

**ESTRATIGRAFÍA Y SEDIMENTOLOGÍA DE LOS ESTRATOS EL  
BORDO EN LA SIERRA DE QUÍMAL, REGIÓN DE  
ANTOFAGASTA, NORTE DE CHILE**

GONZALO GERMÁN MELLA ROJAS

Profesor guía:

RAÚL UGALDE PERALTA

Profesor co-guía

SERGIO SOTO ACUÑA

Miembro de la comisión:

PHILIPPE MOISAN TAPIA

SANTIAGO DE CHILE

## RESUMEN

El sector de Estratos el Bordo en Sierra de Químal se caracteriza por poseer un extenso registro sedimentario y fosilífero de rocas de edad Triásica. Descrito como una secuencia sedimentaria asociada a depósitos lacustres someros con transición a fluvial, esta es subdivida en 3 miembros. Donde su miembro inferior presenta un nivel de tobas dacíticas en su base seguido de una secuencia sedimentaria de niveles de limolita con lutita subordinada intercalado con niveles de caliza microcristalina y cristalina con presencia de microorganismos fósiles concentrados en niveles de calizas, intervenidos por niveles intermitentes de lavas dacíticas. Su miembro medio presenta una secuencia de niveles de limolita con estratificación plano-paralela intercalada con lutita, caliza cristalina con estratificación ondulosa y presencia tanto de lentes de arena en lutitas como grietas de desecación en limolitas. Y su miembro superior presenta niveles secuenciales de limolita con intercalaciones de arena fina y lutita con patinas ferruginosas con gradación normal y presencia de troncos in situ, seguido de esto, hay una secuencia de niveles limolita con areniscas finas cuarcíferas que presentan una gradación inversa a arenas gruesas. Presentando una diferencia litológica en comparación con otras unidades triásicas tanto de nuestro continente como unidades con similar fauna fósil. Ya que, si bien las condiciones regionales se asocian a extensos eventos de volcanismo durante el periodo triásico, las secciones medias y superiores de la zona de estudio se asocian a ambientes lacustres de baja profundidad y fluviales. Y de igual forma la presencia de troncos y registro de flora fósil descrita en el sector nos hablan de condiciones en las que no solo podían habitar y sobrevivir vertebrados y microorganismos, sino condiciones templadas con humedad que permite la adaptabilidad y crecimiento de flora en la zona. Finalizando y de acuerdo con las características litológicas de los cuerpos rocosos estudiados en la zona y la guía estratigráfica internacional, es posible la categorización de los Estratos El Bordo como unidad litoestratigráfica, cuyos estratos se encuentran interrumpidos en sectores por discontinuidades.

## ABSTRACT

El Bordo beds in Sierra de Químal is characterized by havin an extensive sedimentary and fossil record for the Triassic age. Described as a sedimentary sequence associated with shallow lacustrine deposits with transition to fluvial deposits, subdivided into 3 members. There its lower member presents a level of dacitic tuffs at its base followed by a sedimentary sequence of siltstone levels with subordinate shale, and levels of microcrystalline and crystalline limestone with the presence of fossil microorganisms concentrated in limestone levels, intervened by intermittent levels of dacitic lavas. Its middle member presents a sequence of siltstone levels with plane-parallel stratification interspersed with shale, crystalline limestone with wave-like stratification and the presence of sand lenses in shales and desiccation cracks in siltstones. And its upper member presents sequential levels of siltstone with intercalations of fine sand and shale with ferruginous patinas with normal gradation and presence of logs in situ, followed by this, there is a sequence of siltstone levels with fine quartz-bearing sandstones that present an inverse gradation to thick sand. Presenting a lithological difference compared to other Triassic units both on our continent and units with similar fossil fauna. Since, although the regional conditions are associated with extensive volcanism events during the Triassic period, the middle and upper sections of the study area are associated with shallow lacustrine and river environments. And in the same way, the presence of trunks and records of fossil flora described in the sector tell us about conditions in which not only vertebrates and microorganisms could live and survive, but also temperate conditions with humidity that allows the adaptability and growth of flora in the area. Finally, and in accordance with the lithological characteristics of the rock bodies studied in the area and the international stratigraphic guide, it is possible to categorize the El Bordo Strata as a lithostratigraphic unit, whose strata are interrupted in sectors by discontinuities.

## AGRADECIMIENTOS

Redactar los agradecimientos me resulta desafiante debido al gran apoyo recibido a lo largo de mi vida. Pero creo que es apropiado empezar desde una perspectiva, expresando mi profundo agradecimiento.

A mis padres, mi principal fuente de apoyo, quienes han sido constantes en su apoyo a pesar de no siempre estar de acuerdo con mis decisiones. Han compartido sus preocupaciones, alegrías y retos sobre mi camino, brindándome consejos valiosos y oportunidades, sin importar lo largo que haya sido este sendero.

A mis abuelos, que han celebrado cada avance en mi vida, incluso cuando no entendían todos los detalles, y a ti, que, aunque ya no estás presente, estoy seguro de que estarías orgullosa de la persona en la que me he convertido y de mis logros.

Quiero agradecer a mis tíos y primos por su apoyo directo e indirecto en mis estudios, lleno del humor negro característico de nuestra familia.

A mis amistades que me han perseguido desde el colegio, pasando por momentos que van desde DrBloopier hasta los famosos "Pingüinos". Con quienes compartimos etapas de desvelo, jugando AtlantisRo, o las aventuras de Jaime "hackeando" un juego de Pokémon en Gamecube, y momentos más tranquilos viendo películas o discutiendo sobre la razón por la que Jaime se vengó solo por pedirle que me acompañara a un juego de handball.

En la etapa universitaria, agradezco a aquellos dentro de la universidad que toleraron mi humor negro y mala actitud, ya que es similar al suyo (especialmente Álvaro, Stefano y tú, Fabian) y fuera de esta con el mismo humor de mierda, con quienes compartí desvelos, frustraciones y alegrías. Esos momentos valen la pena recordar una y otra vez.

A mi pareja, un apoyo invaluable durante gran parte de mi vida universitaria, quien entendió los sacrificios que tuve que hacer mientras trabajaba en este proyecto y se mantuvo a mi lado dándome ánimos constantemente.

Durante mi etapa como tesista, agradezco profundamente a mi tutor, Raúl Ugalde, y a mi cotutor, Sergio Soto Acuña, por brindarme orientación y conocimientos fundamentales para llevar a cabo este trabajo. Y a su vez agradecerle a Andrés, Pablo, Javier, Jaime (no el mismo de antes), Nicole, y Sebastián "desagrado" Santana, por su apoyo, y risas que me han aportado durante la elaboración de este trabajo.

Finalmente expreso mi gratitud a Osvaldo Rojas del Museo de Historia Natural y Cultural del Desierto de Atacama, al Dr. Alexander Vargas y al Laboratorio de Ontogenia y Filogenia de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, a la Escuela de Geología de la Universidad Mayor y a Kaytrens Consultores en Paleontología SpA.

