



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

GEOARQUEOLOGÍA DE TSUNAMIS HISTÓRICOS EN LA COSTA HIPERÁRIDA DE ARICA Y PARINACOTA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

DIEGO ALONSO MUÑOZ CUPITTY

PROFESOR GUÍA:
GABRIEL VARGAS EASTON

PROFESORA CO-GUÍA:
VALENTINA FLORES AQUEVEQUE

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:
DIEGO SALAZAR SUTIL

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto FONDECYT 1161547

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**
POR: Diego Alonso Muñoz Cupitty
FECHA: 17/10/2019
PROFESOR GUÍA: Gabriel Vargas Easton

GEOARQUEOLOGÍA DE TSUNAMIS HISTÓRICOS EN LA COSTA HIPERÁRIDA DE ARICA Y PARINACOTA

Las costas de Chile son periódicamente afectadas por tsunamis que resultan de los terremotos provocados por la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana a lo largo del margen continental. En particular, la ciudad de Arica históricamente ha sido afectada por tsunamis importantes como los eventos de 1604, 1868 y 1877, los que se vinculan con grandes sismos en la historia del norte hiperárido chileno (Mw 8.8 en 1868 y Mw 8.6-8.8 en 1877).

Este trabajo presenta los resultados de estudios geoarqueológicos en sedimentos no consolidados a través de la excavación de tres calicatas y trincheras aledañas a sitios arqueológicos en la región de Arica y Parinacota. Dos de estas trincheras se ubican al interior de la ciudad de Arica y una en Caleta Camarones. En estas se busca reconocer de depósitos conocidos como tsunamitas, los que son registros y evidencia de eventos de tsunami que han afectado las costas.

Se identificaron dos estratos interpretados como depósitos de tsunamitas y otros que potencialmente podrían serlo. Las facies que caracterizan dichos estratos consisten en arenas medias a gruesas que presentan contactos basales erosivos, canales erosivos, estratificación cruzada y convoluta además de altos contenidos de metales pesados y clastos desprendidos de niveles inferiores (*rip-up*). Estas tsunamitas se han asociado tentativamente a los eventos de tsunami de 1877 y/o 1868 y 1604.

Por otra parte, se comparan estos depósitos con otros eventos catastróficos, como tormentas y aluviones, descartándose ambos como responsables del origen de los mismos.

A partir de estos resultados y un análisis de documentos históricos, es posible correlacionar los relatos históricos con el registro sedimentario existente en la zona de estudio. Los estragos causados por tsunamis históricos son más graves para el primer evento que se registra en 1604 y el segundo en 1868, sin embargo, el tercer desastre de 1877 tuvo menores consecuencias denotando un aprendizaje por parte de la población.

Se concluye que la Región de Arica y Parinacota ha mostrado y sigue manteniendo una alta susceptibilidad de ser afectada por grandes sismos y tsunamis, y que, a pesar de que en el último siglo no se han registrado eventos de gran magnitud. Un ejercicio de revisión y alerta ante grandes episodios, considerando el registro geológico, es necesario para evitar catástrofes en el futuro.

Para mi Abuela Berta

AGRADECIMIENTOS

Fuerza de voluntad es el regalo más grande que uno puede darle a una persona, por eso estoy agradecido de toda la gente que se ha cruzado en mi camino y me ha regalado un poco o mucha.

Gracias a la familia Muñoz Urriola, más que nadie a mi padre que durante toda mi vida ha sido obelisco infranqueable frente a cualquier desafío que yo significara para él, entregándome toda su paciencia y amor de la manera más bruta y honesta que he visto. Gracias a mi tía Carmen y mi tío Daniel, que me han mostrado como vivir con alegría en todo momento. Gracias a mi abuela y a mi tía Brunilda y Bruna, a mis tíos Marco y Patty, por tenerme siempre en su pensar y preocupación.

Gracias a la familia Cupitty Anativia, a mi madre que me entrega su amor dulce e indómito con cada acción, me cuida hasta de maneras que yo no puedo darme cuenta. Junto con mi papá son la razón más grande que existe para que yo pueda estar escribiendo esto ahora. Gracias a mis dos tías Govy y Paola por siempre quererme como su hijo y recibirme con los brazos abiertos. Gracias a mis primos, en especial a la Fran por todos los buenos momentos que compartimos y las enseñanzas que he podido obtener de estos. Gracias a mis dos abuelos, Nelson y Berta por ser la red que nos mantiene a todos unidos y por enseñarme que la familia es lo más importante. Gracias a mi tía Teresa y mi tío Marcial por las infinitas lecciones de amor.

Gracias a mi hermano, eres mi orgullo y mi inspiración.

Gracias a mis amigos de la infancia, mis hermanos, el Zuela y el Vicho, por ser mis primeros compañeros en la vida y acompañarme hasta aquí siempre. Gracias a mis amigos de Rancagua, en especial al Pato, el Carpa y el Maxi, por mostrarme tan distintivas maneras de vivir y de disfrutar.

Gracias a mis compañeros de plan común, en especial al Soto, por la eterna compañía en los momentos de flaqueza, por la paciencia, el cariño y todo el gozo que compartimos y seguiremos compartiendo.

Gracias a mis muchachas y muchachos de geología, por hacer mi día a día, por estar en todas, por ser valientes e inspirarme a serlo cuando no me atrevía, en especial al Mende y la Arroz, sin ustedes, este trabajo no lo podría haber terminado.

Gracias a toda la comunidad del Departamento de Geología, hicieron los últimos 5 años en esta facultad el desenfreno más grande, siempre los recordaré con cariño y sed.

Gracias a todas las personas que en su quehacer diario se dieron el tiempo de regalarme una sonrisa, una conversación de pasillo, un abrazo o un consejo, la Blanca, la Rosita, la Mariela, la Vero, el Moise, la Jacky y la Weli, en especial a la Key, quien me ha acompañado a punta de chuchadas por todos los rincones que me escondo.

Gracias a la Katy y el Pelao, que han sido el abrevadero donde nos arrodillamos a beber por tantos años, entregando siempre un buen momento junto a cada lata. Gracias al vino y a la pilsen, por su eterna compañía y descanso.

Gracias a mis profesores, en especial a Gabriel, quien creyó en mí, mucho más que yo mismo y nunca mostró duda de mi capacidad de cumplir esta tarea. Gracias a la gente que colaboró con este trabajo, a Tomas y Ninoska en especial, quienes fueron mis tutores cuando no tenía idea que estaba haciendo. Gracias a la municipalidad de Arica por los permisos y facilidades para completar este trabajo.

Gracias a la ciudad de Arica, por recibirme en el desierto y mostrarme lo que es amar a tu pueblo, gracias a toda la gente que me recibió con cariño allá.

Gracias al mar por su magnificencia y su azote, que nunca nos falte curiosidad para querer entenderlo.

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Formulación del problema.....	1
1.1.1 Problema de investigación.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Ubicación y vías de acceso.....	3
1.4 Marco geológico-geomorfológico.....	5
1.4.1 Geología local	5
1.4.2 Geomorfología local.....	9
1.4.3 Geomorfología histórica	10
1.4.4 Contexto de los sitios	14
1.4.5 Contexto arqueológico	16
1.4.6 Contexto climatológico	18
1.4.7 Contexto sísmico	19
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
2.1 Parámetros para la identificación de eventos de tsunami en sedimento fino	21
2.1.1 Reconocimiento geomorfológico	21
2.1.2 Recolección de datos de terreno	21
2.1.3 Análisis sedimentológico: Granulometría y parámetros sedimentológicos	24
2.1.4 Análisis paleontológico: reconocimiento de microfauna.....	29
2.1.5 Análisis químico: espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF).....	30
2.1.6 Presentación de datos estadísticos	31
2.1.7 Recolección de archivos históricos	36
3 REGISTRO HISTÓRICO DE TSUNAMIS	37
3.1 Terremoto y tsunami de 1604	37
3.2 Terremoto y tsunami de 1868.....	39
3.3 Terremoto y tsunami de 1877	45
4 SEDIMENTOLOGÍA DE DEPÓSITOS DE TSUNAMIS.....	47
4.1 Observaciones de terreno.....	47

4.1.1 Observaciones geomorfológicas.....	47
4.1.2 Definición de facies.....	49
4.1.3 Estructuras sedimentarias.....	51
4.2 Registro granulométrico.....	55
4.2.1 Granulometría de clastos.....	55
4.2.2 Granulometría de matriz.....	58
4.2.3 Análisis estadístico granulométrico.....	59
4.3 Registro geoquímico y biológico.....	69
4.3.1 Análisis estadístico de geoquímica.....	73
4.4 Depósitos aluviales.....	76
4.5 Análisis estadístico mixto.....	78
5 DISCUSIÓN.....	81
5.1 Impactos de los grandes tsunamis en la ciudad de Arica.....	81
5.2 Registro de tsunamis históricos en la región de Arica y Parinacota.....	84
5.2.1 Morfología y sedimentología de eventos de oleaje extremo.....	84
5.2.2 Aspectos biológicos y geoquímicos.....	88
5.2.3 Caracterización de facies autóctonas.....	89
5.2.4 Cronología de eventos.....	90
5.3 Riesgo de tsunami en Arica.....	93
6 CONCLUSIONES.....	95
7 BIBLIOGRAFÍA.....	97
8 ANEXOS.....	91
8.1 Análisis de muestras sitio CC18.....	91
8.1.1 Granulometría Laser.....	91
8.1.2 Tamizaje.....	92
8.1.3 XRF.....	92
8.2 Análisis de muestras sitio PC18.....	93
8.2.1 Granulometría Laser.....	93
8.2.2 Tamizaje.....	94
8.2.3 XRF.....	94
8.2.4 Componente biológica.....	94
8.3 Análisis de muestras sitio PC218.....	95
8.3.1 Granulometría Laser.....	95
8.3.2 Tamizaje.....	96

8.3.3 XRF.....	96
8.3.4 Componente biológica.....	97
8.4 Figuras	98
8.4.1 Granulometría de clastos.....	98
8.4.2 Granulometría de matriz.....	101
8.4.3 Geoquímica.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contexto geodinámico regional en el norte de Chile, se muestran las unidades morfoestructurales principales. A: Borde costero y Cordillera de la Costa, se marcan las fallas que muestran actividad reciente, B: Depresión central, C: Precordillera y D: Cordillera principal y sus volcanes cuaternarios. Tomado de Vargas et al. (2005).	1
Figura 2. Mapa rutero de la zona de estudio, en rojo se marcan ambas zonas de estudio. Modificado de la carta rutera de la XV región, MOP, 2016.....	4
Figura 3 Mapa geológico de la bahía de Arica. Modificado de García, et al., 2004	7
Figura 4 Mapa geológico de la bahía de Camarones. Modificado de García, G. et. al, 2012.	8
Figura 5. Mapa topográfico de la ciudad de Arica. En rosado y celeste se demarcan los dos niveles de terrazas observados en terreno. Modelo de elevación y fotografía LANSAT obtenidos de Alaska Satellite Facility.	9
Figura 6. Mapa topográfico de la ciudad de Arica y las quebradas que desembocan en la ciudad. De norte a sur estas corresponden a la quebrada de Lluta, Azapa y Acha. Basemap de Arcgis. ...	10
Figura 7. Límite sur del sector de Las Chimbas, en el fondo se aprecia el Batallón Rancagua. Arica, alrededor del año 1945. Cortesía de Claudia Spoueys.	11
Figura 8. Mapa topográfico actual de la ciudad de Arica, se marcan en rojo el cauce del río San José, en naranja el Morro de Arica, en morado el Batallón Rancagua, en rosa el Cementerio de Arica y finalmente, en verde la zona de estudio Parque Centenario. Basemap de ArcGis.....	12
Figura 9. Carta de navegación de la costa de Arica, se resalta en naranja el Morro de Arica, en rosa el Cementerio de Arica y en negro la zona de Las Chimbas. Lartigue, J., 1824.	13
Figura 10. Fotografía panorámica de Arica desde el Morro, alrededor del año 1880. Cortesía de Claudia Spoueys.	14
Figura 11. Mapa topográfico del Parque Centenario. Los perímetros en rojo separan las etapas de la remodelación del Parque Centenario. En el sector 1 ya se completó la remodelación y actualmente está abierto al público. El sector 2 está actualmente en remodelación. El sector número 3 es la última etapa por comenzar su trabajo cuando la remodelación del sector 2 se complete. Las obras están actualmente detenidas.	15
Figura 12. Izquierda: Fotografía del humedal en Caleta Camarones. Derecha: Fotografía del escarpe donde se ubica el sitio de estudio.	15
Figura 13. Detalle de evidencias culturales en el Área próxima al Parque Centenario. Tomado de SECPLAN, Línea de base, 2018.	17
Figura 14. Canal subterráneo en el sitio histórico Parque Centenario 1. Tomado de SECPLAN, 2018.	18
Figura 15. Patrón de anomalías de temperatura observadas durante el fenómeno del Niño. Basado en datos de la oficina de meteorología HadISST, U.K.(tomado de Wallace & Hobs, 2006).	19
Figura 16. Mapa del margen suroccidental de Sudamérica mostrando grandes sismos históricos junto a su registro de rupturas. En rojo se denota el área de estudio. Modificado de Schurr et al. (2014).	20
Figura 17. Sección estratigráfica para el sitio PC-18 y puntos donde se llevó a cabo el muestreo (marcados en círculos rojos). Las líneas negras segmentadas indican los estratos o capas de la sección.	22
Figura 18. Sección estratigráfica para el sitio PC2-18 y puntos donde se llevó a cabo el muestreo (marcados en círculos rojos). Las líneas negras segmentadas indican los estratos o capas de la sección.	23
Figura 19. Sección estratigráfica para el sitio CC2-18 y puntos donde se llevó a cabo el muestreo (marcados en círculos rojos). Las líneas negras segmentadas indican los estratos o capas de la sección.	24
Figura 20. Tamices con mallas en la norma A.S.T.M del laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile.	25
Figura 21 Esquema del equipo Mastersizer 2000. (1) Colector óptico que recolecta la información	

de granulometría. (2) Dispensador de muestra, es el receptáculo donde se agrega la muestra para pasar al colector óptico. (3) Sistema computacional que maneja los datos recolectados posteriormente mediante el software Malvern. Tomado de Malvern Instruments, 2007.	26
Figura 22. Equipo MasterSizer 2000 del laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile.....	27
Figura 23. Lupa binocular Olympus del laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile	30
Figura 24. Equipo Shimadzu EDX-720 para espectrometría de fluorescencia de Rayos X de la Universidad de Chile.	31
Figura 25 Gráfico APC del sitio CC18 mostrando variables de selección TGP y metales pesados. Elaborado utilizando el macro de Excel XLStat.	34
Figura 26. Relación entre las dinámicas de transporte y poblaciones en una distribución acumulada de tamaño de grano para una muestra de arena marina en foreshore. Tomado de Visher, 1969.	35
Figura 27 Tipos de carga en el sedimento. Tracción es un arrastre de los granos por la superficie, la suspensión es el transporte de estos dentro del flujo y la saltación es el punto medio, involucrando pequeños saltos entre su arrastre por la superficie. Modificado de Griem, 2016. ..	36
Figura 28. Estado de la ciudad de Arica posterior al evento del año 1868. A: Arica arrasada por el evento, barcos llevados a tierra por el tsunami, habitantes acampando en los faldeos del Morro. L' Illustration Journal Universel, París 24 de octubre de 1868, Kozak Collection en Fernández Canque (2007). B: Arica después del tsunami de 1868 en Vicente Dagnino, El Corregimiento de Arica, 1535 1784, Arica, Imprenta La Época, 1909, p.130 en Fernández Canque (2007). C: El tsunami arrasa con el Wateree, Frank Leslie's Illustrated Newspaper, Nueva York 3 de Octubre de 1868, p.30, Kozak Collection en Fernández Canque (2007). D: Arica después de la catástrofe, Illustrated London News, Londres, 24 de Octubre de 1868, pp.396 – 397 en Fernández Canque (2007).	40
Figura 29. Embarcaciones que se encontraban en la bahía de Arica el día del evento de 1868. A: Corbeta América después del tsunami, Centro Histórico de la Armada de EE.UU. U.S Naval Historical Center, Sacado de Fernández Canque (2007). B: Wateree con corbeta América en el fondo y mulas incautadas cerca de la proa. Tomada de U.S. Naval Institute Proceedings, Annapolis, julio de 1926, p. 1.323, sacado de Fernández Canque (2007). C: Fotografía del casco de la fragata América en la costa de Arica a 100 metros del Parque Centenario, gentileza de James Goff. D: Fotografía de la caldera de la embarcación Wateree en la costa de la ciudad de Arica, camino al río Lluta, en el fondo se puede apreciar el Morro, fotografía propia.	42
Figura 30. Propagación de las olas de tsunami del terremoto del 1868 en Arica. Ferdinand Von Hochstetter. Tomado de Fernandez Canque (2007).....	44
Figura 31 Modelo 3D del Parque Centenario, se puede visualizar el cambio de altura entre ambas terrazas marinas. Elaboración mediante software AgiSoft	47
Figura 32 Mapeo de terrazas marinas en la ciudad de Arica utilizando el software de teledetección ENVI basado en modelos de elevación digital y imágenes LANSAT de la Alaska Satellite Facility. En rojo se marca la zona de estudio del Parque Centenario.	48
Figura 33 Topografía y mapa de la ciudad de Arica. Jr: Jurásico, Ms: Mioceno superior, Pl: Plioceno, Ps: Pleistoceno, Qt: Cuaternario. En rojo se demarca la zona de estudio del Parque Centenario. Confección mediante uso de software ArcGis en conjunto con la hoja n°84 (García, et al., 2004).	49
Figura 34 Facies de arena. A: Muestra del sitio PC18, arena media. B: Muestra del sitio CC18, arena gruesa. Imágenes tomadas utilizando el microscopio Olympus del laboratorio de sedimentología de la Universidad de Chile.	50
Figura 35 A: Facies orgánica, sitio PC2-18, B: Facies calcárea, sitio PC2-18, C: Facies aluvial, sitio PC-18 y D: Facies humedal, sitio PC2-18. Imágenes tomadas utilizando el microscopio Olympus del laboratorio de sedimentología de la Universidad de Chile.....	50
Figura 36. Sección y esquematización para el sitio PC-18. Los puntos donde se llevó a cabo el muestreo son marcados por círculos rojos y las líneas negras segmentadas indican los estratos o	

capas de la sección.....	52
Figura 37. Sección y esquematización para el sitio PC2-18, se marca con blanco la sección de canal arqueológico encontrado dentro del sitio, no se llevó a cabo muestreo dentro de esta. Los puntos donde se llevó a cabo el muestreo son marcados por círculos rojos y las líneas negras segmentadas indican los estratos o capas de la sección.....	53
Figura 38. Sección y esquematización para el sitio CC-18. Los puntos donde se llevó a cabo el muestreo son marcados por círculos rojos y las líneas negras segmentadas indican los estratos o capas de la sección.....	53
Figura 39. Fotografías de morfologías en la facies de arena de los sitios estudiados. A: Facies calcárea fragmentada por la facies suprayacente de Arena Marina, Sitio PC2-18. B: Rip-up en la facies calcárea (PC-1809), suprayacente a la facies de arena, sitio PC-18, muestras PC-1805 a PC-1808 corresponde a la facies de arena (línea punteada roja) y las muestras PC-1810 a PC-1813 a la facies de humedal. C: Clasto de rip-up de la facies de humedal dentro de la facies de arena marina en el sitio CC-18, muestra CC-1802A. D: Clastos de rip-up en el sitio PC18 (PC-1814). Las líneas rojas muestran los niveles de arena estudiados.	54
Figura 40. Fotografías de canales con fragmentos de metal incrustados. A: Sitio PC2-18. B: Sitio PC-18. Con trazas rojas se marcan las separaciones entre diferentes estratos	54
Figura 41. Fotografías de facies de arena marina para los sitios estudiados. En blanco se resaltan estratificación convoluta y cruzada; en negro se demarca la facies de arena. A y B: Sitio CC-18, se aprecia estratificación cruzada y convoluta (CC1802A hasta CC1804). C: Canal histórico relleno de sedimentos de arena, se puede ver en blanco la estratificación convoluta. D: Nivel de arena en sitio PC18 (PC1805 a PC1808) se puede apreciar clasto de gran tamaño junto a estratificación convoluta en línea blanca punteada.....	55
Figura 42. Esquematización de columna y resultados para granulometría de clastos para el sitio PC-18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la curtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.	56
Figura 43. Esquematización de columna y resultados para granulometría de clastos para el sitio PC2-18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la curtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.	57
Figura 44. Esquematización de columna y resultados para granulometría de clastos para el sitio CC-18 Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la curtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.	57
Figura 45. Esquematización de columna y resultados para granulometría de matriz para el sitio PC-18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la curtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.	58
Figura 46. Esquematización de columna y resultados para granulometría de matriz para el sitio PC2-18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la curtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.	59
Figura 47. Esquematización de columna y resultados para granulometría de matriz para el sitio CC-18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la curtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.	59

Figura 48. Columna esquemática del sitio de estudio CC18 junto a gráficos de distribución de frecuencia acumulada. Los gráficos fueron confeccionados utilizando el macro de Excel Gradistrat (Blott, S. & Pye, K, 2001).	60
Figura 49. Gráfico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos gruesos del sitio CC-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	61
Figura 50. Gráfico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos de matriz del sitio CC-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	62
Figura 51. Columna esquemática del sitio de estudio PC18 junto a gráficos de distribución de frecuencia acumulada. Los gráficos fueron confeccionados utilizando la macro de Excel Gradistrat desarrollada por Blott, S. & Pye, K; 2001.	63
Figura 52. Gráfico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos clásticos del sitio PC-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	64
Figura 53. Gráfico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos de matriz del sitio PC-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	65
Figura 54. Columna esquemática del sitio de estudio PC218 junto a gráficos de distribución de frecuencia acumulada. Los gráficos fueron confeccionados utilizando la macro de Excel Gradistrat desarrollada por Blott, S. & Pye, K; 2001.	66
Figura 55. Gráfico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos de clastos del sitio PC2-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	67
Figura 56. Gráfico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos de matriz del sitio PC2-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	68
Figura 57. Fotografías de los hallazgos de foraminíferos en los sitios de estudio de Arica. A: Muestra PC1803, B: Muestra PC1804, C: Muestra PC1808, D: Muestra PC18202 y E: Muestra PC18203.	70
Figura 58. Esquematación de columna y resultados de elementos mayores junto a fracción orgánica para el sitio PC18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. Se incluye en anexos una versión de página completa.	71
Figura 59. Esquematación de columna y resultados de elementos mayores junto a fracción orgánica para el sitio PC218. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. Se incluye en anexos una versión de página completa.	72
Figura 60. Esquematación de columna y resultados de elementos mayores junto a fracción orgánica para el sitio CC18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. Se incluye en anexos una versión de página completa.	72
Figura 61. Diagrama APC de parámetros geoquímicos para el sitio CC18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	73
Figura 62. Diagrama APC de parámetros geoquímicos para el sitio PC18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	74
Figura 63. Diagrama APC de parámetros geoquímicos para el sitio PC218. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	75
Figura 64. Fotografías de la ciudad de Arica durante el mes de febrero de 2019. A y D: Cauce río San José a metros de la desembocadura en el mar, sitio donde se tomó la muestra AA1901. B: Puente frente a la desembocadura del río San José durante aluvión en Arica, se puede apreciar como el agua arrastra basura, quedando ésta atrapada en el puente ferroviario. C: Caudal del río San José a la altura del pueblo de Azapa.	76
Figura 65. Comparación de composición de elementos mayores para los sitios de Parque Centenario (PC18 Y PC218) y el sedimento del aluvión de 2019 (AA1901).	77
Figura 66. Comparación de tamaño de grano en matriz para los sitios de Parque Centenario (PC18 Y PC218) y el sedimento del aluvión de 2019 (AA1901).	77
Figura 67. Esquematación de la columna estratigráfica del sitio PC-18 en conjunto con	

fotografías de los hallazgos arqueológicos hechos en el sitio.	78
Figura 68. Diagrama APC multivariable para el sitio CC18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	79
Figura 69. Diagrama APC multivariable para el sitio PC18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	80
Figura 70. Diagrama APC multivariable para el sitio PC218. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.	80
Figura 71. Plano histórico de la ciudad de Arica antes del terremoto y tsunami de 1868. Sacado de Fernandez Canque (2008) en William Bollaert, Antiquarian, Ethnological and Other Researches in New Granada, Ecuador, Peru and Chile, Londres. Trubner &Co., 1860.	82
Figura 72. Mapa topográfico de la ciudad de Arica. La estrella roja representa la ubicación del casco de la Corbeta América visto en la Fig. 27. El rectángulo rojo indica el área de estudio del Parque Centenario.	83
Figura 73 Características de un evento de tsunami vs. Uno de tormenta, tomado de Robke & Vott, 2017	85
Figura 74 Cronología propuesta para los sitios estudiados en la ciudad de Arica, las líneas negras indican los estratos correlacionados entre ambas trincheras.	91
Figura 75. Manzanas urbanas expuestas a inundación por tsunami. Tomado de Lagos (2014)	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mallas en norma A.S.T.M y su equivalencia en milímetros.....	25
Tabla 2. Tabla para clasificación de granos acorde a la escala de Udden – Wentworth, 1922 ...	28
Tabla 3. Clasificación para diferentes valores de selección, Folk & Ward, 1957.....	28
Tabla 4. Clasificación para valores de asimetría acorde a Folk & Ward, 1957.....	29
Tabla 5. Clasificación para valores de asimetría acorde a Folk & Ward, 1957.....	29
Tabla 6. Cuadro comparativo de características sedimentológicas para los sitios estudiados ...	66
Tabla 7. Tabla resumen de los resultados de elementos mayores indicando de manera cualitativa las correlaciones entre elementos y preferencia de estos por facies marinas o de humedal. Las secciones con guion indican que no se puede generalizar una preferencia.	74
Tabla 8. Tabla recopilatoria de los datos numéricos recopilados para los tsunamis de 1868 y 1877 en Arica.....	81

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del problema

La ciudad de Arica, ubicada en la Región de Arica y Parinacota, ha sido históricamente azotada por tsunamis, los cuales se asocian a sismos ocasionados por una convergencia de 6.7 cm/año (Schurr *et al.*, 2014) entre las placas de Nazca y Sudamericana. Entre los eventos sísmicos históricos, tres son de alta importancia por el impacto generado: el terremoto de 1604, el terremoto de 1868 (Mw 8.8) y el de 1877 (Mw 8.6-8.8), dado su amplio rango de ruptura y por los daños que ocasionaron a la ciudad (Compte & Pardo, 1991; Ruiz *et al.*, 2018) (Fig. 1).

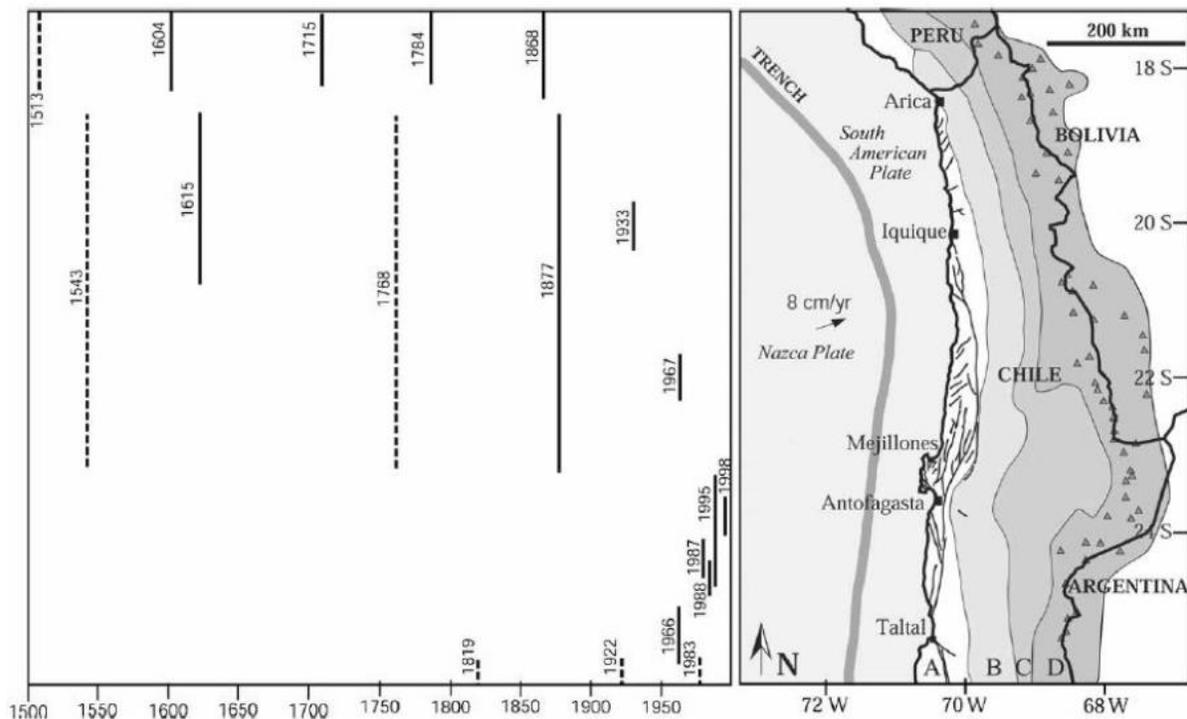


Figura 1. Contexto geodinámico regional en el norte de Chile, se muestran las unidades morfoestructurales principales. A: Borde costero y Cordillera de la Costa, se marcan las fallas que muestran actividad reciente, B: Depresión central, C: Precordillera y D: Cordillera principal y sus volcanes cuaternarios. Tomado de Vargas *et al.* (2005).

Los tsunamis pueden ocasionarse de variadas maneras: terremotos, remociones y deslizamientos submarinos, actividades volcánicas, perturbaciones meteóricas e impactos de meteorito. De todas estas, los terremotos son la principal causa, correspondiendo al gatillante del 82.3% de los tsunamis (Schielein *et al.*, 2017 en B.R.Röbke & A. Vött, 2017). Los mecanismos mediante los cuales un terremoto puede generar un tsunami son tres: (1) una perturbación en la columna de agua por modificación repentina del suelo marino, (2) leves movimientos causados por las ondas Rayleigh que son la perturbación cortical de un sismo y, finalmente, (3) una perturbación indirecta por remociones en masa submarinas o continentales causadas por el sismo (B.R. Röbke & A. Vött, 2017).

Un tsunami puede ser identificado en el registro sedimentario a través de las tsunamitas, un tipo de depósito particular de estos eventos. Las tsunamitas son sedimentos alóctonos de alta energía que se depositan en las costas durante la

ocurrencia de los tsunamis en el continente. Estos depósitos presentan características sedimentarias únicas: disconformidades basales erosivas, granodecrecencia hacia arriba y hacia el continente, espesores leves en sus capas (< 20cm), adelgazamiento hacia el continente, alto contenido fosilífero marino y *rip-ups* de capas subyacentes (B.R. Röbbke & A. Vött, 2017).

Bajo esta línea de trabajo, es necesario estudiar el tipo de depósitos que estos tsunamis generan en el registro estratigráfico, con el fin de comprender mejor la ocurrencia de estos eventos en el pasado y su impacto en la ciudad de Arica en particular. En este sentido, resulta relevante analizar además cuáles son las condiciones geomorfológicas sobre las cuales se emplaza la ciudad, ya que la morfología del relieve donde un tsunami se deposita influye de gran manera en la morfología de las tsunamitas que este genera. Entonces, esto permitirá comprender cómo las catástrofes naturales de este tipo han influido en el desarrollo de la ciudad de Arica.

Este trabajo busca determinar cuáles son las características principales de los depósitos generados por tsunamis históricos, principalmente los de 1604, 1868 y 1877 en la costa de Arica como también evaluar su impacto dado el contexto geomorfológico de la ciudad. Esto se conseguirá mediante análisis multiproxi de los potenciales depósitos de tsunamis en perfiles estratigráficos en la ciudad de Arica, en particular del Parque Centenario en el norte de la ciudad. En paralelo, se llevará a cabo el mismo procedimiento en el humedal de Camarones, con el fin de evaluar a escala regional el registro geológico. Lo anterior se complementa con una revisión histórica del impacto de grandes tsunamis en la región.

1.1.1 Problema de investigación

La investigación de depósitos de tsunami en la actualidad es una disciplina joven y particularmente en el norte hiperárido de Chile existen antecedentes acotados (p.e. León, *et al.*, 2018; LeRoux & Vargas, 2005; León, *et al.*, 2019). Por otro lado, a partir de variados indicadores multi-proxy es posible identificar un depósito de tsunami (LeRoux & Vargas, 2005; Goff, *et al.*, 2012), sin embargo, no se conoce cuáles de estos indicadores son más relevantes para cada zona del país. Por este motivo, al plantearse una hipótesis de investigación, es apropiado considerar las características particulares de la región de estudio.

En el registro geoarqueológico del Parque Centenario se distinguen capas anómalas, las que corresponderían a tsunamis que han afectado la costa de Arica. Su análisis en terreno y posteriormente en laboratorio pretende dilucidar una cronoestratigrafía de los mayores tsunamis históricos que han afectado la ciudad. Esto, sumado a una pesquisa de relatos históricos de eventos catastróficos relacionados a tsunami permitirá reevaluar el impacto de los eventos de 1604, 1868 y 1877.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Reconocer y caracterizar las facies de tsunami en la línea de costa de la Región de Arica y Parinacota vinculándolos con su contexto geomorfológico, estratigráfico, sedimentológico, paleontológico y arqueológico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los registros sedimentológicos ubicados en el Parque Centenario y Caleta Camarones y vincularlos al contexto geomorfológico en el cual estos se encuentran dispuestos.
- Determinar una estratigrafía de eventos de tsunami históricos en las costas de Arica y Parinacota basado en la evidencia científica recolectada para cada sitio.
- Analizar el impacto de los mayores tsunamis históricos en Arica vinculando los resultados obtenidos del registro geoarqueológico con los relatos históricos.

1.3 Ubicación y vías de acceso

El área de estudio se ubica en la ciudad de Arica, que se encuentra entre las coordenadas $18^{\circ} 28' 36.97''\text{S}$ y $18^{\circ} 25' 30.34''\text{S}$; y $70^{\circ} 18' 57.56''\text{O}$ y $70^{\circ} 18' 17.46''\text{O}$. Esta se encuentra en la XV región de Arica y Parinacota, siendo su capital. La zona en cuestión corresponde al Parque Centenario, emplazado a dos cuadras de la playa Chinchorro hacia el continente, y su acceso es por Avenida Luis Beretta Porcel, tomando la salida hacia el Oeste pasada la escalera Chinchorro. Este es un sector perteneciente a la municipalidad de Arica y que actualmente se encuentra en remodelación, abarcando un área de $\sim 0,12\text{ km}^2$. Se encuentra ubicado en el sector conocido como Chinchorro, donde existía un humedal en la ciudad y actualmente es un sector árido costero (Fig. 2).

Parte del área de estudio se encuentra en la Bahía de Camarones, entre las coordenadas $19^{\circ} 11' 08.74''\text{S}$ y $19^{\circ} 11' 45.84''\text{S}$; y $70^{\circ} 16' 23,02''\text{O}$ y $70^{\circ} 16' 02.33''\text{O}$. Esta bahía es una caleta pescadora con ocupación poblacional y presenta una zona de humedal. Su acceso es por la Ruta 5 Norte, tomando el desvío por la ruta A-306 en el Km 1966.

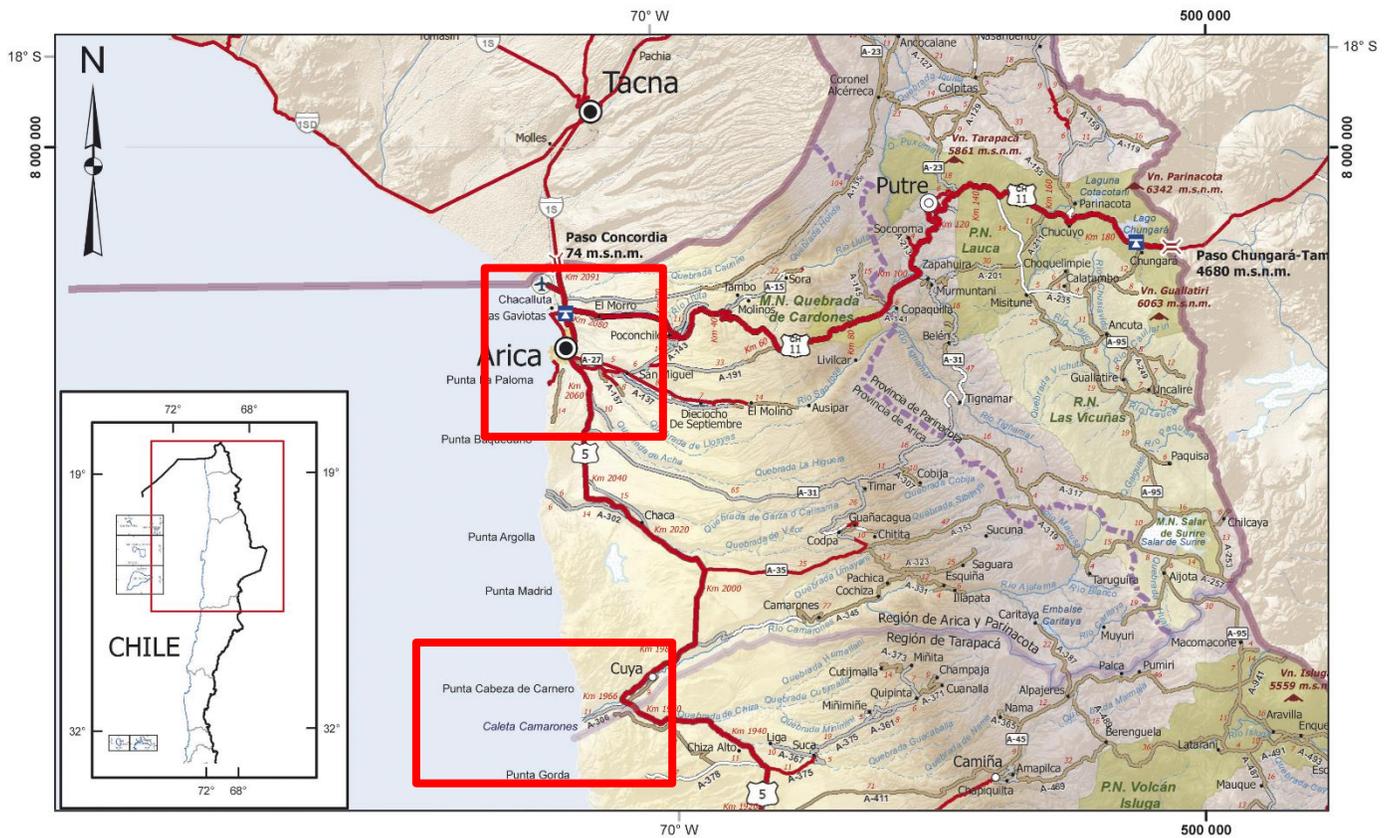


Figura 2. Mapa rutero de la zona de estudio, en rojo se marcan ambas zonas de estudio. Modificado de la carta rutera de la XV región, MOP (2016).

1.4 Marco geológico-geomorfológico

1.4.1 Geología local

De acuerdo con la Hoja n°84 de Arica (García, *et al.*, 2004) (Fig. 3), en la Bahía de Arica aflora la formación Camaraca de edad jurásica. Los afloramientos de esta formación tienen una potencia de 4.000 m de composición ígnea extrusiva, más específicamente lavas andesíticas, en parte basálticas de colores verde oscuro, gris y pardo rojizo y, en menor proporción, intercalaciones de lavas basálticas, tobas y rocas sedimentarias. La sucesión es monótona, con capas de lavas hasta decamétricas y continuas.

La ciudad está edificada sobre un sustrato de depósitos fluviales con edad pleistocena correspondientes a ripios y gravas clastosoportadas, semiconsolidados, con intercalaciones de arenas y limos. Estos depósitos se distribuyen a lo largo de los cauces mayores de quebradas activas o intermitentes: Lluta, Azapa, Vítor y Camarones. Las gravas se presentan generalmente imbricadas y los clastos son de origen predominantemente volcánico con una matriz arenosa o limosa con paleocanales métricos.

En la parte norte de la ciudad, donde se ubica el Parque Centenario, se distribuye una franja de hasta 1 km de ancho, desde la línea de costa hasta la cota de 20m correspondientes a depósitos litorales del Cuaternario. Estos depósitos consisten en arenas de playa actuales y de manera subordinada, los depósitos de playa antiguos alzados. Esta franja se ve limitada por el oriente por un escarpe de abrasión marina formado de los depósitos fluviales del Pleistoceno (Fig. 3).

Las arenas que componen los depósitos litorales están semiconsolidadas, son de granos finos a grueso, bien seleccionados y de colores grises a pardos incluyendo ocasionalmente fragmentos de líticos y conchas. Tienen una estratificación moderadamente definida. En las desembocaduras de los ríos Lluta y San José estas arenas tienen clastos líticos de diámetro hasta 50 cm, bien redondeados, de subsféricos a esféricos y con origen principalmente volcánico.

LEYENDA

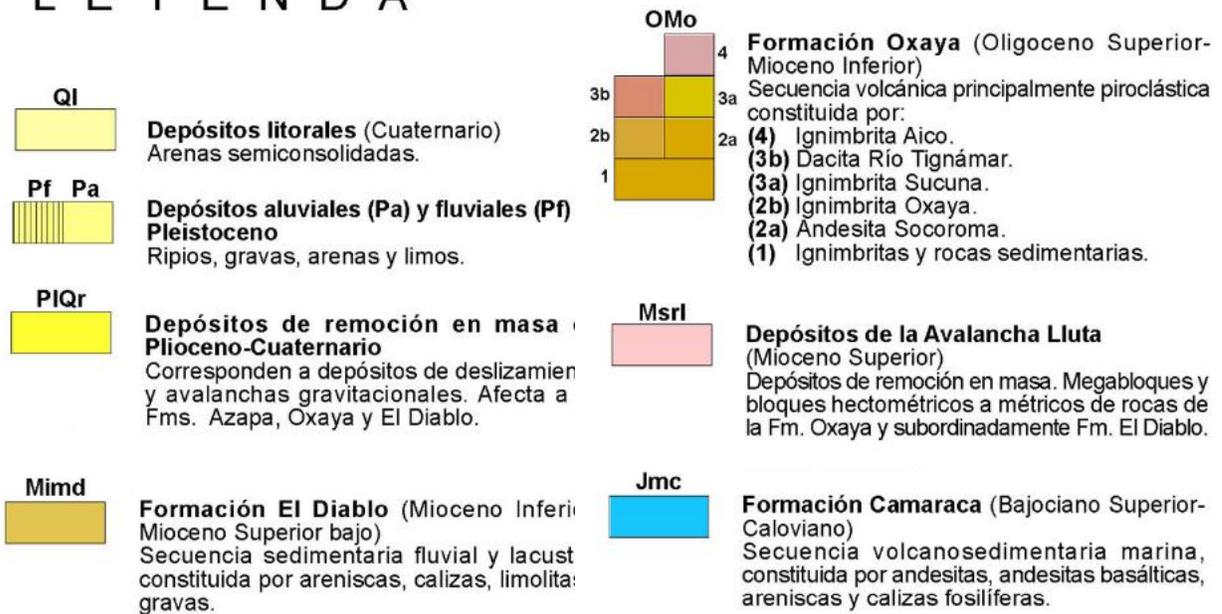


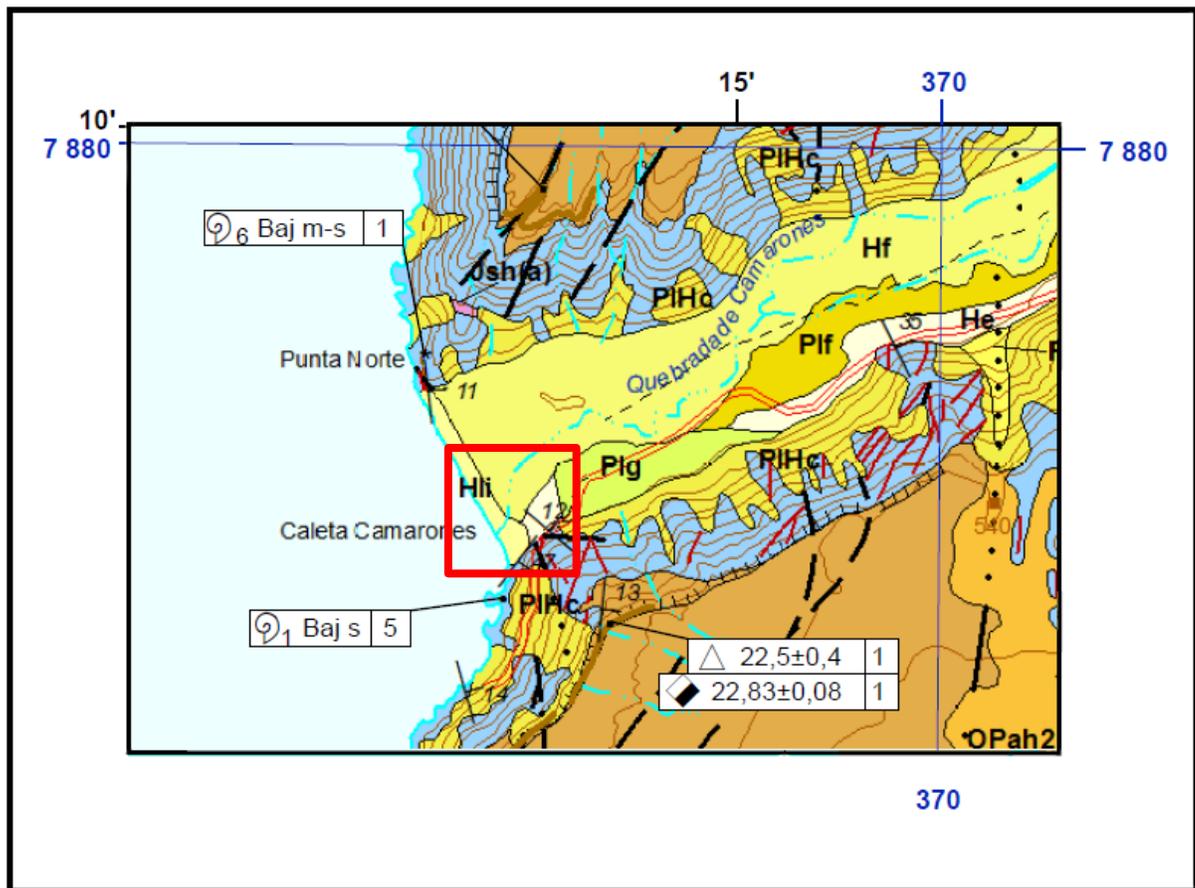
Figura 3 Mapa geológico de la bahía de Arica. Modificado de García, et al. (2004)

Finalmente, se presenta un contenido orgánico en las arenas litorales consistente de restos de conchas de bivalvos: *Mulinia edulis* y *Mesodoma donacium*, indicando una deposición durante el Cuaternario (Frassinetti, com. oral, 2001; Tabla 12 en García, G. et al., 2004), permitiendo separarlos de los depósitos fluviales Pleistocenos.

En lo que respecta a la Caleta Camarones, acorde a la Carta Cuya (García, G. et al., 2012) (Fig.4) esta se encuentra sobre sedimento fluvial del Pleistoceno y Holoceno. En el caso de los depósitos del Pleistoceno estos corresponderían a gravas clastosoportadas, semiconsolidadas con arenas y limos intercalados. Estos se encuentran bien estratificados y con mala a moderada selección con clastos redondeados a subangulosos y generalmente imbricados. En el valle fluvial forman terrazas de 20 a 30 metros por sobre el lecho actual de este. Por otro lado, los depósitos del Holoceno corresponden a gravas, arenas y limos con mala selección (clastos de hasta 2m), bien estratificados y con espesores variables de hasta 50 metros. Localmente, en quebrada camarones, estos depósitos del Holoceno se intercalan con tobas de ceniza datadas en 1,0 +/- 0,5 Ma (Muzzio, 1986, 1987) las cuales se cortan en las quebradas donde se acumulan los depósitos fluviales (Hf). En las inmediaciones de la Caleta Camarones, los depósitos coluviales del Pleistoceno – Holoceno contienen restos de sitios arqueológicos datados en aproximadamente 7.000 años (Niemeyer et al., 1984).

En lo que respecta a roca estratificada, el valle fluvial de la Caleta Camarones se encuentra encajonado por rocas del Jurásico correspondientes a la formación Cuya. El miembro presente consiste de lavas andesíticas, tobas y rocas sedimentarias calcáreas. Esta sucesión es monótona y de gran potencia, llegando a contener coladas de lava con espesores de hasta 80 metros las cuales presentan un aspecto macizo. Aflorando puntualmente en el escarpe norte de la caleta, se aprecia un intrusivo hipabisal de composición diorítica a andesítica asociado a cuerpos plutónicos del Jurásico superior.

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA



ESCALA 1:100.000

LEYENDA

<p>Hf</p> <p>Depósitos fluviales (Holoceno) Gravas, arenas y limos, bien estratificadas. Gravos clastosoportadas con clastos redondeados e imbricados.</p> <p>PIHc</p> <p>Depósitos coluviales (Pleistoceno-Holoceno) Depósitos caóticos, mal seleccionados, de gravas, arenas y limos. Gravos predominantemente clastosoportadas que incluyen bloques métricos.</p> <p>PIf</p> <p>Depósitos fluviales del Pleistoceno Gravas, arenas y limos, bien estratificadas. Gravos clastosoportadas con clastos redondeados e imbricados.</p>	<p>Jmc</p> <p>(a) (b)</p> <p>Jsh</p> <p>(a) (b) (c)</p>	<p>Formación Cuya (Bajociano-¿Caloviano?) (b) Sucesión volcánica y sedimentaria, marina. (b) Brechas sedimentarias, conglomerados, areniscas, limolitas y tobas andesíticas de color gris oscuro. (a) Lavas andesíticas, basálticas y dacíticas, con intercalaciones de tobas andesíticas, areniscas, calizas, limolitas y conglomerados.</p> <p>Intrusivos hipabisales del Jurásico Superior Stocks y filones. (a) Dioritas, monzodioritas y rocas andesíticas, de textura inequigranular a porfídica. (b) Monzodioritas, monzodioritas cuarcíferas y dioritas cuarcíferas, de textura porfídica. (c) Monzogranitos y monzonitas cuarcíferas, de textura porfídica.</p>
--	---	--

Figura 4 Mapa geológico de la bahía de Camarones. Modificado de García, G. et. al. (2012).

1.4.2 Geomorfología local

Dentro de la zona de estudio, se han podido identificar diferentes geoformas, en primer orden, se identifican dos terrazas marinas sobre las cuales se edifica la ciudad (Fig. 5). La primera de estas terrazas marinas se encuentra a la cota 20 ms.n.m. Esta terraza es fácilmente identificable en terreno, se extiende por la parte norte de la ciudad hasta el Río Lluta en las afueras de ésta.



Figura 5. Mapa topográfico de la ciudad de Arica. En rosado y celeste se demarcan los dos niveles de terrazas observados en terreno. Modelo de elevación y fotografía LANSAT obtenidos de Alaska Satellite Facility.

Por otro lado, existen otras geoformas de alta relevancia para el estudio que son las quebradas fluviales por las cuales transitan o transitaban cauces fluviales. Existen tres de estas quebradas (Fig. 6) de las cuales solo dos se encuentran activas en este momento. En la zona norte de la ciudad, como ya ha sido mencionada antes, se encuentra la quebrada de Lluta la cual actualmente se encuentra activa. En el centro de la ciudad se congregan la quebrada de Azapa y la quebrada de Acha. La quebrada de Azapa, actualmente activa, es la que transporta el principal cauce fluvial de la ciudad en forma del río San José, esta quebrada se encuentra canalizada artificialmente en su sección más cercana al mar. La quebrada de Acha actualmente no transporta ningún cauce.

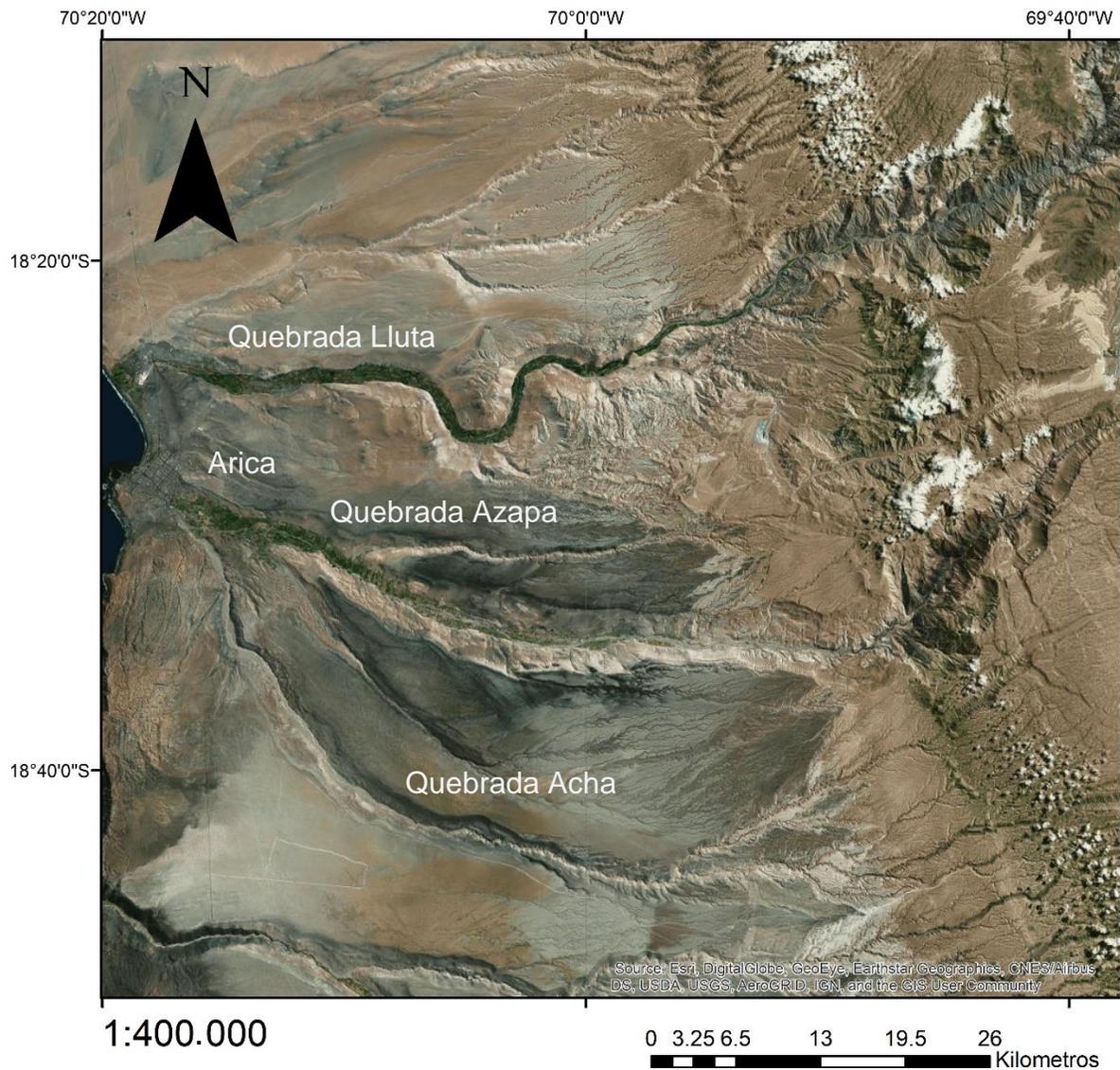


Figura 6. Mapa topográfico de la ciudad de Arica y las quebradas que desembocan en la ciudad. De norte a sur estas corresponden a la quebrada de Lluta, Azapa y Acha. Basemap de Arcgis.

