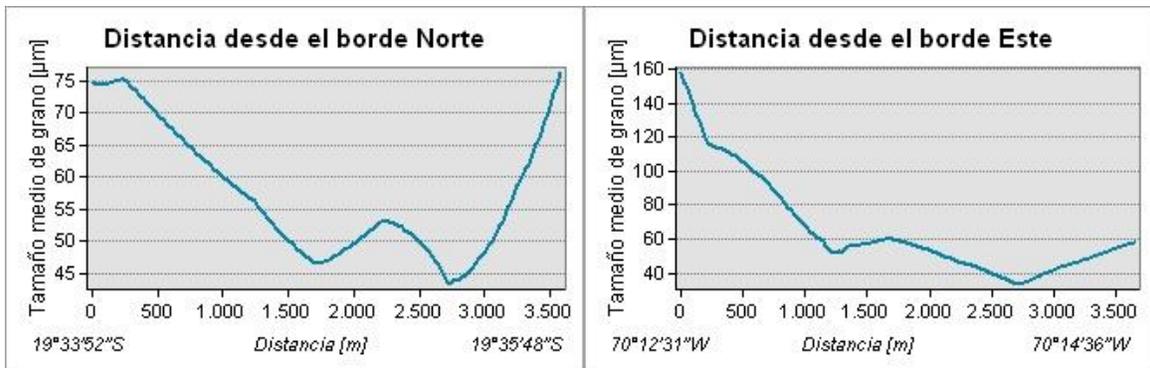


Figura 3-6 Distribuciones Norte-Sur y Este-Oeste del tamaño medio del grano

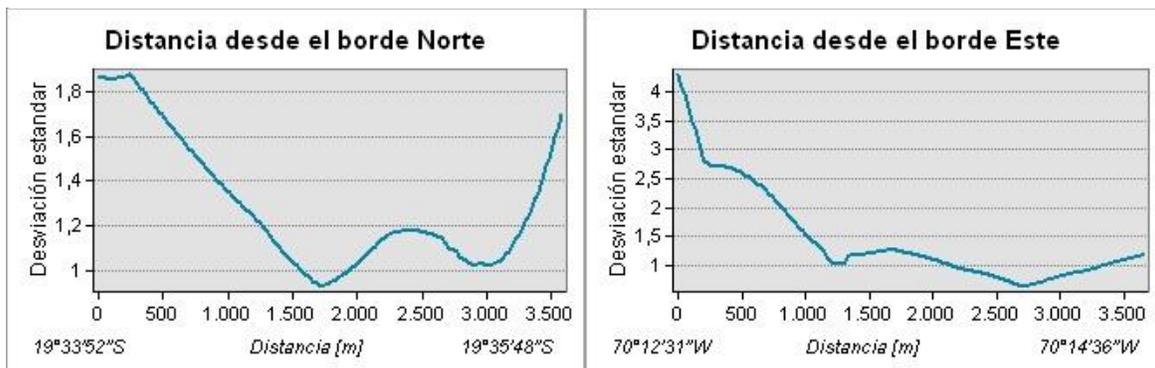


Figura 3-5 Distribuciones Norte-Sur y Este-Oeste de la selección del grano

3.3 Facies geoquímicas de elementos superficiales

La bahía de Pisagua se enmarca en una zona cuyas características geoquímicas son variables. Hacia el sur, hay presencia de intrusivos granodioríticos, con alto contenido metálico de interés, y además se encuentra conectada a mayores altitudes a través de la quebrada Tiliviche.

De los elementos detectados, la mayoría se encuentra distribuido en toda la bahía, no obstante, se observaron ciertas anomalías de metales, como el escandio en la muestra P5. con una concentración del 2,879%, y plomo en la muestra P9. con una concentración de 0,052%.

3.3.1 Elementos mayores

En primer lugar, se presenta el silicio, con concentraciones que varían desde 23.588%, hasta 62,444%. Las muestras P22 y P25, ubicadas al noreste de la bahía presentan las concentraciones mínimas de toda la superficie (Figura 3-7).

A estas muestras, le sigue la P5, ubicada al sur este-, con 44,773% de silicio. Todas las demás muestras concentran más del 55% de este elemento.

El 40% de la superficie de la bahía, presenta concentraciones en el rango 60,400%-62,444%, correspondiente a la zona intermareal.

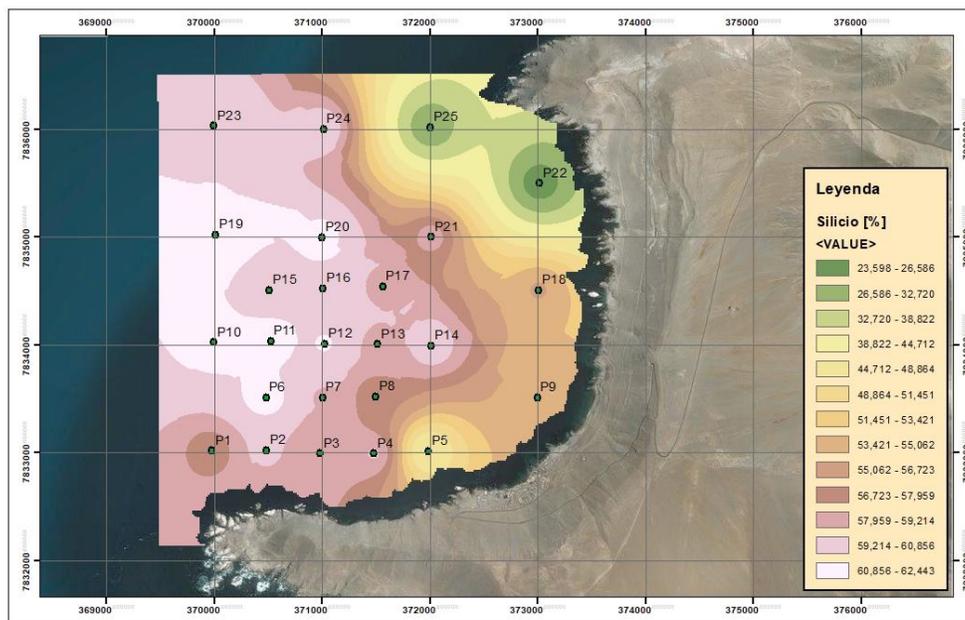


Figura 3-7 Mapa de interpolación de Silicio

La concentración de potasio es homogénea en casi toda la bahía, con un promedio equivalente a $4,138 \pm 0.209\%$. De este promedio se excluyen las muestras P22 y P5, donde la proporción de potasio es 1,758% y 2,976%. Así, se exhibe una distribución muy similar al silicio, menos acentuada hacia el noroeste (Figura 3-8).

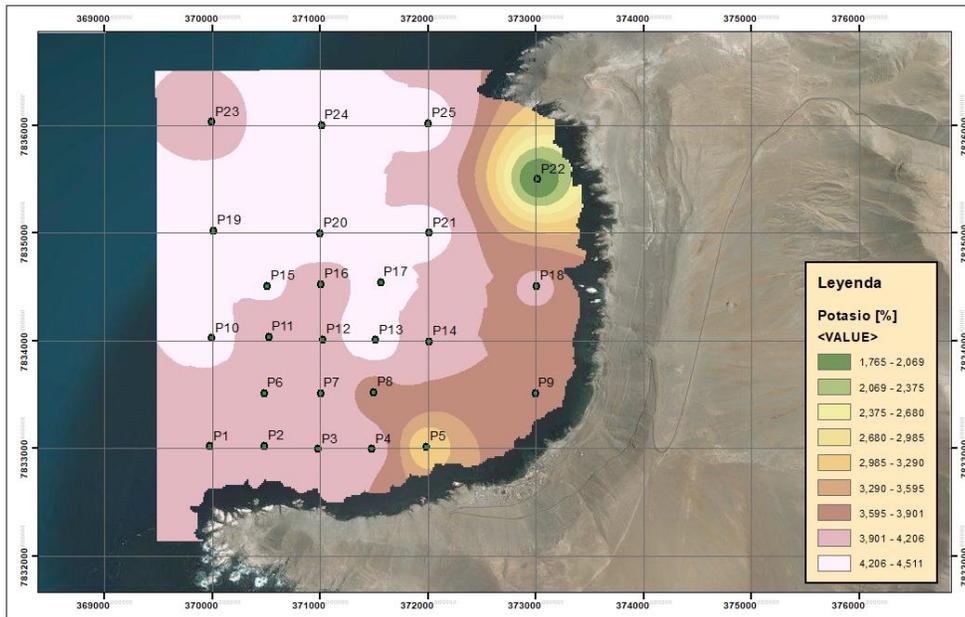


Figura 3-8 Mapa de interpolación de Potasio

El aluminio presenta una distribución similar a los elementos anteriores. Luego, se concentra en mayor grado, en zonas más profundas. Hacia el noroeste, la muestra P23, es la que presenta la mayor proporción de aluminio con 20,841% de este elemento.

Hacia el noreste y sureste, presenta concentraciones más bajas, aunque nunca descienden del 10,000%, evidenciando un comportamiento similar al aluminio y al potasio. Esto último se hace evidente ya que se corresponde también con la irregularidad al centro de la bahía, donde hay un aumento de concentración, que rompe la tendencia (Figura 3-9).

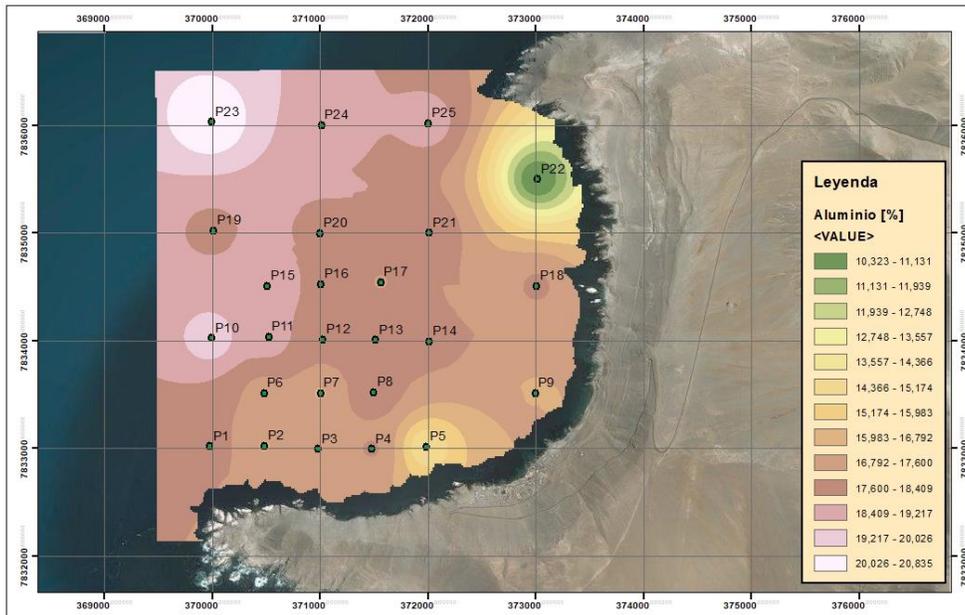


Figura 3-9 Mapa de interpolación de Aluminio

El calcio presenta concentraciones que van desde 3,586% hasta 54,998%, lo que lo convierte en el elemento con mayor varianza.

Se distribuye de forma inversa a los elementos anteriores, es decir, la concentración de este elemento es mucho más alta, cerca del límite costero, acentuado hacia los extremos norte y sur de la costa (Figura 3-10).

En este caso no se observan roturas en la tendencia, manteniéndose un comportamiento más uniforme.

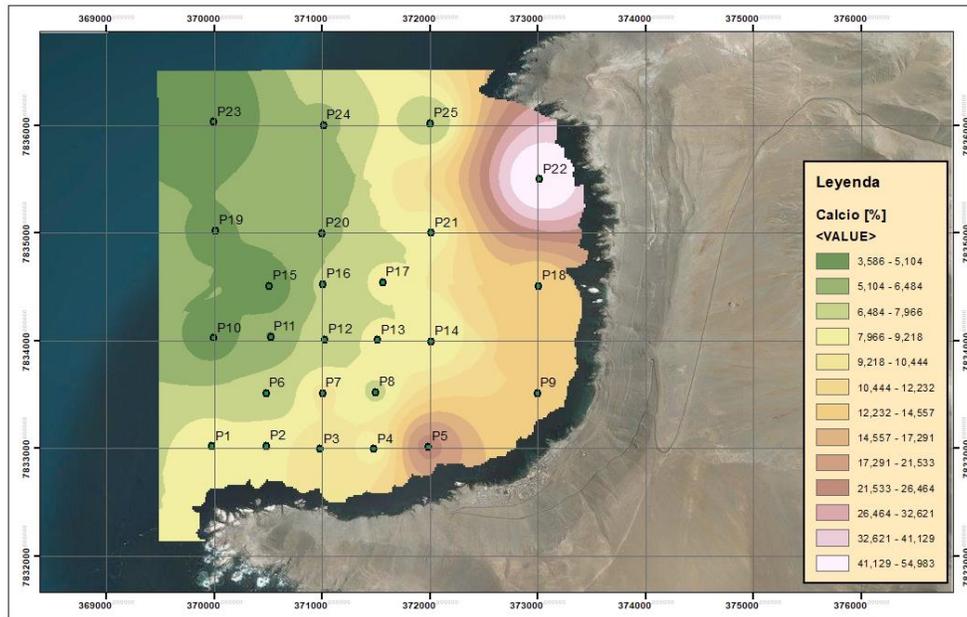


Figura 3-10 Mapa de interpolación de Calcio

El hierro presenta concentraciones en el rango entre 6,176%, -correspondiente a la muestra P8-, y 9,701%, -correspondiente a la P25-, distribuyéndose de manera uniforme, con predominancia de las concentraciones ubicadas entre 6,999% y 8,001%.

A la muestra P25 le sigue la muestra P9, con una concentración igual a 8,869%, hacia el sureste de la bahía (Figura 3-11).

El ejemplar que presenta la menor concentración de hierro se ubica en el rango más bajo de calcio, y entre los rangos superiores de aluminio, silicio y potasio.

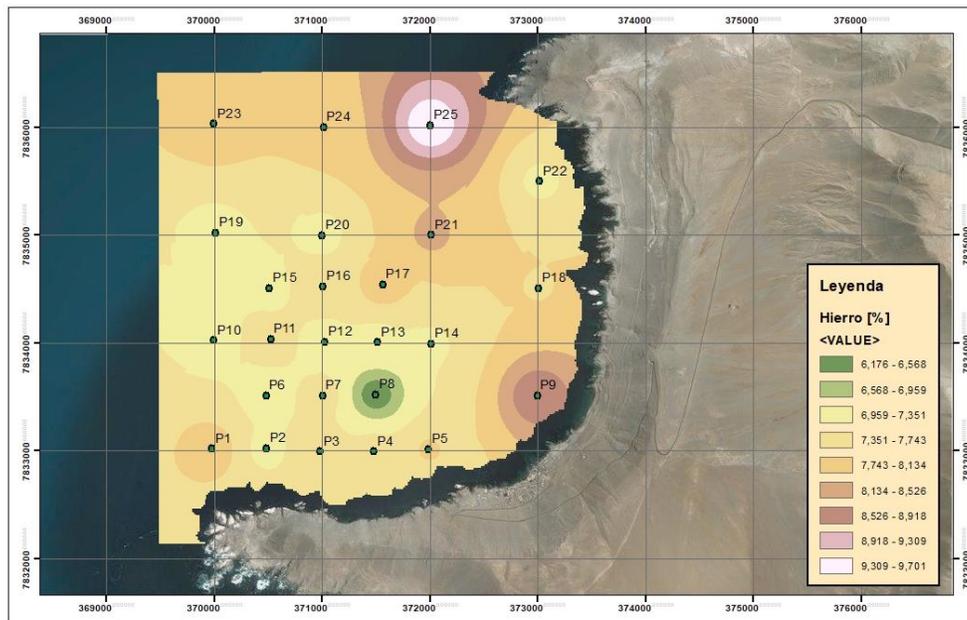


Figura 3-11 Mapa de interpolación de hierro

El azufre predomina en la bahía como elemento mayor, no obstante, hacia el norte se comporta como elemento menor, presentando concentraciones entre 0,7% y 0,9%.

La tendencia de este elemento es creciente hacia el sur, con mayor intensidad hacia el suroeste (Figura 3-12). El azufre es el único elemento mayor que no presenta un patrón claro respecto al resto de los elementos.

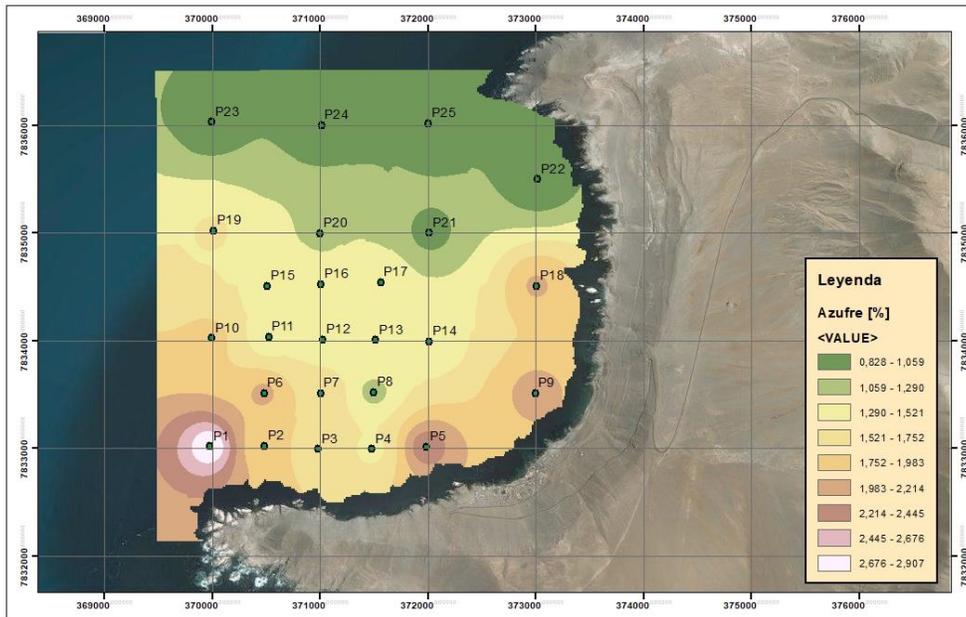


Figura 3-12 Mapa de interpolación de azufre

3.3.2 Elementos menores

Definir esta categoría resulta complejo, puesto que varios de los elementos a continuación, tanto menores como en los traza -en el apartado siguiente-, presentan concentraciones variables entre el 0,01% y el 1%. Para clasificar los diferentes elementos, se tomó en cuenta la categoría con mayor presencia en la bahía.

Por esto los elementos menores corresponden al titanio, manganeso y estroncio donde las muestras presentaron en su mayoría concentraciones entre el 0,099-1,001%.

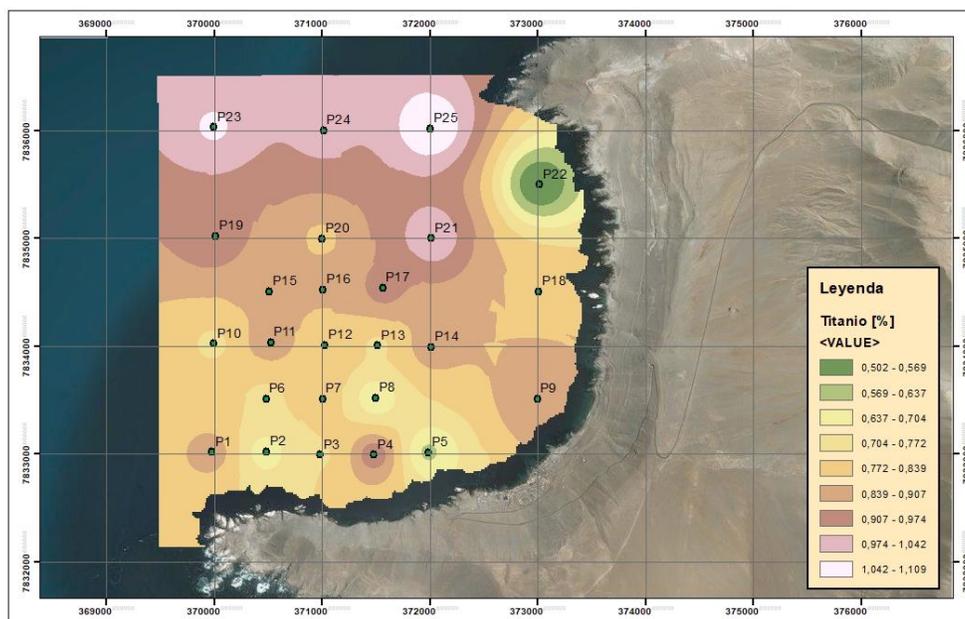


Figura 3-13 Mapa de interpolación de Titanio

El Titanio, se presenta en la mayoría de las muestras como un elemento menor. Las concentraciones observadas no tienen gran variación pues van del 0,505%, hasta un 1,108%. Por este motivo, la subdivisión de los valores es menor que en los elementos mayores (Figura 3-13).

La distribución de este elemento coincide en gran medida con la del hierro, observándose una tendencia a aumentar hacia el norte y en las cercanías del límite costero.

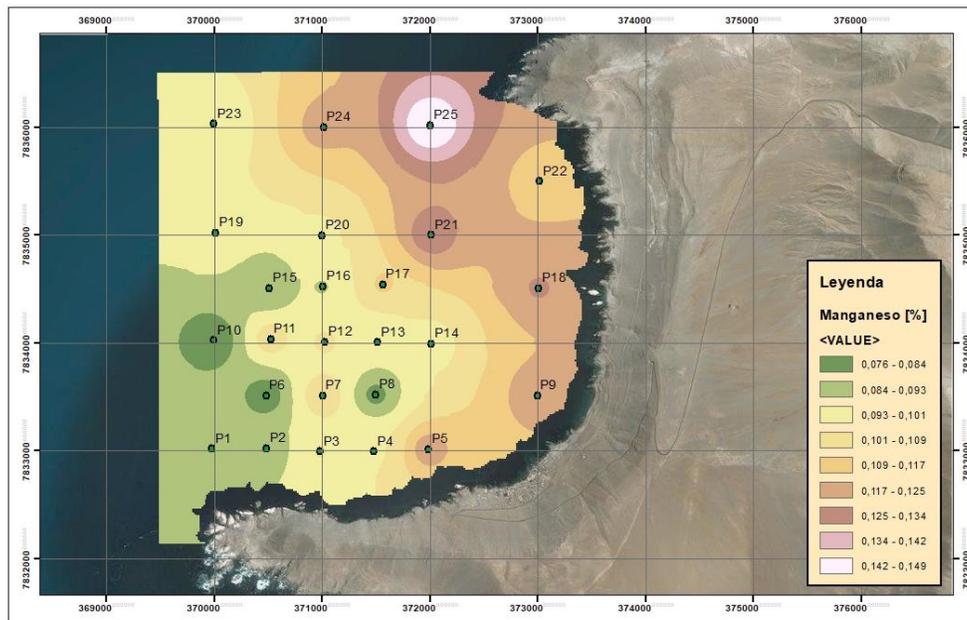


Figura 3-14 Mapa de interpolación de Manganeseo

El manganeso, presenta una distribución relativamente equitativa entre las muestras, como elemento menor y traza.

Se observa una gran similitud a la distribución que presentan el hierro y el titanio, con una concentración elevada en el noreste, y con una concentración baja en la muestra P8 (Figura 3-14).

La variabilidad en su concentración es muy baja, cubriendo casi toda la superficie con una concentración entre 0,087% y 0,168%.

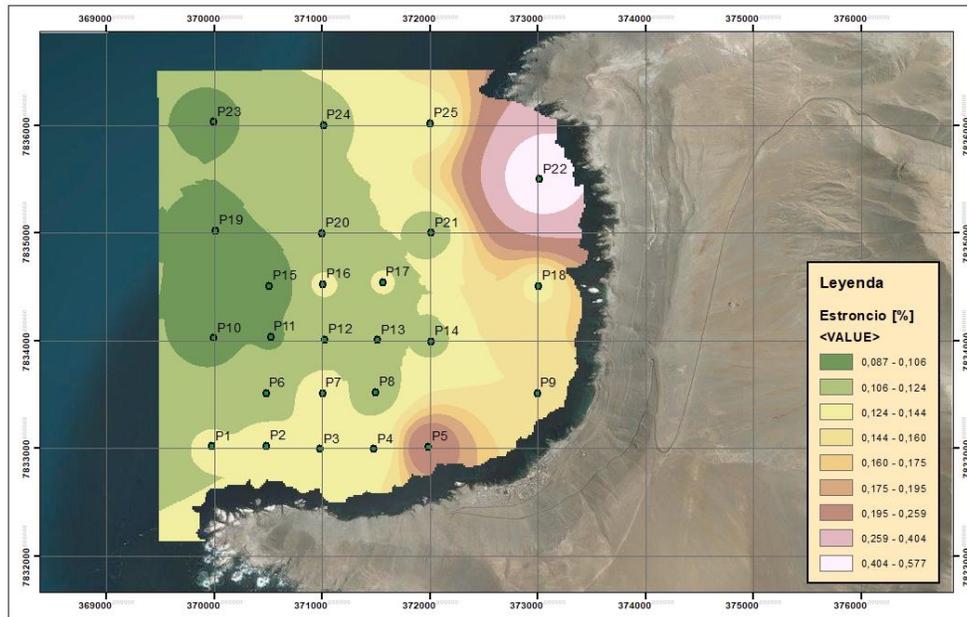


Figura 3-15 Mapa de Interpolación de Estroncio

La distribución del estroncio es creciente hacia la costa y acentuado en sus esquinas, manifestando una correlación con el calcio.

No obstante, su variabilidad es muchísimo menor, lo que implica una distribución más uniforme (Figura 3-15), con un promedio equivalente a $0,142 \pm 0,095\%$.

3.3.3 Elementos traza

De los elementos clasificables en este ítem, ninguno se presenta en todas las muestras. Por lo tanto, se tomaron en consideración aquellos que no son considerados como anómalos.

En primer lugar, el bromo, se presenta en 23 muestras. Tanto en la muestra P22, como en la P24, no fue posible detectar este elemento. El ejemplar P25, que se encuentra en medio de las 2 muestras mencionadas, presenta la concentración mínima detectada, equivalente a 0,018% (Figura 3-16).

Este elemento tiende a concentrarse en mayor medida hacia el sur, donde la máxima concentración detectada de bromo se encuentra en la muestra P2, de la que conforma el 0,083%.

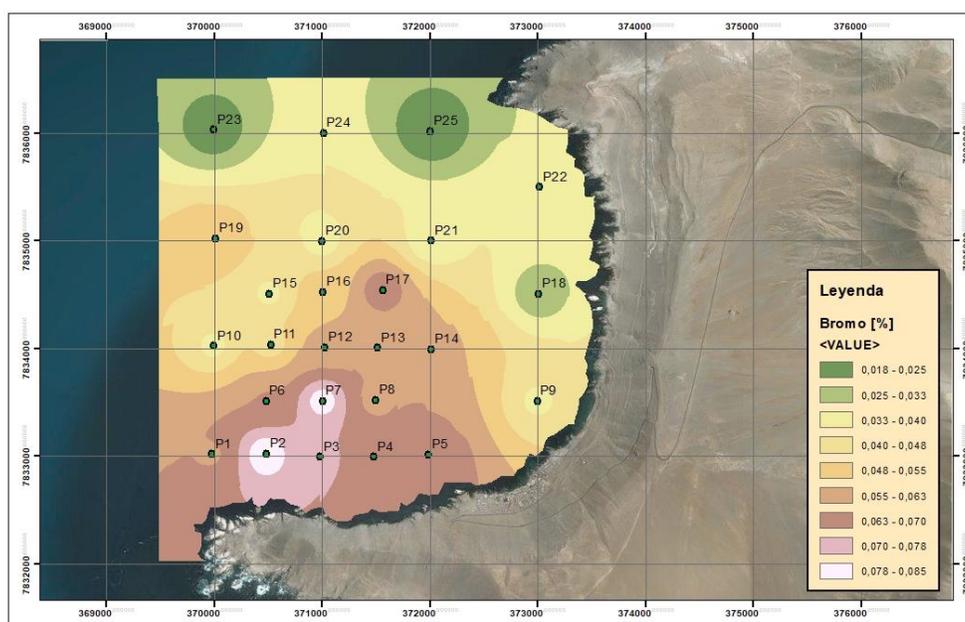


Figura 3-16 Mapa de interpolación de bromo

El vanadio se detectó en 20 de las 25 muestras analizadas. Aquellas que presentaron una concentración por sobre el 0,05% fueron las P21, P11, P7 y P12, cuyas ubicaciones se encuentran relativamente centralizadas, y se encuentran sobre un mismo eje con orientación noreste-suroeste (Figura 3-17).

Las zonas en verde corresponden a las muestras en las que no se detectó el elemento, correspondiente a las muestras P2, P4, P5, P19 y P24.

Hacia el sureste aumenta, mientras que hacia el sur vuelve a disminuir su concentración, siendo la concentración mínima un 0,025% en la muestra P18.

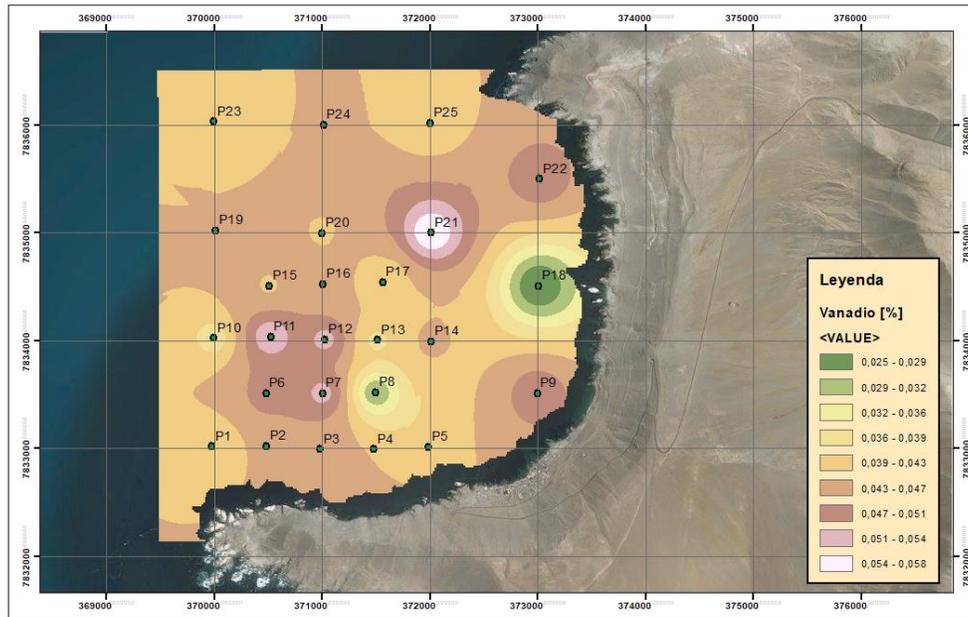


Figura 3-17 Mapa de interpolación de Vanadio

El espectro de concentraciones en que se detectó el rubidio es acotado, siendo su promedio $0,028 \pm 0,0044\%$. Siendo indetectable en las muestras P22 y P23 (Figura 3-18). Manifiesta una tendencia a acumularse mayormente hacia el suroeste de la bahía, donde alcanza su máxima concentración, equivalente a $0,035\%$.

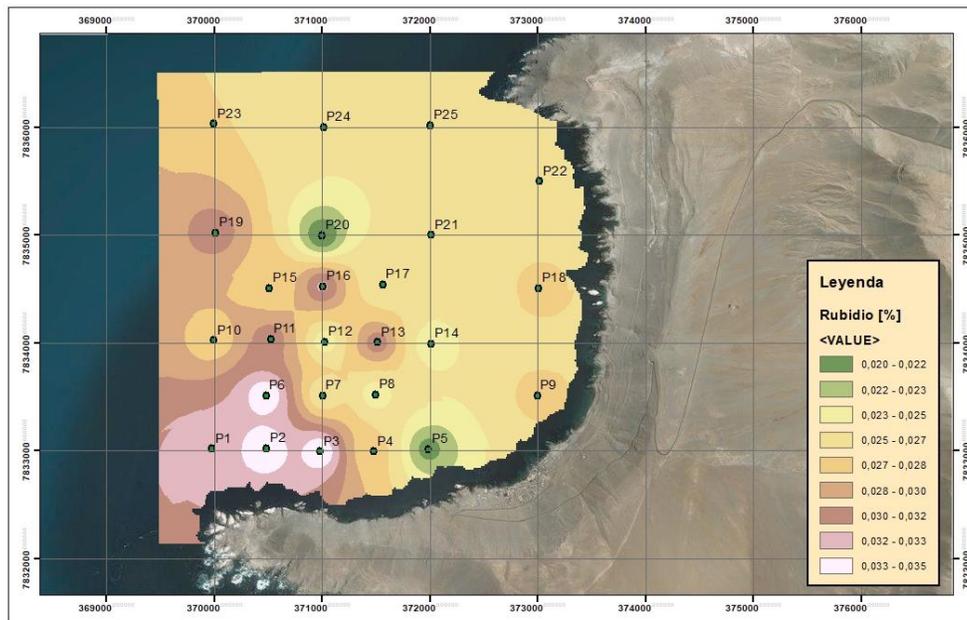


Figura 3-18 Mapa de interpolación de Rubidio

El zinc se presenta en 13 de las 25 muestras, distribuidas en toda la bahía. Se concentra en mayor medida hacia el sureste de la bahía, siendo la muestra P9, la que presenta la mayor concentración de este elemento, con 0,033% (Figura 3-19).

Excluyendo a P9, se tiene una concentración promedio de $0,019 \pm 0,0014\%$, que se distribuye de forma irregular y sin marcar ninguna tendencia.

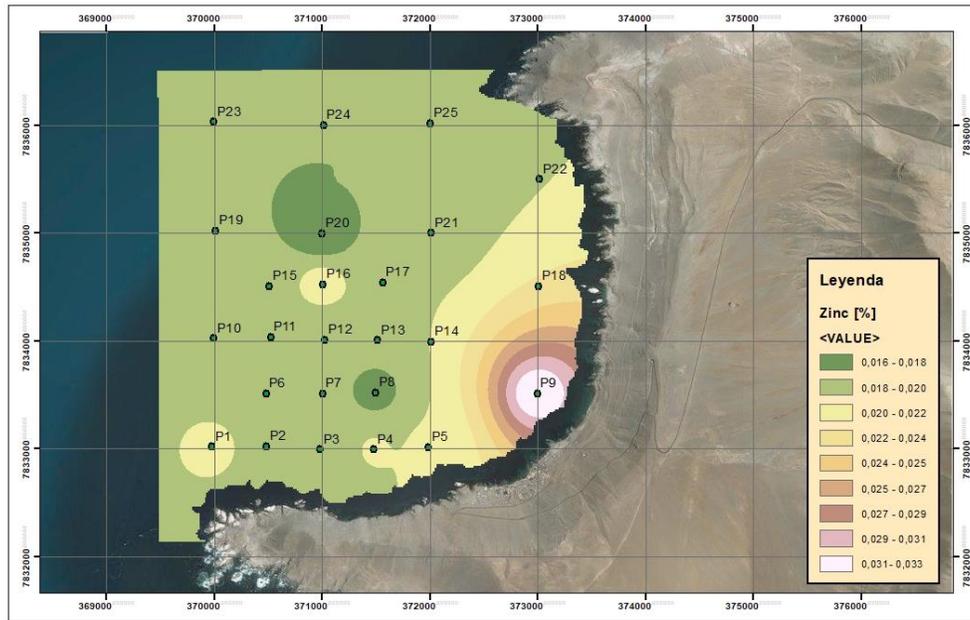


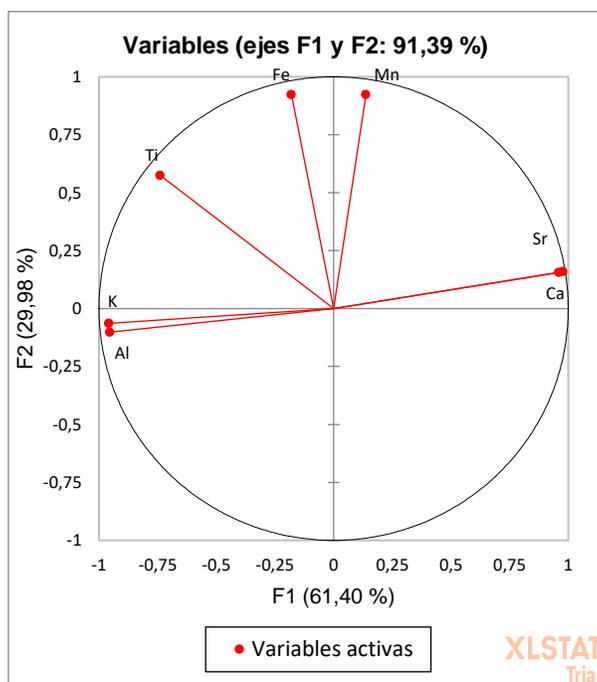
Figura 3-19 Mapa de interpolación de Zinc

3.4 ACP Superficial

Con este análisis se pretende establecer correlaciones entre los elementos, y entre las muestras superficiales.

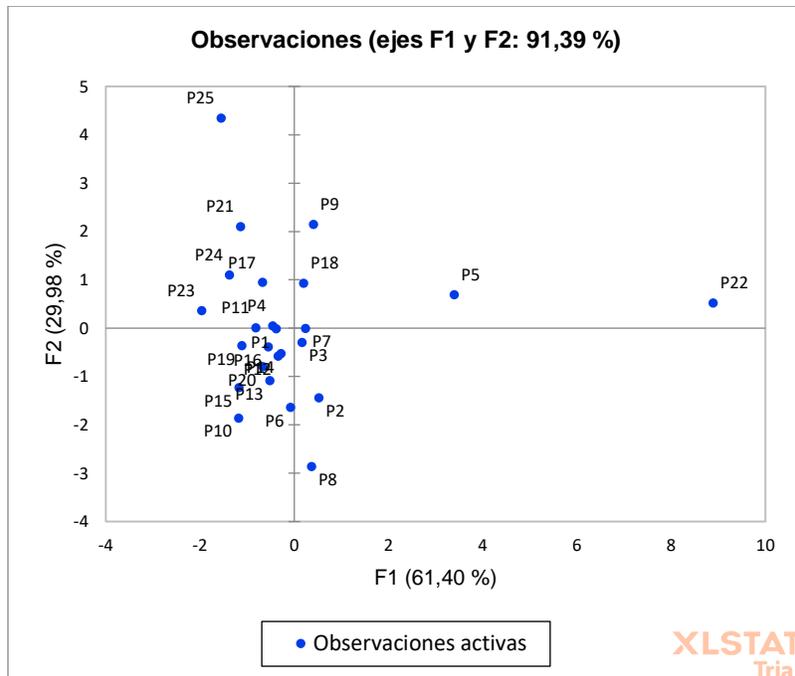
De esta manera, se obtiene un círculo de correlaciones en las que se observa una correlación positiva estrecha entre el potasio y el aluminio, los que, a su vez, también presentan una correlación negativa clara respecto al calcio y al estroncio.

Respecto al hierro, el titanio y el manganeso, se tiene una correlación diferente respecto a la observada más adelante en el ACP realizado sobre el testigo. En la superficie, se tiene una interdependencia mucho más estrecha entre el hierro y el manganeso, por sobre el hierro y el titanio, y aún más sobre el titanio y el manganeso (Gráfica 3-1).



Gráfica 3-1 Círculo de correlación de variables para análisis superficial.

Luego, se tiene que en el vector F1, se correlacionan el aluminio, potasio, calcio y estroncio. Mientras el hierro, el titanio y el manganeso lo hacen en F2. Esto es importante considerarlo para la correlación entre las muestras (Gráfica 3-2):



Gráfica 3-2 Plano de correlaciones entre muestras superficiales.

Se tiene que las muestras en el cuadrante F1 y F2 positivos, son aquellas que presentan una proporción de calcio y hierro, mayor al resto.

En el siguiente cuadrante, se mantiene una proporción más alta de calcio, no obstante, la de hierro disminuye. De esta forma se tiene que en F1 y F2 negativos, la proporción de aluminio y potasio es más alta, manteniéndose la de hierro, manganeso y titanio más bajas. Finalmente, el cuarto cuadrante tiene una composición donde predomina el hierro, el manganeso, el aluminio y el potasio.

4 Estratigrafía

El análisis estratigráfico inicia con un mapeo de las láminas y deformaciones observadas en las tomografías tomadas a todos los testigos obtenidos en terreno.

Luego, se pudieron identificar patrones de deformación y laminación entre los testigos, que se definieron como unidades para la correlación.

Se identificó en la superficie una secuencia reconocible en todos los testigos, exceptuando el PG1801, en el que se perdió la información más superficial durante la extracción. Esta secuencia consiste en una laminación gruesa seguida por una deformación, continuada por una laminación fina, y luego otra deformación. Esta unidad sirve de guía para el inicio de la correlación.

Al no existir más información para establecer correlación a partir de los 70 cm de profundidad, se resaltaron secuencias de capas cuyas densidades relativas, fueran similares entre sí, con el fin de establecer un criterio más objetivo.

De esta forma se puede determinar la existencia de al menos 3 procesos deformativos anteriores.

Luego de definir las unidades en la imagen, se procede a la apertura del testigo PR1805, que, debido al limitado espacio para su guardado y mantención, se deformó debido a una filtración de agua desde las capas superiores a las inferiores, reduciendo su volumen.

Respetando lo definido en el proceso de mapeo de las imágenes, se procede a definir las unidades desde la base hasta el techo, nombradas en números romanos en orden correlativo.

La primera de ellas representa una unidad no deformada, con una laminación fina, muy bien definida y conservada, con un probable aumento en su volumen, respecto al que tenía originalmente. A continuación, le sigue la primera unidad deformada, denominada como Unidad II, que se distingue de la anterior, por una serie de láminas acuñadas y discontinuas, indicadoras de algún proceso deformativo.

Posteriormente, la Unidad III, de un espesor de 3 cm observada en la apertura del testigo, continúa con una laminación bien definida. La siguiente unidad es un de un espesor similar, deformada por lo que correspondería a una inyección de fluidos, seguida por una lámina discontinua del mismo sedimento.

La Unidad V tiene un espesor equivalente de 1,5 cm presentando laminación fina bien definida. La Unidad VI está conformada por 5 cm de láminas gruesas con estructuras lenticulares, y una lámina fina, con indicadores claros de erosión.

Luego continúa un centímetro aproximado correspondiente a la Unidad VII, que se compone por 2 láminas de bordes nítidos y homogéneos. La siguiente unidad es de 8 cm de potencia que presenta una deformación clara, en forma de láminas discontinuas, de morfología evidentemente alterada y estructuras lenticulares.

La Unidad IX se compone por una laminación gruesa bien definida. Luego, la Unidad X, presenta láminas con signos de erosión y acuñaamiento que se distribuyen en 7 cm.

Continúa la Unidad XI, con una serie de intercalaciones, que se componen tanto por laminación fina como gruesa, que, a testigo abierto, presentan una potencia de 5 cm.

Los siguientes 20 cm corresponden a la Unidad XII, en las que vuelven a presentarse estructuras lenticulares, indicadores de erosión, acuñaamiento y discontinuación de láminas, tanto en laminaciones gruesas como delgadas.

Siguen 3 centímetros de laminación gruesa bien definida, que constituyen a la Unidad XIII, para dar paso a la Unidad XIV, en la que se ve una lámina gruesa, cuya granulometría es altamente variable, para continuar con láminas en contactos erosivos.

La siguiente unidad, está definida de mejor manera en la tomografía, no obstante, la posterior disminución del volumen permite únicamente la observación de un tipo de sedimento, que se deposita en una capa de 10 mm de bordes nítidos.

En la Unidad XVI se observan varios contactos erosivos además de un fuerte plegamiento de varias capas, evidenciando un evento deformativo importante, entre los 37 y 28 cm de profundidad en el testigo abierto.

La Unidad XVII, también se observa de forma más clara en la tomografía, no obstante, en la observación del testigo se tienen 2 láminas de no más de 2 mm de espesor, que se encuentran en contacto nítido entre sí, y con las capas adyacentes.

La Unidad XVIII se compone por al menos 2 sedimentos diferentes, de los que uno se encuentra en forma de estructuras lenticulares y en una lámina altamente deformada.

La Unidad XIX está definida de mejor manera en la tomografía inicial del testigo, cuando aún no se alteraba el volumen de este. A partir de eso, se tiene durante la apertura, sólo 2 láminas que no se encuentran afectadas por alguna deformación, y con bordes nítidos.

La Unidad XX, es la unidad deformada más reciente, en la que se observan una inyección de fluidos y calco de carga en el segmento inferior, mientras en el superior se observa lo que correspondería a una *homogenita*, producto de un evento de alta energía.

La unidad más reciente, se compone por laminación fina con bordes nítidos, finalizando en la capa límite de oxigenación.

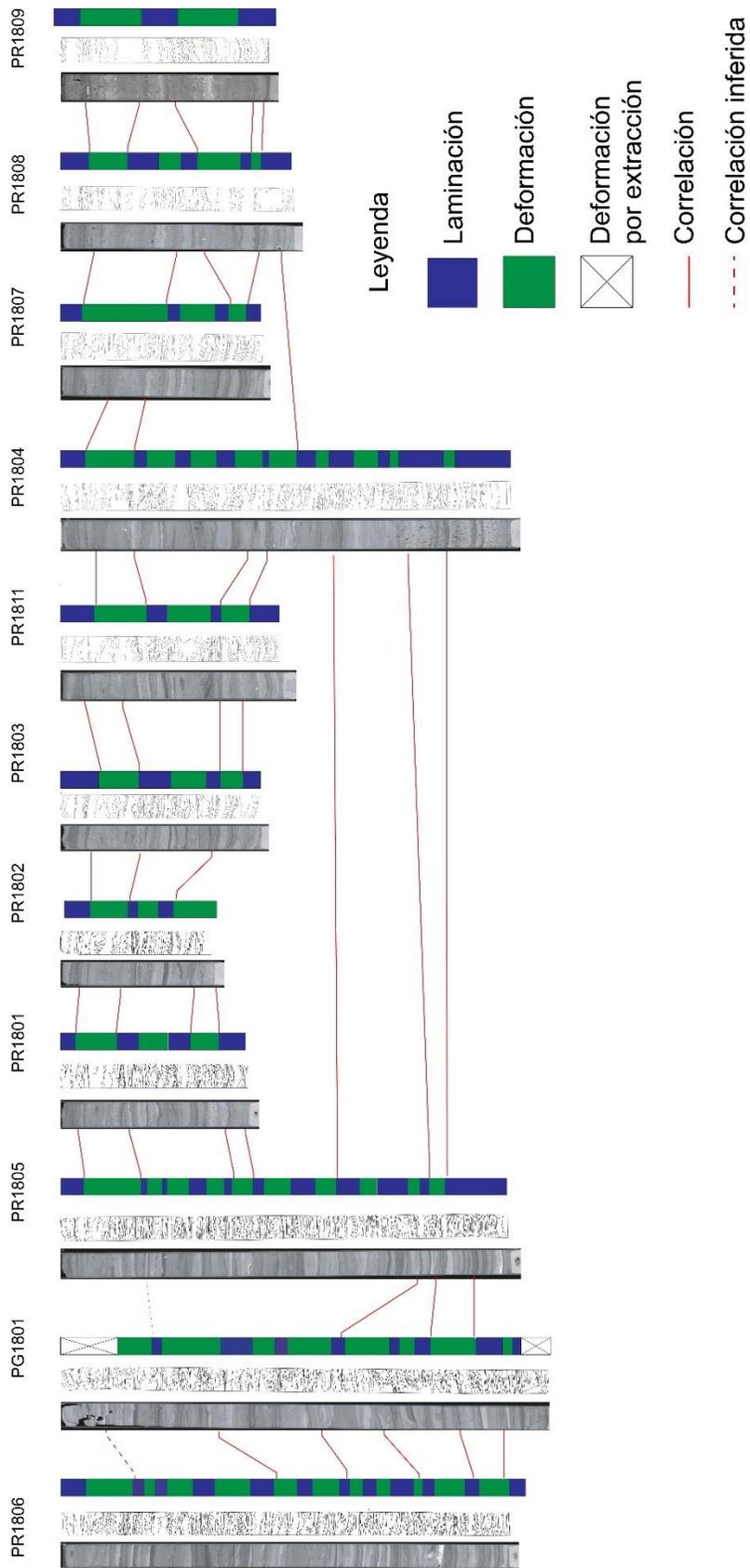


Figura 4-1 Correlación del total de testigos extraídos

4.1 ACP

En primera instancia se realizó el análisis de componentes principales, a la matriz que incluye todos los elementos detectados durante la fluorescencia, en conjunto con los parámetros granulométricos determinados

En primer lugar se realiza el análisis a la matriz que contiene a todos los elementos, que resulta en 23 vectores propios. Para establecer una relación entre los elementos, primero se debe confirmar el vínculo que presenta cada variable, con cada vector. Para esto, se requiere conocer el coseno cuadrado, del valor propio, de cada variable, en cada vector propio. En la medida que el coseno cuadrado de la variable sea más cercano a cero, es más arriesgado establecer una relación con dicha variable.