Actualmente, he pasado de considerarme alguien asocial a seguir manteniendo esa faceta, pero definitivamente con un círculo social más amplio del que imaginaba. Llegando a considerar a más personas como parte de mi familia de lo que alguna vez pensé posible.

Por último, en cuanto a aquellos que durante mi etapa universitaria podrían no haber disfrutado de mi actitud, comentarios, o directamente se hayan sentido ofendidos por aquello, les aseguro con toda sinceridad que probablemente lo tenían merecido.

*"Family don't end with blood, Boy!"*

(Jim Beaver como Bobby Singer)

*"No tiene sentido ser adulto si a veces no puedes actuar un poco infantil"*

(Tom Baker como el Cuarto Doctor)

# Tabla de contenido

1	Introducción .....	1
1.1	Ubicación y rutas de acceso .....	2
2	Marco geológico regional.....	5
2.1	Unidades morfoestructurales .....	5
2.2	Estructura de la cordillera de Domeyko.....	7
2.4	Margen Pérmico-Triásico .....	10
2.5	Registro litoestratigráfico.....	11
2.5.1	Formación Agua Dulce (Carbonífero Superior – Pérmico Inferior).....	11
2.5.2	Granitoides del Carbonífero Superior- Pérmico.....	12
2.5.3	Formación Tuina (Pérmico Superior – Triásico Medio).....	12
2.5.4	Estratos El Bordo (Triásico Medio – Triásico Superior).....	13
2.5.5	Grupo Caracoles (Jurásico Medio-Jurásico Superior).....	14
2.5.6	Formación Tonel (Cretácico Inferior – Cretácico Superior).....	15
2.5.7	Formación Purilactis (Cretácico Superior).....	16
2.5.8	Complejo intrusivo Cerro Químal.....	16
2.5.9	Formación Loma Amarilla (Eoceno – Oligoceno Inferior).....	17
2.6	Antecedentes en la zona .....	17
3	Marco Teórico .....	25
3.1	Estratigrafía y descripción estratigráfica.....	25
3.2	Proveniencia sedimentaria.....	26
4	Formulación del estudio.....	27
4.1	Problemática .....	27
4.2	Hipótesis de trabajo .....	29
4.3	Objetivos .....	29
4.3.1	Objetivo General .....	29
4.3.2	Objetivos específicos.....	29
4.4	Metodología .....	30
4.4.1	Trabajo gabinete 1 .....	30
4.4.2	Trabajo en terreno .....	30
4.4.3	Trabajo de gabinete 2 .....	31
4.4.4	Confección columna estratigráfica.....	31

5 Resultados .....	34
5.1 Estratigrafía .....	34
5.1.1 Sección estratigráfica SA, Loma Peluda .....	38
5.1.2 Sección estratigráfica SC, Loma Herrera .....	42
5.1.3 Sección estratigráfica secundaria, Cañadón Ostrácodo.....	45
5.1.4 Sección estratigráfica SB, Quebrada Peces .....	49
5.1.5 Sección estratigráfica SD, Quebrada Descanso.....	53
5.2 Análisis de facies .....	59
5.2.1 Sección Loma Peluda.....	61
5.2.2 Sección Quebrada Peces .....	62
5.2.3 sección Quebrada Descanso .....	64
5.3 petrografía.....	66
5.3.1 Clasificación de láminas delgadas .....	66
SB 220726/7 .....	67
SB 220726/1 .....	69
SC 220723/5 .....	70
SC 220723/4 .....	71
Cañadón Ostrácodo 220722/3 .....	73
Cañadón Ostrácodo 220722/2 .....	74
7 Discusión .....	76
8 Conclusión .....	93
9 Recomendaciones. ....	95
Bibliografía .....	96

# Índice de figuras

Figura 1. Mapa y ubicación de zona de estudio y rutas de acceso .....	3
Figura 2. Imagen satelital del área de estudio, junto con perfiles de elevación.....	4
Figura 3. Distribución de las unidades de relieve.....	6
Figura 4. Dominio morfoestructural en el norte del territorio nacional.....	7
Figura 5. Figura representativa del sistema de fallas de la cordillera de domeyko .....	9
Figura 6. Sección estructural esquemática .....	10
Figura 7. Gráficas de densidad de probabilidad para recalcu de edades de circón.....	14
Figura 8. Columna estratigráfica esquemática.....	19
Figura 9. Fotos de ostrácodos del sector de sierra de químal .....	20
Figura 10. Muestras de ostrácodos recolectados y presentados por osorio & rivano (1985).....	22
Figura 11. Molde de fémur de reptil, extraída de moreno (2001).....	23
Figura 12. Temnospondyli indet.....	24
Figura 13. Mapa de la localidad estudiada y trazado de las principales unidades geológicas.....	25
Figura 14. Mapa de la zona de estudio. ....	33
Figura 15. Mapa preliminar y columna estratigráfica esquemática .....	35
Figura 16. Columna detallada de la zona de estudio .....	37
Figura 17. Fotos de la zona correspondiente al sector de loma peluda .....	38
Figura 18. A) arenisca calcárea. B) caliza microcristalina con lentes arcillosos .....	40
Figura 19. Columna estratigráfica correspondiente a la sección de loma peluda .....	41
Figura 20. Imagen correspondiente a la zona de loma herrera .....	42
Figura 21. A) intercalaciones de limolita con arenisca media a gruesa, estratificación paralela. B) trazas fósiles de moldes. C) continuación del nivel de limolita y fracturas rellenas con yeso. D) madera fósil .....	43
Figura 22. Columna estratigráfica correspondiente a la sección de loma herrera .....	44
Figura 23. Imagen correspondiente de la sección complementaria de cañadón ostrácodo .....	45
Figura 24. Lava oscura con fracturamiento paralelo. Presenta un fallamiento inverso local.....	46
Figura 25. A) imagen del sector medio de la columna donde se observan las distintas litologías presentes. B) secuencia sedimentario de limolitas masivas predominantes. C) grietas de desecación en areniscas junto con ondulitas simétricas .....	47