1.4.3 Geomorfología histórica

La ciudad de Arica tiene una historia de constante cambio, esto debido a los múltiples embates que ha sufrido durante su historia ya sea por terremotos, tsunamis o conflictos sociopolíticos. Estos cambios se han visto reflejados también en la planificación urbana de la ciudad, existiendo variados relatos de sus cambios (Ballore, 1915; Fernández, 2007). Uno de estos cambios que es de alta relevancia para este estudio es la existencia del sector conocido en la ciudad como Las Chimbas: un sector de humedales ubicado directamente al norte de la ciudad antigua de Arica limitado en su sección sur por el cauce del río San José (Fig. 7).



Figura 7. Límite sur del sector de Las Chimbas, en el fondo se aprecia el Batallón Rancagua. Arica, alrededor del año 1945. Cortesía de Claudia Spoueys.

En la actualidad el sector de Las Chimbas ya no es un humedal, sino que un sector árido costero por sobre el cual se ha expandido la ciudad. Es también en este sector donde se ubica la zona de estudio del Parque Centenario.

En un mapa topográfico de la ciudad actualmente en conjunta de una carta de navegación histórica del año 1824 (Fig. 8 y Fig. 9, respectivamente). Se demarcan cuales son los sitios emblemáticos de la ciudad.

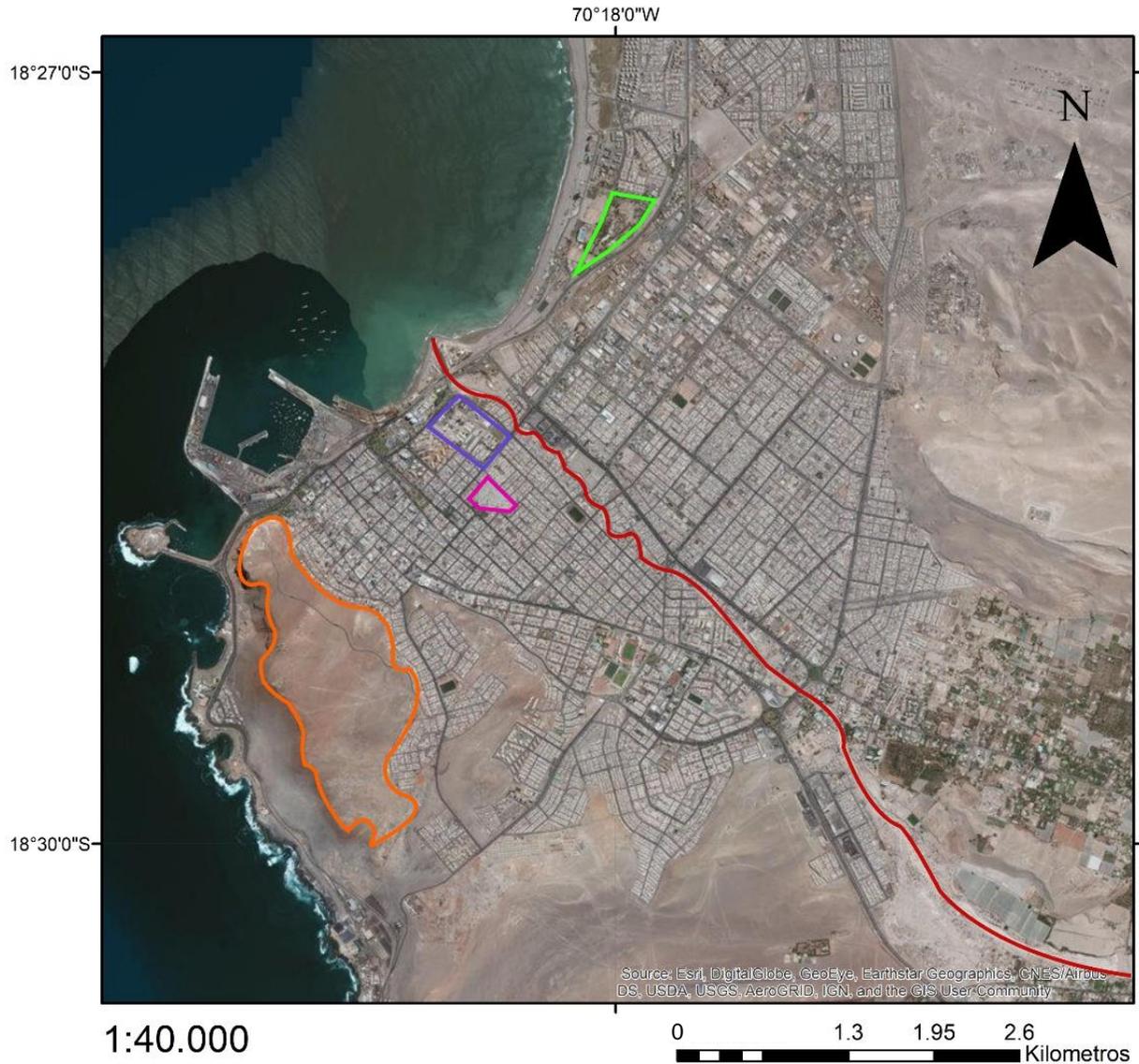


Figura 8. Mapa topográfico actual de la ciudad de Arica, se marcan en rojo el cauce del río San José, en naranja el Morro de Arica, en morado el Batallón Rancagua, en rosa el Cementerio de Arica y finalmente, en verde la zona de estudio Parque Centenario. Basemap de ArcGis.

Utilizando estos sitios como referencia es posible distinguir algunas características clave del entorno al superponerlo con una carta de navegación del año 1824 (Fig. 9). En primer lugar, la ciudad es de menor tamaño, siendo tan solo un villorrio. En el sector norte de este se puede distinguir el cementerio de Arica, el cual ha estado en esta ubicación desde los principios de la ciudad. Entre el cementerio y la ciudad se puede apreciar un flujo de agua ilustrado en la carta; este es discontinuo y se puede estipular sobre la proveniencia de este, siendo un posible origen la quebrada de Acha, esta quebrada, como se puede ver en la figura 6, se origina en la precordillera, lo que explica su actual condición seca, ya que no es alimentado estacionalmente por las lluvias altiplánicas.



Figura 9. Carta de navegación de la costa de Arica, se resalta en naranja el Morro de Arica, en rosa el Cementerio de Arica y en negro la zona de Las Chimbas. Lartigue, J. (1824).

En segundo lugar, se identifica también un flujo al norte del cementerio. Este flujo es continuo y presenta un cuerpo de agua cercano a su desembocadura. Comparando este flujo con la ubicación actual del cementerio respecto al río San José (Fig.8), este flujo es el actual río San José proveniente de la quebrada de Azapa. Actualmente el río San José se encuentra canalizado artificialmente, estas obras fueron llevadas a cabo en la década de los '50 en Arica (Víctor Mérida, com. oral, 2019). El batallón Rancagua corresponde al límite sur de Las Chimbas. La figura 10 muestra una vista de Arica desde el Morro, hacia el norte, alrededor del año 1880. Se puede ver en la parte norte de la ciudad un cuerpo de agua que se puede correlacionar con el ilustrado en la carta de navegación además del batallón Rancagua.

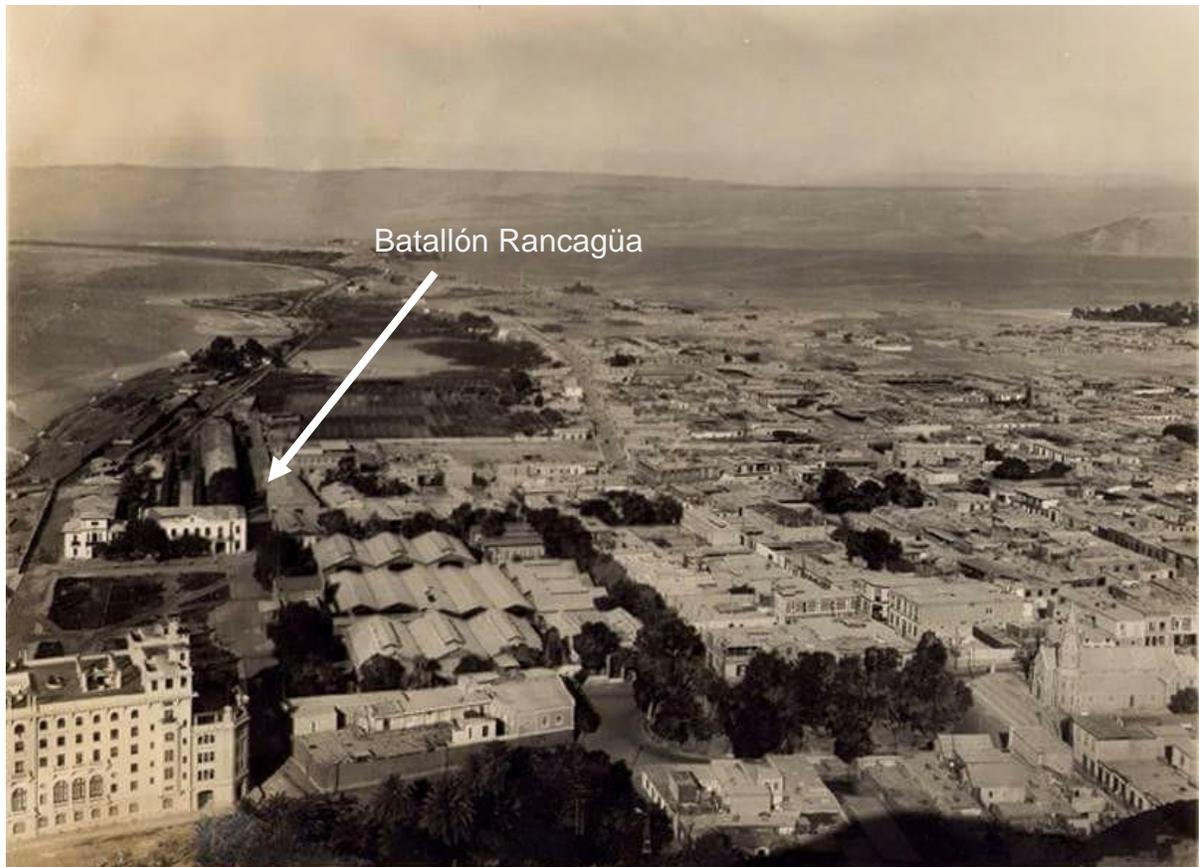


Figura 10. Fotografía panorámica de Arica desde el Morro, alrededor del año 1880. Cortesía de Claudia Spoueys.

1.4.4 Contexto de los sitios

Como ya se ha mencionado, la principal zona de estudio de este trabajo, el Parque Centenario, se ubica en el sector norte de Arica. Este parque se encuentra actualmente en remodelación por la Municipalidad de Arica (Fig. 11) y durante el desarrollo de esta remodelación se han descubierto múltiples sitios de interés arqueológico y geológico. De estos sitios, dos de ellos han sido analizados mediante múltiples técnicas de laboratorio debido a su mayor interés geológico en la búsqueda de depósitos de tsunami en esta investigación.

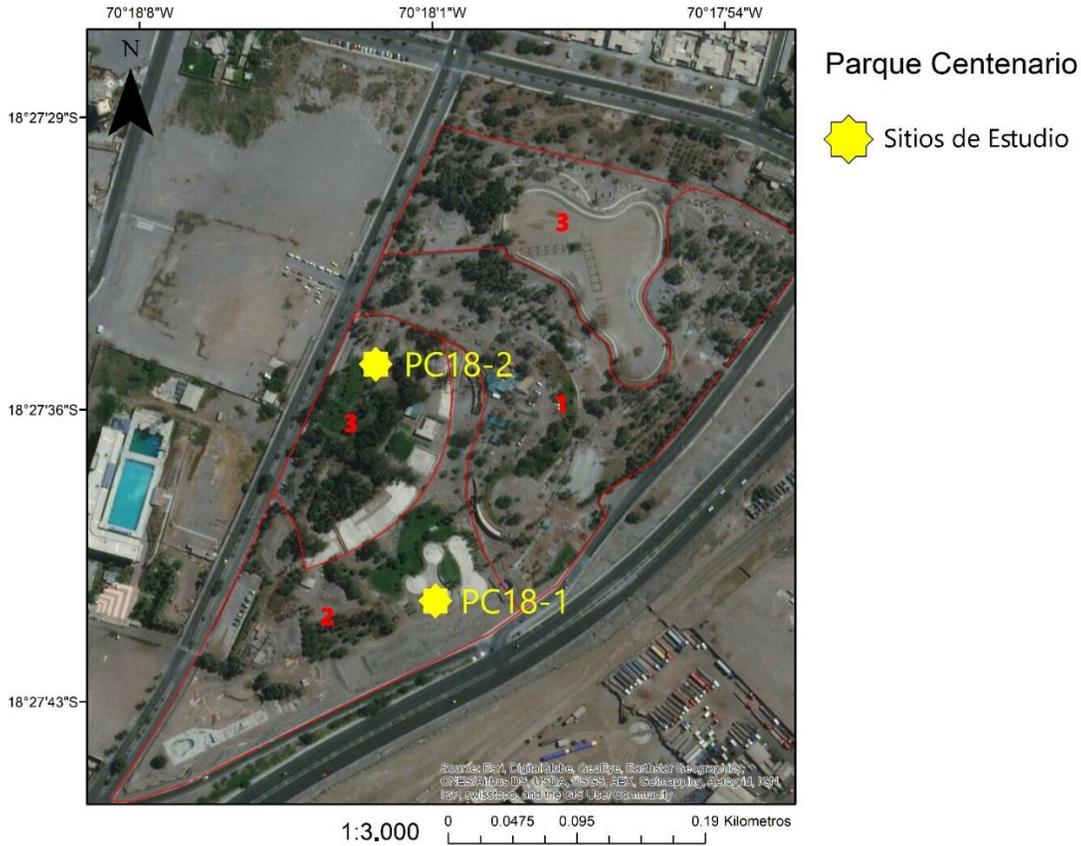


Figura 11. Mapa topográfico del Parque Centenario. Los perímetros en rojo separan las etapas de la remodelación del Parque Centenario. En el sector 1 ya se completó la remodelación y actualmente está abierto al público. El sector 2 está actualmente en remodelación. El sector número 3 es la última etapa por comenzar su trabajo cuando la remodelación del sector 2 se complete. Las obras están actualmente detenidas.

La Caleta Camarones es una localidad pequeña y presenta una reducida población la cual tiene su sustento económico principalmente basado en la pesca. Se ubica dentro de un valle fluvial que recibe aportes esporádicos de caudal, principalmente durante los periodos estivales de lluvia en el altiplano ya que la quebrada se origina en la alta cordillera. El sitio en cuestión corresponde a un escarpe en la parte más continental de la playa (Fig. 12). Además de ser un ambiente costero, la Caleta Camarones presenta un humedal que cubre la parte posterior de la playa, el cual presenta variaciones estacionales en su extensión.

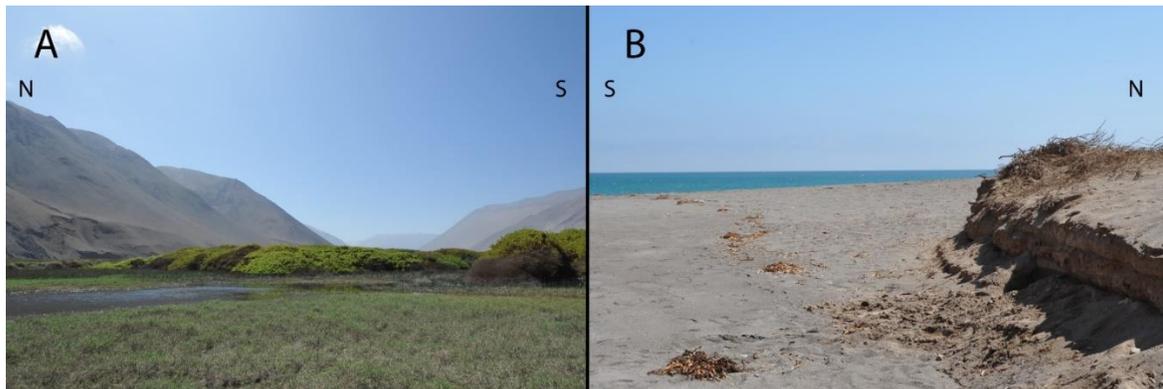


Figura 12. Izquierda: Fotografía del humedal en Caleta Camarones. Derecha: Fotografía del escarpe donde se ubica el sitio de estudio.

1.4.5 Contexto arqueológico

El extremo norte de Chile ha sido ocupado por diferentes culturas durante una larga extensión de tiempo. En particular, Arica presenta un amplio espectro de evidencias de estas culturas en sus hallazgos arqueológicos, remontándose incluso hasta el año 10.500 a.C, periodo en que la economía se basa en la caza- recolección llegando hasta periodos más tardíos donde se aprecian técnicas más elaboradas de producción con la llegada de la colonización (1540 d.C.) (SECPLAN, 2018).

Este periodo, posterior a la llegada de los españoles, es de interés para este trabajo, debido a que, como ya se ha visto, los depósitos estudiados que se piensan pertenecen al periodo histórico posterior a este evento. Al momento del inicio de la colonización la región, esta ya posee un avance cultural importante y para los nuevos ocupantes éste sitio se volvería una articulación para el circuito de la plata, siendo este el sostén de la ocupación del Virreinato de Perú y del comercio hispano en América.

Posterior a la ocupación española, Arica se mantuvo siendo un importante puerto basando ahora su riqueza en el comercio de guano y salitre; sin embargo, todo esto fue destruido durante el terremoto y posterior tsunami de 1868. Finalmente, Arica se adjuntó al estado chileno durante la Guerra del Pacífico a finales del S. XX y el posterior tratado de 1929, fijándose de esta manera los actuales límites entre Perú y Chile. Bajo una nueva administración la región prosperó basado en nuevas redes comerciales, como la línea Ferroviaria Arica - La Paz.

Las evidencias arqueológicas en el sitio de Parque Centenario son extensivas y no se limitan simplemente al Parque, sino que en sus alrededores se puede evidenciar la presencia de sitios de interés: uno de estos sitios es la maestranza Chinchorro, ubicándose a 50 metros al sur del Parque Centenario. Esta maestranza contiene evidencia arqueológica desde el Arcaico-Formativo (3.000-500 a.C) con múltiples individuos enterrados hasta hallazgos pertenecientes a la construcción del Ferrocarril Arica-La Paz.

Durante la elaboración de la línea base arqueológica para la costa de Arica se registraron en sectores cercanos al parque 24 evidencias culturales y en las inmediaciones de este, dos sitios arqueológicos y un hallazgo puntual (Fig. 13). Los sitios arqueológicos correspondientes a CHI_R047PC y CHI_r048 abarcan evidencia de épocas prehispánicas y post hispánicas con cerámicas decoradas y no decoradas. El hallazgo puntual, correspondiente a CHI_r046, es una cerámica con cronología indeterminada.



Figura 13. Detalle de evidencias culturales en el Área próxima al Parque Centenario. Tomado de SECPLAN, Línea de base. (2018)

Las evidencias localizadas dentro del sector Parque Centenario, consisten en múltiples sitios de los cuales algunos han sido cubiertos para su protección y avance en la remodelación del parque. Actualmente y desde el año 2011 que se comenzó la labor en el parque, se reconocen cuatro sitios arqueológicos importantes: PC-1, PC-2, PC-3 y PC-4.

El sitio PC-1 corresponde a un canal subterráneo (Fig.14) ubicado en el conocido para este estudio como sitio PC18-2. Este canal ubicado a un metro de profundidad tiene una estructura rectangular conformada por roca. La estructura tiene un ancho de 90 cm por un alto de 60 cm y es de orientación Este-Oeste.



Figura 14. Canal subterráneo en el sitio histórico Parque Centenario 1. Tomado de SECPLAN. (2018)

Durante la excavación para instalación de cañerías en el sector se hizo el hallazgo del sitio PC-2, el cual tiene una cantidad de 789 evidencias arqueológicas consistentes en botijas y cerámicas de edades prehispánicas tardías con atribuciones Incas y Altiplánicas hasta el periodo republicano. Este sitio se encuentra actualmente cubierto y está ubicado en el centro del Sector 1 del parque (Fig. 11).

Ubicado al sur del Parque y fuera de sus límites de construcción se encuentra el sitio PC-3 denominado “Skate Park”. Este sitio registra evidencias culturales de restos óseos y fragmentos cerámicos atribuidos al Intermedio Tardío que se expanden por un corte vertical de 100 metros.

Finalmente, el sitio PC-4 consiste en un canal subterráneo con pirca. Ubicado cercano al sitio PC18-1, este canal se encuentra actualmente sellado para su protección y no se ha atribuido a ningún periodo específico.

1.4.6 Contexto climatológico

La región de Arica y Parinacota está ubicada en el límite norte del territorio chileno, una región dominada por un clima hiperárido donde las precipitaciones anuales son generalmente nulas (Vargas, *et al.*, 2006). Por otro lado, es una de las regiones chilenas que se ve más afectada por el controlador climatológico conocido como El Niño (ENSO) (Vargas, *et al.*, 2006). Este fenómeno ocurre debido a una interrupción en los vientos alisios, que transportan y acumulan calor desde Sudamérica hacia Australia o disminución en la intensidad de la oscilación del sur. La interrupción de este ciclo genera un estancamiento de calor en las costas de Perú y Ecuador (Fig. 15), provocando precipitaciones anómalas en dichos sectores (Wallace & Hobbs, 2006). Estas precipitaciones, cuando ocurren en sectores como el norte de Chile, un sector conocido por su clima árido, generan grandes movimientos de sedimento a través de los valles fluviales de la zona con notorias consecuencias socioeconómicas (Vargas, *et al.*, 2006,

2019).

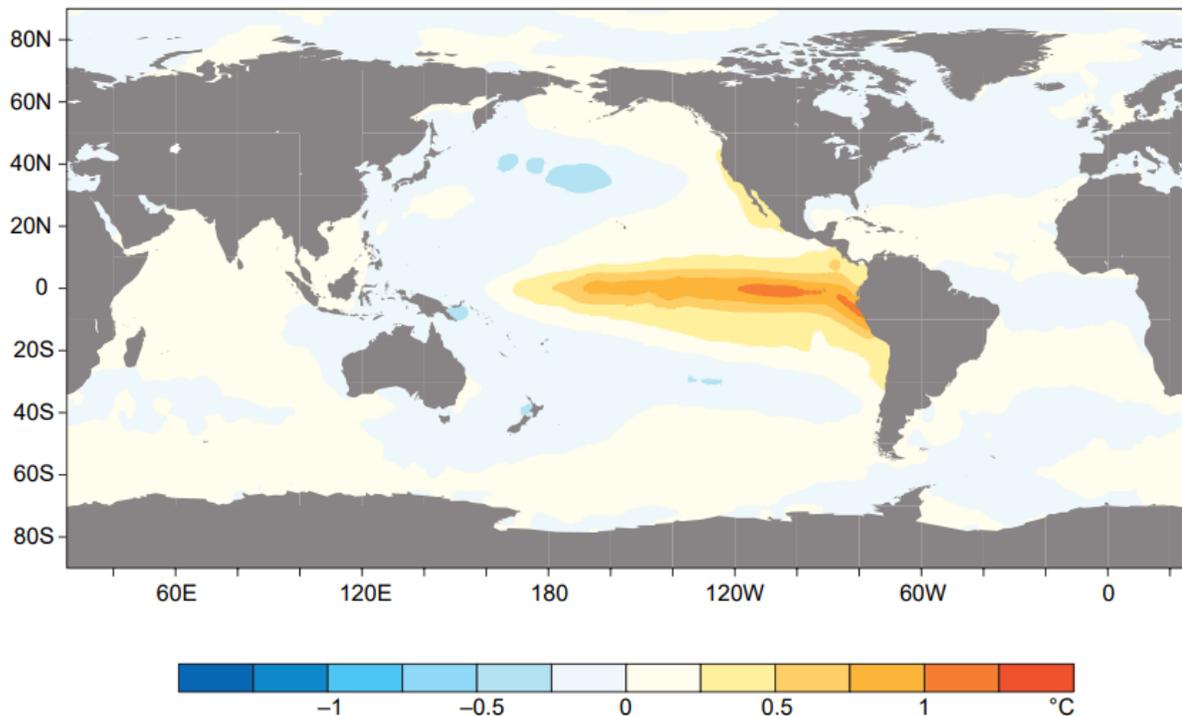


Figura 15. Patrón de anomalías de temperatura observadas durante el fenómeno del Niño. Basado en datos de la oficina de meteorología HadISST, U.K., tomado de Wallace & Hobbs (2006).

1.4.7 Contexto sísmico

El norte chileno presenta un margen continental activo debido a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana en dirección N75°E con una velocidad de 67 mm/año (Angermann, *et al.*, 1999; Schurr *et al.*, 2014). El área de estudio, en Arica y Caleta Camarones (Fig. 16), se encuentra dentro de lo que se conoce como zona sismogénica, lugar donde ocurren los grandes terremotos por subducción. La zona sismogénica se genera debido a una subducción de una placa oceánica relativamente joven, en este caso alrededor de 45 Ma (Muller *et al.*, 1997), bajo la placa continental.

En el caso de Sudamérica, en esta zona sismogénica particularmente, ocurren rupturas de gran escala que se reflejan en terremotos de magnitudes mayores a Mw 7,5 (Comte & Barrientos, 1997). En casos aún más extremos, cuando las rupturas son de mayor escala, se generan sismos de magnitudes superiores a Mw 8,0, que pueden ser seguidos de un gran tsunami, como fue el caso de Arica en 1868 (8.8 Mw) y en 1877 (8.6 – 8,8 Mw) (Compte y Pardo, 1991; Ruiz *et al.*, 2018).

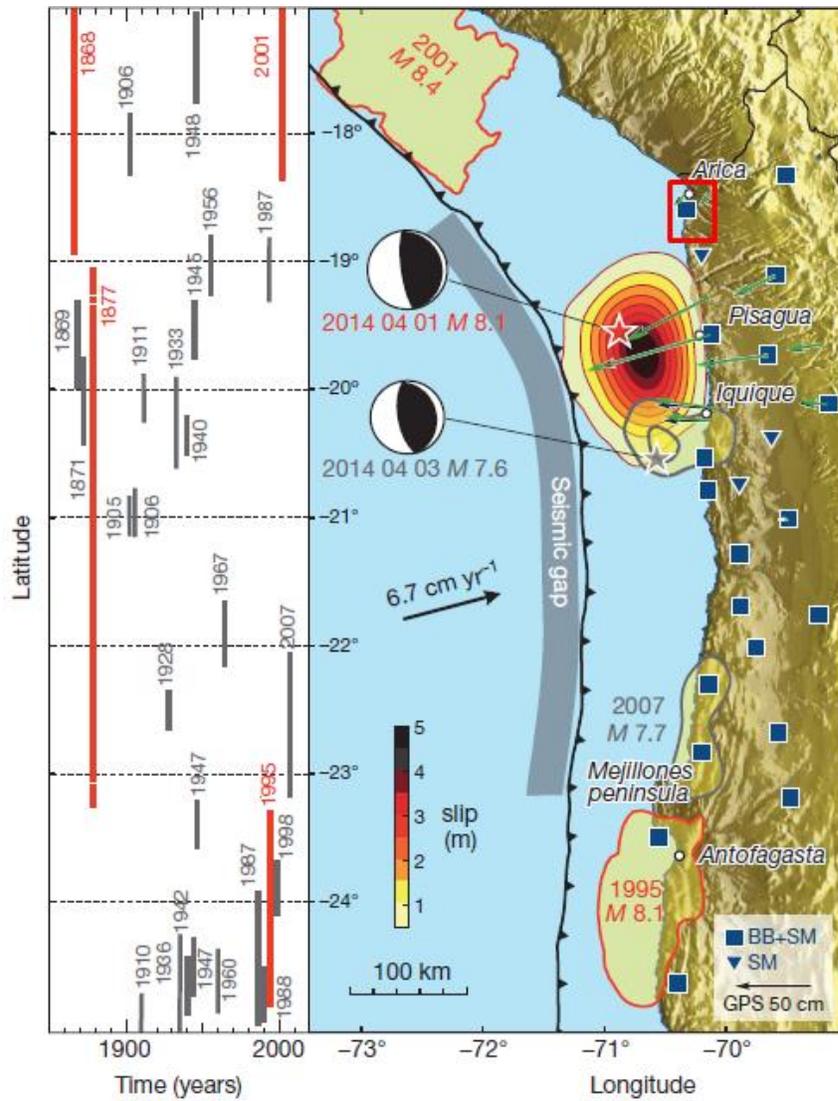


Figura 16. Mapa del margen suroccidental de Sudamérica mostrando grandes sismos históricos junto a su registro de rupturas. En rojo se denota el área de estudio. Modificado de Schurr et al. (2014).

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Parámetros para la identificación de eventos de tsunami en sedimento fino

Los eventos de tsunami generan en el registro sedimentario un tipo de depósito que permite, a través de parámetros multidisciplinarios, su identificación. La huella generada por los tsunamis, sin embargo, puede ser difícil de trazar dependiendo de las características específicas de cada sitio estudiado (Peters & Jaffe, 2010), debido a esto la inexistencia de un registro para un único parámetro en el sitio de estudio no debe ser tomado como determinante de la ausencia de depósitos de tsunami y también en el sentido contrario, la presencia de un parámetro no debe ser dispuesta como una prueba irrefutable de la representatividad del depósito (Goff *et al.*, 2012). Es en este sentido en que un análisis a partir de múltiples indicadores se vuelve relevante.

A partir de estudios anteriores (Cisternas *et al.*, 2005; Nichol *et al.*, 2007; Spiske *et al.*, 2013) se puede conocer que en zonas de humedal y estuarios la preservación de depósitos de tsunami es óptima debido a que estos son cubiertos rápidamente por depósitos propios del humedal. Es en consideración de esta característica que los sitios de estudio seleccionados se encuentran ambos en paleohumedales como es el caso de Arica o humedales activos como lo es para Camarones.

Basándose en estos antecedentes, es que se han seleccionado variados parámetros que permitan diferenciar los depósitos de tsunami de cualquier otro evento esporádico que pueda registrarse, como en un sitio de humedal y como pueden ser depósitos costeros, de tormenta o de aluviones.

2.1.1 Reconocimiento geomorfológico

Estudios previos a la campaña de terreno en febrero de 2019 se llevaron a cabo para la zona de Arica. Estos consistieron en trabajos con imágenes satelitales obtenidas de Alaska Satellite Facility utilizando los softwares Google Earth, ENVI y ArcGis 10.3 con el objetivo de generar un conocimiento a gran escala de la zona de estudio.

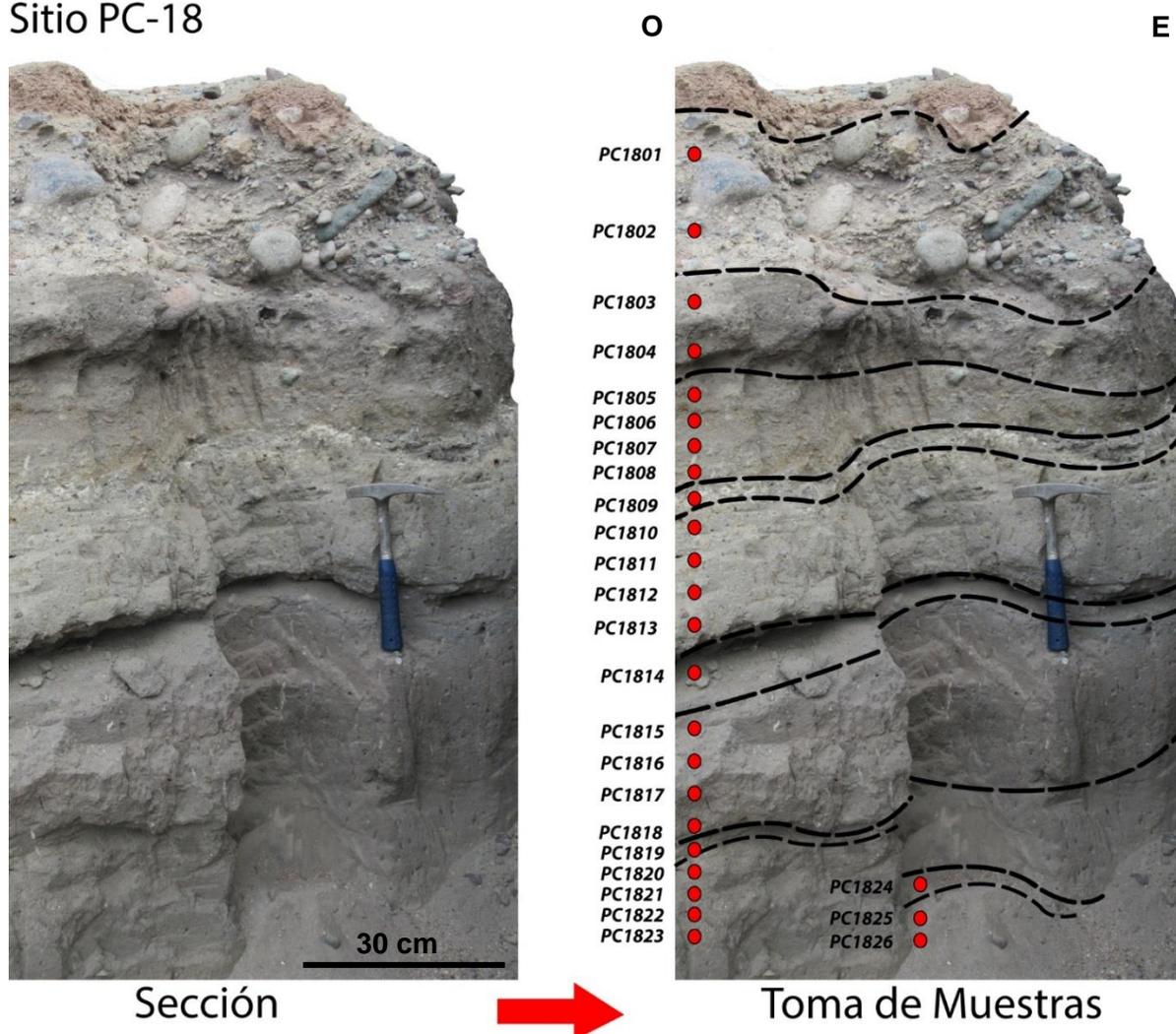
El trabajo en terreno consistió en complementar la información obtenida por estos medios con la que se pudo recabar en terreno, definiendo cuáles rasgos geomorfológicos identificados por teledetección y fotointerpretación eran fidedignos con lo observado. Para profundizar el trabajo y generar modelos de elevación digital (DEM) e imágenes de mayor resolución que los disponibles en satélites de libre acceso se generó una fotometría de la zona de Parque Centenario mediante el uso del UAV *Phantom 4 Pro* para posteriormente realizar un modelo en 3D con el software Agisoft Photoscan.

2.1.2 Recolección de datos de terreno

Posterior a la excavación de las trincheras por maquinaria pesada en el Parque Centenario, la cual fue previa al desarrollo de este trabajo, se recolectó información de las disciplinas abordadas para poder construir un caso sólido de los depósitos de

tsunami. Se consultó la información arqueológica disponible sobre los sitios con la arqueóloga de la municipalidad de Arica a cargo de la supervisión de las excavaciones, Ninoska Cisternas. Se definieron dos sitios de estudio para el levantamiento de información geológica basados en su representatividad. Se muestrearon estos sitios obteniendo 26 muestras de cada uno, muestreando múltiples veces cada nivel para poder definir patrones presentes en los estratos de manera aislada. Las muestras pertenecen a dos secciones estratigráficas con profundidades entre 1.5 a 1.8 m, donde cada estrato fue muestreado al menos una vez (Fig. 17 y Fig. 18). En conjunto con este muestreo se confeccionaron columnas estratigráficas con una caracterización de facies sedimentarias y su relación con las capas adyacentes. También se fotografiaron y esquematizaron las evidencias más importantes entre cada una de estas capas.

Sitio PC-18



Sección



Toma de Muestras

Figura 17. Sección estratigráfica para el sitio PC-18 y puntos donde se llevó a cabo el muestreo (marcados en círculos rojos). Las líneas negras segmentadas indican los estratos o capas de la sección.

Sitio PC2-18

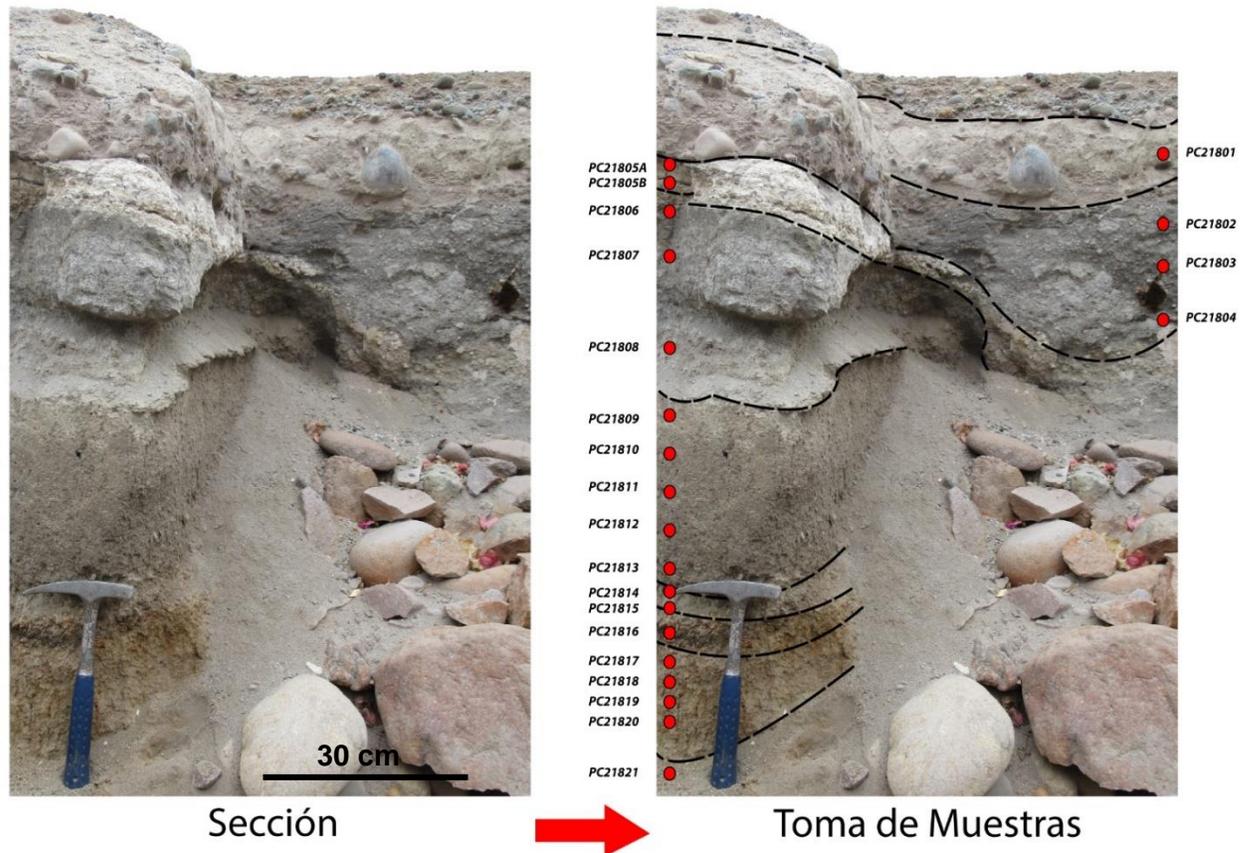


Figura 18. Sección estratigráfica para el sitio PC2-18 y puntos donde se llevó a cabo el muestreo (marcados en círculos rojos). Las líneas negras segmentadas indican los estratos o capas de la sección.

Para el caso de la bahía de Camarones, esta zona también fue muestreada de una manera similar (Fig. 19). Sin embargo, en este sector no fue necesario excavar el escarpe en el cual la columna se encuentra expuesta, ya que aflora de manera natural. En consecuencia, para el muestreo sólo fue necesario remover la primera capa de sedimento expuesto para acceder a un nivel fresco que conservara mejor las características originales de estos depósitos. Se obtuvieron 14 muestras de este sitio en una profundidad de hasta 1.6 m, muestreando múltiples veces cada estrato con el mismo objetivo mencionado anteriormente para los sitios de Arica.

Sitio CC-18

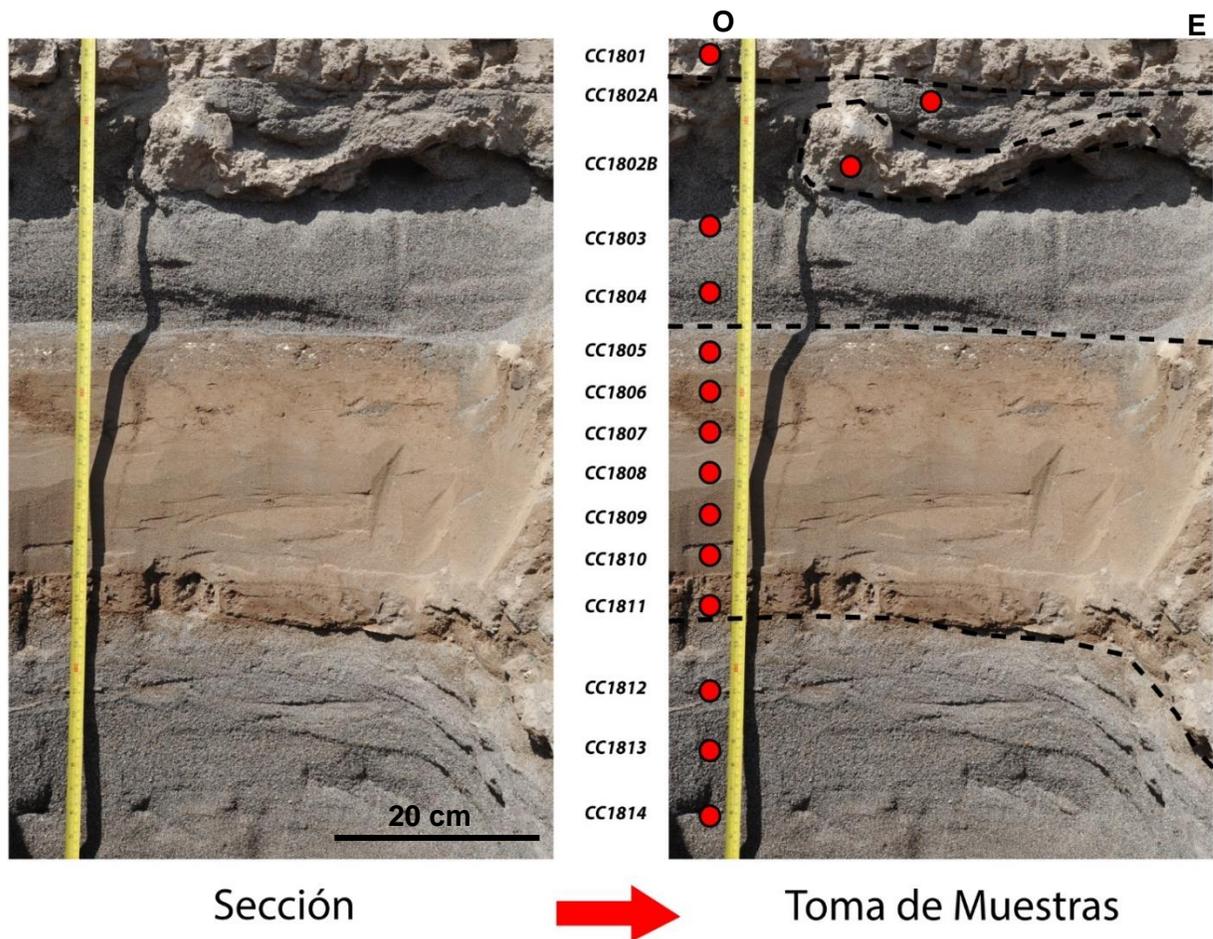


Figura 19. Sección estratigráfica para el sitio CC2-18 y puntos donde se llevó a cabo el muestreo (marcados en círculos rojos). Las líneas negras segmentadas indican los estratos o capas de la sección.

2.1.3 Análisis sedimentológico: Granulometría y parámetros sedimentológicos

Los análisis de granulometría fueron realizados en el laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile, a cargo del Dr. Gabriel Vargas. Estos consistieron en la separación de granos para tamaños mayores a 1 mm y para menos a 1 mm. Los primeros fueron realizados mediante tamizaje con mallas en la norma A.S.T.M (Fig.20; Tabla. 1). Este proceso fue realizado a mano en todas las muestras obtenidas para evitar la destrucción de evidencia biológica por agites mecánicos.



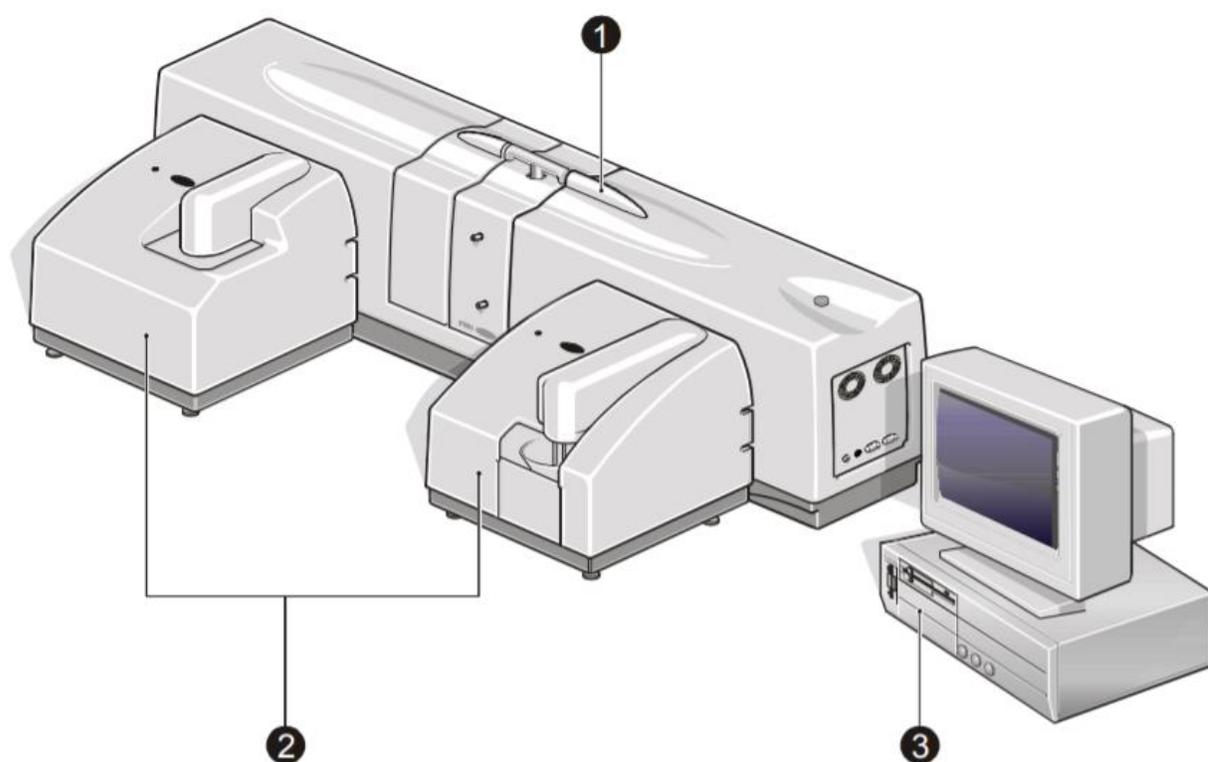
Figura 20. Tamices con mallas en la norma A.S.T.M del laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile.

Tabla 1. Mallas en norma A.S.T.M y su equivalencia en milímetros.

Número de malla A.S.T.M.	Medida en milímetros
# 5/16''	7,93
# 5	4
# 10	2
# 18	1
# 35	0,5
# 60	0,25
# 120	0,125
#230	0,063

El segundo análisis correspondiente a granulometría de finos fue realizado por granulometría láser utilizando el equipo Malvern Mastersizer 2000 (Fig. 21 y Fig. 22). Este equipo utiliza la difracción láser aplicando la teoría de Mie (1908). Este método consiste en la conducción de partículas suspendidas por un medio líquido de índice de refracción conocido de manera previa, en este caso agua, por una celda de vidrio normal a un haz de láser. La luz que difractan las partículas impactadas por el láser es recibida

por detectores detrás de la celda. Posteriormente por un proceso de inversión, a partir de este patrón de difracción medido se obtiene la distribución del tamaño de estas partículas. El manejo del software y equipo Malvern Mastersizer 2000, consistió en hacer una medición manual mediante la ventana *Measure* → *Manual*, donde antes de analizar las muestras se realiza una prueba de *Background* para tener un estándar de medición. Previo al comienzo de la prueba, el programa alinea automáticamente el haz del láser, buscando el detector cero donde no ocurre difracción. Esto se hace debido a que en ese punto el láser incide de manera recta. Este proceso demora aproximadamente 90 s. Una vez terminado este proceso se hace la medición del *Background* cuyo detalle más importante es que la obturación del láser debe ser cercana al 0.0%, lo que indica que no existen partículas interrumpiendo el proceso. Luego se procede a preparar el instrumento para analizar las muestras, primero se debe limpiar mediante la función *Clean* en la pestaña de *accessories*.



ill 7917

Figura 21 Esquema del equipo Mastersizer 2000. (1) Colector óptico que recolecta la información de granulometría. (2) Dispensador de muestra, es el receptáculo donde se agrega la muestra para pasar al colector óptico. (3) Sistema computacional que maneja los datos recolectados posteriormente mediante el software Malvern. Tomado de Malvern Instruments (2007).

Cuando se termina la limpieza del instrumento se manejan los controles de este (Agitador, bombeo y ultrasonido), que sirven para hacer una distribución homogénea de la muestra. Cada muestra es circulada 3 veces por el equipo, para asegurar que no existan errores en la medición. Finalmente, los datos y la curva de distribución del tamaño de las partículas son exportados como archivos de extensión pdf o txt.



Figura 22. Equipo MasterSizer 2000 del laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile.

El registro granulométrico de los sitios estudiados es separado en dos secciones: granulometría mayor o de clastos, la que muestra la información obtenida mediante tamizaje de las muestras y la segunda llamada granulometría menor o de matriz que muestra los resultados de los análisis de granulometría laser.

Para organizar la información obtenida tras el tamizaje se utilizó la clasificación de Folk & Ward (1957). Esta metodología para el manejo de la información es la que entrega un resultado más completo para distribuciones estándar que no tienen una alta densidad de datos que manejar en las colas de la distribución de sedimento (Blott & Pye, 2001). Además, para obtención de todos los parámetros relevantes se utilizó el algoritmo *Gradistrat* (Blott & Pye, 2001), que entrega múltiples parámetros sedimentológicos al alimentarlo con la información de tamaño de grano de cada serie de muestras. Los parámetros sedimentológicos utilizados para este trabajo corresponden a: tamaño de grano promedio (TGP), selección, asimetría, curtosis, D10, D50, D90 y D90-10. Estos últimos corresponden a tamaños de grano en ciertas secciones de la distribución sedimentológica (Es decir, D10 muestra el tamaño de grano en el 10% de la distribución). Además, se utilizó el valor adimensional SPAN que corresponde a la división de los valores $(D90-D10) / D50$ (Kumar, *et al.*, 2015). Estos parámetros son utilizados de manera básica para la distinción entre diferentes tipos de sedimentos no consolidados en diferentes ambientes de deposición y son utilizados ampliamente en estudios geológicos (p.e. Warriier *et al.*, 2016).

El tamaño de grano promedio (TGP), refleja el tamaño del sedimento influenciado por la fuente y ambiente de deposición. En la naturaleza se pueden encontrar tres

poblaciones de sedimento dominantes: grava, arena y limo con arcilla (Tabla 2), resultando estos de diferentes procesos de meteorización física, química y transporte.

Al momento de cuantificar estos parámetros, esto se hace utilizando la escala semilogarítmica (ϕ) (Krumbein, 1934). Este valor varía para cada parámetro separando así las poblaciones de estos y se calcula en base al tamaño de grano utilizando la fórmula:

$$\phi = -\log_2 d \quad (0)$$

Donde d corresponde al diámetro (tamaño de grano en este caso) en milímetros.

Tabla 2. Tabla para clasificación de granos acorde a la escala de Udden – Wentworth (1922).

Udden Wentworth	mm	ϕ
Bloques	>256	-8
Cantos	>64	-6
Guijarros	>2	-2
Arena muy gruesa	>1	0
Arena gruesa	>0.5	1
Arena media	>0.25	2
Arena fina	>0.125	3
Arena muy fina	0.0625	4
Limo	0.0039	8
Arcilla	<0.0039	

La selección (ϕ) se refiere al grado de uniformidad de los tamaños de grano en un sedimento (Folk & Ward, 1957) (Tabla 3) y se da por la ecuación:

$$\text{Selección } (\phi) = \left[\frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} \right] + \left[\frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \right] \quad (1)$$

Acorde a esta ecuación, se otorgan las siguientes clasificaciones para cada valor de selección:

Tabla 3. Clasificación para diferentes valores de selección, Folk & Ward (1957).

Selección	ϕ
Muy buena	<0.35
Buena	0.35 a 0.50
Media a buena	0.50 a 0.71
Media	0.71 a 1.00
Mala	1.00 a 2.00
Muy mala	2.00 a 4.00
Extremadamente mala	> 4.00

El parámetro de asimetría (φ) cuantifica la irregularidad de una distribución respecto a una totalmente simétrica, es decir, una distribución simétrica tendrá un valor $\varphi = 0$ (Folk & Ward, 1957) (Tabla 4). La ecuación para la determinación de este parámetro corresponde a:

$$\text{Asimetría } (\varphi) = \frac{[\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2\varphi_{50}]}{[2(\varphi_{84} - \varphi_{16})]} + \frac{[\varphi_5 + \varphi_{95} - 2\varphi_{50}]}{[2(\varphi_{95} - \varphi_5)]} \quad (2)$$

Entonces, acorde a esta fórmula, se deriva la siguiente tabla de valores:

Tabla 4. Clasificación para valores de asimetría acorde a Folk & Ward (1957).

Asimetría	φ
Muy negativa	-1.0 a -0.3
Negativa	-0.3 a -0.1
Simétrica	-0.1 a 0.1
Positiva	0.1 a 0.3
Muy positiva	0.3 a 1.0

La curtosis (φ) compara los valores de selección en los extremos de la distribución sedimentaria relativa a la parte central de esta (Folk & Ward, 1957) (Tabla 5). Este parámetro está dado por:

$$\text{Curtosis } (\varphi) = \frac{95\varphi - 5\varphi}{[2.44(\varphi_{75} - \varphi_{25})]} \quad (3)$$

Para distintos valores de curtosis se tiene que:

Tabla 5. Clasificación para valores de asimetría acorde a Folk & Ward (1957).

Curtosis	φ
Muy platicurto	<0.35
Platicurto	0.35 a 0.50
Mesocurto	0.50 a 0.71
Leptocurto	0.71 a 1.00
Muy leptocurto	1.00 a 2.00
Extremadamente leptocurto	2.00 a 4.00

2.1.4 Análisis paleontológico: reconocimiento de microfauna

Uno de los parámetros que permiten diferenciar de manera exitosa los depósitos de tsunami respecto a otros tipos de sedimento es el reconocimiento de microfauna. Existen especies de foraminíferos que no se reproducen en ambientes lacustres como es el caso del humedal, siendo así, la identificación de las especies de foraminífero y su

densidad en cada facies indicadores claves al momento de seleccionar proxies de alta utilidad.