De esta manera, con este análisis preliminar, se pudieron descartar los elementos que no presentan dependencia con el resto: silicio, cobre, vanadio, zinc, magnesio, circonio, samario, cesio, escandio, itrio y molibdeno.

	F1	F2
Al (%)	0,867	0,019
Fe (%)	0,020	0,655
Ca (%)	0,758	0,000
K (%)	0,818	0,034
S (%)	0,324	0,007
Ti (%)	0,059	0,596
Mn (%)	0,172	0,397
Sr (%)	0,456	0,148
Br (%)	0,258	0,294
Rb (%)	0,118	0,463

Tabla 4-1 Cosenos cuadrados de los elementos: Al, Ca, Fe, K, S, Ti, Mn, Sr, Br, Rb.

El bromo, presenta coeficientes muy similares tanto en los ejes F1 y F2. y en ambos casos, es deficiente, dado que al aproximar las décimas la cercanía es mayor a 0.

Se infiere que el Bromo, presenta baja dependencia, tanto para los elementos vinculados a F1 y F2. Dado esto, se extrae del análisis, para determinar la codependencia del resto de los elementos.

	F1	F2	F3
Al (%)	0,875	0,000	0,000
Fe (%)	0,071	0,647	0,020
Ca (%)	0,750	0,022	0,091
K (%)	0,850	0,001	0,001
S (%)	0,302	0,038	0,361
Ti (%)	0,131	0,557	0,007
Mn (%)	0,100	0,544	0,112
Sr (%)	0,360	0,243	0,305
Rb (%)	0,229	0,296	0,168

Tabla 4-2 Cosenos cuadrados de los elementos: Al, Ca, Fe, K, S, Ti, Mn, Sr, Rb.

Se puede observar que en el eje F3 el único máximo corresponde al azufre, que dista de 59 centésimas. Por lo tanto, aún no se puede descartar dependencia.

El rubidio, por otra parte, presenta coeficientes más bajos y equitativos, para los primeros 2 ejes, por lo tanto, al igual que el bromo, presenta una dependencia relativa a los elementos vinculados a ambos ejes.

	F1	F2	F3
Al (%)	0,866	0,018	0,008
Fe (%)	0,024	0,728	0,000
Ca (%)	0,780	0,000	0,094
K (%)	0,818	0,024	0,006
S (%)	0,315	0,024	0,526
Ti (%)	0,065	0,649	0,003
Mn (%)	0,158	0,565	0,028
Sr (%)	0,482	0,096	0,289

Tabla 4-3 Cosenos cuadrados de los elementos: Al, Ca, Fe, K, S, Ti, Mn, Sr.

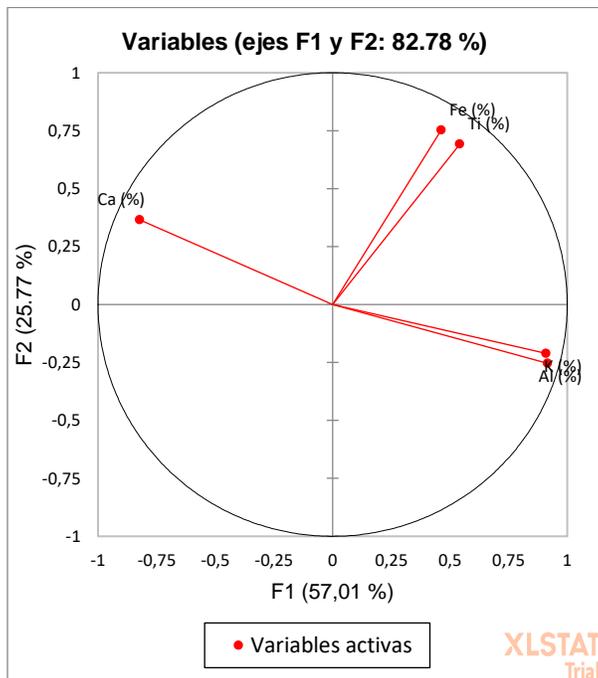
El azufre presenta su vínculo más fuerte en el eje F3, siendo el único, por lo que se establece la independencia de éste con el resto de los elementos.

Por otra parte, tanto el estroncio como el manganeso presentan vínculos deficientes en los ejes F1 y F2. Esto implica una dependencia parcial de estos elementos respecto a los demás vinculados en los ejes respectivos.

En conclusión, los elementos que se encuentran correlacionados son el aluminio, el potasio y el calcio, y, por otra parte, el hierro y el titanio.

4.1.1 Correlación elementos

Los factores o ejes generados en el análisis de componentes principales forman planos entre sí, que indican el grado de codependencia entre los elementos.



Gráfica 4-1 Proyección de los elementos en el plano formado por F1 y F2.

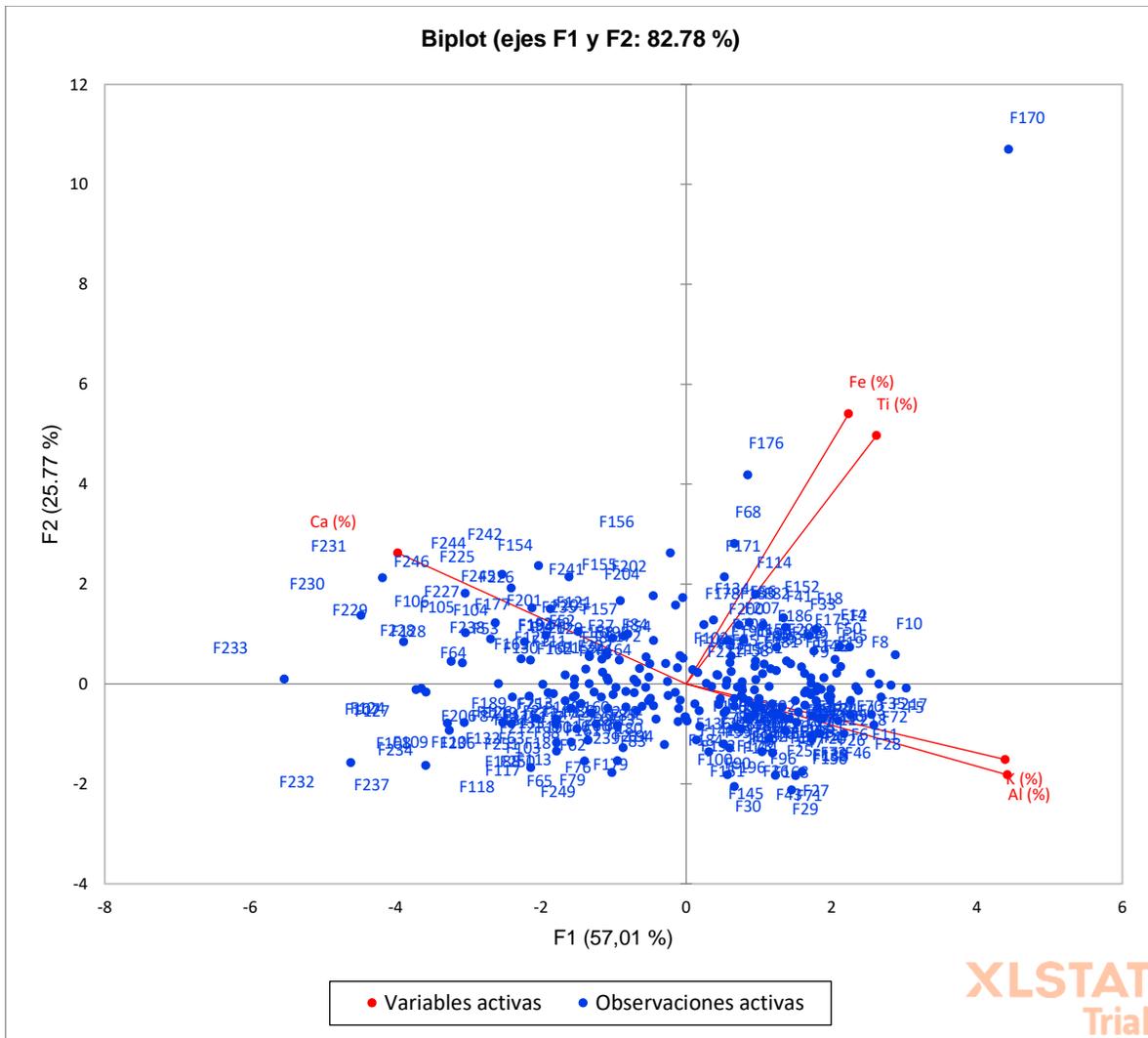
El aluminio y el potasio presentan una correlación positiva estrecha, mientras el calcio se presenta correlacionado negativamente respecto a estos dos.

Respecto a F2, ambos elementos se encuentran correlacionados de forma positiva.

4.1.2 Caracterización de las muestras

Cada muestra u observación, tiene una carga factorial asociada a los ejes. Esa carga factorial determina el grado de influencia de la muestra, en el análisis de los elementos.

De acuerdo con la carga en cada eje, se disponen las muestras en el plano, donde se distribuyen según la similitud en sus composiciones químicas.



Gráfica 4-2 Proyección de las cargas factoriales de cada muestra en los ejes F1 y F2.

Las muestras agrupadas en el primer cuadrante (C1), son aquellas donde el hierro y el titanio presentan las concentraciones más altas, y además más variables. La concentración promedio de hierro equivale a $7,971 \pm 1,130\%$, mientras el titanio conforma $0,889 \pm 0,048\%$. Éstas se distribuyen de manera más o menos homogénea en el testigo, con tendencia a aumentar su densidad hacia la superficie, cubriendo la quinta parte de éste.

Las muestras agrupadas en el segundo cuadrante (C2), representan más de un tercio del testigo, distribuyéndose de manera similar a las agrupadas en C1.

En éstas, las concentraciones promedio, tanto de aluminio como de potasio, son las más altas y con menor variabilidad. En promedio contienen $17,472 \pm 1,168\%$ y $4,204 \pm 0,279\%$, respectivamente.

Dada la relación de estos elementos con el calcio, los ejemplares en C2, además, presentan las concentraciones más bajas y menos variables de este elemento. Dando como resultado una concentración promedio equivalente a $5,403 \pm 1,582\%$.

En el tercer cuadrante (C3), se agrupan las muestras que presentan las concentraciones más bajas y con menor variabilidad, tanto de hierro como de titanio. Mientras que en C4 están las que presentan composiciones “opuestas” a las de C2.

4.1.2.1 Distribución de muestras

Como fue mencionado en el inicio de este capítulo, inicialmente fueron definidas 21 unidades basadas en la observación de las tomografías, dividiéndolo en tramos donde el criterio definitorio es la presencia o ausencia de deformación.

Sin embargo, para optimizar la observación de los procesos, con criterios deformativos y geoquímicos, se definieron 13 unidades, desde la Unidad I hasta la XIII, desde la base al techo:

4.1.2.1.1 Unidad I

Los 2 cm más antiguos del testigo representarían el final de una fase de baja productividad, dados los bajos contenidos de calcio y hierro observados. Éstos, también indicarían un período de alto aporte litogénico, debido a una presencia importante de circonio, silicio y cobre.

Entre los 123 y 120 cm de profundidad, se observa lo que aparentemente corresponde al borde de una cuenca, seguida por una laminación fina no deformada. Durante estos 3 cm,

se observa un incremento acelerado del contenido de calcio, alcanzando una proporción equivalente a 22,702%, además de un aumento gradual de hierro.

La muestra F240 es representativa de una lámina discontinua, arcillosa, correspondiente a una estructura observada dentro de la lámina gruesa mencionada anteriormente. Por ende, este nivel no es indicativo de un cambio en las condiciones climáticas, sino que, de algún evento particular.

Continúa con un aumento leve de calcio en la muestra F237, mientras el hierro disminuye su concentración hasta el mismo nivel. Posteriormente, la sedimentación continúa ocurriendo en forma de laminación fina, hasta los 117,5 cm, donde se ubica un límite erosivo, que da inicio, a una capa gruesa y discontinua, que está representada en 3 muestras (F234-F236), que manifiestan un incremento en el contenido de calcio, que se intensifica en las laminaciones finas posteriores, hasta los 114,5 cm de profundidad.

El contenido de hierro se incrementa gradualmente, acompañado de un aumento en el contenido de aluminio, y de la presencia de zinc. Desde los 117,5 cm, el contenido de hierro desciende de forma gradual durante 2 centímetros, seguido por un incremento abrupto, inmediatamente después, en un 2,702%.

Luego, disminuye gradualmente,

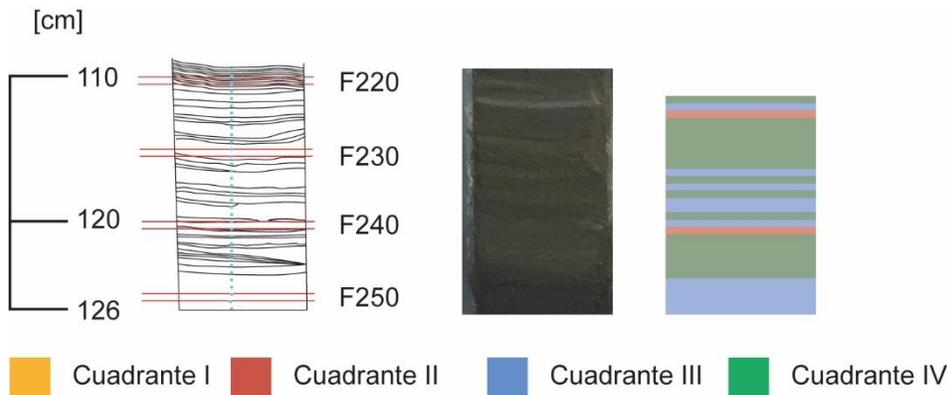


Figura 4-2 Distribución de muestras entre 126 y 111 cm de profundidad.

Las siguientes dos muestras comprenden 4 capas de sedimento. De estas muestras, la primera contiene un mismo tipo de sedimento, y la segunda contiene los cuatro.

Le sigue un pequeño intervalo, donde se eleva el aluminio a 17,003%, y el hierro desciende a 7,498%. Esta muestra representa mayoritariamente a una lámina discontinua de sedimento muy fino, en tono 5R6/2.

Posteriormente, se presenta una serie de muestras intercaladas pertenecientes a C3 y C4, que van desde la F239 hasta la F232, abarcando una sucesión de al menos 5 tipos diferentes de sedimento.

La concentración promedio de aluminio es de un 11,021%, mientras que la de potasio no supera el 2,795%. El calcio, aumenta gradualmente en el tiempo, desde 6,020% hasta 13,002% en los primeros 3 centímetros de la intercalación, para luego, en la muestra F233 elevarse a más del 20%. Esta muestra se compone de una sedimentación con textura porosa y homogénea, de tono 10YR6/6.

La siguiente muestra se compone por dos láminas, de distintos sedimentos, que al tacto presentaron una textura limo arcillosa, una de ellas presenta acuñamiento. En esta muestra, el calcio descendió drásticamente a 11,889%, esto debido a que la muestra F232 presenta, además, un alto contenido de magnesio, equivalente a 6,197%.

El hierro, por su parte, se concentra en un 7,026%, en el primer centímetro. Al siguiente centímetro desciende a un 5,798%, para luego aumentar a 7,586% en la muestra F235. En las siguientes 3 muestras, desciende de manera gradual hasta llegar a 5,199%.

El titanio tiende a comportarse de manera similar al hierro, variando su concentración en la misma forma, no obstante, en el segmento donde la concentración de calcio excede al 20%, el titanio aumenta, a diferencia del hierro, que disminuyó respecto a la anterior.

Continúa un tramo de 3,5 cm, donde el calcio es el elemento variable, con una concentración promedio de $16,879 \pm 4,899\%$.

El resto de los elementos presenta muy baja variabilidad, concentrando en promedio, 10,613% de aluminio, 2,408% de potasio, 7,333% de hierro y 0,689% de titanio.

A continuación, vuelve a presentarse un pequeño intervalo donde el aluminio aumenta a 17,303%, el potasio también lo hace llegando a 3,923%, y el hierro aumenta a 7,907%. El calcio disminuye drásticamente a 5,705%. Esta composición corresponde principalmente a una capa de arcilla de tono N8.

Finalmente, entre los 112 y 111 cm de profundidad, el aluminio y el potasio se mantienen en 14,033% y 3,503%, respectivamente. El calcio aumenta en un 3%, al igual que el titanio, que presenta un aumento desde 0,557% hasta 0,727%, a diferencia del hierro, que disminuye desde 7,901% hasta 7,303%.

4.1.2.1.2 Unidad II

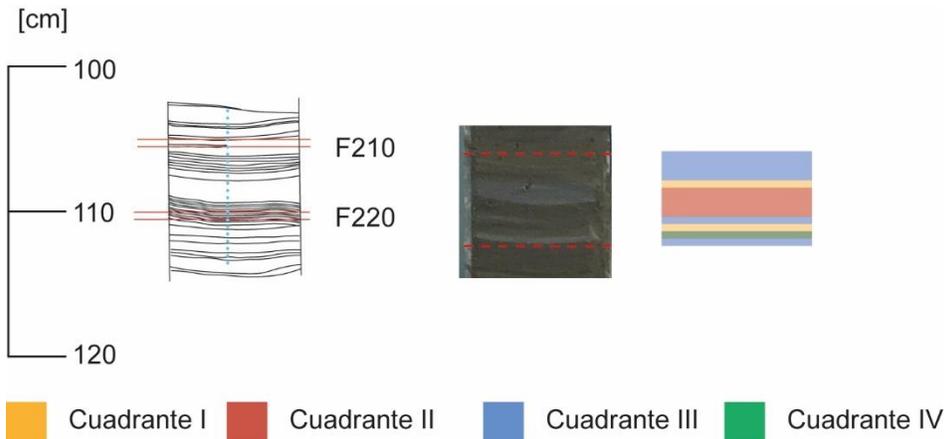


Figura 4-3 Distribución de muestras entre 111 y 103 cm de profundidad

A los 111 cm de profundidad, aparecen las primeras muestras pertenecientes al primer cuadrante. Éstas se presentan en intercalación con muestras pertenecientes a C3, cuyas potencias aumentan hacia la superficie en este segmento.

La muestra más antigua analizada en este segmento es la F221, correspondiente a la parte inferior de una sucesión de laminaciones finas, en que predominan tonos café oscuro.

En esta muestra se evidencia una continuación del aumento gradual de aluminio hasta 15,322%, para descender nuevamente en la siguiente muestra, que presenta una composición muy similar a F222.

Las muestras F220 hasta F217 representan a cabalidad una capa de arcilla de 15 mm, que presenta restos orgánicos. Esta capa se compone por un 18,616% de aluminio, 3,841% de calcio, 4,403% de potasio. El hierro se eleva a 8,122%, junto al titanio, que aumenta hasta 0,799%.

La muestra F216 abarca en su totalidad otra lámina de arcilla, que presenta un tono un poco más rojizo que la anterior. La pequeña variación que representa respecto de la capa de arcilla anterior es el aumento de calcio a 4,913% y la disminución de hierro a 7,603%.

En la muestra F215 el calcio alcanza una concentración equivalente a 6,899%, mientras el aluminio disminuye a 14,677%.

El hierro no varía entre las muestras F215 y F216, pero al igual que el calcio, disminuye en la F214, hasta 6,806%. Luego, presenta variabilidad entre muestra y muestra, aunque con un aumento progresivo de su concentración, hasta la muestra F210, donde se presenta con 7,777%. En este tramo de muestras C1 el hierro se mantiene en torno a esa proporción. Para luego, al igual que el aluminio, disminuir drásticamente a 6,495%.

4.1.2.1.3 Unidad III

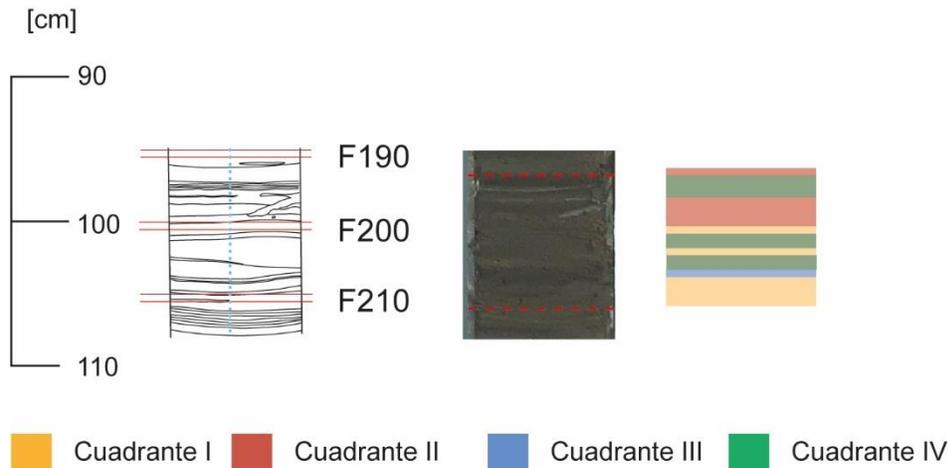


Figura 4-4 Distribución de muestras entre 103 y 96 cm de profundidad

En los 5 mm iniciales, las concentraciones de calcio y aluminio disminuyen, para luego aumentar el calcio y disminuir el aluminio hasta los 106 cm, donde ambos elementos alcanzan la misma proporción de 12,021% en la muestra F211.

Durante el 1,5 cm siguiente, el aluminio aumenta y el calcio disminuye, hasta llegar a 16,034% y 5,514%, respectivamente. Luego vuelven a comportarse inversamente, hasta llegar a la muestra F206, donde el aluminio se concentra en 11,812% y el calcio lo hace en 9,387%. Entre los 102 y 96 cm, se observa una sucesión de muestras C4, C1 y C2. El centímetro basal presenta altos contenidos de hierro y calcio, con 8,099% para ambos elementos. Mientras, el aluminio y el potasio promedian 13,798% y 2,889%, respectivamente

En la siguiente muestra, tanto el aluminio como el potasio aumentan a 16,103% y 3,588%, por lo tanto, el calcio baja, a 6,476%. El hierro también desciende, pero en menor medida hasta 7,869%.

En el siguiente centímetro de muestras C4 el aluminio desciende progresivamente hasta 11,778%, asimismo el potasio, hasta 2,798%. El calcio aumenta en la primera mitad, y luego vuelve a disminuir, promediando $7,321 \pm 0,495\%$.

El hierro, aumenta y disminuye igual que el calcio, pero con una variabilidad mucho mayor, promediando $8,576 \pm 1,003\%$.

Este descenso de todos los elementos en la muestra F201 refleja un cambio en la composición de silicio, que aumenta desde 59,098% a 65,879% en este centímetro.

Luego, el aluminio aumenta progresivamente hasta la muestra F198, donde representa el 18,063% de la muestra. Luego vuelve a disminuir de manera progresiva hasta la F193, donde alcanza 13,532%.

El calcio muestra el comportamiento inverso en las mismas muestras, a excepción de la última, donde su concentración disminuye desde 13,576% a 11,768%, reflejando nuevamente un aumento en la concentración de silicio entre las muestras.

El hierro por su parte, desde la muestra F200 a la F199, aumenta de 7,321% a 7,566%. Para luego disminuir progresivamente en las muestras C2 hasta 6,312%. El titanio, se comporta de manera similar, disminuyendo progresivamente en las muestras C2, desde la muestra F200, que contiene 0,967% de este elemento, hasta 0,767% en la F196.

Posteriormente, al inicio de las muestras C4, el hierro aumenta a 7,759% y vuelve a disminuir progresivamente hasta la muestra F193. En estas muestras, el titanio se comporta de manera inversa al hierro, puesto que disminuye en la muestra F195 y luego aumenta su concentración hasta F193.

En el siguiente centímetro tanto el aluminio como el calcio descienden, desde 15,639% a 13,805%, y desde 7,616% a 6,424%, respectivamente. Por el contrario, el hierro y el titanio aumentan, desde 7,123% a 7,321%, y desde 0,645% a 0,889%, respectivamente. El potasio se mantiene en torno a un 4%.

4.1.2.1.4 Unidad IV

Continúa una sucesión de muestras que contienen a C1, C2 y C3, entre 95 y 89 cm de profundidad. En este segmento, se observa un patrón, en el que se presenta un grupo de muestras C3, limitadas en base y techo por muestras C1. Con una intercalación de muestras C2 y C1, en medio.

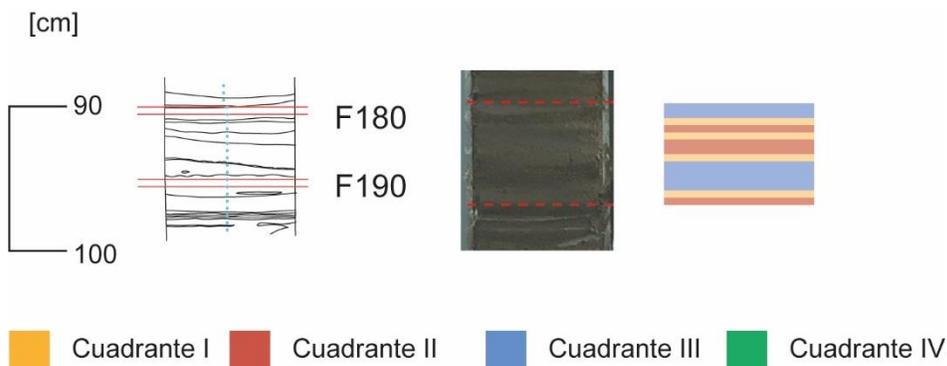


Figura 4-5 Distribución de muestras entre 96 y 89 cm de profundidad

En los primeros 2 centímetros de muestras C3 la mayor variabilidad la muestra el aluminio, mientras el potasio exhibe la menor de este grupo. El calcio aumenta en la primera mitad, desde 5,836% a 9,879%, y en el siguiente centímetro se mantiene en 8,899%.

Por su parte, el hierro y el titanio son estables en el primer centímetro, donde concentran 6,859% y 0,656% respectivamente. En el centímetro posterior el hierro disminuye promediando $6,256 \pm 0,159\%$, asimismo el titanio con $0,638 \pm 0,054\%$.

Le sigue una intercalación de muestras C1 y C2, en las que el aluminio y el potasio son los elementos más estables, con promedios equivalentes a $15,798 \pm 0,544\%$, y $4,067 \pm 0,167\%$, respectivamente. De forma inversa, el calcio es el elemento con mayor variabilidad, promediando $6,750 \pm 1,790\%$.

Por otra parte, las muestras C1 son las que presentan mayores concentraciones de hierro y titanio, con un promedio de $8,069 \pm 0,073\%$ y $0,878 \pm 0,042\%$. Mientras, las muestras C2 presentan $6,767 \pm 0,156\%$ y $0,784 \pm 0,058\%$.

A continuación, la muestra F181 representa un aumento en la concentración de titanio, hasta 0,974%, y una disminución de la concentración de hierro a 6,861%, mientras los demás elementos se mantienen dentro del promedio.

El centímetro siguiente corresponden a muestras C3, en las que el aluminio baja a un 14,443%, que luego se mantiene en la muestra F178, que pertenece a C1. Asimismo, el potasio, se mantiene en las muestras F180 a F178 con una proporción equivalente a 3,608%.

El calcio, sigue mostrando una variabilidad muy alta entre las mismas 3 muestras, promediando $6,637 \pm 2,321\%$.

El titanio, también presenta una alta variabilidad, mientras el hierro, lejos de presentar un comportamiento similar, se mantiene estable en torno a 6,7% en C3, para en la muestra siguiente, aumentar a 8,039%.

4.1.2.1.5 Unidad V

El siguiente segmento, ubicado entre 88 y 83 cm de profundidad, muestra un patrón, que se repite dos veces en ese intervalo, donde se presentan muestras C4-C1-C2.

De este modo, la primera sucesión de muestras inicia con la F177, que se caracteriza por una predominancia del calcio por sobre el aluminio, con 16,343% respecto de 12,432%. El potasio se concentra en 3,378%, mientras el hierro y el titanio representan 7,419% y 0,726%, en esta muestra.

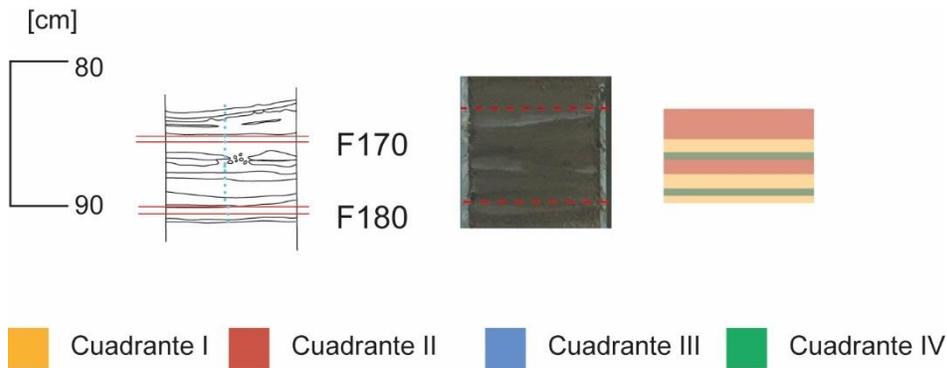


Figura 4-6 Distribución de muestras entre 88 y 83 cm de profundidad

Le sigue un centímetro de muestras C1, donde el aluminio aumenta a 13,587% y luego a 17,091%, y de manera inversa el calcio disminuye a 7,253% y luego a 6,475%.

El hierro aumenta drásticamente, a 12,978%, correspondiente a la concentración más alta, medida hasta este momento temporal. A la muestra siguiente desciende a 8,081%. El titanio, por el contrario, primero disminuye a 0,643% y luego aumenta a 0,867%.

Continúan dos muestras C2, en las que el hierro disminuye, primero a 7,283% y luego a 6,869%. Los demás elementos se estabilizan en este centímetro, en torno al 15,658% para el aluminio, 5,856% para el calcio, 4,037% para el potasio, y 0,739% para el titanio.

Posteriormente, el mismo patrón comienza con una muestra C4, pero que sigue concentraciones diferentes a las vistas anteriormente respecto al aluminio y el calcio.

En estos elementos, la primera muestra de la sucesión presenta 15,323% de aluminio que disminuye en el centímetro siguiente a 14,902% y luego a 12,495%. Mientras el calcio, en estas 3 muestras se mantiene muy estable alrededor de 11,3%.

El hierro, en cambio, en las primeras 2 muestras mantiene una concentración de 7,433%, para luego aumentar a 12,128%. El titanio, por su parte, aumenta de manera rápida, desde 0,767%, a 1,214%, para llegar a su máximo total de 2,341% en la muestra F170.

Esta última muestra, en particular, resalta sobre el resto, pues no sólo presenta una concentración anómala de titanio, sino que también, el bromo presenta su máximo en ella, con 0,198%.

A continuación, siguen dos centímetros de muestras C2, cuyos elementos más variables son el aluminio y el calcio con $17,003 \pm 0,930\%$, y $5,777 \pm 0,711\%$. Los demás elementos presentan muy baja variabilidad con $4,273 \pm 0,021\%$ para el potasio, $7,196 \pm 0,024\%$ para el hierro, y $0,756 \pm 0,002\%$ para el titanio.

4.1.2.1.6 Unidad VI

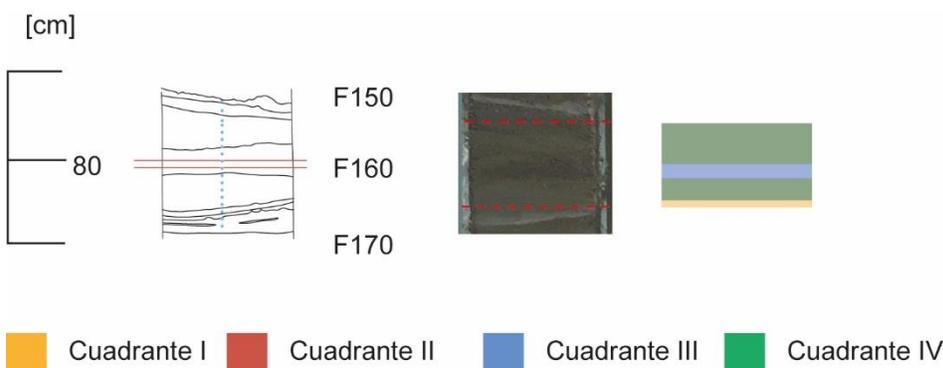


Figura 4-7 Distribución de muestras entre 82 y 76 cm de profundidad

Entre los 82 y 76 cm de profundidad, se observa una sucesión de muestras correspondiente a C1-C4-C3-C4-C1.

En los primeros dos centímetros, el único elemento que presenta una variabilidad significativa es el calcio, que mantiene una composición de 9,979%, salvo la F163, donde aumenta a 13,081% e iguala la proporción de aluminio en la misma. El aluminio, le sigue en variabilidad promediando $14,075 \pm 0,953\%$.

El potasio y el hierro presentan una leve disminución desde el centímetro basal, donde promedian 3,901% y 7,192%, hacia el centímetro siguiente donde promedian 3,342% y 6,903%, respectivamente. El titanio, por su parte, oscila entre 0,798% y 0,620% sin ninguna tendencia.

Siguen la F161 y F160, pertenecientes al tercer cuadrante. De éstas, la primera aumenta la concentración de aluminio a 15,323% que en los 2,5 cm posteriores disminuye gradualmente.

También aumentan las concentraciones de hierro y titanio, que continúan elevándose durante 3 centímetros, desde 6,901% y 0,589%, hasta 8,798% y 0,971%, respectivamente. El calcio se mantiene en 9,879% en estas dos muestras. Al cambiar nuevamente al cuarto cuadrante, aumenta a 11,231%, que disminuye hasta 9,511% en la muestra F156, correspondiente a aquella donde el hierro y el titanio alcanzan sus máximos de este segmento, y donde el aluminio, presenta su mínimo luego del aumento de su concentración en las muestras C3.

En los últimos dos centímetros, el aluminio oscila, aumentando su concentración, mientras el calcio hace lo mismo, disminuyéndola. El potasio baja a 3,020% en el último centímetro

de muestras C4, mientras que, en el último centímetro, de muestras C1, presenta una concentración estable de 3,897%.

El hierro, disminuye de manera continua en estos dos centímetros desde 8,657% hasta 7,697%, mientras el titanio, con comportamiento inverso, aumenta hasta la muestra F152, donde alcanza a representar 1,042% de la misma.

4.1.2.1.7 Unidad VII

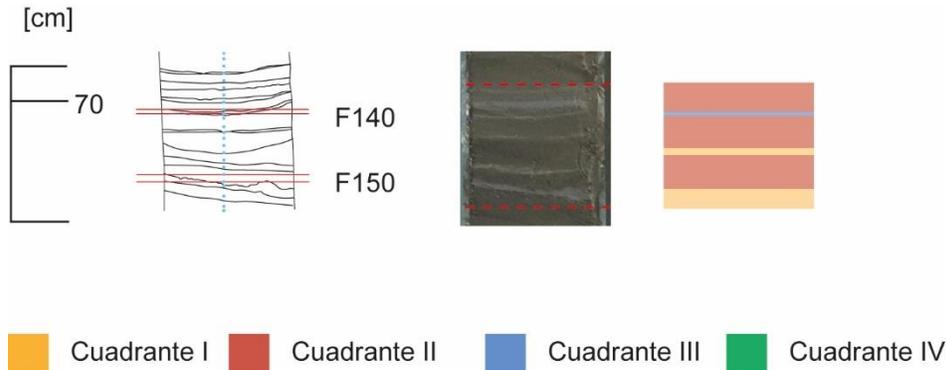


Figura 4-8 Distribución de muestras entre 77 y 68 cm de profundidad

A los 76 cm continúan 23 mm de muestras representativas del segundo cuadrante, donde los elementos se mantienen estables, concentrando en promedio: $17,061 \pm 0,801\%$ el aluminio, $5,819 \pm 0,879\%$ el calcio, $4,133 \pm 0,278\%$ el potasio, $7,412 \pm 0,482\%$ el hierro, y $0,699 \pm 0,047\%$ el titanio.

Le sigue un nivel en el que sólo varía el titanio de forma significativa, aumentando a 0,852%. Continúan 2,5 cm de muestras C2, donde las varianzas se mantienen para todos los elementos, y a la vez, disminuyen las concentraciones de aluminio, potasio y hierro a: 16,502%; 3,938% y 6,967%, mientras aumentan las de calcio y titanio a: 6,812% y 0,723%. A este rango estable, le sigue un pequeño intervalo de 3 mm, en los que el aluminio disminuye a 13,495%, el potasio lo hace hasta 3,502% y el calcio aumenta a 10,431%. Mientras, tanto el hierro como el titanio se mantienen.

Se reanudan las muestras C2 durante 2 cm. Las primeras dos muestras, presentan composiciones muy similares, en las que se concentra 17,697% de aluminio, 4,293% de calcio, 4,465% de potasio, 7,016% de hierro y 0,758% de titanio.

En la siguiente muestra, el aluminio y el potasio se mantienen, mientras el calcio, el hierro y el titanio aumentan a: 5,534%; 7,293% y 0,872%. Posteriormente, la muestra F136

aumenta la concentración de calcio a 9,099%, mientras todos los demás elementos disminuyen.

Terminados los dos centímetros, vuelve a presentarse un pequeño intervalo de composición correspondiente al tercer cuadrante, en el que el calcio aumenta a 9,969%, mientras los demás se mantienen respecto a la muestra anterior, en 15,302% el aluminio, en 4,036% el potasio, 7,109% el hierro, y 0,723% el titanio.

4.1.2.1.8 Unidad VIII

A 67,5 cm de profundidad, y durante los 16 cm posteriores, sólo se presentan muestras C1, C3 y C4. Inicia con la F134, que presenta 14,911% de aluminio, correspondiente al máximo de este elemento, en este tramo.

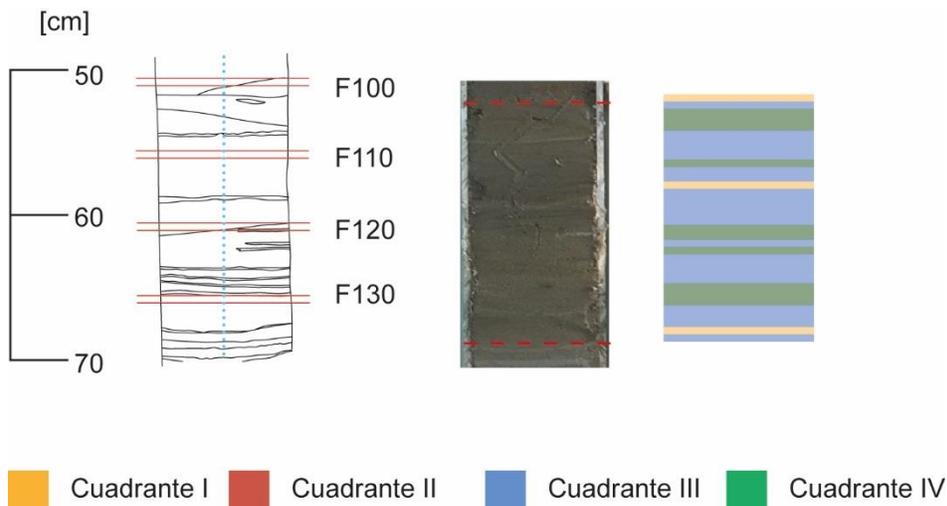


Figura 4-9 Distribución de muestras entre 67 y 51 cm de profundidad

Antes de la siguiente muestra C1, se presentan 9,1 cm en que se intercalan muestras C3 y C4. En éstas, el único elemento que presenta una variabilidad importante es el calcio, con un promedio de $11,122 \pm 2,713\%$.

Los demás elementos se mantienen en relativa estabilidad, promediando: $12,311 \pm 1,003\%$ el aluminio; $3,252 \pm 0,267\%$ el potasio; $6,789 \pm 0,540\%$ el hierro; y el titanio, $0,664 \pm 0,087\%$.

Estos dos últimos, presentan una tendencia leve, a ser mayores en C4, dentro de los 9,1 cm.

A continuación, la F114 representa el siguiente nivel de composición C1, donde el aluminio y el potasio aumentan a 14,745% y 4,103%. El calcio representa una composición de transición de las muestras aledañas, correspondiente a 10,091%.

El hierro representa 7,622% de esta muestra, por lo que no significa una variación importante. No así el titanio, que aumenta a 1,241%.

Siguen 5,5 cm de otra intercalación de muestras C3 y C4, que presenta las mismas concentraciones promedio, de la intercalación anterior, en todos los elementos, excepto el calcio, que en esta intercalación presenta una concentración promedio más alta equivalente a $14,316 \pm 2,902\%$.

4.1.2.1.9 Unidad IX

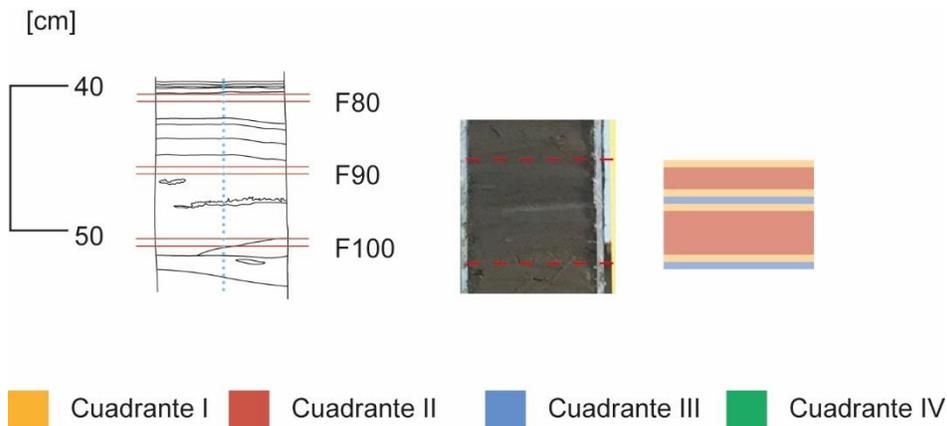


Figura 4-10 Distribución de muestras entre 52 y 45 cm de profundidad

Luego, entre los 51 y 45 cm de profundidad, tienen lugar muestras C1, C2 y C3. Iniciando con un tramo de 3 cm de muestras C2, en los que las concentraciones promedio, equivalen a: $16,319 \pm 0,510\%$ para el aluminio, $5,902 \pm 0,889\%$ para el calcio, $4,050 \pm 0,196\%$ para el potasio, $7,249 \pm 0,279\%$ para el hierro, y $0,714 \pm 0,051\%$ de titanio.

Posteriormente, se da lugar, un pequeño intervalo donde se presentan 3 muestras C1-C3-C1. en los que el aluminio el hierro y el titanio, presentan concentraciones similares en las dos muestras C1 y otra menor en C3. Mientras el calcio y el potasio mantienen

concentraciones similares en el centímetro superior, mientras en la muestra inferior, presentan concentraciones de mayor magnitud.

Luego siguen 3 muestras pertenecientes al segundo cuadrante, que mantiene concentraciones promedio similares en el aluminio, potasio y calcio, respecto al segmento anterior de este cuadrante. No obstante, el hierro y el titanio presentan mayor variabilidad, disminuyendo su concentración en la muestra más superficial, desde 7,295% a 6,723%, y desde 0,861% a 0,693%, respectivamente.

4.1.2.1.10 Unidad X

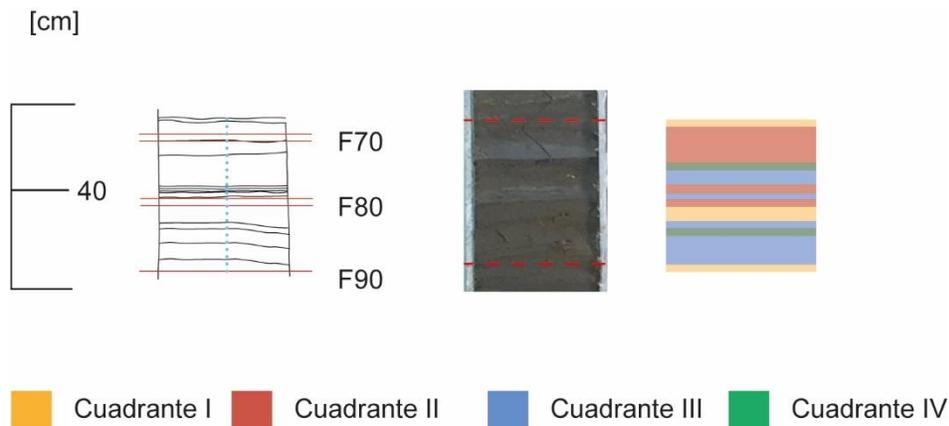


Figura 4-11 Distribución de muestras entre 45 y 35 cm de profundidad

El siguiente intervalo seleccionado, es el único que exhibe muestras de los cuatro cuadrantes. En éste, C1 representa niveles donde el hierro y el titanio, están mucho más elevados, promediando $8,721 \pm 1,899\%$ y $0,806 \pm 0,007\%$, respectivamente. En éstos, el aluminio y el potasio presentan concentraciones intermedias entre C2 y las muestras agrupadas en C3-C4.

Las muestras del segundo cuadrante son aquellas que representan niveles mucho más elevados de aluminio y potasio, $17,469 \pm 1,559\%$ y $4,299 \pm 0,069\%$. De esta forma, tanto C3 como C4 representan niveles altos en calcio, promediando $9,091 \pm 1,575\%$.

La variabilidad de los elementos no representativos de cada cuadrante, entre cada muestra, corresponden mayormente a transiciones entre las muestras aledañas.

4.1.2.1.11 Unidad XI

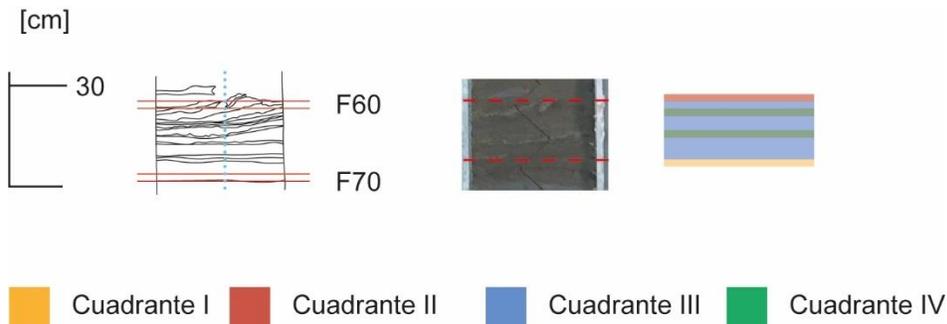


Figura 4-12 Distribución de muestras entre 34 y 30 cm de profundidad

En esta unidad se presentan las últimas muestras C3 de todo el testigo, y se presentan intercaladas con muestras C4

Estos 4 centímetros promedian $13,522 \pm 1,699\%$ de aluminio, $10,129 \pm 4,527\%$ de calcio, $3,519 \pm 0,071\%$ de potasio, $6,711 \pm 0,072\%$ de hierro y $0,663 \pm 0,003\%$ de titanio.