Figura 26. Arenisca de tamaño de grano fino de tono rojizo con presencia de restos fósiles de vertebrado.....	47
Figura 27. Columna estratigráfica correspondiente a la sección auxiliar cañadón ostrácodo .....	48
Figura 28. Imagen correspondiente a la zona de quebrada peces con una vista hacia el w .....	49
Figura 29. A) caliza cristalina a microcristalina con planos de estratificación ondulado y ondulitas de interferencia. B) presencia de bandas oolíticas irregulares. C) presencia de ondulitas longitudinales. D) caliza microcristalina silicificada. ....	51
Figura 30. Columna estratigráfica correspondiente a la sección de quebrada peces. ....	52
Figura 31. Imagen correspondiente a la zona de quebrada del descanso.....	53
Figura 32. A) presencia de troncos fósil in situ. B) limolita maciza de alta competencia en la base y menor competencia en el techo. C) falla normal local. D) cuarzo arenita con estratificación plano-paralela. ....	55
Figura 33. Columna estratigráfica correspondiente a la sección de quebrada del descanso.....	57
Figura 34. Columna generalizada de la zona de estudio.....	58
Figura 35. Láminas delgadas de la muestra 220726/7.....	68
Figura 36. Láminas delgadas de la muestra 220726/1.....	69
Figura 37. Láminas delgadas de la muestra 220723/5.....	70
Figura 38. Láminas delgadas de la muestra 220723/4.....	72
Figura 39. Láminas delgadas de la muestra 220722/3.....	73
Figura 40. Láminas delgadas de la muestra 220722/2.....	75
Figura 41. Figura ilustrativa de cambios en el ambientales locales durante la depositación sedimentaria .....	79
Figura 42. Mapas paleogeográficos del período triásico y zonas paleoclimáticas inferidas a partir de indicadores litológicos y la distribución de los principales clados de dinosaurios .....	84
Figura 43. Imágenes esquemáticas de pangea durante piso carniano. Cambios ambientales y geoquímicos durante el episodio pluvial del carniano.....	85
Figura 44. Imagen representativa de la distribución de unidades triásicas en la región de antofagasta.....	86
Figura 45. Paleolatitud aproximada de cuencas clave del triásico de américa del sur .....	88
Figura 46. Figura ilustrativa del proceso de precipitación en la zona de estudio durante el periodo cálido del triásico.....	92

# Índice de Tablas

Tabla 1. Tabla comparativa de posibles rangos de edad para los estratos el bordo, basada en la cronoestratigráfica internacional 2022.....	27
Tabla 2. Comparativa de biocrones del registro fósil descrito en el área de sierra del químal .....	28
Tabla 3. Tabla de coordenadas geográficas de las 4 secciones principales levantadas en la transecta loma peluda – quebrada del descanso, en la zona de estudio, junto con las coordenadas de las 3 secciones secundarias levantadas y la posición del campamento.....	28
Tabla 4. Tabla de analisis y asociacion de facies sedimentarias .....	60
Tabla 5. Códigos de láminas delgadas para descripción petrográfica. ....	67

SOLO USO ACADÉMICO

# 1 Introducción

La zona del desierto de Atacama en el norte de Chile ha sido reconocida por décadas como un importante reservorio de fósiles y evidencia de ambientes antiguos. La Sierra del Químal, en particular, se ha destacado como un área con un potencial excepcional para la investigación paleontológica debido a su potencial para preservar fósiles y evidencia de ambientes asociados al período Triásico, cuyo registro es escaso en nuestro país. Sin embargo, a pesar de este gran potencial, las difíciles condiciones del desierto habían limitado los estudios previos en la zona a descripciones generales del área y los fósiles, sin un claro detalle estratigráfico.

Los sectores de Cerro Químal, y El Bordo, ubicados en el sector oriente de la Cordillera de Domeyko, junto con la cuenca del Salar de Atacama, en la Región de Antofagasta, destacan por presentar en términos geológicos, registros de eventos de deformación y sedimentación de gran importancia a nivel nacional (Fortt & Frutos, 1976).

La zona comenzó a ser estudiada por primera vez por Fortt (1972), quien describió una geología similar a la presente en el Cuadrángulo Tulo, al noreste de la zona (Fortt & Frutos, 1976). Reconoció unidades geológicas de edades entre el Triásico y el Paleógeno, restos fósiles de plantas, y vertebrados de origen marino y continental (Covacevich et al., 1981).

Dentro de los distintos trabajos realizados en el sector de El Químal, se describió el área de interés como una secuencia volcánica y sedimentaria de edad triásica inferior (Fortt, 1981), y se encontraron restos fósiles asociados a los Estratos de El Bordo. Entre ellos, ostrácodos de la familia de Paraparchitidae aff. *Chamishaella* (Osorio & Rivano, 1985), esthéridos (Covacevich et al., 1981) y arcosaurios. Este conjunto de fósiles permitió estimar un rango de edades que va desde el Carbonífero superior al Triásico Superior (Moreno, 2001).

La falta de información específica de la zona, además de antecedentes paleontológicos dispersos dificulta dar un tratamiento adecuado al área y asociarla con claridad a una formación. Esto ha resultado en el uso de estas unidades como un todo, descrito como Serie El Bordo (Osorio & Rivano, 1985), a consecuencia de la carencia de datos estratigráficos.

Una caracterización actualizada de las unidades aledañas a estos restos fósiles y un adecuado control bioestratigráfico es esencial para determinar antecedentes que ayuden a

comprender el marco geológico de la zona y las unidades litológicas similares. (Covacevich et al., 1981).