Figura 23. Lupa binocular Olympus del laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile

Para llevar a cabo este análisis se contó con una lupa binocular Olympus (Fig. 23) equipada para cámara fotográfica en el laboratorio de sedimentología de la Universidad de Chile. El análisis consistió en la selección de una porción de muestra entre 1 y 3 gramos y se procedió a la selección del material biológico identificado en cada una. Esto consiste en todos los fragmentos de concha, gastrópodos y foraminíferos que se puedan encontrar. Posteriormente este material se masa y se hace un conteo de los foraminíferos identificados para luego obtener un % de fracción orgánica identificada en la muestra. Este proceso se llevó a cabo para los dos sitios del Parque Centenario, sin embargo, no para el sitio de Caleta Camarones.

2.1.5 Análisis químico: espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF)

Otro indicador que es interesante para diferenciar depósitos de tsunami y que se utilizó en este estudio es la composición de elementos mayores en los sedimentos estudiados. Este análisis químico fue llevado a cabo para obtener comparaciones relativas de las concentraciones de los elementos y a través de esto, ver si existen anomalías en las muestras, específicamente para ciertos elementos que deben indicar presencia de agua salada, opuesto a lo que se espera encontrar en un humedal. Dentro de estos elementos se encuentran el Br, S, Cl, Sr, Ba y Na, los cuales sirven para identificar paleosalinidad (Goff, *et al.*, 2012). El Fe, Ca y Mg se asocian a la incorporación de restos de esqueletos carbonatados de conchas y microfósiles marinos (Goff, *et al.*, 2012). También las concentraciones de Ti, Fe y Zr sirven como indicadores de minerales pesados que usualmente son transportados por eventos de alta energía (Goff, *et al.*, 2012) como lo son un tsunami o una tormenta.

La Fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica de espectroscopía en la cual se utiliza

una emisión fluorescente de radiación X generada excitando una muestra con una fuente de radiación X. La radiación que incide en el átomo expulsa electrones de sus capas interiores y estos espacios son utilizados por los electrones de las capas exteriores mientras que la energía restante es disipada en forma de fotones, radiación X con una longitud de onda única dependiente del ordenamiento de electrones en la muestra, determinando de este modo la concentración de dichos elementos en ésta.

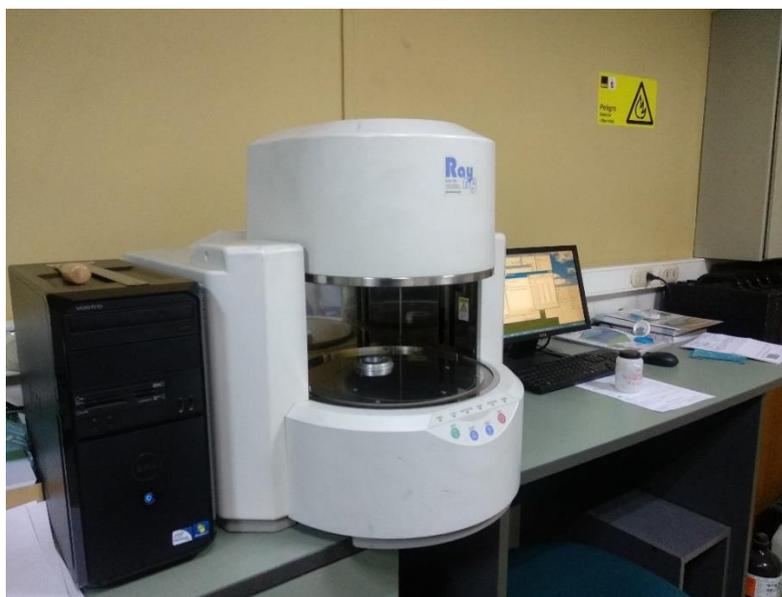


Figura 24. Equipo Shimadzu EDX-720 para espectrometría de fluorescencia de Rayos X de la Universidad de Chile.

Para ejecutar el análisis de XRF se utilizó un equipo Shimadzu EDX-720 para espectrometría de fluorescencia de Rayos X (Fig. 24). Este equipo permite analizar muestras en estado líquido y sólido, mientras estas sean del tamaño apropiado del porta muestras, y reconoce concentraciones superiores a los 20 ppm aproximadamente (varía dependiendo de la muestra y los elementos a reconocer).

Utilizando este equipo se analizaron las muestras de los tres sitios introduciendo en cada porta muestras una pequeña fracción de sedimento. El equipo permite analizar hasta 16 muestras a la vez, por lo que estos análisis se llevaron a cabo en múltiples tandas de 16 muestras.

2.1.6 Presentación de datos estadísticos

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

El contexto tradicional en el cual se utiliza un ACP es para explorar un set de datos con observaciones en p variables numéricas, para cada una de las n entidades, muestras, probetas, etc. Estos valores definen una matriz X de $n \times p$ datos, de la cual la columna j es el vector x_j de observaciones en la variable j . De esta matriz X se busca una combinación de columnas tales que se genere la máxima varianza. Esta combinación lineal está dada por:

$$\sum_{j=1}^p a_j x_j = Xa \quad (1)$$

donde a es un vector de constantes a_1, a_2, \dots, a_p . La varianza de cualquier combinación lineal está dada por:

$$\text{var}(Xa) = a'Sa \quad (2)$$

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, una restricción adicional debe ser impuesta: se debe trabajar con vectores normalizados a la unidad, es decir, imponer la condición $a'a=1$. El problema es equivalente a maximizar la expresión:

$$a'Sa - \lambda(a'a - 1) \quad (3)$$

Donde λ corresponde a un multiplicador langrangiano. Diferenciando respecto al vector a e igualando esta expresión a un vector nulo, se produce la expresión:

$$Sa - \lambda a = 0 \Leftrightarrow Sa = \lambda a \quad (4)$$

Por lo tanto, a debe ser un vector unitario *eigenvector*, y λ su correspondiente *eigenvalue*, de la matriz de covarianza S . En particular, se busca el *eigenvalue* más largo, λ_1 (y su *eigenvector* a_1 correspondiente), ya que los *eigenvalue* son la varianza de la combinación lineal definida por los correspondientes *eigenvector* a :

$$\text{var}(Xa) = a'Sa = \lambda a'a = \lambda \quad (5)$$

La ecuación (3) se mantiene válida si los *eigenvector* son multiplicados por -1, por tanto, los símbolos de todas las cargas son arbitrarios y solo las magnitudes y patrones numéricos son realmente significativos.

Cualquier matriz simétrica real de dimensiones $p \times p$, como la matriz de covarianza S , tiene exactamente p *eigenvalues* reales, λ_k ($k=1, \dots, p$), y sus *eigenvector* correspondientes pueden definirse para formar un grupo ortonormal de vectores, es decir $a'_k a_{k'} = 1$ si $k=k'$ y 0 de lo contrario. 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 *eigenvectors* de S son soluciones al problema de obtener hasta p combinaciones lineales nuevas de la forma:

$$Xa_k = \sum_{j=1}^p a_j x_j \quad (6)$$

La cual 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:

$$a'k'Sak = \lambda ka'k'ak = 0 \quad \text{si } k' \neq k \quad (7)$$

Estas combinaciones lineales de Xa_k se llaman *componentes principales* del conjunto de datos. Los elementos de un *eigenvector* 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 gráfico 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).

Los análisis ACP utilizados en este trabajo (Fig. 25) representan a su derecha las variables utilizadas con una línea roja. El largo de esta línea roja desde el origen demarca cuan bien representada está dicha variable en el gráfico ACP: una línea cercana al perímetro del círculo tiene mejor representatividad. El ángulo entre cada variable muestra el tipo de relación entre aquellas variables (directa, indirecta o sin relación). Un ángulo agudo muestra una relación directa (p.e. Ze y Fe en la figura 25), un ángulo obtuso representa una relación indirecta (p.e. mean M y sorting M en la figura 25) y un ángulo recto muestra que no hay relación entre esas variables (p.e. sorting M y mean G en la figura 25).

A la izquierda del gráfico se ven representadas las distintas muestras con código de color para separar a que facies pertenecen y como se ven afectadas acorde a las variables graficadas. Un ejemplo para mostrar esta interacción es la población de arena en el gráfico (puntos azules): esta población presenta altos contenidos de Fe y Ze, y un bajo valor de sorting M.

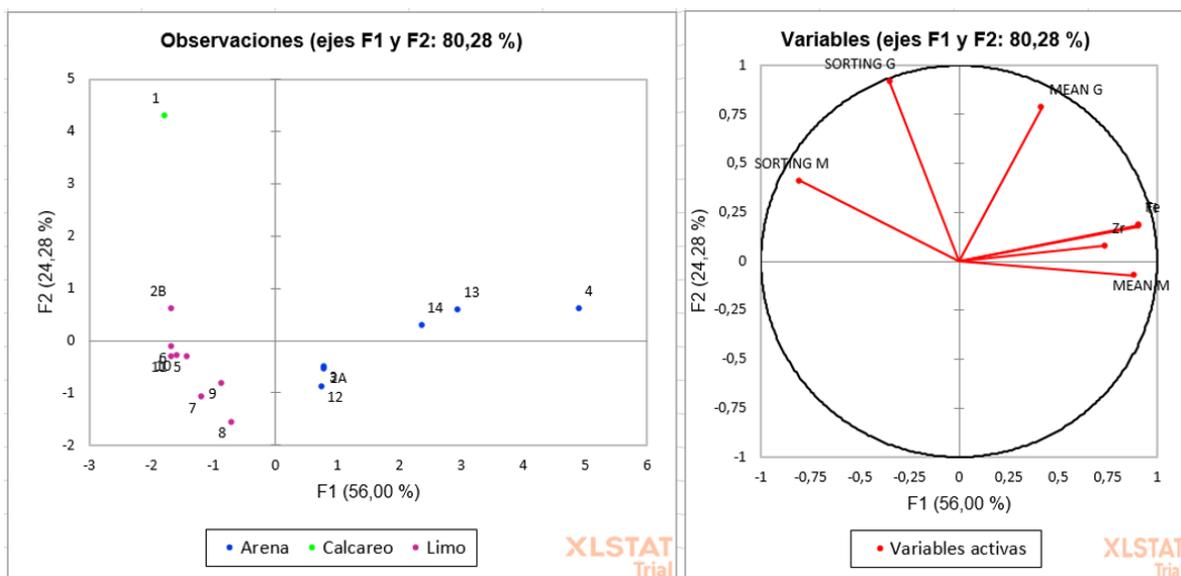


Figura 25 Gráfico APC del sitio CC18 mostrando variables de selección TGP y metales pesados. Elaborado utilizando el macro de Excel XLStat.

Curvas de distribución acumulada

Para análisis de ambiente deposicional de sedimentos, además de los parámetros sedimentológicos ya descritos, se utilizaron curvas de distribución acumulada. Estas curvas muestran tamaño de grano de cada muestra vs. % acumulado de muestra. El largo y pendiente de cada sección de esta curva es indicativo del tipo de transporte al cual el sedimento fue sometido (Fig.27) y permiten entonces, determinar e interpretar el tipo de ambiente y medio por el cual fueron depositados. El tramo superior en la figura 26 ilustra una carga de suspensión ya que estos consisten en los granos más pequeños. El tramo con mayor pendiente del centro involucra las cargas de saltación, estas pueden ser dos poblaciones, como es el caso de la figura 26, en las cuales la diferenciación de estas se nota debido a diferentes selecciones y TGP para ambas (Visher, 1969), lo que, dado la proveniencia de este sedimento, permite separar las cargas de entrada y salida del oleaje. Esta separación ocurre cerca de los 2ϕ o $250\ \mu\text{m}$, donde el tamaño de grano tiende a dar preferencia a el rodaje de los granos. Finalmente, el tramo inferior es la carga de tracción la cual involucra el sedimento de mayor tamaño.

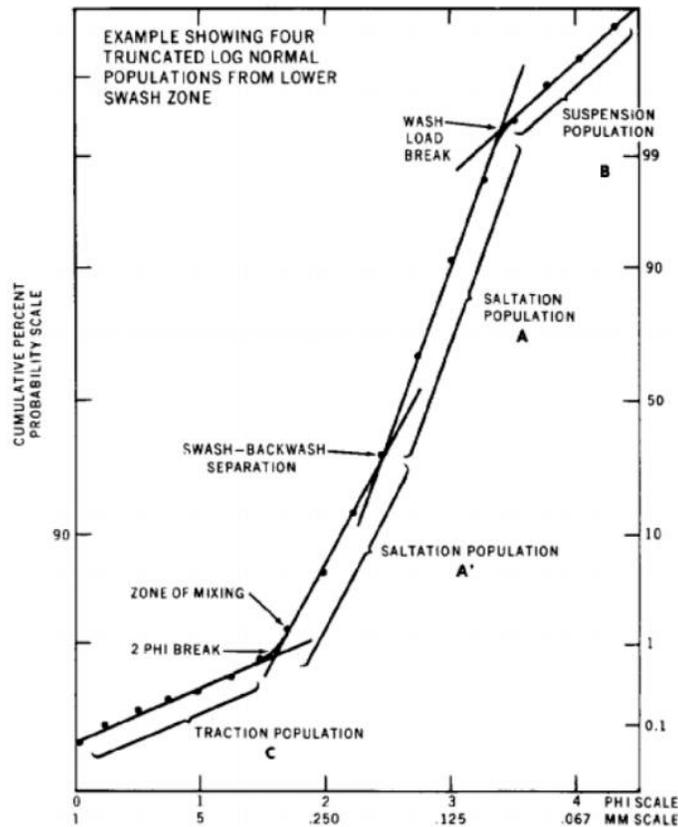


Figura 26. Relación entre las dinámicas de transporte y poblaciones en una distribución acumulada de tamaño de grano para una muestra de arena marina en foreshore. Tomado de Visher (1969).

En condiciones ideales, depósitos de arena correspondientes a playa muestran una asimetría negativa y una buena selección. En una curva de distribución acumulada (Fig. 26), la arena de playa está dominada por la carga de tracción, una buena selección de la carga de saltación y una carga de suspensión pequeña que representa los pequeños granos que son transportados por la ola. Por otro lado, la arena de una duna muestra una asimetría positiva y una muy buena selección de la carga de saltación ya que el viento transporta hasta cierto tamaño de grano. Es también por esta razón que la carga de tracción y saltación están muy pobremente desarrolladas. La arena de una bahía muestra asimetría negativa y una mala selección. Finalmente, la arena fluvial es extremadamente variable, la asimetría disminuye desde positiva a negativa bajo corriente y la selección puede variar desde muy buena a muy mala (Greenwood, 1969; LeRoux, 1999).

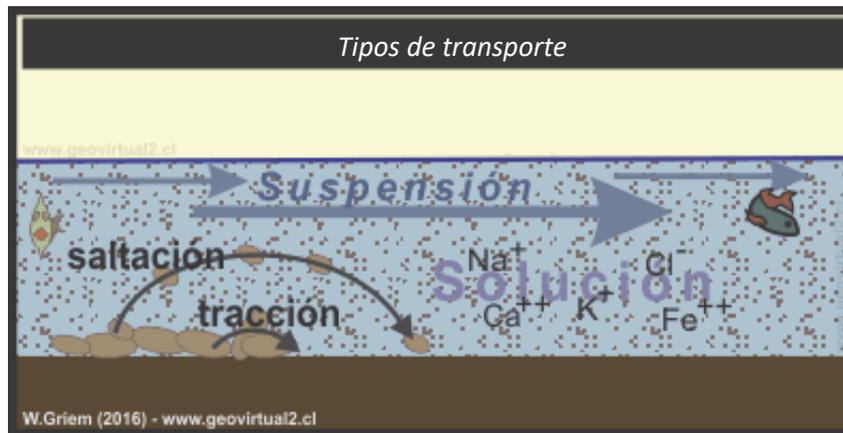


Figura 27 Tipos de carga en el sedimento. Tracción es un arrastre de los granos por la superficie, la suspensión es el transporte de estos dentro del flujo y la saltación es el punto medio, involucrando pequeños saltos entre su arrastre por la superficie. Modificado de Griem (2016).

2.1.7 Recolección de archivos históricos

Para generar una conexión con la perspectiva humana de los eventos históricos de tsunamis y además contrarrestar fuentes de información, se lleva a cabo una recolección histórica del archivo Vicente Dagnino, incluyendo en estas crónicas, cartas privadas, reportes y reportajes, además de libros recopilatorios como los son Fernández, 2007 y Ballore, 1915. El trabajo se lleva a cabo en dos etapas. Primero se recolectaron un conjunto de archivos con datos relevantes. En segundo lugar, se seleccionaron los fragmentos de interés y el escrito citado textualmente, para luego recalcar en un breve resumen la información con mayor importancia.

3 REGISTRO HISTÓRICO DE TSUNAMIS

La historia de la ciudad de Arica es una de continuo cambio y catástrofe, siendo los tsunamis una de las causas de esta situación. Es de conocimiento histórico que los tsunamis de Chile han sido generados en gran parte si no en su totalidad por terremotos. El registro que se expone a continuación pretende recabar información clave sobre los eventos de los tsunamis de 1868 y 1877, ratificando la información que ya se conoce y aportando datos nuevos evidenciados por espectadores de estos eventos.

Este registro se generó a partir de libros recopilatorios de esta información los cuales se citan en cada uno de los escritos presentados aquí. Cabe mencionar que de estos escritos se han seleccionado solo fragmentos debido a lo extenso del registro disponible.

3.1 Terremoto y tsunami de 1604

Relato 1

*“Acuerdo de hacienda real de Arica del 5 de Diciembre de 1604”, en **Montessus de Ballore, 1915: 11-13.***

“ ... En el puerto de San Marcos de Arica en cinco días del mes de Diciembre de 1604 años, el general don Ordo de Aguirre, Corregidor de ese partido y los jueces Oficiales Reales de él, tesorero Alonso García Villanil y contador Simón de Basauri, se juntaron a hacer acuerdo de hacienda real y estando juntos en él dijeron que por cuanto en el terremoto de temblores y creciente de mar que sucedió, el miércoles pasado 24 de noviembre que asoló esta ciudad de Arica y el fuerte de ella...”

Un fuerte terremoto referido como terremoto de temblores el 24 de noviembre de 1604 sugiere múltiples temblores previos o posteriores al terremoto.

Relato 2

*“El corregimiento de Arica, 1535-1784.” Arica: Imprenta La Época, 1909, 350 pp. en **Seiner L., Lizardo, Historia de los sismos en el Perú, Catálogo: Siglos XV-XVII, 2009.***

“DAGNINO, 1909, 52-54

... De este cataclismo no ha quedado relación detallada sino alusiones [...]. En la representación de Francisco de Cervantes, transcrita al Rey por la Audiencia de Lima se lee “Atento a lo cual i a que la ruina i enundacion que le sobrevino a aquel dicho puerto de Arica el año seiscientos i cuatro” [...]. El esmero de cronistas nos hace fijar en 1604 este movimiento sísmico, fecha que da la solicitud del balanzario Cervantes [...]. Una vez por todas declaramos también que los nuevos documentos nos periten reaccionar contra el cómodo sistema seguido por los que ocupan en la crónica ariqueña [...]. Así es como, entre muchos errores, siguen embaucándonos que esa ruina sucedió en 1605 [...]. Sin embargo, nada se aleja más de la verdad [...]. Las salidas el mar no han acontecido, durante el periodo histórico, sino en 1604, 1868 i 1877...”

El sismo ocurrido en 1604 es solamente aludido en reportes de otras materias y no existe un registro formal. Además, se hace una mención de la ocurrencia de tsunamis en la ciudad de Arica únicamente en 1604, 1868 y 1877.

Relato 3

Montessus de Ballore, 1912: 9 en Seiner L., Lizardo, Historia de los sismos en el Perú, Catálogo: Siglos XV-XVII, 2009.

“... 1604. Noviembre, 24. Entre XII y XIII. *Terremoto y Maremoto de Arica y Arequipa.* Los diversos compiladores que relatan el acontecimiento discrepan mucho entre sí en lo tocante al año (100, 1604, 1605), al mes (Noviembre, Diciembre) y á la fecha (23, 24, 25, 26, 29) en que se produjo este memorable fenómeno sísmico, pero toda la incertidumbre desapareció al exhumar el doctor Vicente Dagnino del archivo inédito de Arica el acta del acuerdo de la Real Hacienda del 15 de Diciembre de 1604 en que se expresa la del 24 de Noviembre del mismo año. Este documento no da pormenores concretos sobre el movimiento sísmico propiamente dicho, pero la curiosa expresión que emplea, Terremoto de temblores, deja pensar que en Arica el fenómeno fue acompañado de varias sacudidas premonitorias ó consecutivas. El mar se llevó gran parte de los pertrechos de guerra, gastó las municiones, asoló la ciudad y derribo el fuerte y el almacén real de azogues. Después del desastre se cambió la ubicación de la ciudad, transfiriéndola a su actual situación al pié del célebre Morro...”

...Si el mar en su salida de 1603 [sic] no se hubiera llevado el archivo de Arica, es probable que tendríamos noticia de otros fenómenos sísmicos anteriores.”

Confirma como fecha del sismo el 24 de noviembre y da a conocer la pérdida del Archivo de Arica, causa del porque existe poca información de este sismo y eventos anteriores.

Relato 4

Federico Greve, 1964 Universidad de Chile, Instituto de Geofísica y Sismología

“1604. Noviembre 24, de 12 a 13 horas un terremoto de intensidad VI asoló Arica y la ola marina que se produjo, destruyó el fuerte, arrasando con las cureñas y los percheros de guerra acumulados y el azogue, que se empleaba en la extracción del oro y que se almacenaba en las bodegas.

Los detalles los encontramos en el inventario que se hizo del material de guerra recuperado del fuerte de San Marcos de Arica y en el cual se enumera el material de artillería, tal como las culebrinas, arcabuces y balas.

Nos cuesta figurar la fuerza de la ola marina que pasó por sobre la ciudad si consideramos que fueron arrastradas las cureñas, pesadas plancha de plomo y las balas acumuladas en el fuerte.

El terremoto hizo estragos en Arequipa (Perú).

1604. Diciembre. En diversos documentos se habla que en esta fecha en La Serena, diversos edificios sufrieron desperfectos debido a un sismo (grado IV).”

El relato reafirma una vez más la fecha ya estipulada y reafirma que los daños mayores se expandieron hacia Perú.

3.2 Terremoto y tsunami de 1868

Relato 5

Cónsul de Chile en Arica al ministro de Relaciones Exteriores de Chile

Fernández Canque, M; Arica 1868, Un tsunami y un terremoto, 2007

“Arica, agosto 15 de 1868

Señor Ministro:

El día 13 del actual a las 5 de la tarde hubo en ésta un terremoto, el que duró de 5 a 6 minutos produciendo oscilaciones que se extendían de sur a norte. Toda la población fue convertida en un montón de escombros en un momento, pues la violencia de los remezones fue grande. A las 5 y 20 minutos de la tarde principió a hincharse el mar y en un momento se extendió sobre las dos terceras partes de la población, completando la destrucción total de esa parte de la población, pues la barrió desde sus cimientos....

... El mar barrió siete veces sobre la población y la altura de las olas se calcula en 40 pies. Hasta el momento en que pongo a US. Esta parte (son las doce del día) sigue temblando la tierra repitiéndose cada cuarto de hora o cada minuto hay remezones, habiéndose contado en la noche del 13 al 14 como 600 fuertes temblores. Tocante a las víctimas del pueblo, aunque no se sabe con exactitud, créese que no pasen de 150 víctimas los muertos aplastados por la caída de paredes y por las inundaciones del mar. Los habitantes que han salvado se han refugiado en los valles vecinos y en las alturas que rodean la población.”

El terremoto duró entre 5 y 6 minutos, 20 minutos después comienzan los tsunamis y toda la población fue destruida. Hubo 7 olas de tsunami con altura de hasta 12,2 metros y el terremoto fue seguido de un enjambre de temblores contado en al menos 600 réplicas. 150 víctimas en el pueblo.

Relato 6

El Mercurio de Vapor, revista quincenal de política y comercio

Fernández Canque, M; Arica 1868, Un tsunami y un terremoto, 2007

“Valparaíso, Septiembre 2 de 1868

Arica. (Segundo despacho) ...

...La ciudad está casi enteramente desierta, pues todos sus habitantes han huido a los cerros y al pueblo vecino de Azapa. El lugar ha sido enteramente abandonado por las autoridades y entregado al pillaje. No se ha hecho ninguna tentativa para despejar la playa ni para enterrar los cuerpos ya corrompidos que quedaron tirados en la ciudad y a orillas del mar. Allí todo hace falta: los artículos indispensables para la vida han desaparecido completamente; pero en cambio hay una abundancia de licores que proviene del saqueo de las tiendas y almacenes. La línea férrea está destrozada hasta una distancia de cuatro leguas. La esposa de Mr. Johnson, oficial del Wateree, fue aplastada por una casa que cayó en momentos que trataba de huir.”

Consecuencias y estado de la ciudad posterior al evento de 1868 (Fig. 28)

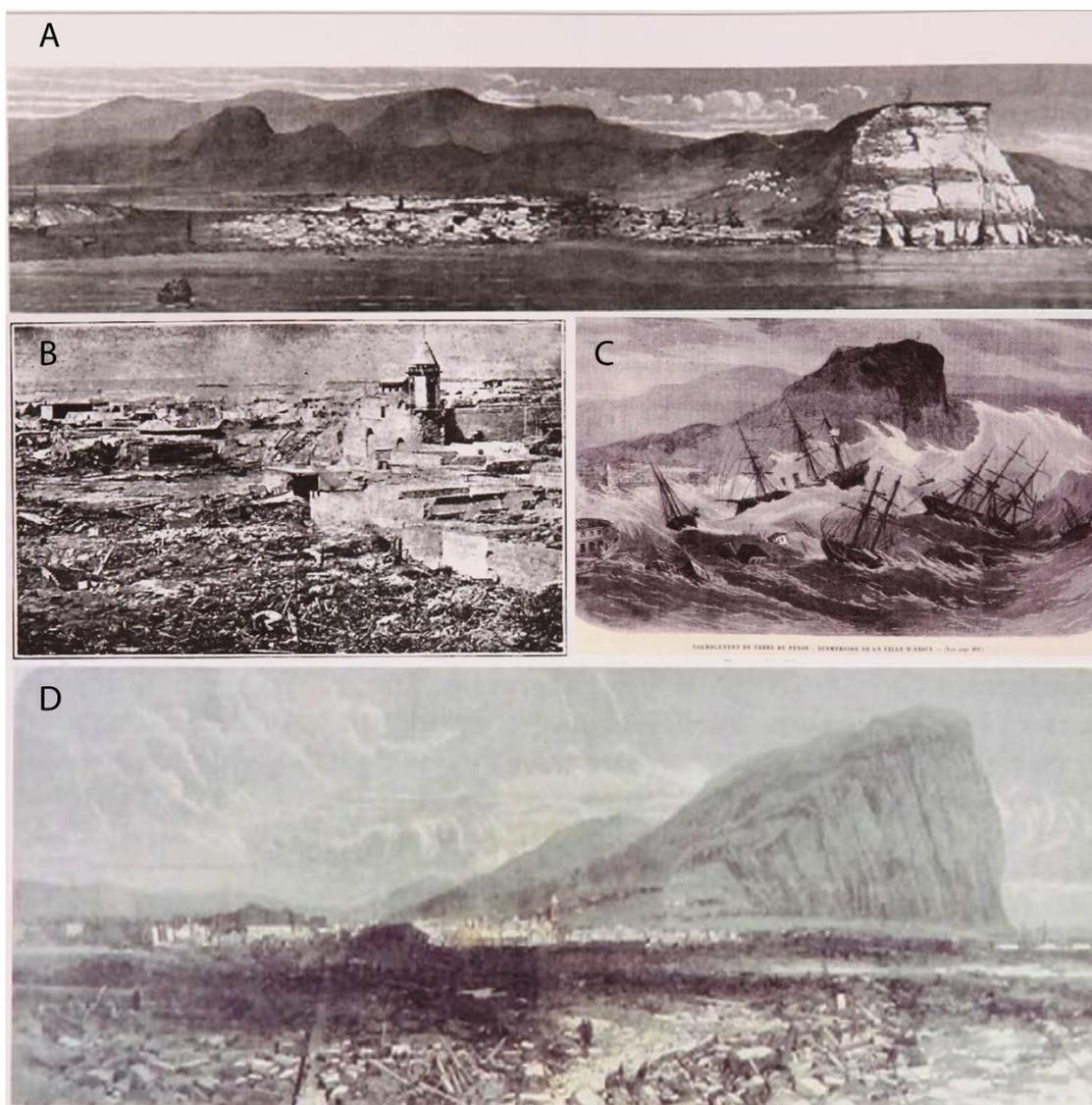


Figura 28. Estado de la ciudad de Arica posterior al evento del año 1868. A: Arica arrasada por el evento, barcos llevados a tierra por el tsunami, habitantes acampando en los faldeos del Morro. *L' Illustration Journal Universel*, París 24 de octubre de 1868, Kozak Collection en Fernández Canque (2007). B: Arica después del tsunami de 1868 en Vicente Dagnino, *El Corregimiento de Arica, 1535 1784, Arica*, Imprenta La Época, 1909, p.130 en Fernández Canque (2007). C: El tsunami arrasa con el Wateree, *Frank Leslie's Illustrated Newspaper*, Nueva York 3 de Octubre de 1868, p.30, Kozak Collection en Fernández Canque (2007). D: Arica después de la catástrofe, *Illustrated London News*, Londres, 24 de Octubre de 1868, pp.396 – 397 en Fernández Canque (2007).

Relato 7

“Valparaíso, septiembre 2 de 1868

Arica. (Tercer despacho) ...

El terremoto principió en esta ciudad a las 5h. P.M. con un remezón de pocos minutos, el cual fue seguido de otro más fuerte que duraría de 7 a 10 min, En el acto salió toda la gente con dirección a la pampa y casi cegada por el polvo que levantaba un viento terrible y la caída de los edificios. En el mismo momento que se sentían en tierra las consecuencias de ese terrible cataclismo, los buques fondeados en las balizas principiaban a sufrir por otra parte los mismos resultados...

... Como 20 minutos después de haber principiado el terremoto se ofreció el espectáculo más aterrante de que es posible tener idea; el mar se retiró silenciosamente y descargó con furioso estruendo sus olas en forma de montañas, penetrando en la plaza

principal hasta la iglesia Matriz, arrasando todas las casas que quedaban en ruinas por el terremoto, y acabando con la aduana, que después del terremoto conservaba tres cuartos de los altos. Por la calle Nueva el mar entró hasta las cinco esquinas y tan sólo se libraron de la inundación las calles que iban en subida...

... La estación del ferrocarril ha sido enteramente destruida, los carros están unos en el río San José, otros en Chacalluta y otros en las calles donde los ha dejado el mar. Las máquinas quedan dispersas en diferentes puntos, unas en tierra, pero lejos de la estación, y otras en el mismo mar o en la orilla...

... En resumen, las pérdidas son inmensas. Arica no existe..."

El terremoto ocurrió a las 5 P.M. con un sismo inicial más breve para dar paso al sismo principal de 7 a 10 min. 20 minutos después del sismo el mar se levanta para arremeter a la ciudad. La parte más marginal de la ciudad no sufrió inundaciones, el ferrocarril fue destruido y esparcidos sus carros por la ciudad.

Relato 8

Carta desde Arica, anónimo

Fernández Canque, M; Arica 1868, Un tsunami y un terremoto, 2007

"Arica, Agosto 15 de 1868.

Mí querido hermano:

Te escribo ésta con la impresión más fuerte que he experimentado en mi vida. Antes de ayer 13 de agosto, a las cinco, se ha experimentado el terremoto más fuerte que en mi vida he visto y veré...

El terremoto duró como cuatro minutos; pasado éste salí a la calle que es bastante ancha, y vi que todas las casas de una y otra vereda habían caído. Pensé en el mar y como autoridad que soy, me dirigí hacia la ribera y el muelle, y entonces noté que la mar había bajado considerablemente y que comenzaba a llenar de la parte del Sur formando remolinos en la parte del muelle. Di la voz de alarma a todas las personas que encontré, entre éstas muchas conocidas y amigas. Corrimos hacia la falda del morro y cuando no bien estaba a la altura de 30 a 40 pies, el mar invadía con tal fuerza y rapidez imponentes arrastrando cuanto encontraba a su paso; levantando los edificios que aún quedaban en pie o inclinados por efecto del terremoto, transportándolos de un lado y otro hasta deshacerlos en su totalidad y retirándose enseguida para invadir nuevamente por cuatro a seis veces. El mar subió como 30 ó 35 pies y penetró hasta la puerta de la Matriz, que está a la altura dicha."

El mar entró a la ciudad entre cuatro a seis veces hasta la altura de la Iglesia Matriz frente a la plaza principal.

Relato 9

Federico Greve, 1964 Universidad de Chile, Instituto de Geofísica y Sismología

"La ola marina o "tsunami" barrió siete veces sobre el puerto de Arica, alcanzando una altura de 13 metros sobre el nivel normal. El puerto y la ciudad quedaron en completa ruina y las embarcaciones ancladas en la bahía quedaron varadas en la playa. La ola llegó hasta California por el Norte y Nueva Zelandia y Australia por el Poniente, atravesando todo el océano Pacífico...

... En diversos informes encontramos narraciones espeluznantes de la catástrofe, así por ejemplo, en una relación escrita en Tacna, pocos días después dice: "Este hermoso

puerto (Arica) es el que más ha sufrido, el terremoto duró cinco minutos, cayó la mayor parte de los edificios, se abrió la tierra y brotó agua. El mar se retiró a gran distancia y volviendo después con rapidez de diez y media millas y con una elevación de 50 pies sobre el nivel ordinario, arrasó cuanto había y dejó varado a más de dos millas de la playa el vapor de guerra de los Estados Unidos “Wateree y “La América” del Perú....

... Las casas de adobes fueron destruídas y las de madera levantadas de sus fundamentos y transportadas a otro sitio. Así por ejemplo, el Hotel de Francia fue encontrado a varias cuerdas de distancia y el hermoso Club del señor Loaysa lo encontraron flotando en alta mar...

... Por la documentación anotada, el maremoto debe haberse producido en la fosa marina ubicada frente de la costa del norte de Chile.”

Este corresponde a un archivo recopilatorio .La ola barrió siete veces con una altura de 13 metros. La ola alcanzo California por el Norte y Nueva Zelanda – Australia por el Oeste. La ola encayó a varios barcos que estaban haciendo puerto en la bahía, entre ellos el Wateree y la America (Fig.29). A partir de la documentación se puede inferir que la ola se generó en la fosa marina frente a la costa del norte de Chile.

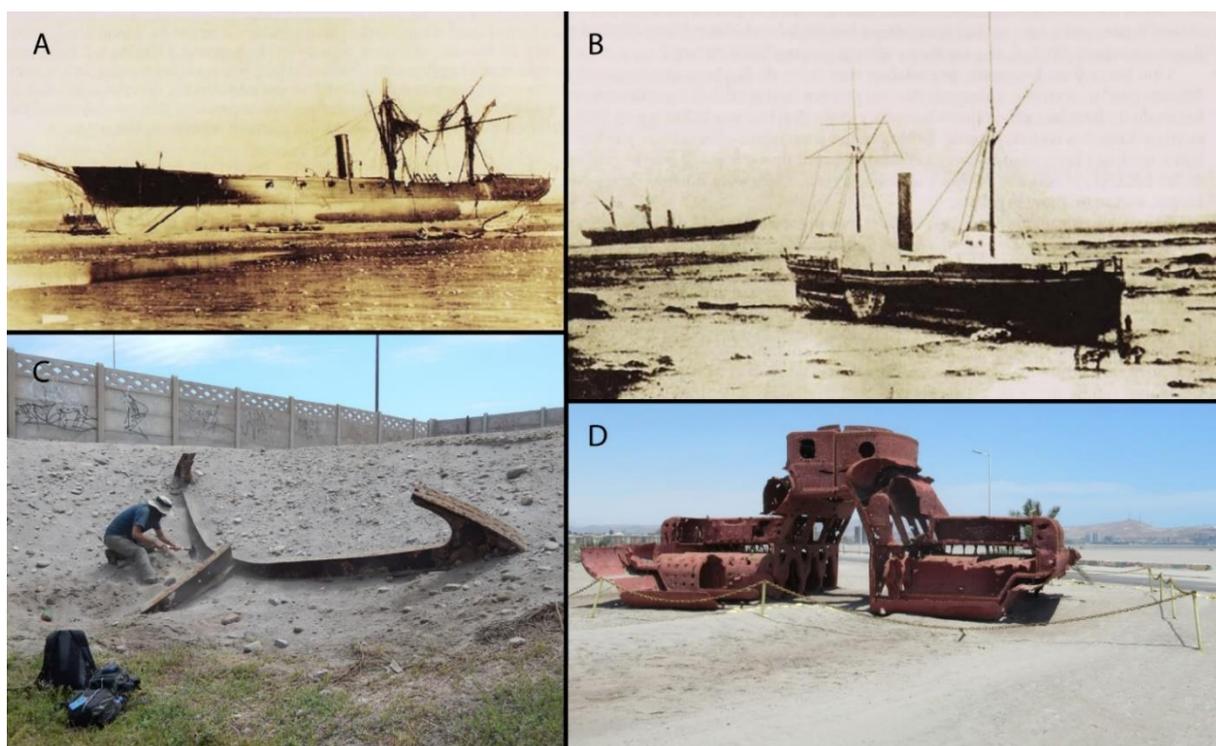


Figura 29. Embarcaciones que se encontraban en la bahía de Arica el día del evento de 1868. A: Corbeta América después del tsunami, Centro Histórico de la Armada de EE.UU. U.S Naval Historical Center, Sacado de Fernández Canque (2007). B: Wateree con corbeta América en el fondo y mulas incautadas cerca de la proa. Tomada de U.S. Naval Institute Proceedings, Annapolis, julio de 1926, p. 1.323, sacado de Fernández Canque (2007). C: Fotografía del casco de la fragata América en la costa de Arica a 100 metros del Parque Centenario, gentileza de James Goff. D: Fotografía de la caldera de la embarcación Wateree en la costa de la ciudad de Arica, camino al río Lhuta, en el fondo se puede apreciar el Morro, fotografía propia.

Relato 10

Informe oficial del capitán James H. Gillis, comandante del Wateree

“Bahía de Arica, 20 de agosto, 1868. Desde el buque Wateree de los EE.UU. (Tercera categoría)

Su Señoría:

Someto a su consideración el siguiente informe detallado de las circunstancias que rodearon el naufragio de esta nave el día 13 del presente:

A las 5:05 p.m. de tal día se sintió un ruido que retumbaba y que iba acompañado de una moción tremolante del buque. Ésta aumentó rápidamente su fuerza hasta el punto de indicar evidentemente que se trataba del remezón inusitadamente severo causado por un terremoto, lo que me hizo subir a la cubierta y, mientras estaba allí, observando la ciudad, me di cuenta que los edificios comenzaban a desplomarse y en menos de un minuto toda la ciudad no era más que una masa de ruinas sin que quedara a lo menos una casa en pie....

... A las 5:32 el mar comenzó a alzarse rápidamente y el buque, colocado sobre una violenta corriente que se deslizaba hacia el noreste, comenzó a andar a la deriva...

... He procedido a registrar la altura a la cual alcanzó la parte sólida de la ola y constatamos que fue de 42 pies y 5 pulgadas (12,93 m) y añadiendo su cresta llega a una altura adicional de 10 a 15 pies (3,05 a 4,57m).”

Hora del sismo 5.05 p.m., 5.32 p.m. hora del tsunami. Altura de la ola 12,93 a 18 metros.

Relato 11

Carlos Donoso Rojas, 1868: UN ANNUS HORRIBILIS EN LA HISTORIA DE IQUIQUE en Universidad Arturo Prat, Revista de Ciencias Sociales, primer semestre 2008, edición n°20, p. 38-39

“EL TERREMOTO DE AGOSTO

... El terremoto del día 13 de agosto de 1868 afectaría principalmente las ciudades de Arequipa, Arica y Tacna (Torres Marín, 1970:163-184). En Iquique, en cambio, la destrucción causada por el terremoto fue menor, no pasando de deterioros en el interior de las viviendas y escasos en las estructuras. A menos de quince minutos de ocurrido el terremoto, y sin que la población tuviese tiempo de reaccionar, una gigantesca ola de dirección noroeste, de una altura de entre veinte y treinta pies [de seis a diez metros] arrasó con más de cien construcciones. La inundación ingresó violentamente por la calle de La Puntilla y del Comercio, y en menor medida por la zona sur, causando incluso “remolinos y choques furiosos en el centro mismo de la población” ...”

La ola de tsunami se aproximó desde el noroeste a la ciudad de Iquique y presentó una altura de seis a diez metros. No hay mención de más de una ola.

Con respecto a lo que el evento de 1868 generó en la comunidad científica de la época, Fernández Canque (2007) indaga en investigaciones llevadas a cabo por la comunidad científica de habla Alemana. El geólogo y oceanógrafo, profesor Ferdinand von Hochstetter y para ese entonces director del Museo de Historia Natural de Viena estudió las características del evento. Poco tiempo después del evento entregó a la Academia de Ciencias de Austria un estudio respecto al desastre en conjunto con dos artículos en una revista científica de Austria “*Acerca del terremoto en Perú el 13 de agosto y el tsunami resultante en el Océano Pacífico, particularmente en las costas de Chile y Nueva Zelanda*” y “*El maremoto en el Océano Pacífico del 13 al 16 de Agosto de 1868 y las profundidades medias de este océano*”.

Estos estudios, acorde a Fernández Canque, son pioneros en el análisis *moderno* de tsunami, incluyendo rigurosas recolecciones de datos en la extensión de todo el océano

Pacífico. Los estudios indagaron en las características de la expansión de ondas posterior al sismo para las costas del norte de Chile y Australia y Nueva Zelanda. Von Hochstetter se interesó en determinar la profundidad del fondo marino (Fig.30). Sus hipótesis consisten en que existe una relación entre la profundidad del fondo marino y la velocidad de propagación para las ondas de un tsunami, además, el propone que esta relación permite deducir la profundidad del fondo marino meramente tras observación y medición de estas velocidades de propagación. Él recopiló velocidades de propagación en todo el océano generando una representación cartográfica de sus conclusiones.

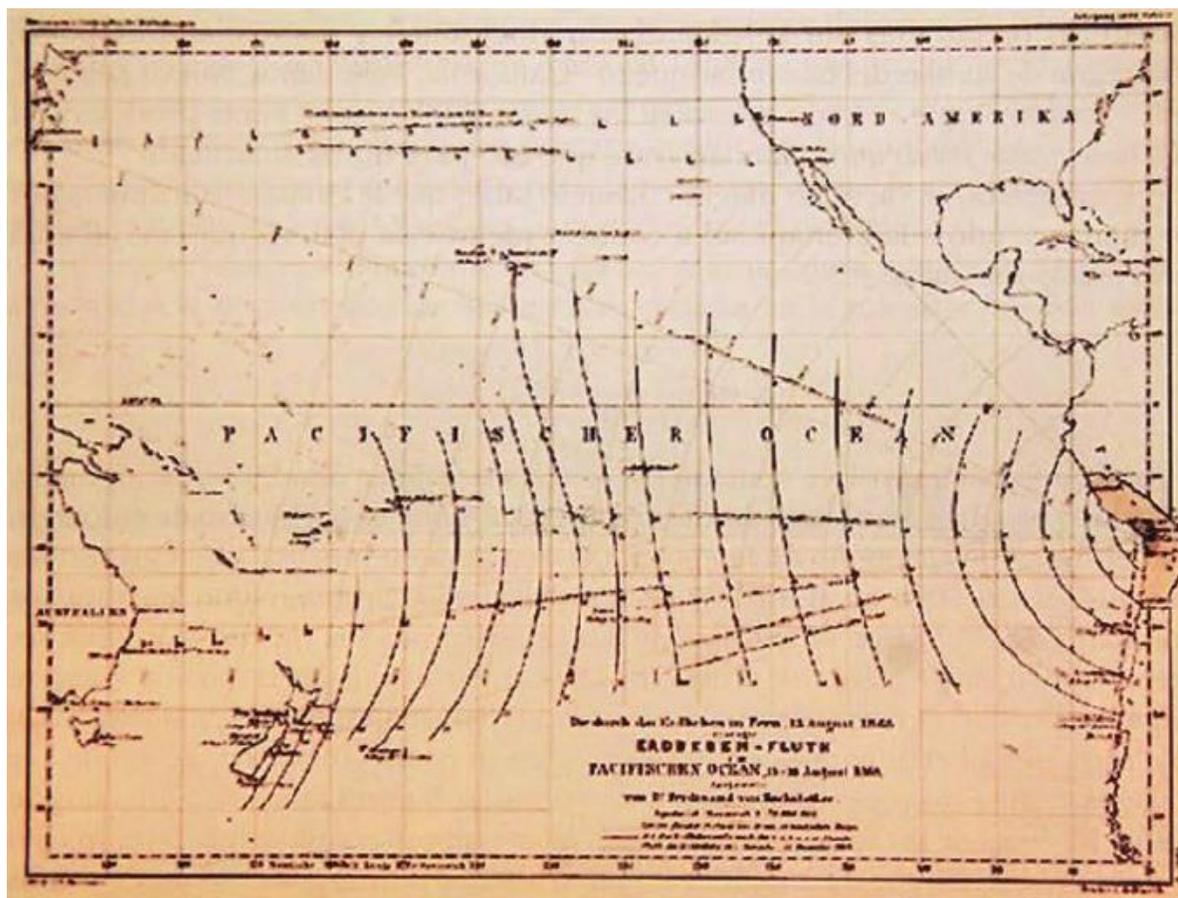


Figura 30. Propagación de las olas de tsunami del terremoto del 1868 en Arica. Ferdinand Von Hochstetter. Tomado de Fernandez Canque (2007)

Los resultados de Von Hochstetter maravillaron a la comunidad científica de la época, sorprendida por la extensión de las olas del tsunami de Arica. El científico estadounidense Richard Proctor concluyó en un artículo científico que en los mares ariqueños se había producido la *ola más grande jamás antes conocida* (Fernández, 2007).

3.3 Terremoto y tsunami de 1877

Relato 12

2.- *Observaciones afuera del área pleistocena, Historia sísmica de los Andes Meridionales por el Conde de Montessus de Ballore (Continuación), 1910.*

“... Arica. La línea férrea estaba destruida hasta el puente del río de Chacalluta, es decir, seis millas. Toda esta pampa entre dicho río y la ciudad había sido inundada por el mar, y con tal fuerza, que el “Wateree”, que había sido varado á mas de un kilómetro el año 68, fue arrastrado por la resaca, hasta cerca de la orilla del mar, á donde sus restos se encuentran ahora. Toda la parte baja de la población del puerto había sido bárrida completamente, hasta el extremo de no conocerse el lugar en donde estaban ántes los edificios, ni las casas. No había salvado ni un bote, ni una lancha y del muelle no quedaron sino algunos pilotes de fierro, que se conservaron hasta ahora para señalarles su ubicacion. Casi ni hubo desgracias personales que lamentar porque los habitantes del puerto, aleccionados con el del 13 de agosto del 68, conocían el peligro y los medios de conjurarlo. (Z.F)

Se inundó la Aduana y todas las mercaderías allí depositadas se han averiado. Los muelles fueron arrancados por las olas y toda la parte de la ciudad hasta la línea de la iglesia, el consulado británico, la oficina del cable y la oficina de los vapores del Pacífico completamente destruidas. La casita del cable perdida. Los restos del vapor “Wateree” vapor de guerra de los E.U. de N.A. perdido el 13 de agosto de 1868, arrastrados dos millas al N. por la playa. La posición del cable ha cambiado: ha quedado á la vista en la bahía. La boya S. del cable arrastrada como un cuarto de milla hacia el N.

La estación del ferrocarril, las máquinas, los carros y demás accesorios completamente destruidos y desparramados en distintas direcciones: solo las ruinas de la oficina del cable han quedado en pié por aquel lugar.

La gran ola subió 65 piés (19.75 metros) (El Nacional de Lima del 13).

El mar avanzó hasta 6 cuadras (750 metros); según “La Reforma”, las pérdidas ocasionadas por el terremoto y el ras de marea llegaron á un valor de 4.000,000 de pesos. Hubo 5 víctimas (El comercio de Lima del 14).

El mar salió 8 veces y subió 39 piés, habiendo ocurrido el mayor flujo á las IV del 10. Se describieron como verdaderamente terribles los estragos producidos por el terremoto y el maremoto. El casco del “Wateree” varado por el maremoto de 1868 fue transportado á dos millas mas hacia el norte á lo largo de la costa. El flujo debe haber tenido la misma altura que en el año aludido. (El Deber núm. 540 G.)

Arica. – A las XXI mas ó menos (t. local medio) tuvo lugar el primer fluo que alcanzó la altura del malecón y entonces se retiró el mar. Su primera salida coincidió con la plenamar. Los flujos que sucedían con intervalo de media hora próximamente. La ola mas alta, ó sea la penúltima, tuvo lugar á las IV.30 del 10 y alcanzó á 8.6 metros de altura (Informe del Gobernador del puerto. G.)

El maremoto principió á las XXI por una retirada de un cuarto de milla mas ó menos. Las cuatro primeras olas se sucedieron hasta media noche, la quinta á la I 1/2 , la sexta á III, y las dos siguientes á IVh y á IVh. 5. La de IVh fue la mayor y alcanzó una altura de 40 a 45 piés encima de la marca de las plenamares. Las corrientes eran circulares en la bahía y afuera en dirección del S. hacia el N. (Informe del Cónsul Alemán en Tacna. G.)

Se notará la gran discrepancia que existe en estas tres relaciones respecto de la altura alcanzada por la ola principal.”

Este relato corresponde a una recopilación de variadas fuentes. El mar entró al continente inundando desde el Morro hasta el actual río Lluta, entrando hasta 6 cuadras (750 m) en la ciudad, ubicación de la iglesia. El mar salió 8 veces en intertantos de aproximadamente 30 minutos y existen discrepancias entre la altura de la ola más alta (penúltima), variando estas entre 12 metros y 19.75 metros. La destrucción es total, se menciona la removilización del casco del *Wateree* hacia el norte de la ciudad y una disminución en las bajas en comparación al evento de 1868 debido al conocimiento de estos fenómenos por la población.

Relato 13

Federico Greve, 1964 Universidad de Chile, Instituto de Geofísica y Sismología

“1877. Mayo 9, a las 22 horas se sintió un terremoto (grado VI) que hizo estragos en Iquique. La ola marina que le siguió subió 5 metros sobre el nivel medio, barrió con la mitad de la población, y se hizo sentir en todo el área del Océano Pacífico tal como Chile, California, Japón y Nueva Zelanda.

En Iquique se comprobaron cambios en el fondo del mar.

En Arica el efecto del terremoto fué semejante al que soportó 10 años antes. El casco del buque de guerra “*Wateree*”, varado por la ola del año 1868, fue removido y trasladado 2 millas más al norte.”

El evento ocurrió el 9 de mayo a las 22 horas, generando una ola de altura 5 metros. Esta se observó en Chile, California, Japón y Nueva Zelanda. En Arica los efectos fueron similares a los de 1868. El casco del buque *Wateree* fue removido.

4 SEDIMENTOLOGÍA DE DEPÓSITOS DE TSUNAMIS

El registro de tsunami en la región de Arica y Parinacota es analizado en este trabajo en tres sitios de interés, dos de ellos en la ciudad de Arica y uno en la Bahía de Camarones. Cada uno de estos sitios se presenta en este capítulo con una columna esquematizada y sus muestras asociadas. Se llevaron a cabo múltiples análisis de laboratorio para cada una de las muestras seleccionadas, los cuales se clasifican en dos apartados: registro granulométrico y registro geoquímico paleontológico. Cada uno de los sitios nombrados: PC-18, PC2-18 y CC-18 tiene sus muestras etiquetadas con el nombre del sitio y un número, es decir: PC-1801 hasta PC-1826, PC2-1801 hasta PC2-1825 y CC-1801 hasta CC-1814.

4.1 Observaciones de terreno

4.1.1 Observaciones geomorfológicas

El resultado de los análisis de teledetección (Fig. 31 y Fig.32) indican que en la ciudad de Arica existen tres terrazas marinas diferenciables por altura y pendiente. Una comparación de estos antecedentes digitales con lo observado en terreno permite diferenciar solamente dos terrazas marinas. Es posible que la tercera terraza marina fuera erosionada por la urbanización, por tanto, no se utilizará esta última para fines de este trabajo.

La geología de la hoja n°84 de Arica (García, *et al.*, 2004) en conjunto con el mapeo geomorfológico en la ciudad permiten unificar criterios en tanto a lo que se puede observar en la ciudad de Arica (Fig. 33). En este mapa se puede observar tres cauces fluviales, dos de ellos activos con depósitos correspondientes al Pleistoceno y un paleocauce, ubicado en la mitad del mapa, que corresponde al Plioceno. Se puede distinguir también la canalización del río San José (Cauce fluvial inferior).