4.1.2.1.12 Unidad XII

Luego, en el intervalo entre 19 y 30 cm, se presentan las últimas muestras C4 distanciadas por amplios tramos donde se intercalan C1 y C2.

Inicia con 2,5 centímetros, en los que la primera muestra, se diferencia de las otras 4, únicamente en su concentración de titanio, correspondiente a $0,692\%$, mientras que en las otras no baja de $0,799\%$. El calcio muestra estabilidad en el primer centímetro con $7,831\%$,

concentración que aumenta a 9,321% en las siguientes 3 muestras, en las que también permanece sin mayor variabilidad.

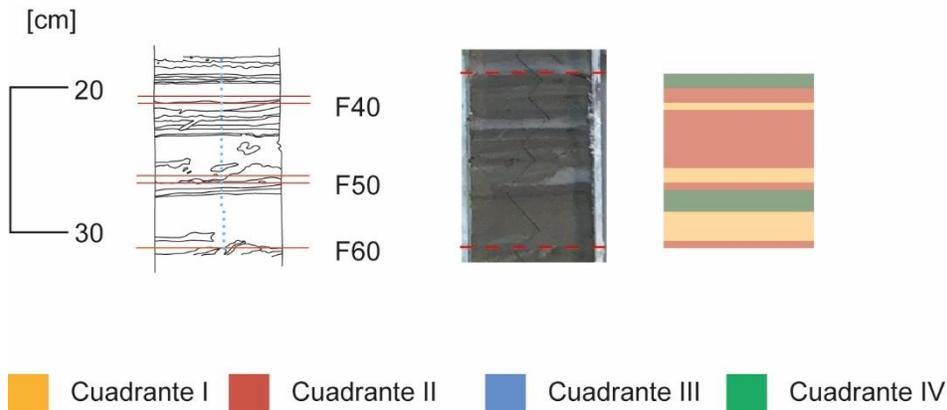


Figura 4-13 Distribución de muestras entre 30 y 19 cm de profundidad

El aluminio presenta una concentración promedio equivalente a $16,073 \pm 0,569\%$, mientras el hierro se concentra $7,454 \pm 0,222\%$, en estas muestras.

A continuación, se presenta el penúltimo segmento de composición C4, conformada por tres muestras. En éstas el aluminio disminuye a $13,451 \pm 1,512\%$, asimismo el potasio baja a $3,511 \pm 0,302\%$. Del mismo modo, el calcio se eleva, concentrando $12,331 \pm 2,803\%$.

El hierro se mantiene en el promedio, mientras el titanio disminuye su concentración promedio de $0,850 \pm 0,081\%$, a $0,713 \pm 0,052\%$.

Posteriormente, vuelven a presentarse una intercalación entre muestras C2 y C1, donde los elementos más variables son el calcio, el hierro y el titanio.

En las muestras C2 el calcio promedio equivale a $5,532 \pm 1,502\%$, mientras en C1 representa $6,602 \pm 0,412\%$. De la misma manera, el hierro presenta en C2 una concentración promedio de $7,250 \pm 0,418\%$, que en C1 es $7,842 \pm 0,512\%$. Luego, el titanio en C2 es igual a $0,762 \pm 0,041\%$, mientras en C1 promedia $0,921 \pm 0,142\%$.

Las muestras F38 y F37 son las últimas de composición C4 del testigo, por lo tanto, son las últimas en presentar una preponderancia de calcio. De esta manera, el promedio de este centímetro es $14,661 \pm 0,362\%$ de aluminio, $10,930 \pm 0,161\%$ de calcio, $3,503 \pm 0,031\%$ de potasio, $7,512 \pm 0,103\%$ de hierro y $0,747 \pm 0,055\%$ de titanio.

4.1.2.1.13 Unidad XIII

Finalmente, los 18 cm más superficiales, se caracterizan por presentar únicamente muestras C1 y C2, donde estas últimas son predominantes en este segmento con 24 ejemplares, versus 13.

Tanto el aluminio como el potasio presentan muy baja variabilidad en este segmento, promediando 18,367% y 4,312%, respectivamente.

El calcio presenta una baja concentración promedio, en torno a un 5,321%. No obstante, el promedio en C1 equivale a un 6,124% mientras que en C2 equivale un 4,813%, con una varianza similar en ambos.

En C1 el hierro se concentra en torno al 8,139%, mostrando muy baja variabilidad, a diferencia de C2, muestras que presentan una concentración promedio de 7,413% con una varianza 4 veces mayor.

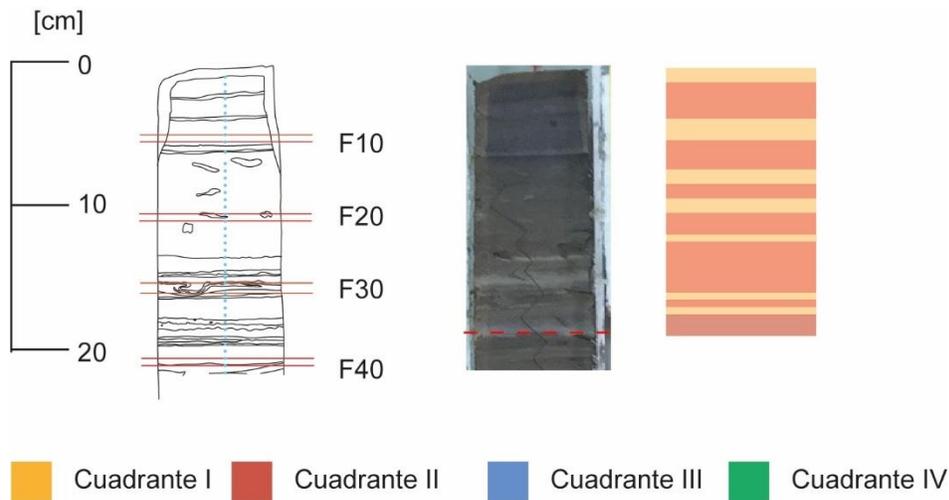


Figura 4-14 Distribución de muestras desde 19 cm de profundidad hasta la superficie.

El titanio promedio equivale 0,791%. Aunque, al igual que el hierro, presenta una concentración mucho más elevada en C1, correspondiente a 0,863%, mientras C2 se encuentra más cerca del promedio total, con 0,762%, con una varianza 1,8 veces mayor respecto a C1.

4.2 Granulometría

A continuación, se presentan los resultados granulométricos utilizados para el análisis final de los procesos de acuerdo a las unidades definidas.

Se pueden observar peaks claros del tamaño de grano hasta la Unidad IX, donde adquiere un comportamiento mucho más irregular hasta la superficie.

La selección es altamente variable, considerándose buena la mayor parte del testigo, con un aumento en la amplitud de su variabilidad a partir de la Unidad IX.

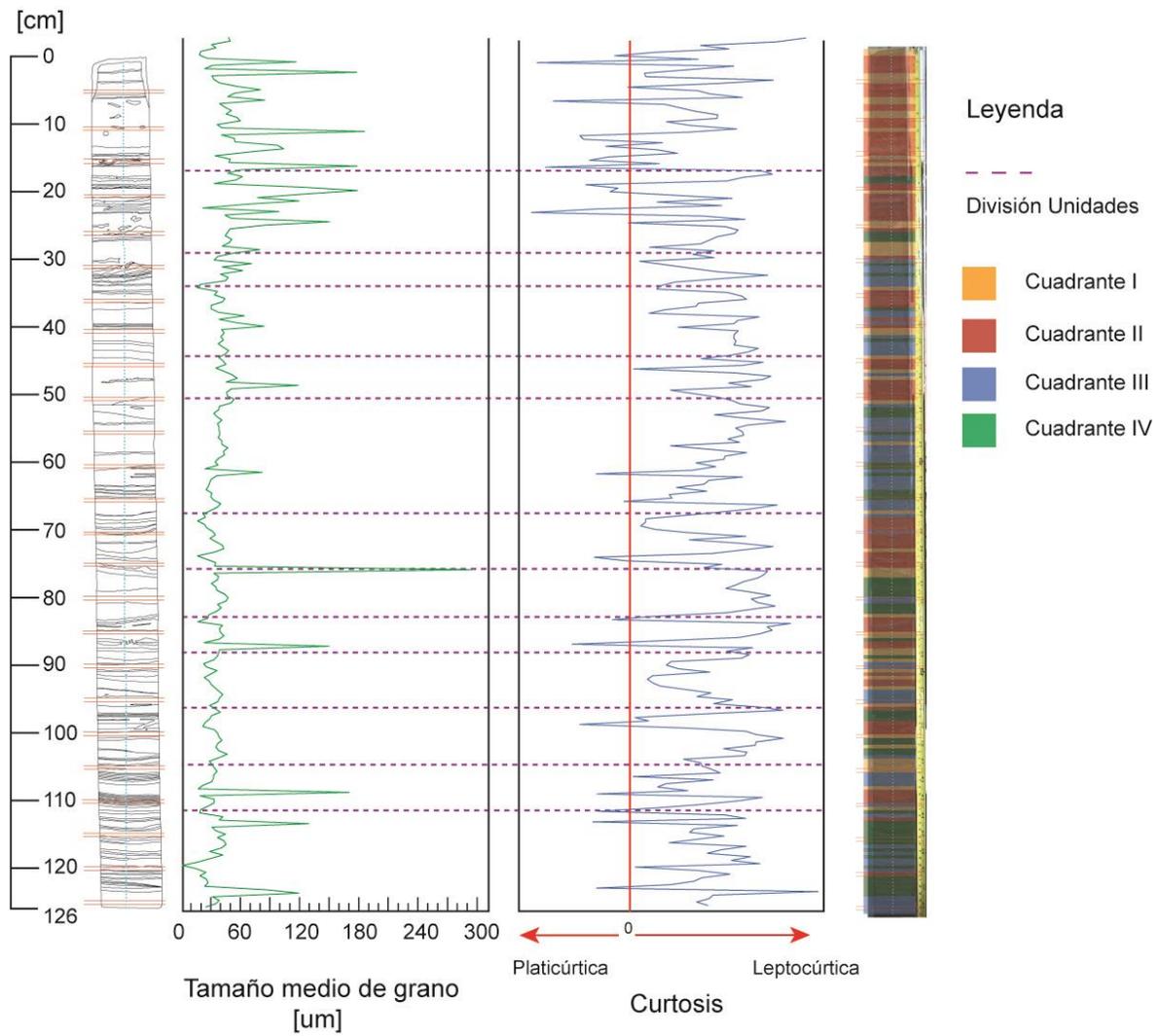


Figura 4-15 Granulometría testigo PR1805

5 Discusión

5.1 Factores condicionantes de distribución granulométrica y geoquímica en la superficie marina de la bahía de Pisagua

El primer factor tomado en consideración corresponde a la geomorfología del área de estudio. Considerando que se encuentra bordeada por un acantilado costero, hay una pendiente importante en las formaciones rocosas que la rodean, por esto mismo la playa asociada a ese segmento de costa, es mínima o nula en los límites de la bahía.

Sumado a esto está limitada por dos promontorios, que funcionan como barrera natural frente a los efectos de los vientos, limitando el aporte de sedimentos eólicos, lo que se acentúa en las penínsulas y en menor grado en los bordes. Esto condiciona la distribución granulométrica, observándose en el tamaño medio de grano que aumenta hacia esos sectores.

Esta distribución coincide parcialmente con la distribución del calcio, indicando que el aporte de sedimentos que influye ahí es producto del desprendimiento y meteorización de las formaciones aledañas. Esto tiene sentido pues según Silva (1972), estas formaciones se constituyen principalmente por anhidritas que se componen en un 84% por sulfato de calcio. Esto mismo explica, porqué se observa una proporción de calcio mucho mayor en la esquina norte, respecto a la del sur que, limita también con un intrusivo granodiorítico (Valenzuela, 2015).

Por otra parte, la distribución de la razón Ca/Ti (Figura 5-1), indica que los sectores enriquecidos en calcio se deben a una sedimentación de carácter biogénico, a diferencia del silicio (Figura 5-2) que muestra un carácter terrígeno hacia el norte, que cambia gradualmente hacia el suroeste, donde la biogénesis de este elemento va adquiriendo mayor importancia.

Para este estudio se utilizó la razón de titanio para verificar la génesis de los sedimentos, puesto que el titanio es insensible a reacciones de tipo redox (e.g.; Peterson et al., 2000; Haug et al., 2001, 2003).

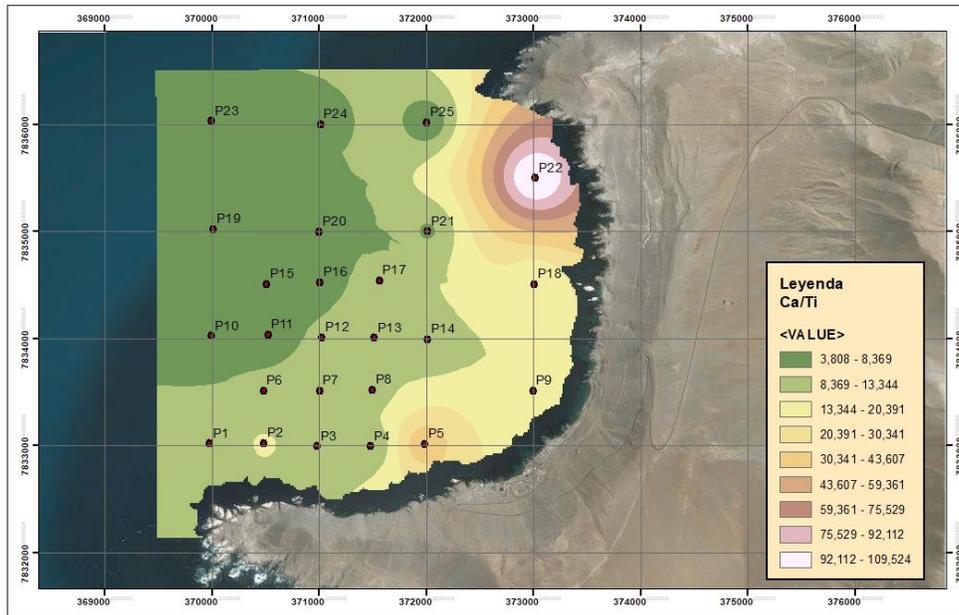


Figura 5-1 Distribución de la razón Ca/Ti

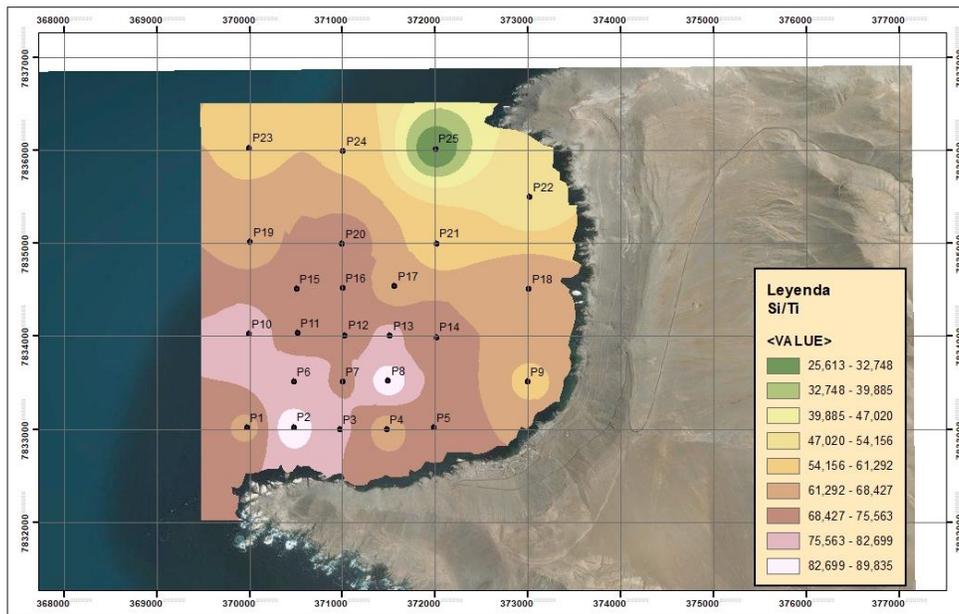


Figura 5-2 Distribución de la razón Si/Ti

Otro factor condicionante es la quebrada Tiliviche, ubicada inmediatamente al norte de la punta Pisagua, en la que, durante eventos lluviosos se genera escorrentía, depositando en la bahía sedimentos producto de la erosión del basamento rocoso de la quebrada.

Esto tiene sentido con la distribución de la razón Si/Ti, que indica una preponderancia de silicio terrígeno en el norte (Figura 5-2).

Según describe Valenzuela (2015), este basamento estaría constituido principalmente por diatomitas, fitoplancton que asimila hierro y silicio para formar su cubierta exterior. Luego se ve un máximo de hierro en el sector más cercano a la desembocadura, lo que se entiende dada la alta densidad del hierro, que dificulta su transporte hacia sectores más lejanos. De la misma manera, el silicio, al ser un elemento de menor densidad es transportado mayores distancias hacia el oeste.

Para el resto de la bahía se observa una distribución relativamente homogénea de hierro, no obstante, al analizar la distribución de la razón de este elemento respecto del titanio, se observa una evolución hacia el sureste, donde la biogénesis adquiere preponderancia en la sedimentación de este elemento (Figura 5-3).

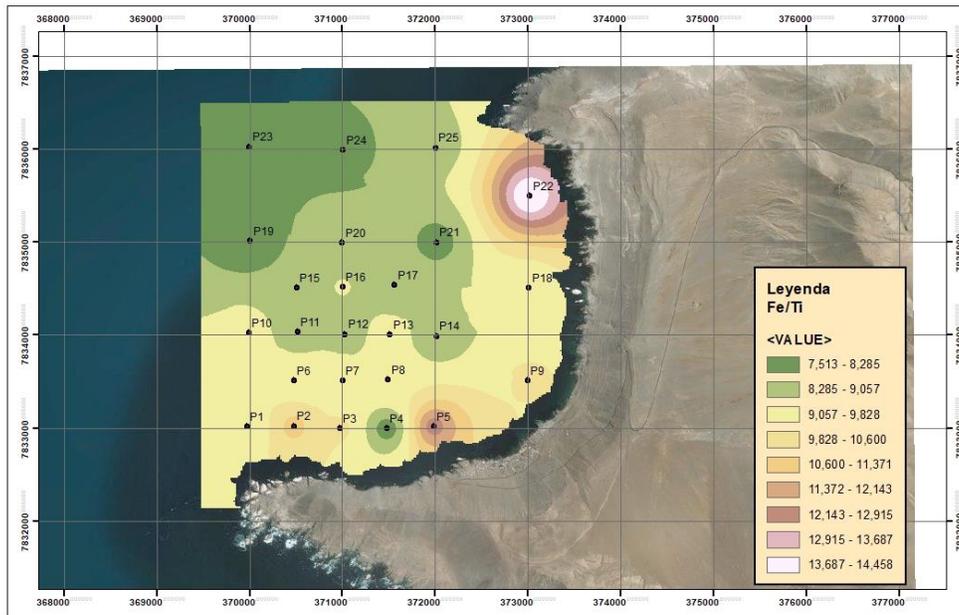


Figura 5-3 Distribución de la razón Fe/Ti

Finalmente, se reconoce otro elemento que incide en la geoquímica de la superficie marina, correspondiente a la franja metalogénica del Jurásico-Cretácico Inferior, cuyo afloramiento se observa en la Punta Pichalo, al sur de la bahía.

Este intrusivo tendría una mayor incidencia en el aporte de elementos como azufre, cobre, cinc y plomo a los sedimentos.

5.2 Variabilidad sedimentaria y reconstrucción paleoambiental

Bajo el supuesto de que la bahía de Pisagua presenta una tasa de sedimentación constante, y similar a la determinada para la bahía de Mejillones, equivalente al rango entre 0,17-0,13 cm por año (Vargas, Ortlieb, Pichon, Bertaux, & Pujos, 2004), las capas más antiguas del testigo analizado tendrían edades entre 750 y 985 años, lo que correspondería al siglo XIII para el primero, y siglo XI para el segundo.

Considerando esa magnitud, es importante tener en consideración, que la tasa de sedimentación supuesta podría haber disminuido drásticamente a los inicios del siglo 20 (Broecker, Stewart, & Tsun-Hung, 1999), por lo tanto, el intervalo de tiempo podría ser mayor.

Según varios autores, el titanio funciona como mejor indicador terrígeno respecto al hierro, debido a que el primero es insensible a las variaciones oxidantes y reductoras (e.g.: Peterson et al., 2000; Haug et al., 2001, 2003). De esta manera se utiliza como elemento normalizador para indicar la génesis (terrígena o biogénica) de los elementos mayores cuya variabilidad es el marco para determinar las variaciones paleo ambientales.

Por otra parte, la normalización con rubidio, respecto a determinados elementos indican distintos aspectos de un depósito turbidítico (Rothwell et al., 2006). La normalización del hierro respecto a este elemento muestra fraccionamiento de granos durante un flujo turbidítico, el acentuamiento de la razón potasio-rubidio, es indicativo de arcillas turbidíticas, mientras la normalización, tanto del circonio como del titanio, se acentúa en las bases de flujos turbidíticos (Rothwell et al., 2006).

En primer lugar, se tiene una capa base con presencia de elementos pesados como escandio y zinc en su borde superior limitando con un acuñamiento de láminas, donde no se aprecian contactos erosivos por lo que se infiere una laminación cruzada indicativa de un flujo turbidítico de baja a mediana densidad, esto se confirma con altos índices de Ti/Rb, Zr/Rb y K/Rb que se acentúan en este sector, acompañada de una gradación inversa indicando un aumento en la velocidad del flujo, que luego se vuelve normal sugiriendo un ajuste de partículas como consecuencia de una disminución de la fuerza del flujo en el tiempo (Nichols, 2009).

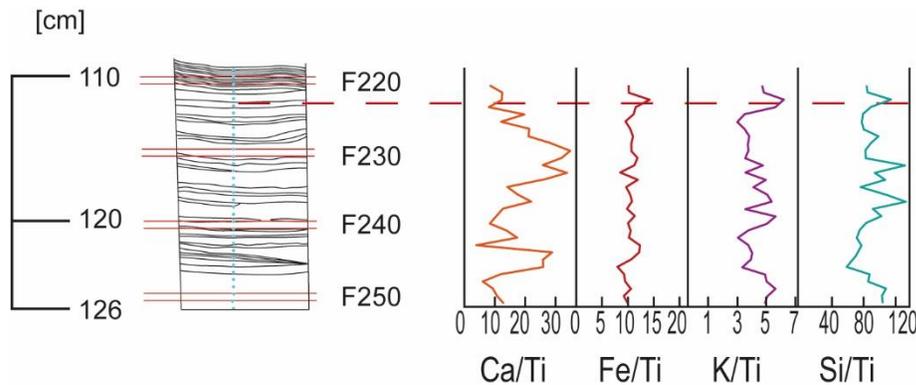


Figura 5-4 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad I

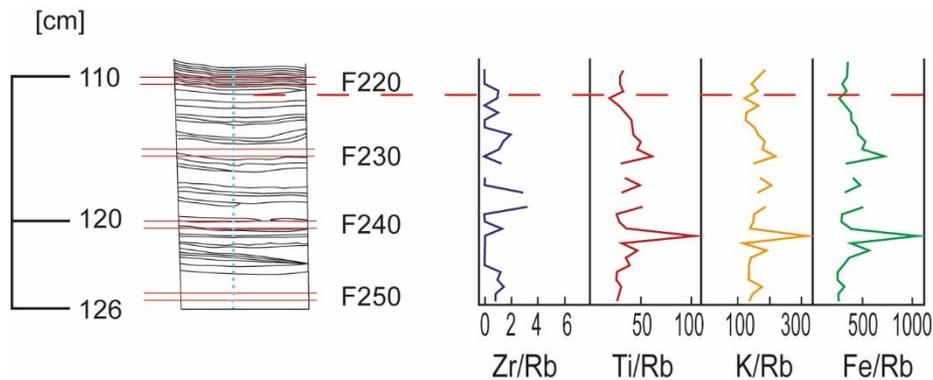


Figura 5-5 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad I

Por otra parte, se observan varios acentuamientos de producción biogénica calcárea a lo largo de toda la unidad. Estos cambios abruptos pueden indicar transiciones glaciales e interglaciales (Croudace & Rothwell, 2015). De esta manera los episodios en los que la temperatura superficial del mar se enfría, favorece la estratificación y con ella la producción calcárea aumenta (Croudace & Rothwell, 2015). Del mismo modo se observan aumentos de silicio biogénico con un leve desfase respecto a la producción calcárea, lo que se asocia al mismo proceso anteriormente mencionado.

Este desfase se explica porque las diatomeas, cuyo exoesqueleto se compone principalmente por sílice, tienen mecanismos que les facilita su flotabilidad, disminuyendo en gran medida la velocidad de deposición respecto a estructuras biogénicas calcáreas de mayor densidad (DIASIN, 2015).

Se han reconocido al menos dos períodos en el océano Pacífico, en los que la temperatura disminuye de forma consistente en torno a $\sim 1,5^{\circ}\text{C}$, y en los que la variabilidad climática se ve intensificada, correspondientes a: 680-475 a.C. y 1270-1475 d.C. (Nunn, 2000). El segundo período, sería consistente con la tasa de sedimentación de $0,17 \text{ cm año}^{-1}$.

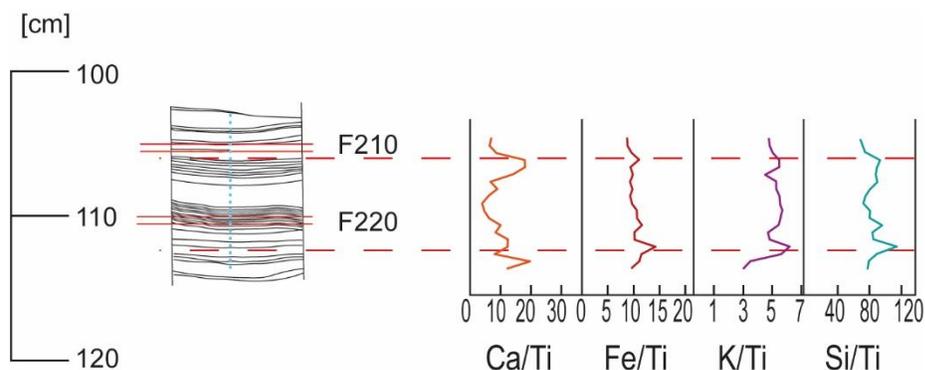


Figura 5-6 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad II

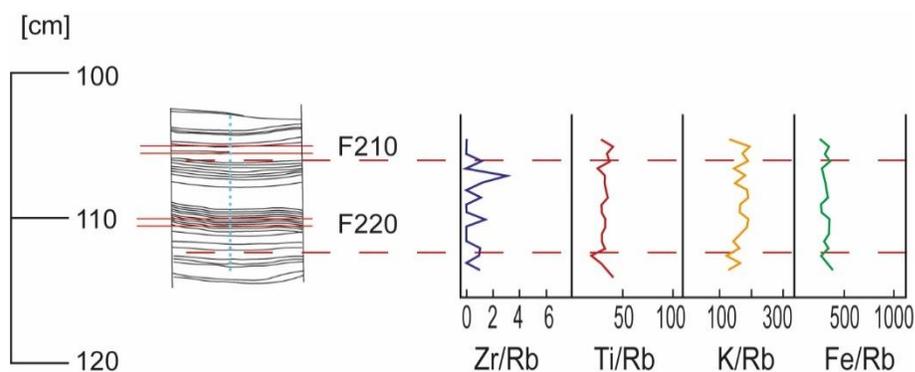


Figura 5-7 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad II

Entre 109,5 y 107,5 cm de profundidad, se observa una fase de mayor fijación de hierro, respecto al titanio, que correspondería a un período post-florecimiento de diatomeas, del orden *Thalassioserae*, que se sustenta con lo observado en la bahía de Mejillones, por Vargas et al., (2004), donde distinguen una asociación aglomerada de fitoplancton de la familia *Chaetoceros* con *Skeletonema Costatum*, y lo relacionan con un ensamblado post-*bloom*, asociada a una fuerte estratificación termal de la columna de agua (Rodríguez & Escribano, 1996).

Además, se confirmaría con la asociación de zinc y aluminio en este intervalo, los que funcionan como acelerantes de la asimilación de hierro, por parte de las diatomeas del orden de *Thalassioserae* (González Dávila, M. et al., 2004).

Por otra parte, se observa laminación cruzada, con base irregular, y gradación normal que se asociaría a un flujo turbidítico de baja densidad, con un aumento de la razón K/Ti, sugiriendo un input terrígeno asociado a arcillas y micas (Diekmann et al., 2008).

Hacia el techo se observa otra deformación asociada a gradación inversa y un acentuamiento de la razón Zr/Rb, paralelo a un aumento sedimentación calcárea biogénica. Esta deposición se explica a través de un flujo turbidítico de alta densidad, sugiriendo

escorrentías por eventos lluviosos generando depósitos producto de la erosión del acantilado costero compuesto en un 84% por calcio (Silva, 1972).

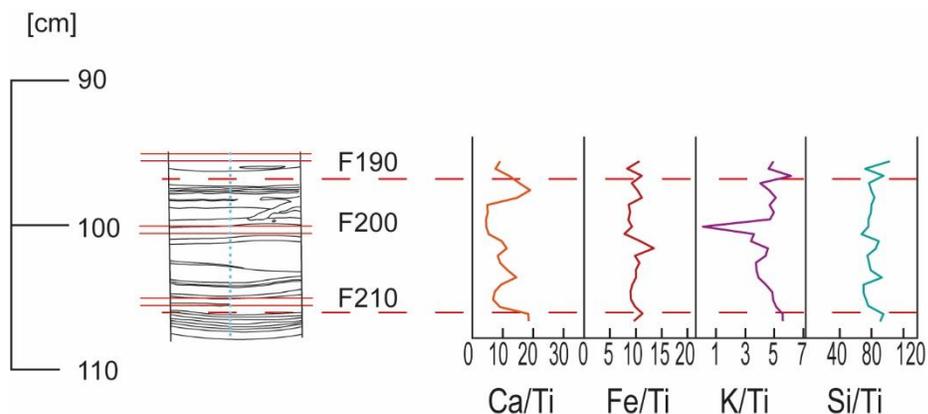


Figura 5-8 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad III

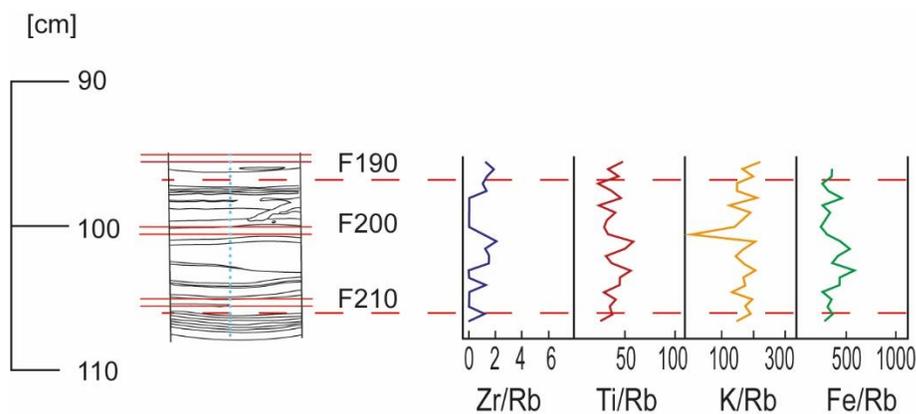


Figura 5-9 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad III

A continuación, se observa una estructura de escape de fluidos, lo que refleja una deposición rápida de sedimentos durante un flujo turbidítico de alta densidad, como se observa en la secuencia definida por Nichols (2009):

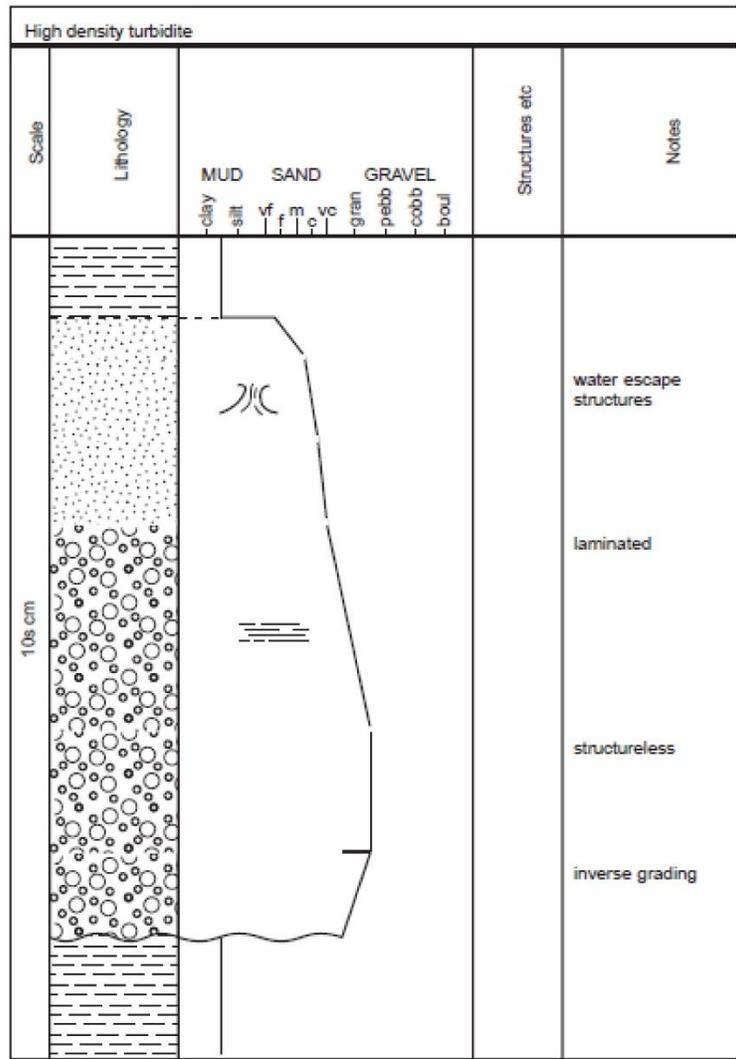


Figura 5-10 Comportamiento granulométrico y estructural en turbiditas de alta densidad (Nichols, 2009)

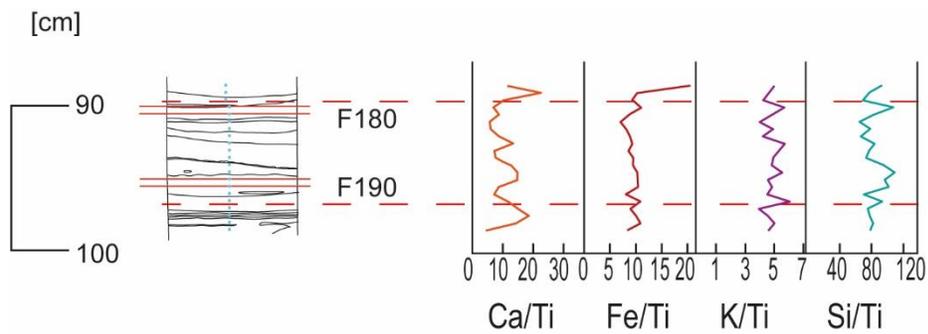


Figura 5-11 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad IV

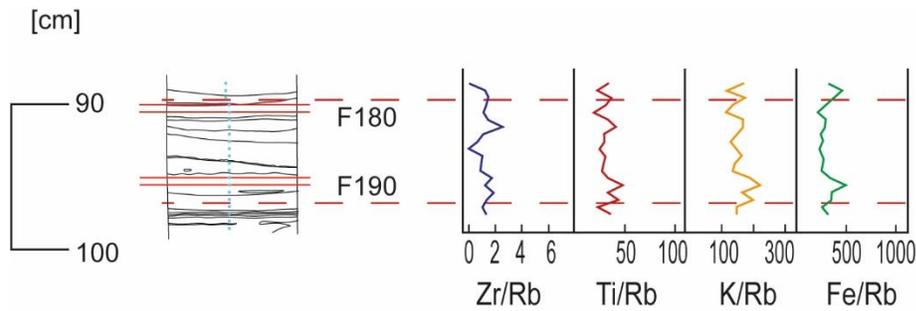


Figura 5-12 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad IV

A continuación, sigue una deposición de láminas finas -sin mayor variabilidad química ni granulométrica- con estructuras laminares discontinuas de arcilla, lo que Nichols (2009) define como laminado intermitente, que, según este autor, ocurre bajo regímenes de oleaje de media a baja amplitud en ambientes de plataforma continental en baja profundidad:

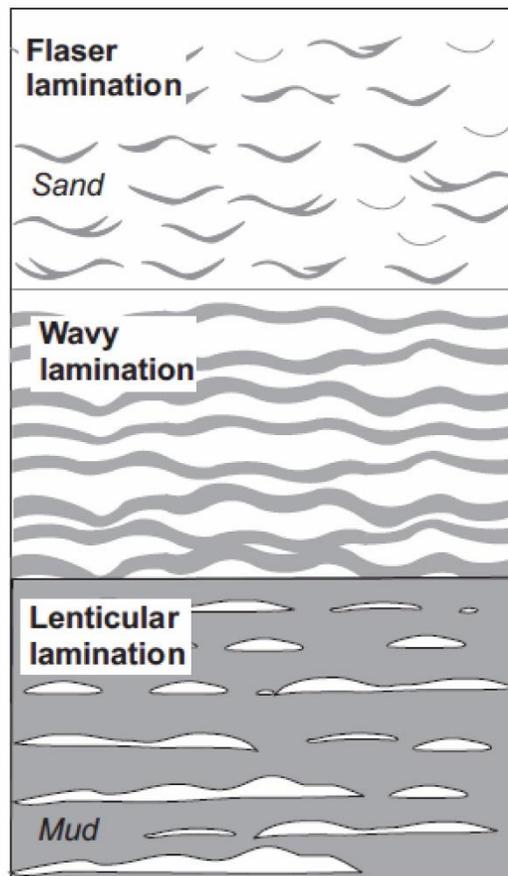


Figura 5-13 Estructuras por oleaje y corriente. Extraído de Nichols (2009)

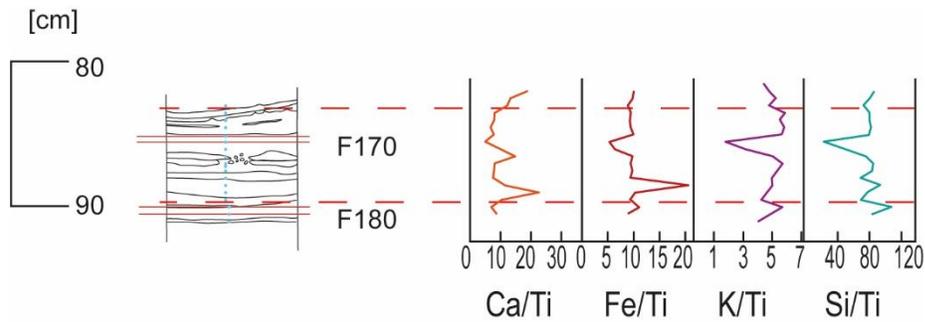


Figura 5-14 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad V

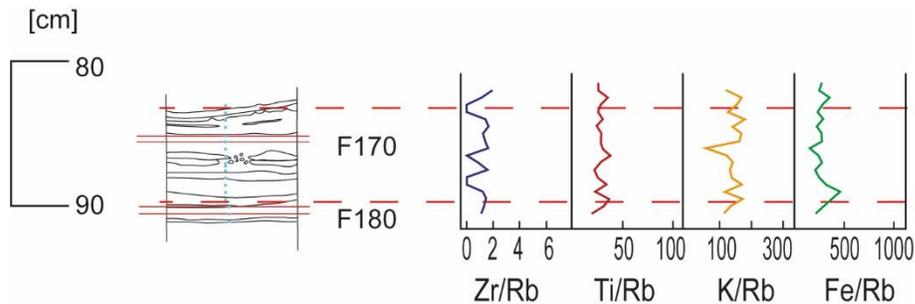
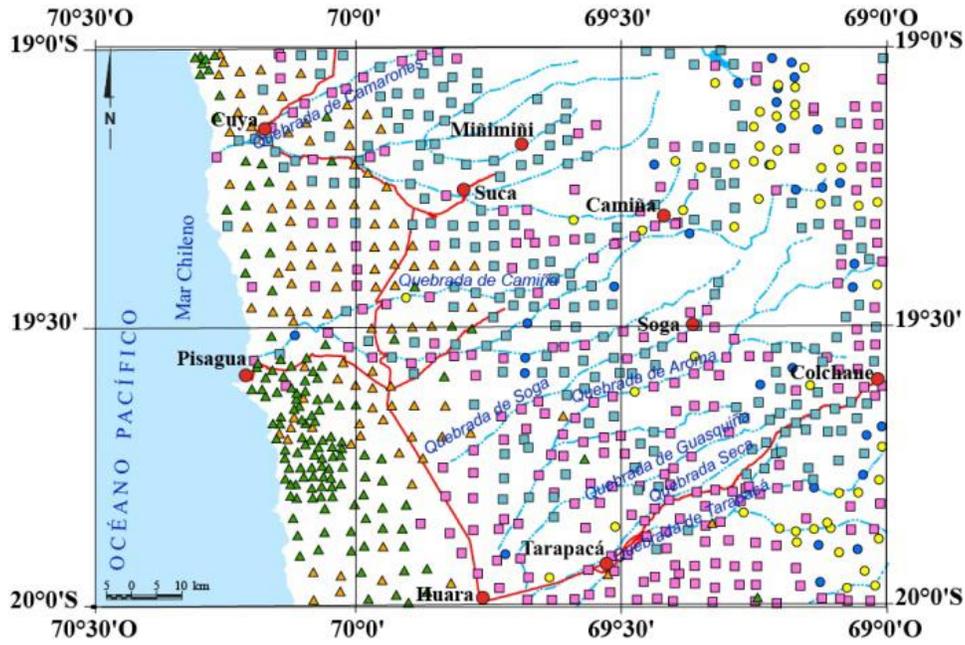


Figura 5-15 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad V

Sigue un aumento sustancial de calcio biogénico, continuado por un aumento de la razón Fe/Ti, que indica una alteración importante de hierro reflejando una intensificación de la hipoxia (Rincón-Martínez et al., 2010). Paralelamente, se aprecia una gradación normal, generalizada hasta la siguiente deformación. Sumado a un aumento de la razón Fe/Rb, este segmento podría definirse como la base de una secuencia turbidítica de baja intensidad.

La deformación potente de estructuras lenticulares de arcilla, con la proporción de titanio más alta del testigo, indica un input terrígeno de gran importancia, lo que se condice con un flujo turbidítico de alta densidad derivado de un aluvión proveniente de zonas altas de la cordillera de la costa, donde se ubican los nodos de titanio (Astudillo et al., 2015; FIG), o bien una intensificación de vientos este-oeste, sugiriendo un input eólico acompañado por un régimen alto de oleaje, en el que la deformación correspondería a una laminación intermitente.



SIMBOLOGÍA

- ▲ Nodo 2 → Alto en: C_{Total}, Na₂O, S_{Total}, CaO, Se, Sr, Au, Mo
 - ▲ Nodo 4 → Alto en: Au, Mo, Cu, MgO, HREE, Cd, P₂O₅, Sc, Pb
 - Nodo 3 → Alto en: Sc, Pb, Zn, Ag, Hg, Sn, Fe₂O₃, MnO, TiO₂, Cr₂O₃, Ni, V, Co, Ga, Nb, Zr, Hf, LREE, Ta, Sb, Th, U, W, Bi
 - Nodo 6 → Alto en: Zr, Hf, LREE, Ta, Sb, Th, U, W, Bi, Tl
 - Nodo 1 → Alto en: SiO₂, Al₂O₃, K₂O, As, Cs, Rb, Ba, C_{Total}
 - Nodo 5 → Alto en: Be
- Centro poblado — Rutas principales - - - Quebrada

Figura 5-16 Principales nodos geoquímicos de Pisagua. Extraído de Astudillo (2015)

Luego, siguen estructuras erosivas que sugieren un régimen medio-alto de corriente, o en su defecto, descenso del nivel del mar, dada la laminación intermitente, seguido por estructuras que aparentan un perfil de canaleta, lo que sugiere un arrastre de clastos de mayor tamaño (Nichols, 2009).

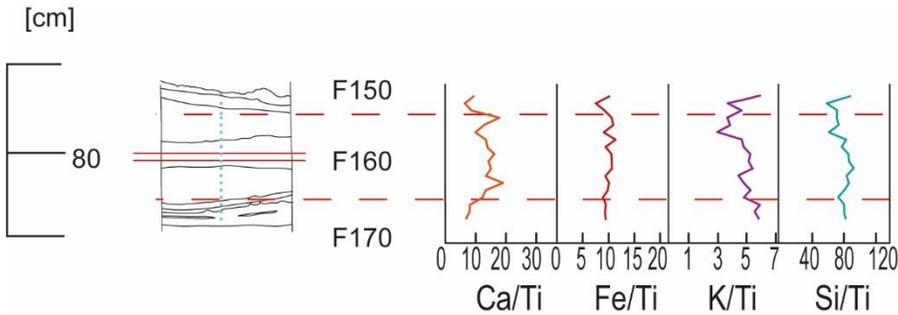


Figura 5-17 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad VI

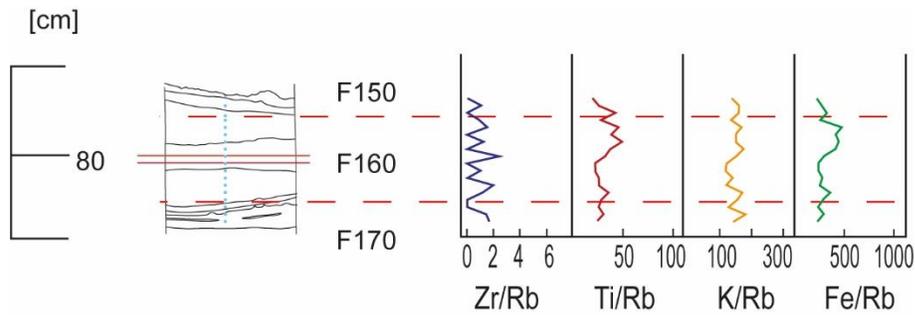


Figura 5-18 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad VI

Siguen capas potentes con gradación inversa, con bordes erosivos e indicadores geoquímicos hacia el techo de una base turbidítica, seguida por una gradación normal, acompañada por un aumento leve de calcio biogénico, además de un aumento en la proporción de titanio, revelando una deposición de sedimento terrígeno. La inclinación de las capas sugiere una laminación cruzada, que sería consistente con una secuencia de Bouma para flujos turbidíticos de baja intensidad (Nichols, 2009; FIG).