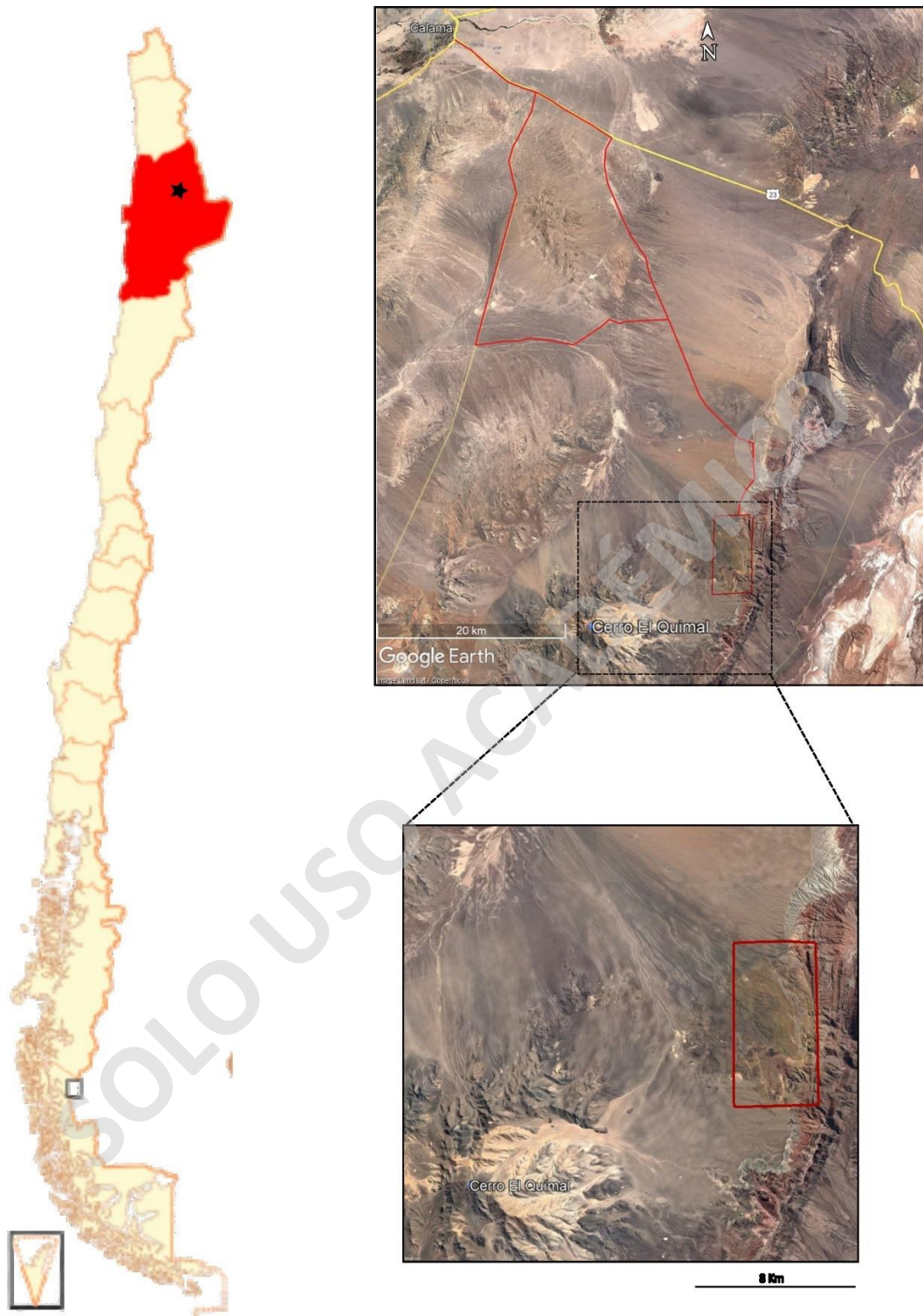
Por lo tanto, el presente trabajo se enfoca en el estudio de las unidades sedimentarias que componen a los Estratos El Bordo, con el objetivo de determinar sus respectivos ambientes de depositación y fuentes, junto con la correcta disposición espacial del registro fósil en la zona y así proponer un rango de edad más acotado tanto a la zona de estudio.

## 1.1 Ubicación y rutas de acceso

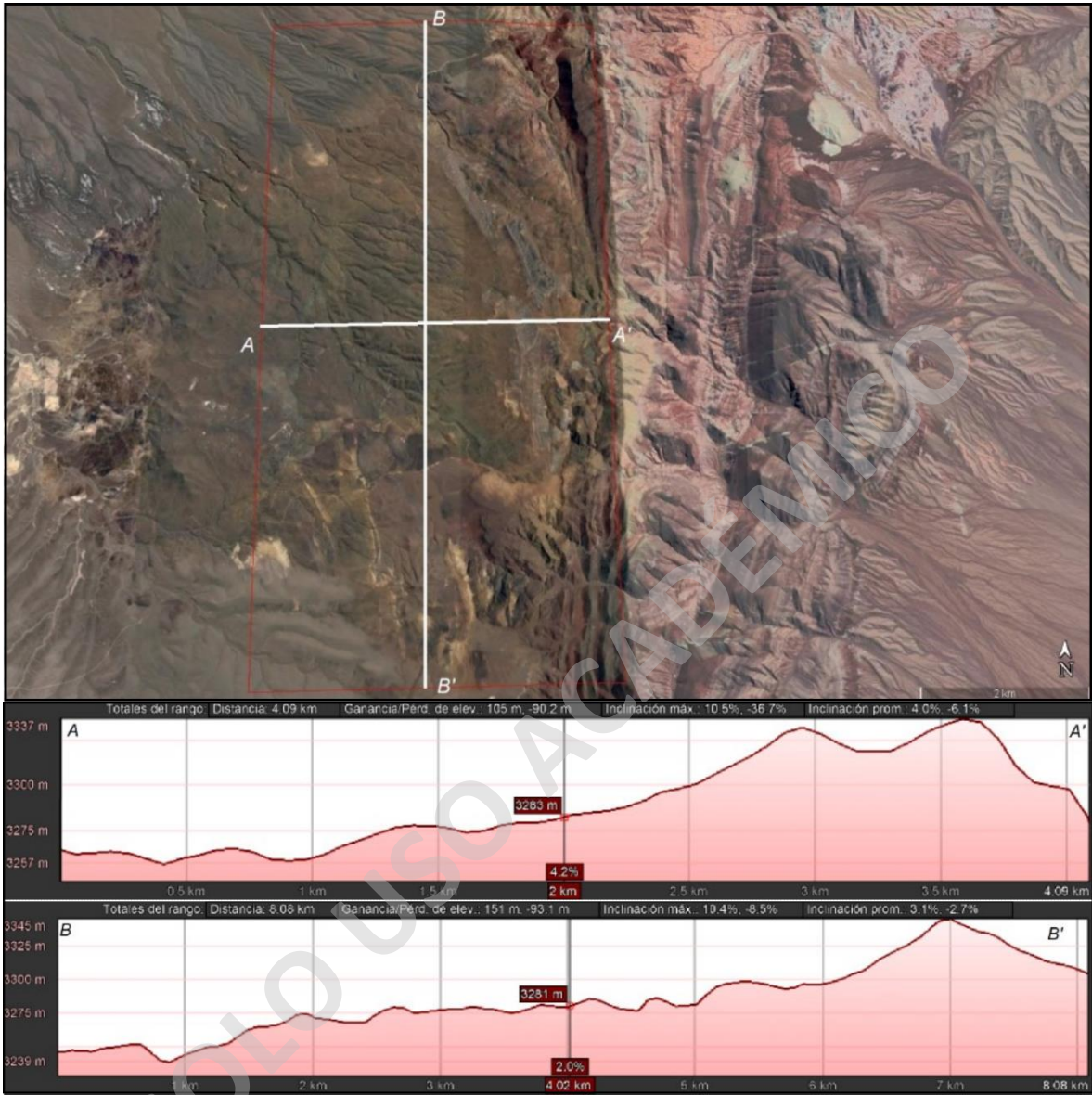
Sierra de Químal se encuentra en el extremo nororiental de la Cordillera de Domeyko, Región de Antofagasta, provincia de El Loa, norte de Chile. Aproximadamente 70 kilómetros al sur de la ciudad de Calama y 35 kilómetros al suroeste de San Pedro de Atacama. Específicamente, este trabajo se concentró 7,5 kilómetros al noreste del Cerro Químal (Figura 1). Las principales rutas de acceso a la zona de estudio se realizan mediante caminos mineros ubicados a 24 kilómetros de la ruta 23 entre Calama y San Pedro de Atacama, y 32 kilómetros hacia el sur de la carretera B255 (Figura 1).