Parque Centenario

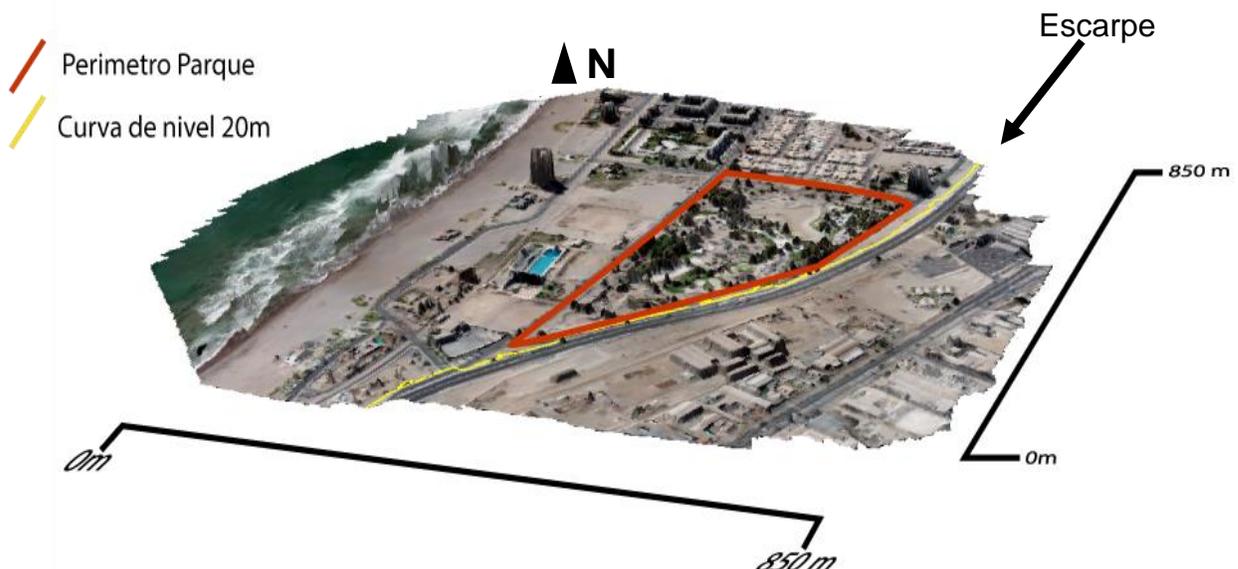


Figura 31 Modelo 3D del Parque Centenario, se puede visualizar el cambio de altura entre ambas terrazas marinas. Elaboración mediante software AgiSoft

Terrazas Marinas Arica

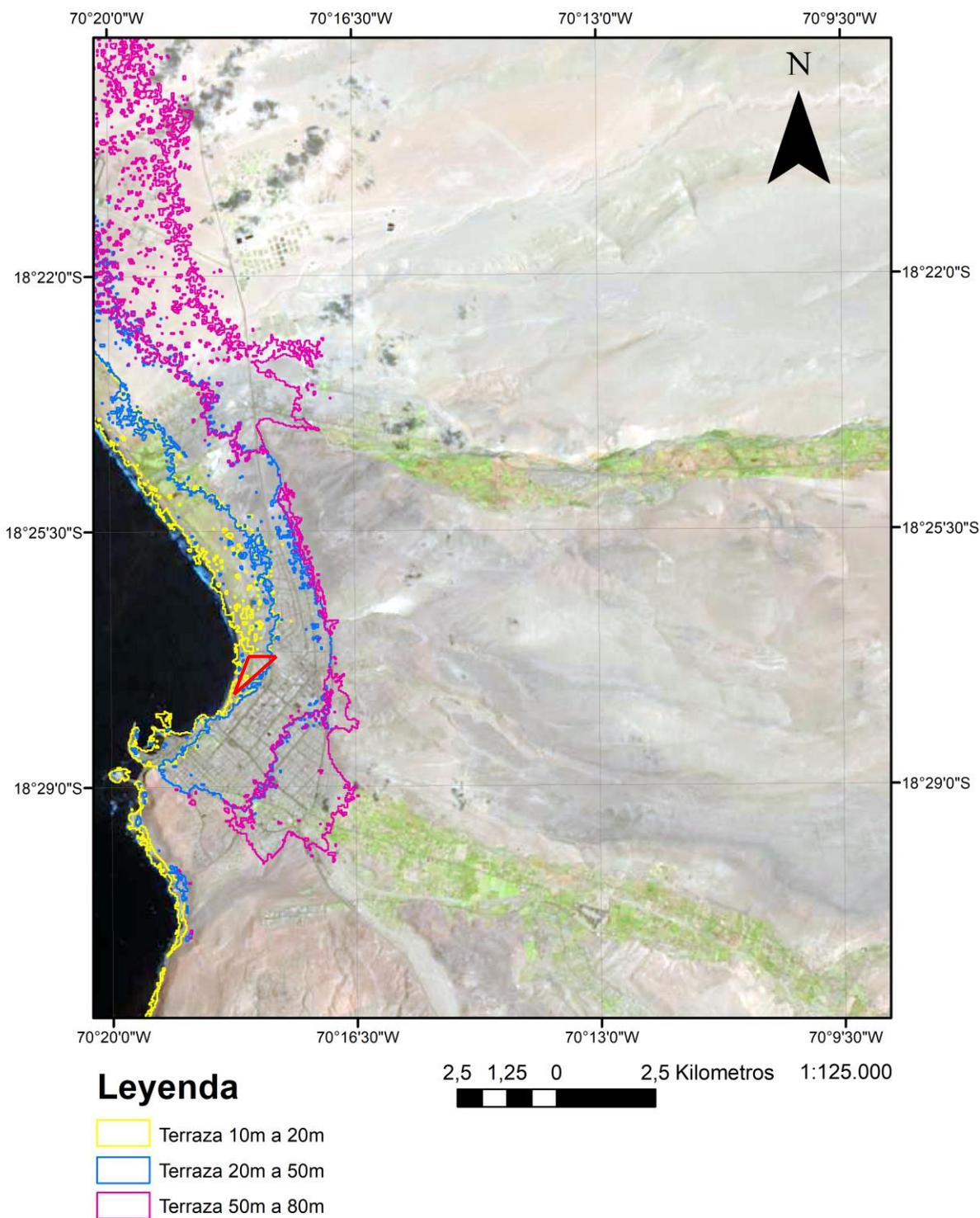
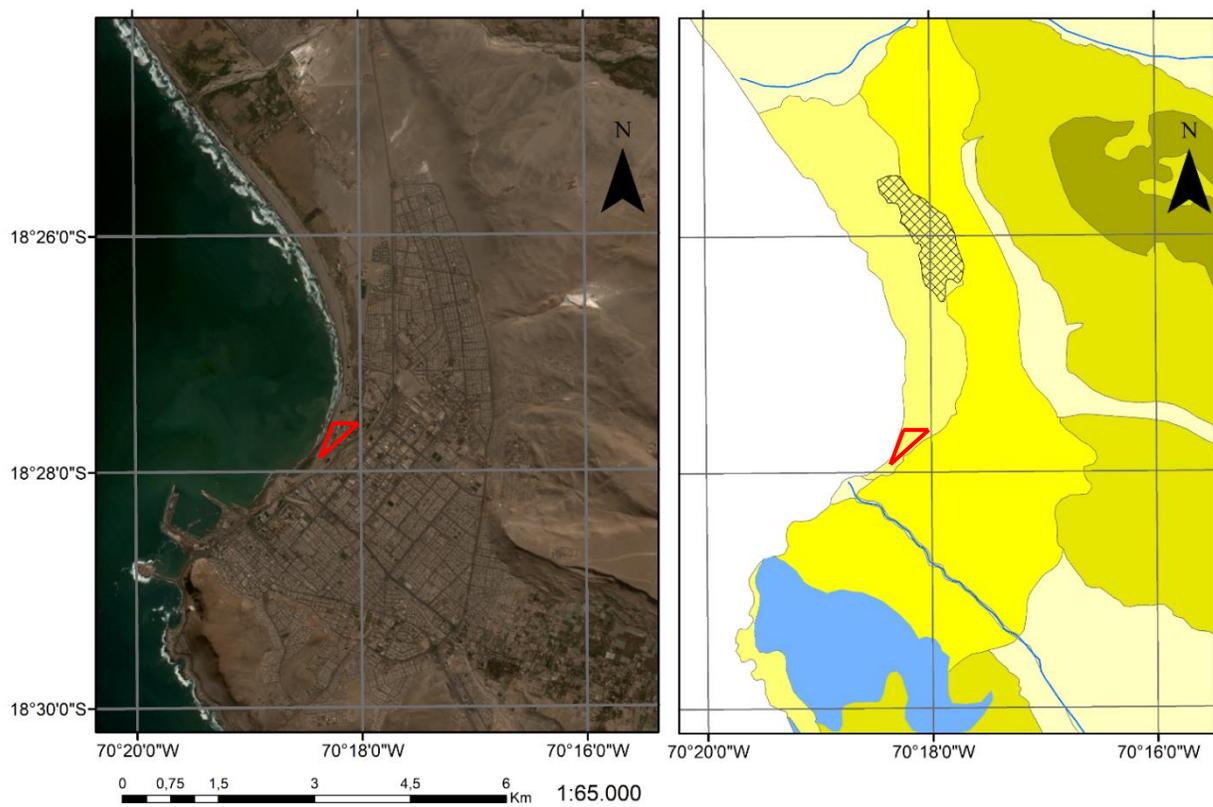


Figura 32 Mapeo de terrazas marinas en la ciudad de Arica utilizando el software de teledetección ENVI basado en modelos de elevación digital y imágenes LANSAT de la Alaska Satellite Facility. En rojo se marca la zona de estudio del Parque Centenario.



Leyenda

Cauces Fluviales	Remoción en masa (Ms)	Terraza marina T0 (Qt)	Depósitos fluviales (Ps y Pl)
Fm. Camaraca (Jr)	Depósitos coluviales y aluviales (Pl)	Terraza marina T1 (Ps)	Inferido

Figura 33 Topografía y mapa de la ciudad de Arica. Jr: Jurásico, Ms: Mioceno superior, Pl: Plioceno, Ps: Pleistoceno, Qt: Cuaternario. En rojo se demarca la zona de estudio del Parque Centenario. Confección mediante uso de software ArcGis en conjunto con la hoja n°84 (García, et al., 2004).

4.1.2 Definición de facies

Durante el trabajo de terreno se distinguieron diferentes facies, las cuales se representan en cada uno de los sitios con un grupo de muestras asociadas a cada facies. En general, los tres sitios estudiados presentan al menos tres claras facies que pueden ser distinguidas (Figuras 36, 37 y 38). Una facies de arena, la cual tiene un alto contenido de fragmentos de concha, poco consolidado, suele ser de poca potencia en el registro y se intercala con otras facies (Fig. 34). La segunda facies distinguible en el registro corresponde a la facies de humedal (Fig.35D), que consiste en sedimento fino semiconsolidado caracterizado por una abundancia de raíces y restos orgánicos de plantas. Estas dos facies suelen tener la mayor potencia en el registro estratigráfico y son las más comunes, ya que como se menciona en secciones anteriores, los tres sitios de estudio se encuentran en sectores de humedal. La tercera facies es calcárea (Fig.35B), que suele encontrarse sólo una vez en cada sitio, presentando una potencia reducida y ubicándose usualmente por sobre la facies de humedal.

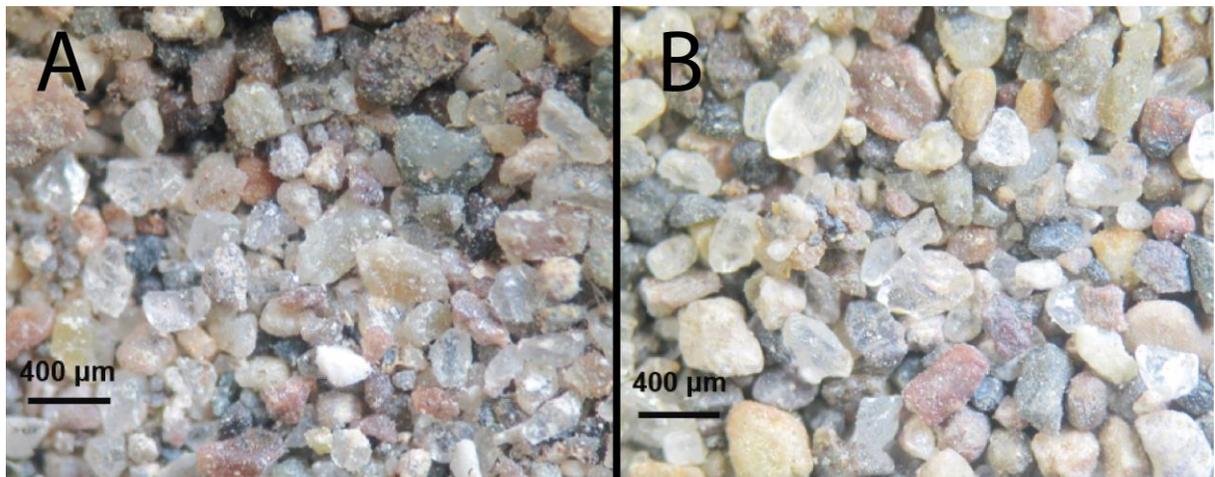


Figura 34 Facies de arena. A: Muestra del sitio PC18, arena media. B: Muestra del sitio CC18, arena gruesa. Imágenes tomadas utilizando el microscopio Olympus del laboratorio de sedimentología de la Universidad de Chile.

Otras facies con menor representatividad en los sitios estudiados se pueden observar también en el registro. La facies orgánica (Fig.35A) consiste en sedimento fino con alta concentración de carbón y precipitaciones calcáreas. Esta facie solo es distinguible en Arica y ha sido caracterizada acorde a los reportes arqueológicos de la zona de estudio como niveles ocupacionales (Briceño, 2015 y 2016; Cisternas, 2018). En el sitio PC-18 se observa este tipo de nivel ocupacional. Finalmente, la facies aluvial (Fig.35C) se caracteriza por una matriz de sedimentos finos en conjunto con clastos hasta decamétricos.

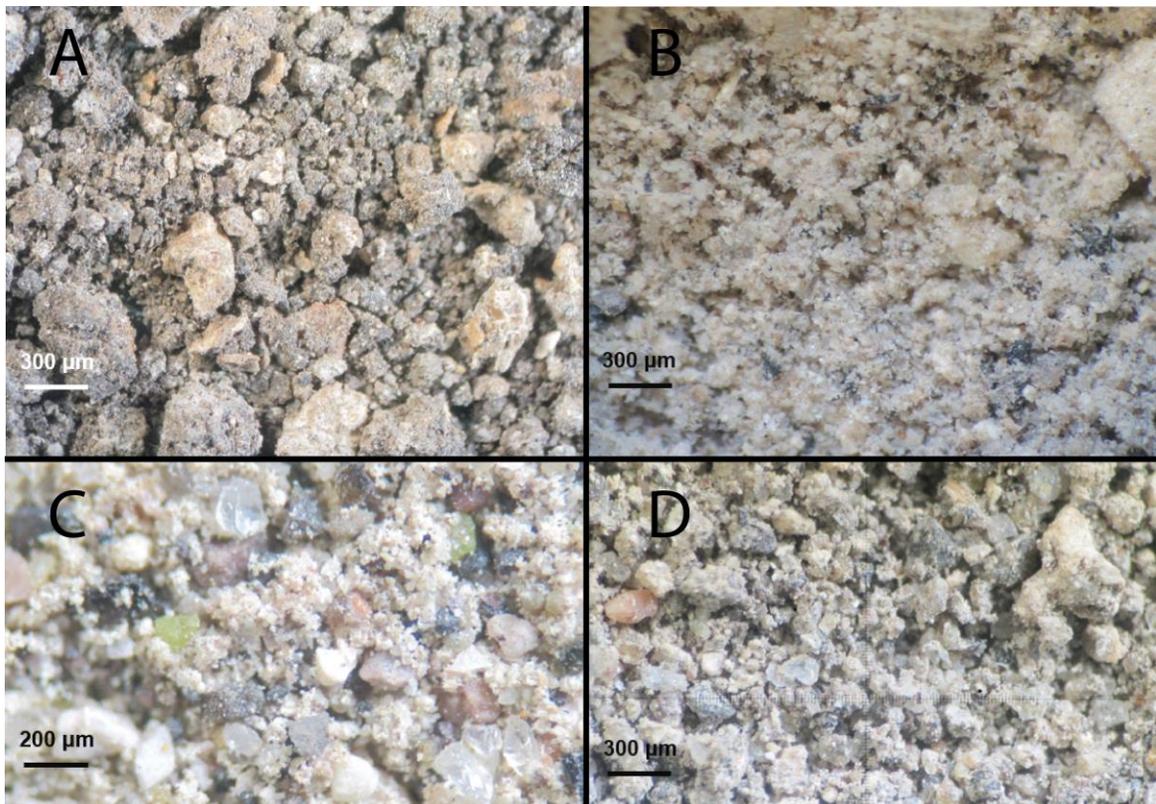


Figura 35 A: Facies orgánica, sitio PC2-18, B: Facies calcárea, sitio PC2-18, C: Facies aluvial, sitio PC-18 y D: Facies humedal, sitio PC2-18. Imágenes tomadas utilizando el microscopio Olympus del laboratorio de sedimentología de la Universidad de Chile.

En el sitio PC2-18 se puede apreciar un canal arqueológico, el cual aún no ha sido asignado a un periodo histórico. Este canal se esquematiza como transparente para el sitio PC2-18 (Fig. 37) debido a que ninguna muestra de sedimento fue tomada dentro de él.

4.1.3 Estructuras sedimentarias

Dentro de los sitios estudiados se presentan morfologías entre los estratos que indican el tipo de interacción entre estas capas. Para el estudio de tsunamis, la distinción de estas características es de alta importancia ya que un depósito de tal evento posee características poco comunes en el registro sedimentológico (Röbke & Vött, 2017, Peters & Jaffe, 2010). En este sentido, es relevante notar que para los tres sitios estudiados se pudieron distinguir clastos de *rip-up* (Fig. 39) completos o parciales. En los sitios ubicados en el sector de Arica, esta interacción se lleva a cabo sobre la facies calcárea, a diferencia del sitio ubicado en Camarones, donde esta morfología se puede apreciar sobre la facies de humedal. También se pueden observar perturbaciones en el estrato suprayacente, presentando irregularidades en dicho contacto. Este tipo de evidencias sugiere un flujo de alta energía y de carácter erosivo que se desplaza por sobre el nivel suprayacente, generando canales en zonas de debilidad y arrancando fragmentos semiconsolidados a su paso. En la figura 39A se puede visualizar cómo la capa calcárea es fracturada por el flujo y en la figura 39 B se aprecia una ruptura parcial de ésta con una infiltración de arena rellorando el espacio vacío. Para el sitio CC-18 esta morfología es aún más penetrativa, presentando un fragmento de la facies humedal completamente asociado dentro de la facies de arena posterior a su separación (Fig.39C).

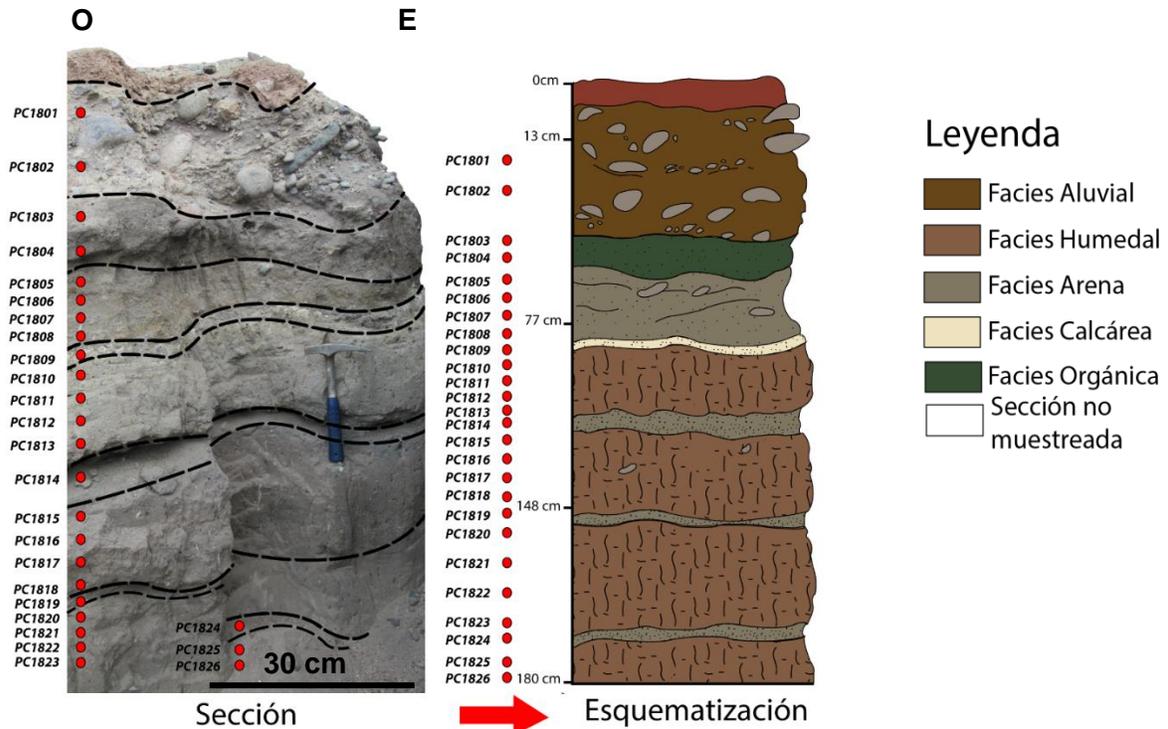


Figura 36. Sección y esquematización para el sitio PC-18. Los puntos donde se llevó a cabo el muestreo son marcados por círculos rojos y las líneas negras segmentadas indican los estratos o capas de la sección.

En el sector de Arica, existen evidencias de paleocanales (Fig. 40) que se observan en ambos sitios dentro de la facies de arena marina. Estos canales concentran sedimentos de mayor tamaño al promedio de la facies de arena y, además, llevan consigo fragmentos de metal de origen antrópico. La presencia de este tipo de canales puede ser debido al uso de caudales continentales por el flujo de resaca al momento de retirarse el oleaje o también es posible que el tsunami erosionara estos canales en zonas de sedimento poco consolidado. En el caso del sitio PC-18 la existencia de un canal previo por donde circuló el flujo de tsunami parece ser más clara debido a la existencia del canal arqueológico directamente bajo la facies calcárea (Fig. 40). De cualquier modo, la presencia de clastos decamétricos y fragmentos de metal, provenientes probablemente de edificaciones o embarcaciones (Sección 3.2), sugiere prematuramente la existencia de un flujo de alta energía.

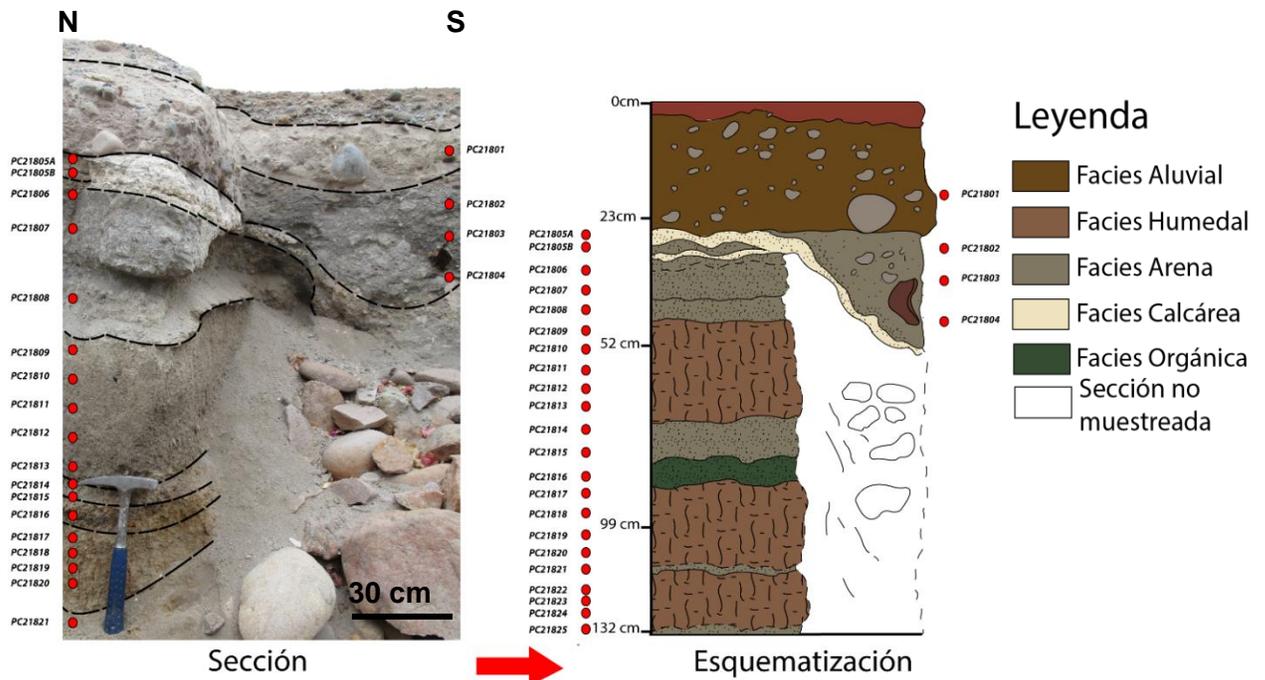


Figura 37. Sección y esquematización para el sitio PC2-18, se marca con blanco la sección de canal arqueológico encontrado dentro del sitio, no se llevó a cabo muestreo dentro de esta. Los puntos donde se llevó a cabo el muestreo son marcados por círculos rojos y las líneas negras segmentadas indican los estratos o capas de la sección.

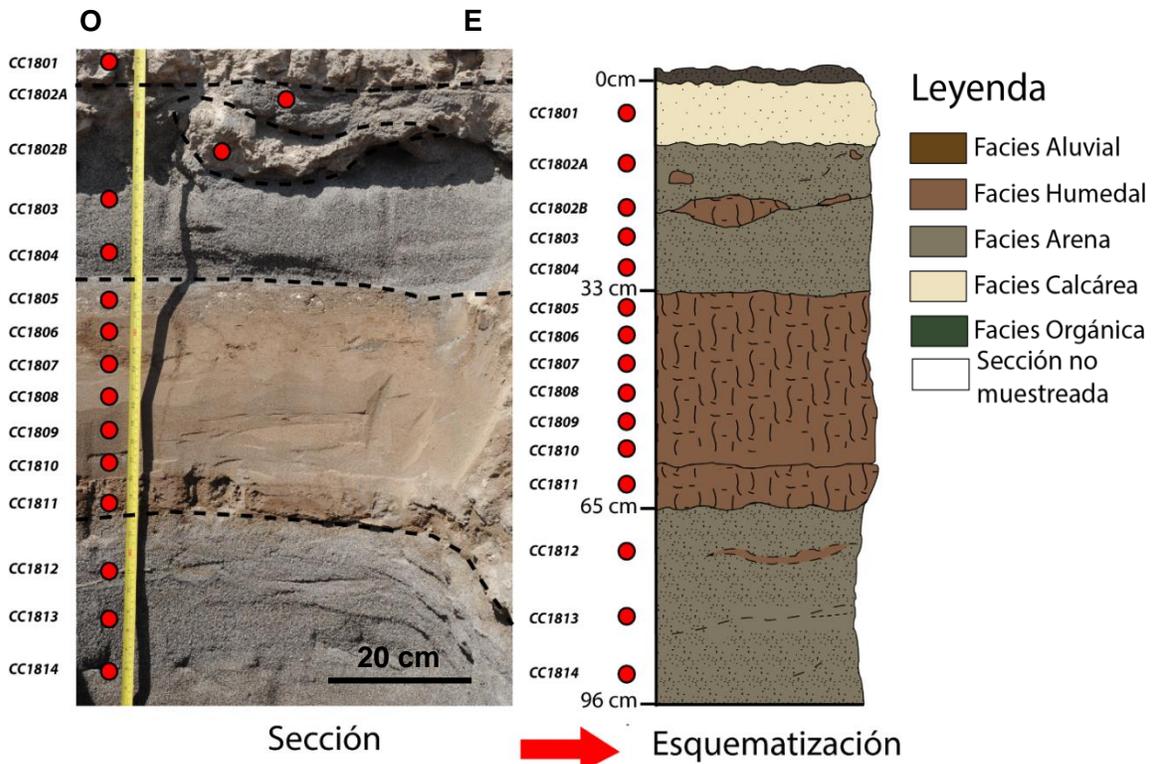


Figura 38. Sección y esquematización para el sitio CC-18. Los puntos donde se llevó a cabo el muestreo son marcados por círculos rojos y las líneas negras segmentadas indican los estratos o capas de la sección.

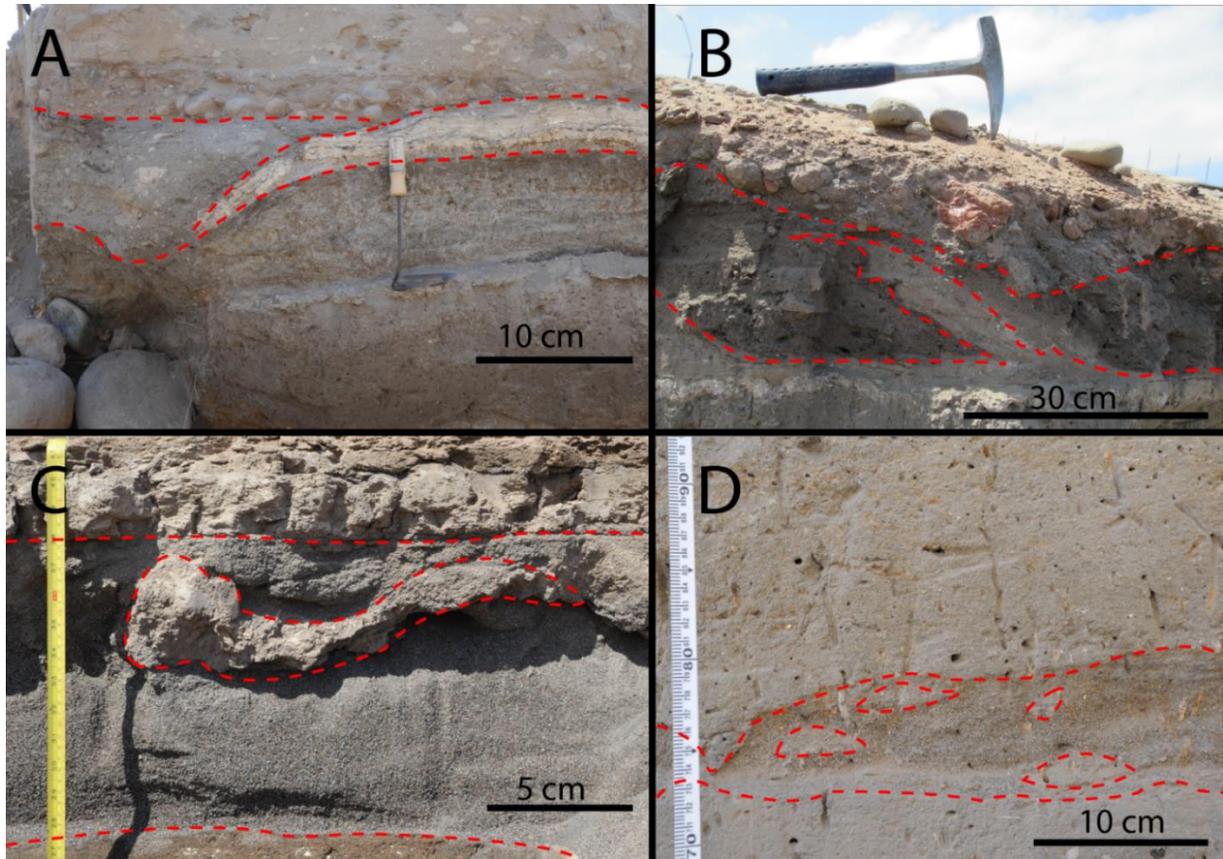


Figura 39. Fotografías de morfologías en la facies de arena de los sitios estudiados. A: Facies calcárea fragmentada por la facies suprayacente de Arena Marina, Sitio PC2-18. B: Rip-up en la facies calcárea (PC-1809), suprayacente a la facies de arena, sitio PC-18, muestras PC-1805 a PC-1808 corresponde a la facies de arena (línea punteada roja) y las muestras PC-1810 a PC-1813 a la facies de humedal. C: Clasto de rip-up de la facies de humedal dentro de la facies de arena marina en el sitio CC-18, muestra CC-1802A. D: Clastos de rip-up en el sitio PC18 (PC-1814). Las líneas rojas muestran los niveles de arena estudiados.

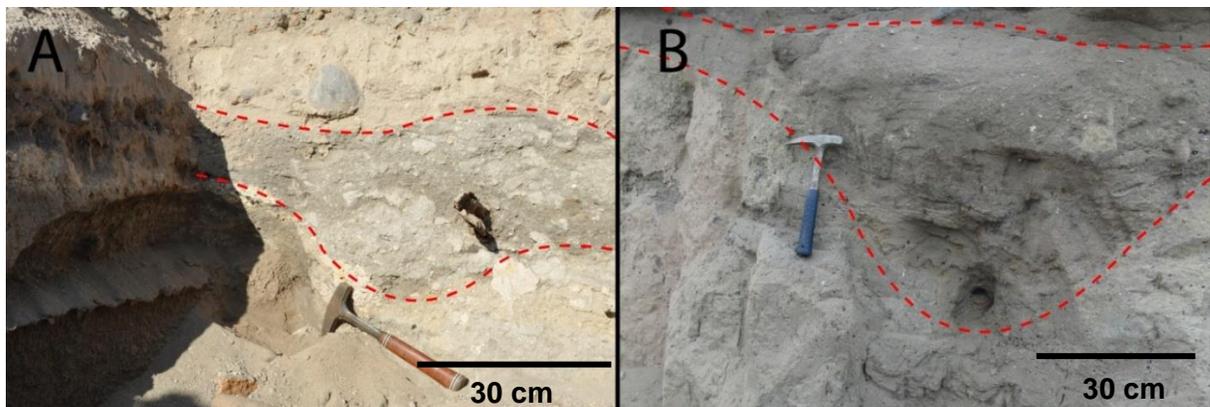


Figura 40. Fotografías de canales con fragmentos de metal incrustados. A: Sitio PC2-18. B: Sitio PC-18. Con trazas rojas se marcan las separaciones entre diferentes estratos

En tanto a la preservación de estructuras sedimentarias, en ambos sitios de Arica se puede apreciar estratificación convoluta en la facies de arena marina, mientras que, en Caleta Camarones, es identificable estratificación cruzada como estratificación convoluta. En la sección de la Fig. 41 se puede apreciar esta estratificación convoluta y se indica con una flecha negra la dirección de la línea de costa, a la cual este escarpe es

perpendicular. Como ha sido registrado en estudios previos (Bahlburg, *et al.*, 2017), la estratificación cruzada, en una facies que se infiere que registra un evento de tsunami, es capaz de indicar la dirección de flujo y por tanto discriminar entre un flujo de ingreso o resaca. Basado en esta información, en la Fig. 41B se puede ver la dirección del flujo de ingreso marcada con una flecha de color blanco y en negro, la dirección de la línea de costa para el sitio CC-18 (CC1802A hasta CC1804).

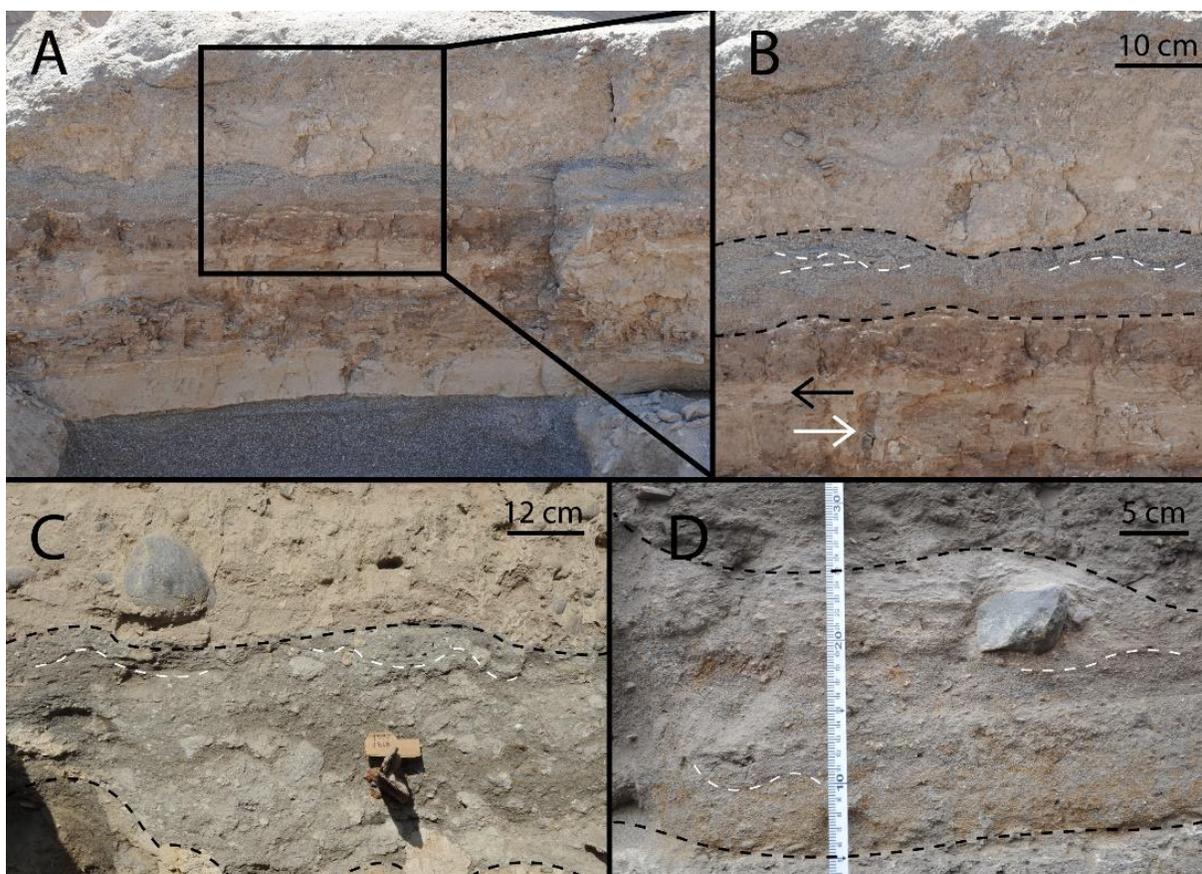


Figura 41. Fotografías de facies de arena marina para los sitios estudiados. En blanco se resaltan estratificación convoluta y cruzada; en negro se demarca la facies de arena. A y B: Sitio CC-18, se aprecia estratificación cruzada y convoluta (CC1802A hasta CC1804). C: Canal histórico relleno de sedimentos de arena, se puede ver en blanco la estratificación convoluta. D: Nivel de arena en sitio PC18 (PC1805 a PC1808) se puede apreciar clasto de gran tamaño junto a estratificación convoluta en línea blanca punteada.

4.2 Registro granulométrico

4.2.1 Granulometría de clastos

De los sitios estudiados, los que se encuentran en la ciudad de Arica son el foco del trabajo, por tanto, los que presentan una mayor densidad de muestras. Para estos sitios (PC-18 y PC2-18) se puede observar que la distribución de tamaño de grano promedio (TGP) es más homogénea que en el caso del sitio CC-18, al igual que para las secciones D10, D50 y D90 (Fig. 42, 43 y 44).

Para el sitio PC-18 (Fig. 42) la distribución TGP es parcialmente representativa de las secciones D10, D50 y D90, siendo la distribución D90 la más homogénea de los resultados con valores similares en toda la extensión de la columna estratigráfica,

exceptuando la primera facies de aluvión (PC1801 hasta PC1803). Esto sugiere un tamaño de grano similar en toda la columna para la parte más gruesa de la distribución, registrando los cambios de facies en las partes más finas de la distribución. Con respecto a los parámetros sedimentológicos selección, asimetría y curtosis, estos presentan una distribución relativamente homogénea a lo largo de toda la columna. La facies de arena presenta una mejor selección para la parte superior de la columna, llegando a valores de $0,8 \phi$. Contrastantemente, la facies de arena más profunda no posee buena selección. Esto se puede observar con mayor claridad en los parámetros de asimetría y curtosis, siendo estos aún más homogéneos que la selección. La única excepción a este fenómeno en este sitio de estudio es la facies de aluvión depositada por sobre la facies de arena que, siguiendo la misma línea de pensamiento, se tiene que este nivel aún preserva sus características originales dado que es el más reciente y es solamente cubierto por el desarrollo de suelo actual. También se puede apreciar en la muestra PC1816 (Fig. 42), ubicada dentro de la facies de humedal, una anomalía en su tamaño de grano en las secciones D10 y D50, lo que también es visible en su selección y *curtosis*. Una explicación a esto es difícil de conjugar debido a lo puntual del evento, donde sus muestras vecinas presentes en el mismo nivel no muestran ninguna anomalía similar.

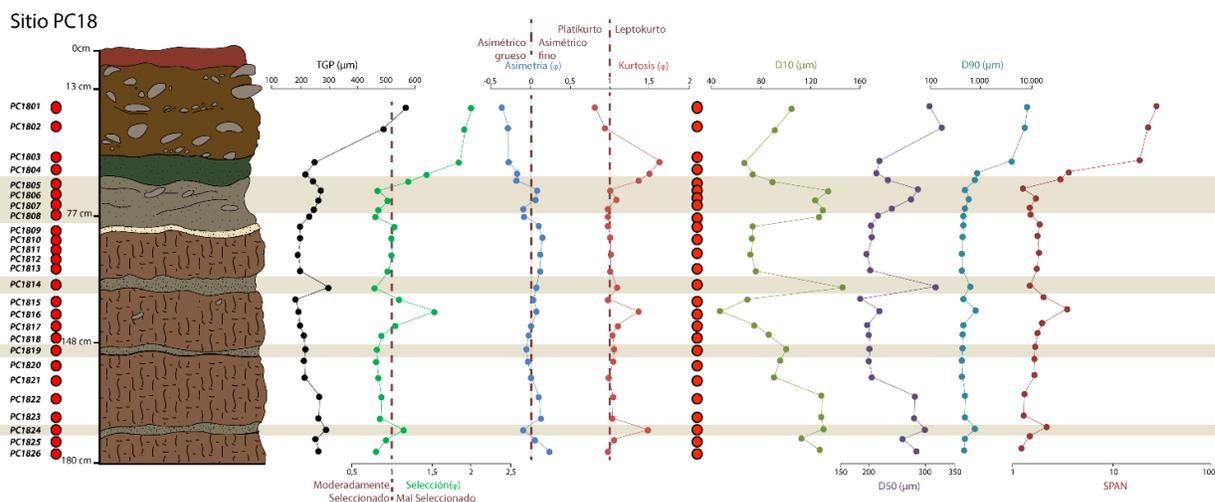


Figura 42. Esquematación de columna y resultados para granulometría de clastos para el sitio PC-18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la curtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.

En cuanto al sitio PC2-18 (Fig.43), se aprecian valores de TGP mayores en la facies de humedal ($\approx 400 \mu\text{m}$) y menores en la facies de arena ($\approx 250 - 350 \mu\text{m}$). Al igual que en el sitio PC-18, la facies superior de aluvión presenta los mayores valores de TGP ($\approx 1400 \mu\text{m}$), esta relación se mantiene para todas las secciones D10, D50 y D90. Esto es anómalo al compararlo con el resto de la facies de arena en otros sitios y en particular con la granulometría de matriz para el mismo sitio PC2-18. Se puede suponer de manera prematura que esto se debe a una meteorización del sedimento en este sitio en particular para la facies de arena. En el caso de los parámetros granulométricos, si se puede apreciar una preferencia por mejores selecciones ($\approx 0,7 \phi$) y asimetría positiva o gruesa en la facies de arena ($\approx 0,3 \phi$). En el caso de la curtosis, a medida que la profundidad aumenta en la columna, las tendencias son más leptocurtas, independiente de la facies. Finalmente, los valores de SPAN son perceptiblemente menores en facies de arena.

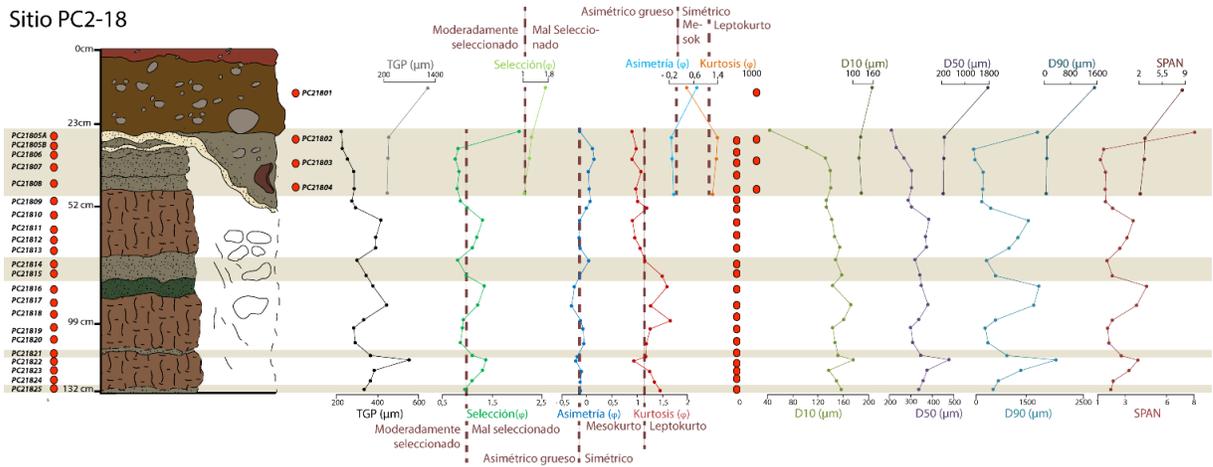


Figura 43. Esquematación de columna y resultados para granulometría de clastos para el sitio PC2-18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la kurtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.

En tanto al sitio de Caleta Camarones, CC-18 (Fig.44), se puede apreciar de manera muy sencilla la amplia diferencia entre lo que corresponde a facies de arena y facies de humedal. Esto indica una buena preservación del sedimento en el sitio y permite una clara visualización de las facies. Los valores de TGP indican un cambio fuerte entre ambas facies, lo que también se ve reflejado en las secciones D10 y D50, siendo la sección D90 donde hay un menor cambio en la granulometría, aunque sigue siendo posible visualizar una diferencia entre facies. Lo que respecta a parámetros sedimentológicos, la facies de arena presenta una mejor selección como lo es también en las secciones de Arica, no obstante, asimetría y *curtosis* presentan leves variaciones sin algún patrón identificable entre facies, esto se aprecia también en el parámetro de SPAN.

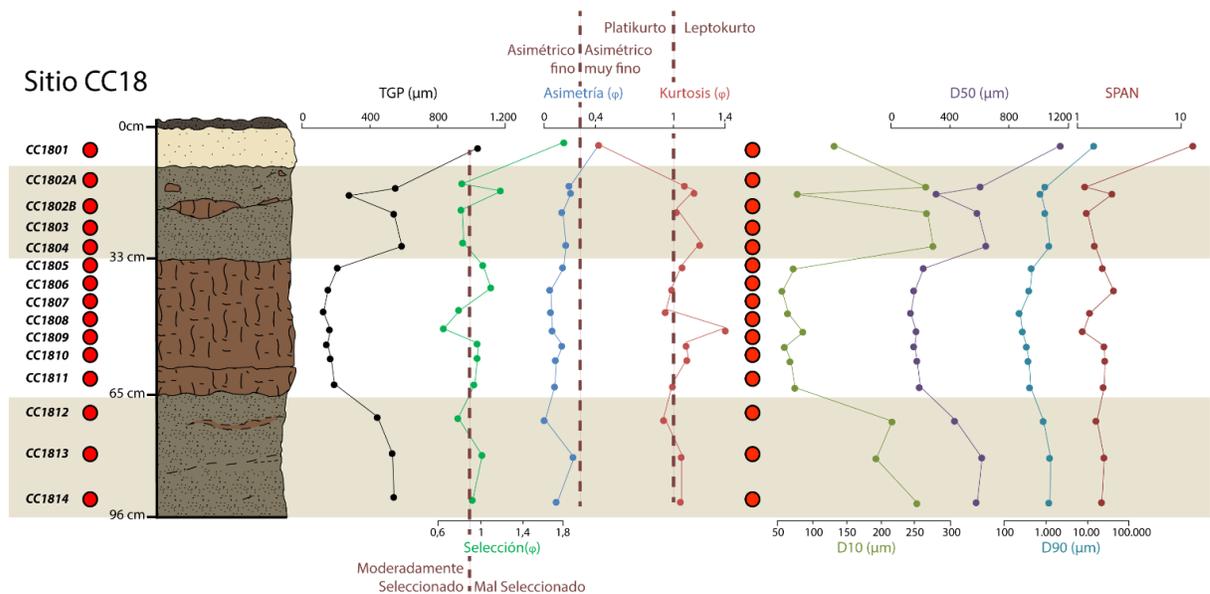


Figura 44. Esquematación de columna y resultados para granulometría de clastos para el sitio CC-18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la kurtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.

4.2.2 Granulometría de matriz

La granulometría de matriz muestra los tamaños de grano menores a 1 mm. Este análisis es el que permite develar más claramente diferencias entre distintas facies por su exactitud y por las diferencias inherentes que presentan los sedimentos de facies lacustres o humedales en comparación con los sedimentos de facies marinas.

Para el sitio PC-18 (Fig. 45) el tamaño de grano promedio es representativo de la realidad de la distribución. Al hacer un contraste con las secciones D10, D50 y D90, los resultados muestran máximos similares, apreciándose más discretamente en la sección D90. Con respecto al resto de los parámetros sedimentológicos, existe una variación en la selección, asimetría y *curtosis* para la columna, en la cual los valores correspondientes a las dos facies de arena superiores de la columna (PC1805 hasta PC1808 y PC1814) consistentemente se clasifican de manera diferente al resto del sedimento. Es interesante notar la correlación entre TGP y selección, donde se observa una mejor selección para las muestras con mayores valores de TGP. Esto indica que las muestras de arena media son las que presentan una mejor selección, lo que va acorde con la simetría y curtosis de estos sitios también. El parámetro SPAN también muestra una anomalía notoria para la facies de arena, una relación directa con la selección e indirecta con los tamaños de grano.

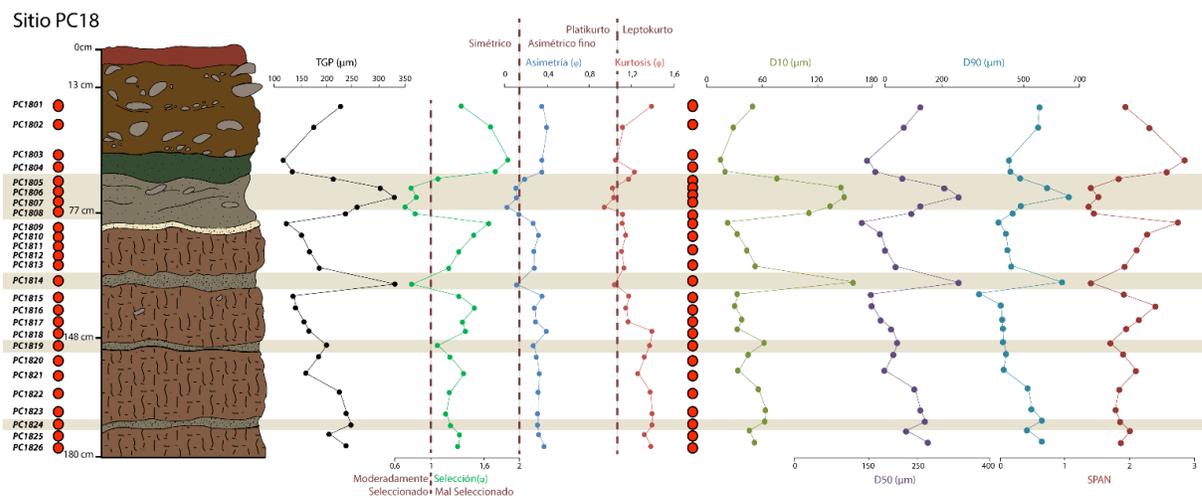


Figura 45. Esquematación de columna y resultados para granulometría de matriz para el sitio PC-18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la curtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.

El resultado de la granulometría de matriz para el sitio PC-2-18 (Fig. 46) es bastante similar al PC-18 en el sentido que los valores de TGP y secciones D10, D50 y D90 presentan fuertes similitudes, siendo levemente menos notorias en el caso de la sección D90. Este sitio también presenta la antes mencionada correlación de carácter indirecto entre TGP y selección, con las facies marinas de arena siendo siempre la con mejor selección, no obstante, aún bastante pobres. Para asimetría y *curtosis*, la facies de arena distintivamente tiene una asimetría fina (positiva) y un carácter *leptocurto*. El valor del parámetro SPAN es menor para la facies de arena marina y presenta una correlación directa con la selección.

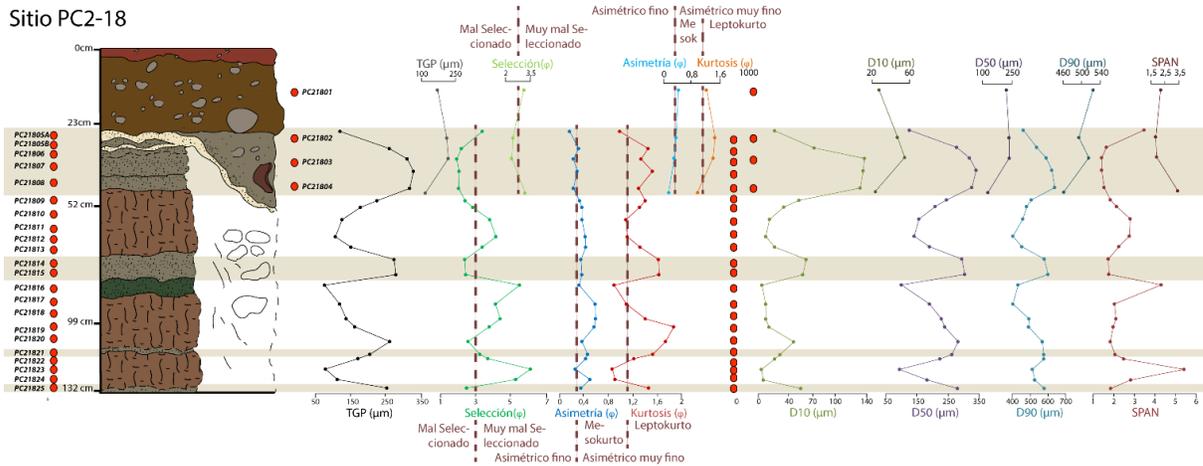


Figura 46. Esquematación de columna y resultados para granulometría de matriz para el sitio PC2-18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la kurtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.

En la bahía Camarones, el sitio CC-18 (Fig. 47) muestra resultados muy similares a los que se vieron en su granulometría de clastos en la sección 4.2.1: amplias diferencias entre facies de arena y facies de humedal y similitudes notorias entre las secciones D10, D50 y D90 respecto al TGP, en este caso la similitud entre estas es aún más notoria existiendo prácticamente ninguna diferencia entre los valores de las tres secciones D10, D50 y D90. La selección muestra una relación indirecta con el TGP, con mejores selecciones en la facies de arenas. Se puede apreciar un carácter platikurto y levemente asimétrico en facies de arena. Los valores de SPAN presentan valores mayores para la facies de humedal con respecto a las de arena.

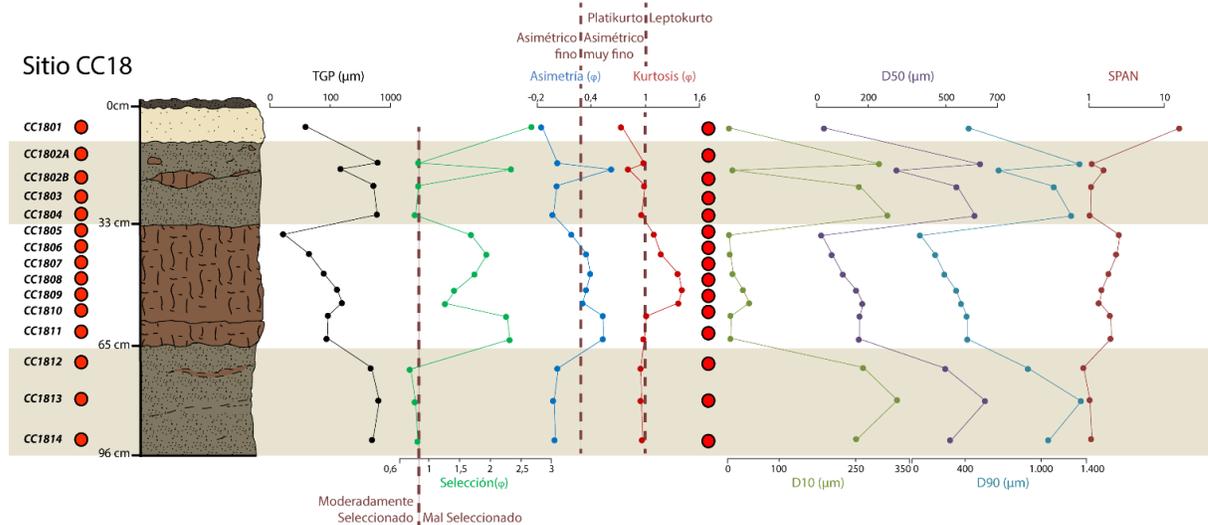


Figura 47. Esquematación de columna y resultados para granulometría de matriz para el sitio CC-18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. En negro se muestra el TGP, en verde la selección, en azul la asimetría y en rojo la kurtosis. En la siguiente sección en verde olivo el D10, púrpura el D50, calipso el D90 y rojo el SPAN. Se incluye en anexos una versión de página completa.