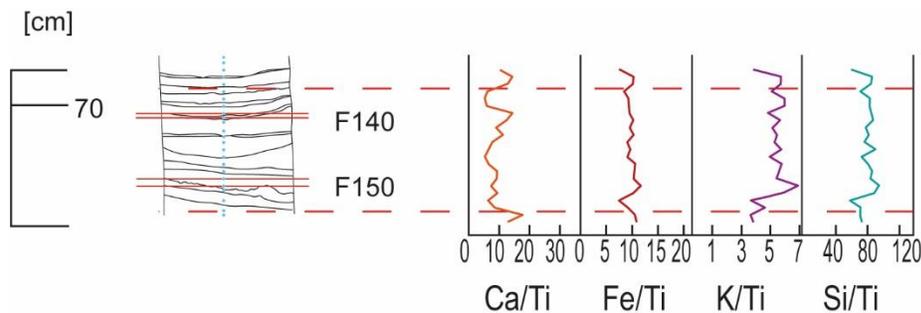


Figura 5-19 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad VII

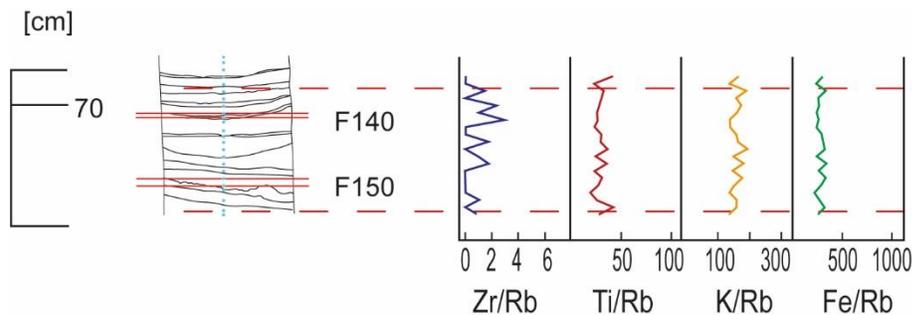


Figura 5-20 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad VII

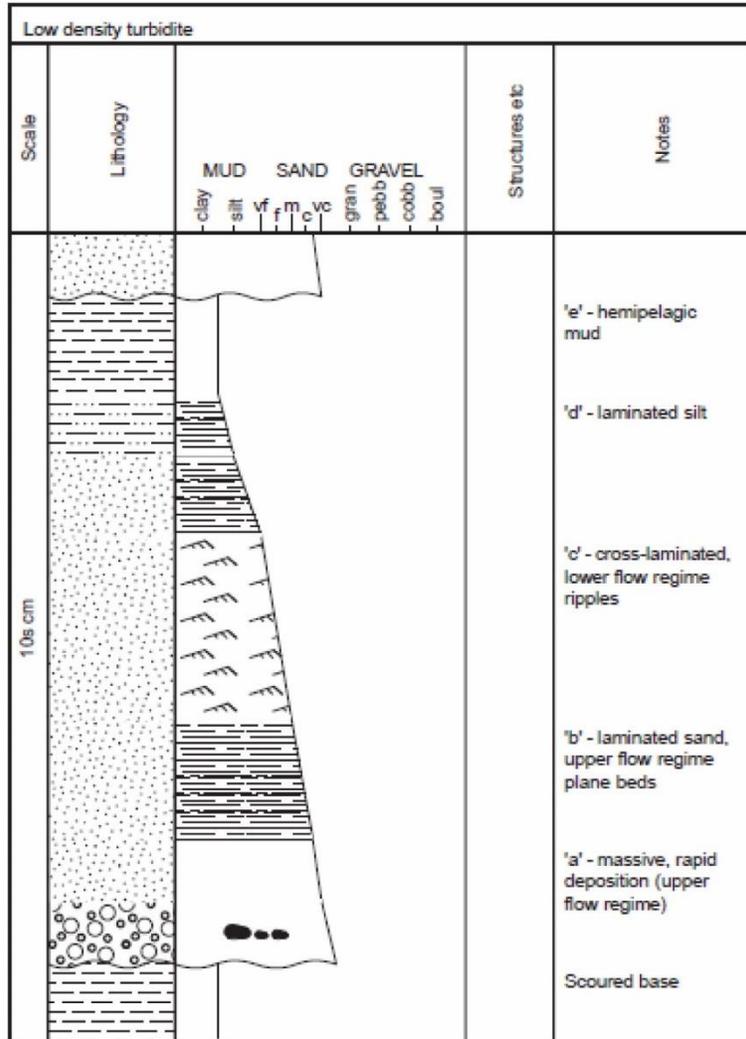


Figura 5-21 Comportamiento granulométrico y estructural en turbiditas de baja densidad (Nichols, 2009)

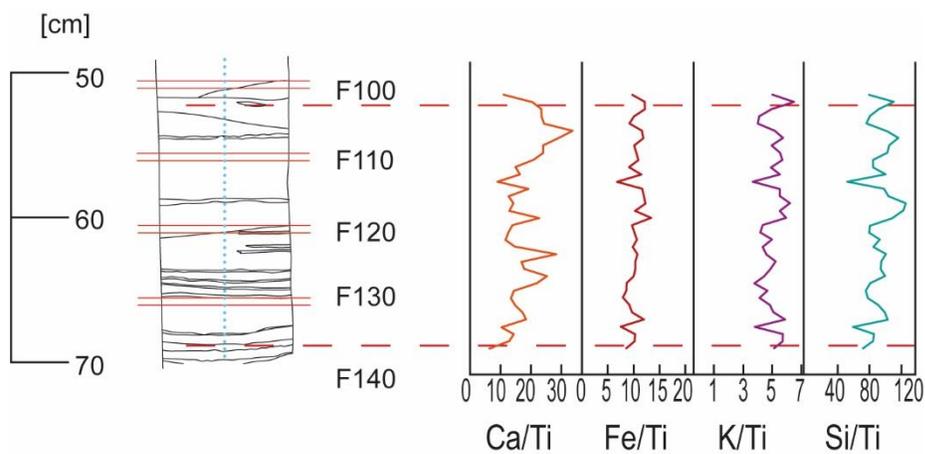


Figura 5-22 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad VIII

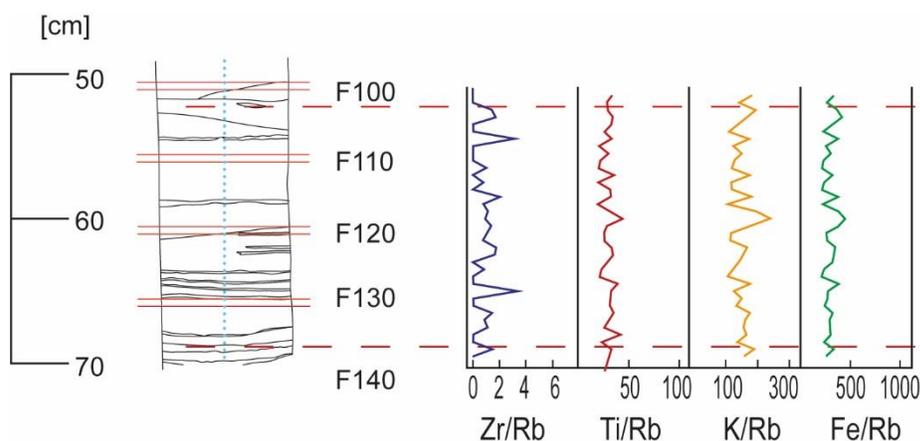


Figura 5-23 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad VIII

Luego, hacia la base, aumenta la razón Zr/Rb , al que le sigue un descenso importante en la proporción de rubidio que puede observarse en la gráfica (FIG), donde paralelamente se observa un aumento de la sílice biogénica, el que se vio precedido por un aumento de calcio biogénico. Este comportamiento se explica inicialmente como un slump, caracterizado por una gradación inversa, hasta los 65 cm de profundidad aproximadamente, para luego iniciar una secuencia turbidítica de baja intensidad, con gradación normal, donde se encuentra el primer acentuamiento de la razón Zr/Rb .

Luego, el posterior pico de la razón K/Rb correspondería a arcillas turbidíticas, que serían resultado de un fraccionamiento producto del flujo de turbidez reflejado en el aumento de la razón Fe/Rb , donde además hay un pico de la razón Ti/Rb , indicando la base de una nueva secuencia turbidítica. De esta manera, el proceso ocurrido, sería una superposición de flujos de turbidez de baja intensidad, asociado a dos períodos de aumento en la producción primaria.

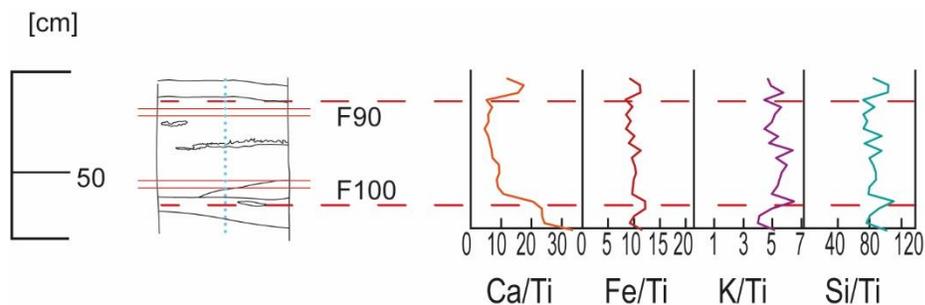


Figura 5-24 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad IX

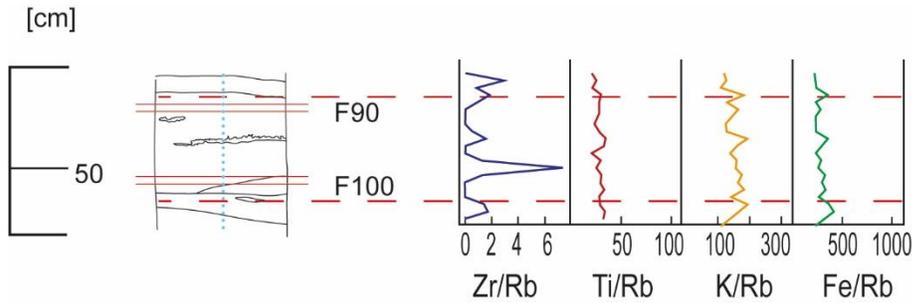


Figura 5-25 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad IX

A continuación, se observa un aumento sustancial en el aporte de circonio, con una gradación normal inmediatamente posterior, asociada a estructuras erosivas con aspecto dentado. Que continúa con laminación fina de limo y arcillas, con 2 ciclos de gradaciones inversas y normales.

Previo a la primera gradación inversa observada, se observa un aumento en la proporción de calcio biogénico, seguido inmediatamente por un leve aumento en la proporción de sílice biogénico, donde a la vez hay leves aumentos en las razones Zr/Rb, K/Rb y Fe/Rb, con una laminación oblicua, cuya génesis es un pequeño flujo de turbidez.

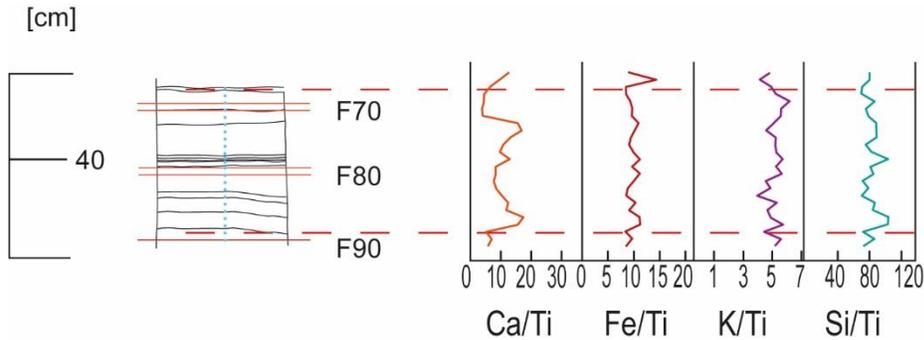


Figura 5-26 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad X

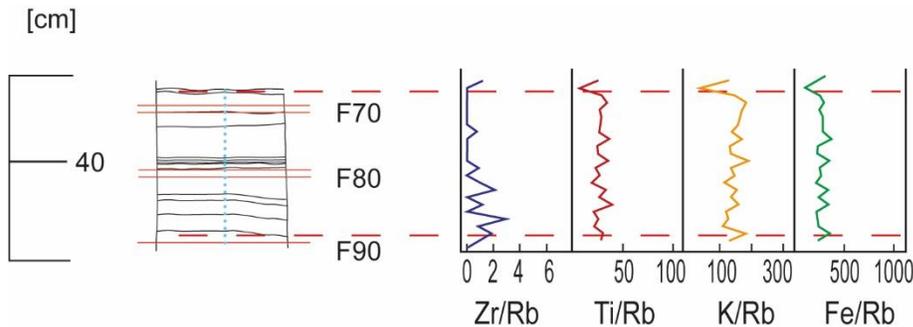


Figura 5-27 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad X

A continuación, no se observa mayor aporte terrígeno, donde la intercalación de limos y arcillas indican una laminación por un régimen bajo a medio de oleaje (Nichols, 2009). Luego, hay un aumento sustancial del potasio, lo que deriva en un aumento de las

normalizaciones con Rb y Ti, indicando un aporte importante de micas tamaño arcilla, a partir de lo que se deduce una disminución en la fuerza de corrientes y oleaje, permitiendo la deposición de las micas en suspensión.

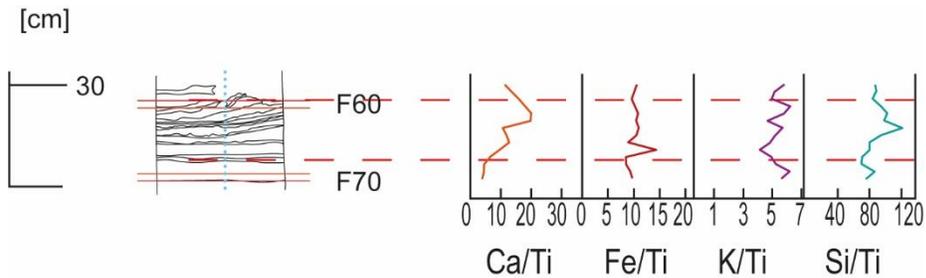


Figura 5-28 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad XI

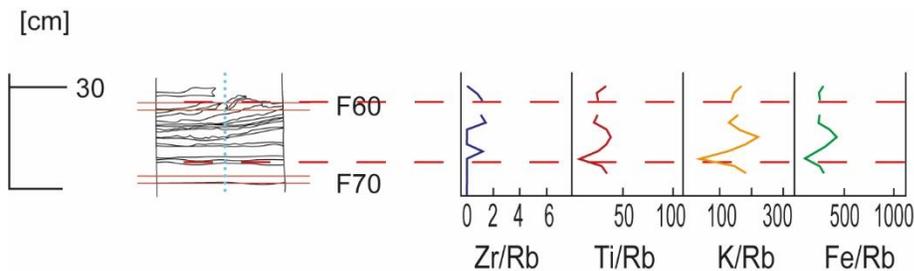


Figura 5-29 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad XI

Sigue un potente cabalgamiento sobre otro, de una intercalación de láminas arcillosas y limosas, con una gradación variable, cuya amplitud va aumentando hasta la superficie del testigo

Dada la alta deformidad, y la disminución de input terrígeno, se asocia esta deformación a la acción de al menos 2 eventos sísmicos de gran magnitud posterior a la deposición de la intercalación de las láminas anteriores, cuyo sedimento sería en apariencia el mismo.

De esta forma, estaría afectado por un primer sismo poco después de la deposición, y un sismo posterior de mayor magnitud que habría agitado sedimentos a mayor profundidad.

Este segundo evento sísmico, habría afectado desde los 8 cm de profundidad, aproximadamente, hasta este plegamiento.

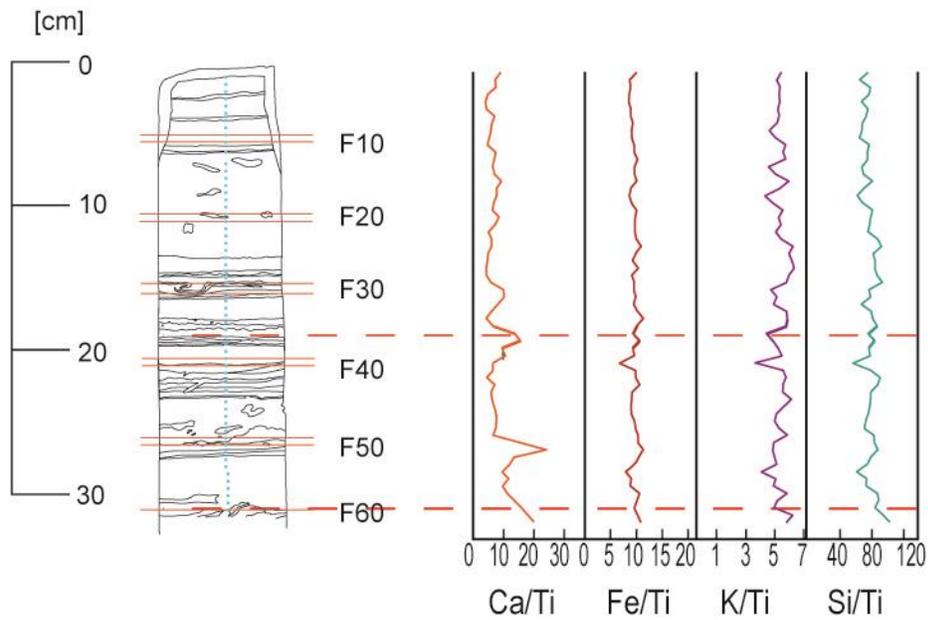


Figura 5-30 Distribución de normalización respecto al titanio. Unidad XII y XIII

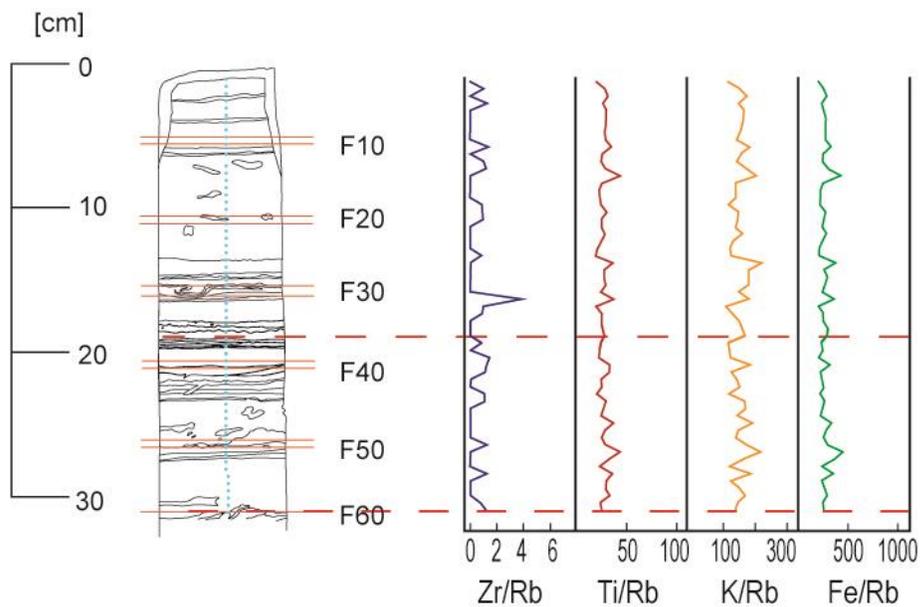


Figura 5-31 Distribución de normalización respecto al rubidio. Unidad XII y XIII

Ante una variabilidad granulométrica importante, no es posible determinar flujos de turbidez hacia el techo, debido a que este sismo con tsunami asociado habría afectado un espesor importante de sedimentos, exhibiendo en el sector superior una mayor afectación por estos eventos.

Rodríguez-Pascua (2000) explica estas potentes deformaciones a través de un proceso donde un primer choque sísmico provoca un aumento en la presión de fluido en los poros, reduciendo la resistencia al corte de las láminas no consolidadas, plegándolas.

La continuidad en el movimiento o vibración producto del terremoto provoca una migración del plegamiento hacia secciones inferiores y simultáneamente el aumento en la tensión de corte provoca la fractura de las láminas plegadas del segmento superior (Rodríguez-Pascua et al. 2000; Figura 5-31). En base a lo anterior se sostiene que un sismo de gran magnitud habría generado horizontes deformados de mayor espesor respecto de aquellos terremotos de menores magnitudes, dado que los primeros tienden a presentar una mayor duración lo que favorecería la perturbación de un mayor número de capas de sedimentos laminados (Figura 5-31) y consecuentemente presentar una deformación de mayor intensidad en el techo de la unidad (Figura 5-31).

Luego, esta capa con un alto nivel de fraccionamiento se definiría como una *homogenita* acorde a la descripción realizada por diversos autores como Bertrand et al. (2008), Kastens & Cita (1981) y Sturm et al. (1995), y correspondería a un importante marcador paleosismológico.

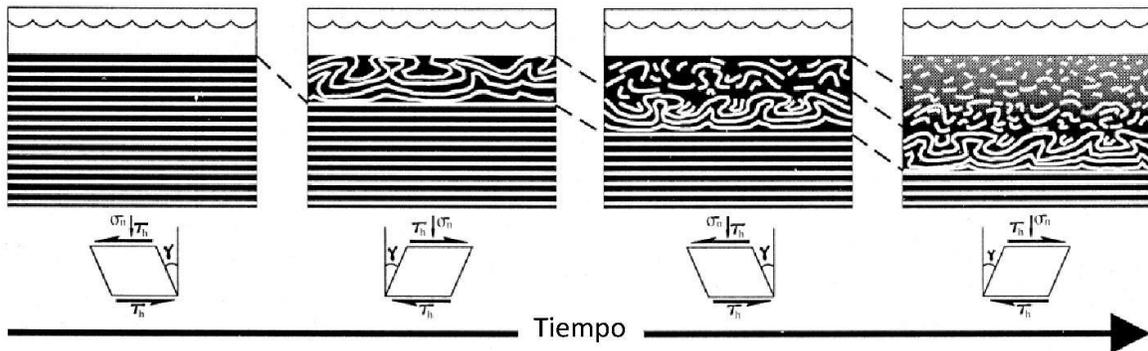


Figura 5-32 Efecto de choques sísmicos en sedimentos marinos laminados no consolidados.

Tomando en consideración los últimos eventos sísmicos de gran magnitud, se tendrían 2 posibilidades: aquel con mayor probabilidad de generar la última unidad deformada correspondería al ocurrido en 1877, con una tasa de sedimentación más baja que $0,13 \text{ cm año}^{-1}$, o bien, si fuese el sismo ocurrido en 2014, tendría que haber existido una tasa demasiado alta durante los últimos 5 años, lo que tiene una probabilidad muy por debajo, por lo que se descartaría.

De esta manera, las condiciones paleo-ambientales, ocurridas durante la deposición del tramo posteriormente afectado, no se vería reflejado en la geoquímica, manteniendo una distribución homogénea de los elementos, salvo aumentos de calcio biogénico en zonas de mayor densidad.

6 Conclusión

La distribución superficial manifiesta correlación directa entre el tamaño de grano y altos niveles de calcio, lo que se asocia a la deposición de esqueletos y partes duras de organismos marinos.

Tanto el silicio, como el aluminio y el potasio, presentan una correlación inversa respecto a la granulometría, explicada por una menor densidad, además de un carácter predominantemente terrígeno en estos sedimentos hacia el norte, influenciados por la quebradas, y una mayor incidencia en la biogénesis de microorganismos hacia el sur, que a su vez están afectados por las condiciones oceáno-climáticas recientes, como lo han sido fuertes precipitaciones en el altiplano y las variaciones en la temperatura superficial marina. La normalización sobre el titanio de los elementos mayores, funciona como buen indicador de origen terrígeno, asimismo, su proporción aumenta de forma considerable en segmentos altamente deformados. Aunque se correlaciona fuertemente con el hierro, se pueden definir sectores donde este presenta menor incidencia, explicado por su mayor susceptibilidad ante variaciones en las condiciones oxidantes-reductoras.

Altas proporciones de silicio y calcio respecto al titanio, permiten inferir períodos de alta producción primaria, mientras mayores proporciones de potasio, hierro, titanio y circonio, sobre el rubidio, junto con las variaciones de tamaño medio de grano y selección, permiten definir con mayor precisión los procesos deformativos asociados a corrientes de turbidez

A partir de esto se afirma, que las variaciones oceáno-climáticas son los que condicionan la distribución geoquímica en profundidad. Las estructuras con grados de deformación elevados, son asociados a eventos sísmicos, mientras deformaciones de menor impacto serían producidas por corrientes de turbidez, de alta y baja densidad.

Los niveles donde la deformación es muy intensa no permiten un análisis lineal temporal de la variabilidad ambiental en la medida que afectan fracciones potentes de las laminaciones previas.

Por otra parte, un aspecto fundamental a considerar es la tasa de sedimentación, que se ve influenciada por los factores antes mencionados, así como por la acidez y salinidad del océano que se han visto alteradas con el calentamiento global y la alteración del ciclo del carbono durante los últimos 70 años, y que no habrían condicionado los cambios climáticos ocurridos en otros siglos.

Asimismo, las deformaciones de alta intensidad alteran la posición de los sedimentos y con esto la geoquímica, pudiendo indicar falsamente eventos de mayor o menor productividad.

De esta manera, la geoquímica de elementos mayores, menores y traza, más la granulometría no son suficientes para hacer una reconstrucción de la variabilidad ambiental en los tramos que se ven afectados por eventos deformativos de gran magnitud, pero sí en aquellos donde la laminación se preserva.

6.1 Perspectivas y recomendaciones

Para una reconstrucción paleo-ambiental precisa se requieren análisis geocronológicos, así como de metales pesados y mineralogía en la totalidad del testigo.

También se requiere de observación por microscopio para definir cuales son los microorganismos presentes y así determinar con mayor precisión los períodos de mayor y menor productividad primaria, así como también para diferenciar procesos de deposición y concentración de partes duras de organismos de mayor tamaño, que podrían deberse a variaciones en la salinidad y acidez del océano, explicada por cambios en las corrientes y vientos.

7 Bibliografía

Allen, J.R.L., 1982. *Sedimentary Structures: their Character and Physical Basis*, Vol. II. Elsevier, New York, 663 pp.

Allmendinger, R.W.; and González, G. 2009. Neogene to Quaternary tectonics of the Coastal Cordillera, northern Chile. *Tectonophysics*, 495. 93–110.

Alsop, G. I., Marco, S. 2012. A large-scale radial pattern of seismogenic slumping towards the Dead Sea Basin. *Journal of the Geological Society*, 169, pp.99-110.

Alsop, G. I., & Marco, S. 2011. Soft-sediment deformation within seismogenic slumps of the Dead Sea Basin. *Journal of Structural Geology*, 33(4), pp. 433-457.

Anketell, J.M., Cegla, J., Dzulinsky, S., 1970. On the deformational structures in systems with reversed density gradients *Ann. Soc. Geol. Pol.* 1 (XL), pp. 3–30.

Antonioletti, R., Schneider, H., Borcosque, J., Zarate, E. 1972. Características climáticas del Norte Chico (26° a 33° latitud sur). Instituto de investigación de recursos naturales, Santiago, 102 pp.

Armijo, R., Lacassin, R., Coudurier-Curveur, A., Carrizo, D., 2015. Coupled tectonic evolution of Andean orogeny and global climate. *Earth Sci. Rev.* 143, 1–35.

Armijo, R., Thiele, R., 1990. Active faulting in northern Chile: ramp stacking and lateral decoupling along a subduction plate boundary? *Earth and Planetary Science Letters* 98, pp. 40– 61.

Arnaud, F., Lignier, V., Revel, M., Desmet, M., Beck, C., Pourchet, M., Tribovillard, N. 2002. Flood and earthquake disturbance of 210Pb geochronology (Lake Anterne, NW Alps). *Terra Nova*, 14(4), pp. 225-232.

Arriagada, C., Mpodozis, C., Yañez, G., Roperch, P., Charrier, R., Farías, M., 2009. Rotaciones Tectónicas en Chile Central: El Oroclino de Vallenar

Astudillo F, L. J. (4-8 de Octubre de 2015). XVI Congreso Geológico. Principales Características Geoquímicas en los Sedimentos de la Hoja Pisagua, Regiones de Tarapacá y de Arica y Parinacota, Chile, 272-276. La Serena, Chile: Sociedad Geológica de Chile.

Avsar, U., Hubert-Ferrari, A., De Batist, M., Fagel, N., Schmidt, S. 2014. Seismically triggered organic-rich layers in recent sediments from Göllüköy Lake (North Anatolian Fault, Turkey). *Quaternary Science Reviews* 103, pp. 67–80.

Beck, C., 2009. Late Quaternary lacustrine paleo-seismic archives in north-western Alps: examples of earthquake-origin assessment of sedimentary disturbances. *Earth-Science Reviews* 96, pp. 327–344.

Beck, C., de Lépinay, B. M., Schneider, J. L., Cremer, M., Çağatay, N., Wendenbaum, E., Eris, K. 2007. Late Quaternary co-seismic sedimentation in the Sea of Marmara's deep basins. *Sedimentary Geology*, 199(1-2), pp. 65-89.

Beck, C., Manalt, F., Chapron, E., Van Rensbergen, P., De Batist, M. 1996. Enhanced seismicity in the early post-glacial period: evidence from the post-Würm sediments of Lake Annecy, northwestern Alps. *Journal of Geodynamics*, 22(1-2), pp. 155-171.

Bernal, P., Robles, F., Rojas, O. 1982. Variabilidad física y biológica en la región meridional del sistema de corrientes Chile-Peru. *Monogr. Biol.*, 2, 75-102.

Bertrand, S., Charlet, F., Chapron, E., Fagel, N., De Batist, M. 2008. Reconstruction of the Holocene seismotectonic activity of the Southern Andes from seismites recorded in Lago Icalma, Chile, 39°S. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, ISSN: 0031-0182, Vol: 259, Issue: 2, pp. 301-322

Bouma, A., H., 1987. Megaturbidite: an acceptable term? *Geo Mar. Lett.*, 7, pp. 63-67.

Bouma, A., H., 1962. In *Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation*. Amsterdam: Elsevier. pp. 168.

Bradley, D., Hanson, L., 1998. Paleoslope analysis of slump folds in the Devonian flysch of Main. *The Journal of Geology* 106, 305-318.

Brandhorst, W. 1971. Condiciones oceanográficas estivales frente a la costa de Chile. *Rev. Biol. Mar.* 14 (3), 45– 84 (Valparaíso).

Bertaux, J.; Fröhlich, F; Ildefonse, PH. 1998. Multicomponent analysis of FTIR spectra: quantification of amorphous silica and crystallized mineral phases in synthetic and natural sediments. *Journal of Sedimentary Research* 68 (3): 440-447.

Broecker, W., Stewart, S., & Tsun-Hung, P. (1999). A Possible 20th-Century Slowdown of Southern Ocean Deep Water Formation. *Science*, 286. 1132-1135.

Brüggen, H., 1950. *Fundamentos de la Geología de Chile*. Instituto Geográfico Militar, Santiago, 510 p.

Bull, D., Kemp, A., 1996. Composition and origins of laminae in late Quaternary and Holocene sediments from the Santa Barbara Basin. In: Kemp, A.E.S. (Ed.), *Paleoclimatology and Paleoceanography from Laminated Sediments*. Geological Society London Special Publication 116. 143– 156.

Cahill, T., Isacks, B. 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, pp. 17.503-17.529.

Caniupán, M., Villaseñor, T., Pantoja, S., Lange, C. B., Vargas, G., Muñoz, P., Salamanca, M., 2009. Sedimentos laminados de la Bahía Mejillones como registro de

cambios temporales en la productividad fitoplanctónica de los últimos~ 200 años. *Revista chilena de historia natural*, 82(1), pp. 83-96.

Caputo, R., Helly, B. 2008. The use of distinct disciplines to investigate past earthquakes. *Tectonophysics* 453, pp. 7–19.

Carr, M. E., P. T. Strub, A. C. Thomas, and J. L. Blanco (2002), Evolution of 1996 – 1999 La Niña and El Niño conditions off western coast of South America: A remote sensing perspective, *J. Geophysics. Res.*, 107(C12), 3236. doi:10.1029/2001JC001183.

Carrillo, E., Beck, C., Audemard, F. A., Moreno, E., Ollarves, R. 2008. Disentangling late Quaternary climatic and seismo-tectonic controls on Lake Mucubají sedimentation (Mérida Andes, Venezuela). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259(2-3), pp. 284-300.

Carrizo, D.; González, G.; Dunai, T. 2008. Constricción neógena en la Cordillera de la Costa, norte de Chile: neotectónica y datación de superficies con ^{21}Ne cosmogónico. *Revista Geológica de Chile* 35 (1): 1-38.

Chapron, E., Beck, C., Pourchet, M., Deconinck, J. F. 1999. 1822 earthquake-triggered homogenite in Lake Le Bourget (NW Alps). *Terra Nova*, 11(2-3), 86-92.

Cita M.B., Aloisi G. 2000. Deep-sea tsunami deposits triggered by the explosion of Santorini (3500 y BP), eastern Mediterranean *Sedimentary Geology*, 135, pp. 181-203.

Cita, M.B., Rimoldi., B. 1997. Geological and geophysical evidences for Holocene tsunami deposits in the eastern Mediterranean deep-sea record *J. Geodyn.*, 1–4 (1997), pp. 293-304

Cita, M.B., Carmerlenghi, A. Rimoldi, B. 1996. Deep-sea tsunami deposits in the eastern Mediterranean: new evidence and depositional models *Sediment. Geol.*, 104, pp. 155-173

Collinson, J., 1994. Sedimentary deformational structures. In: Maltman, A.J. (Ed.), *The Geological Deformation of Sediments*. Chapman & Hall, London, pp. 95-125.

Comte, D., Haessler, H., Dorbath, L., Pardo, M., Monfret, T., Lavenue, A., Pontoise, B., Hello, Y. 2002. Seismicity and stress distribution in the Copiapo, northern Chile subduction zone using combined on- and off-shore seismic observations. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 132, 197–217.

Comte, D., G. Suárez. 1995. Stress distribution and geometry of the subducting Nazca plate in northern Chile using teleseismically recorded earthquakes, *Geophys. J. Int.* 122, 419–440.

Comte, D., Pardo, M. 1991. Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps. *Natural Hazards*, 4(1), 23–44.

Cook, E., Palmer, J., & D'Arrigo, R. (2002). Evidence for a 'Medieval Warm Period' in a 1100 years tree-ring reconstruction of past austral summer temperatures in New Zealand. *Geophysical Research Letters*, 29(14), 1667-1671.

Coudurier-Curveur A., Lacassin R., Armijo R. 2015. Andean growth and monsoon winds drive landscape evolution at SW margin of South America, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 414, pp. 87-99.

Contreras-Reyes, E., Jara, J., Grevemeyer, I., Ruiz, S., Carrizo, D. 2012. Abrupt change in the dip of the subducting plate beneath north Chile. *Nat. Geosci.* 5, 342–345.

CSN. (2009). CSN CIEMAT. Obtenido de MDCSN: http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/133100241_2411200913036.pdf

Debacker, T. N., Van Noorden, M., Sintubin, M. 2006. Distinguishing syn-cleavage folds from pre-cleavage folds to which cleavage is virtually axial planar: examples from the Cambrian core of the Lower Palaeozoic Anglo-Brabant Deformation Belt (Belgium). *Journal of structural geology*, 28(7), pp.1123-1138.

Debacker, T.N., Sintubin, M., Verniers, J., 2001. Large-scale slumping deduced from structural and sedimentary features in the Lower Palaeozoic Anglo-Brabant fold belt, Belgium. In: *Journal of the Geological Society of London*, vol. 158. pp.341-352.

De Baptist, M., Talling, P., Strasser, M., Girardclos, S. 2017. Subaquatic paleoseismology: records of large Holocene earthquake in marine and lacustrine sediments. *Marine Geology*, 384, pp.1-3.

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* 132, pp.302– 338.

Delouis, B., Monfret, T., Dorbath, L., Pardo, M., Rivera, L., Comte, D., Haessler, H., Caminade, J.P., Ponce, L., Kausel, E., Cisternas, A., 1997. The Mw=8.0 Antofagasta (northern Chile) earthquake of 30 July 1995: a precursor to the end of the large 1877 gap. *Bulletin of the Seismological Society of America* 87 (2), pp.427– 445.

DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. & Stein, S. 1990. Current plate motions, *Geophys. J. Int.* 101, 425–478.

DIASIN. (2015). Integrative Eco-mechanics of Diatom Sinking: Cellular Physiology, Complex Advection and the Biological Carbon Pump. Final Report - DIASIN, UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS

Duputel, Z., Jiang, J., Jolivet, R., Simons, M., Rivera, L., Ampuero, J.-P., et al. 2015. The Iquique earthquake sequence of April 2014: Bayesian modeling accounting for prediction uncertainty. *Geophysical Research Letters*, 42, 7949–7957.

Dunai, T.; González, G.; Juez-Larré, J. 2005. Oligocene-Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion sensitive landforms. *Geology*, Vol. 33, No 4, p. 321-324.

Elliot, C.G., Williams, P.F., 1988. Sediment slump structures: a review of diagnostic criteria and application to an example from Newfoundland. *Journal of Structural Geology* 10, 171-182.

Engdahl, E. R., & Villasenor, A. (2002). Global seismicity: 1900–1999. *Int. Geophys.*, 81, 665–690.

Espinoza, S., & Carrasco, M. (Agosto de 1985). Nódulos de bornita en la granodiorita Pisagua, al sur de Pisagua. Antofagasta, Chile: Universidad del Norte-Antofagasta; Sociedad Geológica de Chile.

Farías, M.; Charrier, R.; Comte, D.; Martinod, J.; Hérail, G. 2005. Late Cenozoic deformation and uplift of the western flank of the Altiplano: Evidence from the depositional, tectonic, and geomorphologic evolution and shallow seismic activity (northern Chile at 19°30'S). *Tectonics* 24, TC4001.

Farrell, S.G., Eaton, S., 1988. Foliations developed during slump deformation of Miocene marine sediments, Cyprus. *Journal of Structural Geology* 10, 567-576.

Farrell, S.G., Eaton, S., 1987. Slump strain in the Tertiary of Cyprus and the Spanish Pyrenees. Definition of palaeoslopes and models of soft sediment deformation. In: Jones, M.F., Preston, R.M.F. (Eds.), *Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks*. Special Publication of the Geological Society of London, vol. 29, pp.181-196.

Fernández, V. (20 de Octubre de 2016). Geoinnova. Recuperado el 2020. de <https://geoinnova.org/blog-territorio/cocolitoforidos-reguladores/>

Fonseca, T. R., Farías, M. 1987. Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. *Invest. Pesq. (Chile)*, 34, 33-36.

Fuentes Puebla, L., Felipe Torres, S., & Valencia Fernández, V. (Mayo-Junio de 2015). Efectos biológicos de los Rayo-X en la práctica de Estomatología. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 14(3), 337-347. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/rhcm/v14n3/rhcm11315.pdf>

Fuenzalida, H. 1982. Un país de clima extremo. Chile: *Esencia y Evolución*, H. García, Ed., Instituto de Estudios Regionales de la Universidad de Chile, 27–35.

García, M.; Riquelme, R.; Farías, M.; Hérail, G.; Charrier, R.; 2011. Late Miocene-Holocene canyon incision in the western Altiplano, northern Chile: tectonic or climatic forcing?. *Journal of the Geological Society (London)*. V. 168, p. 1047-1060.

García, M., y G. Hérail. 2005. Fault-related folding, drainage network evolution and valley incision during the Neogene in the Andean Precordillera of northern Chile, *Geomorphology*, 65, 279 – 300.

García-Perez, T., Marquardt, C., Yáñez, G., Cembrano, J., Gomila, R., Santibañez, I., Maringue, J., 2018. Insights on the structural control of a Neogene forearc basin in Northern Chile: A geophysical approach, *Tectonophysics*, 736, 1-14.

Garreaud, R. D., and D. S. Battisti (1999), Interannual (ENSO) and interdecadal (ENSO-like) variability in the Southern Hemisphere tropospheric circulation, *J. Clim.*, 12. 2113 – 2123.

Goldfinger, C., Nelson, C. H., Johnson, J. E., Shipboard Scientific Party. 2003. Holocene earthquake records from the Cascadia subduction zone and northern San Andreas fault based on precise dating of offshore turbidites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31(1), pp. 555-577.

González-Alfaro, J., Vargas, G., Ortlieb, L., González, G., Ruiz, S., Báez, J. C., del Río, I., 2018. Abrupt increase in the coastal uplift and earthquake rate since ~ 40 ka at the northern Chile seismic gap in the Central Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 502, pp. 32-45.

González Dávila, M., Santana Casiani, J., Laglera, L., & Millero, F. &. (2004). Sinergismo y antagonismo en la cinética de asimilación de hierro por fitoplancton marino. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Green, R. A., & Bommer, J. J., 2019. What is the smallest earthquake magnitude that needs to be considered in assessing liquefaction hazard?. *Earthquake Spectra*, 35(3), 1441-1464.

Grimm, K., Lange, C., Gill, A., 1997. Self-sedimentation of phytoplankton blooms in the geologic record. *Sediment. Geol.* 110. 151– 161.

Heifetz, E., Agnon, A., Marco, S. 2005. Soft sediment deformation by Kelvin Helmholtz Instability: A case from Dead Sea earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1-2), pp. 497-504.

Herrera Escobar, S. S. (2013). Configuración y Evolución estructural Pos-Oligocena de la Precordillera de Camiña, Región de Tarapacá, Chile (19°14'-19°32'S/69°13'-69°38'W). Santiago: Universidad de Chile.

Hoffmann, F., Metzger, S., Moreno, M., Deng, Z., Sippl, C., Ortega-Culaciati, F., Oncken, O. 2018. Characterizing afterslip and ground displacement rate increase following the 2014 Iquique-Pisagua Mw 8.1 earthquake, Northern Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, pp. 4171–4192.

Hoke, G.D., Isacks, B.L., Jordan, T.E., Blanco, N., Tomlinson, A.J., Ramezani, J. 2007. Geomorphic evidence for post-10 Ma uplift of the western flank of the central Andes 18°30'-22°S. *Tectonics* 26, pp 17.

Hughen, K., Overpeck, J., Peterson, L., Anderson, R., 1996. The nature of varved sedimentation in the Cariaco basin, Venezuela, and its palaeoclimatic significance. In: Kemp, A.E.S. (Ed.), *Paleoclimatology and Paleoceanography from Laminated Sediments*. Geological Society London Special Publication 116. 171– 183.

Jordan, T.E., Nester, P.L., Blanco, N., Hoke, G.D., Dávila, F., Tomlinson, A.J., 2010. Up-lift of the Altiplano–Puna plateau: a view from the west. *Tectonics* 29, TC5007.

Jordan, T. E., Isacks, B. L., Allmendinger, R. W., Brewer, J. A., Ramos, V. A., & Ando, C. J. (1983). Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin* 1, 94, pp. 341–361.

Kastens, K., Cita, M.B. 1981. Tsunami-induced sediment transport in the abyssal Mediterranean Sea *Geol. Soc. Am. Bull.*, 92, pp. 845-857

Kanamori, H. 1977. The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82, pp. 2981–2987.

Kelling, G., Walton, E.K., 1957. Load-cast structures: their relationship to upper-surface structures and mode of formation. *Geol. Mag.* 94, pp. 481–490.

Kemp A.E.S. 2003. Evidence for abrupt climate changes in annually laminated marine sediments. *Philosophical Transactions the Royal Society* 361, pp. 1851-1870.

Kemp A.E.S. 1996. Laminated sediments as palaeoindicators. En: Kemp A.E.S. (ed) *Palaeoclimatology and palaeoceanography from laminated sediments: vii-xii*. Geological Society, Special Publication 116. The Geological Society London, London, United Kingdom.

Khim, B.-K., Yoon, H., Kang, C., & Bahk, J. (Noviembre de 2002). Unstable Climate Oscillations during the Late Holocene in the Eastern Bransfield Basin, Antarctic Peninsula. *Quaternary Research*, 58(3), 234-245.

Kirk-Lawlor, N., Jordan, T.E., Rech, J.A., Lehmann, S. 2013. Late Miocene to Early Pliocene paleohydrology and landscape evolution of Northern Chile, 19° to 20°S. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 387, pp. 76–90.

Kneller, B. 1995. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. In A. J. Hartley, & D. J. Prosser, Characterization of deepmarine clastic systems (pp. 31-49), Geological Society Special Publication, Vol. 94.

Kober, F., Schlunegger, F., Zeilinger, G., Scheider, H. 2006. Surface uplift and climate change: the geomorphic evolution of the Western Escarpment of the Andes of northern Chile between the Miocene and present. In: Spec. Pap., Geol. Soc. Am., vol.398, pp.75–86.

Lambeck, K., Esat, T. M., Potter, E. K. 2002. Links Between climate and sea levels for the past three million years. *Nature*, Vol. 419, pp.199-206.

Lambeck, K, Chappell, J. 2001. Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle. *Science* 292, Vol 5517: 679-686.

Lara, A., & Villalba, R. (1993). A 3620-Year Temperature Record from Fitzroya cupressoides Tree Rings in Southern South America. *Science*, 260(5111), 1104-1106.

León, T. 2014. Geología marina de la bahía de Tal e implicancias para la prospección arqueológica submarina. Universidad de Chile, Santiago

Li, S., Moreno, M., Bedford, J., Rosenau, M., & Oncken, O. 2015. Revisiting viscoelastic effects on interseismic deformation and locking degree: A case study of the Peru-North Chile subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, pp. 4522–4538

Loveless, J. P. (2017). Super-interseismic periods: Redefining earthquake recurrence. *Geophysical Research Letters*, 44, pp. 1329–1332.

Lowe, D.R., 1975. Water escape structures in coarse-grained sediments. *Sedimentology* 31, pp. 739–745.

Lowe, D.R., Lo Piccolo, R.D., 1974. The characteristics and origins of dish and pillar structures. *J. Sediment. Petrol.* 44, pp. 484–501.

Lukas, R., 1986. The termination of the Equatorial Undercurrent in the eastern Pacific. *Prog. Oceanogr.*, 16, pp. 63-90.

Maltman, A., 1994a. *The Geological Deformation of Sediments*. Chapman & Hall, London, pp. 362.

Maltman, A., 1994b. Introduction and overview. In: Maltman, A. (Ed.), *The Geological Deformation of Sediments*. Chapman & Hall, London, pp. 1-35.

Maltman, A., 1984. On the term soft-sediment deformation. *Journal of Structural Geology* 6, pp. 589-592

Marco, S., Stein, M., Agnon, A., & Ron, H. 1996. Long-term earthquake clustering: A 50,000-year paleoseismic record in the Dead Sea Graben. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B3), pp. 6179-6191.

Marco, S., Agnon, A., 1995. Prehistoric earthquake deformations near Masada, Dead Sea graben. *Geology* 23, pp. 695–698.

Marín, V., Rodríguez, L., Vallejos, L., Fuenteseca, J., Oyarce, E., 1993. Efectos de la surgencia costera sobre la productividad primaria primaveral de Bahía Mejillones del Sur (Antofagasta, Chile). *Rev. Chil. Hist. Nat.* 66, pp. 479– 491.

Marquardt, C. 2005. Tesis de Doctorado, Activité des failles de la plaque supérieure dans l'avant-arc côtier du nord du Chili (~23°30'S) : Paléosismologie, implications néotectoniques et relation avec le cycle de subduction Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Marquardt, C., Lavenue, 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* 394, pp. 193–219.

Marquardt, C., Braucher, R., Ritz, J.F., Philip, H., Bourles, D., Lavenue, A., Delouis, B., Ortlieb, L., 2002. Late Quaternary slip rates of the Mejillones Fault, northern Chile (23°S), using ¹⁰Be dates. 5th ISAG, Toulouse, France, abs. vol., pp. 409–412.

Martinsen, O.J., Bakken, B., 1990. Extensional and compressional zones in slumps and slides in the Namurian of County Claire, Eire. In: *Journal of the Geological Society of London*, vol. 147, pp. 153-164.

Martinsen, O.J., 1989. Styles of soft-sediment deformation on a Namurian delta slope, western Irish Namurian basin, Ireland. In: Whateley, M.K.G., Pickering, K.T. (Eds.), *Deltas: Sites and Traps for Fossil Fuels*. Geol. Soc. London Spec. Publ, vol. 41, pp. 167-177 (Geological Society London, London).

Mather, A., Hartley, A., Griffiths, J., 2014. The giant coastal landslides of Northern Chile: Tectonic and climate interactions on a classic convergent plate margin, *Earth and planetary science letters*, volume 388, pp. 249-256.

McCalpin, J., 2009. *Paleoseismology*. Academic Press, pp. 613.