La zona de estudio presenta elevaciones que van desde los 3.200 m s.n.m a 3.347 m s.n.m, con una inclinación promedio de 11% en una traza Este-Oeste y una inclinación promedio de 8% en una traza Norte-Sur (Figura 2).

El área de estudio se caracteriza por presentar un clima desértico marginal de altura, existiendo una gran oscilación térmica, destacándose una estación fría y cálida muy marcadas. La estación fría se presenta entre los meses de mayo a septiembre, donde los meses de junio y julio son aquellos con temperaturas más bajas. La estación cálida en cambio corresponde a los meses entre octubre y abril, donde los meses de enero y febrero son aquellos con mayores temperaturas, junto con eventos de precipitaciones ocasionales.



**Figura 1.** Mapa y ubicación de zona de estudio y rutas de acceso. La estrella marca posición referencial de la zona de estudio dentro de la región de Antofagasta, el cuadro rojo encierra el área de interés. Las líneas rojas corresponden a las rutas de acceso posibles al área de estudio. Imágenes obtenidas de Google Earth, correspondientes al año 2020.



**Figura 2.** Imagen satelital del área de estudio, junto con perfiles de elevación correspondientes a la zona de estudio. Imagen y perfiles obtenidos del software Google earth. Imagen correspondiente al año 2020.

## 2 Marco geológico regional

### 2.1 Unidades morfoestructurales

En el relieve de la región de Antofagasta se pueden distinguir una serie de unidades morfoestructurales dominantes, presentando orientación N-S. De oeste a este: Plataforma de Abrasión Litoral, Cordillera de la Costa, Depresión o Llano Central, Cordillera de Domeyko, Depresión Andina, Cordillera de los Andes y Puna (figura 3 y 4).

La Plataforma de Abrasión Litoral resulta de la acción de abrasión marina en la zona, relativamente ancha a la altura de la ciudad de Antofagasta, adelgazando hasta desaparecer parcialmente hacia el sur (Moscoso, 1979).

La cordillera de la costa presenta una altitud promedio de 1.500 metros sobre el nivel del mar y 20 kilómetros de anchura media. Hacia el oeste presenta un límite abrupto y escarpado con la plataforma de abrasión litoral, delimitando a la depresión central hacia el este (Charrier et al, 2007).

El Llano Central corresponde a una depresión geológica limitada por la Cordillera de la Costa, al oeste y la Cordillera de Domeyko, al este. Presenta una altura media de 1.700 metros sobre el nivel del mar, destacando una suave pendiente de orientación E-W, correspondiente al Desierto de Atacama (Charrier et al, 2007).

La Cordillera de Domeyko corresponde a un cordón desmembrado de la Cordillera de los Andes. Presenta un relieve en forma de arco, el cual se extiende por más de 450 kilómetros paralelo y al poniente de esta. Presenta una altura promedio de 3.500 m s.n.m siendo Cerro Químal el punto de altura máxima (Amilbia & Skarmeta, 2003).

La Depresión Andina corresponde a un relieve asociado a cuencas endorreicas, presente entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de los Andes, donde escurren las precipitaciones andinas llegando desde el este en forma de aguas subterráneas y pequeños ríos efímeros, a su vez se produce evaporación, lo que va generando salares en su extensión (Amilbia & Skarmeta, 2003).

La Cordillera de los Andes corresponde a un sistema montañoso con una extensión que abarca desde la costa del Caribe hasta el extremo sur del continente americano. La cual, en la zona norte de Chile, a partir de un volcanismo activo, colmó de cenizas y escoria la

separación entre los cerros, generando una planicie sobre los 4.000 metros (Moscoso, 1979).

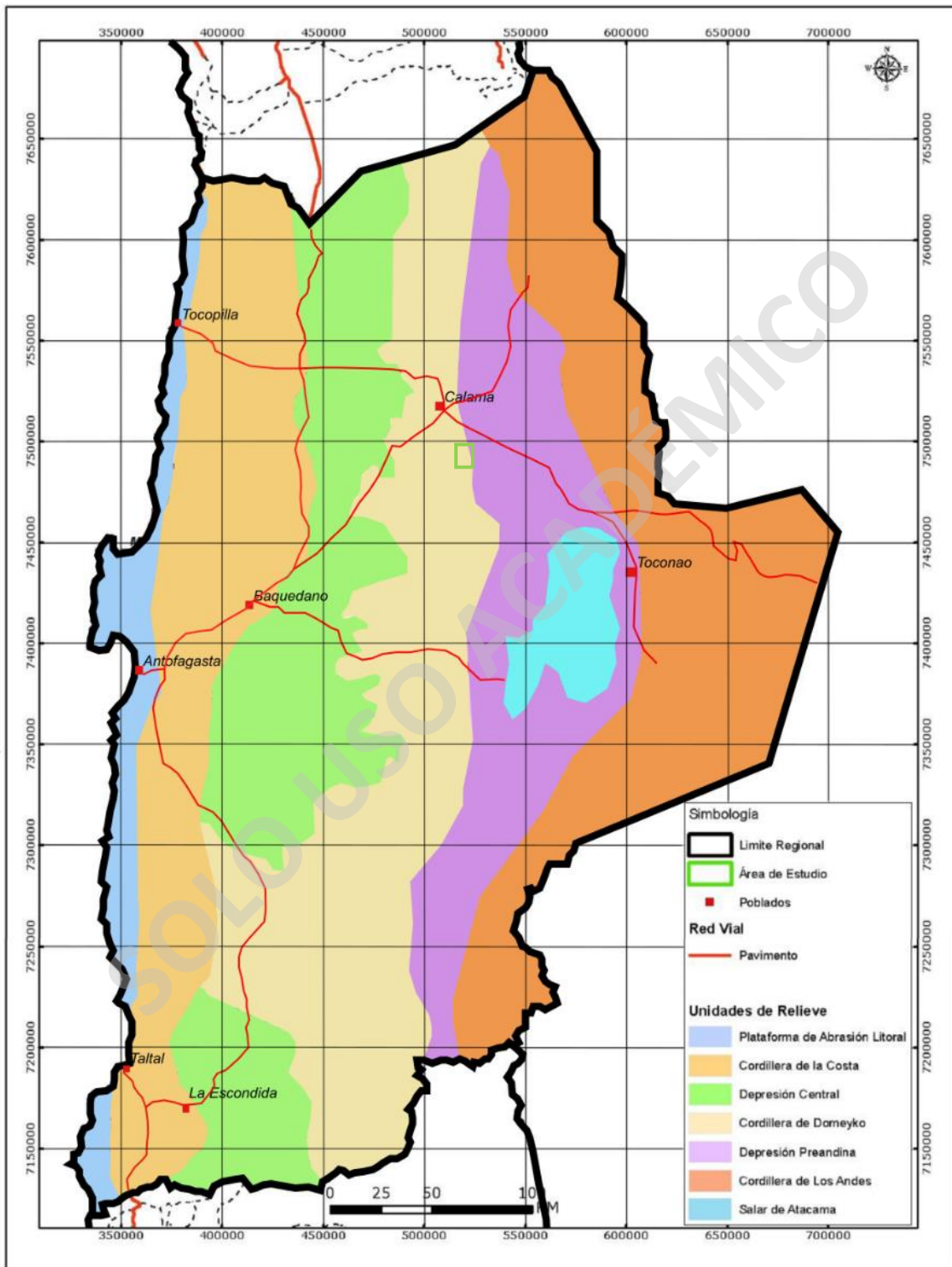


Figura 3. Distribución de las unidades de relieve, Región de Antofagasta, extraído y modificado del informe final de Línea base ambiental de tres zonas del norte grande, Ministerio de energía (2011).