4.2.3 Análisis estadístico granulométrico

Acorde a lo propuesto en la metodología, se calculan las distribuciones de frecuencia acumulada para todos los sitios de estudio. Para el sitio CC-18 (Fig 48) se puede

observar que la mayoría del sedimento en la facies de arena se transporta mediante tracción y saltación. La sección de saltación presenta dos poblaciones las cuales se separan entre ellas cercano a 2ϕ , punto en el cual se pueden distinguir cargas de saltación con tendencias de rodaje para la sección inferior y cargas puras de saltación, esto sugiere dos flujos, uno que presenta una carga dominada por el arrastre y otra dominada por la pura saltación (Visher, 1969). La carga de suspensión esta pobremente desarrollada, descartando un posible transporte eólico para el sedimento.

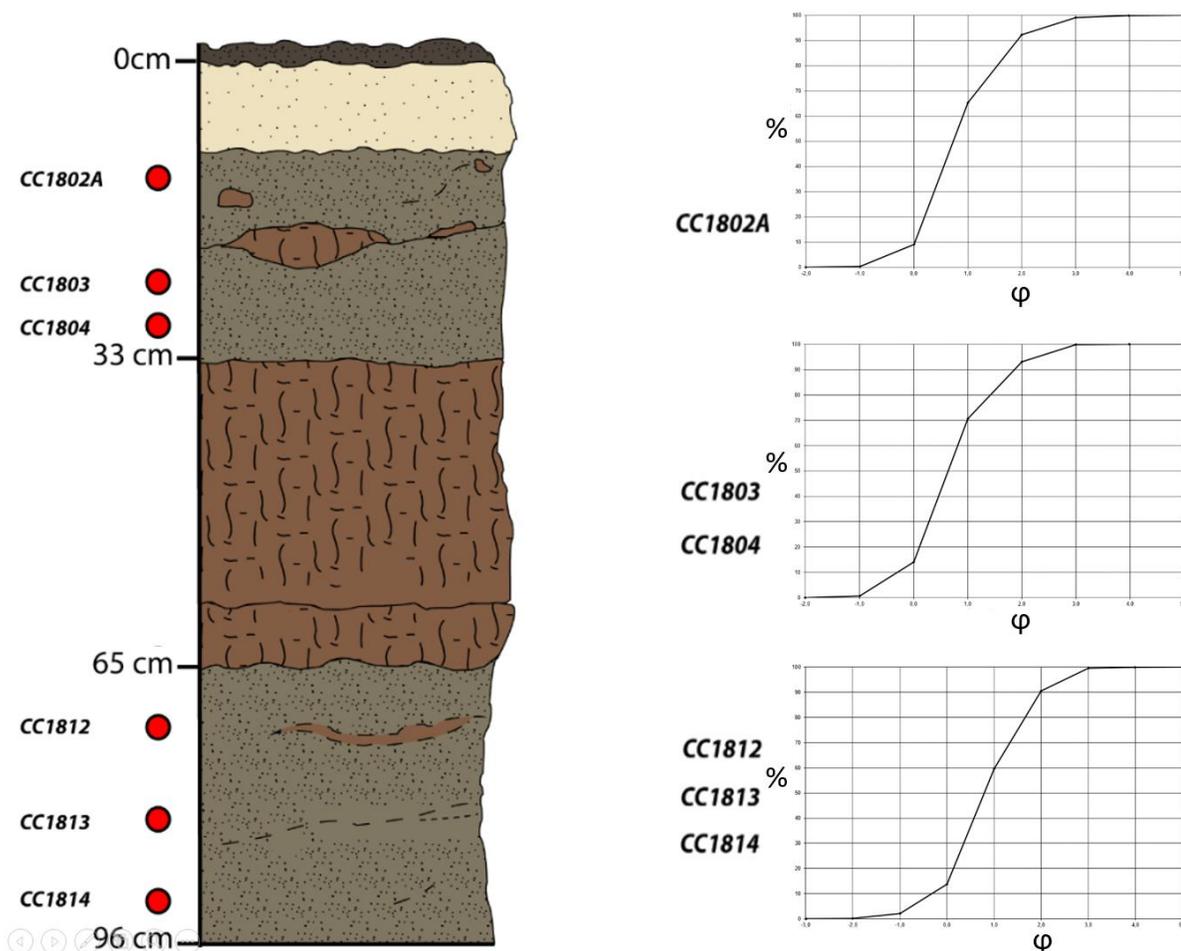


Figura 48. Columna esquemática del sitio de estudio CC18 junto a gráficos de distribución de frecuencia acumulada. Los gráficos fueron confeccionados utilizando el macro de Excel Gradistrat, Blott, S. & Pye, K (2001).

En la figura 49 se puede ver que para el sitio CC18, en su distribución granulométrica para clastos, el TGP (MEAN en el gráfico) no es representativo de las colas de sedimento en la distribución (D10 y D90), ya que es prácticamente perpendicular a ellos en el círculo de variables, aunque es bastante representativo del centro de la distribución (D50). El parámetro de SPAN está fuertemente correlacionado con la cola superior de la distribución de sedimentos (D90). Las variables sedimentológicas muestran fuertes relaciones entre ellas, particularmente el TGP con la asimetría, indicando que un mayor tamaño de grano implica una asimetría positiva. La facies de arena tiende a presentar asimetrías positivas y una mejor selección, mientras que la facies de humedal (limo) tiende a ser más leptocurta.

Por otro lado, en la Fig. 50, se pueden ver los resultados del ACP para los sedimentos de matriz. En este caso, el TGP y todas las secciones de la distribución (D10, D50 y D90)

están fuertemente correlacionadas, por tanto, el TGP sí es representativo. Además, esto significa que la serie es relativamente homogénea y que tiene una mejor selección en general. En tanto a los parámetros sedimentológicos, la selección marca un patrón entre la facies de arena y la facies de humedal, siendo la facies de arena la que presenta la mejor selección. Lo mismo se puede decir para la asimetría siendo la facies arena la que muestra una asimetría negativa, es decir, una marcada preferencia por una distribución bien seleccionada de gruesos.

Parámetros sedimentológicos de clastos CC18

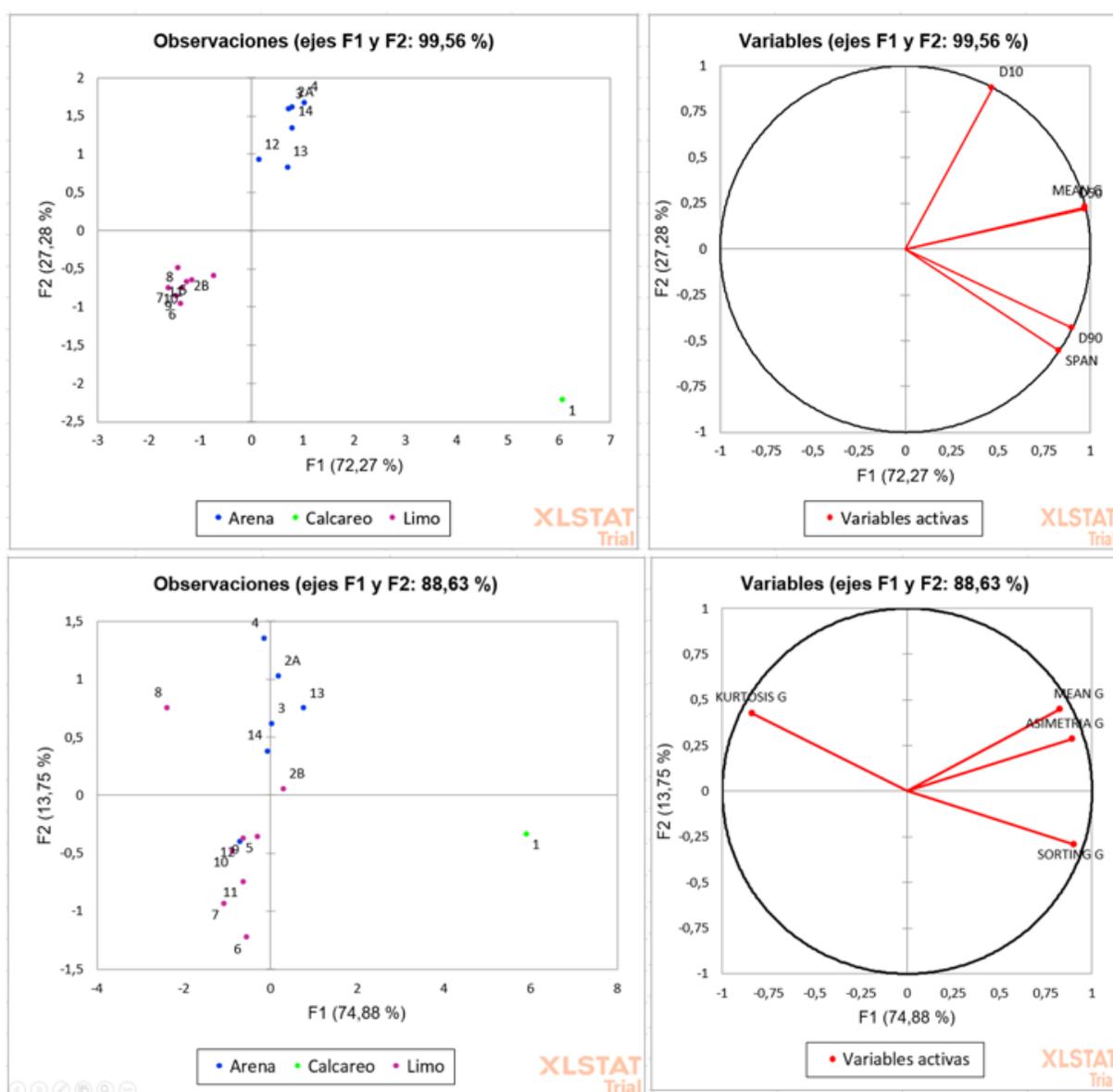


Figura 49. Gráfico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos gruesos del sitio CC-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

Parámetros sedimentológicos de matriz CC18

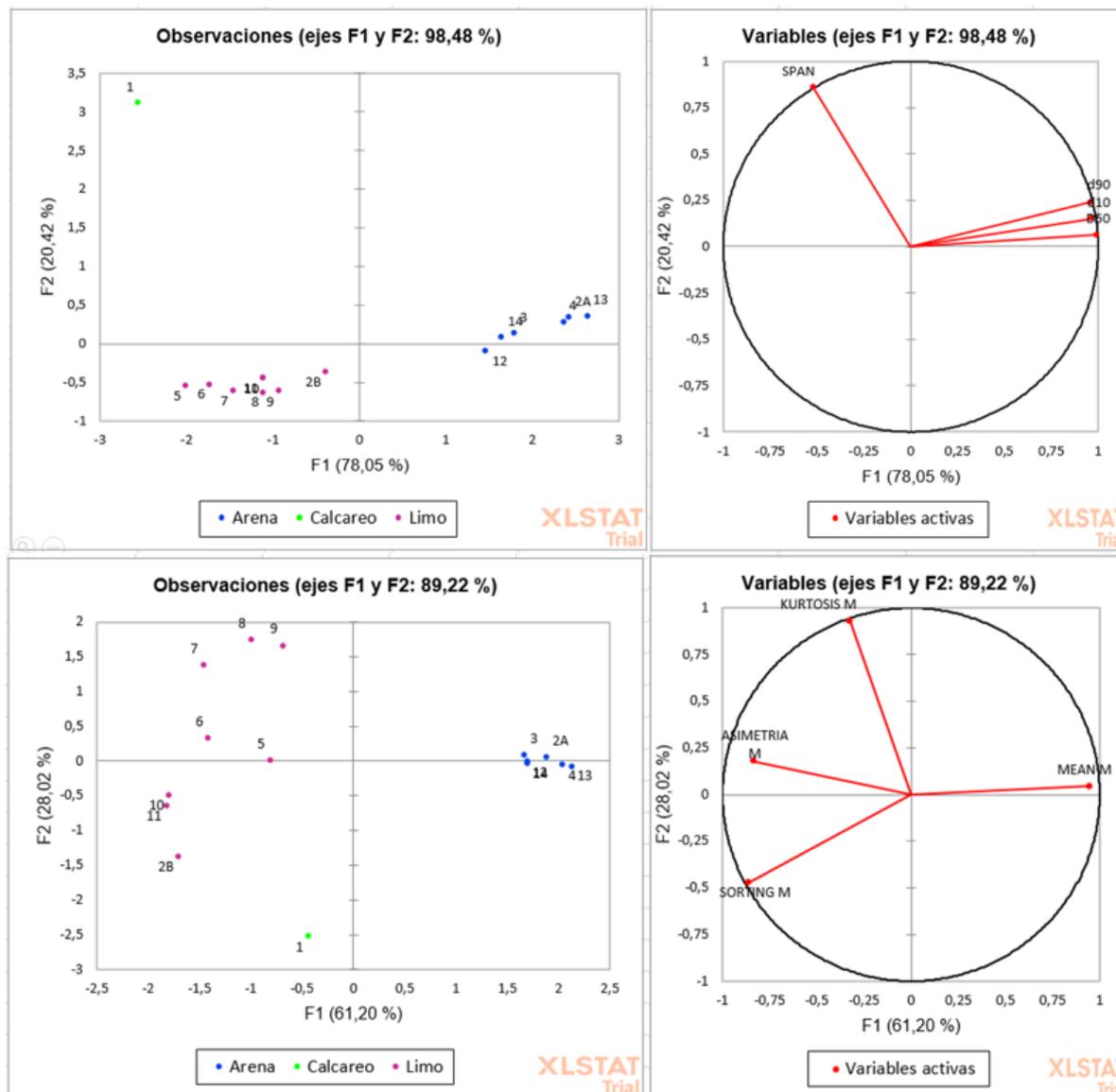


Figura 50. Gráfico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos de matriz del sitio CC-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

En el sitio PC18 se puede ver que para los gráficos de frecuencia acumulada (Fig. 51), se presenta una dominancia de la carga de tracción, la cual va aumentando con la profundidad de la columna. Esto sugiere que los niveles más profundos de arena presentaron mayor energía que los superiores. En todos los gráficos se puede ver que la carga de suspensión es muy baja y la carga de saltación es casi perpendicular (70° - 80°). Esto es indicativo de una arena con origen marino dada su buena selección, además la carga de saltación para la muestra PC1814 y PC1819 muestra dos poblaciones, como se ha mencionado antes, esto sugiere dos flujos, siendo el más grueso el más erosivo (Visher, 1969).

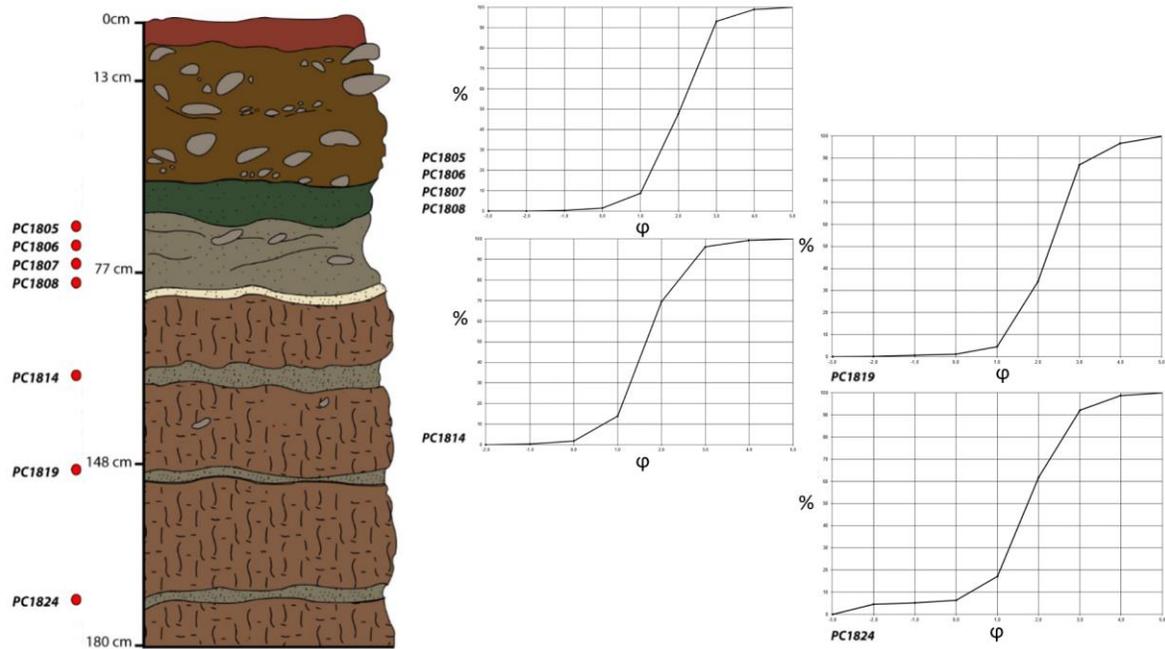


Figura 51. Columna esquemática del sitio de estudio PC18 junto a gráficos de distribución de frecuencia acumulada. Los gráficos fueron confeccionados utilizando la macro de Excel Gradistrat desarrollada por Blott, S. & Pye, K. (2001).

En el sitio PC18, el gráfico de APC de sedimento de clastos (Fig. 52) muestra que el TGP no es representativo de las diferentes secciones del sedimento, muestra una relación relativamente débil con la sección media de la distribución (D50) y con la cola gruesa de ésta (D90). El SPAN y la sección D90 están fuertemente relacionadas, sugiriendo una gran diferencia de tamaño entre las partes más gruesas de la distribución y el resto de ésta. El gráfico de dispersión muestra que las arenas dominan en tamaño de grano sobre la facies de humedal, como es de esperarse, pero la facies aluvial es la que presenta mayor tamaño de grano.

En tanto a los parámetros sedimentológicos, la selección y la asimetría muestran una relación indirecta entre ellos. Esto sugiere que una mejor selección implica una asimetría positiva o fina. No existe una diferencia notoria entre la selección de la facies de arena y la de humedal, lo que se podría atribuir a la mezcla de sedimentos entre niveles o infiltración de sedimento fino en niveles de arena (Peters & Jaffe, 2010).

La figura 53 muestra los gráficos APC para la granulometría de matriz del sitio PC-18. Se puede ver en el gráfico de variables que el promedio y las diferentes secciones de la distribución tienen una muy buena correlación entre ellas y en el gráfico de dispersión esto se ve representado con las arenas mostrando un tamaño de grano mayor al sedimento de humedal en general. En tanto a los parámetros sedimentológicos, la arena muestra una mejor selección que el limo de humedal y una asimetría negativa hacia los gruesos.

Finalmente, el sitio PC2-18 muestra en sus gráficos de frecuencia acumulada (Fig.54) resultados bastante similares a los ya vistos para los sitios anteriores. Una alta carga de tracción que aumenta hacia la parte más profunda de la trinchera, una carga de saltación con una buena selección y una casi ausente carga de suspensión, sugiriendo una vez más un dominio del transporte mediante oleaje. En este sitio la presencia de

dos poblaciones de saltación se hace más evidente para las secciones más profundas de la columna, sugiriendo que los niveles superiores solo muestran un tipo de carga, mientras que los más profundos indican una carga de dominada por la suspensión y otra por la suspensión rotación (Visher, 1969).

Parámetros sedimentológicos de clastos PC18

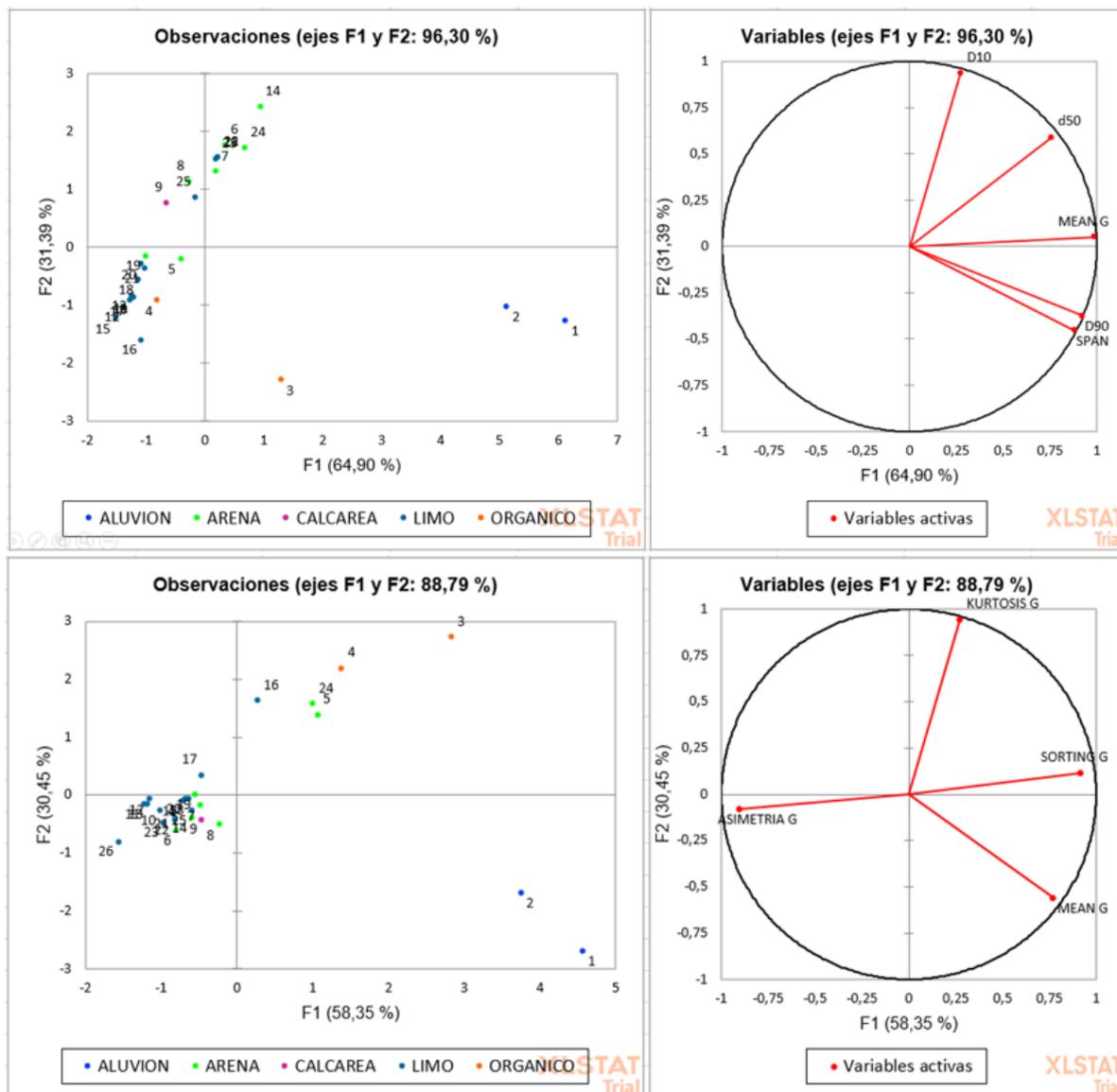


Figura 52. Gráfico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos clásticos del sitio PC-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

El sitio PC2-18 muestra resultados de APC (Fig. 55) para su sedimentología de clastos que son menos claros en comparación a otros sitios. Si bien en el gráfico de variables la representatividad del TGP es bastante buena, se pierde cualquier distinción entre el sedimento de facies arena y facies humedal. La única distinción que es posible de establecer es un aumento en el tamaño de grano en la parte fina de la distribución (D10) para la facies de humedal. En tanto a los parámetros sedimentológicos, la facies de arena tiene una mejor selección en general pero no se aprecia tampoco un patrón marcado de preferencia.

Parámetros sedimentológicos de matriz PC18

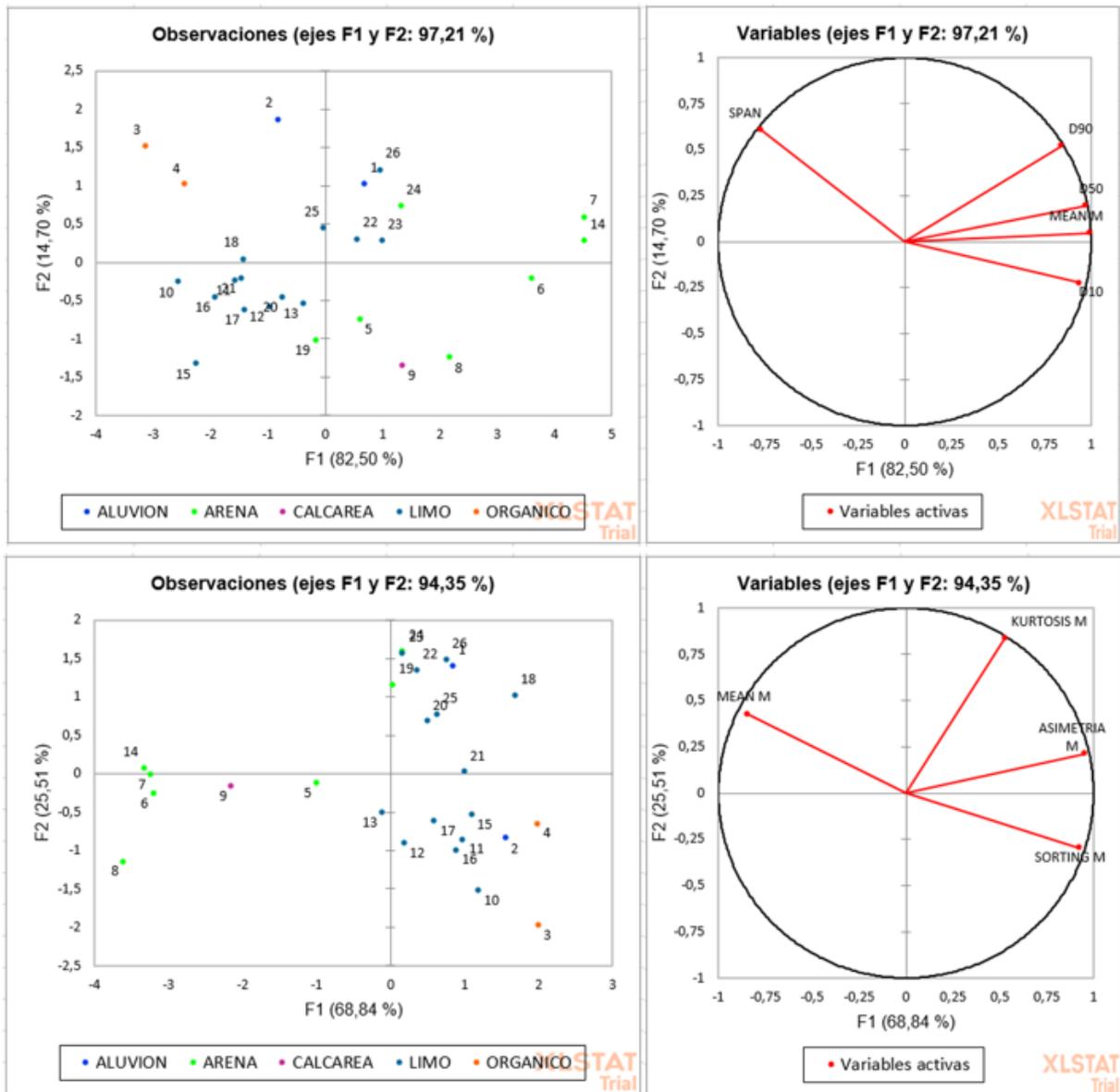


Figura 53. Grafico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos de matriz del sitio PC-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

En el caso de la granulometría de matriz para el sitio PC2-18 (Fig. 56) se tiene una buena correlación entre el TGP y todas las secciones de la distribución (D10, D50 y D90), siendo el promedio una buena representación de la distribución. En el gráfico de dispersión la facies de arena muestra una clara diferencia de tamaño de grano en comparación a la facies de humedal (limo en gráfico). En el diagrama APC para parámetros sedimentológicos se ve una mejor selección y un carácter leptocurto cuando el TGP es mayor, lo que se ve para el caso de las arenas. La facies de humedal parece estar más dispersas que la arena en este caso, presentando un amplio rango de características.

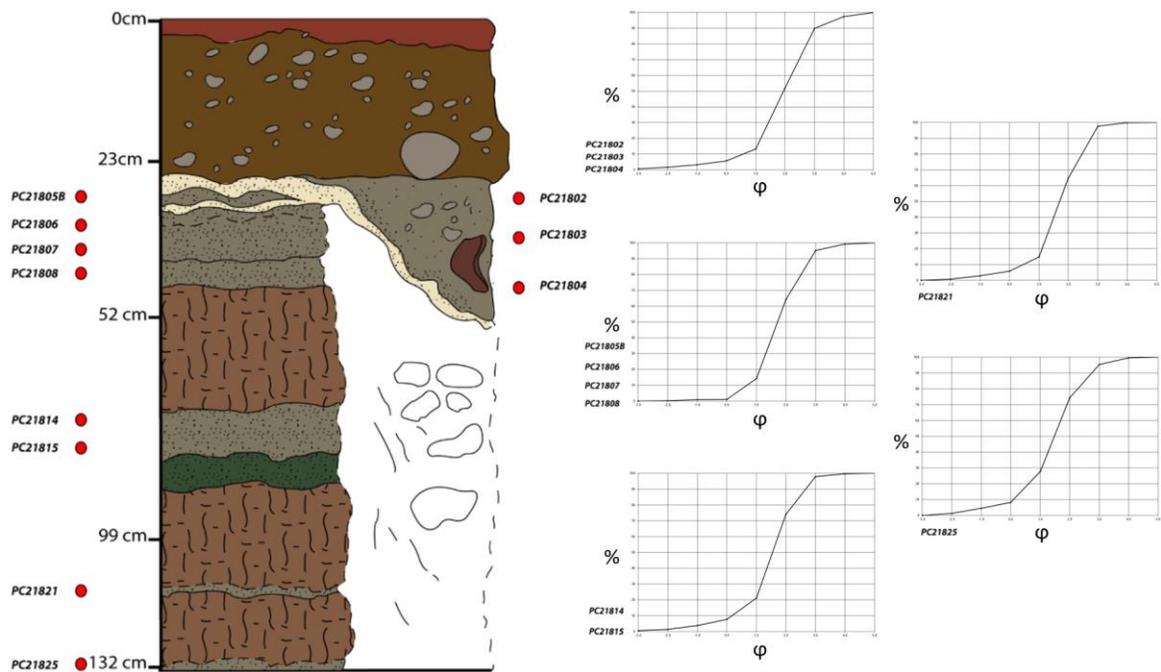


Figura 54. Columna esquemática del sitio de estudio PC218 junto a gráficos de distribución de frecuencia acumulada. Los gráficos fueron confeccionados utilizando la macro de Excel Gradistrat desarrollada por Blott, S. & Pye, K. (2001).

A manera de resumen, se puede apreciar en la Tabla 6 que los resultados de parámetros sedimentológicos siguen un patrón al hablar de selección, ya sea para granulometría de clastos o de matriz: la selección siempre es mejor para la facies de arena marina. En el caso de la asimetría y la *curtosis* es más complejo distinguir un patrón, no obstante, de manera generalizada se puede afirmar que la asimetría es más fina (positiva) para la facies de humedal y la facies de arena tienden a ser más platicurta.

Tabla 6. Cuadro comparativo de características sedimentológicas para los sitios estudiados

CLASTOS	FACIES HUMEDAL			FACIES MARINAS		
	SELECCIÓN	ASIMETRÍA	KURTÓSIS	SELECCIÓN	ASIMETRÍA	KURTOSIS
PC-18	MALA	-	LEPTOKURTO	MODERADA	-	LEPTOKURTO
PC2-18	MALA	ASIMÉTRICO GRUESO	-	MODERADA	SIMÉTRICO	MESOKURTO
CC18	MALA	ASIMEÉTRICO FINO	-	MODERADA	ASIMÉTRICO FINO	-
MATRIZ	SELECCIÓN	ASIMETRÍA	KURTÓSIS	SELECCIÓN	ASIMETRÍA	KURTOSIS
PC-18	MALA	ASIMÉTRICO FINO	LEPTOKURTO	MODERADA	SIMÉTRICO	PLATIKURTO
PC2-18	MUY MALA	ASIMÉTRICO MUY FINO	MESOKURTO	MALA	ASIMÉTRICO FINO	LEPTOKURTO
CC18	MALA	ASIMÉTRICO MUY FINO	LEPTOKURTO	MODERADA	ASIMÉTRICO FINO	PLATIKURTO

Parámetros sedimentológicos de clastos PC218

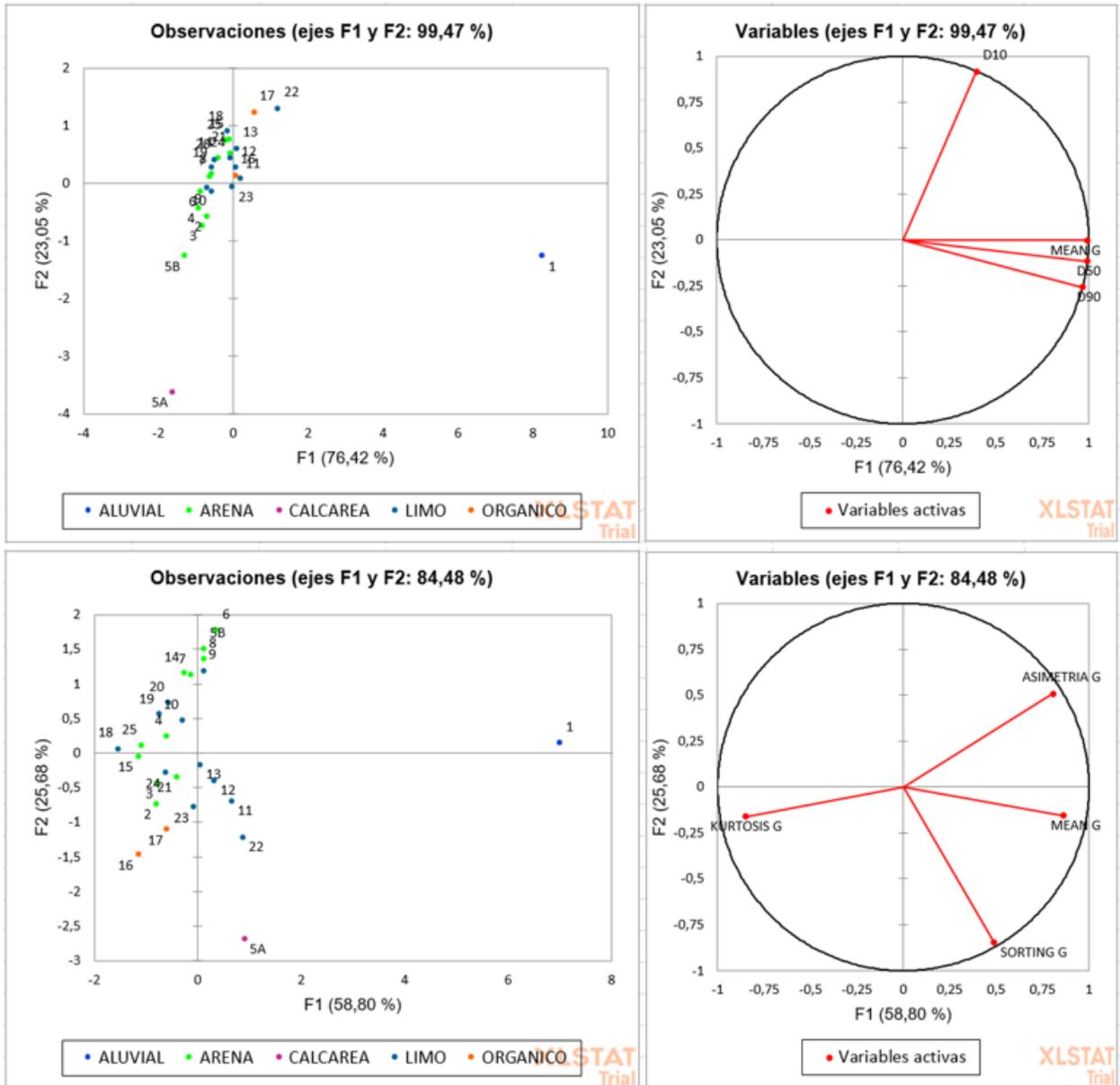


Figura 55. Gráfico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos de clastos del sitio PC2-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

Parámetros sedimentológicos de matriz PC218

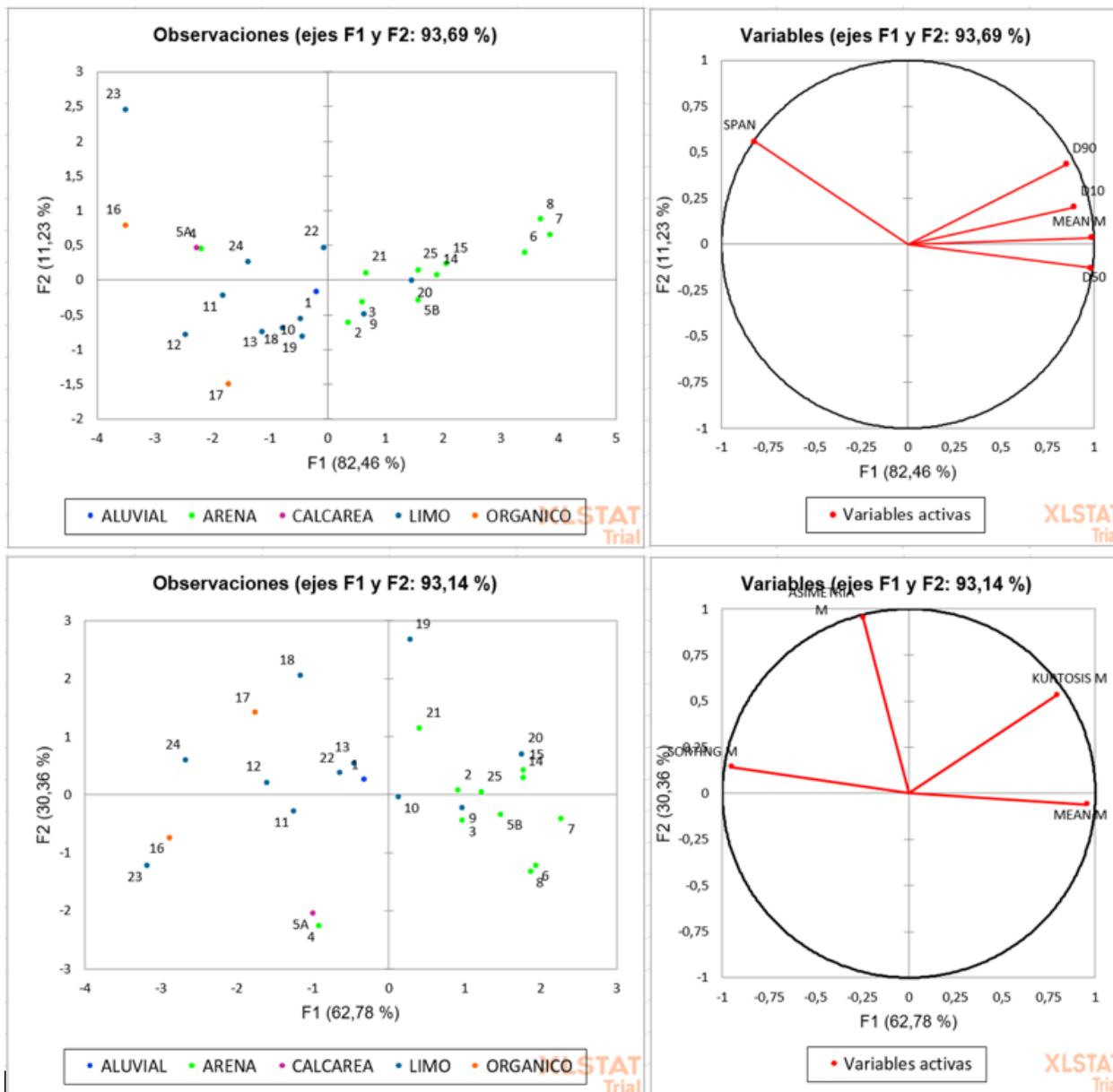


Figura 56. Gráfico de variables y dispersión en un plot ACP para los sedimentos de matriz del sitio PC2-18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

4.3 Registro geoquímico y biológico

Al momento de analizar la composición de elementos mayores para los sitios estudiados se hizo una selección de los elementos químicos que podrían presentar mejores indicadores para los sitios de trabajo (Goff, et al., 2012). Estos resultados se separan en tres grupos importantes: (1) Esqueletos calcáreos (Mg, Ca y Sr), (2) metales pesados (Fe, Ti y Zr) y (3) Piritita (Fe y S). Es importante notar que acorde al trabajo de Goff, el parámetro más distintivo para sedimento marino es la fase salina (Na y Cl). Sin embargo, estos elementos no se registran en los resultados de laboratorio, lo que se puede atribuir a la movilidad de estos elementos. Además de los análisis de elementos mayores, se muestran los resultados del análisis de fracción orgánica, estos indican % de fragmentos orgánicos por muestra y el n° de foraminíferos en ellas para los sitios PC-18 y PC2-18.

El análisis de material biológico en los sedimentos indicó que la presencia de foraminíferos es limitada en la zona de estudio, reconociéndose solamente cinco individuos tras el análisis. De estos cinco individuos (Fig. 57), todos ellos fueron identificados como foraminíferos bentónicos miembros de la especie *Buccella Peruviana* (Figuerola, et al., 2005). Este pobre registro de foraminíferos indica una fuerte meteorización en los sitios de estudio de Arica, esto se condice con lo mencionado anteriormente respecto a la granulometría de estos en la sección 4.2. En lo que respecta al ambiente de proveniencia, existen diferentes registros debido a que ha sido caracterizada bajo diferentes taxonomías por distintas escuelas de estudio (Calvo & Langer, 2012). En las costas de Argentina, donde existe una amplia gama de estudios al respecto, la especie es caracterizada como perteneciente a un ambiente marino somero (Laprida, et al., 2012). En tanto a lo que respecta a la costa chilena, una menor cantidad de estudios se refieren al ambiente de proveniencia de la *Buccella Peruviana* (Páez, et al., 2001; Hromic, 2007; Reilly, 2003), sin embargo, estos también la caracterizan como marino somero y hasta zona media acorde a Páez (2001). Es entonces posible suponer un ambiente somero marino para la especie *Buccella Peruviana* (Peters & Jaffe, 2010). En estudios anteriores se ha registrado una amplia variedad de foraminíferos de manera caótica en facies de arena atribuidas a tsunamis, lo que es contrario al caso de estos sitios. También es notable que en ningún otro nivel se ha registrado presencia de foraminíferos. Esto puede también ser indicativo de una fuerte meteorización.

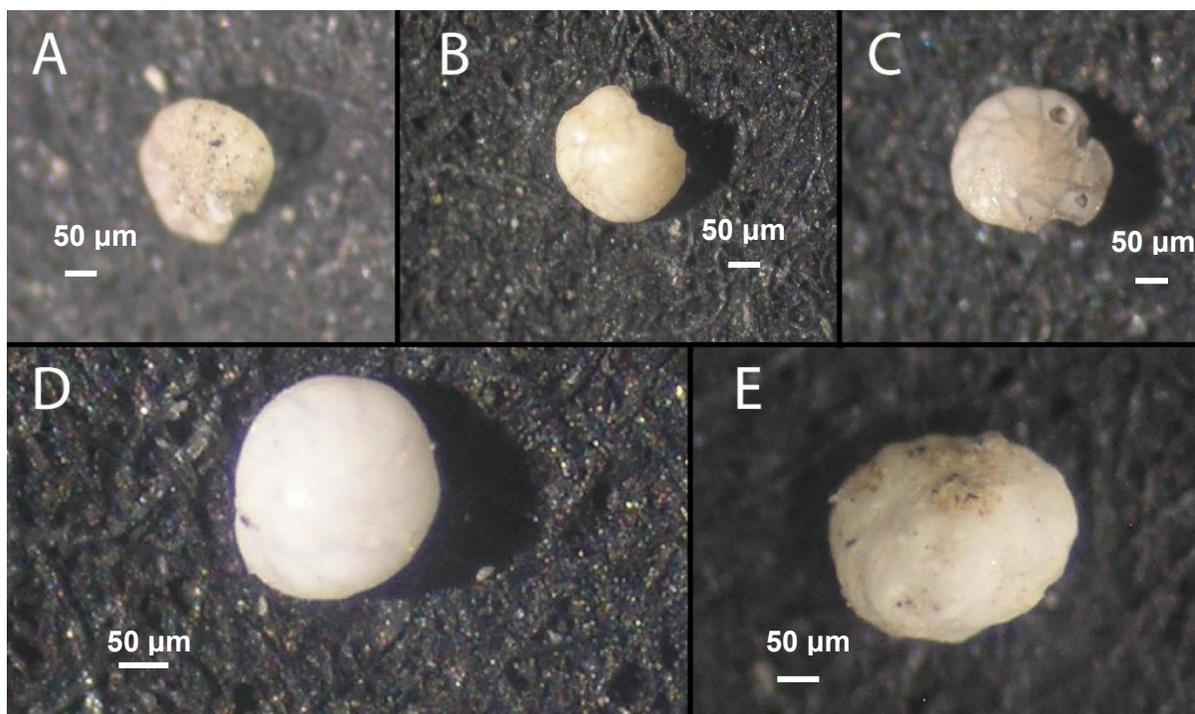


Figura 57. Fotografías de los hallazgos de foraminíferos en los sitios de estudio de Arica. A: Muestra PC1803, B: Muestra PC1804, C: Muestra PC1808, D: Muestra PC18202 y E: Muestra PC18203.

En el sitio PC-18 (Fig. 58) los resultados para esqueletos calcáreos no muestran presencia de Mg. Sin embargo, para la facies de arena superior de la columna (PC1805 a PC1808) se observa un aumento en concentración de Sr y Ca con una posterior disminución paulatina en estos elementos hasta la siguiente facies de arena (PC1814) donde, posterior a la misma, se puede apreciar otra disminución más pronunciada. Esto se puede comparar con el aumento en fracción orgánica para la primera facies de arena y la presencia de foraminíferos en ésta, indicando una coincidencia entre estos parámetros. Respecto a los metales pesados, estos sí muestran más claramente una preferencia por la facies de arena. Para la facies de arena superior, los tres metales aumentan su contenido con una posterior disminución en la facies calcárea (PC1809) y la facies de humedal, repitiéndose en la siguiente facies de arena, posterior a estas dos capas, no se puede apreciar una variación notoria para el Ti ni el Fe, manteniéndose constantes durante el resto de la columna. El último metal pesado, Zr, muestra en su patrón variaciones hacia el final de la secuencia, incrementando sus valores en facies de humedal (PC1820 a PC1823). En el caso del azufre y el hierro, su mayor correlación se presenta en las dos primeras facies de arena, en las cuales se puede ver un aumento en ambos elementos, el azufre de manera más substancial, en profundidad el azufre paulatinamente disminuye. Se puede inferir entonces, que los metales pesados son los que entregan un resultado más claro en cuanto a preferencias.

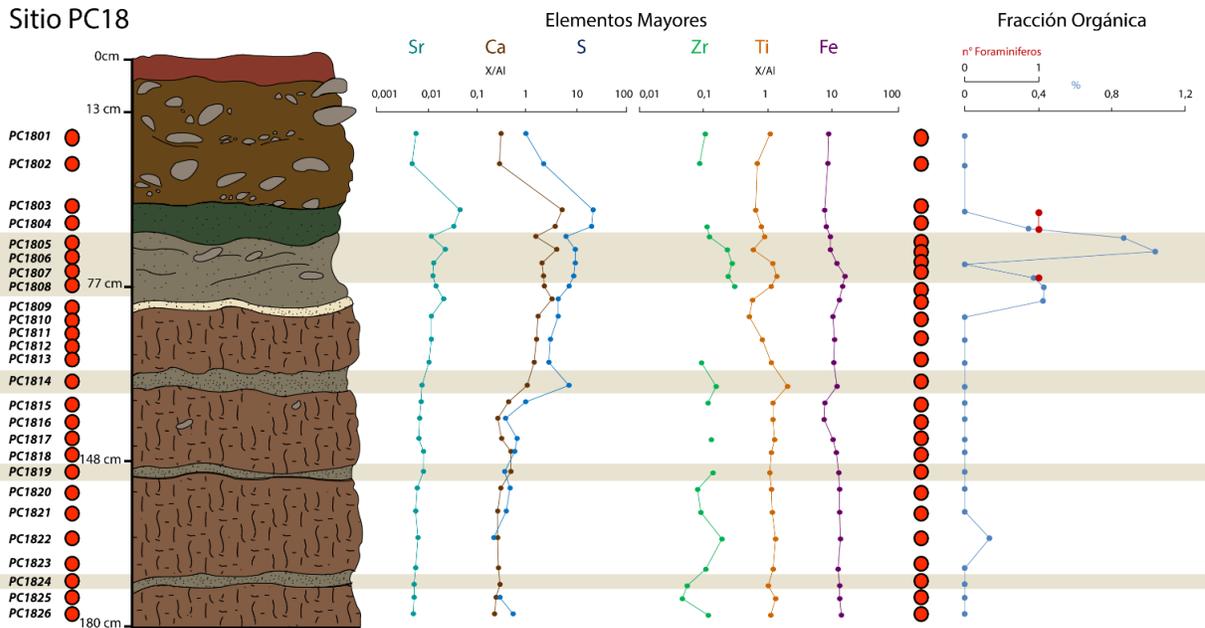


Figura 58. Esquematización de columna y resultados de elementos mayores junto a fracción orgánica para el sitio PC18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. Se incluye en anexos una versión de página completa.

En el sitio PC2-18 (Fig. 59), la clasificación correspondiente a esqueletos calcáreos muestra una menor concentración de Sr y Ca en facies de arena con respecto a la de humedal de manera general, esto con la excepción del canal de arena (PC1802 a PC1804) donde se puede ver un incremento en estos elementos, lo que es coincidente con la concentración de fracción orgánica y de foraminíferos en esta sección de la columna. En tanto, los metales pesados no muestran un patrón preferencial por alguna facies y se comportan erráticamente, con máximos en distintas zonas de la columna, siendo el Fe el más consistente durante toda la columna y mostrando leves incrementos en la facies de humedal. En tanto a su relación con el azufre, estos se correlacionan de manera consistente durante toda la columna presentando máximos en facies de humedal. Este comportamiento es opuesto a lo visto en el sitio PC-18. La facies de arena es la que presenta alta permeabilidad, una infiltración y transporte de elementos se puede sugerir para esta facies.

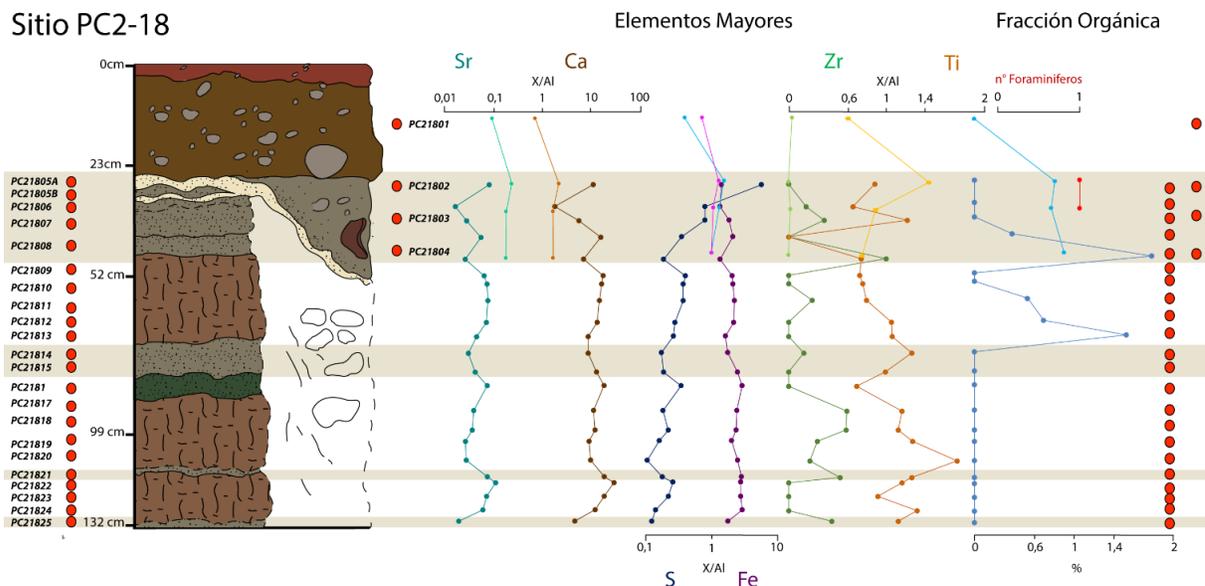


Figura 59. Esquematización de columna y resultados de elementos mayores junto a fracción orgánica para el sitio PC218. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. Se incluye en anexos una versión de página completa

Finalmente, el sitio CC18 (Fig.60) muestra un patrón preferencial para el Ca en facies de arena, sin embargo, el Sr no muestra el mismo patrón, siendo en la primera facies de arena donde se observan sus menores concentraciones. Los patrones de metales pesados si muestran una fuerte correlación entre ellos, donde se puede ver que en la facies de arena hay un aumento de estos consistentemente entre los tres elementos. A pesar de que la correlación de hierro con azufre no es tan clara como en sitios anteriores, se puede ver una preferencia de ambos por la facies de arena.

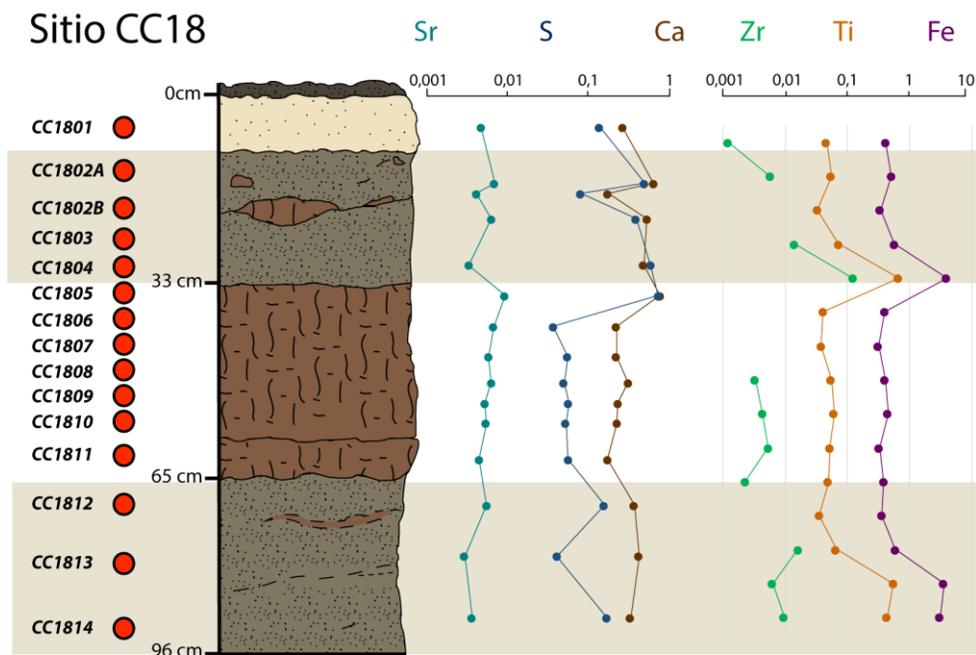


Figura 60. Esquematización de columna y resultados de elementos mayores junto a fracción orgánica para el sitio CC18. Las franjas amarillas indican los niveles de la facies de arena. Se incluye en anexos una versión de página completa

4.3.1 Análisis estadístico de geoquímica

Para cuantificar la correlación entre diferentes elementos químicos se prepararon análisis APC para cada uno de los sitios estudiados con la intención de dilucidar relaciones entre estos elementos y las facies estudiadas en cada trinchera.