Melnick, D., Moreno, M., Quinteros, J., Baez, J. C., Deng, Z., Li, S., & Oncken, O. (2017). The super-interseismic phase of the megathrust earthquake cycle in Chile. *Geophysical Research Letters*, 44, pp. 784–791

Meng, L., Huang, H., Bürgmann, R., Ampuero, J. P., & Strader, A. (2015). Dual megathrust slip behaviors of the 2014 Iquique earthquake sequence. *Earth and Planetary Science Letters*, 411, pp. 177–187.

Métois, M., Socquet, A., Vigny, C., Carrizo, D., Peyrat, S., Delorme, A., et al. (2013). Revisiting the North Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling. *Geophysical Journal International*, 194(3), pp.1283–1294.

Mie, G., 1908. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik*, Vierte Folge, Band 25, No. 3, pp. 377-445.

Moernaut, J., Van Daele, M., Strasser, M., Clare, M. A., Heirman, K., Viel, M., Cardenas, J., Kilian, R., de Guevara, B., Pino, M., Urrutia, R., De Batist, M., 2015. Lacustrine turbidites produced by surficial slope sediment remobilization: A mechanism for continuous and sensitive turbidite paleoseismic records, *Marine Geology*.

Morales, C.E., Blanco, J.L., Braun, M., Reyes, H., Silva, N., 1996. Chlorophyll-a distribution and associated oceanographic conditions off northern Chile during the winter and spring 1993. *Deep-Sea Res.* 43, pp. 267– 389.

Morellón, M., Anselmetti, F.S., Valero-Garcés, B., Giralt, S., Ariztegui, D., Sáez, A., Mata, M.P., Barreiro-Lostres, F., Rico, M., Moreno, A. 2014. The influence of subaquatic springs in lacustrine sedimentation: origin and paleoenvironmental significance of homogenites in karstic Lake Banyoles (NE Spain) *Sed. Geol.*, 311, pp. 96-111

Moreno, M., Rosenau, M., & Oncken, O. (2010). 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature*, 467(7312), pp. 198–202.

Mörner, N.-A. (1989). Changes in the Earth's rate of rotation on an El Niño century basis. *Geomagnetism and Paleomagnetism* (F.J. Lowe et al., eds.), 45-53.

Mörner, N.-A. (1993). Present El Niño-ENSO events and past super-ENSO events. *Bull. Inst. fr. études andines*, 3-12.

Mortimer, C., 1980. Dranaige evolution in the Atacama Desert of Northernmost Chile. *Revista Geológica de Chile*, Nº 11, v. 2, pp. 3-28.

Mortimer, C.; Saric, N. 1976. Cenozoic Studies in Northernmost Chile. *Geol. Rundschau*, 65, pp. 395-420.

Mortimer, C., 1973. Área Pan de Azúcar, Región de Atacama. The Cenozoic History of the Southern Atacama Desert, Chile. *Jour. Geological Society*, London, 129, pp. 505-526.

Mortimer, C., Saric, N., 1972. Landform evolution in the coastal region of Tarapacá Province, Chile. *Rev. Géomorphol Dyn.* 21, pp. 162– 170.

Motagh, M., Schurr, B., Anderssohn, J., Cailleau, B., Walter, T. R., Wang, R., & Villotte, J. P. 2010. Subduction earthquake deformation associated with 14 November 2007, Mw 7.8 Tocopilla earthquake in Chile: Results from InSAR and aftershocks. *Tectonophysics*, 490(1-2), pp. 60–68.

Mpodozis, C.; Ramos, V.A. 1990. The Andes of Chile and Argentina. In *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and energy resources*. Circum-Pacific Council for Energy and Hydrothermal Resources (Ericksen, G.E.; Cañas, M.T.; Reinemund, J. A.; editors). American Association of Petroleum Geologists, Earth Science Series: pp. 59-90. Houston, Texas.

Muck, B., Skinner, B., Porter, S., 1996. Environmental geology.

Mulder, T., Zaragosi, S., Razin, P., Grelaud, C., Lanfume, V., Bavoil, F. 2009. A new conceptual model for the deposition process of homogenite: application to a cretaceous megaturbidite of the western Pyrenees (Basque region, SW France) *Sed. Geol.*, 222, pp. 263-273
Mutti, E., Lucchi, F.R., Seguret, M., Zanzucchi, G. 1984. Seismoturbidites: a new group of resedimented deposits *Mar.Geol.*, 55, pp. 103-116.

Mulder, T., Syvitski, J. P. 1995. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans. *The Journal of Geology*, 103(3), pp. 285-299.

Nakajima, T., Kanai, Y. 2000. Sedimentary features of seismoturbidites triggered by the 1983 and older historical earthquakes in the eastern margin of the Japan Sea. *Sedimentary Geology*, 135(1-4), pp. 1-19.

Naranjo, J.A., Paskoff, R., 1985. Evolución cenozoica del piedemonte andino en la Pampa del Tamarugal, norte de Chile (18°–21°S). In: *IV Congreso Geológico Chileno*, vol.4. Universidad del Norte de Chile, pp.5-149–5-165.

Nemec, W. 1990. Aspects of sediment movement on steep delta slopes. In *Coarse-grained deltas* Vol. 10, pp. 29-73.

Nichols, G. 2009. *Sedimentology and stratigraphy*, second edition, pp. 218-224.

Newell, R. E., & Hsiung, J. (1984). Sea surface temperature, atmospheric CO₂. and the global energy budget: some comparisons between the past and the present. *Climatic Changes on a Yearly to Millennial Basis*, 553-561.

Niemeyer, H.; González, G.; Martínez-de los Ríos, E. 1996. Evolución tectónica del margen continental activo de Antofagasta, norte de Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 23. Nº 2. p.165-186.

Nunn, P. (2000). Environmental Catastrophe in the Pacific Islands around A.D. 1300. *Geoarchaeology: An International Journal*, 15(7), 715-740.

Obermeier, S.F., Jacobson, R.B., Smoot, J.P., Weems, R.E., Gohn, G.S., Monroe, J.E., Powars, D.S., 1990. Earthquake- induced liquefaction features in the coastal setting of South Carolina and in the fluvial setting of the New Madrid seismic zone. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1504, 44 pp.

Obermeier, S.F., Gohn, G.S., Weems, R.E., Gelinas, R.L., Rubin, M., 1985. Geologic evidence for recurrent moderate to large earthquakes near Charleston, South Carolina. *Science* 227, pp. 408–411.

Ordóñez, A. R. (2004). Mapa metalogénico de la I Región de Tarapacá, Escala 1:500.000. Chile: Inédito.

Ortega, C. 2014. Variabilidad climática en la costa semiárida de Chile (30-32°S) durante los últimos 13.000 años. Tesis doctoral, Universidad de Chile, Departamento de Geología.

Ortlieb, L., Escribano, R., Follegati, R., Zuñiga, O., Kong, I., Rodríguez, L., Valdés, J., Guzmán, N., Iratchet, P., 2000. Recording ocean-climate changes during the last 2,000 years in a hypoxic marine environment off northern Chile (23°S). *Revista Chilena de Historia Natural* 73, 221–242.

Ortlieb, L., Zazo, C., Goy, J.L., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., Cournoyer, L., 1996. Coastal deformation and sea-level changes in the northern Chile subduction area (23°S) during the last 330 ky. *Quat. Sci. Rev.* 15, pp. 819–831.

95

Owen, G., 1996. Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples. *Sedimentology* 43, pp. 279–293.

Owen, G., 1995. Soft-sediment deformation in upper Proterozoic Torridonian sandstones (Applecross Formation) at Torridon, Northwest Scotland. *J. Sediment. Res.* A65 (3), pp.495–504.

Paskoff, R., 1979. Sobre la evolución geomorfológica del gran acantilado costero del norte grande de Chile. Norte Grande, Instituto de Geografía, Universidad. Católica de Chile; N° 6 (1978-1979). Santiago, Chile.

Paskoff, R., 1978. Sobre la evolución geomorfológica del gran acantilado costero de Norte Grande de Chile. *Géog. Phys. Quatern.* 32, p. 351.

Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. 1973. Sand and sandstone. Springer Science & Business Media. pp. 102-147

Pilger, R. H. 1984. Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South American Andes. *Journal of the Geological Society*, 141(5), pp. 793–802.

Pinto, L., Hérail, G., & Charrier, R. 2004. Sedimentación sintectónica asociada a las estructuras neógenas en la Precordillera de la zona de Moquella (19°15'S, norte de Chile). *Revista Geológica de Chile*, 31(1), pp. 19-44.

Polonia, A., Bonatti, E., Camerlenghi, A., Lucchi, R.G., Panieri, G., Gasperini L. 2013. Mediterranean megaturbidite triggered by the AD 365 Crete earthquake and tsunami *Sci. Rep.*, 3, p. 1285.

Postma, G., Babic, L. J., Zupanic, J., Roe, S. L., 1988. Delta-front failure and associated bottomset deformation in a marine, gravelly Gilbert-type fan delta. *Fan deltas: sedimentology and tectonic settings*, pp. 91-102.

Pratt, B.R., 1994. Seismites in the Mesoproterozoic Altyn Formation (Belt Supergroup), Montana: a test for tectonic control of peritidal carbonate cyclicity. *Geology* 22, pp.1091–1094.

Prior, D. B., Suhayda, J. N., Lu, N. Z., Bornhold, B. D., Keller, G. H., Wiseman, W. J., Yang, Z. S. 1989. Storm wave reactivation of a submarine landslide. *Nature*, 341(6237), 47.

Pritchard, M.E., Simons, M., Rosen, P.A., Hensley, S., Webb, F.H., 2002. Co-seismic slip from the 1995 July 30 Mw=8.1 Antofagasta, Chile, earthquake as constrained by InSAR and GPS observations. *Geophysical Journal International*, 150, pp.362–376.

Quezada, J.; Cerda, J. L.; & Jensen, A. 2010. Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile. *Andean Geology*, 37(1), pp.78-109.

Quezada, J.; Bataille, K.; González, G. 2005. The effect of subduction earthquakes in the coastal configuration of northern Chile. In *International Symposium on Andean Geodynamics*, No. 6, Actas: 578-581. Barcelona, España.

Rahn, D., Garreaud, R., Rutllant, J., 2011. The low-level atmospheric circulation near Tongoy Bay / point Lengua de Vaca (Chilean coast, 30°S). *Monthly Weather Review* 139, pp.3628-364.

Rajendran, C.P., Talwani, P., 1993. Paleoseismic indicators near Bluffton, South Carolina: an appraisal of their tectonic implications. *Geology* 21, pp.987–990.

Rajendran, C.P., Ehrlich, R., Talwani, P., Collinsworth, K., 1993. Recognition of seismically induced liquefaction features: application of Fourier Grain Shape Analysis to two sites in the Charleston, South Carolina, area. *Sediment. Geol.* 87, pp.129–138.

Reeder, M., Rothwell, R.G., Stow, D.A.V., Kahler, G., Kenyon, N.H. 1998. Turbidite flux, architecture and chemostratigraphic of the Herodotus Basin, Levantine Sea, SE

Mediterranean M.S. Stocker, D. Evans, A. Cramp (Eds.), Geological Processes on Continental Margins, Geol. Soc, London, Spec. Publ., vol. 129, pp.19-41

Reutter, K.-J., P. Giese, H.-J. Götze, E. Scheuber, K. Schwab, G. Schwarz, and P. Wigger. 1988. Structures and crustal development of the central Andes between 21° and 25°S, in the 80 Southern Central Andes, Lect. Notes Earth Sci., vol. 17. edited by H. Bahlburg, C. Breitzkreuz, and P. Giese, pp. 231-261. Springer Verlag, New York.

Ricci Lucchi, F., 1980. Sedimentologia II (2nd ed.). Coop. Libr. Univ. Ed., 222 pp.

Ritter D., Kochel, R., Miller, J. 2002. Process Geomorphology, 4th Edition. McGraw Hill, New York.

Robles, F., 1979. Water masses and circulation in the SE Pacific and the El Niño event. Ph.D. thesis, University of Wales, United Kingdom.

Rodbell, D.T., Schweig, E.S., 1993. The record of seismically induced liquefaction on late Quaternary terraces in northwestern Tennessee. Bull. Seismol. Soc. Am. 83 (1), pp.269–278.

Rodríguez, L., & Escribano, R. (1996). Bahía Antofagasta y Bahía Mejillones del Sur: Observaciones de la temperatura, penetración de la luz, biomasa y composición fitoplanctónica. Est. Oceanol., 15. 75-85.

Rodríguez, L., Marín, V., Farías, M., Oyarce, E., 1991. Identification of an upwelling zone by remote sensing and in situ measurement, Mejillones del Sur Bay (Antofagasta-Chile). Sci. Mar. 55 (3), pp.467–473.

Rodríguez, M.P; Aguilar, G; Urresty, C.; Charrier, R., 2014. Neogene landscape evolution in the Andes of north-central Chile between 28.5 and 32°S: Interplay between tectonic and erosional processes.

Romero, O., & Hebbeln, D. (2003). Marine Micropaleontology. Biogenic silica and diatom thanatocoenosis in surface sediments below the Perú-Chile Current: controlling mechanisms and relationship with productivity of surface waters, 48. 71-90. Science Direct.

Romero, O., Hebbeln, D., & Wefer, G. (2001). Deep-Sea Research I. Temporal and Spatial variability in export production in the SE Pacific Ocean: evidence from siliceous plankton flutes and surface sediment assemblages, 48. 2673-2697. Elsevier.

Ruegg, J. C., Campos, J., Armijo, R., Barrientos, S., Briole, P., Thiele, R., et al. (1996). The Mw = 8.1 Antofagasta (North Chile) earthquake of July 30,1995: First results from teleseismic and geodetic data. Geophysical Research Letters, 23, pp.917–920.

Ruff, L. and Kanamori, H. 1983. Seismic coupling and uncoupling at subduction zones, Tectonophysics 99, pp.99-117.

Ruiz, S., Madariaga, R., 2018. Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics* 733, pp. 37-56.

SC, W., & MJ, P. (2000). *Oral radiology. Principles and interpretation*. Saint Louis, Missouri, USA.

Ruiz, S., Métois, M., Fuenzalida, A., Ruiz, J., Leyton, F., Grandin, R., et al. 2014. Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique Mw 8.1 earthquake. *Science*, 345(6201), pp.1165–1169.

Russ, D.P., 1979. Late Holocene faulting and earthquake recurrence in the Reelfoot Lake area, northwestern Tennessee. *Geol. Soc. Am. Bull.* 90, pp.1013–1018.

Rutllant, J., Fuenzalida, H., Torres, R., Figueroa, D., 1998. Interacción océano-atmósfera-tierra en la Región de Antofagasta (Chile, 238S): Experimento DICLIMA. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 71, pp.405– 427.

Saucier, R.T., 1991. Geoarchaeological evidence of a strong prehistoric earthquakes in the New Madrid (Missouri) seismic zone. *Geology* 19, pp.296–298.

Saucier, R.T., 1989. Evidence for episodic sand-blow activity during the 1811–1812 New Madrid (Missouri) earthquake series. *Geology* 17, pp.103–106.

Schildgen, T., Hodges, K., Whipple, K., Reiners, P., Pringle, M., 2007. Uplift of the western margin of the Andean plateau revealed from canyon incision history, southern Peru. *Geology* 35, pp. 523–526.

Schlunegger, F., Kober, F., Zeilinger, G., von Rotz, R. 2010. Sedimentology-based reconstructions of paleoclimate changes in the Central Andes in response to the uplift of the Andes, Arica region between 19 and 21°S latitude, north-ern Chile. *Int. J. Earth Sci.* 99 (Suppl. 1), 123–137.

Schlunegger, F., Zeilinger, G., Kounov, A., Kober, F., Husser, B., 2006. Scale of relief growth in the forearc of the Andes of Northern Chile (Arica latitude, 18°S). *Terra Nova* 18, 217–223.

Schnellmann, M., Anselmetti, F. S., Giardini, D., McKenzie, J. A. 2005. Mass movement-induced fold-and-thrust belt structures in unconsolidated sediments in Lake Lucerne (Switzerland). *Sedimentology*, 52(2), pp. 271-289.

Scholz, C. H., 1998. Earthquakes and friction laws. *Nature*, 391(6662), pp. 37-42.

Schurr, B., Asch, G., Hainzl, S., Bedford, J., Hoechner, A., Palo, M., 2014. Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake. *Nature*, 512(7514), pp. 299–302.

Seilacher, A., 1991. Events and their signatures - an overview. In: Emsele, G., Reiken, W., Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer, Berlin, pp. 222–226.

Seilacher, A., 1984. Sedimentary structures tentatively attributed to seismic events. *Mar. Geol.* 55, pp. 1–12.

Seilacher, A., 1969. Fault graded beds interpreted as seismites. *Sedimentology* 13, pp. 155–159.

Shiki, T., Kumon, F., Inouchi, Y., Kontani, Y., Sakamoto, T., Tateishi, M., Fukuyama, K. 2000. Sedimentary features of the seismo-turbidites, Lake Biwa, Japan. *Sedimentary Geology*, 135(1-4), pp. 37-50.

Silva, N., Sievers, H., 1981. Masas de agua y circulación en la región de la rama costera de la corriente de Humboldt. Latitudes 18°S-33°S (Operación Oceanográfica MARCHILE X-ERFEN 1). *Cienc. Tec. Mar. CONA*, 5, 5-20.

Silva, I., 1972. Geología de las Hojas Pisagua y Zapiga, Provincia de Tarapacá, Chile. Memoria de título, Univ. de Chile. Santiago.

Stanley, D.J. 1981. Unifites: structureless muds of gravity-flow origin in Mediterranean basins *Geo-Mar. Lett.*, 1 (1981), pp. 77-83

Staubwasser, M., Sirocko, F., 2001. On the formation of laminated sediments on the continental margin off Pakistan: the effects of sediment provenance and sediment redistribution. *Mar. Geol.* 172. 43–56.

Strub, T., Mesías, J., Montecino, V., Rutllant, J., Salinas, S., 1998. Coastal ocean circulation off western South America. In: Robinson, A.R., Brink, K.H. (Eds.), *The Sea* vol. 11. Wiley, New York, pp. 273– 313.

Sturm, M., Siegenthaler, C., Pickrill, R.A., 1995. Turbidites and 'homogenites'. A conceptual model of flood and slide deposits. 5ème congrès de Sédimentologie. ASF, Livre des Résumés, vol. 22, Paris, 1 pp.

Talwani, P., Cox, J., 1985. Paleoseismic evidence for recurrence of earthquakes near Charleston, South Carolina. *Science* 229, pp. 379–381. Vargas, G., Palacios, C., Reich, M., Luo, S., Shen, C. C., González, G., & Wu, Y. C., 2011. U-series dating of co-seismic gypsum and submarine paleoseismology of active faults in Northern Chile (23 S). *Tectonophysics*, 497(1-4), pp. 34-44.

Vargas, G., 2002. Interactions ocean-atmosphère au cours de dernier siècles sur la côte du Désert d'Atacama: analyse multi-proxies des sédiments laminés de la Baie de Mejillones (23°S). L'Universite Bordeaux I.

Vargas, G., Ortlieb L., Chapron E., Valdes J., Marquardt C., 2005. Paleoseismic inferences from a high-resolution marine sedimentary record in northern Chile (23°S). *Tectonophysics* 399, pp. 381– 398

Vargas, G., Ortlieb, L., Pichon, J., Bertaux, J., & Pujos, M. (2004). Sedimentary facies and high resolution primary production inferences from laminated diatomaceous sediments off northern Chile (23°). *Marine Geology* (211), 79-99.

Vargas, G., Pantoja, S., Rutllant, J.A., Lange, C.B., Ortlieb, L., 2007. Enhancement of coastal upwelling and interdecadal ENSO-like variability in the Peru–Chile Current since late 19th century. *Geophysics. Res. Lett.* 34 (13), L13607.

Vargas, G., Ortlieb, L. 1998. Patrones de variaciones climáticas durante el Cuaternario tardío en la costa de la Región de Antofagasta. In *Congreso Geológico Chileno*, No. 7, Actas, Vol. 1, p. 400-404. Antofagasta.

Vargas, G. 1996. Evidencias de cambios climáticos ocurridos durante el cuaternario en la zona de Antofagasta, II Región. *Magíster en Geología*, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 174 p.

Vergara, J., 1993. Effects of coastline geometry on wind-induced upwelling in the Chilean coast: a numerical study. In *Preprints 4th International conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*. American Meteorological Society, Boston, pp. 270-271.

Vergara, J., 1991. Un modelo numérico bi-dimensional continuamente estratificado para el estudio de la surgencia costera. *Invest. Pesq. (Chile)*, 36, pp. 39-50.

Vigny, C., Rudolff, A., Ruegg, J.-C., Madariaga, R., Campos, J., & Alvarez, M. 2009. Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap, Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175, 86–95.

Von Huene, R., Ranero, C.R., 2003. Subduction erosion and basal friction along the sediment-starved convergent margin off Antofagasta, Chile. *J. Geophys. Res.* 108, 2079.

Walker, R.G. y Plint, A.G., 1992. Wave- and stormdominated shallow marine systems. In: *Facies Models: Response to Sea Level Change* (Eds Walker, R.G. & James, N. P.). Geological Association of Canada, St Johns, Newfoundland; pp. 219–238.

Wang, L., Shum, C. K., Simons, F. J., Tassara, A., Erkan, K., Jekeli, C., Yuan, D. N. 2012. Coseismic slip of the 2010 Mw 8.8 Great Maule, Chile, earthquake quantified by the inversion of GRACE observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 335, 167–179.

Wesnousky, S.G., Leffer, L.M., 1992. The repeat time of the 1811–1812 New Madrid earthquakes: a geological perspective. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 82 (4), pp. 1756–1785.

Woodcock, N.H., 1979. The use of slump structures as palaeoslope orientation estimators. *Sedimentology* 26, pp. 83-99.

Woodcock, N.H., 1976a. Ludlow series slumps and turbidites and the form of the Montgomery trough, Powys, Wales. *Proceedings of the Geologists Association* 87, pp.169-182.

Woodcock, N.H., 1976b. Structural style in slump sheets: Ludlow series, Powys, Wales. In: *Journal of the Geological Society, London*, vol. 132, pp.399-415.

Yáñez, G., Cembrano, J., Pardo, M., Ranero, C., & Selles, D. 2002. The Challenger-Juan Fernández-Maipo major tectonic transition of the Nazca-Andean subduction system at 33-34°S: Geodynamic evidence and implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), pp. 23–38.

Zeilinger, G., Schlunegger, F., Simpson, G., 2005. The Oxaya anticline (northern Chile): a buckle enhanced by river incision? *Terra Nova* 17, pp. 368–375.

Zhang, Y., J. M. Wallace, and D. S. Battisti (1997), ENSO-like interdecadal variability: 1900 – 93. *J. Clim.*, 10. 1004 – 1020.

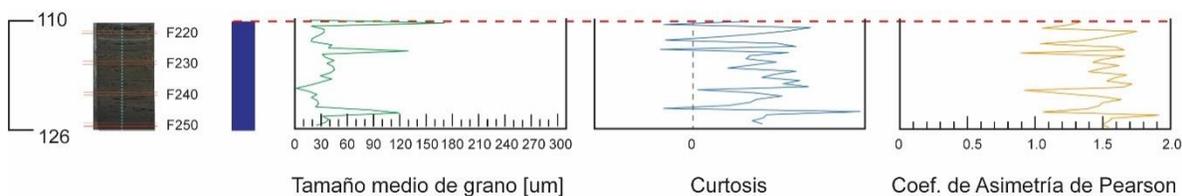
Anexo A: Estratigrafía, geoquímica y granulometría detallada según definición inicial de unidades

Unidad I

Esta unidad corresponde al tramo basal del testigo, desde los 126 cm del testigo en la apertura hasta los 110 cm de profundidad, abarcando 16 cm de potencia.

La primera sección consiste en 20 mm, de limo arcilloso masivo, color 10YR4/2, cuyo tamaño promedio de grano aumenta de la base hasta el techo.

Respecto a su composición, se observan índices altos de la razón Si/Al, sugiriendo un mayor contenido de sílice biogénico, versus litogénico. No obstante, también se presenta un contenido importante de circonio, elemento de carácter litogénico, además de zinc y escandio en su techo, y cobre en su base. Respecto al calcio y el hierro, se mantienen bajo el promedio en esta primera capa. El estroncio presenta el mismo comportamiento que el calcio en esta capa.



Gráfica 0-1 Granulometría Unidad I

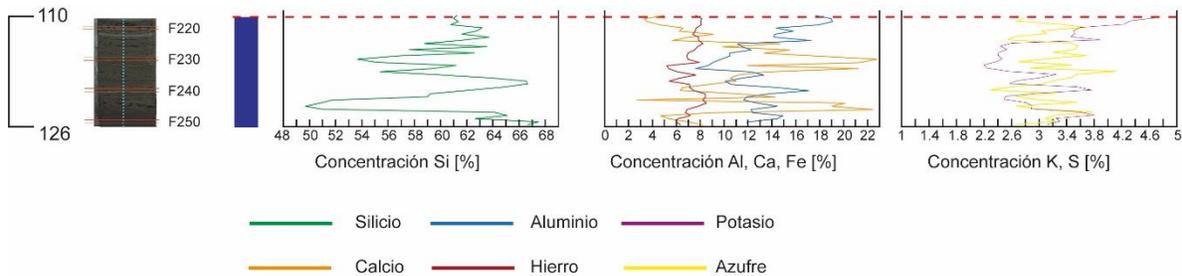
La siguiente capa alcanza un promedio de 110 μm , con mala selección, reflejada en la curtosis de la muestra. Ésta consiste en 5 mm de arena muy fina color 5Y3/2, sin estructuras.

La razón Si/Al aumenta junto con la concentración de calcio y hierro, se sugiere, por lo tanto, un aumento de la productividad primaria durante la deposición de esta capa.

Posteriormente, se depositan una serie de láminas acuñadas, que inicia con 5 mm en su espesor máximo, de textura limo arcillosa y de aspecto masivo, color 10YR4/2. Le siguen 3 láminas, con contacto nítido entre sí, de 1 mm de espesor máximo. Posteriormente, se observa una capa masiva que se acuña en sentido contrario a las láminas anteriores, y que se encuentra en contacto irregular y oblicuo con ellas. De espesor variable entre 13 y 2,5 mm, color 5YR5/6.

Las 2 muestras que contienen estas láminas mantienen una granulometría menor a 50 μm y con buena selección.

En este nivel, se observa un aumento abrupto en el contenido de calcio y estroncio, además, de un descenso importante en la concentración de silicio.



Gráfica 0-2 Distribución elementos mayores en Unidad I

En contacto nítido respecto de la capa anterior, sobre yace una fina lámina de 1 mm, color 10YR8/2, con textura arcillo-limosa.

Luego, se deposita una intercalación de 4 láminas, con contactos nítidos entre ellas, de potencia total de 10 mm, en los que se mantiene un tamaño promedio de grano similar a la sucesión anterior.

Se observan dos tipos de sedimento en esta intercalación:

1. La lámina más antigua corresponde a un sedimento de textura arcillo-limosa, de aspecto masivo, color 10YR4/2, de 4,5 mm de espesor. Ésta corresponde al *peak* de bromo y vanadio, además de presentar circonio en su composición.

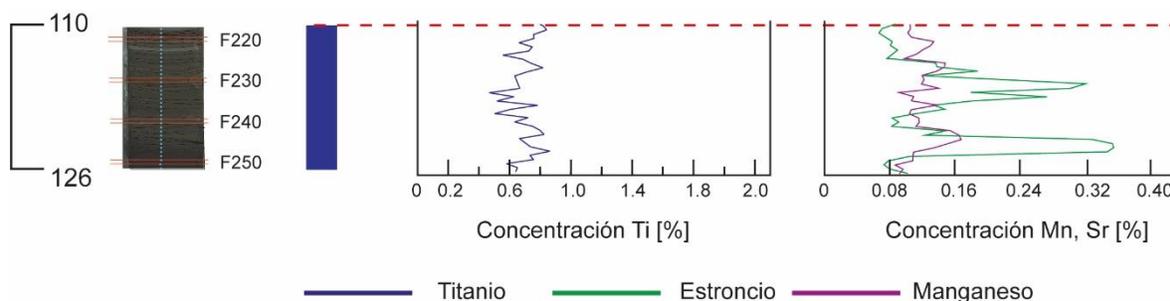
Se vuelve a presentar una lámina con las mismas características observables, con un 1 mm de espesor, pero no se logra distinguir su composición, debido que la muestra refleja el contenido de todas las láminas siguientes.

2. Las otras dos láminas, corresponden a finas capas de 0.5 mm de espesor, color 5YR2/2, de textura limo-arcillosa. Su techo es nítido respecto de la siguiente capa

En contacto nítido respecto de la capa anterior, sobre yace una fina lámina de 1 mm, color 10YR8/2, con textura arcillo-limosa, cuya granulometría se mezcla con la de las láminas anteriores.

Respecto a la composición de elementos mayores, se observa un descenso importante en la composición de calcio, llegando a menos del 4%, mientras el aluminio y el silicio aumentan.

Se sugiere, dada la morfología y composición, una fase de baja productividad, con mayor aporte terrígeno.



Gráfica 0-3 Distribución elementos menores Unidad I

A estos depósitos, le sigue una capa potente de 19 mm de espesor máximo, color 10YR4/2, de textura arcilla-limosa, que es interrumpida por una lámina discontinua de 2 mm de espesor, de arcilla 5R6/2.

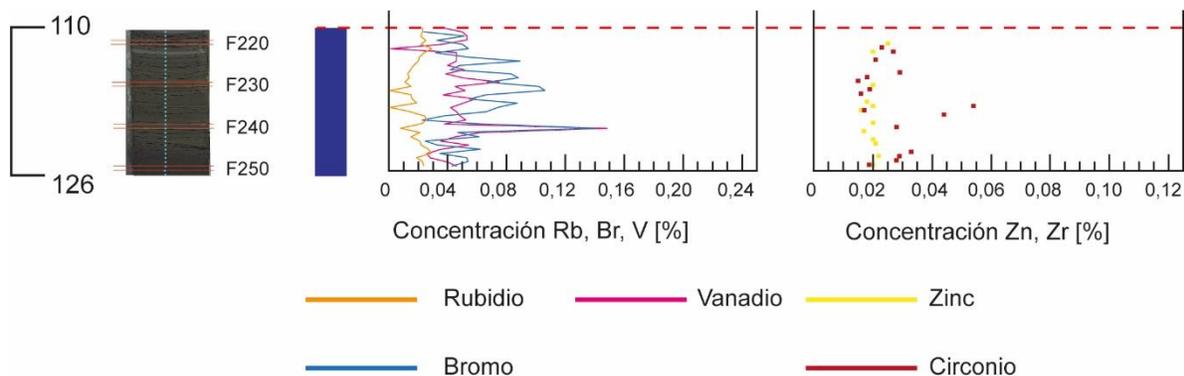
Las 4 muestras que abarcan esta sección manifiestan un cambio importante en aquella que contiene la lámina discontinua. El sedimento que define a la capa más potente presenta un tamaño medio de grano en torno a los 30 μm , mientras la lámina discontinua, se encuentra en torno a los 5 μm . Esto da un coeficiente de curtosis bajo en la muestra, debido a la mezcla de sedimentos.

La lámina discontinua, tiene una composición elevada de aluminio respecto de la capa contenedora (17,076% versus 13,102%), y un contenido de calcio de 6,325%, que en la capa que lo contiene, equivale a un 10,316% en promedio. Mientras, se observa un aumento sostenido en la proporción de silicio.

Esta lámina también contiene circonio, mientras el rubidio aumenta levemente, respecto al descenso abrupto de bromo y vanadio.

La muestra F237 contiene tanto la capa potente anterior, así como la siguiente de 2 mm de espesor, de color 5YR2/2 y que se encuentra acuñada hasta el centro del testigo.

El contenido de calcio aumenta, de un 8,974% hasta 11,008%, y la de hierro disminuye desde 7,098% hasta 5,395%. Además, contiene zinc, circonio y tántalo, con una concentración en torno al promedio, equivalente a 0,016%, 0,017% y 0,207% respectivamente. Los demás elementos mantienen un comportamiento oscilatorio, de amplitud muy baja.



Gráfica 0-4 Distribución elementos traza Unidad I

Le sigue una lámina de 5 mm, color 5YR5/6, de arcilla limosa, sin estructuras, en la que aumenta levemente el contenido de zinc, circonio y tántalo. El tamaño promedio de grano aumenta a 45 μm , con buena selección.

Luego vienen 2 láminas de 1 mm, de textura arcillo-limosa, con aspecto masivo, que inician un aumento sostenido de calcio, azufre, manganeso y estroncio, y la consecuente disminución sostenida de silicio, durante los siguientes 13 mm.

Luego se deposita una capa de 9 mm, de textura arcilla limosa, de aspecto masivo, color 10YR4/2. En ésta el contenido de calcio alcanza 13,441%, mientras el aluminio, el potasio y el hierro, se mantienen respecto a los tramos anteriores. Por otra parte, el cobre reaparece, con 0,033%. La granulometría indica un tamaño promedio en torno a 50 μm , y una selección, que, si bien es peor que el de la capa anterior, continúa siendo buena.

En los siguientes 6 mm el calcio aumenta a 21,204% y el silicio desciende hasta 59,341%. El estroncio y el bromo, al igual que el calcio, aumentan sostenidamente hasta este punto. La granulometría respecto a la capa anterior se mantiene.

Posterior a esta, se deposita una fina lámina, de 2 mm de espesor con textura limo-arcillosa, de aspecto masivo, acuñado hacia el centro.

Siguen 2 capas, de 2 y 1 mm de espesor, y que presentan bordes nítidos, y un tamaño promedio de grano por sobre los 50 μm . Estas láminas presentan una concentración de calcio equivalente a 21,854%, con un contenido de silicio igual a 58,362%, y un descenso en la concentración de hierro a 5,361%.

En contacto nítido y regular, sigue una intercalación de 3 tipos de sedimentos, cuya potencia total es de 21 mm:

1. Lámina de 1,5 mm de espesor, de textura limo-arcillosa, color 5YR2/2.
2. 2 mm de espesor, de textura arcillo-limosa, color 10YR6/6.

3. 7 mm de espesor, de textura arcillo-limosa, color 5YR5/6.
4. 1 mm de espesor, de textura limo-arcillosa, color 5YR2/2.
5. 2 mm de espesor, de textura arcillo-limosa, color 10YR6/6.
6. 6 mm de espesor, textura arcillo-limosa, color 5YR5/6.

La muestra F232. comprende la dos primeras láminas, y parte de la segunda. En éstas se observa un descenso en el contenido de calcio a 11,966%, y un aumento de silicio a 61,192%. El hierro se mantiene respecto a la muestra anterior.

La particularidad de estas láminas es su contenido de magnesio, equivalente a 6,214%, motivo por el que la variación de los demás elementos no tiene la misma amplitud que tuvo la de calcio.

La siguiente muestra abarca, tanto la capa de 7 mm, como la siguiente de 1 mm. En éstas se observa un aumento brusco de la concentración de calcio llegando a componer el 21,294%, mientras el hierro también aumenta a 7,887%.

La muestra F230 abarca la penúltima lámina, y una porción de la última, de la intercalación mencionada. En ésta se observa el máximo de calcio de todo el testigo, con 22,798%, mientras el silicio alcanza el mínimo de este tramo con 53,667%. El hierro desciende nuevamente a 6,969%, mientras el circonio aparece con una concentración por debajo del promedio con 0,015%.

La siguiente muestra cubre en su totalidad a la lámina de 6 mm, donde se observa un descenso en el contenido de calcio, a un 18,474%. Tanto el silicio como el aluminio aumentan en el orden de un 2%, mientras el hierro mantiene una concentración similar.

En ésta el circonio vuelve a presentarse con 0,018%, en conjunto con el tántalo, que lo hace con 0,231%.

Posteriormente, deposita una capa de 3 mm de espesor, con aspecto masivo, color N8, de techo regular y nítido. Ésta presenta un tamaño promedio de grano de 22 μm , y se observa un descenso de calcio a 13,354%, mientras el silicio alcanza un 62,592%.

Tanto el hierro como el aluminio se mantienen respecto a la muestra anterior, además de elevar el contenido de circonio a 0,029%.

Siguen 4 mm de sedimento de color 5YR5/6. Ésta presenta una lámina discontinua de 0,5 mm de espesor, de textura limo-arcillosa, color 5Y3/2. Tanto la base como el techo, de la capa principal y de la lámina discontinua corresponden a bordes nítidos.

Esta capa, presenta una granulometría equivalente a 129 μm . El contenido de calcio vuelve a aumentar a un 15,447%.

Luego, se presenta una intercalación de 2 tipos de sedimentos, con contactos nítidos entre sí, que es interrumpida por una lámina discontinua, a los 3,2 mm de la intercalación, la que presenta 17 mm de potencia total:

1. 5 mm de espesor, textura arcillo-limosa, color 10YR4/2.
2. 0,2 mm de espesor, textura limo-arcillosa, color 5YR2/2.
3. 3 mm de espesor máximo, se acuña junto la lámina siguiente, alcanzando el borde del testigo con un espesor de 0,6 mm, compuesta por sedimento arcillo-limoso, color 10YR4/2.
4. Interrupción de lámina acuñada hacia el centro del testigo, de espesor máximo de 0.3 mm de textura arcillo-limosa, color 5YR5/6
5. 1 mm de espesor, textura limo arcilloso, color 5YR5/6.
6. 2 mm de espesor, textura arcillo-limosa, color 10YR4/2.
7. 0,5 mm de espesor, textura limo arcilloso, color 5YR2/2.
8. 2 mm de espesor, textura arcillo-limosa, color 10YR4/2.
9. 1 mm de espesor, textura limo arcilloso, color 5YR2/2.
10. 2 mm de espesor, textura arcillo-limosa, color 10YR4/2

El contenido de silicio y aluminio es oscilatorio en toda la intercalación, con tendencia a aumentar, asimismo el calcio, con tendencia a disminuir.

Se observa circonio y asociado a aquellas muestras donde el contenido de aluminio es más alto, acompañado de zinc en las últimas 2 muestras.

La granulometría de las láminas es más o menos uniforme, en torno a los 40 μm .

Respecto al titanio, esta unidad se mantiene oscilante, aunque estable en torno a 0,65%. Las concentraciones de potasio y azufre son oscilatorias, y van superponiéndose una con la otra. En aquellas donde aumentan las concentraciones de calcio, el azufre tiende a aumentar, mientras que aquellas más enriquecidas en aluminio, presentan mayor contenido de potasio.

El vanadio, se comporta de manera independiente al resto de los elementos, con cierta estabilidad, que sólo se rompe con el primer *peak* de bromo.

En cuanto al manganeso, presenta una respuesta tardía y mucho más leve que el estroncio, frente a la variación de calcio.

Unidad II

Inicia con una capa potente de 15 mm de color 5R6/2, que presenta restos orgánicos, en la base de esta capa, lo que explicaría un tamaño medio de grano superior a 150 μm , y en

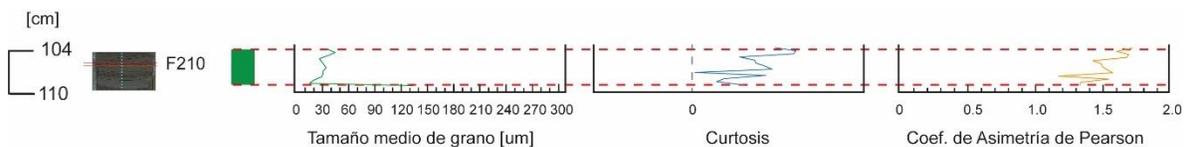
consecuencia un alto coeficiente de desviación estándar, además de curtosis negativa, lo que implica mala selección. El coeficiente de asimetría demuestra que existe una mayor cantidad de valores inferiores a la media, que superiores.

Hacia el resto de la capa se observa un descenso en el tamaño, hasta 30 μm , con una mejora en la selección.

Presenta un contenido de silicio equivalente a 62,437%, sumado a un descenso leve en el contenido de aluminio, desde 19,066% a 17,649% en el techo. Asimismo, se observa también, un aumento leve pero progresivo de calcio, desde 3,524% a 4,897%. El hierro disminuye desde 8,039% hasta 7,603%.

Tanto el titanio como el estroncio se comportan dentro de los márgenes del promedio del testigo. El bromo no está presente en la base de la capa, mientras si lo hace el circonio con 0,032%, seguido por zinc con 0,020% y en el techo se hace presente el tántalo, con 0,175%. Continúa con una lámina de 4 mm, de textura arcillo-limosa, color 5YR5/6, de aspecto masivo, que se observa levantada hacia uno de los bordes, dando a lugar al acuñamiento de las láminas posteriores.

Esta capa muestra un aumento en el contenido de silicio, que continúa hacia la mitad de la intercalación posterior. El aluminio desciende hasta 14,733%, evidenciando una mayor proporción de sílice biógeno, versus litogénico. El calcio aumenta a 6,921% y el hierro desciende hasta 7,542%.



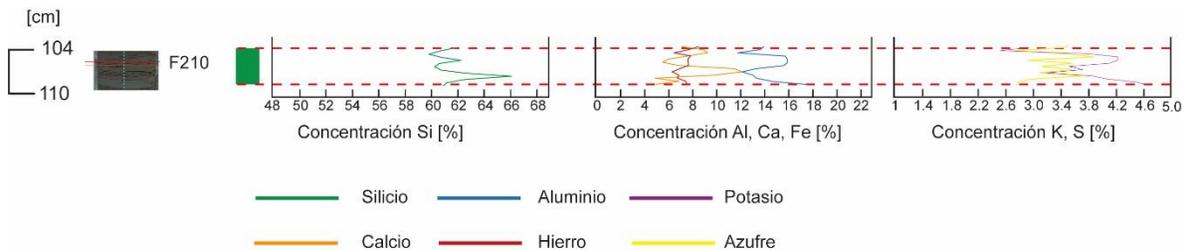
Gráfica 0-5 Granulometría Unidad II

Todos los elementos menores se mantienen dentro de su rango promedio en el testigo. Dentro de los elementos traza, tanto el zinc como el circonio forman parte de la muestra contenedora de esta capa.

Luego se deposita una intercalación de potencia total 6 mm, en el siguiente orden:

1. 1 mm de espesor, textura limo-arcillosa, color 5YR2/2, acuñada hacia el borde del testigo.
2. 1 mm de espesor, textura limo-limosa, color 5YR5/6, acuñada en la misma dirección que la lámina anterior.
3. 1 mm de espesor, textura limo-arcillosa, color 5YR2/2.
4. 1 mm de espesor, textura arcillosa, color 5R6/2.
5. 1 mm de espesor, textura arcillo-limosa, color 5YR5/6.

6. 1 mm de espesor, textura arcillosa, color 5R6/2.



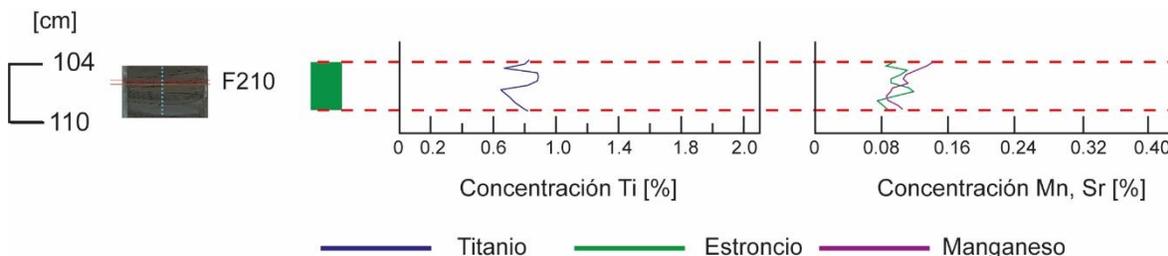
Gráfica 0-6 Distribución elementos mayores Unidad II

En la muestra F214, que contiene al menos las primeras 3 láminas (parte de las adyacentes), se observa el *peak* de silicio en esta unidad, alcanzando 66,179%, con un aluminio que disminuye hasta 13,399%. El tamaño promedio de grano es 33 μm y con buena selección.

El contenido de calcio disminuye a 4,985%, mientras el hierro alcanza 6,811%. Se vuelve a presentar el zinc con 0,018%.

A continuación, el ejemplar F213 contiene las 3 últimas láminas, sumado a un pequeño segmento de la capa superior. Ésta presenta las mismas características granulométricas que la anterior.

El contenido de silicio disminuye junto al del aluminio a 62,673% y 13,078% respectivamente. El calcio, alcanza el porcentaje de 9,941%, mientras el hierro se mantiene.



Gráfica 0-7 Distribución elementos menores Unidad II

La siguiente capa, tiene 10,5 mm de espesor, textura arcillo-limosa, color 5YR5/6. interrumpida por una lámina discontinua de 1 mm de espesor, de textura arcillo-limosa, color 10YR6/6. Su techo y su base se presentan como contactos nítidos.

El tamaño promedio de grano de esta capa es de 35 μm con buena selección. El contenido de aluminio es levemente más alto en la muestra que contiene la lámina discontinua, presentando 13,381%, mientras el resto de la capa contendría 12,191%, de este elemento. La proporción que ocupa el silicio en ambas muestras es muy similar, en torno a 60,568%.

En esta capa, el calcio continúa con el aumento progresivo alcanzando 12,221%. El hierro se mantiene en el mismo orden, en torno al 6,700%.

Tanto el azufre como el potasio alcanzan valores similares, atribuyéndose una dependencia relativa, del azufre respecto al calcio, y el potasio respecto al aluminio.

Tanto el manganeso como el estroncio responden al comportamiento del calcio, el segundo con mayor intensidad que el primero. Asimismo, el titanio se corresponde en su comportamiento con el hierro.

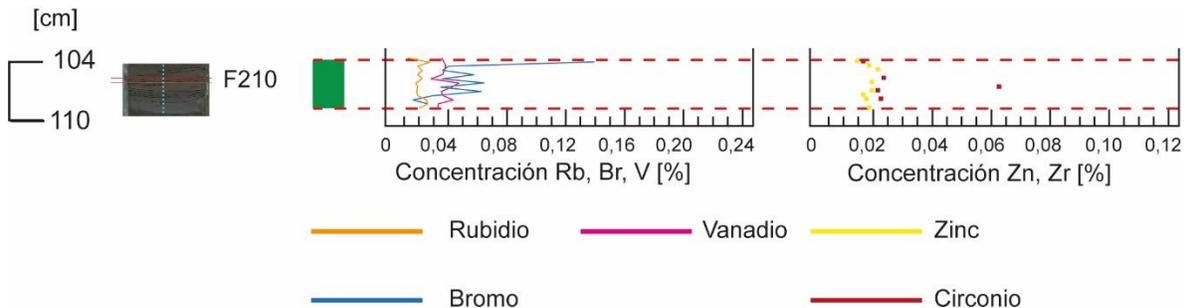
Respecto a los elementos traza, el zinc y el circonio están presentes en la capa con 0,021% y 0,064%, respectivamente.

Posteriormente, se deposita una lámina de 1,5 mm de espesor, con textura limo-arcillosa, color 5YR2/2, de borde nítido en el techo. Que se encuentra totalmente incluida en la muestra F210, la que también incluye parte de las capas adyacentes.

La siguiente capa corresponde a la base del acuñamiento, de las láminas posteriores, con 10 mm de espesor máximo, y 2 mm de espesor mínimo, color 5YR5/6.

Finalmente se depositan 2 láminas, una muy delgada y discontinua, que inicia en la base del borde más angosto de la capa posterior.

La última capa, se encuentra acuñada, con 13 mm de potencia mínimo y 19 mm de potencia máximo, por lo que las 2 últimas muestras de esta unidad comprenden las 3 últimas láminas señaladas.