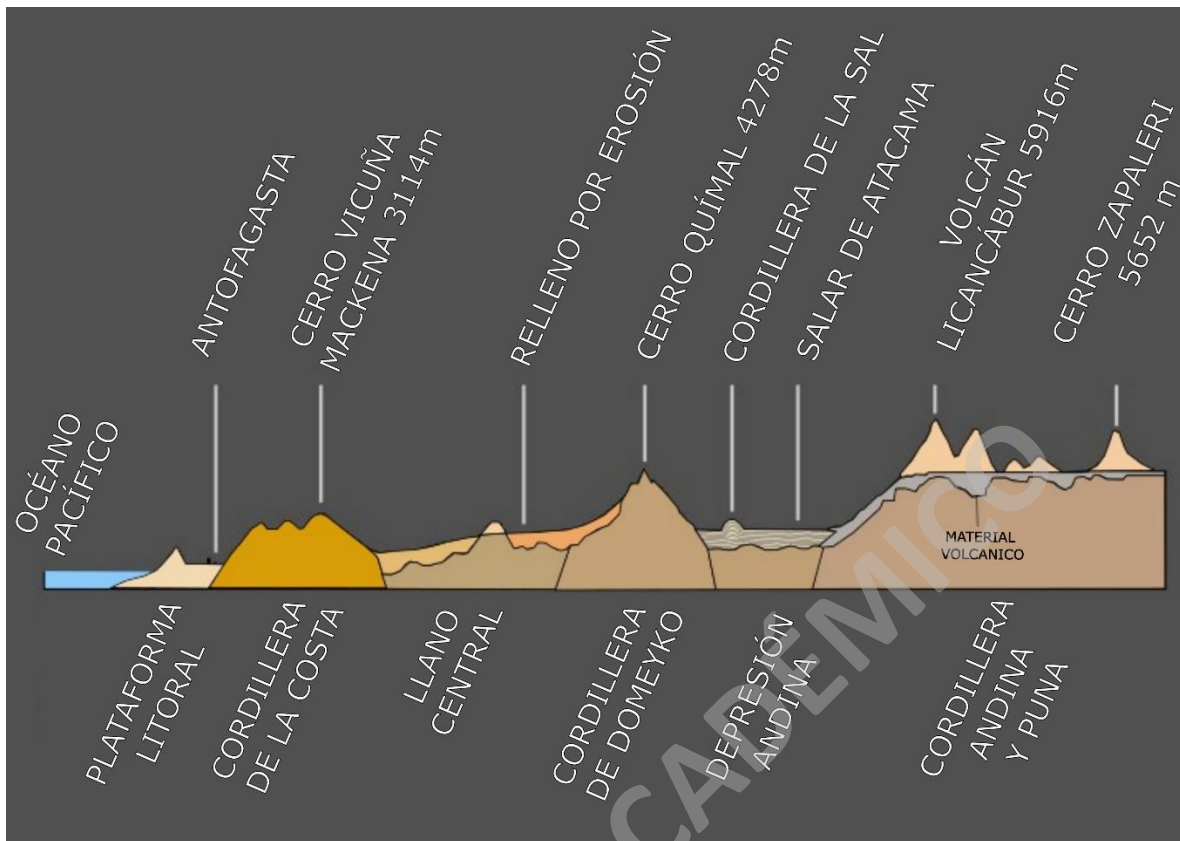


Figura 4. Dominio morfoestructural en el norte del territorio nacional. Modificado de Gioretta, M (2020). <https://giorgetta.ch>.

## 2.2 Estructura de la cordillera de Domeyko

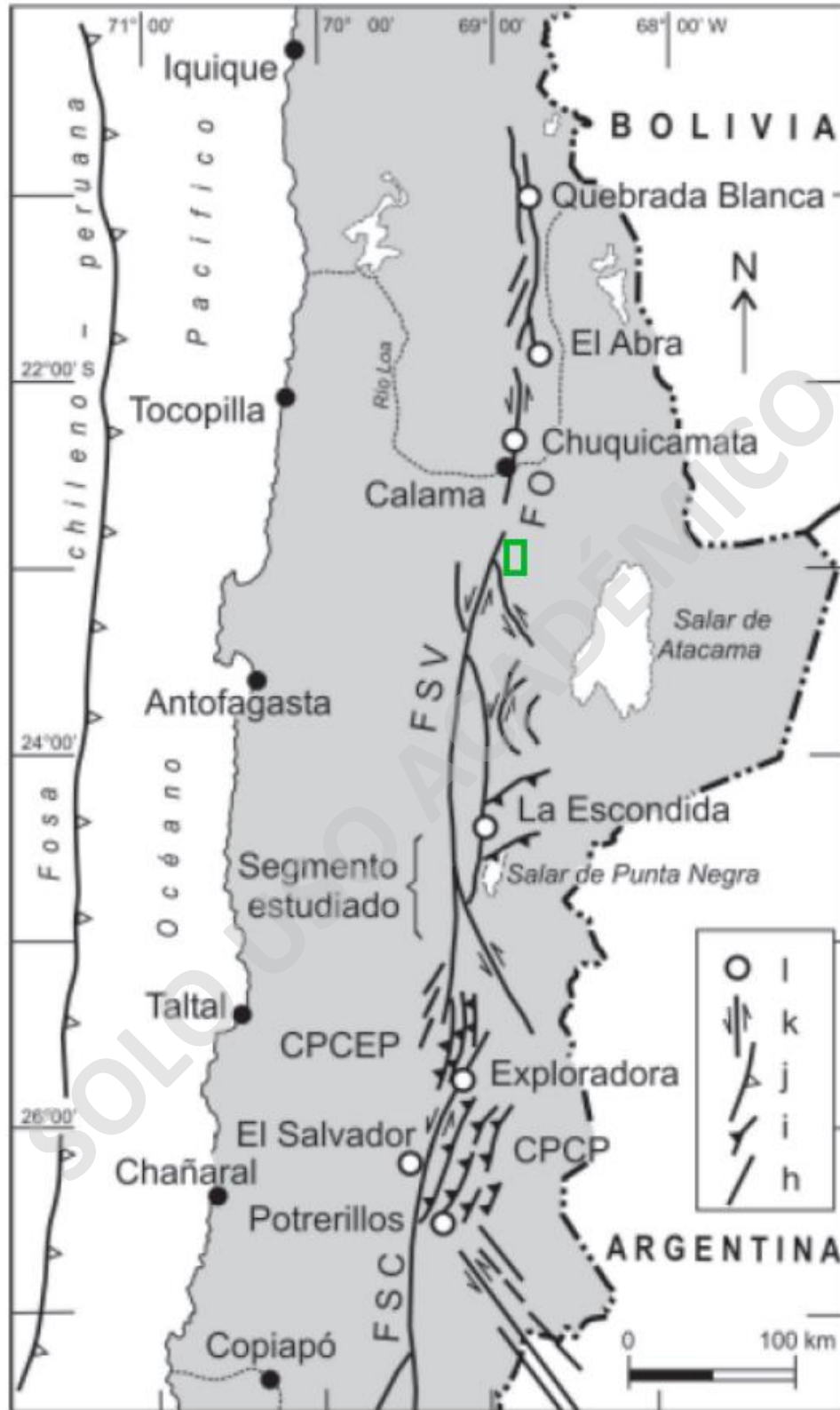
La Cordillera de Domeyko es una unidad morfoestructural bien definida que parte de la precordillera del norte de Chile, entre el valle central y la franja de los salares andinos orientales. Esta cordillera presenta unidades de rocas expuestas que varían tanto en edad como en litología, correspondiendo a: Un basamento paleozoico y triásico intrusivo, metamórfico y volcánico, rocas jurásicas y cretácicas de carácter sedimentario marino a continental, depositadas en cuencas de tras arco extensionales, una cobertura sedimentaria-volcánica cretácica depositada en rifts continentales, intrusivos del Paleoceno-Oligoceno, depósitos volcánicos y sedimentarios sin-orogénicos del Cenozoico al presente, derivados de la erosión producida por la deformación y alzamiento de la Cordillera de Domeyko (Amilbia & Skarmeta, 2003).