Para el sitio CC18 (Fig. 61) se tiene una correlación positiva entre el Ca y el S, lo que no es de esperarse acorde a Goff, *et al.* (2012), ya que el Ca se relaciona con el Sr para formar esqueletos. No obstante, en este sitio la relación entre estos dos es prácticamente nula. También se tiene una fuerte relación entre los metales pesados, lo que sí es indicador de una procedencia marina para los sedimentos. En el gráfico de dispersión se ve que la facies de humedal se agrupa de manera clara y la facies de arena tiene una dispersión más amplia. No obstante, se debe notar que existe una clara preferencia por los metales pesados en estas últimas.

Parámetros geoquímicos CC18

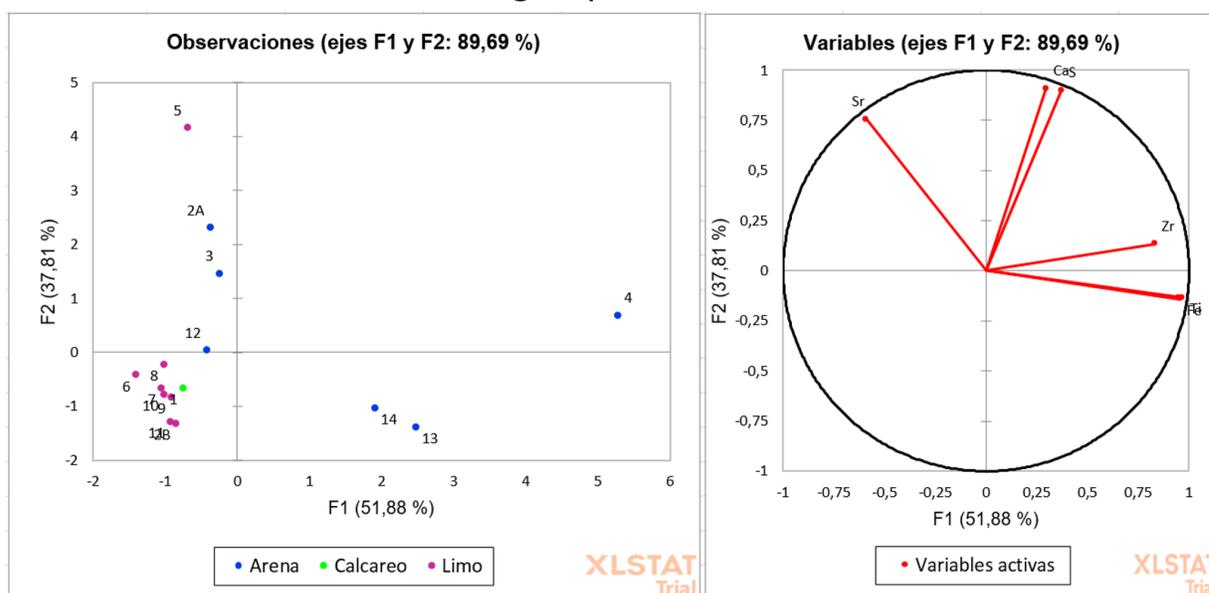


Figura 61. Diagrama APC de parámetros geoquímicos para el sitio CC18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

En el caso del sitio PC18 (Fig. 62) los resultados indican claramente una correlación entre el Zr, Ti y Fe en el primer cuadrante y Ca, Sr, S en el cuarto cuadrante. La correlación entre Fe y S es débil, indicador de que la pirita no está presente en el sitio. El gráfico de dispersión muestra claramente a los sedimentos aluviales y de humedal agrupados con bajo contenido en estos elementos químicos. Las arenas, a pesar de estar más dispersas, si muestran un claro contenido de metales pesados y esqueletos calcáreos.

Parámetros geoquímicos PC18

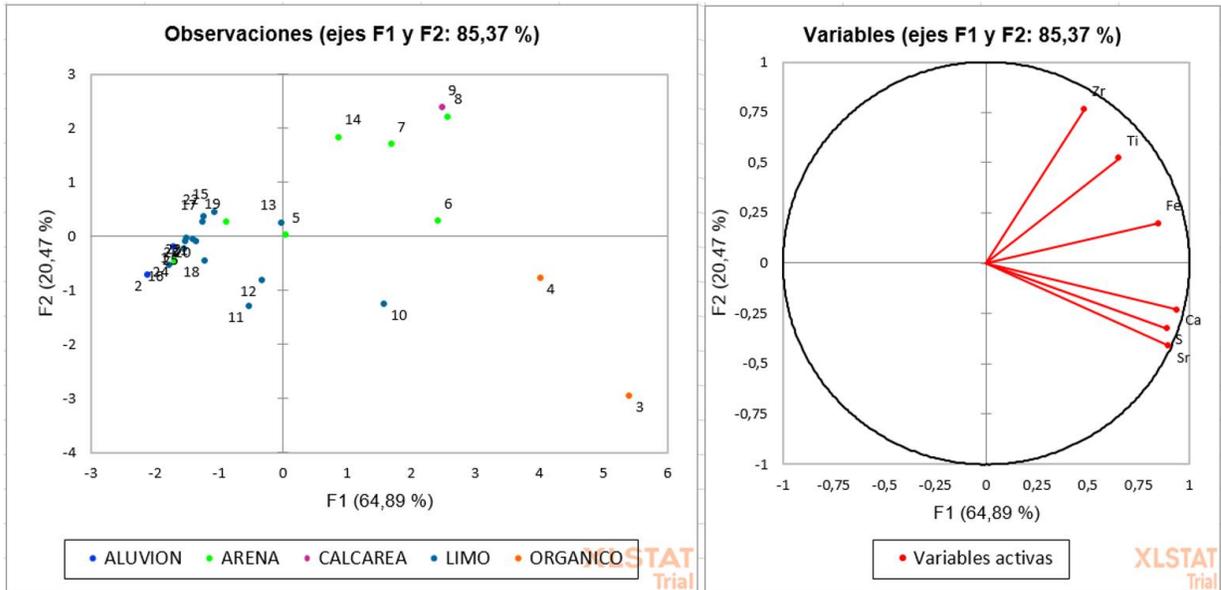


Figura 62. Diagrama APC de parámetros geoquímicos para el sitio PC18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

En el caso del sitio PC2-18 (Fig. 63) el análisis ACP mostraba una alta tasa de variabilidad al graficar todas las variables juntas (Var. <60%), por lo tanto, se optó por generar tres gráficos diferentes para cada grupo de elementos de interés. Los resultados son bastante difusos y no entregan información concisa respecto a patrones que se puedan identificar para el sitio. Las correlaciones entre elementos son pobres exceptuando el caso de los esqueletos calcáreos (Ca y Sr), a pesar de esto, al ver la gráfica de dispersión no se identifican patrones para este caso tampoco. Para este sitio de estudio es difícil utilizar los elementos mayores para definir un patrón entre los sedimentos.

A modo de recapitulación, en la tabla 7 se puede apreciar de manera cualitativa que los elementos se correlacionan entre ellos de manera bastante pobre. En el sitio PC2-18, es donde los resultados parecen estar más dispersos, mientras que en el sitio PC-18 es donde se ve la mayor preferencia por la facies marina.

Tabla 7. Tabla resumen de los resultados de elementos mayores indicando de manera cualitativa las correlaciones entre elementos y preferencia de estos por facies marinas o de humedal. Las secciones con guion indican que no se puede generalizar una preferencia.

E. MAYORES	CORRELACIÓN			PREFERENCIA		
	ESQUELETOS	METALES PESADOS	PIRITA	ESQUELETOS	METALES PESADOS	PIRITA
PC-18	BUENA	BUENA	MEDIA	MARINO	MARINO	MARINO
PC2-18	MEDIA	MALA	MALA	-	-	-
CC18	MALA	BUENA	MALA	-	MARINO	-

Parámetros geoquímicos PC218

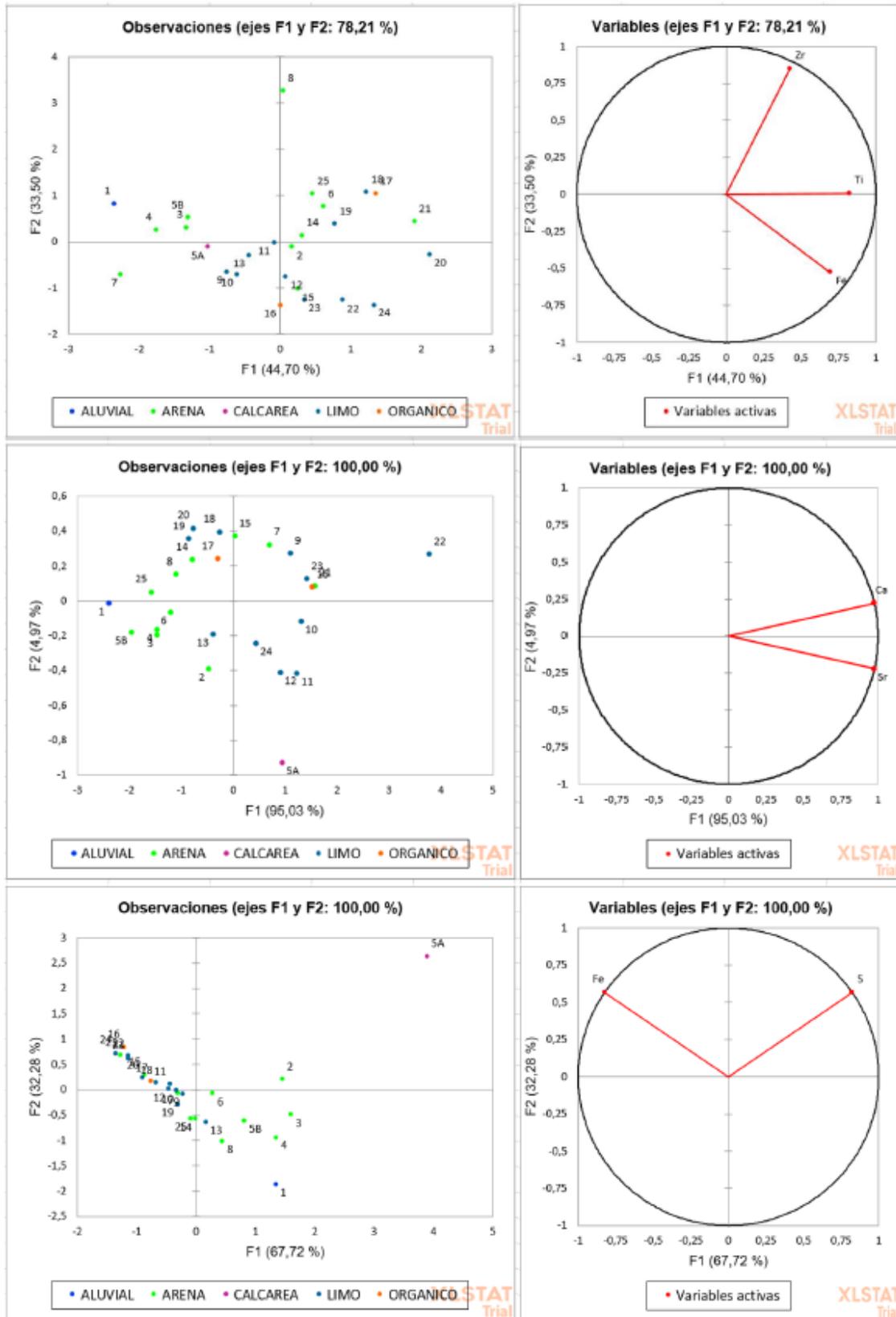


Figura 63. Diagrama APC de parámetros geoquímicos para el sitio PC218. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

4.4 Depósitos aluviales

En los sitios PC-18 y PC2-18 se encuentra una facies de sedimento fino con material gravoso y conglomerádico, el cual se ha atribuido a una facies de aluvión. Como se mostró en la sección de geomorfología histórica de este trabajo, el cauce del río San José en la antigüedad circulaba por la zona norte de la ciudad desembocando en lo que se conocía como Las Chimbas, que corresponde a la zona donde se encuentran los dos sitios estudiados (Sección 1.4.3).

Durante la campaña de terreno en el mes de febrero de 2019, se presencié un evento de aluvión provocado por el fenómeno ENSO que afectó al norte de Chile a principios del presente año (Fig. 64). Durante este evento se recolectó una muestra para una posterior comparación con las muestras de la facies de aluvión de los sitios PC-18 y PC2-18, ya que, acorde a bibliografía relacionada al fenómeno ENSO (Aceituno, *et al.*, 2009; Kiladis *et al.*, 1985; Quinn & Neal, 1987), un evento lluvioso se registró en el norte de Chile y sur de Perú en el periodo 1887 y 1888.

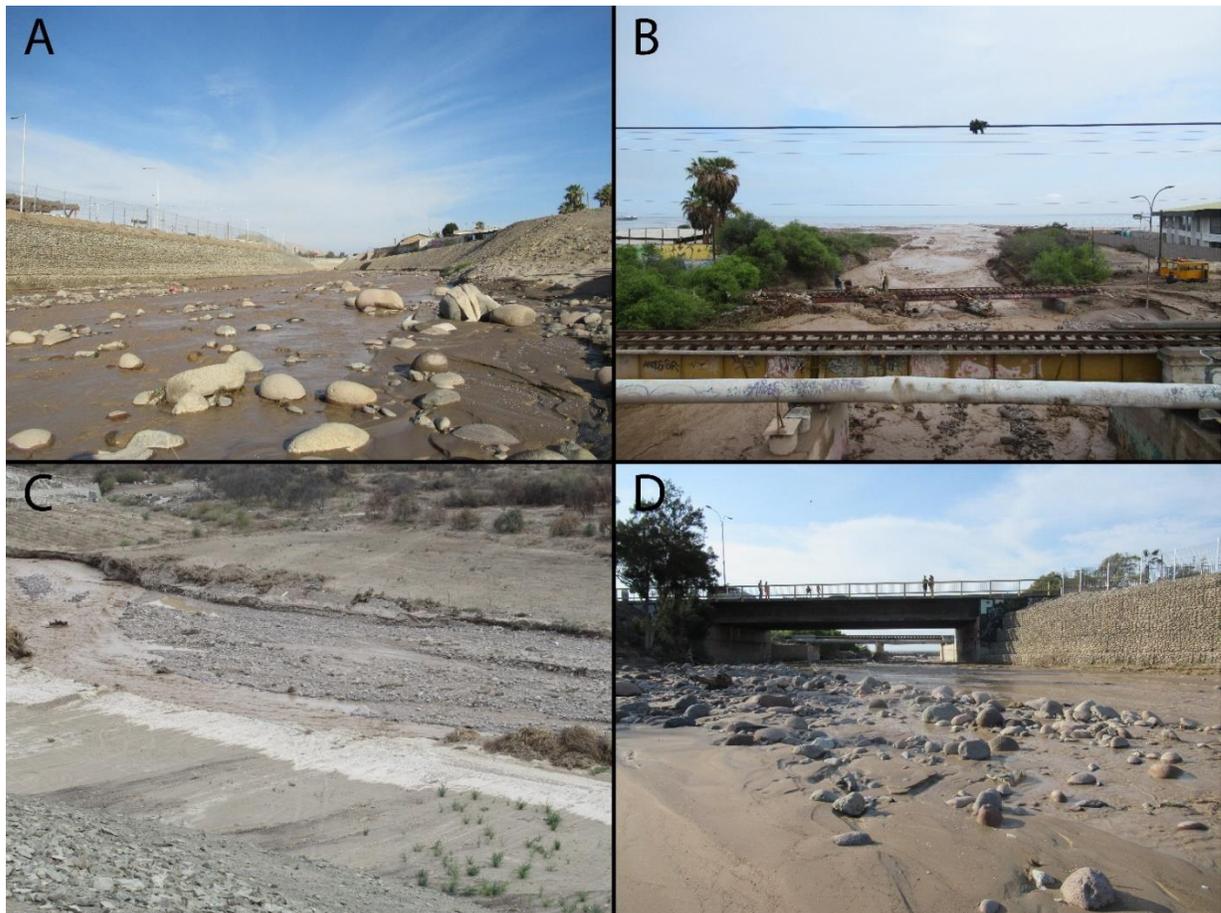


Figura 64. Fotografías de la ciudad de Arica durante el mes de febrero de 2019. A y D: Cauce río San José a metros de la desembocadura en el mar, sitio donde se tomó la muestra AA1901. B: Puente frente a la desembocadura del río San José durante aluvión en Arica, se puede apreciar como el agua arrastra basura, quedando ésta atrapada en el puente ferroviario. C: Caudal del río San José a la altura del pueblo de Azapa.

Los análisis llevados a cabo para esta muestra se comparan con los resultados de las muestras PC1801, PC1802 y PC21801, los cuales corresponden a la facies de aluvión para los sitios de estudio en este trabajo. Esta comparación muestra, primeramente,

que la composición de elementos mayores (Fig. 65) para ambos casos es bastante similar, donde todas las muestras presentan concentraciones en el mismo orden para cada elemento. En segundo lugar, se comparan los resultados de granulometría láser (Fig. 66), en los cuales se puede apreciar que la distribución para la muestra de 2019 es más acotada en su tamaño de grano, no obstante, mantiene un solo máximo similar a las muestras de las facies de aluvión.

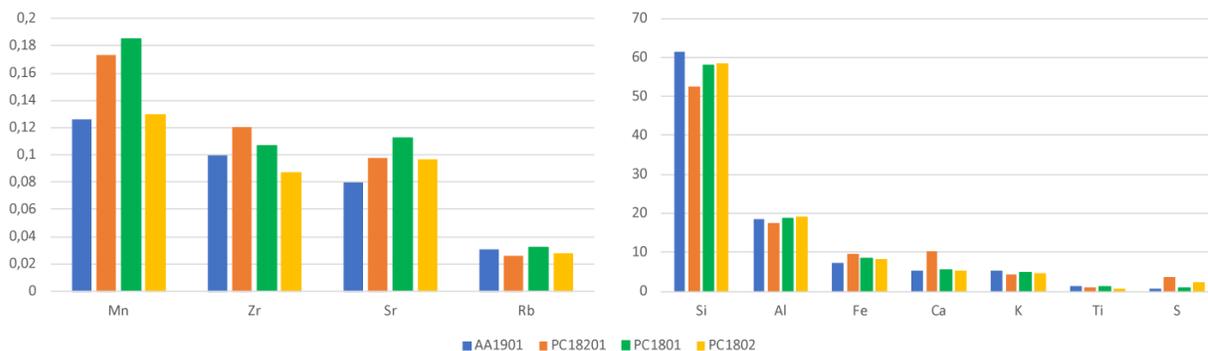


Figura 65. Comparación de composición de elementos mayores para los sitios de Parque Centenario (PC18 Y PC218) y el sedimento del aluvión de 2019 (AA1901).

Además de los resultados de laboratorio, en los sitios de estudio del Parque Centenario se hicieron hallazgos arqueológicos, específicamente en el sitio PC-18 (Fig.67). Estos hallazgos consisten en fragmentos de botella de vidrio (PCH-01), fragmentos de periódico o libro (PCH-02) y un fragmento de metal (PCH-03). Todas estas evidencias fueron descubiertas en la facies de aluvión.

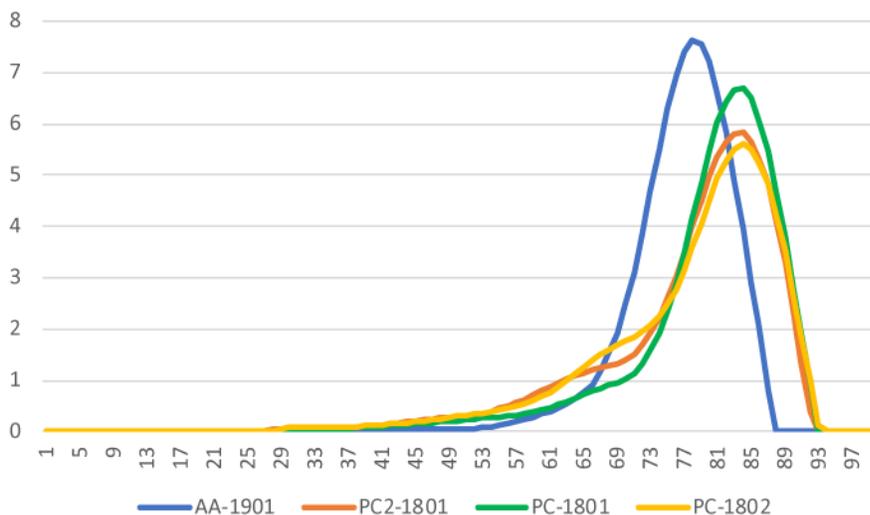


Figura 66. Comparación de tamaño de grano en matriz para los sitios de Parque Centenario (PC18 Y PC218) y el sedimento del aluvión de 2019 (AA1901).

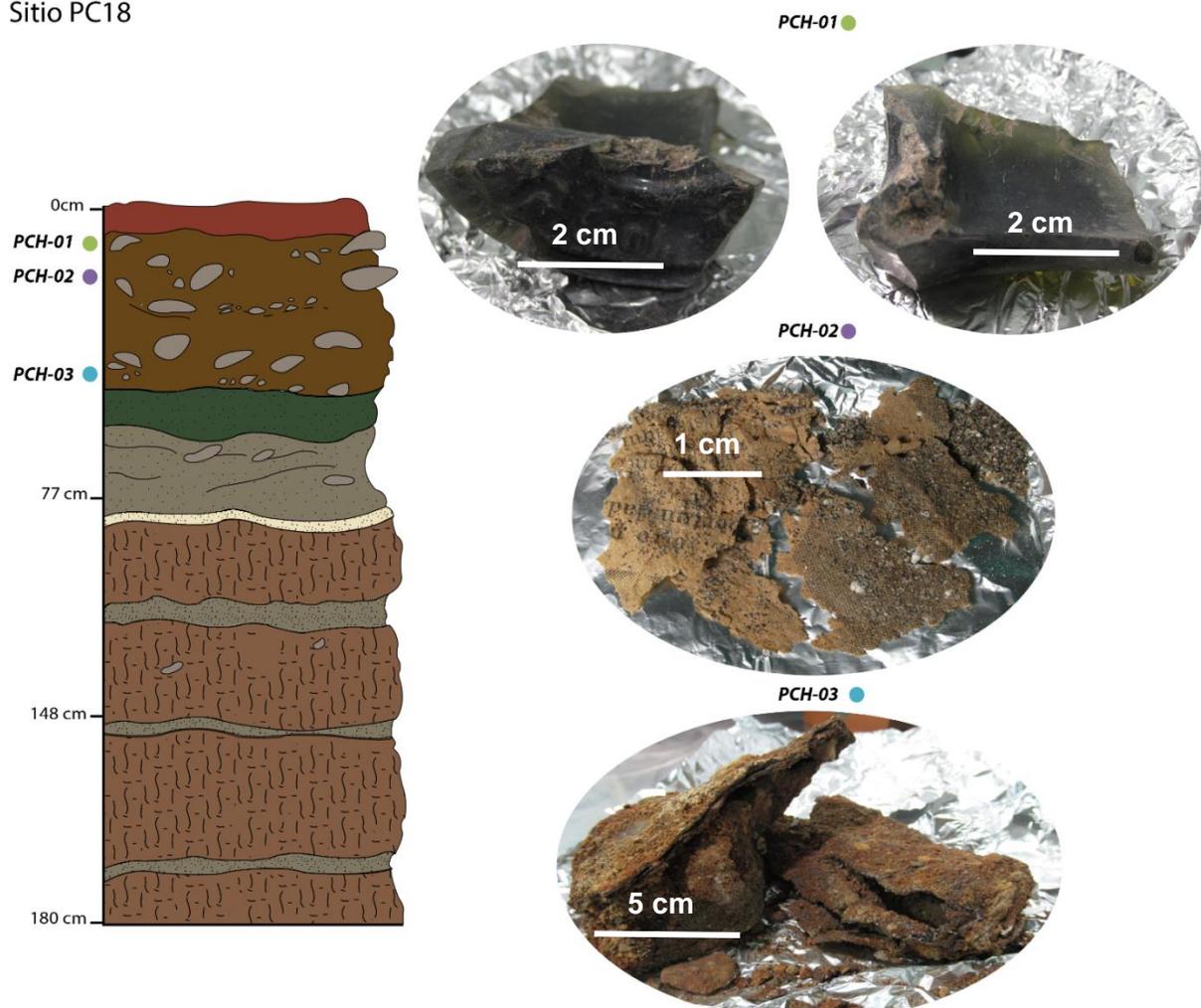


Figura 67. Esquematación de la columna estratigráfica del sitio PC-18 en conjunto con fotografías de los hallazgos arqueológicos hechos en el sitio.

La similaridad en los resultados de estos análisis sugiere la misma fuente para el sedimento estudiado. Esto en conjunto con las evidencias arqueológicas y la información disponible respecto a la variación en el cauce del río San José mostradas en la sección 1.4.3 sugieren que el sedimento ubicado en las trincheras el Parque Centenario corresponde a depósitos de aluvión.

4.5 Análisis estadístico mixto

Tomando en cuenta todas las apreciaciones hechas en las secciones anteriores de resultados, se generaron diagramas APC para las variables más relevantes de cada sitio estudiado. Los resultados se exhiben a continuación.

El sitio CC18 muestra que las variables más relevantes al momento de diferenciar facies son la selección y TGP para clastos y matriz en conjunto a los metales pesados. Utilizando estos parámetros en un diagrama ACP (Fig. 68) se puede ver una clara diferencia entre la facies de arena y la de humedal. La facies de arena está dominada principalmente por un mayor contenido de metales, un mayor tamaño de grano y una mejor selección en comparación con la facies de humedal.

Análisis multivariable CC18

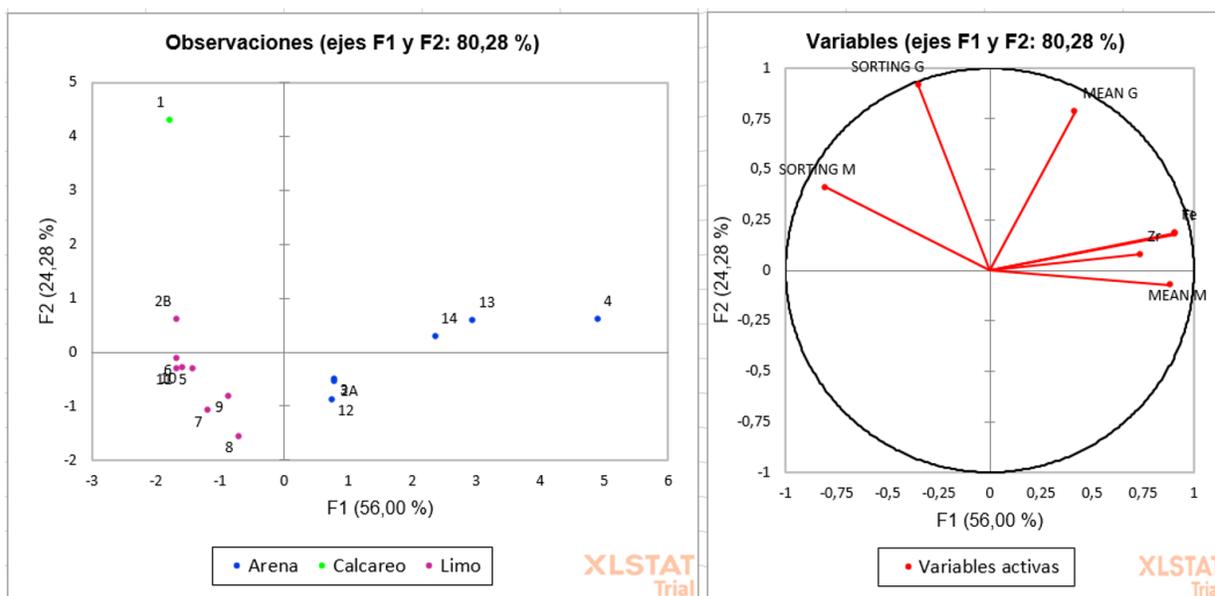


Figura 68. Diagrama APC multivariable para el sitio CC18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

En el caso del sitio PC18, dada la positiva correlación para elementos químicos, se consideran los elementos que definen los esqueletos calcáreos (Sr y Ca) en conjunto a los metales pesados (Ti, Fe, Zr). Además de esto se considera la selección y el TGP para clastos y matriz. El gráfico de APC (Fig. 69) muestra que existe una distinción poco clara entre las poblaciones de arena y limo, lo que es posible atribuir a la varianza de 70%. Se presenta de manera clara que las arenas están dominando los contenidos de elementos químicos tanto para esqueletos como para metales pesados. También se puede apreciar que las arenas tienen en general muestran una mejor selección en gruesos y en matriz respecto a las facies de humedal.

Finalmente, el sitio PC218 tiene una mala correlación de metales pesados, por lo tanto, solo se considera para este gráfico de APC (Fig. 70) a los elementos que definen los esqueletos calcáreos (Ca y Sr) en conjunto a la selección y TGP para matriz y clastos. El resultado indica que la población de arena presenta la mejor selección y un mayor TGP para la matriz, mientras que la facies de humedal domina el TGP para los clastos. Las concentraciones de Ca y Sr son mayores para la facies de humedal. Como es de esperarse, el sedimento aluvial es el que presenta el mayor TGP para clastos.

Análisis multivariable PC18

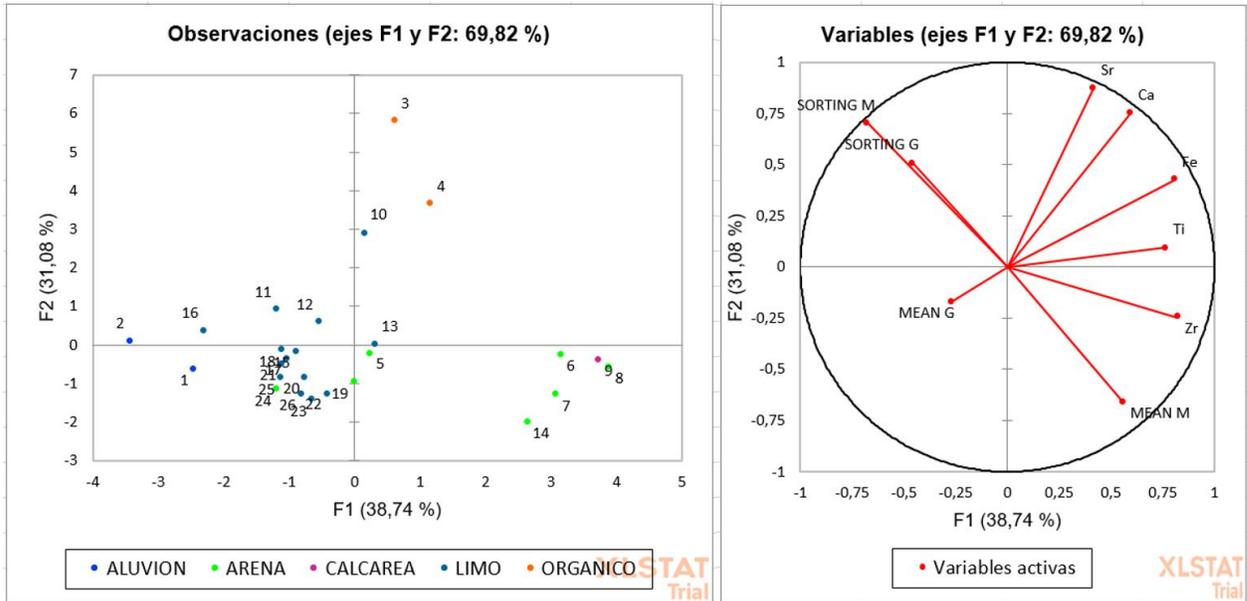


Figura 69. Diagrama APC multivariable para el sitio PC18. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

Análisis multivariable PC218

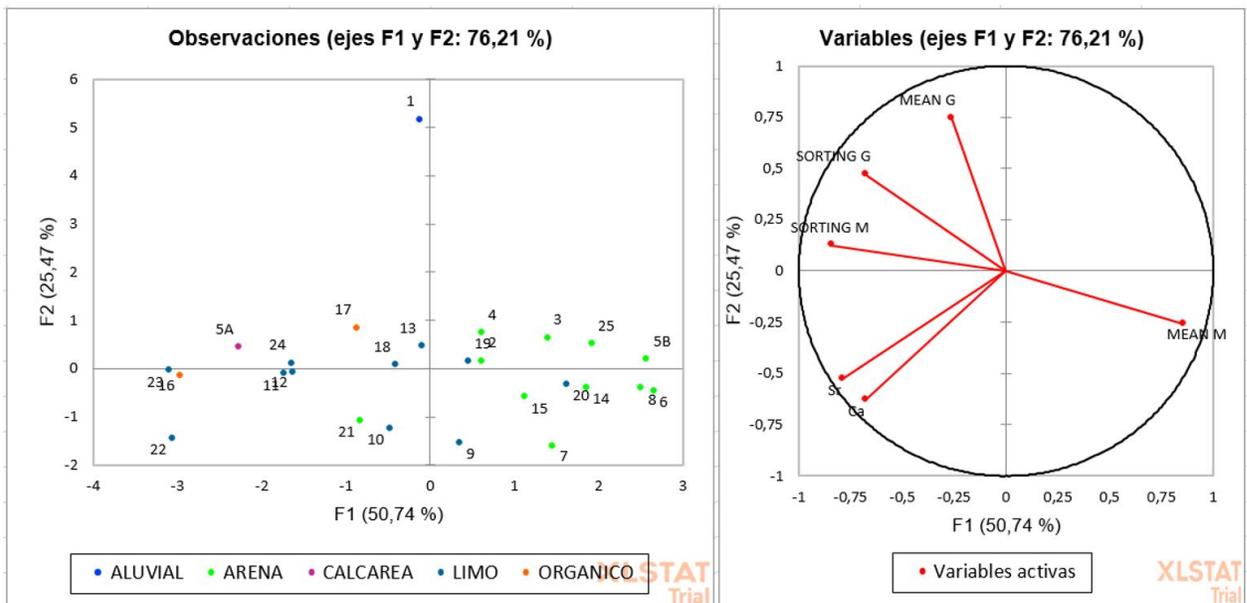


Figura 70. Diagrama APC multivariable para el sitio PC218. La confección de los gráficos se llevó a cabo utilizando el macro para Excel XLSTAT.

5 DISCUSIÓN

5.1 Impactos de los grandes tsunamis en la ciudad de Arica

Tal como se menciona antes, la región de Arica y Parinacota ha sido afectada por grandes terremotos y tsunamis históricos, ocurridos en los años 1604, 1868 y 1877.

El evento del 24 de noviembre de 1604 dejó a la ciudad de Arica en ruinas, destruyendo el archivo histórico de la ciudad, borrando así de la memoria los relatos de este y otros eventos anteriores. Este evento también inundó otras ciudades del sur de Perú (Fernández, 2007 *en* Ruiz, 2018). Esta inundación causó la reubicación de la ciudad de Arica desde su antigua situación, más cercana a la línea de costa, cerca del humedal del río San José, hacia su actual emplazamiento, en las faldas del Morro.

Existen diferentes fuentes que documentan los parámetros técnicos de este tsunami (Compte & Pardo, 1991), el catálogo del SISRA (Sismicidad y Riesgo Sísmico en la Región Andina) – Perú (1985) entrega coordenadas de 17.88°S y 70.94°W a una profundidad de 80 km para el epicentro, ubicándolo en la costa entre Moquegua y Tacna. Este catálogo también reporta una magnitud de *MS (I)* de 7,9 y un largo de ruptura de $L = 137$ km. Por otro lado, el mismo catálogo SISRA – Chile (1985) ubica el epicentro en las coordenadas 18.50°S y 70,35°W con una magnitud *MS* de 8,4. Esto ubicaría el epicentro frente al Morro de Arica, metros bajo el mar y sería coincidente con el epicentro del sismo de 1868. Considerando que los daños más notorios se expandieron hacia Perú (Greve, 1964), es posible que el epicentro propuesto por el catálogo peruano sea el más preciso, lo que es reafirmado por Compte & Pardo (1991).

El sismo de 15 de agosto del 1868 es probablemente el evento destructivo histórico más conocido en Arica, esto gracias a las amplias fuentes de información disponibles (p.e. Montessus de Ballore, 1912; Fernández, 2007). Los parámetros numéricos recopilados para el tsunami se pueden encontrar en la Tabla 8. Es claro para el sismo de 1868 que la altura máxima de las olas fue alrededor de 12 metros y el n° de olas es 6 o 7. Es interesante ver esto en contraste con lo visto en el registro sedimentario ya que existen estratos de arena en los que no es posible hacer distinción entre diferentes entradas o salidas del mar.

Tabla 8. Tabla recopilatoria de los datos numéricos recopilados para los tsunamis de 1868 y 1877 en Arica.

EVENTO	Fuente	Autor	Duración sísm.	N° olas	Altura máxima	Réplicas	Hora
1868	Fernández (2007)	Cónsul Chileno en Arica	5 a 6 min.	7	12.2 metros	600	
	Fernández (2007)	Mercurio de Vapor	7 a 10 min.	-	-	-	5:00 p.m
	Fernández (2007)	Anónimo	-	4 a 6	-	-	-
	Greve (1964)	Recopilación Anónimos	-	7	13 metros	-	-
	Fernández (2007)	Comandante <i>Wateree</i>	-	-	12,93 metros	-	5:05 p.m
	U. Arturo Prat (2008)	Carlos Donoso Rojas	-	-	16 a 10 metros	-	-
1877	Montessus de Ballore(1910)		-	8	8,6 a 19,75 met	-	9:00 p.m

Las consecuencias socioeconómicas de este tsunami son graves, como se ve en los relatos y en la imagen viva que representan, por ejemplo, los dos cascos de buque expuestos en el capítulo 3 (Fig. 29). Dentro de lo que estas consecuencias abarcan se encuentra una inundación de la ciudad hasta la calle de la Iglesia Matriz (Fig. 71). Una destrucción total del ferrocarril con sus carros esparcidos por la ciudad. El

Compte & Pardo (1991) recopilan los antecedentes científicos del evento. El catálogo de SISRA – Chile (1985) indica un epicentro de $18,50^{\circ}\text{S}$ y $70,35^{\circ}\text{W}$, ubicándolo 5 km al SW de la bahía de Arica, donde una magnitud de $M_s = 8,5$ indica que un tsunami se generó. No se asocia una profundidad al epicentro de este evento. Lockridge (1985) localiza el evento en las coordenadas $18,6^{\circ}\text{S}$, $71,0^{\circ}\text{W}$, ubicándolo a 50 km al SE de Ilo, Perú, siguiendo la línea de costa. La magnitud reportada es de $M_s = 8,5$ en asociación con un gran tsunami. Finalmente, utilizando un mapa de isosistas, Compte & Pardo (1991) ubican el sismo en $17,7^{\circ}\text{S}$, $71,6^{\circ}\text{W}$, 27 km al oeste de Ilo y estiman una magnitud de $M_S(I) = 8,8$.

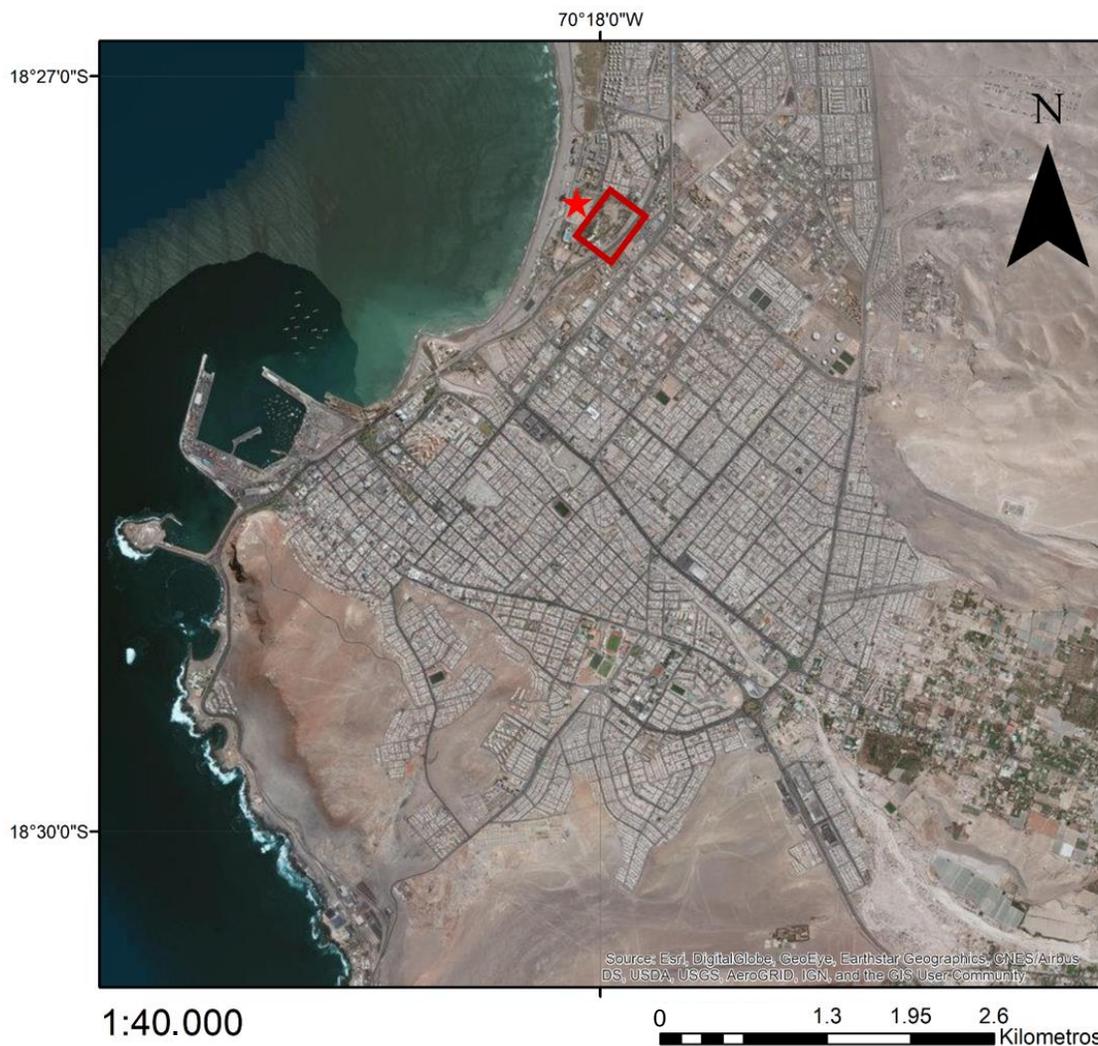


Figura 72. Mapa topográfico de la ciudad de Arica. La estrella roja representa la ubicación del casco de la Corbeta América visto en la Fig. 27. El rectángulo rojo indica el área de estudio del Parque Centenario.

Finalmente, el evento de 1877 es documentado como igual de terrorífico al ocurrido 11 años antes, sin embargo, los archivos históricos disponibles para este evento son mucho más acotados respecto a su contraparte, posiblemente debido a que los estragos socioeconómicos fueron menores por el conocimiento de la población de este tipo de eventos. El archivo de Montessus de Ballore (1910) entrega una buena lectura de lo que ocurrió ese día, recopilado de variadas fuentes. El evento ocurrió el 9 de mayo a las 22 horas y la posterior inundación ocurrió desde el Morro hasta el río Lluta, ubicado en la

parte más norte de la ciudad, incluso más al norte de *La Chimba*. Los reportes de altura de las olas van desde 5 metros hasta 19,75 metros y el mar arremetió 8 veces inundando 6 cuadras en la ciudad (750 metros). El casco del buque *Wateree* fue posteriormente relocalizado a su ubicación actual (Fig. 27). La ola se propagó hasta California, Japón y Nueva Zelanda.

Este evento, al igual que su predecesor, está muy bien documentado en la bibliografía. Compte & Pardo (1991) indican que acorde al catálogo de SISRA – Chile (1985), el epicentro se ubica en las coordenadas 19,60°S y 70,23°W, en la bahía de Pisagua. No se presenta información de profundidad del epicentro y la magnitud es de $M_s = 8,3$ lo que se asocia a un gran tsunami. Basado en isosistas, Compte & Pardo (1991) ubican el epicentro en 21,00°S y 70,25°W, a 20 km al sur de Punta Patacha y en base a los reportes de daño asumen una profundidad somera. Con estos antecedentes, reportan una magnitud $MS(I) = 8,8$ con ruptura de $L = 420$ km.

En la revisión histórica, además de una búsqueda de los catastros de los eventos de tsunami, se buscó información relacionada a los eventos históricos de aluvión en Arica. Esta búsqueda no fue fructífera, siendo los únicos reportajes al respecto los vistos en documentos de carácter científico. Otro tipo de evento para el que se escrutó la bibliografía son los eventos de tormenta marina, dada su similitud con depósitos de tsunami, sin embargo, tampoco se logró identificar ningún archivo que hiciera mención al respecto.

Finalmente, se puede decir que los relatos indican que, para los eventos estudiados, las zonas donde los tsunamis parecen generar más daño se han repetido en cada episodio. Por ejemplo, se menciona que, para el sismo de 1877, los daños no fueron tan graves como para el de 1868 debido a que ya se tenía experiencia al respecto por parte de los ariqueños. Sin embargo, es importante enfatizar que de todos modos y después de todos estos años, Arica sigue manteniéndose en el mismo lugar, sea este un acto de resiliencia o desconocimiento.

5.2 Registro de tsunamis históricos en la región de Arica y Parinacota

5.2.1 Morfología y sedimentología de eventos de oleaje extremo

Existen dos tipos de sedimentación en términos de cómo esta se genera: (1) sedimentación *normal*, la que se puede apreciar de eventos como las barras de un río construidas a lo largo de años y (2) sedimentación *catastrófica*, la cual es asociada a eventos puntuales como lo es un tsunami. La sedimentación *catastrófica* es un evento que ocurre casi instantáneamente e involucra niveles de energía de varias magnitudes mayores a los eventos de sedimentación *normal*. Un nivel de sedimento *catastrófico* tiende a representar una pequeña porción del total del horizonte sedimentario, entonces este puede también referirse como un sedimento *raro*, contrario a un sedimento *común* (Reading, 1986). Dentro de este tipo de depósitos catastróficos, existen dos tipos de depósitos de origen marino que tienden a generar confusión; los depósitos de tsunami y los depósitos de tormenta. Estos depósitos tienen características texturales, estructurales y sedimentológicas similares y no consta un criterio inequívoco de cómo diferenciarlos. Existe una percepción común en que estos depósitos sólo indican la ocurrencia de un evento de alta energía con origen marino que inundó

zonas costeras con agua marina, esto es referido como eventos de oleaje extremo (Kortekaas, S. & Dawson, A. G., 2007; Switzer, 2008; Switzer & Jones, 2008 *en* Lario, *et al.*, 2010). A pesar de esta dificultad para diferenciar estos tipos de depósito, existen trabajos que ahondan en las características de cada uno de ellos (p.e. Robke & Vott, 2017; Goff, *et al.*, 2012; Lario, *et al.*, 2010; Kortekaas, S. & Dawson, A. G., 2007) y con respecto a este estudio, son de relevancia (Fig.73).

Las características que tienen en común los depósitos de tsunami y tormenta no se ven siempre reflejadas en los sitios de estudio. No se observa en ninguno de los tres sitios de trabajo, por ejemplo, grandes bloques que puedan ser asociados a depósitos de eventos de oleaje extremo. En la ciudad de Arica, dado el contexto urbano donde los sitios se encuentran, la removilización de este tipo de material por los habitantes posterior al evento es un factor a tomar en consideración. Sin embargo, en Caleta Camarones, la cual presenta una población mucho menor que la capital regional, tampoco se presentan estos bloques, lo que sí podría esperarse en este sitio. Acorde a LeRoux & Vargas (2005) los bloques observados en un depósito de tsunami tienen origen en sistemas aluviales cercanos a la zona de inundación. Entonces, es posible que la carencia de estos se pueda justificar por la ausencia de bloques de estas características en las bahías estudiadas, sin embargo, este no es el caso como es posible ver en los depósitos de aluvión. El adelgazamiento de los estratos hacia el continente es otra característica que no es posible verificar en los sitios estudiados en Arica, debido a la proximidad entre las trincheras, aunque esto no es un argumento válido para descartar su ocurrencia en la zona.

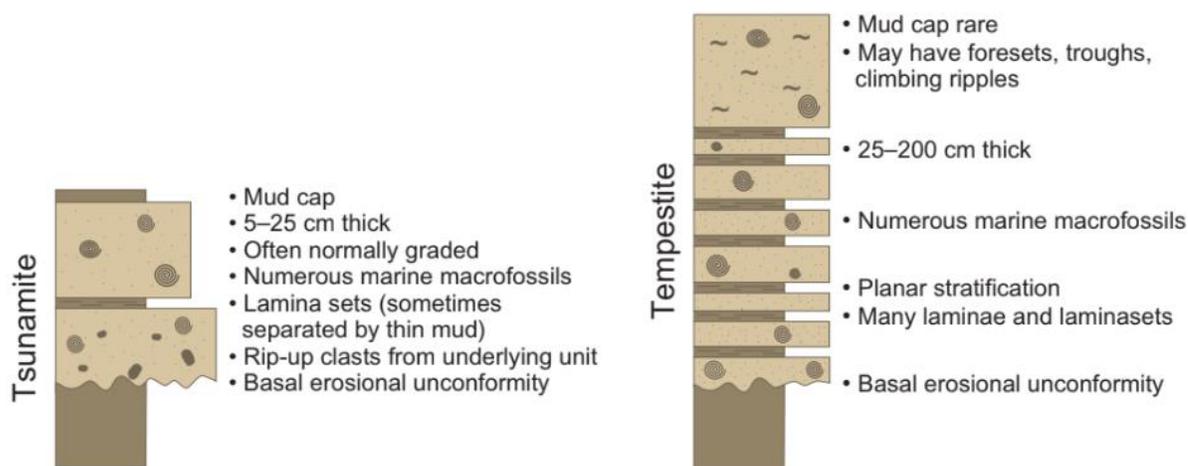


Figura 73 Características de un evento de tsunami vs. uno de tormenta, tomado de Robke & Vott (2017).

El depósito de tsunami interpretado en Caleta Camarones (CC-18; Fig. 20), compuesto de arena gruesa, se caracteriza por una selección moderada y carácter mesocurto simétrico a levemente asimétrico positivo. El contacto basal erosivo del primer nivel de la facies de arena (Muestra CC1802A) (Fig. 34B), el intraclasto de la facies humedal (Muestra CC1802B) (Fig. 32C), la estratificación cruzada y convoluta en conjunto sugieren un flujo de alta energía y carácter erosivo como los descritos para un flujo de tsunami (Le-Roux & Vargas, 2005; Goff *et al.*, 2012). La estratificación cruzada vista en un perfil de orientación perpendicular a la línea de costa indica una dirección de flujo hacia el continente para este nivel, sugiriendo una ola de ingreso (Bahlburg, *et al.*, 2017) (Fig. 34B). El depósito inferido como tsunami sobreyace a un nivel

interpretado como una facies de humedal (Muestras CC1805 a CC1811), este nivel compuesto desde limo hasta arena fina se caracteriza por una mala selección y una asimetría positiva fina. El nivel de arena que se encuentra en la base de la trinchera (Muestras CC1813 y CC1814), si bien comparte las características sedimentológicas del nivel superior inferido como tsunami, no tiene estratificación que demuestre un alto nivel energético ni tampoco se puede apreciar su contacto con el nivel inferior para identificar como contacto erosivo o *rip up*, por tanto, en términos granulométricos y morfológicos, es poco factible, basado en la información disponible, atribuirle un carácter catastrófico.

Los análisis estadísticos de granulometría para el sitio CC-18 muestran claramente que, en el caso de la matriz y los clastos, se puede diferenciar la facies de humedal de la de arena siendo esta última la que muestra siempre el mayor tamaño de grano y la mejor selección. El análisis de mecanismos de transporte muestra que la carga de sedimento para los niveles de arena se realiza mediante tracción y saltación predominantemente. En el caso de la saltación, esta presenta dos poblaciones claramente divididas entre 1 y 2 ϕ . Basándose en que el sedimento es transportado por oleaje, se puede interpretar que esta división representa una carga de saltación que se moviliza mayormente por rotación de los clastos y otra carga que se transporta mayoritariamente en el flujo (Visher, G., 1969). Si estas cargas actúan de manera consecutiva entre sí y no simultáneamente, entonces, es posible inferir la presencia de dos flujos. Un flujo de entrada correspondiente a la carga de saltación dominada por flujo y uno de salida asociado a la carga de saltación dominada por la rotación, esto basado en que el flujo de retirada es el que presenta el carácter más erosivo de los dos (LeRoux & Vargas, 2005). En el caso del sitio CC18, la presencia de dos cargas de saltación se aprecia en todos los estratos pertenecientes a la facies de arena, aunque, como se mencionó anteriormente, solo el primer estrato de la facies de arena se atribuye a un evento de oleaje extremo, dejando los otros dos estratos de arena como de posible origen por la acción de la anteplaya.

En la ciudad de Arica, los dos sitios candidatos a depósitos de tsunami (Fig. 18 y 19) presentan características que diferencian los niveles de arena estudiados de los estratos aledaños. El sitio PC-18 (Fig. 18) presenta 4 estratos de sedimento que se infiere que representan depósitos de tsunami. De estos estratos, el más superficial (PC1805 a PC1808) y el que lo sigue (PC1814) presentan arena de tamaño medio a fino, con selección moderada y un carácter simétrico mesocurto. En la base del primer estrato se puede identificar un contacto erosivo, clastos de *rip up* (Fig. 32B), clastos centimétricos, estratificación convoluta (Fig. 34D) y un canal erosivo de sedimento con fragmentos metálicos (Fig. 33B). Estas evidencias indican un flujo energético que penetra en el nivel inferior de sedimento, lo que es coincidente con lo propuesto en estudios previos para un depósito de tsunami (p.e. León, *et al.*, 2019; LeRoux & Vargas, 2005; Goff, *et al.*, 2012). Acorde a lo visto en LeRoux & Vargas (2005) una ola de *backwash* o retirada sufre una transformación de flujo que induce una canalización en la topografía costera, por tanto, se atribuye este nivel de la facies de arena a un flujo de *backwash* basado en la presencia de esta canalización. En el caso del segundo estrato (PC1814), se puede apreciar un contacto basal erosivo y pequeños clastos de *rip-up* (Fig. 32D). Respecto a los niveles inferiores de la facies de arena, no se ha identificado en ellos ninguna característica morfológica que permita asignarlos a un depósito de tsunami, aunque sus características sedimentológicas si permiten diferenciarlos de la

facies de humedal, como se ve también en los gráficos APC estadísticos, y su potencia centimétrica sugiere un evento puntual. El origen tsunamigénico no se descarta para estos niveles, sin embargo, evidencias más prominentes son necesarias para asegurar esta hipótesis.

En tanto a los análisis estadísticos APC para parámetros sedimentológicos del sitio PC-18, estos muestran distribuciones de poblaciones entre las facies de arena y humedal que permiten, hasta cierto punto diferenciar estas dos facies sedimentológicamente, sin embargo, las diferencias pueden ser poco notorias al contrastarlas, por ejemplo, con el sitio CC18. Esto puede deberse a que el sedimento arenoso de esta bahía es de tamaño fino y, como ya se ha mencionado antes (Peters & Jaffe, 2010), es probable en este tipo de depósito tener una contaminación por niveles aledaños a los estudiados mediante una infiltración de sedimentos finos o erosión de los granos de mayor tamaño y, dada la naturaleza permeable del sedimento arenoso, esto sería factible. El primer nivel de la facies de arena está depositado bajo el nivel aluvial definido en la sección 4.4. No es posible descartar, entonces, que este depósito aluvial haya contaminado en algo el sedimento estudiado.