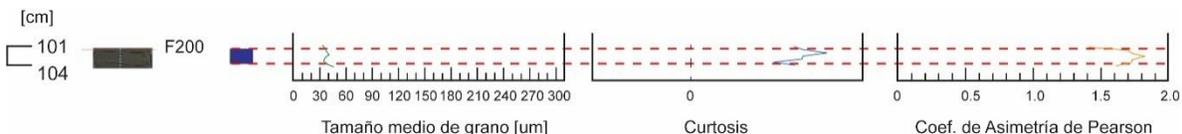
Gráfica 0-8 Distribución elementos traza Unidad II

El contenido de aluminio aumenta a 16,011%, con un contenido de silicio estable respecto a las capas anteriores. El calcio disminuye hasta 5,575%, mientras el hierro aumenta hasta 7,739%.

El potasio vuelve a distanciarse del azufre, y los elementos menores continúan con el comportamiento similar respecto al hierro y el calcio.

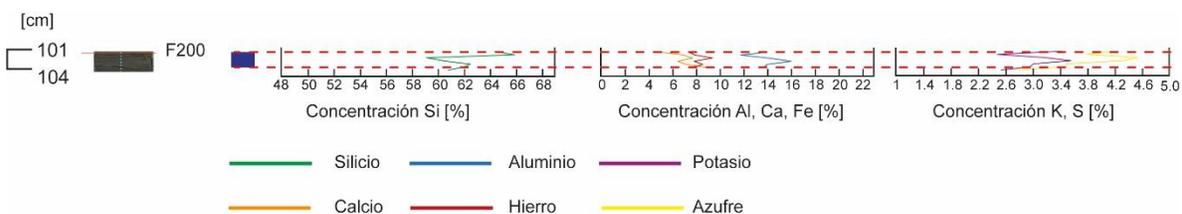
Unidad III

Inicia con una capa acuñada hacia el centro del testigo, con 4 mm máximo de espesor, de color 10YR6/6. La muestra F207, representativa tanto de esta lámina como la que sigue, tiene un tamaño medio de grano equivalente a 47 μm .



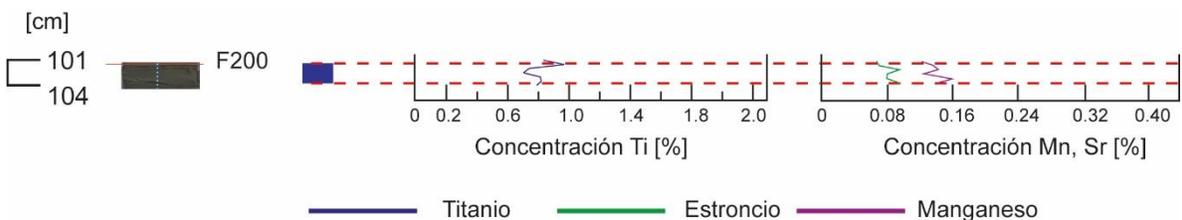
Gráfica 0-9 Granulometría Unidad III

Continúa después, una serie de muestras muy similares en sus características cuantitativas, gracias a la siguiente lámina de 28,5 mm de espesor, color 5YR5/6, que presenta un tamaño medio de grano equivalente a 37 μm , con buena selección. En la base de esta capa, se observa un elemento mayor anómalo en este testigo, correspondiente al magnesio, con una concentración de 5,263%.



Gráfica 0-10 Distribución elementos mayores Unidad III

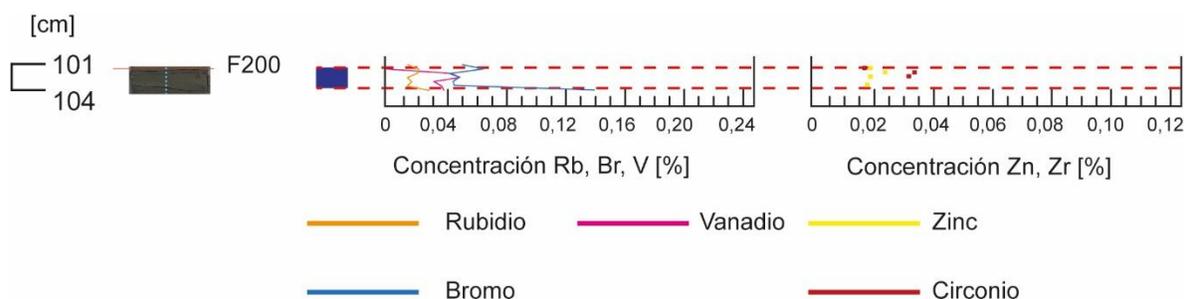
Los contenidos de silicio, aluminio, hierro, potasio, titanio y manganeso aumentan progresivamente en esta capa. El hierro lo hace desde 6,525% hasta 8,604%, siendo la concentración de hierro más elevada hasta esta altura.



Gráfica 0-11 Distribución elementos menores Unidad III

El calcio, por su parte disminuye hacia el techo, desde 9.351% hasta 7.154%.

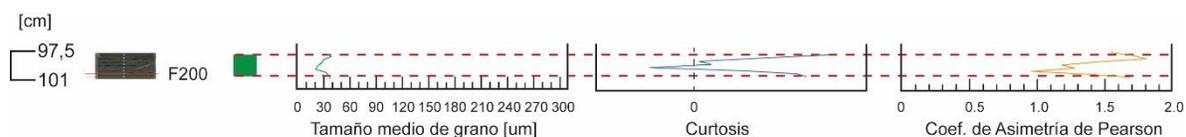
Finaliza con una lámina de 1 mm de espesor, con sedimento arcillo-limoso, color 10YR6/6, sin estructuras visibles, que se asocia parcialmente a la muestra F203. que presenta las características de la capa anterior.



Gráfica 0-12 Distribución elementos traza Unidad III

Unidad IV

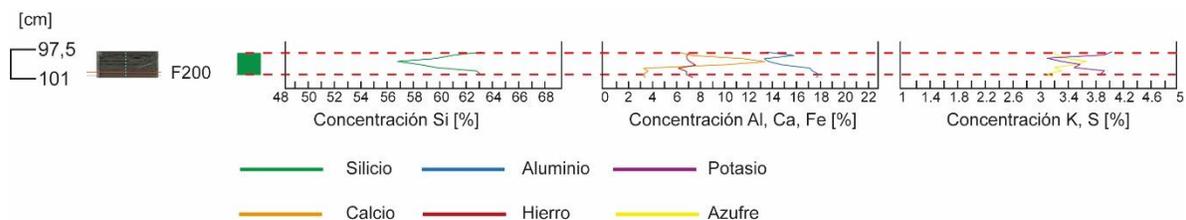
Inicia con 5 mm de sedimento color 5YR2/2, que presenta estructura lenticular de arcilla, de dimensiones 0,5 mm x 0,5 mm. Presenta un tamaño medio de grano de 38 μm , y las características más representativas son, la elevada concentración de hierro, que alcanza en esta muestra correspondiente a 9,411%, y el contenido de bario, equivalente a 0,777%. Continúa sedimentándose una capa de 7 mm, cuyo tamaño medio de grano es de 37 μm . Se compone por 65,928% de silicio, 11,812% de aluminio, 6,959% de calcio, 7,922% de hierro. La relación Si/Al, es alta, lo que, sumado al contenido más alto de hierro, sugiere una componente biogénica importante en estas capas.



Gráfica 0-13 Granulometría Unidad IV

Por otra parte, reaparece el cobre con 0,033%, además de zinc y circonio, con 0,002% para ambos.

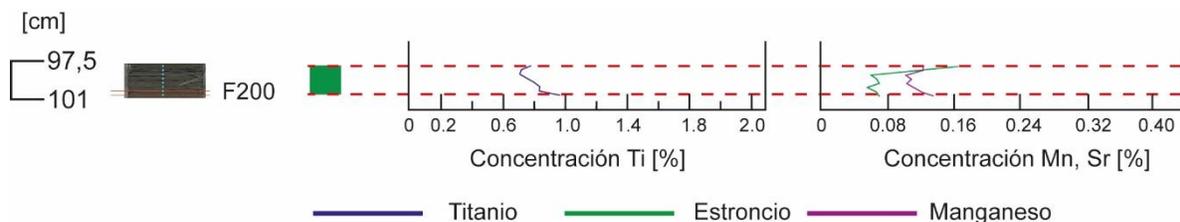
Continúa la deposición de una lámina de 4 mm, color 10YR4/2, que presenta estructura lenticular de arcilla.



Gráfica 0-14 Distribución elementos mayores Unidad IV

La muestra F200 contiene las dos láminas anteriores, presentando un tamaño medio de grano de 33µm. En ésta se observa un aumento en el contenido de aluminio, no obstante, la relación Si/Al sigue siendo alta.

La proporción de calcio desciende progresivamente desde el inicio de esta unidad, llegando a 4,724% en esta capa. Asimismo, el hierro, que alcanza 7,393% en la muestra. También se detecta un pequeño contenido de molibdeno, equivalente a 0,008%.

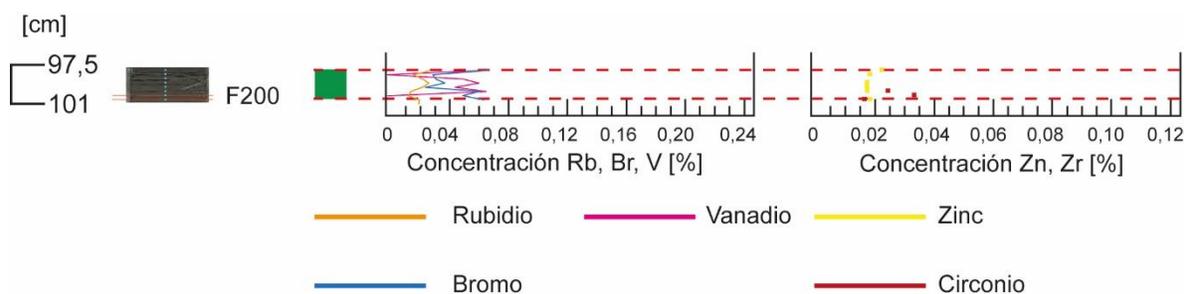


Gráfica 0-15 Distribución elementos menores Unidad IV

Luego, se depositan 8 mm de sedimento color 5YR2/2. que se ve afectada por lo que correspondería a una inyección de fluidos.

La muestra F199 y F198 representan por lo tanto el sedimento proveniente de la capa posterior, así como el correspondiente a la última lámina descrita. Ésta exhibe un tamaño promedio de grano de 22 µm, con buena selección. Continúa en aumento el contenido de aluminio hasta llegar a 18,091%, con la razón Si/Al más baja de esta unidad.

Del mismo modo, el calcio disminuye hasta 3,415%, mientras el hierro se mantiene en 7,011%.



Gráfica 0-16 Distribución elementos traza Unidad IV

El potasio por su parte, no se alcanza a medir en la muestra F199 para luego en la muestra F198 presentarse el contenido de titanio más alto de la unidad con 0,976%. A estas características se les agrega el contenido de zinc y circonio equivalente a 0,019% y 0,026%, respectivamente.

Siguen 8 mm de sedimento cuyo tamaño y muestra el color 5YR5/6. Esta presenta una lámina discontinua, de 1 mm de espesor, de color 5YR8/1. Este mismo sedimento, se encuentra en el otro borde, plegada, afectando las capas más antiguas, sugiriendo una inyección de fluidos.

Las muestras F197 y F196 contienen casi en totalidad la última capa junto a la estructura sugerente de inyección de fluidos. El tamaño medio del grano es de 29 μm , con buena selección.

En éstas se observa una disminución gradual del contenido de aluminio hasta 17,322%, junto al silicio que disminuye hasta 60,029% en la muestra F196. La última muestra mencionada, también contiene 5,141% de magnesio.

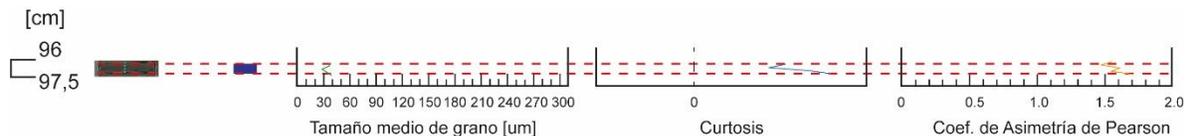
En promedio esta capa junto a las estructuras, presentan 3,656% de calcio, 6,670% de hierro.

Unidad V

Inicia con una intercalación, cuya potencia total equivale a 15 mm, compuesta por 5 láminas, de 2 tipos de sedimentos:

- Sedimento arcilla-limosa, color 5Y3/2: 2 mm de espesor en la lámina basal, 1 mm en la lámina intermedia y 9 mm en la última lámina.
- Sedimento arcilla, color 5YR8/1: ocupa la segunda y cuarta capa, en las que presenta sólo 1 mm de espesor.

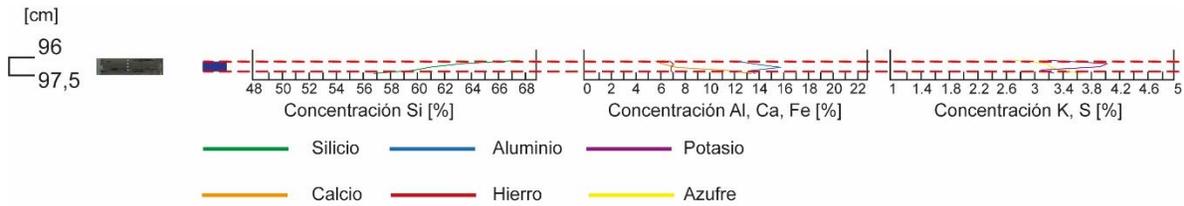
Las muestras F195-193 contienen la intercalación completa, siendo la F195 representativa de ambos tipos de sedimento, mientras las dos siguientes representan al primer sedimento descrito.



Gráfica 0-17 Granulometría Unidad V

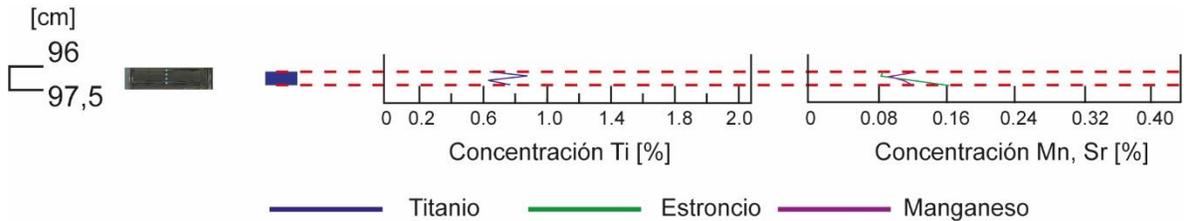
La granulometría en esta unidad muestra un descenso progresivo del tamaño medio de grano desde 40 μm hasta 29 μm , junto a la consiguiente mejora en la selección.

El silicio se mantiene en torno a 58,504% en esta unidad, mientras el aluminio lo hace en 14,163%.



Gráfica 0-18 Distribución elementos mayores Unidad V

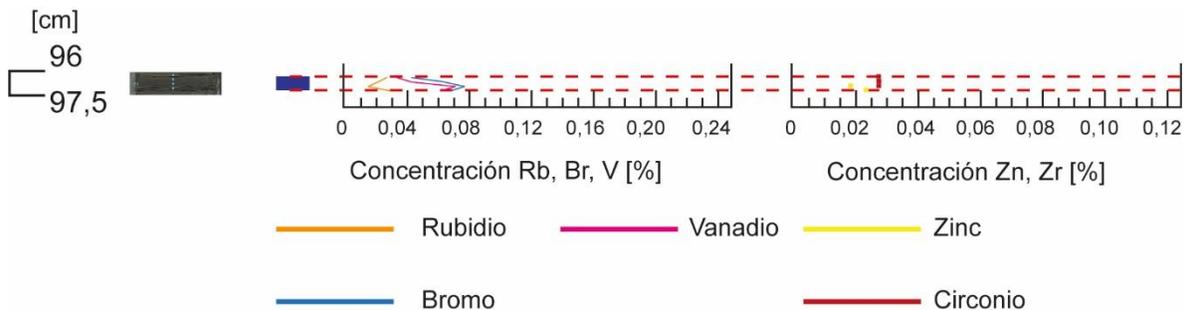
El calcio marca la diferencia entre un sedimento y otro, evidenciando un mayor contenido de calcio en el primer sedimento descrito en torno al 12,746%, mientras en la muestra F195. representa un 10,023%.



Gráfica 0-19 Distribución elementos menores Unidad V

El hierro es otro elemento que disminuye de manera gradual, desde 7,781% hasta 7,064% en el techo de la unidad. Al mismo tiempo, el contenido de titanio aumenta gradualmente desde 0,716% hasta 0,788%.

El segundo sedimento descrito, sería el que probablemente contenga cobre, ya que sólo se presenta en la muestra F195 con 0,028%, mientras el zinc está presente en la totalidad de la unidad con un promedio de $0,021 \pm 0,002\%$.

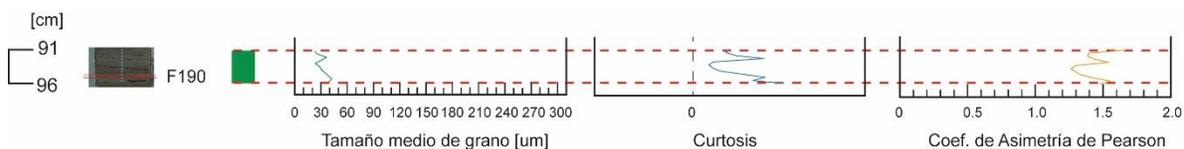


Gráfica 0-20 Distribución elementos traza Unidad V

Unidad VI

Inicia con una capa de 15 mm de espesor y de color 10YR4/2, que muestra una estructura lenticular de 25 mm de ancho y 1 mm de alto, que presenta color 5R2/2.

Esta capa muestra un aumento leve y progresivo en el tamaño medio de grano, hacia el techo, desde 37 μm hasta 42 μm , con buena selección.



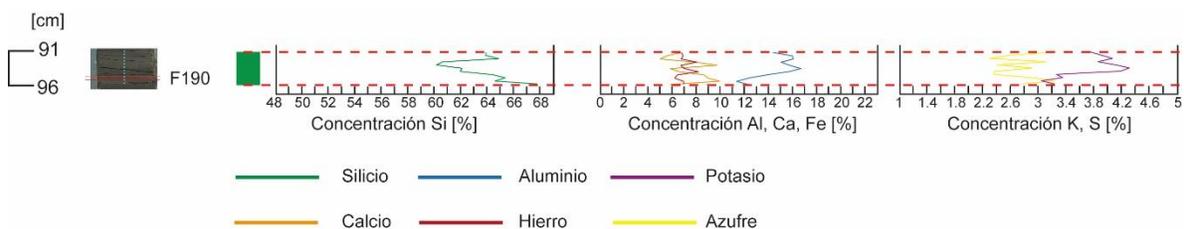
Gráfica 0-21 Granulometría Unidad VI

El silicio es el único elemento que también presenta un aumento en su contenido hacia el techo desde 61,774% hasta 67,755%.

Tanto el contenido de aluminio como el de calcio, disminuyen hacia el techo, con 15,974% hasta 12,255%, y desde 7,578% hasta 5,793%, respectivamente.

En el centímetro basal de la capa, el hierro se mantiene en torno a 7,014%, mientras en los 5 mm restantes disminuye a 6,943%. Lo mismo sucede con el potasio y el azufre, que se mantienen en 4,001% y 3,241%, respectivamente, y en los últimos 5 mm disminuyen a 3,232% y 2,749% respectivamente.

El titanio a diferencia de los demás elementos presenta una alta concentración en la muestra central de esta capa con 0,898% y en las otras muestras mantiene un contenido de titanio en torno a 0,658%.



Gráfica 0-22 Distribución elementos mayores Unidad VI

Respecto a los elementos anómalos, se detectó cobre y cesio en la base de la capa, con 0,021% y 0,336%, respectivamente. El circonio se detecta en toda la capa, promediando 0,031%, mientras el tántalo se localiza en el centímetro superior de la capa con 0,226%.

La siguiente capa presenta espesor variable, y en su techo tiene contacto con una lámina parcialmente erosionada, que mediante observación del color (10YR6/6), se corresponde

en el tipo de sedimento de la pequeña estructura lenticular presente hacia la base de esta capa.

La muestra F189 representa parcialmente a la capa inicial de esta unidad, más la recién mencionada. Esta muestra presenta un tamaño promedio de grano de 38 μm con buena selección. El contenido de silicio y de aluminio, disminuyen respecto a la capa anterior, a 64,452% y 11,302%, respectivamente.

La proporción de calcio es más alta en esta muestra alcanzando 9,898%, asimismo el estroncio y el bromo, que pasan de 0,074% a 0,100% y 0,051% a 0,072%.

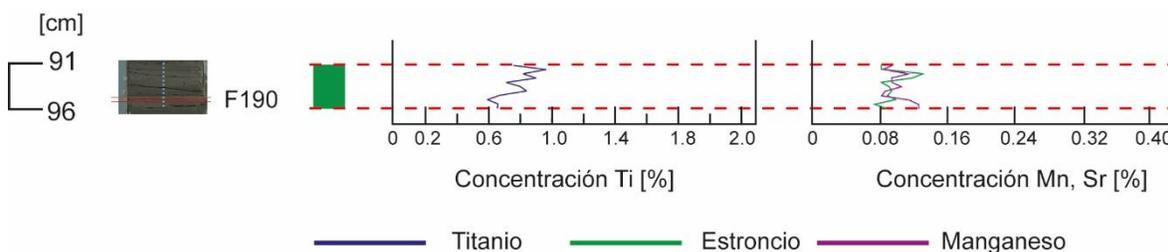
Se detecta cobre, zinc y circonio, con 0,030%, 0,021% y 0,017%.

El ejemplar F188 representa parte de la capa anterior, junto a un segmento de la lámina erosionada. El contenido de silicio y aluminio descienden en el orden de un 1% respecto a la muestra anterior, y en el mismo orden, el contenido de calcio aumenta.

El hierro desciende desde 6,908% a 6,149%, el potasio aumenta desde 3,041% a 3,343%, de la misma forma el azufre pasa de 3,227% a 2,879%.

El titanio baja hasta 0,599%, asimismo el manganeso y el estroncio que descienden desde 0,115% y 0,100% hasta 0,082% y 0,087%.

Respecto a los elementos traza y anómalos en el testigo, se detecta circonio y tántalo, con 0,031% y 0,224%.



Gráfica 0-23 Distribución elementos menores Unidad VI

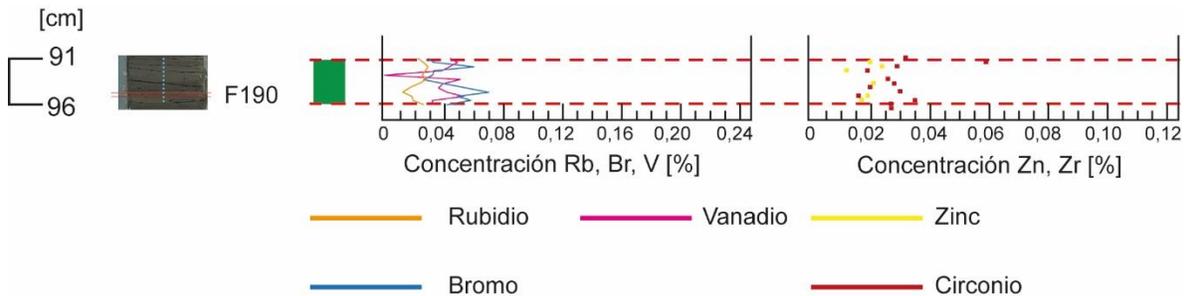
La capa siguiente consiste en 12 mm de sedimento color 5YR5/6. Está representada por las muestras F187-185. Presenta consistencia en su granulometría con 29 μm de tamaño promedio de grano, con buena selección.

El contenido de silicio disminuye, alcanzando 61,922% de la muestra, al igual que el calcio, elemento que alcanza 6,548%.

Tanto el aluminio como el hierro aumentan, hasta 15,607% y 8,124%, respectivamente. El contenido de potasio aumenta desde 3,257% hasta 4,177%, mientras el azufre se mantiene en 2,348%.

El titanio aumenta de la base al techo, alcanzando 0,851%, mientras la variabilidad del manganeso y el estroncio es casi nula.

Respecto a los elementos traza, éstos se mantienen dentro el promedio total del testigo, mientras los elementos anómalos, muestran que en el techo de la capa se detecta cobre con 0,044%, zinc con 0,022%, y circonio, que está presente en toda la capa con 0,025%. En la base, además, se tiene la presencia de tántalo, con 0,285%. A continuación, se depositan 5,5 mm de sedimento color 10R6/2. con un tamaño promedio de grano equivalente a 23 μm , con buena selección.



Gráfica 0-24 Distribución elementos traza Unidad VI

Tanto el silicio como el aluminio aumentan de manera leve a 62,091% y 16,623%, mientras el contenido de calcio y de hierro disminuyen a 5,813% y 6,953%.

El titanio alcanza a componer 0.809% de la muestra representativa de esta capa. Los elementos traza oscilan alrededor del promedio del testigo, y dentro de los anómalos, se detecta circonio y tántalo con 0,027% y 0,242%, respectivamente.

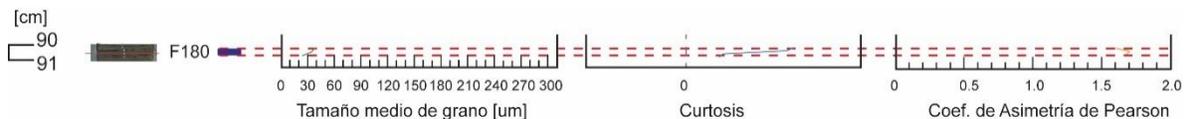
Esta unidad finaliza con 6 mm de sedimento color 5R4/2, representados por la muestra F183 y parcialmente la F182

Se observa un descenso en el contenido de aluminio y potasio, mientras el hierro alcanza un 8,021% de la muestra y el titanio lo hace con 0,910%.

En cuanto a los elementos anómalos, el zinc y el circonio se hacen presentes con 0,013% y 0,021%, respectivamente.

Unidad VII

Sigue una lámina de 2 mm de sedimento color 10YR6/6, que forma parte de la muestra F182, cuya granulometría indica un tamaño promedio de grano de 26 μm .



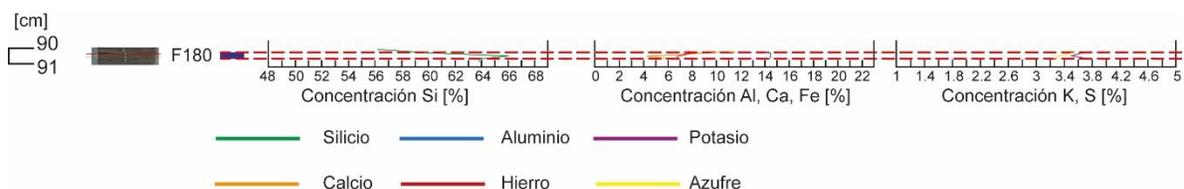
Gráfica 0-25 Granulometría Unidad VII

Luego, se deposita una lámina de espesor variable, entre 7 y 9 mm, conformada por sedimento color 5YR3/2. Esta capa está representada por las muestras F181-180.

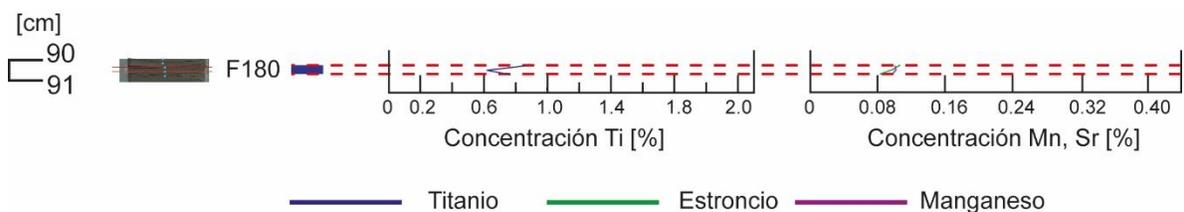
La granulometría correspondiente a este sedimento es equivalente a 22 μm , con buena selección.

Se compone por 63,843% de silicio y 6,762% de hierro. Presenta un contenido de aluminio que aumenta hacia el techo, desde 16,006% hasta 14,332%, junto con el calcio que pasa desde 4,946% hasta 6,687%.

El titanio alcanza el *peak* de esta unidad, en la muestra central de esta capa, con 0,974%. También en esta muestra, se detecta 0,052% de cobre, 0,021% de zinc y 0,060% de circonio.



Gráfica 0-26 Distribución elementos mayores Unidad VII



Gráfica 0-27 Distribución elementos menores Unidad VII

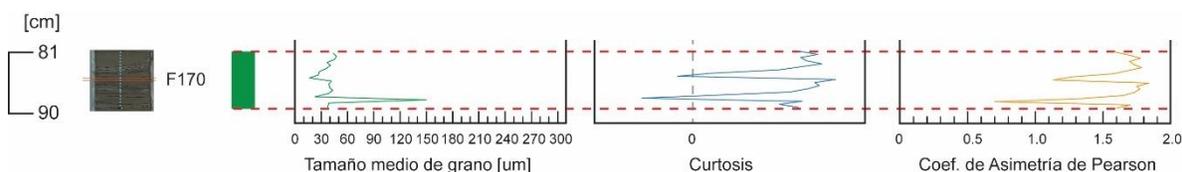


Gráfica 0-28 Distribución elementos traza Unidad VII

Unidad VIII

Esta unidad inicia con 2 mm de sedimento color 5R6/2, que se acuña hacia el centro del testigo. Ésta forma parte de una mínima porción de la muestra F179.

Continúa inmediatamente, una capa de espesor variable entre 2 y 5 mm, color 5YR8/1, que está representada casi en su totalidad por la F179. Ésta presenta un tamaño promedio de grano equivalente a 37 μm , con una buena selección.



Gráfica 0-29 Granulometría Unidad VIII

Su contenido de silicio es de 66,071%, el de aluminio equivale a 14,520%, mientras el hierro y el calcio se encuentran bajo el promedio total del testigo, con 6,794% y 4,304%, respectivamente.

Tanto el titanio como el manganeso y el estroncio se mantienen dentro del promedio. Respecto a los elementos anómalos, se detecta: cobre con 0,036%, zinc con 0,025%, circonio con 0,035% y bario con 0,448%.

Luego se deposita una capa de 13 mm de sedimento color 5YR3/2. Está representada por las muestras F178 hasta F176, en las que se observa una disminución importante en el contenido de silicio hasta 56,196%, al igual que el aluminio hasta 12,339%.

El calcio aumenta, alcanzando su máximo en la muestra intermedia (F177) con 16,334%, mientras el hierro lo hace en la muestra F176, de la que forma parte en un 12,866%.

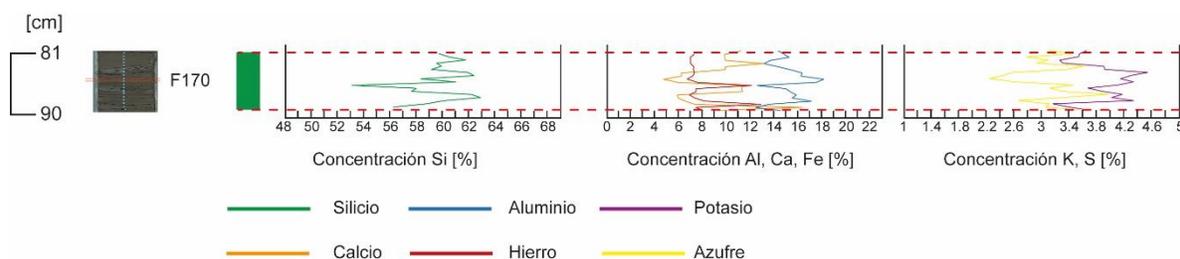
El titanio, alcanza su máximo en la F178, con 0,866%, disminuyendo su concentración hacia el techo, alcanzando en la F176 una concentración equivalente a 0,629%.

El estroncio presenta un comportamiento similar al calcio, con su máximo en la F177. con 0,195%. El manganeso por su parte disminuye desde 0,133% hasta 0,088% hacia el techo. Se percibe un primer aumento importante en el bromo en la muestra F177 con 0,076%.

Se detecta, además, zinc, circonio y tántalo, en las concentraciones: 0,021% 0,031% y 0,242%, respectivamente.

En cuanto a la granulometría, ésta aumenta hacia el techo alcanzando un tamaño promedio de grano equivalente a 151 μm , con selección de regular a mala, en el ejemplar F176.

Continúan 6 mm de sedimento color 5YR5/6 con un tamaño promedio de grano de 23 μm y muy buena selección.



Gráfica 0-30 Distribución elementos mayores Unidad VIII

Aumenta levemente el contenido de silicio hasta 60,067%, mientras el aluminio lo hace en mayor medida hasta 17,078%. Además, el calcio alcanza una proporción de 6,541%, mientras el hierro lo hace en 8,148%.

El potasio se distancia del azufre con 4,331% respecto a 2,658%. El titanio vuelve a elevarse hasta 0,871%. Los demás elementos se mantienen dentro de los márgenes promedio del testigo, sin detectarse ninguna anomalía.

A continuación, se observa una capa de 28 mm de sedimento, color 5Y3/2, en la que se observa una fuerte deformación.

Las estructuras que se observan corresponden a 2 láminas discontinuas, y lentes correspondientes a los sedimentos que conforman ambas láminas.

Las muestras F173 y F174 son representativas de las láminas discontinuas y las estructuras lenticulares. De acuerdo con esto, la composición de ambas láminas es: 62,475% de silicio, 15,645% de aluminio, 5,897% de calcio, 7,110% de hierro, 4,096% de potasio, 3,624% de azufre, 0,744% de titanio, 0,101% de manganeso y 0,096% de estroncio. Detectándose sólo un elemento anómalo correspondiente al circonio con 0,052%.

Las siguientes 3 muestras representan la capa principal, donde se presenta una disminución progresiva de silicio, que llega a 53,069% en la muestra F170. Asimismo, el aluminio también desciende en su concentración hacia el techo con 12,525% en la misma muestra.

Este tramo, llama particularmente la atención, debido a que se detecta un incremento en el contenido de hierro, titanio y bromo, muy importantes. El hierro alcanza una concentración de 12,069% en la última muestra, mientras el titanio aumenta ya de manera importante en la muestra F171, donde alcanza 1,169%, alcanzando el 2,277% en la F170.

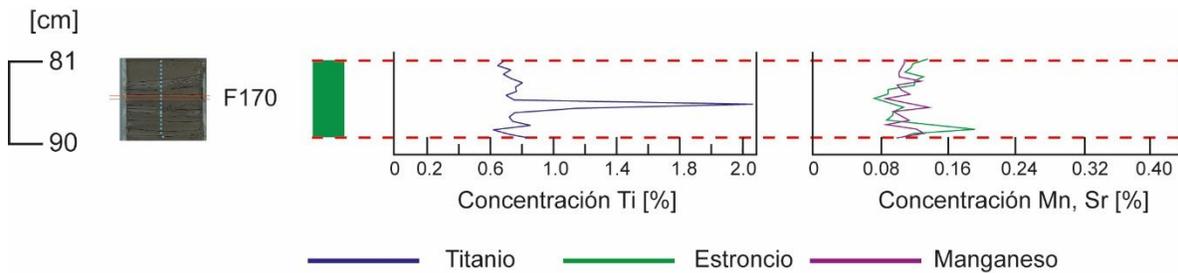
El bromo supera el 0,1% en la muestra F170, componiendo un 0,198% de ésta.

Posteriormente se depositan 10 mm de sedimento color 10YR4/2, que contiene una lámina discontinua de 1 mm, color 5YR8/1.

La muestra que contiene a la lámina discontinua presenta un tamaño medio de grano de 16 μm , exhibiendo un contenido de 18,123% de aluminio, mientras el contenido de este elemento en la muestra anterior, que contiene una porción mucho menor de la lámina, es de 17,497%. Por esta razón, la muestra F168 tiene un menor contenido de silicio que la F169, promediando entre ambas, 59,624%.

El contenido de calcio se había mantenido en el tramo anterior (F172-F170) en torno a 11,305%, mientras en esta capa desciende progresivamente de 5,609% a 4,367%.

Al igual que el calcio, el hierro desciende desde 7,586% a 6,702%. El titanio, a su vez, permanece alrededor de 0,703%, mientras, tanto el manganeso como el estroncio, están concentrados en torno 0,091%.



Gráfica 0-31 Distribución elementos menores Unidad VIII

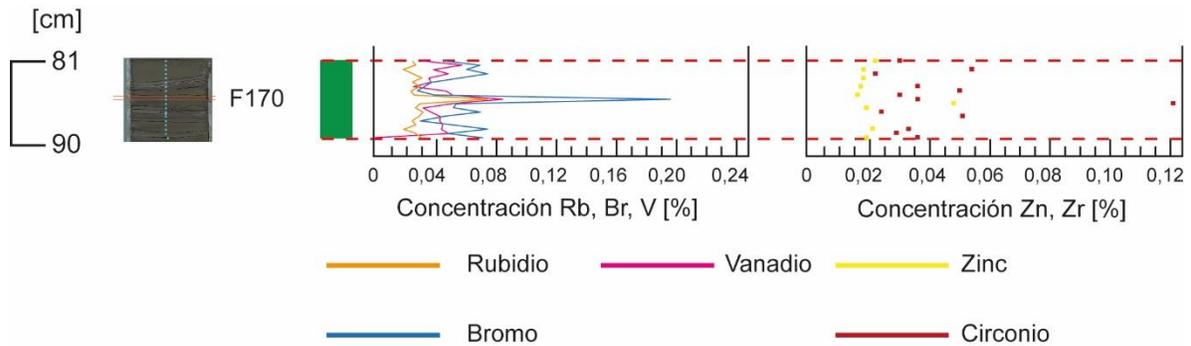
El bromo vuelve a concentrarse como en prácticamente todo el testigo, al igual que el resto de los elementos traza. Se detectaron los elementos anómalos, cobre, circonio, zinc y magnesio, cuyas concentraciones corresponden a 0,024%, 0,031%, 0,017% y 4,719%, respectivamente.

Sigue una lámina que aparentemente se encuentra erosionada, con un espesor máximo de 1,5 mm, y del mismo color que la lámina discontinua contenida en la capa anterior.

Sobre la lámina erosionada, sigue una capa de 3 mm de sedimento color 5R6/2, y ambas forman parte, principalmente de la muestra F167. Esta muestra presenta un tamaño medio de grano 28 μm , con buena selección.

El silicio aumenta en esta muestra a 62,385%, y el aluminio desciende a 16,202%. Tanto el hierro como el calcio aumentan respecto a la muestra anterior, a 7,166% y 6,226%, respectivamente. Los demás elementos se encuentran dentro del promedio.

Se detectaron 2 elementos anómalos, correspondiente al circonio con 0,051%, y tántalo con 0,174%.



Gráfica 0-32 Distribución elementos traza Unidad VIII

Al final de esta unidad, se encuentra una capa de 22 mm de sedimento color 10YR4/2, con estructuras lenticulares, que presentan el mismo color que la capa anterior.

Las muestras que representan a esta capa van desde la F166 hasta la F162. Éstas presentan en promedio un tamaño de grano equivalente a 41 μm , que es menor sólo en las muestras que contienen los lentes, donde el tamaño medio no baja de 35 μm .

Las variaciones dentro de la capa no son tan importantes, salvo por el aluminio, que aumenta de forma leve en las muestras que contienen los lentes, así como la presencia de resto orgánico en la muestra F162, muestra un alza en el contenido de calcio a 13,103%.

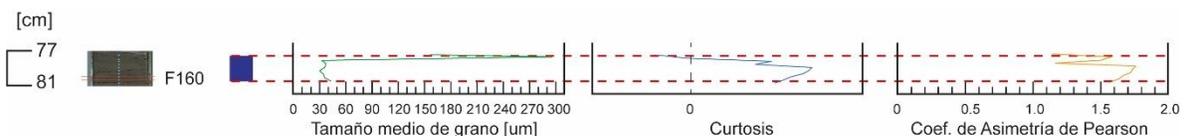
De esta manera, la capa estaría compuesta por: 60,438% de silicio, 14,549% de aluminio, 9,768% de calcio y 7,141% de hierro.

Los elementos que se presentan son el zinc, el circonio y el tántalo, concentrados en la mitad superior de la capa.

Unidad IX

Esta unidad se compone por 2 capas de gran potencia. En la base se encuentran 13,5 mm de sedimento color 5Y3/2, y sobre ella una capa de 21 mm de sedimento color 10YR4/2.

La composición granulométrica y química es similar en ambas capas, tanto el silicio como el aluminio no presentan mayores variaciones, manteniéndose en una concentración alrededor de 59,802% y 14,415%, respectivamente, con un tamaño medio de grano equivalente a 37 μm .

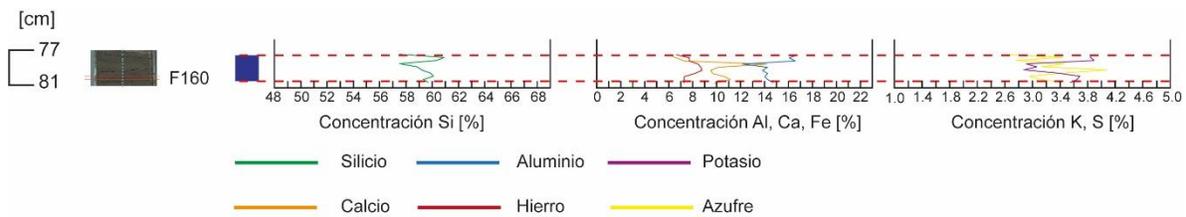


Gráfica 0-33 Granulometría Unidad IX

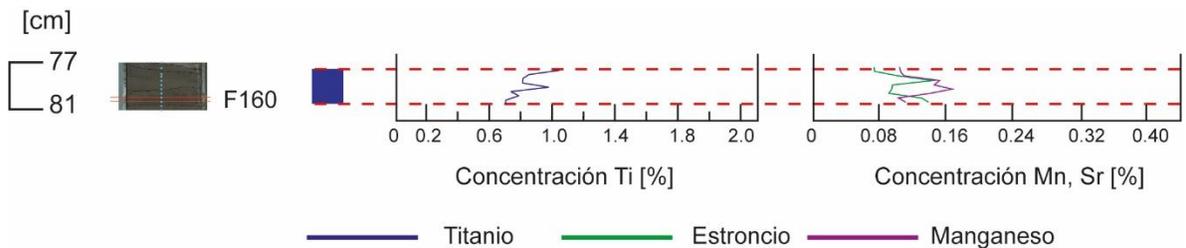
El calcio también es similar en ambas capas, no obstante, se observa una mayor concentración hacia la base de la capa de 21 mm, con 11,182%, mientras en el resto de las muestras, se mantiene en torno a 9,912%. El estroncio muestra el mismo comportamiento, alcanzando un máximo 0,138%.

El hierro, aumenta hacia el techo en ambas capas, de forma de progresiva, inicia en la base de la primera capa, con 6,945%, hasta el techo de la segunda capa, con 8,810%. El titanio muestra el mismo comportamiento, con tendencia a aumentar a través de ambas capas, desde 0,656%

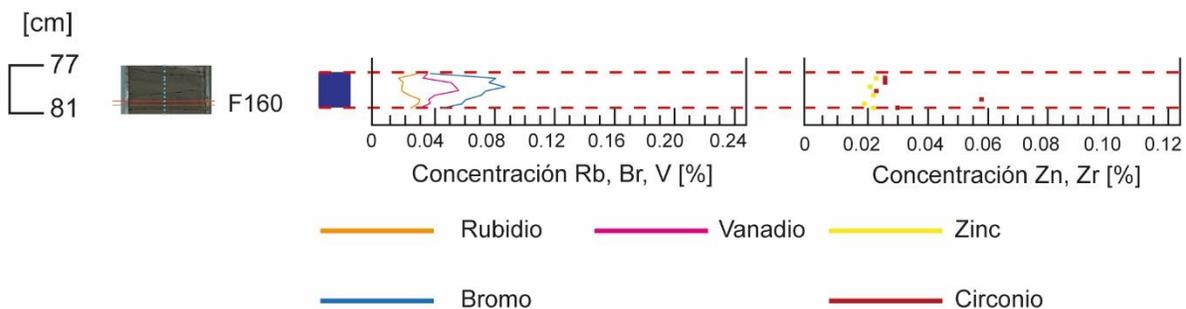
La principal diferencia entre ambas capas se encuentra en los elementos anómalos presentes. La primera, presenta zinc, circonio y tántalo, mientras en la segunda, además de ver disminuidos estos elementos en su concentración, además presenta 0,031% de cobre.



Gráfica 0-34 Distribución elementos mayores Unidad IX



Gráfica 0-35 Distribución elementos menores Unidad IX

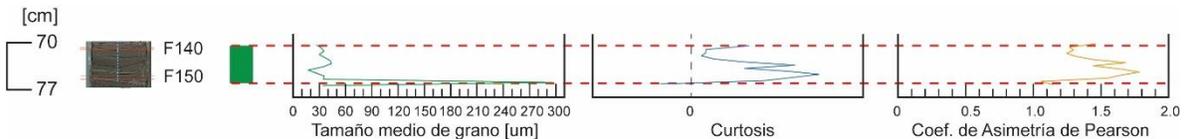


Gráfica 0-36 Distribución elementos traza Unidad IX

Unidad X

Esta unidad inicia con una capa de 10 mm, asociada a una capa de aproximadamente 4 mm, deformada en “slump”.

La primera se compone por 58,856% de silicio, 14,256% de aluminio, 10,178% de calcio y 8,709% de hierro. Su granulometría promedio es de 33 μm , con buena selección. La lámina que se encuentra deformada presenta un tamaño promedio de grano de 296 μm , con mala selección.



Gráfica 0-37 Granulometría Unidad X

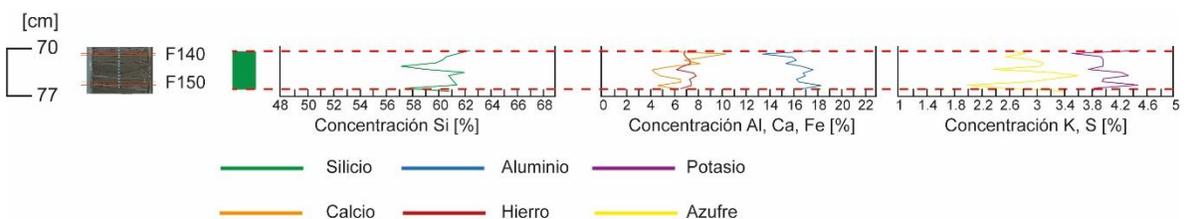
Esta última contiene un 57,543% de silicio, 12,182% de aluminio, 14,177% de calcio y 8,466% de hierro. El potasio disminuye respecto a la capa anterior, desde un 3,065% a 2,913%, mientras el azufre aumento en el mismo orden de magnitud, alcanzando una concentración de 3,457%.

El estroncio, el manganeso y el bromo, aumentaron en la segunda capa, de forma leve respecto a la anterior. En cuanto a los elementos anómalos, se detecta un 0,022% de zinc en la primera y 0,027% de circonio en la segunda.

Le sigue una lámina de 8 mm, cuya composición es de un sedimento color 10YR4/2 y cuyo tamaño promedio de grano es 32 μm , con escasos residuos orgánicos visibles.

Su composición corresponde a 59,597% de silicio, 16,489% de aluminio, 6,659% de calcio y 7,384% de hierro. El potasio aumenta nuevamente, alcanzando a componer en promedio un 3,864% de la capa, mientras el azufre vuelve a bajar hasta 2,921%.

Lo que llama la atención de esta capa, es su concentración elevada de titanio, que promedia 0,845%, y que alcanza hasta un 1,041% en la muestra que contiene esta capa en su totalidad.



Gráfica 0-38 Distribución elementos mayores Unidad X

Los elementos traza se mantienen dentro del promedio, mientras aparecen los elementos zinc, circonio, tántalo y magnesio, conformando 0,021%, 0,026%, 0,178% y 5,543%, en las muestras que representan a la capa.

Luego, hay una fina lámina de 3 mm, compuesta por sedimento color 5YR8/1, que se observa levemente ondulada. El tamaño promedio del grano que conforma esta capa es 16 μm , con muy buena selección.