La estructura de la cordillera de Domeyko se encuentra dominada a partir de franjas elongadas de orientación NS, paralelas a la fosa chileno-peruana del norte de Chile al igual

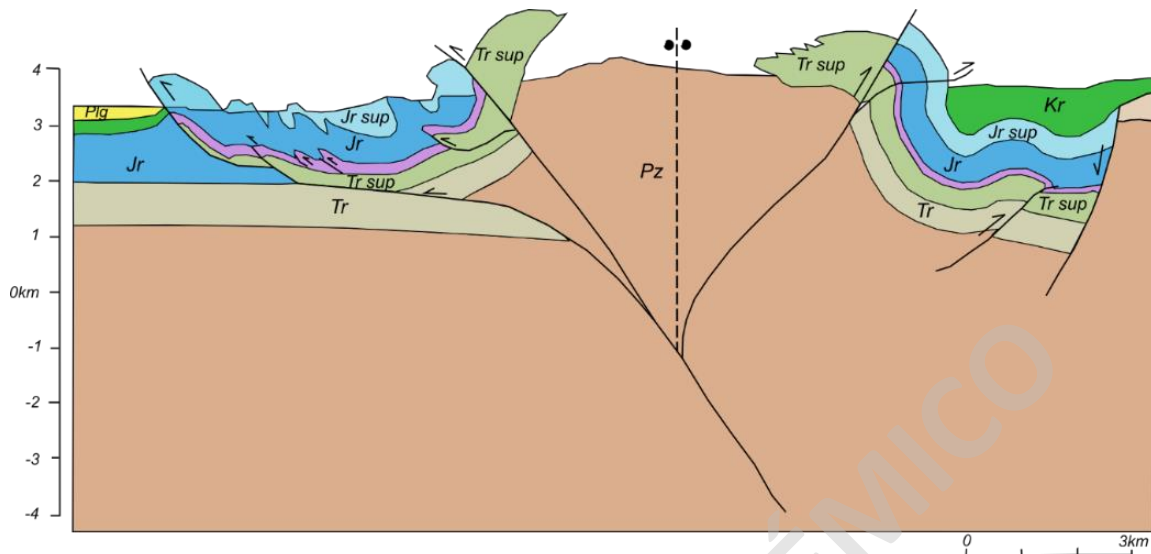
que las otras unidades morfoestructurales dominantes en el norte de Chile, de la cual dista unos 150 kilómetros al interior del continente (Figura 5) (Niemeyer & Urrutia, 2009). Los bloques de su basamento se encuentran exhumados producto de fallas inversas sub-verticales que a su vez se encuentran plegando y fallando los sedimentos volcánicos del triásico al cenozoico que se encuentran localizados de forma adyacente y yuxtaponiendo contra él. Las fallas limitantes a los bloques del basamento presentan una vergencia generalmente variable al Este y al Oeste, cambiando drásticamente a lo largo del rumbo de ellas (Oeste en el sector de La Escondida, Este en el Salar de Atacama) (Amilbia & Skarmeta, 2003). Este arreglo de fallas permite una geometría tipo pop-up de doble vergencia (Figura 6), relacionado con un componente de esfuerzos compresivos y transformantes ocurridos durante el Eoceno tardío-Oligoceno a lo largo de las principales fallas (Niemeyer & Urrutia, 2009).

Restituciones de secciones realizadas a través de la cordillera de Domeyko concluyen que los estilos de inversión tectónica se encuentran influenciados por estructuras preexistentes y por la estratigrafía de las cuencas mesozoicas. La directa relación entre las estructuras del basamento y las de la cobertura descarta un alzamiento de las estructuras del basamento por medio de estructuras relacionadas con fallas de rumbo (Reutter et al., 1991, 1993, 1996; Tomlinson & Blanco, 1977).

A escala local, el sector de la zona de estudio es descrito como parte de un anticlinal abierto asimétrico con convergencia hacia el este, con una extremidad trasera larga y suavizada, junto con un miembro frontal corto y empinado. Este muro colgante asimétrico presenta basamento con rocas del triásico tardío que afloran. Lo cual sugiere que la geometría del anticlinal es consistente con la reactivación de una falla normal triásica preexistente. (Amilbia et al., 2008).