Los análisis de mecanismos de transporte (distribuciones de frecuencia acumulada) indican para el sitio PC-18 (Fig. 44) una alta carga de tracción y una buena selección de la carga de saltación con una carga de suspensión mínima, permitiendo descartar la opción de que estos sedimentos se generaran por un medio eólico (Greenwood, B. 1969; LeRoux, 1999). Del mismo modo que en el sitio CC18, se puede observar una división de poblaciones en la carga de saltación, como se propuso antes; esta división sugiere la presencia de un flujo de entrada y uno de retirada de la ola. Esto se aprecia en el segundo estrato de la facies de arena en este sitio (PC1814) el cual sería evidencia entonces del flujo de entrada y salida de un evento de tsunami. En el caso del primer estrato de la facies de arena (PC1805 a PC1808) esto no se puede observar, respaldando la hipótesis de que este nivel representa únicamente un flujo de retirada.

El sitio PC2-18 es el segundo sitio ubicado en la ciudad de Arica. El nivel de la facies arena presente en este sitio, que correspondería a depósitos de tsunami (Fig. 19) (Muestras PC21802 a PC21804), se caracteriza por tener sedimento de arena fina de carácter *leptocurto* y asimetría fina. Similar al caso del sitio PC-18; en este sitio también se puede apreciar un contacto erosivo sobre el nivel calcáreo (Fig. 32A) acompañado de clastos de *rip up*, un canal erosivo con fragmentos metálicos (Fig. 33A) que también se asocia a un flujo de retirada (LeRoux & Vargas, 2005), y estratificación convoluta (Fig. 34C). El resto de los niveles de arena del sitio comparten las características sedimentológicas de este nivel y tienen potencias apropiadas, <20 cm, para ser candidatos a un nivel de tsunami. Sin embargo, ninguna de las apreciaciones morfológicas de contacto con las capas aledañas se observa. Es por esto que, acorde a los aspectos granulométricos y morfológicos, asignar estos niveles a un tsunami sería prematuro.

El análisis ACP en el sitio PC2-18 muestra que en el caso de los clastos no hay gran diferencia entre las facies de humedal y de arena, lo que es contra indicativo de que estos sedimentos representan un tsunami. Como se explicó anteriormente, esto sustenta dos teorías: que sea esta una característica del sedimento propio de la cuenca o la existencia de una contaminación en la facies de arena para los sitios de Arica que,

en el caso de este sitio, es mucho más notoria que en el sitio PC-18.

Finalmente, los criterios morfológicos y sedimentarios aquí vistos y su contraste con la bibliografía permiten indicar que en Arica y Camarones los eventos estudiados de tsunami dejan en el registro sedimentológico depósitos de oleaje extremo. Estos depósitos, si bien comparten características con un evento de tormenta, al menos en el sentido sedimentológico son distintivos entre sí. En Arica, el nivel que se puede atribuir con toda confianza a un evento de tsunami es el más somero en ambas trincheras que corresponde a la facies de arena y representa un flujo de retirada de un evento de tsunami. En el caso del sitio PC-18, se interpreta también como depósito de tsunami el segundo estrato más somero (PC1814) dadas sus estructuras sedimentarias características.

En tanto al sitio de Camarones, aquí también se asigna un solo nivel (CC1802A) a un evento de tsunami por las mismas razones vistas en Arica. Este estrato se atribuye a un oleaje de entrada en su sección inferior y en la superior a uno de retirada. Bajo este nivel también se pueden ver sedimentos correspondientes a la facies de arena (CC1803 y CC1804). Sin embargo, estos no presentan estratificaciones que muestren alta energía, por tanto, no se puede descartar que provengan de la sedimentación del frente de playa o un evento de tormenta, por tanto, también se descartaría, a priori, para los alcances de este trabajo, que estas correspondan a un evento de tsunami.

5.2.2 Aspectos biológicos y geoquímicos

Para los sitios en que se analizó la componente biológica (PC-18 Y PC2-18) se pudo detectar presencia de foraminíferos, esqueletos calcáreos y vegetación. Los esqueletos y la vegetación presentes son fragmentos pequeños y se presentan en variadas capas. Las mayores concentraciones porcentuales de fracción orgánica se pueden ver en la facies de arena o en niveles directamente sobre una facies de arena. Esto ocurre en depósitos de tsunami jóvenes (Goff, *et al.*, 2012). Entonces, este sedimento rico en fragmentos de conchas marinas es retrabajado por el nivel sobreyacente y depositado finalmente en ese nivel a pesar de originarse en conjunto a la facies de arena.

Respecto a la evidencia de foraminíferos, esta es acotada y muestra que existe solo una especie de foraminíferos en los sedimentos estudiados (Figuroa *et al.*, 2005). Acorde a Peters & Jaffe (2010), un depósito de tsunami presenta variadas especies de diferentes ambientes arregladas caóticamente, lo que es opuesto a lo expuesto en este estudio. La especie de foraminíferos identificada en el registro corresponde a la *Buccella Peruviana*. Esta especie, catalogada como marina somera (p.e. Páez, *et al.*, 2001; Hromic, 2007; Reilly, 2003) si bien no descarta la posibilidad de un evento de tormenta, tampoco niega la posibilidad de un evento de tsunami; dado que la plataforma marina es ancha en la bahía de Arica. Esto puede indicar que hay una alta meteorización en la zona de estudio que perjudicó la preservación del registro fósil, posiblemente por una disolución de los esqueletos, dada la textura de disolución que se puede ver en uno de los especímenes estudiados (Fig. 57C).

Para la apta preservación de foraminíferos bentónicos su enterramiento debe ser rápido (Sexton & Wilson, 2009), aunque otros factores como la litología y la tasa de sedimentación son relevantes posterior al enterramiento, el mayor daño a las especies

puede hacerse previo a este. Entonces, considerando estos factores, se puede suponer un enterramiento lento del sedimento arenoso en Arica.

La composición de las aguas continentales está dominada por cuatro cationes: Calcio (Ca^{+2}), Magnesio (Mg^{+2}), Sodio (Na^+) y Potasio (K^+), y tres aniones: Carbonato (CO_3^{-2}), Sulfato (SO_4^{-2}) y Cloruro (Cl^-) (Allen & Collinson, 1986). Estos parámetros, en conjunto con los propuestos por Goff, *et al.* (2012) para aguas marinas permiten diferenciar las características de sedimentos continentales y otros de origen marino. En general, los resultados de elementos mayores en este trabajo son bastante homogéneos en el sentido que no existen grandes anomalías o patrones claros que sugieran diferencias. Los resultados más interesantes se pueden ver en lo que respecta a metales pesados: En la Tabla 7 se muestra que estos tienen una preferencia por las facies de arena en el sitio PC-18 y CC-18. En lo que respecta al sitio PC2-18, no se representa este patrón y al igual que con otros parámetros, esto apunta a la ya mencionada contaminación de este sitio. El sitio CC-18 es el que muestra resultados más claros en cuanto a composición de elementos mayores. En la Fig. 53 se puede apreciar como la facies de arena concentra los valores de Ca, sin embargo, al no estar esto asociado al Sr (Fig. 54) es difícil asignarlo a una mayor presencia de esqueletos calcáreos, ya que podría deberse a la movilización del Ca perteneciente al sedimento de la facies humedal.

Existen otros iones como el Cl^- y el Na^+ , que acorde a la literatura (Goff, *et al.*, 2012) deberían presentar altas concentraciones en niveles de sedimento marino, contrario a lo revelado en este trabajo. A nivel regional no se registró presencia de ninguno. Estos pueden haber sido desplazados fácilmente debido a su facilidad para generar enlaces; no obstante, es importante recalcar el antecedente de su ausencia.

5.2.3 Caracterización de facies autóctonas

La fracción gruesa de un depósito de aluvión es definida por la literatura como estratos de baja potencia caracterizados por sus notorios clastos, predominantemente guijarros (2 a 64 mm). Si bien estos guijarros dominan el sedimento también se pueden presentar troncos, vegetación, gravas e incluso brechas de material desplazado dentro del flujo (Allen & Collinson, 1986). Los depósitos descritos como facies de aluvión son consistentes con esta definición Si bien no se pueden ver grandes restos de vegetación entre el sedimento, los tamaños de los clastos mayores sugieren este tipo de transporte de alta energía. Los clastos son redondeados y similares en tamaño a los vistos en el aluvión de 2019 (Fig. 57), lo que sugiere una misma fuente de origen en el sector más cordillerano de la cuenca. También existe material antropogénico (Fig. 60) en el sedimento, el cual puede caracterizarse como desplazado dentro del flujo y no originario de la fuente del mismo.

En secciones anteriores se ha propuesto una contaminación de los sitios de estudio en Arica por medio de este flujo de aluvión depositado sobre las capas de arena estudiadas. Esta contaminación se sugiere que es producto de la infiltración del fluido transportado por este flujo el cual debió presentar contaminantes químicos tanto como sedimentológicos (suponiendo una infiltración también de sedimento fino). Dado que el sitio estudiado se encuentra en la antigua desembocadura del cauce fluvial del río San José, esta es la zona donde el aluvión habría acumulado la mayor cantidad de escombros, basura y sedimento, teniendo a disposición más material para este proceso

contaminante.

Los depósitos generados por una laguna son de dos tipos, clásticos y carbonáticos. La facies carbonática se reconoce por niveles de calcita bajos en Mg y niveles orgánicos preservados en condiciones anóxicas. Este sedimento calcáreo es generado en lagunas de agua fresca de cuatro maneras: (i) inorgánicamente, por fotosíntesis o sobresaturación, (ii) producción de esqueletos calcáreos, (iii) aporte alóctono y (iv) diagénesis temprana (Allen y Collinson, 1986). El control más importante es el sistema del CO₂. La remoción de CO₂ principalmente por fotosíntesis incrementa el pH y promueve la precipitación de calcita. Como se registra a través de fotografías y raíces en el sector de Arica, se puede suponer una alta cantidad de vegetación generando, entonces, estos niveles calcáreos referidos en este trabajo como facies calcárea.

La facies clástica consiste en laminaciones finas de fango y limo (Allen y Collinson, 1986). Como en este caso no se observan estas laminaciones y gracias al contexto histórico de los sitios, en este trabajo se observa que los depósitos clásticos finos estudiados no corresponden a laminaciones. Allen y Collinson (1986) proponen también que para un depósito de estanque o estuario se puede apreciar niveles no estratificados de lignito y limo, esto, en conjunto con la abundancia de raíces y niveles carbonáticos, soportan la hipótesis del origen de los niveles asociados a la facies de humedal.

5.2.4 Cronología de eventos

Acorde a los resultados y discusión de los eventos estudiados en este trabajo se asignaron a episodios de tsunami tres estratos en las trincheras analizadas; estos corresponden al estrato más somero de la facies de arena en Arica (para ambas columnas), el estrato más somero en el sitio de Caleta Camarones y el segundo estrato de arena en el sitio PC-18 de Arica.

En la ciudad de Arica se aprecian claras sucesiones en el sedimento desde el fondo de las trincheras estudiadas hacia la superficie: estratos de alta potencia (> 30cm) pertenecientes a la facies de humedal seguidos de estratos de baja potencia (<10cm) que representan la facies de arena. Esto indica un patrón deposicional similar en la zona. Estudios en el Golfo de México, donde se presenta un clima más templado y húmedo sugieren tasas de acreción para estuarios y humedales de hasta 1 cm por año máximo (Callaway, *et al.*, 1997). Considerando las condiciones hiperáridas de la región de estudio, se esperaría que estas tasas fueran menores para los humedales aquí analizados, por tanto, el patrón deposicional que se propone consiste en deposición lenta del sedimento de humedal durante años intercalado con eventos de deposición rápida y esporádica que generan los estratos de la facies de arena.

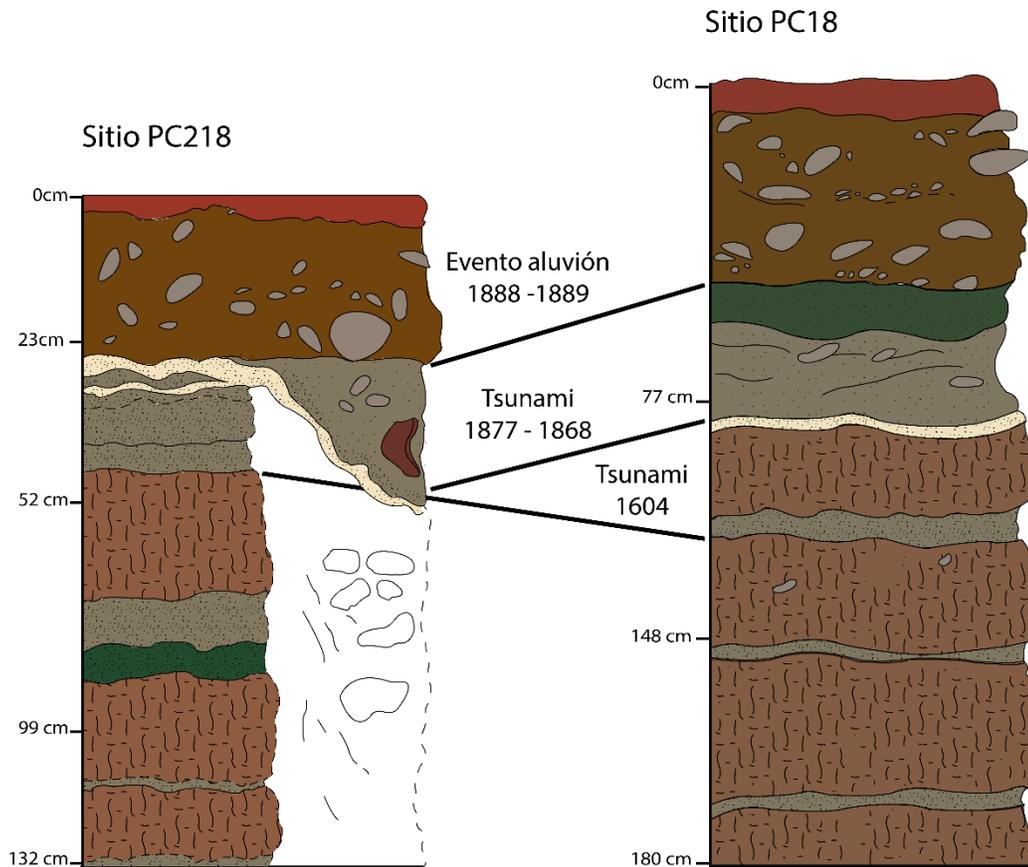


Figura 74 Cronología propuesta para los sitios estudiados en la ciudad de Arica, las líneas negras indican los estratos correlacionados entre ambas trincheras.

Los estratos correspondientes a la facies orgánica no son correlacionables entre los sitios de estudio en Arica, esto sugiere que corresponden a eventos separados en cada sitio, lo que se puede asociar a la posición relativa de cada trinchera respecto al humedal al momento de deposición de estos estratos. Por ejemplo, cuando se deposita el estrato de la facies orgánica para el sitio PC2-18 este se debió encontrar en una zona donde restos orgánicos se acumulaban en el humedal y la trinchera PC-18 en ese momento no compartía esas características.

El estrato correspondiente a la facies calcárea que se encuentra en ambas trincheras marca un evento en la bahía de Arica el cual posiblemente se asocie a la deposición del humedal dada su posición relativa por sobre de los últimos sedimentos de humedal, este estrato marca la primera correlación entre ambas trincheras. Al encontrarse este bajo un estrato de arena que se asocia a tsunami en ambas columnas y dado que estos estratos de arena comparten las mismas características sedimentológicas, podemos relacionar dichos estratos de arena al mismo evento de tsunami (Fig. 74). Al considerar lo somero de estos estratos, su posición relativa bajo el sedimento que se atribuye al evento de aluvión de 1888 – 1889 y que se encuentran por sobre los últimos estratos asociados a la facies de humedal, podemos relacionar estos al evento de tsunami más reciente en la zona, el evento de 1877. Considerando las tasas de sedimentación ya mencionadas para humedales y la proximidad temporal de este evento al anterior evento de tsunami en 1868, es posible considerar que entre los depósitos de estos dos eventos no se generara un estrato de sedimento del humedal, por tanto, se propone que

este estrato también puede representar el evento de 1868 que fue erosionado y/o reabajado por su sucesor. En el sitio PC-18 se aprecia una separación de este estrato de arena al siguiente estrato que documenta un evento de tsunami mediante un estrato de la facies de humedal, este siguiente evento se asocia al evento de 1604 dada esta separación y se correlaciona con el tercer estrato de arena del sitio PC2-18. Este estrato en el sitio PC2-18 no es separado de su sucesor en la facies de arena por ningún depósito del humedal, esto se atribuye a una migración del humedal dejando sectores abandonados tras el evento de tsunami. Esta asociación temporal debiera ser apoyada con futuros análisis

Se ha considerado en otras secciones de este trabajo una contaminación del sedimento de la facies de arena en los sitios estudiados en Arica dada la poca representatividad del sedimento arenoso de lo que se esperaría para sedimento de arena marina y en comparación con lo visto en el sitio CC18 que presenta un sedimento mejor preservado. Esta contaminación se sugirió que puede ocurrir por un enterramiento lento del sedimento (Sexton & Wilson, 2009) y/o por una infiltración de sedimento fino de otras facies, como lo son la facies aluvial o la facies de humedal (Peters & Jaffe, 2010). De ser el caso, esta contaminación ocurriría en toda la profundidad de las columnas estudiadas y se podría asociar a una lenta deposición del sedimento de humedal y su infiltración en los estratos permeables de arena, esto respaldaría los dos tipos de contaminación. Un factor para considerar al proponer este tipo de evento es que los estratos superiores de arena no tienen por sobre ellos depósitos del humedal, lo que sugiere que, en estos sitios, la sedimentación del humedal se detuvo posterior al evento de tsunami, descartando así que estos estratos puedan presentar esta contaminación. Esto se respalda mediante el razonamiento que estos estratos presentan en ellos la única evidencia foraminífera encontrada en el sedimento estudiado, es decir, el rápido enterramiento de estos estratos bajo el sedimento de aluvión, opuesto a lo ocurrido para los otros estratos cubiertos por sedimento de humedal, contribuyó a la preservación de las pocas especies de foraminíferos encontradas, sin embargo, el sedimento fino del aluvión y la presencia de fluidos aun así generaron infiltración en los estratos de arena manteniendo la contaminación vista en la granulometría.

Otra manera de visualizar estas sutilezas granulométricas es considerando que el sedimento de la bahía de Arica es de diferentes características respecto al de Caleta Camarones y que presenta granulometría más fina para las arenas de manera natural. Sin embargo, al considerar esta opción se enfrenta el problema que en la trinchera PC2-18, el sedimento de arena es más fino que para el caso de la trinchera PC-18 por tanto aún se encuentran discrepancias entre estas dos. Estas discrepancias pueden ser también atribuidas a que el sedimento de la facies de arena en ambos casos pertenezca a diferentes secciones de la ola de retirada, mostrando por tanto diferentes tamaños de grano.

En tanto a la ausencia de depósitos de humedal en la parte superior de las trincheras de Arica, esto se asocia a la reubicación del cauce del río San José en la primera mitad del S.XX (Víctor Mérida, com. oral, 2019) en conjunto a los depósitos de aluvión que sellan ambas trincheras en Arica, por tanto, la cronología para este último periodo, posterior a los eventos de tsunami de 1868 y 1877 consiste en la deposición de los sedimentos aluviales, los cuales aíslan esta sección del humedal de Las Chimbas, restringiendo así la deposición de más sedimento fino de humedal para este sector.

Posteriormente, dada la canalización del río San José y la urbanización del sector de Las Chimbas, no se vuelve a reacomodar el humedal por sobre este sedimento, dejando así sellado el registro hasta la actualidad.

Respecto al sitio CC18, la cronología de eventos en esta trinchera es más simple; el sedimento arenoso es más potente en este sitio, sugiriendo una deposición más lenta de arena, seguida de la deposición lenta del humedal y una deposición rápida para el estrato más somero de arena. Este último estrato que se asignó a un evento de tsunami, utilizando el mismo argumento que para los sitios de Arica, al no presentar sobre él más sedimento de humedal, sugiere que no ha estado un largo periodo de tiempo depositado, por tanto, se atribuye a los eventos de 1877 y/o 1868.

5.3 Riesgo de tsunami en Arica

La costa chilena está expuesta al riesgo de tsunami constantemente debido a su contexto sísmico (Comte & Barrientos, 1997). Históricamente, las culturas que habitan las costas de Arica han mostrado resiliencia frente a estos eventos que se remontan a los primeros indicios culturales de la bahía hacia 10.500 a.C. con sociedades basadas en la caza – recolección, técnicas de producción implementadas en periodos tardíos y posteriormente durante el periodo colonial con la llegada de los españoles en 1540 d.C. (SECPLAN, 2018). En el periodo histórico, desde 1500 d.C., Arica ha sido impactada por tsunamis al menos 5 veces (Montandon, 1962 *en* Lomnitz, 1970).

Durante el periodo histórico, como se ha visto en este trabajo, los tsunamis son causa de bastas consecuencias socioeconómicas para la población de Arica y en los últimos 130 años no se han registrado eventos catastróficos en la ciudad a la magnitud de los sismos estudiados aquí. Esto es debido a que el gap sísmico de la misma edad no ha sido completamente quebrantado aún (Lomnitz, 2004). Es por esto que es importante, al momento de cuantificar y calificar los riesgos de tsunami, tener en cuenta la historia reciente de la zona. Lagos (2014) caracteriza los riesgos de tsunami en la ciudad de Arica (Fig. 75) desde el punto de vista estadístico. Como se puede ver en el mapa, la zona de estudio se encuentra totalmente dentro del área catalogada como expuesta y los registros históricos de alcance del *run up* para los eventos de 1604 y 1868 se acomodan a lo propuesto por Lagos (2014). También es interesante comparar esta figura con los resultados para terrazas marinas en la zona (Sección 4.1.1). Esto es indicador de dos cosas: (i) las zonas de riesgo de tsunami en Arica son altamente influenciadas por los niveles de terrazas marinas alzados y además se han mantenido consistentes durante los últimos 200 años y (ii) la zona de estudio, al estar dentro de esta zona de riesgo es una zona ideal para excavar trincheras para este tipo de estudios, por tanto, validando los resultados de este trabajo.

En los relatos históricos asociados al sismo de 1604, Montessus de Ballore (1915) registra una reubicación de la ciudad de Arica, en ese tiempo villa, hacia las faldas del Morro a modo de protección en caso de sismos y posteriores tsunamis. Ese cambio se ve reflejado en el plano de la ciudad de 1860 mostrado en la Fig. 71. Al fijarse en la evolución de la ciudad a la situación actual donde toda la costa está nuevamente ocupada, se ve que este relato ha sido puesto de lado, lo que es natural, con la expansión de la ciudad. Es importante, sin embargo, tener en consideración el registro gearqueológico y daño socioeconómico de los desastres naturales históricos al

momento de analizar riesgos. La ciudad de Arica en este sentido tiene una gran ventaja sobre otros sectores de Chile dado que su registro histórico es vasto y puede indicar claramente cuáles son los riesgos sobre la ciudad contrario a lo visto en otros sectores del país (p.e., León, *et. al*, 2018).

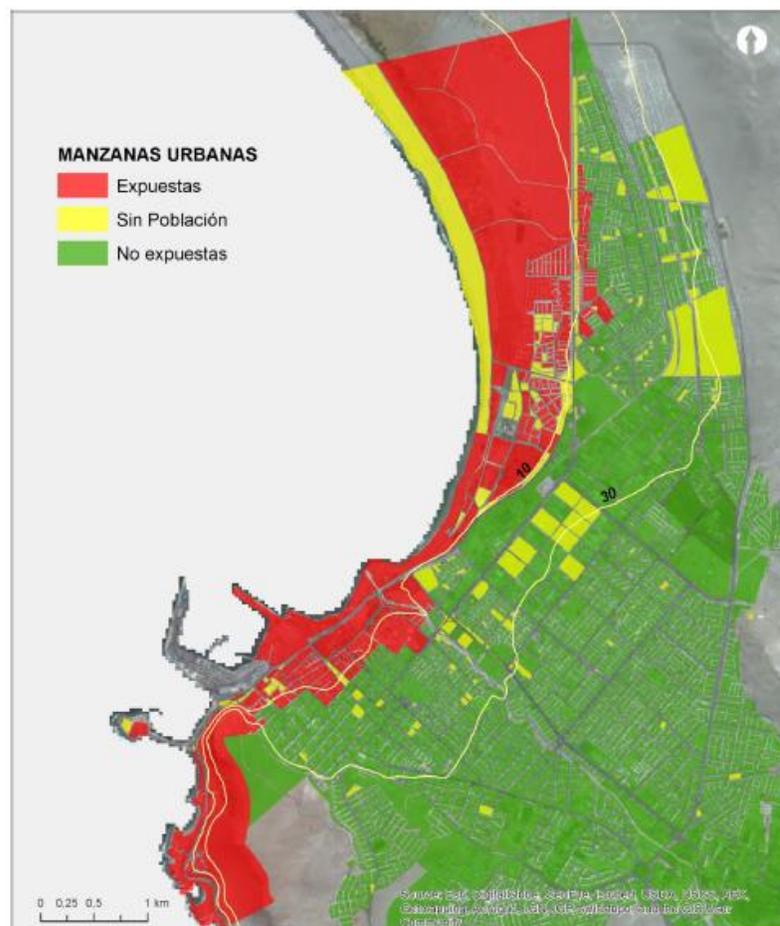


Figura 75. Manzanas urbanas expuestas a inundación por tsunami. Tomado de Lagos (2014).

6 CONCLUSIONES

En la ciudad de Arica y en Caleta Camarones a 450 metros y 100 metros de la costa respectivamente se encuentran perfiles naturales de sedimento, dentro de los cuales se albergan depósitos que, después de análisis multiproxy se concluye que corresponden a depósitos de tsunami. En Arica, estos depósitos representan niveles de arena media a fina, con características distintivas que permiten identificarlos como pertenecientes a la ola de retirada del tsunami, *backwash*. Entre estas características se encuentra una selección moderada, un transporte predominante por saltación y tracción, canales de sedimento, clastos de *rip up*, estratificación convoluta y altos contenidos de metales pesados. En Caleta Camarones, las tsunamitas consisten en arenas gruesas, también con morfologías características de tsunami ya mencionadas y gracias a estratificaciones distintivas, estos depósitos se asocian al flujo de entrada del tsunami.

En los sitios ubicados en la ciudad se pueden observar que las características granulométricas distintivas de las tsunamitas son sutiles, esto se interpreta como una característica nata del sedimento de la bahía y su posición relativa respecto a la ola de tsunami y/o a una contaminación del sedimento de la facies de arena dada la infiltración de niveles superiores en el sedimento estudiado además de la constante exposición a la contaminación de la ciudad. Esto si bien dificulta el estudio de estos sitios no evita que se puedan obtener respuestas del todo. Un futuro análisis de estos factores para una mejor comprensión de los eventos en esta zona es recomendado, posibles metodologías para esto son análisis SEM y de diatomeas para caracterizar la proveniencia de mejor manera.

Existen depósitos arqueológicos en la ciudad de Arica que están emplazados dentro de las trincheras estudiadas en este trabajo. Estos depósitos pueden ser indicativos de periodos históricos, por tanto, pueden contribuir a determinar una cronología de eventos para los sitios estudiados. Sin embargo, a la fecha de este trabajo, estudios arqueológicos aún no han sido llevados a cabo. Queda entonces propuesto para futuros estudios de tsunami en la ciudad de Arica, reevaluar la cronología de estos depósitos, asociando así niveles estratigráficos de tsunamitas a eventos específicos. Alternativamente, dataciones de radiocarbono pueden también ser ilustrativas de las fechas a las que corresponde cada nivel estratigráfico ayudando a una reconstrucción más prolija de eventos.

Tras una revisión de documentos históricos que relatan los eventos ocurridos en la ciudad de Arica durante los terremotos y tsunamis de 1604, 1868 y 1877 se concluye que esta ciudad de Arica es altamente susceptible a inundaciones por tsunami. Al comparar los relatos históricos con las referencias sísmicas y mapas de peligros de tsunamis esto es reafirmado y se debe mantener en consideración que estos eventos aún pueden ocurrir en el futuro a pesar de que no se presenten en el pasado reciente (>100 años). Las características morfológicas de la ciudad de Arica, en particular las terrazas marinas, son de gran importancia al momento de canalizar los flujos de agua provenientes de cualquier evento de oleaje extremo, pues se muestra una correlación entre los niveles de terrazas más jóvenes (cercanas a la línea de costa) con las zonas de mayor riesgo de tsunami en la ciudad.

Finalmente, es posible asignar, en forma tentativa a los eventos de tsunami de 1877

y/o 1868 los depósitos de observados en Arica y en Caleta Camarones en el primer estrato de sedimento correspondiente a la facies de arena. Subsecuentemente, se asigna tentativamente a tsunamitas del evento de 1604 los depósitos observados en el segundo estrato de la facie de arenas en Arica.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. Angermann, D., Klotz, J., & Reigber, C. 1999. Space-geodetic estimation of the Nazca-South America Euler vector. *Earth and Planetary Science Letters* 171, 329–334. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00173-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00173-9).
2. Comte, D., & Barrientos, S. 1997. Potencial Sismico en Chile. En: VII CONGRESO geologico chileno. Antofagasta, Universidad Catolica del Norte. 1755-1759.
3. Aceituno, P., Prieto, M. D. R., Solari, M. E., Martínez, A., Poveda, G., & Falvey, M. (2009). The 1877-1878 El Niño episode: Associated impacts in South America. *Climatic Change*, 92(3-4), 389–416. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9470-5>
4. Bahlburg, H., Nentwig, V., & Kreutzer, M. (2018). The September 16, 2015 Illapel tsunami, Chile – Sedimentology of tsunami deposits at the beaches of La Serena and Coquimbo. *Marine Geology*, 396, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.12.011>
5. Blott S.J., & Pye K. 2001. GRADISTAT: A Grain Size Distribution and Statistic Package For the Analysis of UnConsolidated Sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237–1248.
6. Briceño, L., SECPLAN, 2015. Caracterización del sitio arqueológico PC-2 Parque Centenario, Arica.
7. Briceño, L., SECPLAN, 2016. Informe ejecutivo: Caracterización del sitio PC-3 (Skatepark), Parque Centenario, Arica.
8. Calvo-Marcilese, L., & Langer, M. R. 2012. Ontogenetic morphogenesis and biogeographic patterns: Resolving taxonomic incongruences within “species” of *Buccella* from South American coastal waters. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 15(1), 23–32. <https://doi.org/10.4072/rbp.2012.1.02>
9. Cisternas, N., SECPLAN, 2018. Línea de base Arqueología Parque Centenario Arica, Arica, Chile.
10. Cisternas, M., Atwater, B. F., Torrejón, F., Sawai, Y., Machuca, G., Lagos, M., Eipert, A., Youlton, C., Salgado, I., Kamataki, T., Shishikura, M., Rajendran, C. P., Malik, J. K., Rizal, Y., Husni, M. 2005. Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature* 437, 404–407. <https://doi.org/10.1038/nature03943>.
11. 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. <https://doi.org/10.1007/BF00126557>
12. DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F. and Stein, S. (1994), Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate

motions. *Geophys. Res. Lett.*, 21: 2191-2194. En Vargas et al., 2011.

13. Donoso, C. R., 1868: *UN ANNUS HORRIBILIS EN LA HISTORIA DE IQUIQUE en Universidad Arturo Prat, Revista de Ciencias Sociales, primer semestre 2008, edición n°20, p. 38-39*
14. Fernández, M. 2007. *Arica 1868, un tsunami y un terremoto*. Arica, Chile: Centro de investigaciones Diego Barros Arana.
15. Figueroa, S., Marchant, M., Giglio, S., & Ramírez, M. 2005. Foraminiferos Benticos Rotalinidos Del Benthic Rotaliinan Foraminiferans of the Central South of *Gayana*, 69(2), 329–363. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382005000200013>
16. Folk, R.L. and Ward, W.C. 1957. A Study in the Significance of Grain-Size Parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
17. L. Folk, Robert. 1966. A Review of grain size parameters. *Sedimentology*. 6. 73 - 93. [10.1111/j.1365-3091.1966.tb01572.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1966.tb01572.x).
18. García, M.; Gardeweg, M.; Clavero, J.; Hérail, G. 2004. Hoja Arica, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 84, XX p., 1 mapa escala 1:250.000, Santiago.
19. García, M.; Fuentes, G. 2012. Carta Cuya, Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 146: 80 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
20. Goff, J., Chagué-Goff, C., Nichol, S., Jaffe, B., & Dominey-Howes, D. 2012. Progress in palaeotsunami research. *Sedimentary Geology*, 243–244, 70–88. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.11.002>
21. Greenwood, B., 1969, Sediment parameters and environment discrimination: an application of multivariate statistics, University of Toronto, Ontario, Canadian Journal of Earth Science, Vol. 6.
22. Greve, F. 1964. Historia de la sismología en Chile, Instituto de Geofísica y Sismología, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
23. Hromic, T. 2007. Biodiversidad y Ecología del Microbentos (Foraminífera: Protozoa), entre la Boca del Guafo y Golfo de Penas (43°-46°S), Chile. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 30(1).
24. Jolliffe, I. T., & Cadima, J. 2016. Principal component analysis : a review and recent developments Subject Areas : Author for correspondence : *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374, 20150202. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>

25. Kiladis, G., Díaz, H. 1986. An analysis of the 1877-78 ENSO episode and comparison with 1982- 83. *Monthly Weather Review*, Vol. 114, pp. 1035–1047. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114<1035:AAOTEE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114<1035:AAOTEE>2.0.CO;2)
26. Kortekaas, S., & Dawson, A. G. 2007. Distinguishing tsunami and storm deposits: An example from Martinhal, SW Portugal. *Sedimentary Geology*, 200(3–4), 208–221. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.004>
27. Krumbein, W.C. (1934) Size Frequency Distribution of Sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 4, 65-77.
28. Laprida, C., Chandler, D. D. E., Mercau, J. R., López, R. A., & Marcomini, S. (2011). Modern foraminifera from coastal settings in northern Argentina: Implications for the paleoenvironmental interpretation of Mid Holocene littoral deposits. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(1), 45–64.
29. Lario, J., Luque, L., Zazo, C., Goy, J. L., Spencer, C., Cabero, A., ... Alonso-Azcárate, J. 2010. Tsunami vs. storm surge deposits: a review of the sedimentological and geomorphological records of extreme wave events (EWE) during the Holocene in the Gulf of Cadiz, Spain. *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 54(3), 301–316. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2010/0054S3-0029>
31. León, T. 2018. Registro de Tsunamis y Paleotsunamis en la costa de Taltal, Región de Antofagasta, Chile. (Tesis de Magíster). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
32. León, T., Vargas, G., Salazar, D., Goff, J., Guendon, J., Andrade, P., Álvarez, G. (In prep.). Geo-archaeological records of large Holocene tsunamis along the hyperarid coastal Atacama Desert in the major northern Chile seismic gap.
33. Lagos, M. 2014. Diagnóstico de riesgo de tsunami en la ciudad de Arica. Informe final ONEMI.
34. Le Roux, J.P. 1999 Fundamentals of Sedimentary Petrography, Department of Geology, University of Chile, Santiago, Chile.
35. Le Roux, J. P., & Vargas, G. 2005. Hydraulic behavior of tsunami backflows: Insights from their modern and ancient deposits. *Environmental Geology*, 49(1), 65–75. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0059-2>
36. Lomnitz, C. 1970. Major earthquakes and tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955. *Geologische Rundschau*, 59(3), 938–960. <https://doi.org/10.1007/BF02042278>
37. Lomnitz, C. 2004. Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters*, 75(3), 368–378.

<https://doi.org/10.1785/gssrl.75.3.368>

38. Montessus de Ballore, 1915. Serie de observaciones de temblores (1810-1905), Primera Parte. En Montessus de Ballore, *Historia sísmica de los Andes meridionales* (1084-1147). Servicio Sismológico Nacional, Santiago, Chile.
39. MOP 2016, Lámina de la Carta Caminera: Región de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, Ministerio de Obras Públicas, Chile
40. Müller, R. D., Roest, W. R., Royer, J.-Y., Gahagan, L. M. & Sclater, J. G. 1997. Digital isochrons of the world's ocean floor. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 3211–3214. <https://doi.org/10.1029/96JB01781>.
41. Muzzio, G. 1986. Geología de los cuadrángulos Caleta Camarones, Cuya, Punta Gorda y Atajaña. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe (Inédito): 43 p., 1 mapa escala 1:100.000..
42. Muzzio, G. 1987. Geología de los cuadrángulos Pisagua, Zapiga, Caleta Buena y Huara. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe (Inédito): 74p., 1 mapa escala 1:100.000
43. Nichol, S. L., Goff, J. R., Devoy, R. J. N., Chagué-Goff, C., Hayward, B. & James, I. 2007. Lagoon subsidence and tsunami on the West Coast of New Zealand. *Sedimentary Geology* 200, 248-262. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.019>.
44. Peters, R., & Jaffe, B. 2010. Identification of tsunami deposits in the geologic record; developing criteria using recent tsunami deposits. *United States Geological Survey Open-File Report*, 43 pp.
45. Niemeyer, H.; Niemeyer, H.; Schiappacasse, V. 1984. Una falla geológica sub-actual detectada en el sitio arqueológico 14. Desembocadura del río Camarones-Desierto de Atacama, Chile. *Revista Geológica de Chile* 22:91-94. doi:10.5027/angeoV11n2-a08.
46. Passega, R. 1964 Grain Size Representation by CM Patterns as a Geological Tool. *Journal of Sedimentary Research*, 34. 830-847. <https://doi.org/10.1306/74D711A4-2B21-11D7-8648000102C1865D>
47. Páez, M., Zúñiga, O., Valdés, J., & Ortlieb, L. (2001). Foraminíferos bentónicos recientes en sedimentos micróxicos de la bahía Mejillones del Sur (23° S), Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 36(2), 129–139.
48. Potocnjak, J., SECPLAN, 2015. Informe de excavaciones sitio arqueológico PC-2 “Depósito de Botijas”, Parque Centenario, Arica.
49. Quinn, W. H., & Neal, V. T. 1987. El Nino Occurrences Over the Past Four and a Half Centuries. *Journal of Geophysical Research*, 92(C13), 14,449-14,461.

50. Reading, H.G. 1986. Sedimentary Environments and Facies. Department of Earth Sciences. London: University of Oxford. Blackwell Scientific Publications. Second Edition.
51. Rübke, B. R., & Vött, A. 2017. The tsunami phenomenon. *Progress in Oceanography*, 159(October 2016), 296–322. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.09.003>
52. Ruiz, S., & Madariaga, R. 2018. Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics*, 733(December 2017), 37–56. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.01.015>
53. Schielein, P., Zschau, J., Woith, H., Schellmann, G., 2007. Tsunamigefährdung im Mittelmeer—Eine Analyse geomorphologischer und historischer Zeugnisse. In: Schellmann, G. (Ed.), Bamberger Geographische Schriften, vol. 22, pp. 153–199.
54. Schurr, B., Asch, G., Hainzl, S., Bedford, J., Hoechner, A., Palo, M., ... Vilotte, J. P. 2014. Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake. *Nature*, 512(7514), 299–302. <https://doi.org/10.1038/nature13681>
55. Seiner, L. 2009. Historia de los sismos en el Perú, Catálogo: Siglos XV-XVII, Universidad de Lima, Lima, Perú.
56. Spiske, M., Piepenbreier, J., Benavente, C., Kunz, A., Bahlburg, H., & Steffahn, J. 2013. Historical tsunami deposits in Peru: sedimentology, inverse modeling and optically stimulated luminescence dating. *Quaternary International*, 305, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.02.010>
57. Vargas, G., Rutllant, J., & Ortlieb, L. 2006. ENSO tropical-extratropical climate teleconnections and mechanisms for Holocene debris flows along the hyperarid coast of western South America (17°-24°S). *Earth and Planetary Science Letters*, 249(3–4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.07.022>
58. Vargas, G.; Ortlieb, L.; Chapron, E.; Valdes, J. y Marquardt, C. 2005, Paleoseismic inferences from a high-resolution marine sedimentary record in northern Chile (23°S). *Tectonophysics* Vol. 399, p. 381-398.
59. Vargas, G.; Palacios, C.; Reich, M.; Luo, S.; Shen, C.; González, G. y Wu, Y. 2011, U-series dating of co-seismic gypsum and submarine paleoseismology of active faults in Northern Chile (23°S). *Tectonophysics* Vol. 497, p. 34-44.
60. Wallace, J., Hobbs, P. 2006 Atmospheric Science, Second Edition. In *Annals of surgery* (Vol. 142). <https://doi.org/10.1007/s007690000247>
61. Warrior, A. K., Pednekar, H., Mahesh, B. S., Mohan, R., & Gazi, S. 2016. Sediment grain size and surface textural observations of quartz grains in late quaternary lacustrine sediments from Schirmacher Oasis, East Antarctica:

Paleoenvironmental significance. *Polar Science*, 10(1), 89–100.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2015.12.005>

62. Yang, S., Aviantara, A., Delius, H., Le Nir, I., Gong, H., & Wang, K. 2017. Continuous Microfacies Analysis in Clastic Environments Utilizing Pseudo Grain Size Distribution from Electrical Borehole Images. *Second EAGE Borehole Geology Workshop*, (1969). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201702389>
63. Visher, G., 1969, Grain size distributions and depositional processes, University of Tulsa, Oklahoma, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 39, N°3, p-1074 – 1106.

8 ANEXOS

8.1 Análisis de muestras sitio CC18

8.1.1 Granulometría Laser

	0,447744	0,502377	0,563677	0,632456	0,709627	0,796214	0,893367	1,002374	1,124683	1,261915	1,415892	1,588656	1,782502	2	2,244037	2,517851	2,825075	3,169786	3,556559	3,990525	4,477442	5,023773	5,636766	6,324555	
CC1801 - Av	0,070182	0,24274	0,292544	0,362618	0,412941	0,445285	0,467024	0,480229	0,491713	0,507566	0,533497	0,571664	0,623384	0,684231	0,751357	0,821062	0,891635	0,964647	1,039503	1,121505	1,211166	1,31503	1,434941	1,574232	
CC1802 - Av	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CC1802B - A	0,037904	0,086341	0,122209	0,146503	0,164586	0,177999	0,185528	0,190371	0,194874	0,201682	0,213293	0,230494	0,253754	0,280974	0,310812	0,341594	0,372584	0,404483	0,43695	0,472067	0,509699	0,552131	0,599631	0,653162	
CC1803 - Av	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CC1804 - Av	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CC1805 - Av	0,076906	0,183161	0,296646	0,374753	0,436093	0,483664	0,512001	0,530371	0,545415	0,565009	0,596907	0,644372	0,71012	0,789767	0,880845	0,979598	1,084326	1,197292	1,316264	1,447274	1,587795	1,744326	1,916182	2,10576	
CC1806 - Av	0,065868	0,151309	0,220413	0,269427	0,309027	0,341843	0,364634	0,382442	0,398354	0,415898	0,438702	0,467483	0,502837	0,541435	0,581184	0,61952	0,655304	0,689092	0,720373	0,751068	0,781194	0,812782	0,846262	0,882659	
CC1807 - Av	0,04545	0,103574	0,147089	0,178263	0,203118	0,223321	0,236962	0,247315	0,256507	0,266965	0,281137	0,299597	0,322746	0,348346	0,374861	0,400353	0,423758	0,445113	0,463875	0,481083	0,49684	0,512508	0,528692	0,546341	
CC1808 - Av	0	0,015851	0,07554	0,088501	0,101395	0,109745	0,1157	0,119556	0,123036	0,127615	0,134693	0,144734	0,157997	0,173224	0,18951	0,205656	0,220893	0,235081	0,247633	0,258962	0,268816	0,277798	0,286128	0,294387	
CC1809 - Av	0	0	0	0,04996	0,059657	0,063563	0,063011	0,064342	0,064988	0,066462	0,070672	0,077676	0,087877	0,100376	0,114511	0,129379	0,144347	0,159329	0,173683	0,187794	0,201128	0,214155	0,226774	0,239325	
CC1810 - Av	0,041088	0,095451	0,143867	0,177566	0,205072	0,228409	0,245457	0,260059	0,274695	0,292045	0,315042	0,344058	0,37982	0,419552	0,461816	0,504523	0,546631	0,588738	0,629912	0,67214	0,714527	0,758863	0,804488	0,851373	
CC1811 - Av	0,042619	0,099225	0,15057	0,18647	0,21607	0,241512	0,260497	0,277043	0,293702	0,313212	0,338638	0,37029	0,408967	0,451736	0,497138	0,542985	0,588169	0,633276	0,677196	0,721879	0,766171	0,811714	0,857589	0,903558	
CC1812 - Av	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,010338	0,040816	0,056467	0,060879	0,069063	0,071114	0,07666	0,080599	0,084277	0,08792	0,091252	
CC1813 - Av	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CC1814 - Av	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7,096268	7,962143	8,933672	10,023745	11,246826	12,619147	14,158916	15,886565	17,825019	20	22,440369	25,178508	28,250751	31,697864	35,565588	39,905246	44,774423	50,237729	56,367659	63,245553	70,962678	79,621434	89,336718	100,23745	112,46827
	1,735295	1,914234	2,113118	2,31843	2,528592	2,726378	2,903037	3,044686	3,139351	3,178328	3,155103	3,066454	2,917575	2,711946	2,46293	2,182733	1,88279	1,58306	1,287174	1,018435	0,778463	0,585173	0,446385	0,374663	0,379998
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,037784	0,059189	0,075087	0,091649	0,109053	0,126552	0,145508	0,17015	0,203831	
	0,713423	0,779113	0,851611	0,927137	1,006912	1,086994	1,167051	1,244894	1,318387	1,387146	1,447533	1,499656	1,539213	1,564577	1,571398	1,555676	1,512281	1,438042	1,327066	1,183991	1,008816	0,816827	0,624338	0,458701	0,352812
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,018348	0,054932	0,057318	0,064559	0,067174	0,070111	0,072981	0,081907	0,105393	0,156059	0,248895	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2,314941	2,53932	2,78391	3,036134	3,299635	3,55962	3,811449	4,042367	4,238525	4,388743	4,475448	4,489134	4,42033	4,264877	4,027723	3,71892	3,350844	2,951485	2,530622	2,126654	1,745313	1,413307	1,135097	0,915372	0,751652
	0,922858	0,966744	1,01657	1,071762	1,136263	1,211361	1,30231	1,413606	1,549289	1,717227	1,915805	2,15376	2,421248	2,720881	3,039937	3,365749	3,687513	3,981249	4,237354	4,429695	4,551878	4,590052	4,541933	4,407963	4,196652
	0,566319	0,588906	0,615443	0,645569	0,681133	0,722316	0,771395	0,830349	0,901317	0,989221	1,095257	1,227765	1,386658	1,581168	1,813148	2,086673	2,406279	2,764253	3,167333	3,589888	4,031279	4,458313	4,85054	5,175444	5,401061
	0,30327	0,313454	0,326323	0,342567	0,364075	0,391675	0,427048	0,471128	0,524195	0,587718	0,659909	0,74378	0,837371	0,945782	1,072139	1,223892	1,412157	1,64417	1,940325	2,298926	2,737846	3,244385	3,812693	4,416249	5,013603
	0,252259	0,265924	0,281539	0,299435	0,321274	0,347503	0,379326	0,417054	0,460286	0,509268	0,561562	0,618243	0,67722	0,741836	0,815599	0,906548	1,027143	1,189435	1,416963	1,717433	2,114603	2,605791	3,19292	3,85636	4,556968
	0,898882	0,944732	0,988387	1,026204	1,057499	1,079588	1,091982	1,094192	1,086824	1,070912	1,04892	1,024253	0,995373	0,970668	0,953379	0,948904	0,96437	1,007559	1,09036	1,220075	1,411468	1,668836	1,999962	2,402481	2,86181
	0,948759	0,990823	1,02901	1,059916	1,082761	1,095369	1,097508	1,089239	1,071782	1,046565	1,016816	0,984288	0,953379	0,927119	0,910636	0,909189	0,929725	0,979536	1,070203	1,208019	1,40712	1,670471	2,004694	2,406144	2,859373
	0,094247	0,096502	0,097634	0,096956	0,093927	0,088799	0,078866	0,070843	0,061161	0,008416	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,020248	0,069148	0,218079
	126,19147	141,58916	158,86565	178,25019	200	224,40369	251,78508	282,50751	316,97864	355,65588	399,05246	447,74423	502,37729	563,67659	632,45553	709,62678	796,21434	893,36718	1002,3745	1124,6827	1261,9147	1415,8916	1588,6565	1782,5019	2000
	0,472786	0,655336	0,933531	1,288664	1,709308	2,157382	2,591707	2,96825	3,232456	3,348838	3,283661	3,035788	2,612366	2,022556	1,438387	0,503957	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,27461	0,385595	0,569685	0,84652	1,247366	1,787216	2,470897	3,294366	4,205473	5,178639	6,099687	6,918213	7,530912	7,881002	7,925727	7,667774	7,130872	6,398093	5,527074	4,627197	3,737169	2,906354	2,169136	1,400325	0,796742
	0,342215	0,462999	0,750034	1,21108	1,855619	2,651042	3,545085	4,472215	5,322188	6,020957	6,451356	6,566021	6,324058	5,73359	4,850148	3,751483	2,552733	1,430469	0,83485	0	0	0	0	0	0
	0,405885	0,643081	0,990493	1,45372	2,054413	2,78493	3,62819	4,558352	5,501708	6,417454	7,187857	7,762071	8,055468	8,031625	7,679268	7,039791	6,162978	5,171911	4,136196	3,179163	2,337231	1,651606	1,125816	0,677121	0,365997
	0	0,072434	0,333322	0,661672	1,178833	1,865601	2,712622	3,70222	4,757004	5,836839	6,808926	7,617286	8,157284	8,378997	8,253612	7,805127	7,074442	6,172085	5,167537	4,185092	3,265416	2,457	1,780807	1,125111	0,630733
	0,631922	0,545592	0,474597	0,402889	0,316623	0,224148	0,067963	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3,912968	3,579388	3,197987	2,794513	2,370973	1,94578																			

8.1.2 Tamizaje

T/Muestra	1	2A	2B	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
5 16(7930)	94,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5(4000)	45,23	0	0	0,22	0	0	0	0	0,05	0	0	0	0	0,39	0,47
10(2000)	45,78	1,08	1,93	1,72	2,49	0,08	0,01	0,33	0,44	0,06	0	0,57	0,29	4,97	8,67
18(1000)	50,07	39,78	3,71	39,25	59,92	0,94	2,53	0,46	2,28	0,39	0,36	1,34	8,09	48,62	53,54
35(500)	61,62	252,44	34,52	234,24	252,34	17,72	13,34	2,05	3,75	2,17	3,52	5,96	96,56	172,59	208,37
60(250)	68,69	121,62	84,16	137,97	100,18	114,82	77,52	34,67	51,68	45,52	60,78	78,2	123,25	67,92	139,81
120(125)	44,19	30,42	39,96	28,91	30,01	116,56	140,12	235,24	343,7	124,05	113,83	106,67	30,65	53,82	41,72
230(63)	29,82	3,4	18,61	2,17	0,54	37,77	98	199,45	81,93	61,25	50,16	40,82	1,36	1,07	1,48
<230(63)	11,48	0,61	13,28	0,44	0,01	21,63	42,9	36,57	9,6	26,98	17,16	13,31	0,48	0,02	0,06
REAL	451,13	449,35	196,17	444,92	445,49	309,52	374,42	508,77	493,43	260,42	245,81	246,87	260,68	349,4	454,12
NETO	456	453	202	451	450,5	318	379,5	512	498	262	259,5	257	263	353	460
PROF (CM)	104	93	91	86	77	71	65	59	54	50	46	39	30	20	8

8.1.3 XRF

	1	2A	2B	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Si	58,719	50,292	58,725	52,038	34,144	49,163	64,41	62,543	61,115	63,695	62,666	62,789	56,079	29,405	37,201
Al	19,136	16,479	19,775	16,706	9,264	15,46	18,17	17,816	17,559	18,299	18,34	19,369	17,475	11,83	11,918
Fe	7,959	8,521	6,752	9,524	36,711	6,192	5,789	7,226	8,056	6,069	7,135	7,011	10,449	42,439	37,269
K	5,082	4,006	4,603	4,014	1,609	4,667	5,549	5,638	5,295	5,261	5,153	5,068	4,357	1,089	1,241
Ca	5,081	10,594	3,472	8,91	4,512	12,063	4,086	4,008	5,528	4,262	4,184	3,362	6,558	5,043	3,979
S	2,644	8,277	1,608	6,612	5,497	11,463	0,671	1,003	0,879	1,047	0,971	1,1	2,779	0,49	2,046
Ti	0,894	0,91	0,659	1,21	6,179	0,636	0,694	0,998	1,092	0,966	0,912	0,69	1,171	6,505	5,203
Mn	0,192	0,316	0,177	0,344	0,380	0,126	0,159	0,217	0,18	0,166	0,181	0,215	0,331	0,527	0,344
Sr	0,091	0,115	0,082	0,106	0,031	0,144	0,124	0,105	0,112	0,096	0,101	0,087	0,097	0,035	0,044
Cu	0,046	0,262	0	0,170	0,028	0	0	0	0,038	0	0	0,155	0,217	0,032	0
V	0,044	0,034	0,02	0,052	0,259	0,021	0,032	0,052	0	0	0,037	0,022	0,04	0,264	0,216
Br	0,039	0,01	0,02	0,01	0,01	0,031	0,021	0,017	0,01	0,012	0,01	0,026	0,01	0,01	0,01
Zn	0,026	0,071	0,03	0,053	0	0	0,018	0,023	0,025	0	0,019	0,04	0,066	0,056	0
Rb	0,026	0,028	0,028	0,026	0	0,034	0,036	0,033	0,034	0,028	0,029	0,034	0,028	0	0
Zr	0,023	0,095	0	0,234	1,149	0	0	0,06	0,076	0,098	0,042	0	0,286	0,075	0,115
Y	0	0	0,007	0	0	0	0,008	0	0	0	0	0,007	0,007	0	0
Nb	0	0	0	0	0,014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,21	0
Tm	0	0	0	0	0	0	0,233	0,262	0	0	0,231	0	0	0	0,205
Sm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,13
Ge	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,044
Cr	0	0	0	0	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0,061	0	0,044
Mg	0	0	4,042	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	0	0	0	0	0,155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