La composición de esta capa consiste en 61,517% de silicio, 18,426% de aluminio, 4,743% de calcio y 7,541% de hierro. El potasio continúa aumentando hasta 4,493%, mientras el azufre disminuye a 2,008%.

Se detectaron, además, los elementos: cobre con 0,033%, zinc con 0,021% y bario con 0,321%.

La siguiente capa tiene un espesor levemente variable en torno a 6 mm, conformada por sedimento cuyo tamaño promedio es 34 μm y de color 10YR4/2. Se compone por 61,288% de silicio, 16,614% de aluminio, 6,659% de calcio y 7,518% de hierro. Además, el potasio disminuye hasta 3,975% y el azufre aumenta hasta 2,909%.

No se detectaron elementos anómalos, así como los elementos traza se mantuvieron dentro del promedio.

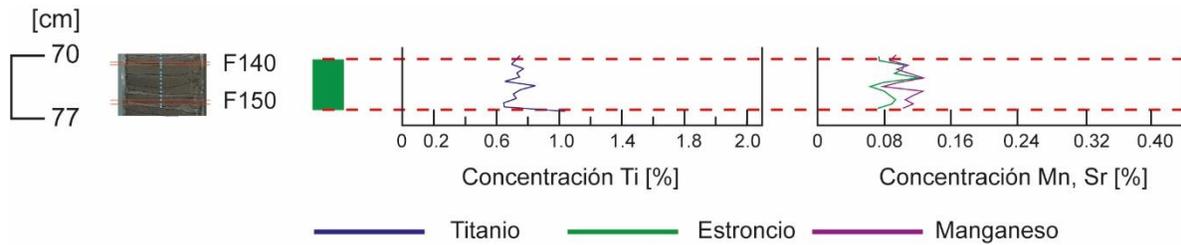
Luego, está la deposición de otra capa de espesor variable, de 10 a 14 mm, conformada por un sedimento cuyo tamaño medio es 40 μm , disminuyendo hacia el techo, con una selección que también va mejorando en el mismo sentido.

Tanto el silicio, como el aluminio y el hierro mantienen una concentración estable en la capa, con 61,348%, 16,786% y 7,700% respectivamente. Asimismo, el potasio con 4,195%, el titanio con 0,773% y el azufre con 3,372%.

El calcio disminuye hacia el techo, desde 6,619% a 4,526%, de la misma forma el estroncio pasa desde 0,094% a 0,080%.

Los elementos traza mantienen su comportamiento, mientras se detecta zinc con 0,021%, además de tántalo en la base con 0,252%, y circonio en el techo con 0,041%.

Luego, se encuentra en contacto con una lámina discontinua de 1 mm de espesor máximo, compuesta por arcilla color 5YR8/1. La composición de ésta se ve reflejada en la última muestra descrita.

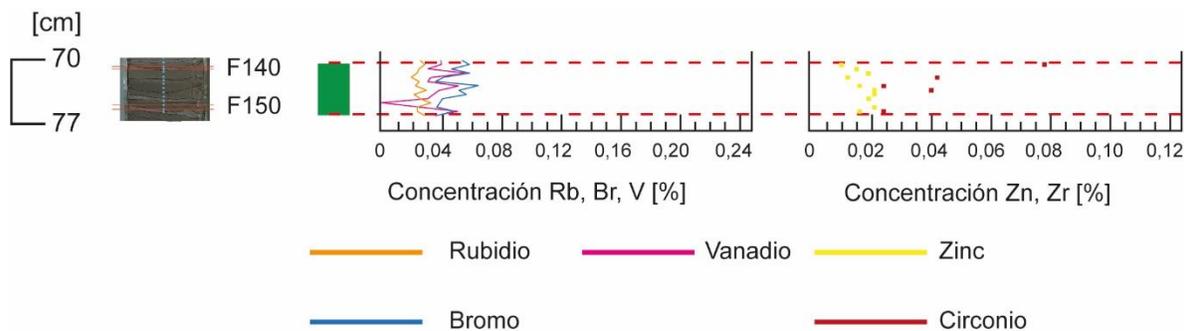


Gráfica 0-39 Distribución elementos menores Unidad X

Le sigue una capa de 12 mm, formada por sedimento de color 10YR4/2 y un tamaño medio de grano que disminuye de manera progresiva y gradual, desde 35 μm hasta 24 μm .

El contenido de silicio aumenta, también de forma progresiva, desde 57,261% hasta 60,738%. Los demás elementos no presentan ninguna tendencia, promediando en total: 16,171% de aluminio, 7,406% de calcio, 7,205% de hierro, 3,980% de potasio, 2,925% de azufre, 0,740% de titanio, 0,108% de manganeso y 0,099% de estroncio.

Se detecta una presencia importante de elementos anómalos, entre ellos se encuentra el cobre con 0,035%, zinc con 0,016% y tántalo con 0,229% en toda la capa. Sólo en la base, se encuentran el circonio y el magnesio con 0,043% y 5,172%, mientras sólo en el techo se vuelve a detectar el bario con 0,250%.



Gráfica 0-40 Distribución elementos traza Unidad X

Continúa una lámina de 4 mm de espesor, con sedimento cuyo tamaño medio de grano es 16 μm , y de color 5R6/2. Su composición consiste en 61,551% de silicio, 13,536% de aluminio, 10,423% de calcio, 6,909% de hierro, 3,535% de potasio, 2,857% de azufre, 0,727% de titanio, 0,109% de manganeso y 0,104% de estroncio.

Se detectaron zinc y circonio con 0,011% y 0,079%, respectivamente.

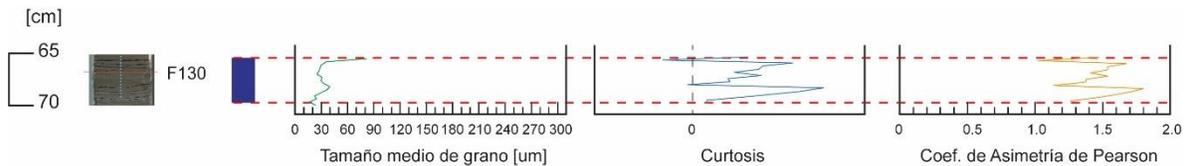
Esta unidad finaliza con 6 mm de sedimento de tamaño promedio equivalente a 25 μm y color 10 YR4/2, donde se observan estructuras lenticulares de 1 x 1 mm, provenientes de

la capa anterior. En esta capa aumentan el silicio, el aluminio y el potasio a 62,512%, 17,827% y 4,523%, respectivamente.

Unidad XI

Inicia con otra capa de 6 mm, de sedimento color 10YR4/2 y cuyo tamaño medio de grano son 40 μm . Se compone por 59,594% de silicio, 15,307% de aluminio, 9,943% de calcio, 7,178% de hierro, 3,992% de potasio, 2,953% de azufre y 0,696% de titanio.

No presenta ningún elemento anómalo, y los elementos traza se concentran dentro del promedio del testigo.

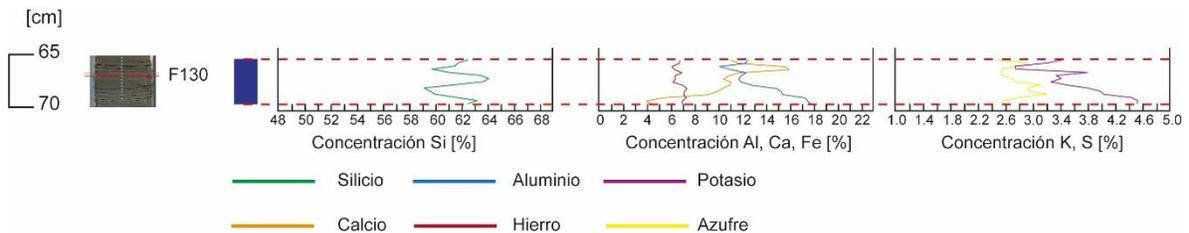


Gráfica 0-41 Granulometría Unidad XI

Posteriormente se observa una lámina de arcilla color 5R6/2, con 1 mm de potencia, y que se encuentra levemente ondulada. Continúan 25 mm de sedimento color 10YR4/2, y de tamaño equivalente a 30 μm . Tanto la lámina de 1 mm, como la capa de 25, están representadas en las muestras F134 a F130.

Se compone por 62,386% de silicio, que sólo es más bajo en aquella muestra que contiene la lámina de arcilla, donde equivale a 59,187%, y contiene una proporción más alta de aluminio, equivalente a 14,922%, y que en el resto de la capa equivale a 12,131%.

Se observa una consistencia en el contenido de calcio, que en promedio equivale a 10,755%, asimismo el hierro, el potasio y el azufre, que se mantienen en torno a 6,707%, 3,472% y 2,815%, respectivamente.



Gráfica 0-42 Distribución elementos mayores Unidad XI

Los elementos traza se encuentran dentro del espectro normal del testigo, salvo el vanadio, que en la muestra F131, de la que forma parte en un 0,153%.

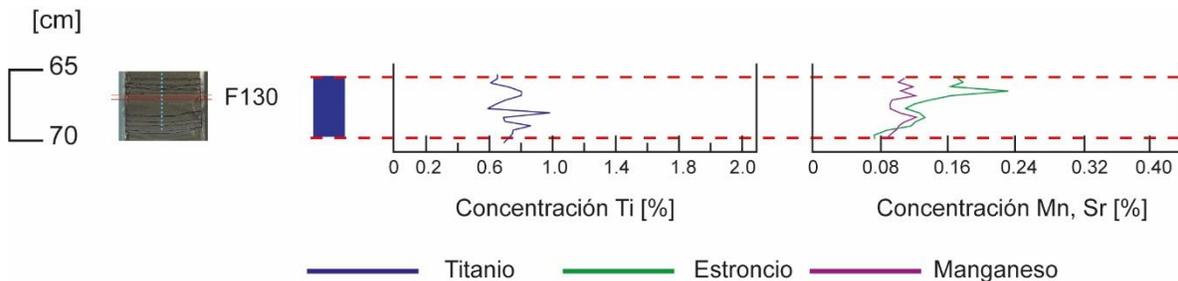
En la muestra basal se detectó zinc con un 0,022% de concentración, esta concentración se repite en la muestra siguiente, sumada a la presencia de cobre en 0,033%.

Luego, el zinc no se detecta, y continúa observándose cobre, junto a circonio en proporciones equivalentes a 0,032% y 0,018%.

Posteriormente se presenta zinc y circonio, en las mismas proporciones mencionadas, y en el techo se detecta tántalo en un 0,226%.

Continúa 1,5 mm de arcilla color 5R6/2, para dar paso a una intercalación de 17 mm de potencia. La primera lámina que conforma la intercalación es de 2 mm, color 10YR6/6, seguida por otra del mismo espesor de color 5R2/2.

Luego se deposita otra lámina, con las mismas características de la primera, pero con 3 mm de espesor, a la que siguen otros 2 mm de sedimento color 5R2/2, para dar paso a la última lámina color 10YR6/6, con 7 mm de espesor, y finalizar con una lámina de 1 mm, color 5R2/2.



Gráfica 0-43 Distribución elementos menores Unidad XI

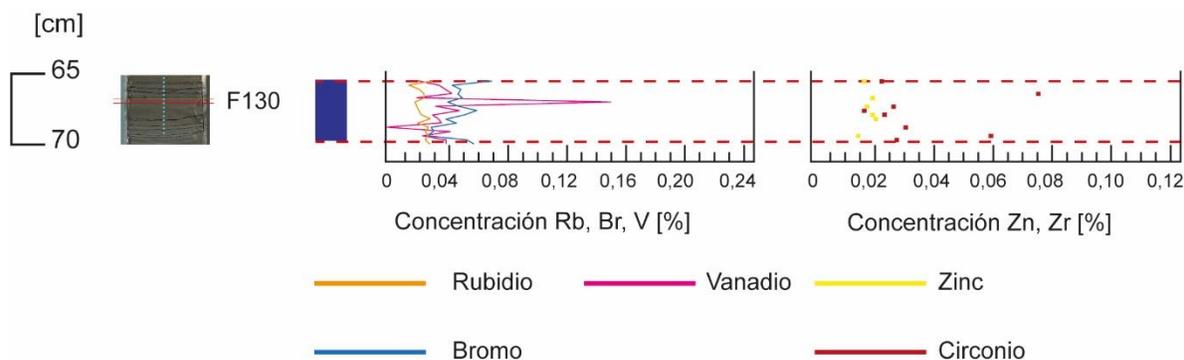
La muestra F129, presenta un tamaño promedio de grano equivalente a 25 μm , y representa tanto la lámina de 1,5 mm, como los 2 tipos de sedimento presente en la intercalación.

Se compone por 61,104% de silicio, 12,349% de aluminio, 11,709% de calcio, 6,981% de hierro, 3,802% de potasio, 2,544% de azufre y 0,812% de titanio.

También se detectó zinc y tántalo, en proporciones equivalentes a 0,021% y 0,271%.

El ejemplar F128 contiene a los dos tipos de sedimento en la intercalación en una proporción similar. Esta muestra exhibe un tamaño promedio de grano equivalente a 30 μm , y se compone por 59,778% de silicio, 11,097% de aluminio, 15,975% de calcio, 6,341% de hierro, 2,764% de potasio, 2,568% de azufre y 0,733% de titanio.

Además, se detecta circonio con 0,077% y tántalo con 0,211%.



Gráfica 0-44 Distribución elementos traza Unidad XI

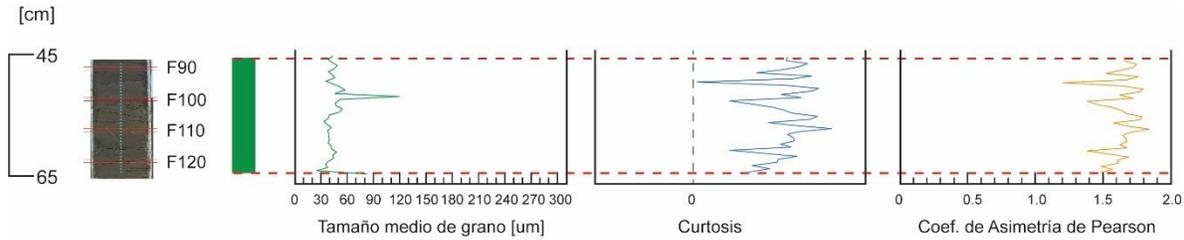
La muestra F127, contiene casi en su totalidad al sedimento cuyo color es 10YR6/6, y su tamaño medio de grano es 36 μm . De este modo, este sedimento se compone por 61,524% de silicio, 10,118% de aluminio, 15,620% de calcio, 6,157% de hierro, 2,752% de potasio, 2,804% de azufre y 0,617% de titanio. En esta muestra el único elemento anómalo que se detecta es el cobre con 0,027%.

Finalmente se tiene la F126, que contiene parte de los 2 sedimentos, incluyendo una porción de la capa de la siguiente unidad.

Por este motivo se tiene un aumento en el tamaño de grano y una baja en la selección, con un promedio de 86 μm . Está compuesta en un 61,765% de silicio, 12,321% de aluminio, 11,747% de calcio, 6,750% de hierro, 3,218% de potasio, 2,913% de azufre y 0,658% de titanio. También se detectó tántalo con 0,222%.

Unidad XII

Esta unidad inicia con una potente capa de espesor variable entre 25 y 30 mm, que contiene 3 estructuras importantes: una en su base, correspondiente a una lámina discontinua de 1 mm de espesor, color 5YR2/2, otra que se ubica en la mitad de la capa, que presenta un espesor de 0,5 mm y aparentemente del mismo sedimento que la primera, y finalmente una tercera que se ubica en el costado más potente, en los primeros 5 mm, que también tiene un espesor de 1 mm, pero cuyo sedimento no es similar a las anteriores, presentando el color 5R6/2.



Gráfica 0-45 Granulometría Unidad XII

La capa contenedora, presenta un sedimento de color 10YR6/6 y un tamaño promedio de grano que está representado por la muestra F124 en su totalidad, con 38 μm . El ejemplar F125, contiene además a la primera lámina discontinua descrita, mostrando un tamaño promedio de grano de 25 μm . Esta última se compone por un 62,536%, a diferencia de la siguiente, en la que se observa una proporción de silicio equivalente a 59,655%.

El aluminio permanece bajo el promedio en el total de la capa, no superando el 13,140%. En contraposición, el calcio, es mayor al aluminio, con 16,672% en la capa total, y 11,122% en la muestra que contiene la lámina. El hierro no presenta mayor variabilidad, encontrándose en torno a 7,079%, con tendencia a aumentar hacia el techo.

El potasio sólo es menor en la muestra que sólo contiene la capa, donde llega a representar un 2,718% en la F124. En el resto de las muestras promedia 3,318%.

El azufre se mantiene estable en todas las muestras alrededor de 2,860%. El titanio, al igual que el hierro, presenta una baja variabilidad en la capa, promediando 0,687%

Respecto a los elementos anómalos, el zinc se detecta en todas las muestras, promediando 0,019%. El circonio, sólo se ausenta en la muestra conformada únicamente por la capa contenedora, promediando en el resto de las muestras 0,029%.

El cobre se detecta únicamente en la muestra F124 con 0,031%, asimismo el tántalo, sólo se detecta en la muestra F123 con 0,234%.

Continúa una capa de sedimento color 10YR4/2, con un espesor variable dado la lámina anterior, y que se encuentra en torno a los 21 mm. El tamaño promedio de grano equivale a 43 μm , con buena selección. Se compone por 63,722% de silicio en promedio, pues en esta capa se alcanza el máximo de este elemento, en la muestra F118, donde se mide un 68,607% de silicio. El aluminio no presenta mayor variabilidad, promediando 12,429%, no obstante, es prudente mencionar que en la muestra F118, es donde alcanza la menor proporción en esta capa con 11,637%.

El calcio es mayor en la mitad basal de la capa, donde promedia 11,442%, mientras en la mitad superior, promedia 7,331%. Asimismo, el hierro, es mayor en la mitad basal con 7,314%, mientras en la mitad superior se detecta 6,097%.

El potasio no presenta mayor variabilidad en la capa promediando, 3,224%, al igual que el azufre, que en esta capa aumenta hasta promediar 3,454%.

El circonio se presenta en todas las muestras representativas de la capa, promediando 0,022%. Los demás elementos anómalos sólo se presentan en el techo, detectándose tántalo en un 0,201%, zinc en un 0,018% y molibdeno con 0,011%.

Sigue una lámina de 3 mm, con signos de erosión en su base, de sedimento color 10YR6/6, y cuyo tamaño promedio de grano equivale a 38 μm .

Está compuesta por: 63,334% de silicio, 13,965% de aluminio, 7,698% de calcio, 7,302% de hierro, 3,360% de potasio, 3,381% de azufre y 0,610% de titanio.

Por otra parte, el bromo no alcanza a detectarse, pero sí se detectan cobre, zinc y circonio con 0,033%, 0,023% y 0,025% respectivamente.

Continúan 40 mm de sedimento color 10YR4/2, y que contiene una lámina discontinua de 1 mm, color 5YR2/2. Esta potente capa está representada por las muestras F115 – F108. En éstas se observa un tamaño promedio de grano equivalente a 38 μm , estable en toda la capa, con buena selección.

El silicio presenta una mayor variabilidad, encontrándose un mínimo de 56,687% y un máximo de 61,107%, promediando en total 59,477%.

Se observa una tendencia del aluminio a disminuir en su concentración desde la base hacia el techo, desde 14,986% hasta 11,242%, promediando 13,107%. Nuevamente se observa la interdependencia negativa respecto al calcio, que presenta una tendencia a aumentar desde 9,299% en la base, hasta 15,172% en el techo, promediando 12,419%.

El hierro no presenta mayor variabilidad, siendo su mínimo 5,937% y el máximo 7,555%, promediando en el total de la capa 6,670%.

El potasio, similar al aluminio, también presenta una tendencia a disminuir hacia el techo desde 4,107% hasta 2,920%. El azufre presenta también esta tendencia, pero con una variabilidad mucho menor, desde 3,342% hasta 2,486%.

El titanio, esta vez a diferencia del hierro presenta un máximo considerable de 1,116% en la muestra F114, promediando en el resto de las muestras, una concentración equivalente a 0,611%.

El estroncio se comporta similar al calcio, aumentando hacia el techo, desde 0,104% hasta 0,227%. El manganeso no manifiesta ninguna tendencia y una baja variabilidad, promediando 0,108%.

Los elementos traza no manifiestan ningún comportamiento fuera de lo común. Se detecta cobre con 0,029% en la muestra superior (F108), el zinc se detecta en la mitad de las muestras que representan la capa y de forma alternada, promediando entre ellas 0,021%. El circonio se detecta en 3 de las 8 muestras, también de forma alternada, pero sólo en la mitad basal, promediando entre ellas 0,031%. El tántalo esta vez cobra más protagonismo entre los elementos anómalos, detectándose en 5 de las 8 muestras, distribuidas de forma homogénea, promediando entre ellas 0,224%.

Continúa una lámina de 1 mm, parcialmente erosionada, y aparentemente de arcilla color 5YR8/1, para dar paso a una capa de espesor variable entre 16 y 5 mm conformada por sedimento color 10YR6/6. Éstas se encuentran representadas parcialmente por las muestras F107 a F105, siendo la F106, la única representativa en su totalidad, de la capa más potente.

De esta forma, el ejemplar F107, representa tanto la capa con mayor potencia, así como la lámina de arcilla, mostrando un tamaño promedio de grano equivalente a 39 μm , mientras las siguientes muestras presentan un tamaño medio de 52 μm .

La variabilidad de casi todos los elementos es baja, distinguiéndose diferencias tanto en las muestras F107 y F105, dada las porciones de las otras capas que se incluyen en ellas.

Estas diferencias se aprecian en los elementos calcio, hierro y titanio. Los dos primeros se distinguen en la muestra más reciente, donde el calcio disminuye en un 2% respecto a las anteriores, desde 18,363% a 16,567%. El hierro, por el contrario, aumenta en la última muestra respecto a las anteriores desde 6,620% hasta 7,127%.

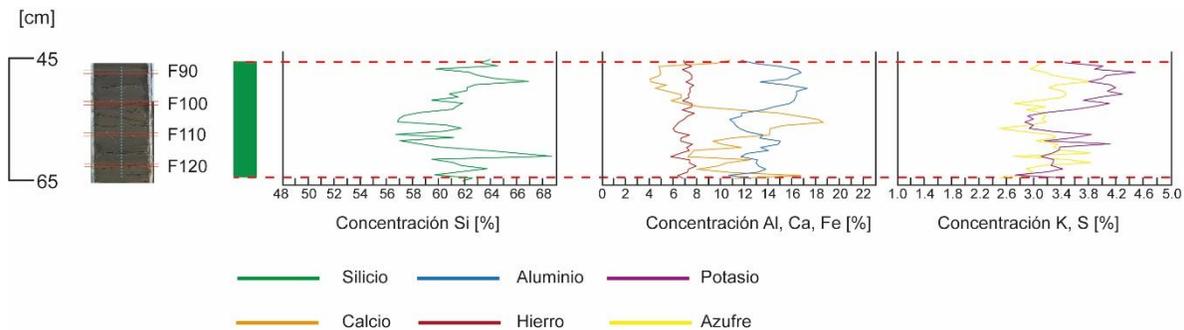
El titanio se diferencia en la muestra más antigua, con 0,553% respecto a las dos siguientes que promedian 0,728%.

Los demás elementos promedian en las tres muestras las siguientes proporciones: 57,005% para el silicio, 11,156% para el aluminio, 2,912% para el potasio, 3,146% para el azufre, 0,104% para el manganeso y 0,257% para el estroncio.

Los elementos traza no presentan ningún comportamiento anómalo, no obstante, el cobre se detecta en las 3 muestras con un promedio de 0,028%, además de zinc y circonio sólo en la muestra basal, con 0,018% y 0,053%.

Continúa una lámina con espesor levemente variable en torno a los 9 mm. Se compone por sedimento color 5R2/2 y un tamaño promedio de grano. Presenta una estructura lenticular importante, de 15 mm de ancho y 4 mm de espesor, ubicada hacia el segmento superior de la capa. De esta forma, se tendría: la muestra F105, que la representa parcialmente, la F104 que representa en su totalidad a la capa contenedora de la estructura, la F103 que

representaría tanto la capa como el lente, y finalmente la F102, que representa una mínima porción de la capa.



Gráfica 0-46 Distribución elementos mayores Unidad XII

De este modo, se tiene que la capa se compondría por un sedimento cuyo tamaño promedio de grano equivale a 46 μm , mientras el lente presentaría una granulometría levemente más baja, teniendo en la muestra F103, una granulometría promedio equivalente a 38 μm .

La capa contenedora está conformada por una proporción de silicio correspondiente a 58,436%, mientras el lente presenta una proporción mucho mayor, permitiendo que en la muestra F103 se detecte una proporción de este elemento de 61,006%.

Asimismo, esta última muestra contiene una proporción más alta de aluminio, correspondiente a 13,506% versus la muestra F104 donde el contenido del elemento es 11,706%. En contraposición el calcio es más alta en la F104, con 14,892%, versus 11,339% en la muestra siguiente.

El hierro presenta una diferencia de aproximadamente un 1% menos en la muestra más reciente, de 7,710% a 6,725%, comportamiento que repite el titanio, que representa 0,553% en la muestra más reciente, respecto a los 0,635% de la muestra anterior.

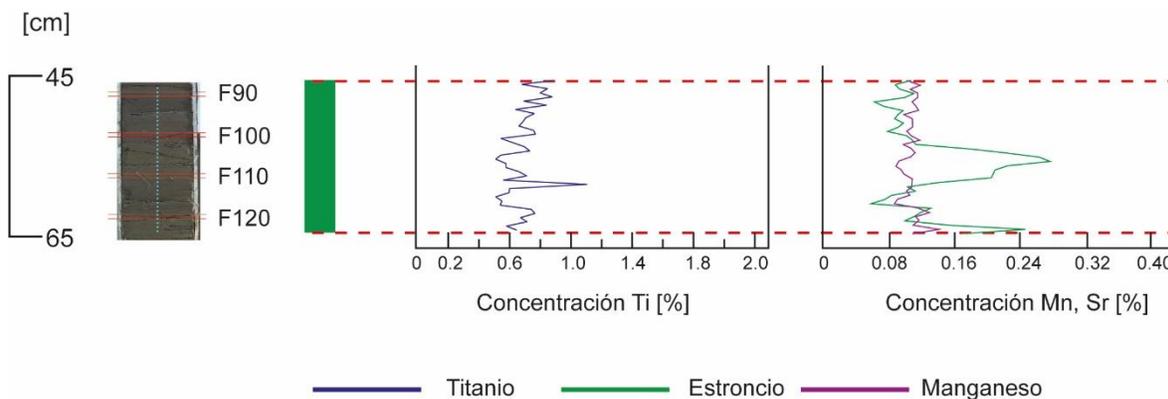
El potasio por su parte se mantiene estable en torno a 3,362%, al igual que el azufre, que promedia en ambas muestras 2,995%.

Luego se observa una capa de 11 mm que se encuentra acuñada hasta el centro. Paralelamente se observa una capa de gran potencia, en torno a 45 mm de espesor.

De esta forma la muestra F102 contiene los 3 sedimentos por lo que las mediciones entregadas no son fiables para ninguno de ellos. De esta forma, la capa acuñada está representada en porciones de las muestras F101 y F100, la que también representan parcialmente a la capa de gran potencia.

Ambas presentan una granulometría muy diferente, teniendo en la F101 un tamaño medio de grano de 119 μm , versus la siguiente que presenta 45 μm . La primera, como es

esperable, presenta una mala selección en comparación con la siguiente. Esto se explica debido que la muestra más antigua, contiene una proporción mucho mayor de la capa acuñada, mientras en la siguiente la fracción resulta mínima.



Gráfica 0-47 Distribución elementos menores Unidad XII

Luego el ejemplar F101 se compone por 61,778% de silicio, 15,697% de aluminio, 6,845% de calcio, 7,540% de hierro, 4,095% de potasio, 2,701% de azufre y 0,768% de titanio.

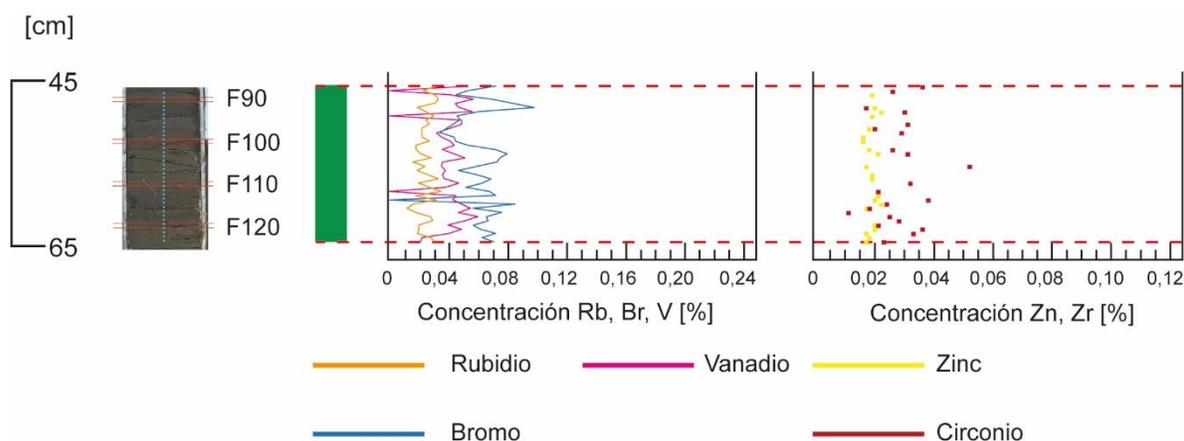
Posteriormente, en la muestra F100 se tiene 59,418% de silicio, 16,099% de aluminio, 5,792% de calcio, 6,720% de hierro, 3,711% de potasio, 3,105% de azufre y 0,673% de titanio.

De este modo, una de las diferencias que se observan es una menor concentración en casi todos los elementos, excepto el calcio que es levemente mayor, además de los elementos anómalos, detectándose zinc y tántalo en la más antigua, con 0,017% y 0,243%, respectivamente, mientras en la más joven se detectan zinc con 0,017%, magnesio con 4,189% e itrio con 0,004%.

Luego desde la F99 hasta la F89 representan el resto de la capa potente antes mencionada, dando fin a esta unidad. Esta capa se compone por sedimento de color 5R2/2, cuyo tamaño medio de grano equivale a 44 μm . Esta capa presenta 2 estructuras, una de ellas es laminar con bordes dentados, y la otra es un lente de arcilla de 2 mm de espesor y 10 mm de ancho, y que presenta color 5R6/2, al igual que la estructura laminar.

La primera estructura mencionada se encuentra contenida en la muestra F95, mientras el lente se encuentra parcialmente representado en las muestras F91 y F92.

De este modo, las variaciones más importantes se encuentran en dichas muestras.



Gráfica 0-48 Distribución elementos traza Unidad XII

De esta forma se tiene que el sedimento que compone tanto la lámina como el lente, se compondrían por un 66,844% de silicio, 13,274% de aluminio, 4,082% de calcio, 7,033% de hierro, 3,790% de potasio, 3,836% de azufre y 0,702% de titanio.

El resto de la capa se compone, en promedio, por: 62,041% de silicio, 16,254% de aluminio, 5,239% de calcio, 7,329% de hierro, 4,108% de potasio, 3,305% de azufre y 0,772% de titanio.

El resto de los elementos menores y traza, se comportan de manera habitual. Se detectan cobre, zinc, circonio, tántalo, magnesio y bario.

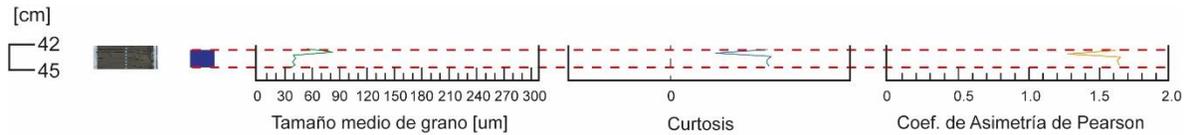
El cobre se detecta en la muestra basal, y en la que contiene las estructuras, promediando entre ellas 0,027%. El zinc se concentra en el centro de la capa, donde compone aproximadamente un 0,021%.

El circonio abarca una mayor cantidad de muestras (6 de 11), distribuidas de forma homogénea en la capa, en la que promedia 0,058%.

Se detecta el tántalo en la muestra F92 con 0,242%, el magnesio en la muestra F90 con 4,432% y finalmente el bario se percibe en la F96 con 0,553%.

Unidad XIII

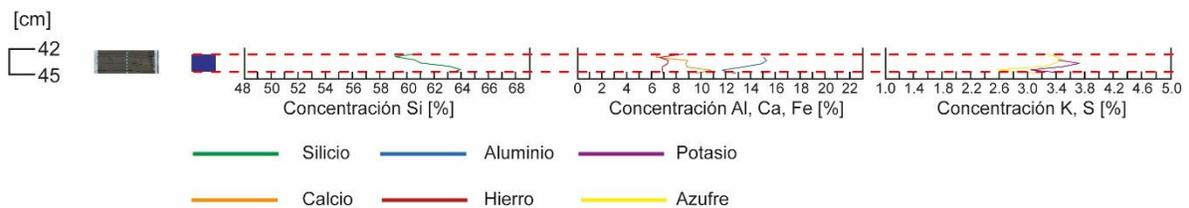
Esta unidad inicia con 10 mm de sedimento color 5YR5/6 con tamaño medio de grano de 42 μm . Esta capa mantiene una composición química estable en las muestras que la representan, luego, la proporción de los elementos corresponde a 63,384% de silicio, 12,611% de aluminio, 9,692% de calcio, 6,845% de hierro, 3,340% de potasio, 2,962% de azufre y 0,659% de titanio.



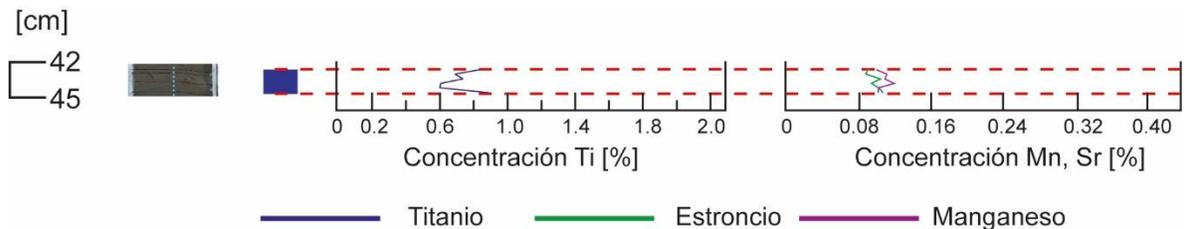
Gráfica 0-49 Granulometría Unidad XIII

Tanto los elementos menores restantes, como los traza presentan un comportamiento normal. Se detectó circonio en toda la capa, con una concentración estable equivalente a 0,049%. Además, se encontró zinc y tántalo en la muestra central con concentraciones correspondientes a 0,020% y 0,248%

Continúan 9 mm de sedimento color 5R2/2 y tamaño medio de grano igual a 63 µm, con una selección regular. Mantiene una composición estable en las muestras que la representan (F85 – F84) con 60,744% de silicio, 15,048% de aluminio, 8,790% de calcio, 7,270% de hierro, 3,569% de potasio, 3,429% de azufre y 0,780% de titanio.



Gráfica 0-50 Distribución elementos mayores Unidad XIII



Gráfica 0-51 Distribución elementos menores Unidad XIII

Se detectaron zinc y circonio, el primero se encuentra en la mitad basal de la capa con 0,019%, mientras el segundo se encuentra en la mitad superior con 0,025%.

Finalmente, hay una capa de 5 mm conformada por un sedimento cuyo tamaño promedio de grano es 56 µm, una buena selección, y de color 5YR5/6.

Se compone por 59,098% de silicio, 14,997% de aluminio, 6,336% de calcio, 6,583% de hierro, 3,639% de potasio, 3,399% de azufre y 0,746% de titanio.

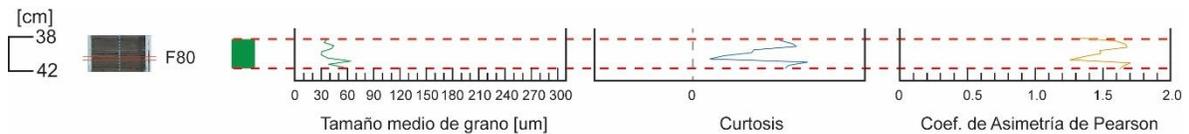


Gráfica 0-52 Distribución elementos traza Unidad XIII

Las anomalías detectadas corresponden a tántalo y magnesio, que conforman 0,187% y 4,701%.

Unidad XIV

Inicia con 23 mm de sedimento color 10YR4/2, representados en las muestras F83 a F80. Esta potente capa presenta una granulometría altamente variable, tanto la muestra F82 como la F80 presentan un tamaño medio de grano igual a 38 μm , mientras en la F83 se detecta un tamaño medio equivalente a 56 μm , y en la F81, 64 μm .



Gráfica 0-53 Granulometría Unidad XIV

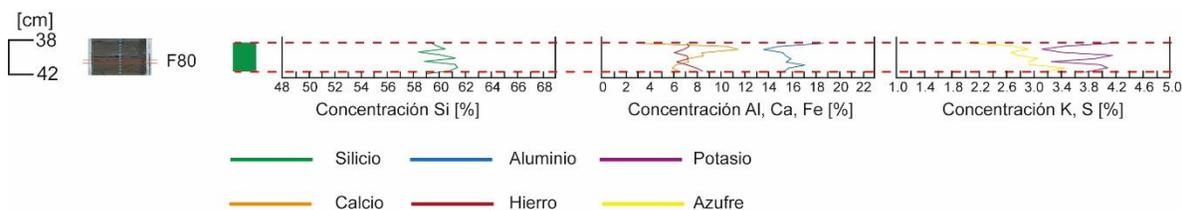
A pesar de esta distribución del tamaño de grano, presenta una composición química estable, y con tendencias claras y graduales.

En primer lugar, el silicio, en la muestra basal compone un 59,098%, proporción que aumenta gradualmente hasta el techo alcanzando 61,282%, asimismo el aluminio que inicia con 14,499% y que alcanza en el techo 17,142%.

El calcio mantiene una concentración similar en todas las muestras, promediando 6,277%.

El hierro se concentra en torno al 8,291% en las muestras centrales de la capa, mientras en sus extremos inferior y superior se detectan 6,583% y 7,294% respectivamente.

Tanto el potasio como el azufre se mantienen estables dentro de la capa promediando cada uno 3,898% y 3,265%.



Gráfica 0-54 Distribución elementos mayores Unidad XIV

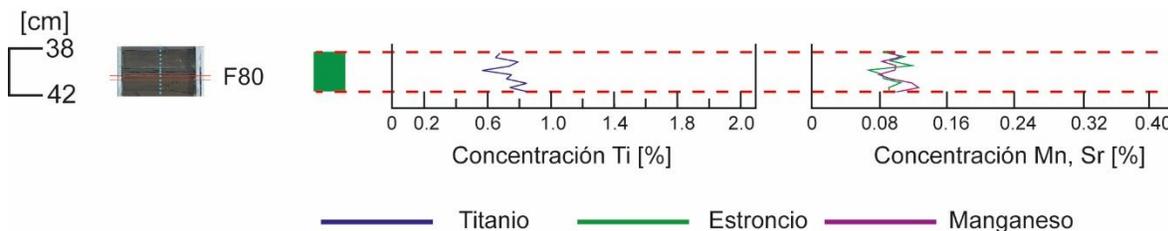
El titanio se concentra mayoritariamente en la muestra F82 que contiene 0,853%, mientras las demás se mantienen alrededor de 0,741%.

Presenta zinc en la mitad superior en una concentración igual a 0,021%, el circonio se detecta en las muestras centrales con un contenido equivalente a 0,045%. También se presenta tántalo y magnesio en la base, con 0,235% y 4,701%.

La unidad finaliza con una intercalación, que presenta un contacto erosivo entre la lámina más reciente, y la anterior.

Se conforma por un total de 5 láminas, tres de ellas muestran un color 5YR5/6, mientras las dos que se encuentran entre ellas son de color 5R6/2.

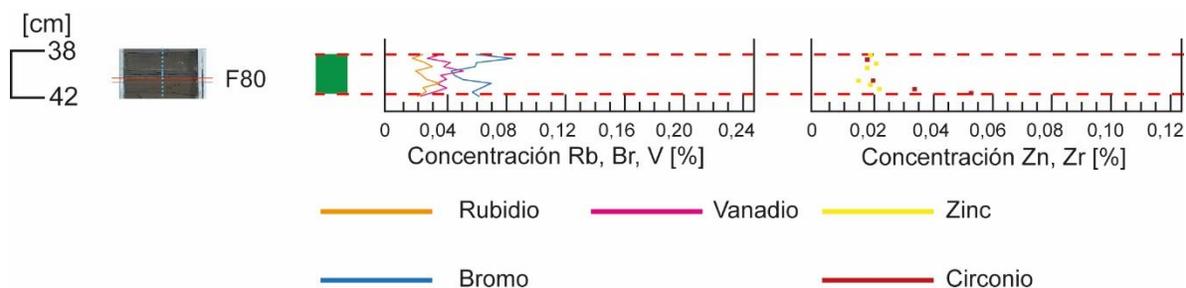
Inicia con una lámina de 3 mm, del primer sedimento mencionado, para luego dar lugar a 0,5 mm del otro sedimento. Sigue otra lámina de 1 mm del primero, y éstas son las contenidas en la muestra F79 y F78.



Gráfica 0-55 Distribución elementos menores Unidad XIV

Continúa 1 mm más del segundo sedimento, para finalizar con una potente capa de 22 mm, del primero, que se ve representada en las muestras F77 hasta F73.

En la muestra basal se mide un tamaño medio de grano menor que el resto, con 30 μm , lo que se explica a través de la presencia de la lámina de 1 mm. Luego, la capa más potente tendría un tamaño promedio grano 39 μm . En todas ellas se observa una buena selección. Respecto a su composición química, son varios los elementos que se mantienen estables, en primer lugar, el silicio, que promedia 60,092%, el hierro, promediando 7,005%, el potasio, que se concentra en 3,620% y el azufre con 2,831%.



Gráfica 0-56 Distribución elementos traza Unidad XIV

El aluminio y el calcio muestran tendencias claras a disminuir y aumentar, respectivamente. La muestra basal se compone por 15,974% de aluminio y 7,157% de calcio, a partir de estas concentraciones el cambio se vuelve progresivo, hasta llegar a 14,947% y 10,618%, respectivamente para cada elemento.

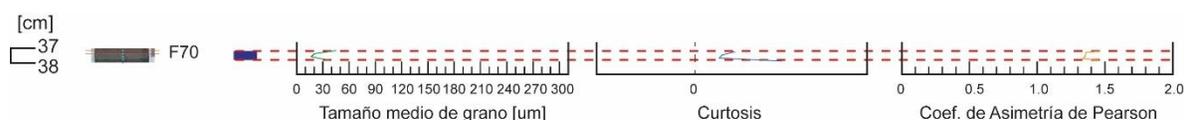
El titanio presenta una concentración más elevada en la base, con 0,800%, mientras en las muestras superiores promedia 0,673%.

Se detectó zinc en las muestras F76 y F75, con 0,019% y 0,022%, el circonio se detecta en la muestra más superficial con 0,019%. El tántalo se detecta en las muestras F78, F77 y F75, con una concentración muy similar en las tres, alrededor de 0,244%

Finalmente, el magnesio se detecta en la muestra F76 con 4,552%.

Unidad XV

Esta unidad comprende únicamente 10 mm de un mismo sedimento, siendo la única capa entre intercalaciones que no presenta bordes erosivos, ni estructuras, ni deformaciones.

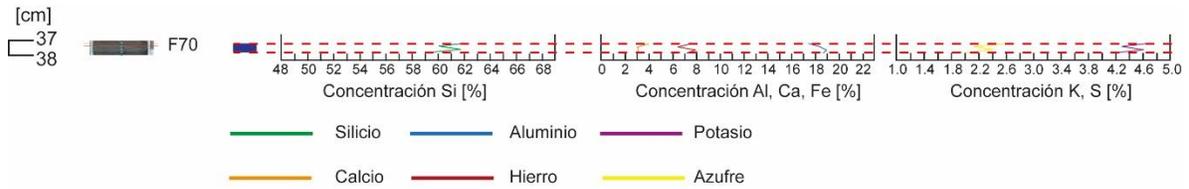


Gráfica 0-57 Granulometría Unidad XV

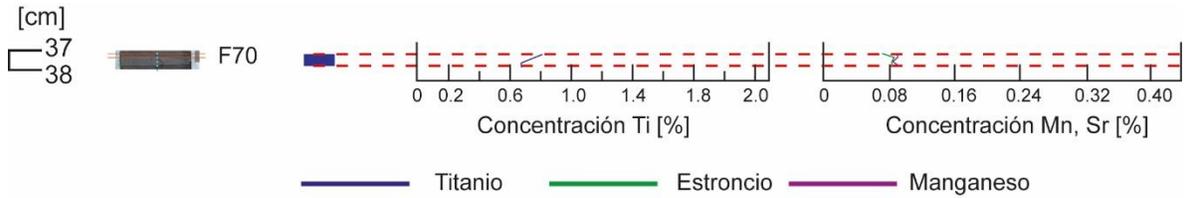
Las dos muestras que lo representan presentan una granulometría equivalente a 18 µm, con muy buena selección.

Su composición química corresponde a 60,594% de silicio, 18,855% de aluminio, 3,106% de calcio, 7,586% de hierro, 4,406% de potasio, 2,212% de azufre y 0,786%. Ambas presentan zinc en una proporción igual a 0,019%.

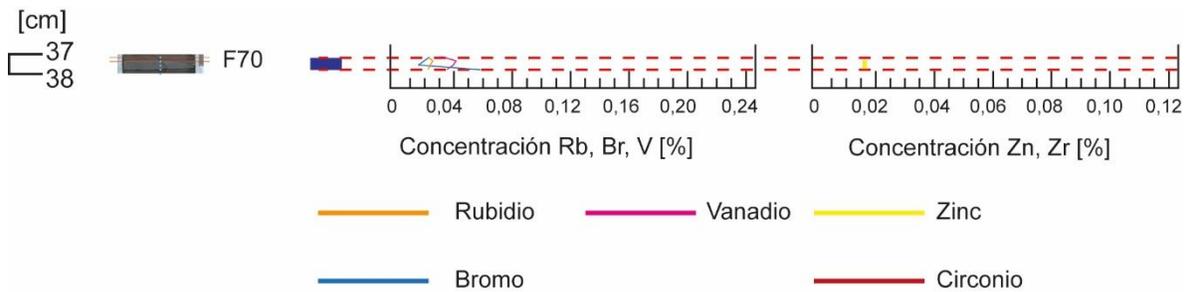
La principal diferencia entre ambas es la presencia de magnesio en la primera, con 4,341%, haciendo que las proporciones del resto de los elementos en la segunda sea levemente más alto.



Gráfica 0-58 Distribución elementos mayores Unidad XV



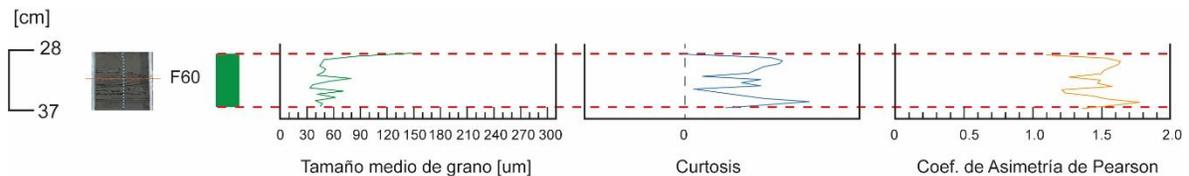
Gráfica 0-59 Distribución elementos menores Unidad XV



Gráfica 0-60 Distribución elementos traza Unidad XV

Unidad XVI

Inicia con una intercalación de 27 mm de potencia total, que es interrumpida a los 8 mm por una lámina discontinua de arcilla, de espesor 0,8 mm y color 5R8/2. Se encuentra en contacto erosivo con la unidad anterior.