8.2 Análisis de muestras sitio PC18

8.2.1 Granulometría Laser

	0.02	0.02244	0.02516	0.02825	0.0317	0.03557	0.03991	0.04477	0.05024	0.05637	0.06325	0.07036	0.07962	0.08934	0.10024	0.11247	0.12619	0.14159	0.15887	0.17825	0.2	0.2244	0.25179	0.28251	0.31636	0.35566	0.39905	0.44774	0.50238	0.56368	0.63246	0.70963	0.79621			
PC1801-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
PC1802-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1803-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1804-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1805-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1806-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1807-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1808-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1809-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1810-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1811-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1812-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1813-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1814-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1815-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1816-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1817-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PC1818-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PC1819-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PC1820-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PC1821-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PC1822-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PC1823-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PC1824-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PC1825-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PC1826-A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.89337	1.00237	1.12468	1.26192	1.41859	1.59866	1.78225	2.0	2.24404	2.51795	2.82508	3.18979	3.59566	3.99053	4.47744	5.02377	5.63677	6.32456	7.09627	7.96214	8.93367	10.0237	11.2468	12.6192	14.1589	15.8866	17.825	20	22.4404	25.1795	28.2508	31.8979	35.9566	39.9053	44.7744		
0.05737	0.05932	0.06001	0.06332	0.06713	0.07354	0.08225	0.0926	0.1048	0.11623	0.12942	0.14087	0.15243	0.16508	0.17901	0.19243	0.20802	0.21969	0.2333	0.2442	0.25947	0.2723	0.28611	0.30178	0.32122	0.34624	0.37334	0.41952	0.46879	0.52701	0.58939	0.65628	0.72729	0.78269			
0.0353	0.0378	0.03954	0.04134	0.04316	0.04502	0.04691	0.04882	0.05075	0.05271	0.05468	0.05667	0.05868	0.0607	0.06274	0.06481	0.0669	0.06901	0.07114	0.0733	0.07548	0.07774	0.08001	0.08229	0.08458	0.08688	0.08919	0.09151	0.09384	0.09618	0.09853	0.10089	0.10326	0.10564			
0.12055	0.12152	0.12243	0.12336	0.12432	0.12531	0.12631	0.12732	0.12834	0.12937	0.13041	0.13146	0.13251	0.13357	0.13464	0.13571	0.13679	0.13787	0.13895	0.14004	0.14114	0.14224	0.14334	0.14445	0.14556	0.14667	0.14779	0.14891	0.15004	0.15117	0.15231	0.15345	0.1546	0.15575	0.1569		
0.10351	0.10491	0.10635	0.10784	0.10938	0.11097	0.11261	0.11429	0.11601	0.11778	0.11956	0.12138	0.12324	0.12514	0.12708	0.12906	0.13108	0.13314	0.13524	0.13738	0.13956	0.14178	0.14404	0.14634	0.14868	0.15106	0.15348	0.15594	0.15844	0.16098	0.16356	0.16618	0.16884	0.17154	0.17428		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.11647	0.117	0.1182	0.11937	0.12057	0.12181	0.12309	0.12441	0.12578	0.12719	0.12864	0.13013	0.13166	0.13323	0.13484	0.13649	0.13818	0.13991	0.14168	0.14349	0.14534	0.14723	0.14916	0.15113	0.15314	0.15519	0.15728	0.15941	0.16158	0.16379	0.16604	0.16833	0.17066	0.17303	0.1754		
0.07348	0.0735	0.07407	0.07459	0.07516	0.07578	0.07644	0.07714	0.07788	0.07867	0.0795	0.08038	0.08126	0.08218	0.08314	0.08414	0.08518	0.08626	0.08738	0.08854	0.08974	0.09098	0.09226	0.09358	0.09494	0.09634	0.09778	0.09926	0.10078	0.10234	0.10394	0.10558	0.10726	0.10898	0.11074		
0.07175	0.0718	0.0724	0.07307	0.07377	0.0745	0.07531	0.07614	0.07701	0.07792	0.07887	0.07986	0.0809	0.08198	0.0831	0.08427	0.08548	0.08674	0.08804	0.08938	0.09076	0.09218	0.09364	0.09514	0.09668	0.09826	0.09988	0.10154	0.10324	0.10498	0.10676	0.10858	0.11044	0.11234	0.11428		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.05658	0.05659	0.0566	0.05662	0.05664	0.05667	0.05671	0.05675	0.0568	0.05684	0.05689	0.05694	0.05699	0.05704	0.05709	0.05714	0.05719	0.05724	0.05729	0.05734	0.05739	0.05744	0.05749	0.05754	0.05759	0.05764	0.05769	0.05774	0.05779	0.05784	0.05789	0.05794	0.05799	0.05804	0.05809		
0.06387	0.06388	0.06389	0.06391	0.06393	0.06396	0.06399	0.06402	0.06405	0.06408	0.06411	0.06414	0.06417	0.0642	0.06423	0.06426	0.06429	0.06432	0.06435	0.06438	0.06441	0.06444	0.06447	0.0645	0.06453	0.06456	0.06459	0.06462	0.06465	0.06468	0.06471	0.06474	0.06477	0.0648	0.06483		
0.03735	0.03761	0.03782	0.03807	0.03832	0.03857	0.03882	0.03907	0.03932	0.03957	0.03982	0.04007	0.04032	0.04057	0.04082	0.04107	0.04132	0.04157	0.04182	0.04207	0.04232	0.04257	0.04282	0.04307	0.04332	0.04357	0.04382	0.04407</									

8.2.2 Tamizaje

T/Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
5 (16/7930)	68,23	52,74	2,42	15,22	7,14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,7	0	0,86	0	0	0,28	0	0	0	0	0	0
5(4000)	25,85	22,58	62,6	6,91	6,61	0,01	0,95	0,06	1,06	0,45	0	0,06	0	0	1,78	2,4	1,03	0,39	0,38	0,02	0,26	0,03	0,5	25,4	1,15	0,01	
10(2000)	19,53	19,88	7,04	8,69	12,26	1,74	4,15	1,82	2,23	2,78	0,51	0,62	0,42	1,33	4,06	4,8	1,7	1,93	2,81	1,12	0,92	0,85	1,45	3,32	2,02	0,87	
18(1000)	23,43	24,31	12,22	14,79	15,59	6,23	9,97	5,62	4,71	5,55	4,78	2,07	1,55	7,97	5,43	28,47	4,75	4,52	3,02	1,7	1,87	5,57	4,45	6,72	6,73	1,12	
35(500)	53,79	53,92	32,86	36,66	39,18	43,85	53	39,83	21,63	20,82	15,04	13,82	11,76	65,72	21,6	47,69	32,8	19,87	19,16	12,64	12,35	48,35	39,53	60,9	43,44	29,59	
60(250)	127,1	154,25	140,99	142,35	172,95	274,76	236,58	212,02	184,17	181,86	189,27	177,64	188,85	300,84	154,02	145,26	159,5	160,62	164,06	169,45	184,04	271,86	272,8	252,21	232,21	296,8	
120(125)	173,6	123,1	188,06	193,76	205,24	182,95	182,95	247,5	282,89	198,17	210,66	219,16	227,95	144,4	207,53	192,83	234,4	260,42	293,85	286,19	254,71	187,64	183,68	172,38	197,65	169,41	
230(63)	51,43	63,22	91,46	82,96	67,2	27,09	45,69	31,77	35,47	93,35	78,38	88,91	78,88	16,01	117,55	25,58	90,05	70,05	54,6	63,62	66,14	38,13	36,99	37,16	52,25	39,1	
<230(63)	17,28	18,58	49,83	33,92	19,33	6,45	8,87	5,75	10,8	32,38	36,07	36,16	32,2	4,13	38,44	86,58	32,36	21,12	18	15,94	18,22	7,75	8,46	7,01	9,48	9,57	
REAL	560,24	532,58	587,48	535,26	545,5	543,08	542,16	544,37	542,96	535,36	534,71	538,44	541,61	540,4	550,41	538,31	556,59	539,78	555,88	550,68	538,79	560,18	547,86	565,1	544,93	546,47	
NETO	567	549	544	546	580	549	550,5	554	549	548	555	548	554	547	570,6	541,7	560	546,7	562,2	555,9	550	568	556	552	556	556	
PROF (CM)	160	142,5	129	124	121	117	113	109	106	102	97	90	83	76	71	65,5	60	55,5	50	45	38	30	20,5	16	12	7	

8.2.3 XRF

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Si	58,145	58,602	26,855	28,696	47,194	30,27	39,659	35,4	40,745	40,75	48,001	47,69	50,444	47,763	65,995	64,734	61,065	56,584	56,212	58,019	58,324	56,06	57,864	56,655	56,393	56,093
Al	18,582	19,319	6,249	7,738	12,342	9,393	11,464	10,997	10,383	9,285	12,046	12,435	12,95	13,535	14,258	17,25	17,359	16,51	16,199	18,421	18,621	19,808	19,653	19,984	20,379	20,176
Fe	8,547	8,29	7,339	7,911	9,146	9,223	11,366	15,461	13,9	12,492	10,025	10,38	10,319	11,614	7,384	7,303	9,837	11,27	12,272	12,544	12,425	12,698	11,742	12,575	12,649	13,099
Ca	5,633	5,4	31,579	29,075	18,777	37,09	23,037	23,721	23,251	29,592	20,4	19,748	18,462	13,895	6,1	4,602	5,561	8,035	7,755	5,518	4,988	5,171	5,451	5,776	5,015	4,647
K	4,966	4,771	3,058	3,272	4,102	2,751	3,275	3,017	2,934	2,393	3,785	2,951	3,347	3,306	3,401	4,255	3,855	3,492	3,367	3,445	3,698	4,113	3,69	3,548	3,537	3,406
Ti	1,063	0,674	0,633	0,789	0,887	0,586	1,158	1,355	1,087	0,562	0,504	0,795	1,109	1,951	1,174	1,154	1,237	1,113	1,049	1,115	1,12	1,259	1,18	0,972	1,278	1,076
S	0,947	2,176	21,872	19,75	6,2	9,426	9,366	8,683	7,023	4,359	4,298	3,013	2,828	7,21	0,972	0,383	0,654	0,57	0,366	0,46	0,393	0,218	0	0	0,292	0,541
Tm	0,298	0	0	0	0	0,302	0	0	0	0	0,378	0	0	0,309	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,505
Mn	0,185	0,13	0,139	0,151	0,189	0,156	0,171	0,159	0,142	0,135	0,091	0,092	0,138	0,141	0,076	0,083	0,088	0,121	0,099	0,076	0,104	0,119	0,099	0,107	0,092	0,089
Sr	0,112	0,097	0,289	0,261	0,151	0,217	0,158	0,145	0,154	0,203	0,149	0,153	0,142	0,106	0,107	0,124	0,118	0,139	0,136	0,117	0,112	0,132	0,116	0,111	0,113	0,109
Zr	0,107	0,087	0	0,112	0,121	0,233	0,278	0,241	0,302	0	0	0,091	0,153	0,117	0	0,129	0	0,138	0,08	0,089	0,187	0,107	0,055	0,046	0,115	
V	0,038	0	0,022	0,039	0,048	0	0,041	0,083	0,052	0,03	0	0,026	0,044	0,098	0,06	0,056	0,048	0,052	0,044	0,057	0,056	0,062	0,06	0,069	0,06	0,074
Rb	0,032	0,028	0,019	0,019	0,025	0,023	0,026	0,025	0,027	0,027	0,027	0,028	0,027	0,025	0,025	0,027	0,026	0,027	0,026	0,025	0,023	0,032	0,027	0,026	0,024	0,025
Zn	0,028	0,029	0,241	0,162	0,032	0	0	0	0	0,035	0,039	0,033	0,034	0	0,023	0	0	0,037	0,04	0,041	0,046	0,042	0	0,036	0,04	0,037
Y	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,009	0	0	0,009	0,011	0,009	0	0,009	
Ba	0	0,342	0	0	0	0,302	0	0	0	0	0,422	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cu	0	0,054	0,224	0,187	0	0	0	0	0	0,11	0,1	0	0,062	0	0	0,031	0	0,068	0,057	0,082	0	0,089	0	0,077	0,082	0
P	0	0	1,32	1,714	0,768	0	0,713	0	0	0	0	0	0	0,202	0	0	0	1,957	2,241	0	0	0	0	0	0	0
Br	0	0	0	0,036	0,018	0,026	0	0	0	0,026	0,022	0,021	0,023	0	0	0	0	0,015	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0	0	0	0,083	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Au	0	0	0	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,257	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

8.2.4 Componente biológica

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
PC18																										
MASA T	3,13	4,05	3,2	2,87	2,65	2,4	2,57	2,52	2,78	2,56	2,61	2,72	2,71	2,45	2,53	2,83	3,01	2,94	2,48	2,39	2,44	2,9	2,68	2,5	2,89	2,7
Delta M	0	0	0	0,01	0,023	0,025	0	0,0095	0,012	0,011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0	0	0	0	0
Orgánico	0	2	2	2	2	1	2	3	4	4	2	1	1	0	1	1	0	3	1	1	0	0	1	0	0	0
Foram	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
%	0	0	0	0,348432	0,867925	1,041667	0	0,376984	0,431655	0,429688	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,137931	0	0	0	0

8.3 Análisis de muestras sitio PC218

8.3.1 Granulometría Laser

	0.02	0.0224	0.0252	0.0283	0.0317	0.0356	0.0393	0.0448	0.0502	0.0564	0.0632	0.071	0.0796	0.0893	0.1002	0.1125	0.1262	0.1416	0.1589	0.1783	0.2	0.2244	0.2518	0.2825	0.317	0.3557	0.3991	0.4477	0.5024	0.5637	0.6325	0.7096	0.7962				
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8934	1.0024	1.247	1.2619	1.4159	1.5987	1.7825	2	2.244	2.5179	2.8251	3.1636	3.5566	3.9905	4.4774	5.0238	5.6368	6.3246	7.0963	7.9621	8.9337	10.024	11.247	12.619	14.159	15.897	17.825	20	22.44	25.179	28.251	31.636	35.566	39.905	44.774	50.238		
0.0306	0.0094	0.0062	0.0068	0.0021	0.006	0.0127	0.1278	0.145	0.163	0.1809	0.195	0.2151	0.2313	0.2467	0.2622	0.2781	0.2955	0.3153	0.3366	0.3676	0.4025	0.4451	0.4962	0.56	0.6309	0.7089	0.7928	0.8766	0.9599	1.033	1.0978	1.1503	1.1914	1.2232			
0.059	0.0588	0.0581	0.0585	0.0619	0.0684	0.0783	0.0907	0.1048	0.1198	0.1349	0.1501	0.1648	0.1793	0.193	0.2061	0.2184	0.2299	0.2408	0.2513	0.2626	0.2753	0.2917	0.313	0.3413	0.3778	0.4227	0.4758	0.5332	0.5928	0.6479	0.6952	0.7306	0.7546	0.7686	0.7746		
0.0329	0.0326	0.0309	0.0332	0.0358	0.0553	0.0651	0.0749	0.0883	0.1015	0.115	0.1285	0.144	0.1542	0.1664	0.1783	0.1897	0.2009	0.212	0.2236	0.2367	0.2521	0.2717	0.2966	0.3283	0.3675	0.4134	0.4656	0.5193	0.5726	0.619	0.6563	0.6819	0.6985	0.7065			
0.105	0.0975	0.0935	0.0915	0.0931	0.0988	0.1079	0.1187	0.1294	0.1388	0.1469	0.1546	0.1631	0.174	0.1865	0.2082	0.2335	0.2651	0.3037	0.3488	0.4025	0.4637	0.5386	0.619	0.7168	0.8315	0.9644	1.1202	1.295	1.4944	1.7089	1.9399	2.1773	2.4146	2.6519	2.8892		
0.1146	0.1062	0.1014	0.0968	0.0965	0.1013	0.112	0.1247	0.1401	0.1561	0.172	0.1884	0.2052	0.2239	0.2446	0.2689	0.2963	0.3267	0.3674	0.4103	0.4603	0.5167	0.583	0.6595	0.75	0.857	0.9823	1.1306	1.2986	1.4916	1.7003	1.9261	2.1586	2.3909	2.6232			
0	0	0	0	0	0	0	0	0.0104	0.0414	0.0594	0.0686	0.077	0.0863	0.0968	0.1071	0.1178	0.1284	0.139	0.1492	0.1589	0.1688	0.1793	0.1923	0.2094	0.2333	0.2665	0.3106	0.3673	0.434	0.5098	0.5864	0.6587	0.7168	0.7542	0.7816	0.809	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.018	0.0492	0.0625	0.0694	0.0764	0.0846	0.0923	0.1003	0.1073	0.1132	0.1177	0.1207	0.1226	0.1239	0.126	0.1307	0.1402	0.1562	0.181	0.214	0.2552	0.3003	0.3453	0.3831	0.4176	0.4476	0.4736	
0	0	0	0	0	0	0.0219	0.0484	0.0624	0.0707	0.0805	0.0907	0.1005	0.1064	0.1206	0.1306	0.1404	0.1498	0.1585	0.1659	0.172	0.1764	0.1798	0.1823	0.187	0.1939	0.2054	0.2236	0.2487	0.2815	0.319	0.3584	0.3938	0.4195	0.4452	0.4712	0.4976	
0	0	0	0	0	0	0	0.018	0.057	0.0608	0.0715	0.0805	0.0907	0.1001	0.1092	0.1179	0.1258	0.1329	0.139	0.1441	0.1484	0.1522	0.1563	0.1617	0.1695	0.1809	0.1965	0.2166	0.2398	0.2647	0.2874	0.3048	0.3129	0.321	0.3291	0.3371	0.3451	
0	0	0	0	0	0.0158	0.0477	0.0659	0.0762	0.0898	0.1034	0.1177	0.1316	0.146	0.1603	0.175	0.1897	0.2046	0.2196	0.2347	0.2506	0.2676	0.2874	0.311	0.3404	0.377	0.4212	0.4741	0.5323	0.595	0.6558	0.715	0.757	0.7905	0.8154	0.8398	0.8636	
0.0687	0.0647	0.0615	0.0607	0.0635	0.0706	0.0821	0.0959	0.1137	0.1315	0.1495	0.1676	0.1853	0.2032	0.2209	0.2392	0.2579	0.2773	0.2978	0.3195	0.3434	0.3686	0.3959	0.4347	0.4757	0.5237	0.5788	0.6418	0.7095	0.7824	0.8552	0.9276	0.997	1.0646	1.1294	1.1934		
0.1668	0.1622	0.1577	0.1566	0.1612	0.1726	0.1912	0.2148	0.2416	0.2696	0.2976	0.3255	0.3524	0.3794	0.4058	0.4327	0.4598	0.4873	0.5157	0.5445	0.5731	0.6024	0.6441	0.6864	0.7301	0.802	0.8804	0.9772	1.0898	1.221	1.3623	1.512	1.661	1.8034	1.934	2.0544		
0.2407	0.2349	0.2294	0.2281	0.2344	0.2496	0.2739	0.3044	0.3387	0.3739	0.4083	0.4417	0.4726	0.5027	0.5291	0.555	0.5794	0.6031	0.6264	0.6497	0.6747	0.7019	0.7344	0.7738	0.8236	0.8861	0.9626	1.0554	1.1606	1.2789	1.4015	1.5262	1.6457	1.7568	1.8614	1.9594		
0.1379	0.135	0.1325	0.1328	0.138	0.1489	0.1657	0.1866	0.2102	0.2344	0.2581	0.2811	0.3024	0.3227	0.3414	0.3582	0.3762	0.3926	0.409	0.4256	0.4437	0.4636	0.4876	0.5169	0.5539	0.6003	0.6569	0.7254	0.8027	0.8894	0.979	1.0703	1.1587	1.2434	1.3244	1.4014		
0.03																																					

44.774	50.238	56.368	63.246	70.363	79.621	89.337	100.24	112.47	126.19	141.59	158.87	178.25	200	224.4	251.79	282.51	316.36	355.66	399.05	447.74	502.36	563.68	632.46	709.63	796.21	893.37	1002.4	1124.7	1261.9	1415.9	1588.7	1782.5	2000									
1.2319	1.2711	1.3241	1.4013	1.5191	1.6879	1.9207	2.2233	2.5921	3.0266	3.5308	4.0118	4.5074	4.9719	5.3642	5.6554	5.8187	5.8294	5.6679	5.3321	4.814	4.1339	3.3045	2.3652	1.3644	0.3661	0.0071	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
0.7717	0.7919	0.8335	0.9165	1.0684	1.3103	1.6641	2.1388	2.7239	3.4133	4.1492	4.9095	5.6136	6.2251	6.6812	6.9456	6.9902	6.8038	6.3789	5.7475	4.9271	3.9676	2.8872	1.8879	0.9156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
0.713	0.7377	0.7829	0.8989	1.0831	1.3637	1.7589	2.2719	2.8661	3.4168	4.0493	4.7018	5.4241	6.1612	6.6757	6.7953	6.7638	6.5233	6.077	5.4713	4.725	3.9011	3.0398	2.1634	1.3137	0.4552	0.1006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
2.6449	2.8557	3.046	3.204	3.3336	3.4322	3.5064	3.5618	3.6048	3.6424	3.6771	3.702	3.7372	3.7527	3.7474	3.7127	3.6339	3.5195	3.3412	3.1071	2.8067	2.4497	2.041	1.576	1.1265	0.632	0.1476	0.0278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
2.6156	2.8201	3.063	3.1527	3.2734	3.3633	3.4297	3.4791	3.5189	3.5565	3.5948	3.6351	3.6723	3.7006	3.7098	3.6908	3.6335	3.5301	3.3868	3.1448	2.8516	2.4957	2.0823	1.5923	1.1396	0.605	0.0189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
0.7665	0.7551	0.7291	0.7079	0.7181	0.7343	0.7449	1.2951	1.7739	2.432	3.2339	4.1698	5.1425	6.1005	6.9348	7.5604	7.9058	7.9185	7.5787	6.9257	6.0018	4.9082	3.7263	2.5857	1.3349	0.1995	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
0.4138	0.4004	0.3717	0.3418	0.3312	0.3708	0.4978	0.7517	1.1614	1.7613	2.5358	3.432	4.5308	5.8685	6.7277	7.6341	8.2323	8.6111	8.545	8.0322	7.2786	6.198	4.9408	3.6301	2.3948	1.078	0.0308	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
0.4239	0.4216	0.3955	0.3602	0.3305	0.3313	0.3947	0.5582	0.8543	1.3219	1.9626	2.7968	3.7833	4.8519	5.9507	6.9725	7.8235	8.3827	8.6166	8.4474	7.8808	6.9718	5.803	4.4068	3.1343	1.7238	0.1023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0.2961	0.2762	0.2598	0.263	0.3067	0.4151	0.6157	0.9325	1.3774	1.9683	2.6783	3.5089	4.3935	5.3031	6.1614	6.9052	7.4759	7.8082	7.8675	7.6336	7.1081	6.3335	5.3616	4.2626	3.1498	2.0236	0.6814	0.084	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0.8138	0.8332	0.8635	0.9232	1.0393	1.2366	1.5429	1.976	2.5349	3.2217	3.9833	4.7972	5.7377	6.2654	6.7923	7.1039	7.1639	6.9605	6.4949	5.8215	4.9731	4.0302	3.045	2.102	1.0511	0.1076	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.1348	1.2139	1.317	1.4553	1.6502	1.9132	2.2592	2.6909	3.1959	3.7657	4.3498	4.9266	5.4302	5.8292	6.0764	6.1491	6.034	5.7394	5.2713	4.6784	3.9789	3.2273	2.4503	1.7028	0.8807	0.1943	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.9352	2.0518	2.1593	2.2605	2.3698	2.497	2.6562	2.8551	3.0927	3.3681	3.6578	3.9508	4.2131	4.4281	4.5709	4.6294	4.59	4.452	4.2053	3.8568	3.4039	2.8528	2.189	1.5728	0.6339	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.8534	1.9544	2.0525	2.1607	2.2957	2.4667	2.6845	2.9506	3.2554	3.5902	3.9215	4.2336	4.4883	4.6693	4.7544	4.7351	4.6046	4.3637	3.9975	3.5263	2.9032	2.1724	1.4009	0.2367	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.3266	1.4123	1.5138	1.6409	1.7939	2.0446	2.3476	2.7267	3.1719	3.6758	4.1937	4.7063	5.1943	5.5094	5.7289	5.9113	5.6815	5.404	4.9588	4.3831	3.6904	2.9223	2.0941	1.3178	0.4101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.6195	0.6013	0.5735	0.5523	0.562	0.6303	0.7911	1.0752	1.5	2.0862	2.8058	3.6543	4.5552	5.4676	6.3022	6.9873	7.4592	7.6578	7.5536	7.1495	6.4583	5.5464	4.4811	3.3127	2.2385	1.0865	0.0324	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.6478	0.6335	0.6073	0.5835	0.5818	0.6291	0.7589	0.996	1.3663	1.8915	2.5519	3.3497	4.216	5.1223	5.9767	6.7157	7.2667	7.5625	7.5664	7.2662	6.6681	5.8303	4.8206	3.6711	2.6342	1.4573	0.0667	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.1511	2.1778	2.1793	2.1443	2.1035	2.0891	2.0604	2.0955	2.1981	2.3406	2.55	2.808	3.0852	3.3625	3.6088	3.7918	3.8935	3.8989	3.7575	3.4332	3.0832	2.5396	1.8708	1.1003	0.2956	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1.381	1.326	1.2517	1.1848	1.1547	1.2015	1.3638	1.6739	2.144	2.7839	3.5449	4.3988	5.2388	6.0924	6.8428	7.4801	7.905	8.2317	8.3969	8.3021	7.9151	7.1957	6.0893	0.0455	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0.8457	0.7639	0.6873	0.6425	0.6559	0.7572	0.973	1.3213	1.8025	2.4813	3.1251	3.9035	4.6738	5.3943	5.9864	6.3953	6.5678	6.4805	6.1206	5.523	4.7285	3.799	2.7955	1.9267	0.6799	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.5818	0.5103	0.4552	0.4445	0.5077	0.6744	0.9717	1.415	1.9988	2.7207	3.5227	4.3825	5.21	5.9612	6.5569	6.9444	7.0818	6.9455	6.5252	5.8594	4.9718	3.9343	2.9325	1.8755	0.4866	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.5217	0.4783	0.4133	0.4323	0.4789	0.6068	0.8448	1.2133	1.7165	2.3626	3.1101	3.949	4.8015	5.631	6.3593	6.9271	7.2831	7.3825	7.2039	6.7806	6.0682	5.1858	4.1908	3.0819	2.0977	1.0475	0.0317	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.9315	0.933	0.9312	0.9415	0.9844	1.0825	1.2602	1.5368	1.9189	2.4165	2.9964	3.6542	4.3281	4.9832	5.5757	6.0413	6.3457	6.4519	6.3415	6.0186	5.4893	4.7949	3.9731	3.0669	2.1669	1.2419	0.2968	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.3131	1.3877	1.4652	1.5502	1.6558	1.7907	1.9679	2.1951	2.4728	2.805	3.1716	3.5701	3.9673	4.3516	4.6928	4.9691	5.1596	5.2409	5.1965	5.0161	4.6891	4.2245	3.6317	2.9231	2.1785	1.3871	0.5855	0.0532	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.2612	2.1814	2.0571	1.9069	1.7436	1.5923	1.4715	1.4003	1.3923	1.4581	1.5992	1.8194	2.1058	2.454	2.8419	3.2449	3.6332	3.9579	4.1801	4.2418	4.1061	3.7401	3.1249	2.32	1.254	0.2172	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.6353	1.6232	1.5274	1.4282	1.3426	1.2351	1.1053	1.0899	1.057	1.0194	1.2453	2.5512	2.9987	3.4746	3.9422	4.369	4.7212	4.9543	5.0366	4.9336	4.625	4.1048	3.3713	2.432	1.4037	0.3312	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.7103	0.7268	0.7495	0.732	0.874	1.0148	1.2389	1.5573	1.9615	2.5204	3.1449	3.8531	4.5854	5.3359	5.9798	6.5238	6.8979	7.0515	6.9556	6.6069	6.0094	5.2141	4.2751	3.2265	2.2585	1.2105	0.1945	0.0051	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

8.3.2 Tamizaje

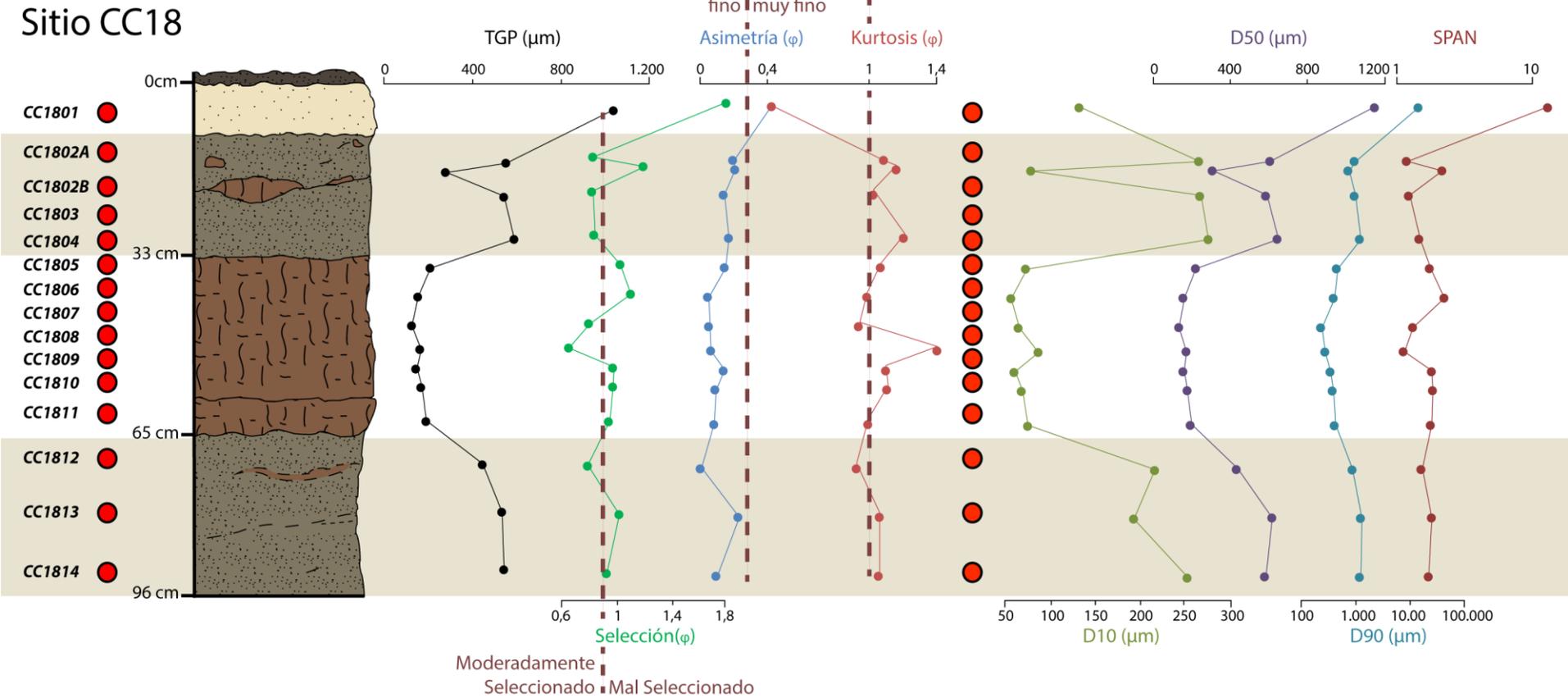
T/Muestra	201	202	203	204	205A	205B	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225
5116(793)	274.46	5.27	0.71	3.05	3.24	0	0	0	0	76.53	0	0	2.67	1.79	0.78	1.22	2.15	2.56	0	0	0	0.72	0.8	0	0	0.46
5(4000)	20.71	7.47	10.52	5.96	13.01	0.02	0.78	2.76	0.54	4.36	2.2	1.29	2.03	2.98	2.79	1.91	7.35	4.79	4.75	3.76	3.08	1	3.94	3.8	4.5	5.54
10(2000)	10.18	11.28	13.64	9.05	11.71	0.03	2.12	3.44	2	2.94	5.78	14.58	8.71	7.58	5.6	6.13	10.51	32.09	15.62	9.56	9.3	9.08	27.08	16.17	11.8	9.95
18(1000)	8.25	17.42	19.26	13.06	10.28	0.15	2.25	0.22	0.19	3.57	10.4	43.02	45.39	52.77	0.28	9.57	11.64	54.29	23.62	12.31	12.96	22.71	49.17	18.69	12.87	10
35(500)	12.52	46.18	50.11	41.56	12.35	1.2	9.88	26.91	38.87	4.1	36.74	62.95	79.21	112.31	22.57	33.57	27.86	76.38	51.86	25.16	38.9	48.28	63.55	62.6	69.95	51.88
60(250)	17.1	173.4	203.52	214.07	22.1	20.88	135.57	154.8	146.74	9.82	142.13	103.39	146.5	226.19	113.14	131.28	100.57	263.81	305.79	201.5	215.92	131.06	98.74	116.83	165.36	208.65
120(125)	13.44	148.02	187.65	209.24	22.72	21.24	105.43	92.59	91.1	8.49	93.38	77.01	100.17	124.												

8.3.4 Componente biológica

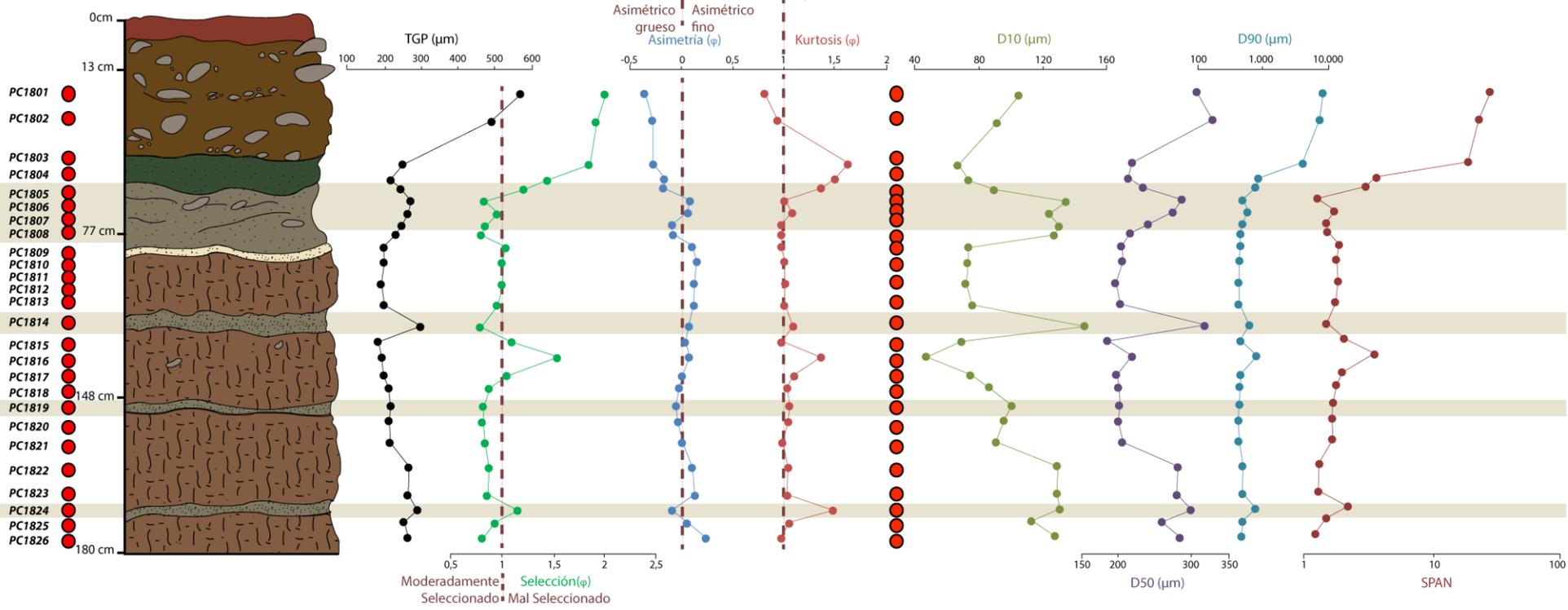
PC218	1	2	3	4	5A	5B	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
MASA T	2,43	2,54	2,6	2,515	1,01	0,99	0,96	1,11	0,89	0,88	0,92	1,06	1,03	0,92	0,1	1,1	1,03	0,95	1,24	1,22	1,16	0,98	0,95	0,964	1,03	1,2	
Delta M	0	0,0203	0,0199	0,0224	0	0	0	0	0,0159	0	0	0,0057	0,0072	0,0141	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Organico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Foram	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
%	0	0,799213	0,765385	0,890656	0	0	0	0	1,786517	0	0	0,537736	0,699029	1,532609	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

8.4 Figuras

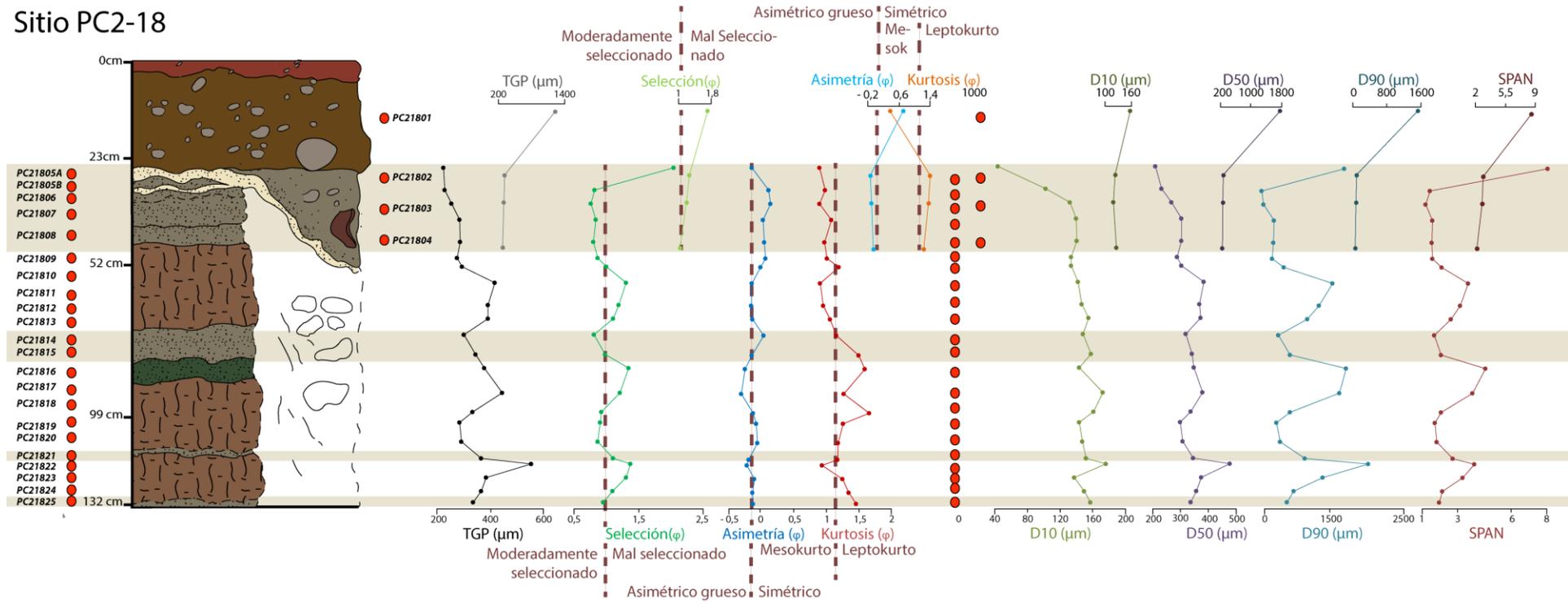
8.4.1 Granulometría de clastos



Sitio PC18

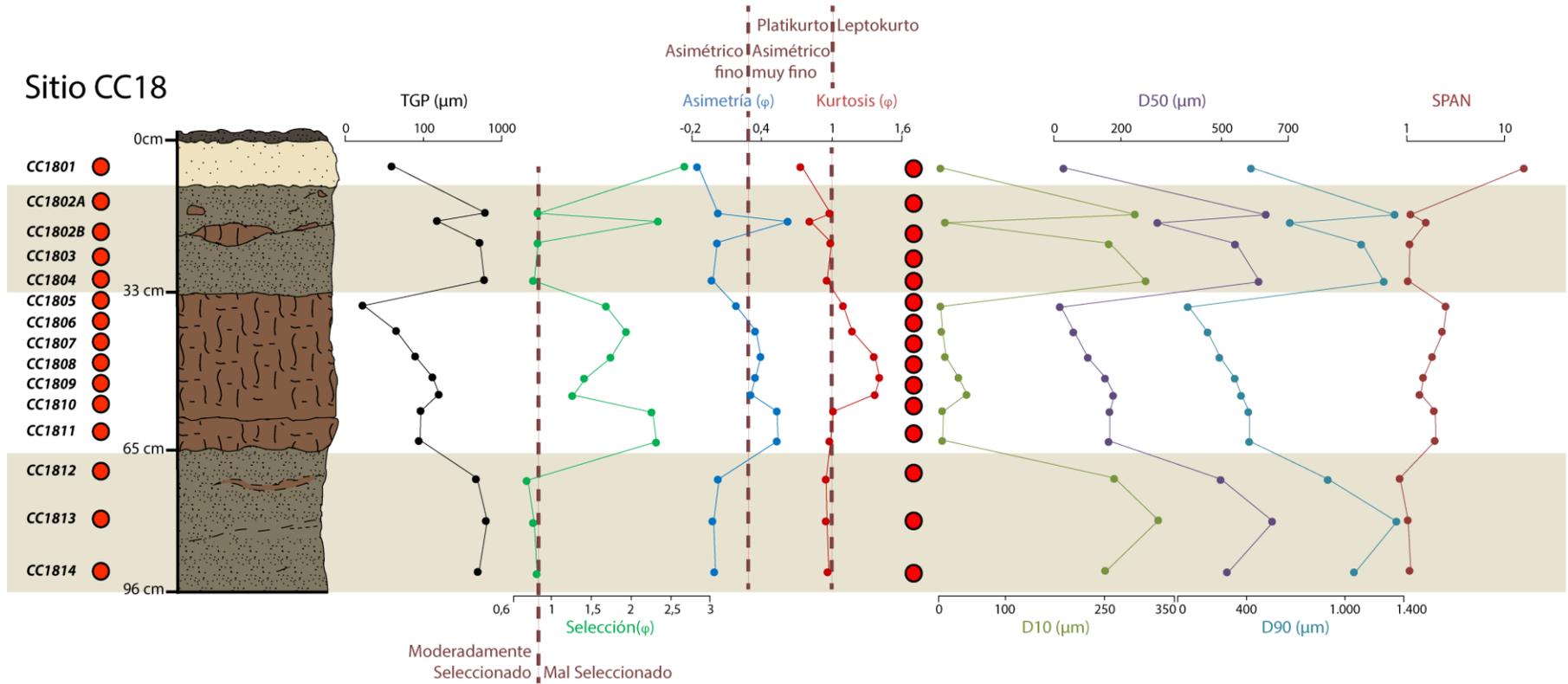


Sitio PC2-18

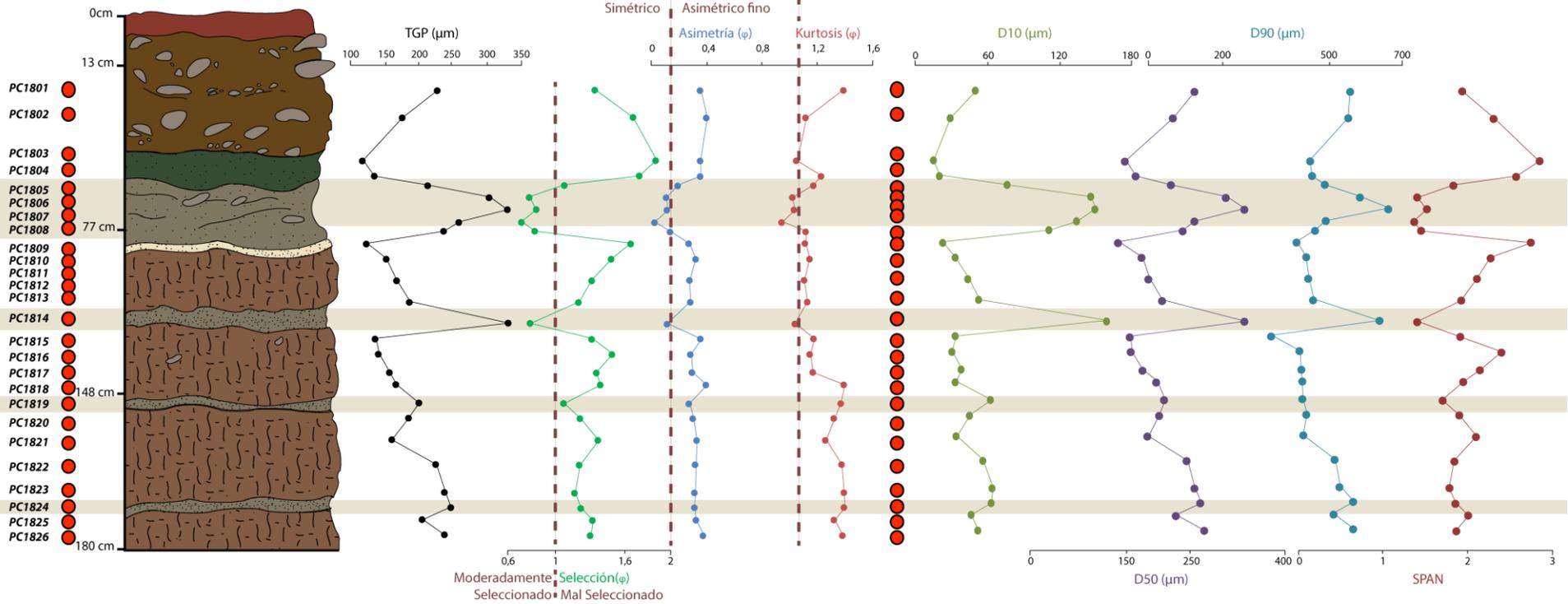


8.4.2 Granulometría de matriz

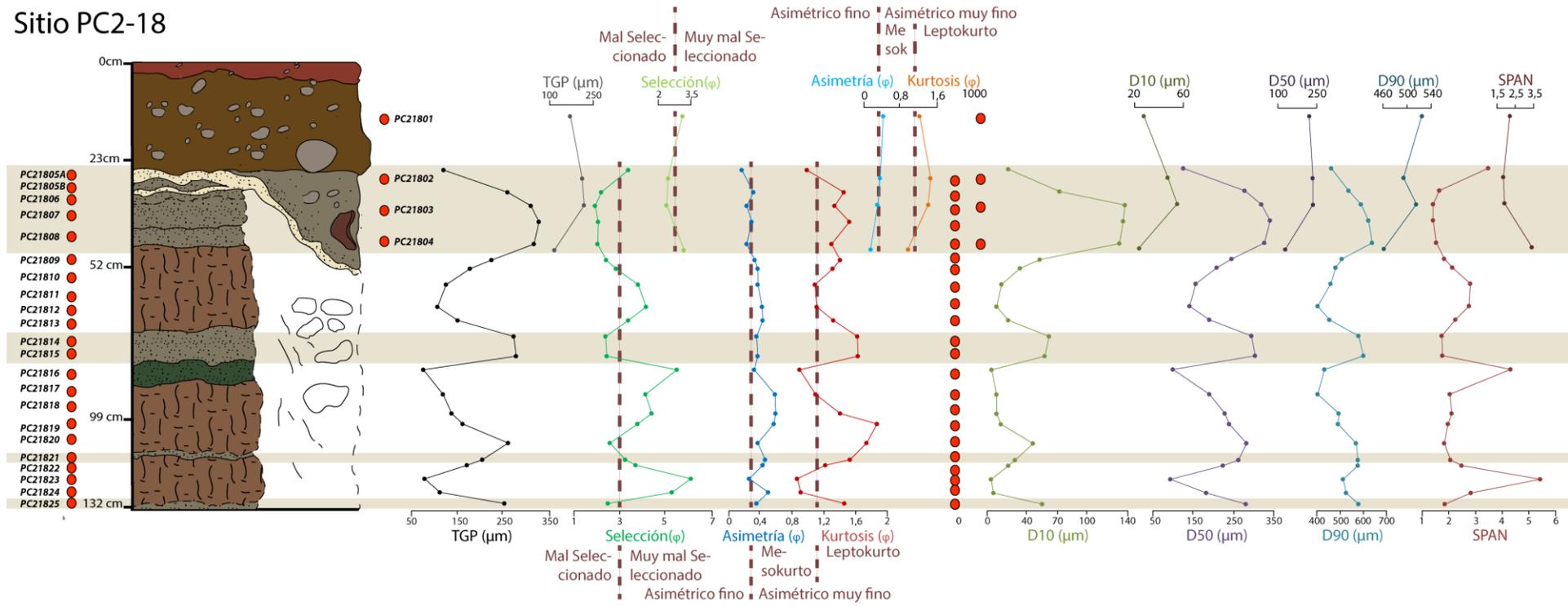
Sitio CC18



Sitio PC18

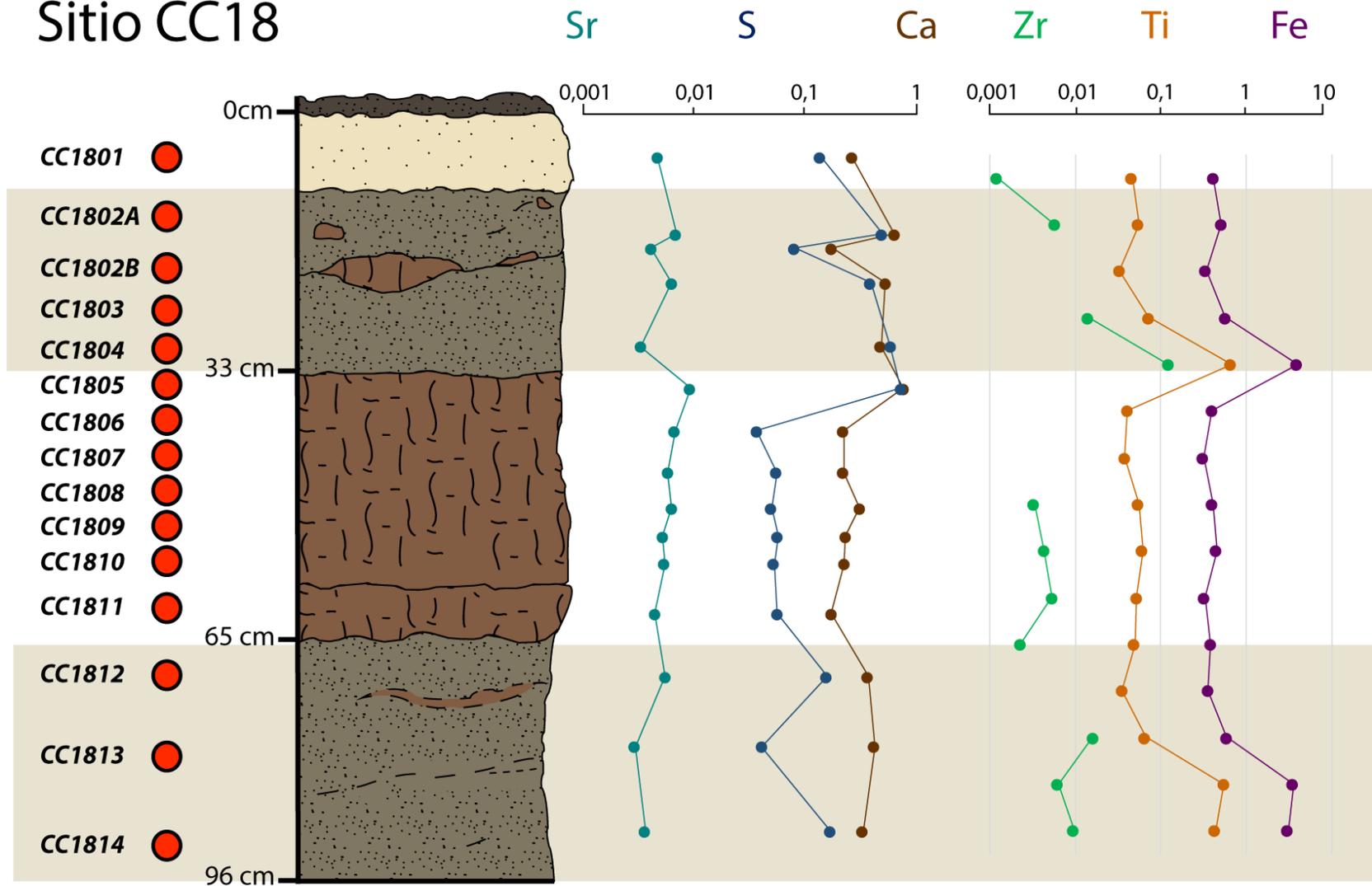


Sitio PC2-18

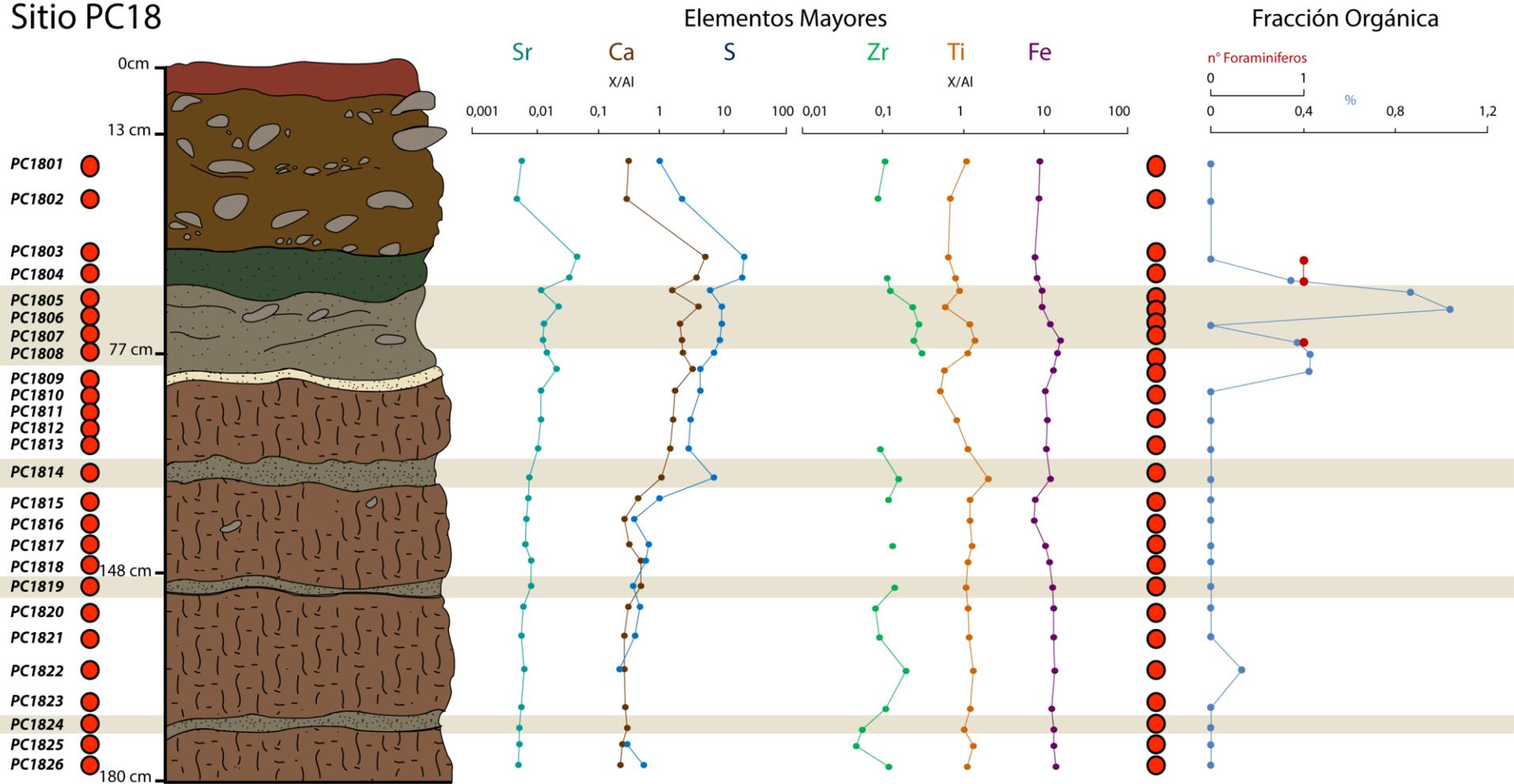


8.4.3 Geoquímica

Sitio CC18



Sitio PC18



Sitio PC2-18