Gráfica 0-61 Granulometría Unidad XVI

Esta intercalación se compone por 2 tipos de sedimentos, el que ocupa la base tiene 15 mm de espesor y color 10YR4/2, y un tamaño medio de grano equivalente a 44 µm. Este sedimento se presenta en 2 ocasiones más con espesores de 2 y 6 mm, formando parte del techo. Este sedimento se compone por 61,198% de silicio, 17,822% de aluminio,

4,228% de calcio, 7,120% de hierro, 4,419% de potasio, 2,524% de azufre, y 0,817% de titanio.

El segundo sedimento presenta el color 5R2/2 y un tamaño promedio de grano de 56 µm, y se compone por 63,828% de silicio, 14,248% de aluminio, 8,033% de calcio, 7,040% de hierro, 3,521% de potasio, 2,083% de azufre y 0,673% de titanio.

La muestra que contiene la lámina discontinua se caracteriza por un aumento importante de bromo a 0,241%.

Continua una lámina erosionada de 1 mm de espesor máximo, de color 5R8/2, que se encuentra en la misma muestra que contiene la base de la siguiente sucesión, consistente en una capa de 4 mm de sedimento color 10YR6/6, que presenta restos orgánicos.

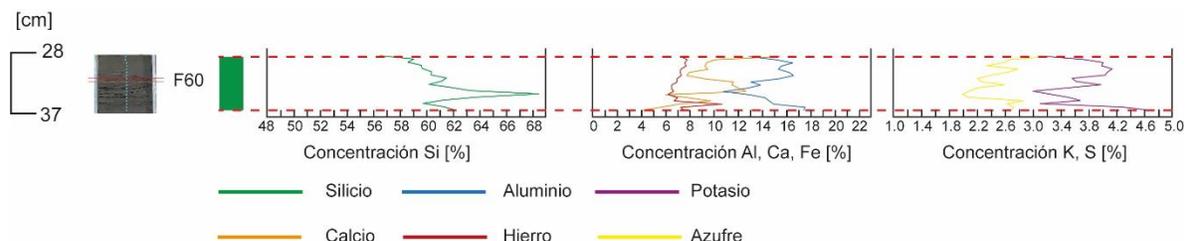
Esta muestra presenta un tamaño promedio de grano 72 µm y mala selección. Su composición consiste en 63,828% de silicio, 14,248% de aluminio, 8,033% de calcio, 7,040% de hierro, 3,521% de potasio, 2,083% de azufre y 0,673% de titanio

La siguiente muestra contiene al menos 3 sedimentos diferentes, en capas de 1 y 2 mm, de colores 10YR4/2, 5R2/2 y 10 YR6/6. Muestra un tamaño promedio de grano de 33 µm, y una composición consistente en 68,478% de silicio, 12,997% de aluminio, 6,056% de calcio, 6,203% de hierro, 3,250% de potasio, 1,991% de azufre y 0,567% de titanio.

Posteriormente está representado el techo de la sucesión, que contiene 1 mm de sedimento color 5R2/2 y 4 mm de sedimento color 10YR4/2. La muestra que contiene estas láminas presenta un tamaño medio de grano 37 µm y buena selección.

Su composición dista de la muestra anterior, sobre todo en el silicio con 63,387%, y el calcio que se duplica alcanzando un 12,694%, los demás varían de forma poco importante.

Se detecta zinc y tántalo en las proporciones 0,021% y 0,259%.

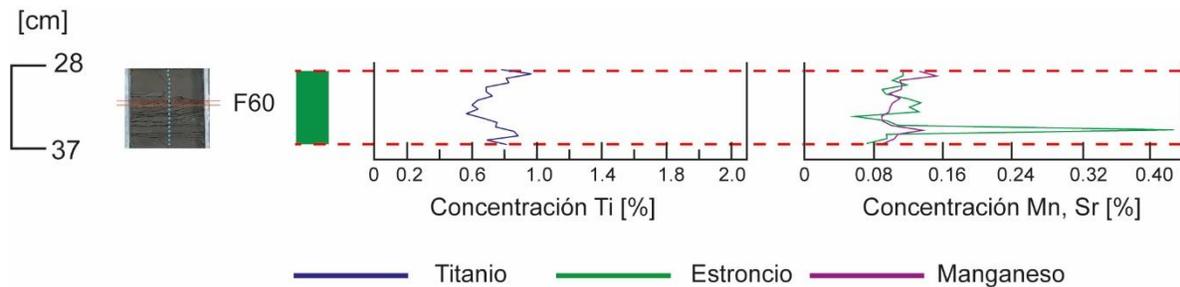


Gráfica 0-62 Distribución elementos mayores Unidad XVI

A continuación, se presenta una fuerte deformación de, al menos, 3 sedimentos cuyos colores son 10YR6/6, 5R8/2 y 5R2/2. Este último sedimento es que el presenta mayor potencia, que varía entre 5 y 10 mm, y que presenta estructuras lenticulares pertenecientes

a la sucesión anterior. Los otros tienen un espesor en torno a 1 mm y son las láminas que presentan el plegamiento más intenso.

Esta deformación está representada en las muestras F61 hasta la F59. Las 3 muestras presentan granulometrías sumamente diferentes. La muestra basal muestra un tamaño medio de grano de 52 μm , la intermedia muestra un tamaño de 72 μm , con muy mala selección, mientras que en la superior se midió 42 μm con una selección levemente mejor. La composición química es similar en las 3 muestras debido a la fuerte mezcla de los sedimentos. En promedio se componen por 61,113% de silicio, 13,228% de aluminio, 11,742% de calcio, 6,679% de hierro, 3,707% de potasio, 2,356% de azufre y 0,657% de titanio.



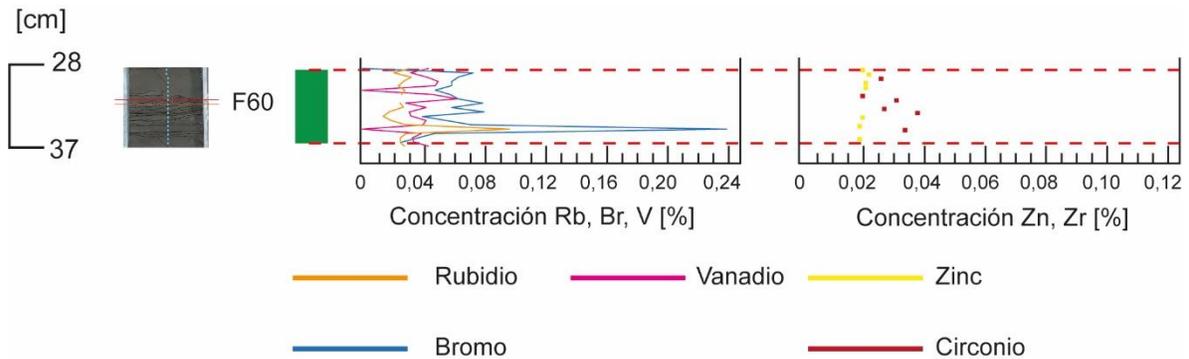
Gráfica 0-63 Distribución elementos menores Unidad XVI

Se detecta circonio en las 2 muestras hacia la base, promediando 0.034%, mientras en la intermedia y la superior se detecta tántalo en 0,202%.

Finalmente, se depositan 38 mm, de color 10YR4/2, que presenta una estructura de 20 mm de ancho y 2 mm de largo.

El tamaño promedio de grano que compone la capa es de 49 μm , mientras la muestra que contiene a la estructura se eleva a 85 μm con mala selección.

El silicio presenta una tendencia a disminuir hacia el techo desde 61,527% hasta 56,547%, el calcio aumenta, desde 7,796% hasta 15,488%.



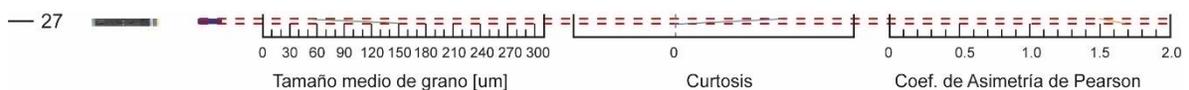
Gráfica 0-64 Distribución elementos traza Unidad XVI

El comportamiento de los demás elementos es oscilatorio, con baja variabilidad. El aluminio promedio es 15,846%, el hierro promedia un total de 7,413%, 3,839% el potasio, 2,625% el azufre y 0,773% el titanio.

Se detecta cobre y bario, en el medio de la capa con 0,027% y 0,471%. El zinc se encuentra más disperso al igual que el circonio, sin embargo, tienden a concentrarse en el techo, el primer elemento, y en la base, el segundo. Promedian 0,022% y 0,027%, respectivamente. El tántalo se detecta en las dos muestras más recientes de la capa, donde equivale a 0,205%.

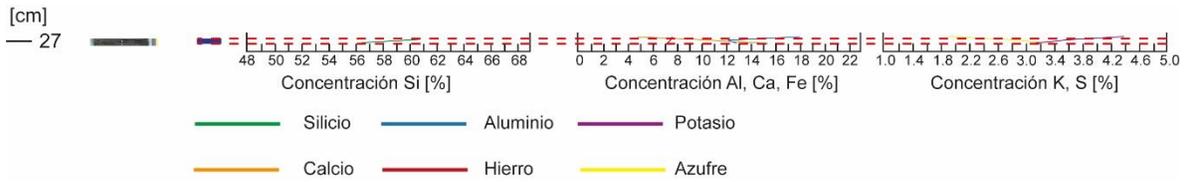
Unidad XVII

Esta unidad se define en base a lo observado en la tomografía, lo que aplicado a la descripción del testigo se atribuye a 2 láminas de 2 y 3 mm, ambas con bordes nítidos.

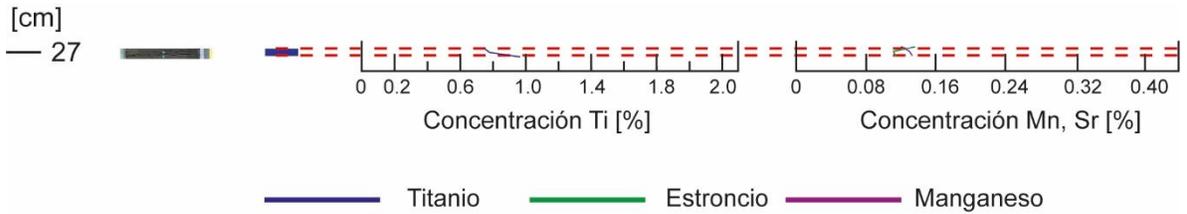


Gráfica 0-65 Granulometría Unidad XVII

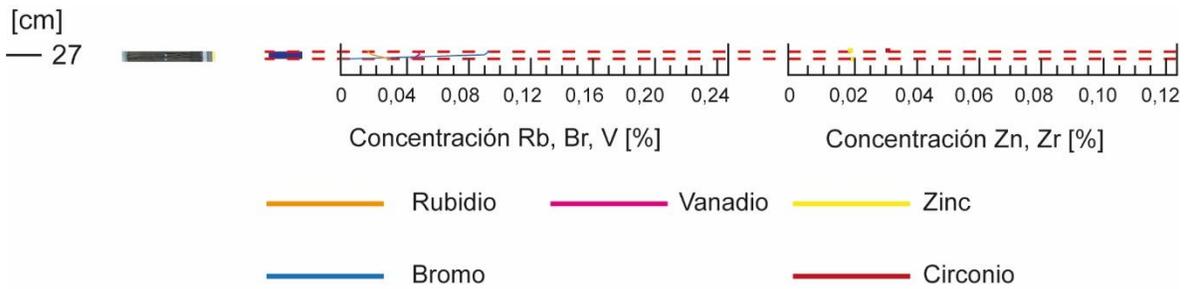
La lámina basal, de 2 mm, está conformada por un sedimento color 10YR6/6, y la siguiente tiene color 5R2/2. Ambas están incluidas en la muestra F52, en la que se midió un tamaño medio de grano de 44 μm , y cuya composición es 60,878% de silicio, 12,220% de aluminio, 11,416% de calcio, 7,551% de hierro, 3,604% de potasio, 2,863% de azufre y 0,730% de titanio. El único elemento anómalo que se detectó es tántalo con 0,315%.



Gráfica 0-66 Distribución elementos mayores Unidad XVII



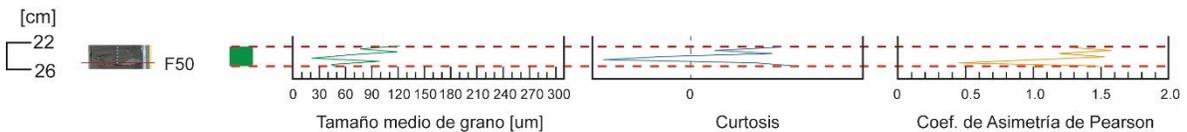
Gráfica 0-67 Distribución elementos menores Unidad XVII



Gráfica 0-68 Distribución elementos traza Unidad XVII

Unidad XVIII

Inicia con 5 mm de sedimento color 10YR6/6 que contiene una estructura lenticular pequeña, de 1x1 mm, y de color 10YR8/6. Esta capa presenta un tamaño medio de grano de 43 μm con una selección regular.



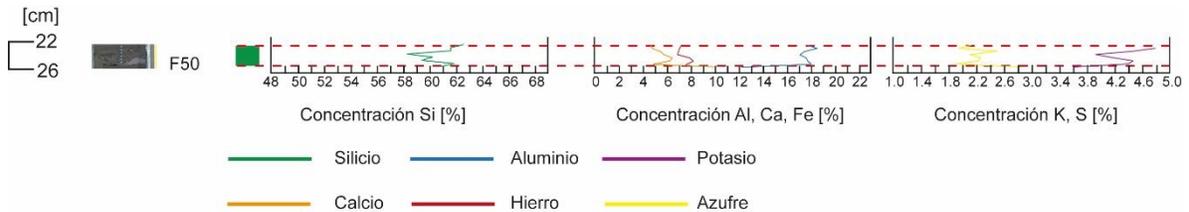
Gráfica 0-69 Granulometría Unidad XVIII

Su composición química consiste en 61,889% de silicio, 18,066% de aluminio, 4,900% de calcio, 7,692% de hierro, 4,397% de potasio, 1,924% de azufre y 0,749% de titanio.

A continuación, se observa una capa con claros signos de deformación y erosión, que se acuña hasta casi llegar al otro borde del testigo. Está conformada por un sedimento color

5R8/2 que tiene un espesor máximo de 10 mm, y uno mínimo de 1 mm. La granulometría observada en las muestras que lo contienen no es exacta para esta capa, pues contiene parte de la capa siguiente.

De este modo, la muestra F50 que contiene mayoritariamente a la capa deformada, muestra un tamaño promedio de grano de 99 μm , mientras la siguiente muestra uno de 20 μm . Ambas presentan mala selección.



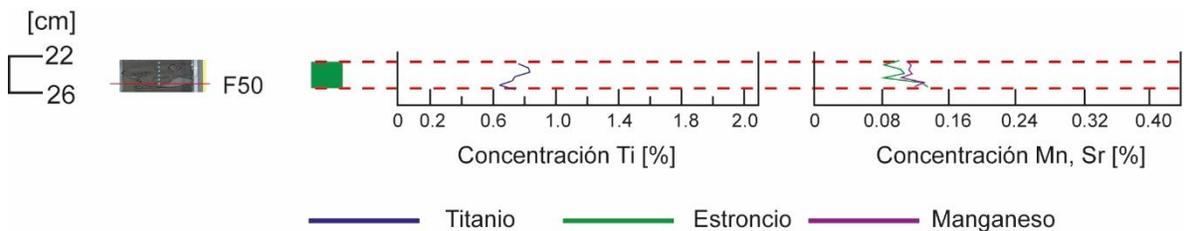
Gráfica 0-70 Distribución elementos mayores Unidad XVIII

La composición de la primera muestra no presenta grandes diferencias respecto a la anterior, salvo los elementos anómalos, detectándose cobre, zinc y circonio en proporciones de 0,032%, 0,020% y 0,032%.

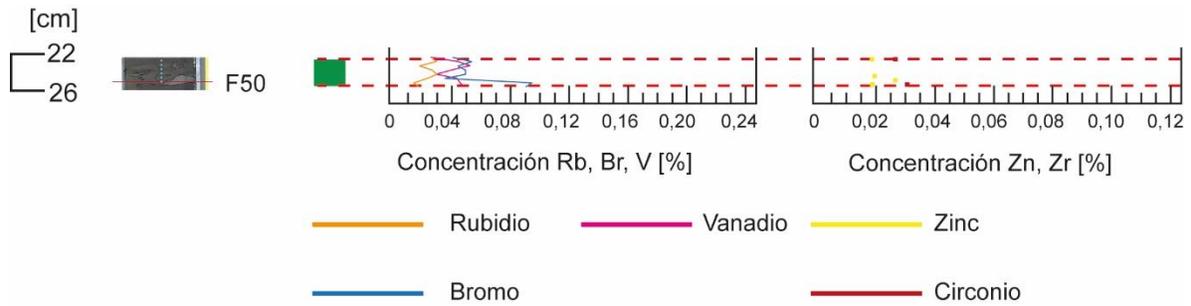
La siguiente se compone por 59,459% de silicio, 17,788% de aluminio, 6,275% de calcio, 8,252% de hierro, 4,474% de potasio, 2,238% de azufre y 0,843% de titanio.

También se detecta zinc y tántalo, con 0,028% y 0,299%.

Luego, se tiene una capa cuyo espesor varía debido a la capa anterior. Presenta un espesor que va desde los 20 hasta los 30 mm, de un sedimento color 10YR4/2, con una presencia importante de estructuras lenticulares pertenecientes a la capa anterior, además de restos orgánicos.



Gráfica 0-71 Distribución elementos menores Unidad XVIII



Gráfica 0-72 Distribución elementos traza Unidad XVIII

Está representada por las muestras F49 hasta F45, siendo la F47 la muestra que representa de forma mayoritaria a la capa, mientras las demás contienen las estructuras mencionadas. De este modo, la capa contenedora presentaría un tamaño medio de grano de 77 μm , mientras en las demás el tamaño promedio no baja de 120 μm , alcanzando un máximo en el techo, con un tamaño equivalente a 180 μm . Todas ellas presentan muy mala selección. Se observa una tendencia a aumentar en el contenido de silicio hacia el techo, al igual que el hierro y el titanio, siendo sus máximos 62,615%, 7,241% y 0,796%.

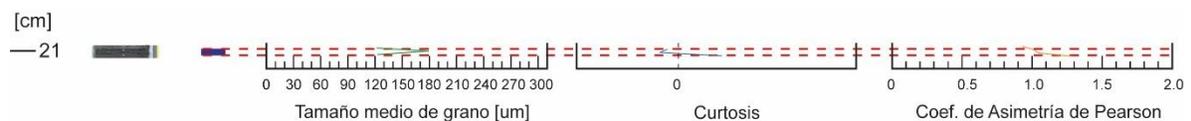
Los demás elementos son oscilantes con baja variabilidad, promediando 17,733% para el aluminio, 5,215% para el calcio, 4,938% para el potasio y 2,180% de azufre.

Se detectaron en la base los elementos magnesio e itrio, con 4,682% y 0,004%. En la muestra siguiente se detecta 0,232% de tántalo, mientras en la muestra superior se tiene zinc y circonio con 0,020% y 0,028%.

Unidad XIX

Esta unidad está definida de mejor manera en la tomografía inicial del testigo, cuando aún no se alteraba el volumen de este (De la Fuente, 2019). A partir de eso, se tiene durante la apertura, sólo 2 láminas que no se encuentran afectadas por alguna deformación.

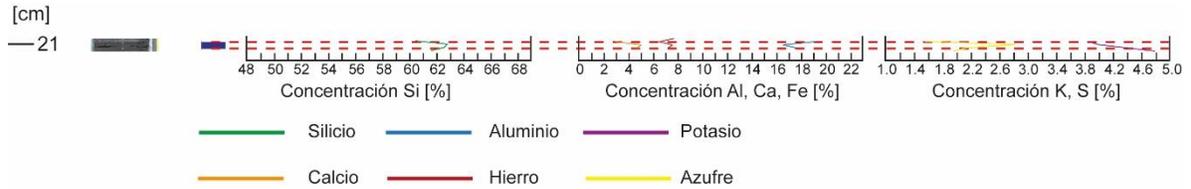
La basal tiene sólo 1 mm de espesor y se encuentra, aparentemente, discontinua. Su color en la escala de Munsell es 5R8/2, y el de la siguiente lámina, de 3 mm de espesor, es 10YR4/2.



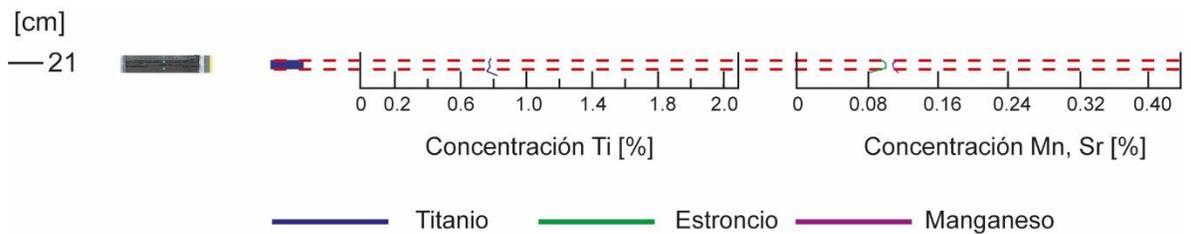
Gráfica 0-73 Granulometría Unidad XIX

El tamaño medio de grano de la muestra que representa a ambos sedimentos es 120 μm , con una muy mala selección.

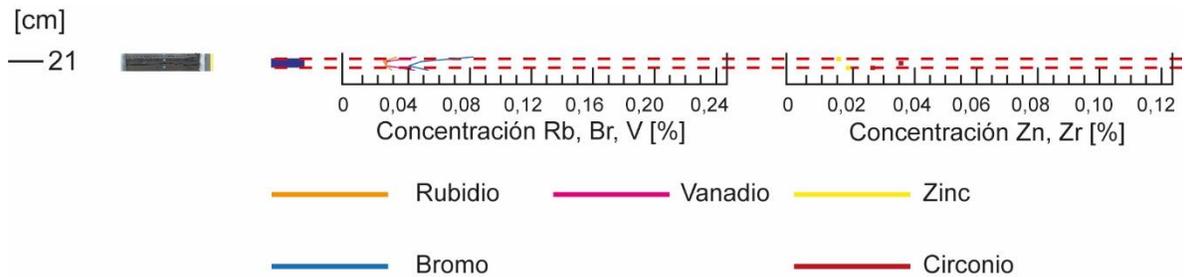
Su composición consiste en 62,846% de silicio, 16,568% de aluminio, 5,054% de calcio, 7,583% de hierro, 3,994% de potasio, 2,290% de azufre y 0,718% de titanio. El único elemento anómalo es el circonio, que se presenta con 0,037% de la muestra.



Gráfica 0-74 Distribución elementos mayores Unidad XIX



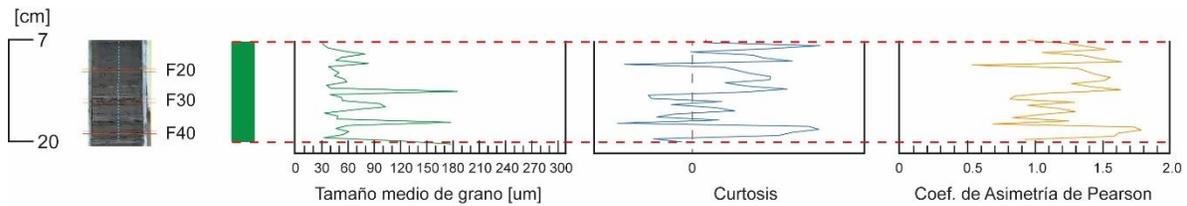
Gráfica 0-75 Distribución elementos menores Unidad XIX



Gráfica 0-76 Distribución elementos traza Unidad XIX

Unidad XX

Inicia con 4 mm de sedimento color 5R2/2. Luego sigue una lámina de 3 mm de espesor, conformada por sedimento color 5R8/2. Estas 2 capas se encuentran afectadas por la inyección de fluidos proveniente de la capa siguiente. Ésta consiste una capa de 4 mm, compuesta por sedimento de color 10YR4/2.



Gráfica 0-77 Granulometría Unidad XX

Todas estas láminas están representadas por una sola muestra de mayor potencia, correspondiente a la F43, el tamaño promedio de grano de este ejemplar es 34 μm , con una mala selección, como es esperable, por los sedimentos diferentes, traducida en la curtosis de la muestra. Su composición consiste en 60,484% de silicio, 19,205% de aluminio, 3,010% de calcio, siendo ésta la concentración más baja en el testigo, de este elemento. Además, presenta 6,558% de hierro, 3,858% de potasio, 1,554% de azufre y 0,667% de titanio.

Se detectan 2 elementos anómalos correspondientes a zinc con 0,017% y magnesio con 4,391%.

Continúa una lámina de espesor igual a 4 mm, compuesta por sedimento color 10YR6/6. Su aspecto es masivo y homogéneo. El tamaño medio de grano de la muestra que representa este sedimento es 55 μm .

Se compone por 62,197% de silicio, 17,201% de aluminio, 5,128% de calcio, 7,720% de hierro, 4,410% de potasio, 2,154% de azufre y 0,791% de titanio.

Se detecta además cobre y zinc, en concentraciones iguales a 0,033% y 0,023%, respectivamente.

Continúa una lámina acuñada hacia el centro con 4 mm de espesor máximo y color 5YR5/6. Ésta se ve representada en la muestra F41, junto a otra capa de 5 mm, color 10YR4/2, la que muestra un tamaño medio de grano de 63 μm .

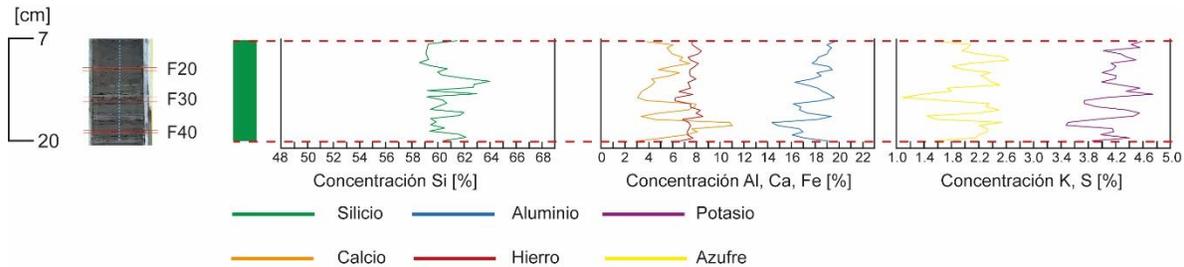
Se compone por un contenido de titanio alto, equivalente a 1,085%. El silicio se concentra en un 61,623%, mientras el aluminio lo hace en 16,106%. El calcio aumenta a 7,044% de calcio, el hierro se presenta con 7,307% de la muestra, también, 3,986% de potasio y 2,208% de azufre.

Posteriormente, se observa una intercalación de 5 capas, de 2 sedimentos diferentes:

- Lámina basal, media y terminal: Sedimento de color 10YR4/2, de potencia 15, 2 y 9 mm respectivamente.
- Láminas intermedias: Sedimento de color 5YR2/2, de espesores correspondientes a 1 y 0,3 mm, de la base al techo.

La lámina basal está representada por las muestras F40 a F38, mostrando un aumento en el tamaño medio de grano desde 47 μm hasta 176 μm en la lámina superior, empeorando su selección considerablemente, no obstante, su composición es estable en las 3 muestras. Éstas promedian un 59,813% para el silicio, 16,195% para el aluminio, 8,932% de calcio, 7,398% de hierro, 3,935% de potasio, 2,286% de azufre y 0,754% de titanio.

Se detectan varios elementos anómalos: el cobre se presenta en la muestra intermedia, con 0,027%, también se observa en promedio un 0,019% de zinc concentrado en las 2 muestras superiores. El circonio se presenta en una concentración promedio 0,040% concentrado en las 2 muestras hacia la base, también se observa 0,226% de tántalo que se presenta en toda la capa. Finalmente, también se detecta bario con 0,365%, en la muestra basal.



Gráfica 0-78 Distribución elementos mayores Unidad XX

La F37 representa el sedimento de las 2 láminas intermedias, sumada al sedimento anterior. Ésta muestra un tamaño medio de grano equivalente a 48 μm .

Se compone por 59,893% de silicio, 14,403% de aluminio, 10,821% de calcio, 7,403% de hierro, 3,516% de potasio, 2,543% de azufre y 0,785% de titanio. Se detecta zinc, circonio y tántalo, en concentraciones equivalentes a 0,019%, 0,026% y 0,224%.

La última lámina de la intercalación está contenida en la muestra F36 y F35.

Esta capa tendría un tamaño medio de grano de 50 μm , y se compondría por 59,478% de silicio, 18,252% de aluminio, 4,546% de calcio, 6,844% de hierro, 3,953% de potasio, 1,583% de azufre y 0,681% de titanio. Se detecta, además, 4,412% de magnesio.

A continuación, se presentan 3 mm de un sedimento arcilloso de color 5R8/2, con borde dentado en su base. A éste, le sigue otra capa de 3mm, compuesta también por sedimento arcilloso, pero de color 5R6/2, que contiene un lente de 1x1 mm^2 , de la misma composición de la lámina anterior. Ambas se encuentran contenidas totalmente en la F35, la que muestra un tamaño medio de grano de 66 μm , con mala selección.

Se compone por 62,007% de silicio, 17,394% de aluminio, 4,773% de calcio, 7,989% de hierro, 4,551% de potasio, 2,180% de azufre y 0,779% de titanio, y en la que se detecta zinc como único elemento anómalo con una concentración igual a 0,021%.

Siguen 12 mm de sedimento color 10YR4/2 representados por las 3 muestras siguientes. En éstas se ve un aumento considerable tanto en el tamaño medio de grano, como en las concentraciones de hierro y titanio, en la muestra intermedia, respecto a las que contienen los límites de la capa.

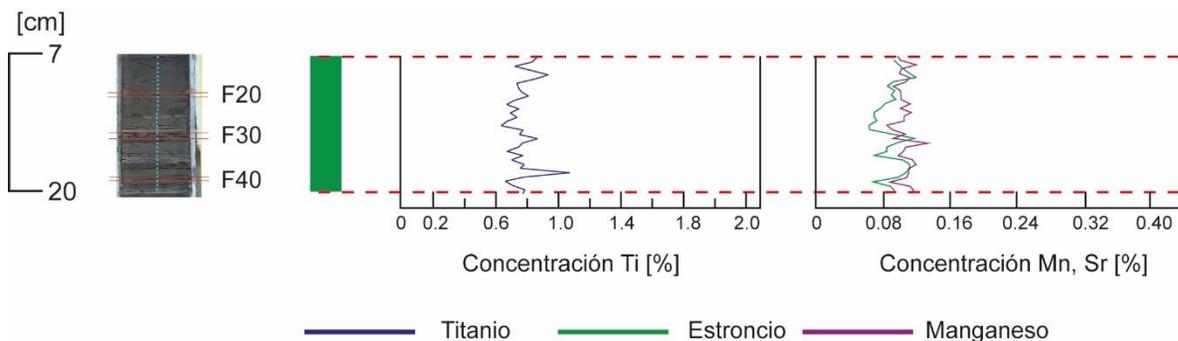
En la base se tiene un tamaño equivalente a 66 μm , para luego dar lugar a un tamaño de 103 μm y finalmente uno de 97 μm .

Salvo el hierro, el titanio y el calcio, los elementos se mantienen estables en torno a 60,517% para el silicio, 16,973% para el aluminio, 4,282% para el potasio y 2,328% de azufre.

El calcio aumenta en un 3% desde la muestra basal a intermedia, manteniéndose en las 2 muestras superiores con una concentración igual a 7,609%.

El hierro alcanza una concentración de 8.375% en la muestra intermedia, mientras en las otras 2 promedia 7,759%. El titanio, siguiendo el mismo patrón que el hierro, presenta 0,878% de máximo, promediando en las demás 0,769%.

Se detecta zinc y circonio, distribuidos de manera uniforme en la capa, además de tántalo en el techo. Las concentraciones con que se presentan estos elementos equivalen a 0,021%, 0,034% y 0,246%.



Gráfica 0-79 Distribución elementos menores Unidad XX

Luego se tienen 2 capas, antes de una fuerte deformación, y que no superan los 2 mm de espesor cada una. En la muestra representativa de éstas se tiene una composición 60,710% de silicio, 16,187% de aluminio, 7,995% de calcio, 7,525% de hierro, 3,742% de potasio, 2,358% de azufre y 0,785% de titanio. Además, se detecta zinc, circonio y tántalo, con 0,021%, 0,037% y 0,246%, respectivamente.

La intercalación que sigue tiene 10 mm de espesor en total, y corresponde a 4 capas de 2 sedimentos.

- La lámina basal corresponde a un sedimento arcilloso de color 5R8/2, de 1 mm de espesor, que se encuentra deformada también por el calco de carga de la segunda lámina de esta intercalación. La tercera lámina, tiene la misma composición y espesor que la basal.
- La primera lámina de arcilla limosa, y responsable de las estructuras de calco de carga, tiene color 10YR4/2 y espesor de 6 mm. La última lámina se compone por el mismo tipo de sedimento, pero ocupa sólo 2 mm de espesor.

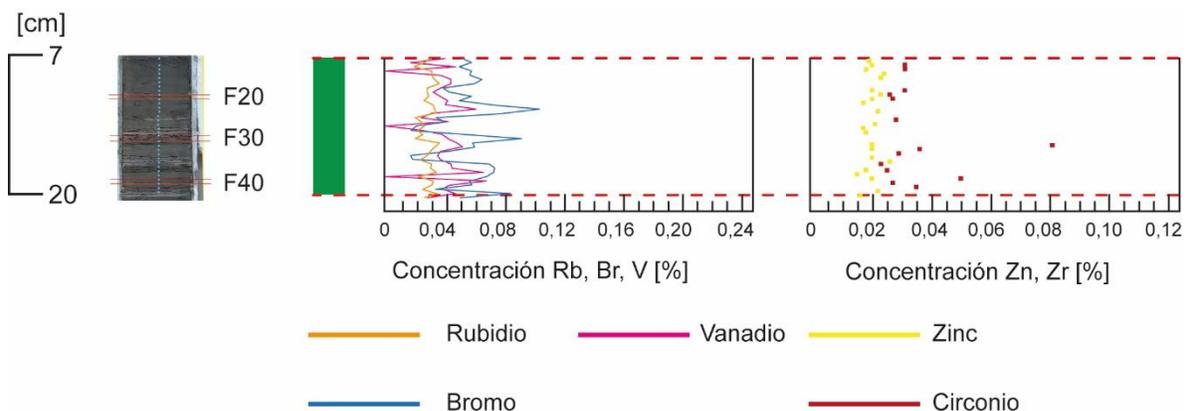
La composición de ésta es 60,391% de silicio, 18,396% de aluminio, 3,860% de calcio, 6,195% de hierro, 3,746% de potasio, 1,720% de azufre y 0,641% de titanio, con un tamaño medio de grano de 54 μm .

En ésta se observa una proporción de circonio mucho más alta, con 0,082%. También se detecta zinc y tántalo en proporciones similares a las mencionadas para las capas anteriores, no deformadas.

Finalmente, se presenta una capa de 80 mm de espesor, atribuida a una *homogenita*, con un número importante de estructuras lenticulares, sumado a restos orgánicos en la base.

La muestra basal es la que presenta el mayor tamaño medio de grano con 186 μm .

Luego se presenta una granulometría altamente variable, entre 31 μm mínimo y 80 μm máximo, con un promedio de 50 μm .



Gráfica 0-80 Distribución elementos traza Unidad XX

La composición es oscilatoria, pero con muy baja variabilidad respecto del orden de magnitud de los elementos. Los promedios de las concentraciones son 60,483% de silicio,

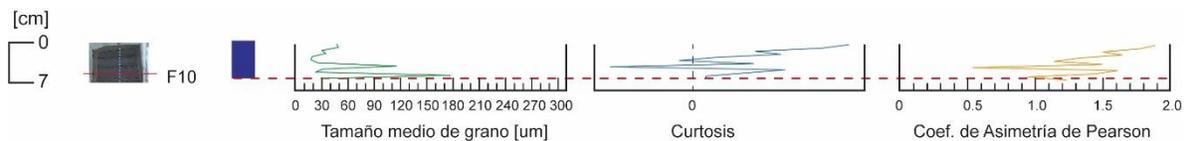
18,452% de aluminio, 5,3642% de calcio, 7,669% de hierro, 4,295% de potasio, 2,124% de azufre y 0,786% de titanio.

Hay una presencia casi en el total de las muestras, de zinc y tántalo, los que promedian 0,023% y 0,286%. Se detecta magnesio en la base, con 4,969%.

El circonio se detecta en la mitad de las muestras, promediando 0,030% y finalmente el cobre se presenta en la parte superior de esta capa en una concentración promedio de 0,039%.

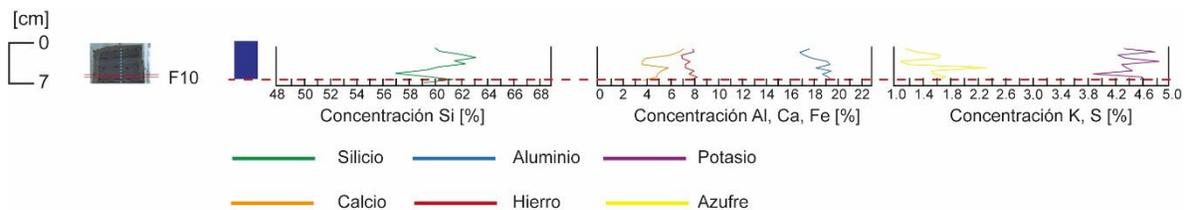
Unidad XXI

Inicia con 1 mm de limo arcilloso color 5YR2/2, sin estructuras, y de base en contacto nítido con la unidad XX. Le siguen 3 mm de arcilla color 5R8/2, totalmente homogénea. Ambas están contenidas en una misma muestra, que presenta un tamaño medio de grano de 35 μm . Ésta, además, se compone por 59,304% de silicio, 18,993% de aluminio, 6,057% de calcio, 7,645% de hierro, 4,433% de potasio, 2,081% de azufre y 0,792% de titanio.



Gráfica 0-81 Granulometría Unidad XXI

Luego, se depositan 20 mm conformados por un sedimento color 5YR5/6. La muestra basal presenta un tamaño promedio de grano de 178 μm , con una mala selección atribuible a la presencia de restos orgánicos. La granulometría es variable en las 4 muestras que representan la capa, presentando 110 μm en el techo y un promedio de 28 μm en las muestras intermedias.

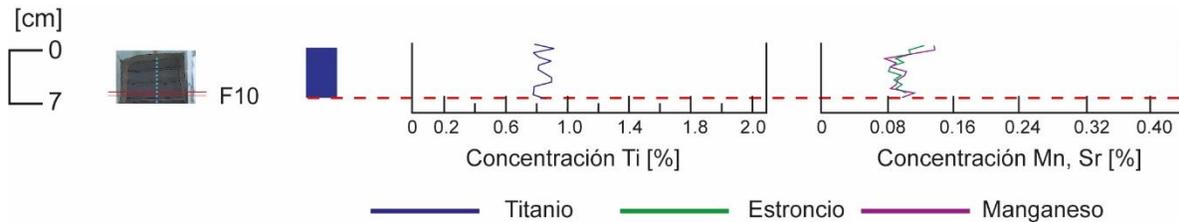


Gráfica 0-82 Distribución elementos mayores Unidad XXI

El silicio es menor en las muestras que presentan menor tamaño de grano, promediando 58,204%, mientras las 2 muestras en los extremos promedian 60,477%.

El aluminio se mantiene estable en torno a 19,390%. El calcio tiende a aumentar hacia el techo desde 3,851% hasta 5,392%. El hierro aumenta en 2 muestras, correspondientes a la F10 y F8. En éstas se presenta con 8,093% y 8,338% respectivamente.

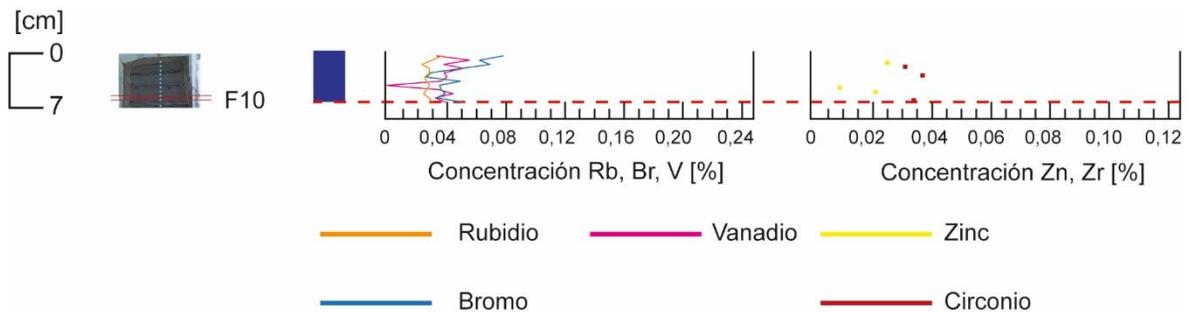
El potasio y el azufre, al igual que el aluminio, se mantienen estables en las 4 muestras promediando cada uno 4,397% y 1,626%.



Gráfica 0-83 Distribución elementos menores Unidad XXI

El titanio es más alto en las 2 muestras intermedias, en las que presenta exactamente la misma concentración, equivalente a 0,908%.

El manganeso al igual que el calcio, aumenta hacia el techo desde 0,085% hasta 0,101%. En la base se detectaron cobre con 0,028% y zinc con 0,020%. En la muestra siguiente se detecta circonio con 0,035%, y el tántalo continúa hasta la muestra superior, promediando 0,291%. El magnesio se presenta en la muestra F9 con 4,370%, y el zinc vuelve a presentarse en el techo con 0,021%.



Gráfica 0-84 Distribución elementos traza Unidad XXI

Sigue una capa color 10YR4/2, de 2 mm de espesor, que presenta una estructura lenticular, de 1 mm de alto y 25 mm de ancho. Luego continúan 12 mm conformado por sedimento color 5YR5/6. La muestra F7, representaría tanto la lámina de 2 mm, como la base de la capa siguiente. Ésta presenta un tamaño promedio de grano de 27 μm , mientras las 2 siguientes disminuyen hasta alcanzar 19 μm como tamaño medio.

El silicio, el aluminio y el potasio se muestran estables en las 3 muestras, no obstante, la menor concentración se observa en la muestra basal con 60,393% para el silicio, 18,327%

para el aluminio y 4,321% para el potasio. Las siguientes 2 muestras, promedian para estos elementos, 62,037%, 19,409% y 4,592%.

El calcio presenta una mayor concentración en la muestra basal, equivalente a 5,969% mientras en las 2 siguientes promedia 3,766% con una mínima variabilidad. El azufre se comporta de forma muy similar, concentrando en la base 2,345%, y promediando en las 2 siguientes 1,155%.

Tanto el hierro como el titanio se mantienen estables, sin mayor variabilidad en las 3 muestras, promediando en total 7,523% y 0,849%.

Posteriormente se deposita una lámina de 2 mm de espesor, compuesta por sedimento color 5R2/2, que está en contacto con una capa de 10 mm, que presenta color 5YR5/6, para finalizar con el límite de oxigenación, que en el testigo abierto era de espesor variable entre 5 y 7 mm, conformada por sedimento color 10YR4/2.

Se observan diferencias entre las primeras 2 muestras, respecto a las 2 últimas. En primer lugar, el centímetro basal de esta serie de láminas presenta una concentración mucho más alta de silicio, equivalente a 62,673%, con un tamaño medio de grano de 33 μm , mientras el centímetro superior, promedia, de forma respectiva un 60,318% y 49 μm .

El aluminio disminuye gradualmente en las primeras 3 muestras, desde 18,094% hasta 16,988%, presentando una última alza en la superficie con 17,790%.

El calcio, por su parte, aumenta en la misma dirección que lo hace el aluminio, incluyendo la muestra F1, desde 4,025% hasta 7,250%. Tanto el manganeso como el estroncio presentan un comportamiento similar.

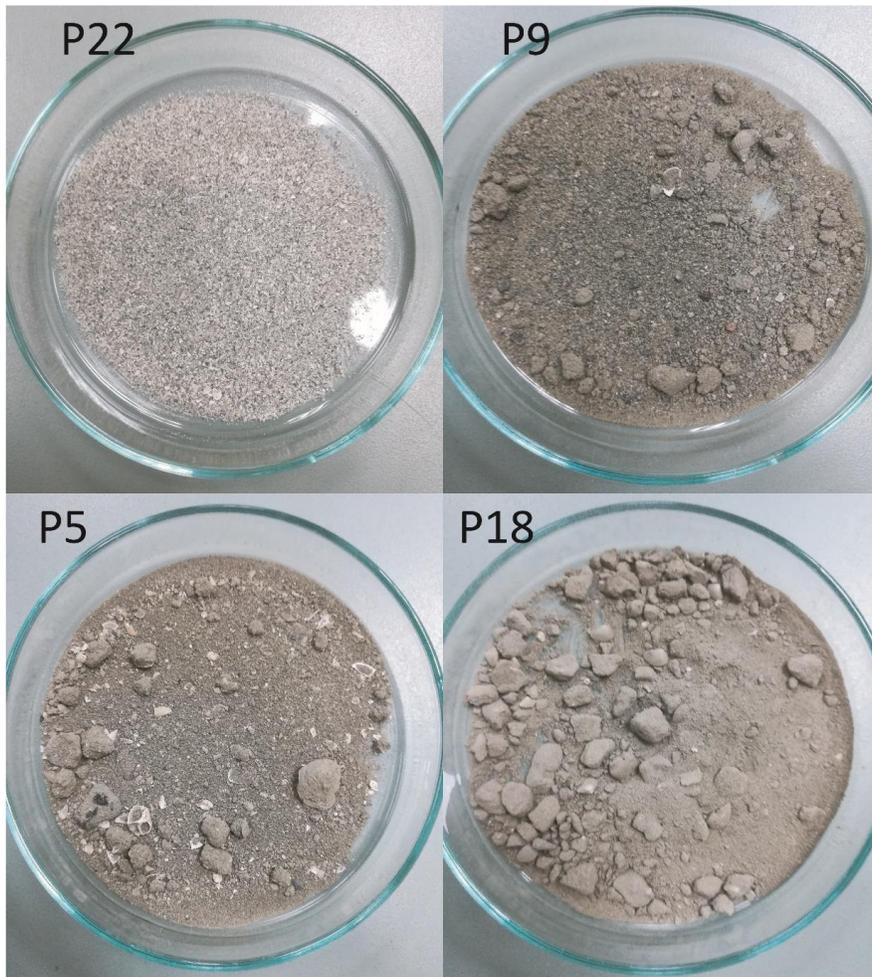
El hierro oscila con tendencia a aumentar, promediando 7,101% en el centímetro basal, y 8,064% en el centímetro superior. Asimismo, el titanio presenta una concentración promedio de 0,806% en la base y 0,860% en la superficie.

El cobre se concentra en su máximo en el centímetro superior, donde alcanza 0,082% en la muestra F2, y 0,037% en la F1.

El tántalo se detecta en el centímetro basal con un promedio de 0,313%. El circonio se presenta sólo en la capa de 10 mm, con 0,036%, mientras el zinc sólo se observa en el techo con 0,026%.

Anexo B: Muestras superficiales de la bahía próximas al litoral.

En las imágenes se destaca el contenido de bióclastos presentes en ellas.



Anexo C: Muestras representativas del sector central de la bahía.

En ellas se destaca la baja a nula presencia de bióclastos