**Figura 5.** Figura representativa del sistema de fallas de la Cordillera de Domeyko en el norte de Chile, según Cornejo y Mpodozis (1996). h. Fallas indiferenciadas; i. Fallas inversas; j. Fosa chileno-peruana; k. Fallas transcurrentes; l. Ubicación de pórfidos cupríferos en la zona. En la que la marca de color verde representa la ubicación aparente de la zona de estudio. Extraído y modificado de Cornejo & Mpodozis (1996)



**Figura 6.** Sección estructural esquemática de pop-up del sector de la quebrada Profeta, de la Cordillera de Domeyko. las edades se encuentran abreviadas; Jr: Jurásico; Tr: triásico; Tr sup: Triásico superior; Jr sup: Jurásico superior; kr: Cretácico; Plg: paleógeno; Pz: Paleozoico. Extraído y modificada de Amilibia (2002)

## 2.4 Margen Pérmico-Triásico

La era paleozoica finaliza con una catástrofe ambiental y extinción masiva de la vida en el planeta (Raup & Sepkoski, 1984). Esta tajante división llevo a la a la clasificación de la era Mesozoica por Phillips (1840, 1841) con el periodo Triásico como base, entre el Paleozoico y el Cenozoico.

Los eventos ocurridos durante el Pérmico tardío y el Triásico temprano llevaron a la extinción progresiva del 80% de los géneros marinos. generando anomalías de isótopos de carbono y estroncio, condiciones oceánicas anoxicas generalizadas, importantes regresiones marinas y exposición de las plataformas, seguido de un mayor evento transgresivo. La mayoría del ecosistema no se recompuso hasta inicios del Triásico Medio (Anisiano medio-Tardío) (Chen & Benton, 2012).

Es importante tener en consideración esta información para entender el contexto geológico, morfológico y paleoambiental del área correspondiente tanto para el sector de la Codillera de Domeyko como a escala más local correspondiente a la zona de estudio.

## 2.5 Registro litoestratigráfico

El sector correspondiente al área de estudio y alrededores al Cerro Químal presentan alturas variables, entre 2.300 y 4.200 m s.n.m, teniendo como punto más alto el cerro homónimo, donde alrededor se sitúan extensas planicies, como es el llano del Químal.

A continuación, se describe la estratigrafía paleo-mesozoica correspondiente al cuadrángulo Cerro Químal, y zonas aledañas al área de estudio, entre las latitudes 68°30' y 68°55' y longitud 22°40' y 23°05', tomando como referencia para el acotamiento de coordenadas la carta geológica realizada por Basso & Mpodozis (2012). Tanto en la Provincia del Loa, como en la Provincia de Tocopilla.

### **2.5.1 Formación Agua Dulce (Carbonífero Superior – Pérmico Inferior)**

Definida por García (1967) como una sección de más de 1.000 m de espesor, compuesta por una secuencia volcánica, que incluye: tobas dacíticas de color rosáceo anaranjado con textura fluida con fenocristales de plagioclasa; lavas andesíticas porfídicas bien estratificadas con intercalaciones locales de brechas volcánicas y características amigdaloides rellenas con cuarzo y epidota; tobas de lapilli con fragmentos líticos de origen volcánico, inmerso en matriz vítrea silicificada con bandas de vidrio desvitrificado; y pórfidos riolíticos que afloran con pequeños filones de bajo espesor relacionado con lavas y rocas ya descritas junto con fenocristales de cuarzo, plagioclasa y sanidina en una masa fundamental microcristalina cuarzo-feldespática (Basso et al., 2012).

Esta formación aflora como una franja discontinua, con una dirección aproximada NNE-SSE, siendo intruida por granitoides del Carbonífero Superior-Pérmico (303-249 Ma). La base de esta unidad no se encuentra expuesta y, al norte del cerro Químal, las tobas de lapilli pertenecientes a esta formación se encuentran cubiertas en discordancia angular por rocas pertenecientes a los Estratos El Bordo (Basso et al., 2012).

Se realizaron dataciones K/Ar en sanidina en pórfidos riolíticos que afloran en la Sierra Agua Dulce, obteniendo una edad de 294±9 Ma (Mpodozis et al. 1993), los

cuales han respaldados por análisis de edades de U – Pb en circones, de 292 Ma (Marinovic, 2007) y 296 Ma (Cornejo et al., 2006).

### **2.5.2 Granitoides del Carbonífero Superior- Pérmico**

Descrito por Mpodozis et al. (1993). Esta unidad incluye un conjunto plutónico bajo el nombre Complejo Intrusivo Pampa Elvira, intruyendo a la Formación Agua Dulce. Corresponde a monzogranitos y granitos de biotita, con variaciones a facies de monzogranito de biotita ( $\pm$ muscovita) que afloran al este de los cerros Caracoles y Catorce de Febrero, granodioritas de biotita y anfíbola de grano grueso con leve alteración a esméctita y cuarzo intersticial, que constituyen gran parte de los afloramientos de esta unidad observados en la ladera occidental del Cerro Químal; monzodioritas cuarcíferas y monzodioritas de anfíbola, constituidas por plagioclasa parcialmente argilizada, con apatito y turmalina como minerales accesorios; dioritas cuarcíferas de anfíbola y piroxeno ( $\pm$ biotita), constituido por plagioclasas intensamente alteradas a sericita y caolinita, con cristales de anfíbola cloritizados y actinolitizados (Mpodozis et al., 1993).

Esta unidad aflora como una franja discontinua con orientación NE-SO, desde el área de Pampa Elvira, hasta el oeste del cerro Químal (Mpodozis et al., 1993).

Se realizaron dataciones de K/Ar y Ar/Ar a biotitas, en los granitos que afloran al este de los cerros Caracoles, obteniendo edades de  $303\pm 7$  Ma y  $298,8\pm 0,9$  Ma respectivamente (Basso & Mpodozis 2012). A su vez, dataciones U-Pb en circones de dioritas ubicadas al oeste del cerro Químal y K/Ar, obtuvieron edades de  $249,3\pm 1,8$  Ma y  $236\pm 6$  Ma, respectivamente (Mpodozis et al., 1993). Estos datos fueron interpretados como producto del rejuvenecimiento provocado por algún evento magmático más joven, o una posible inclusión de granitoides emplazados durante el Triásico (Basso & Mpodozis 2012).

### **2.5.3 Formación Tuina (Pérmico Superior – Triásico Medio)**

Definida por Raczyński (1963) como una secuencia constituida por: un miembro inferior principalmente volcánico, de andesitas con intercalaciones dacíticas, junto con tobas asociadas al 30% de la secuencia; un miembro medio, constituido principalmente por una secuencia bien estratificada de lutitas a conglomerados

brechosos con intercalaciones de andesita porfírica; y un miembro superior, principalmente constituido por lavas andesíticas y brechas volcánicas en forma subordinada por riolitas, dacitas, areniscas y conglomerados (Mundaca et al., 1982). Esta formación se dispone en discordancia angular bajo la Formación Purilactis (Dingman, 1963), al sur de la Pampa Chilcara y en los cerros de Aiquina. Siendo considerados como parte de esta formación también las lavas andesíticas y tobas expuestas en afloramientos aislados en Llano del Químal y en el sector de los cerros Negro y El Bordo (Marinovic & Lahsen, 1984).

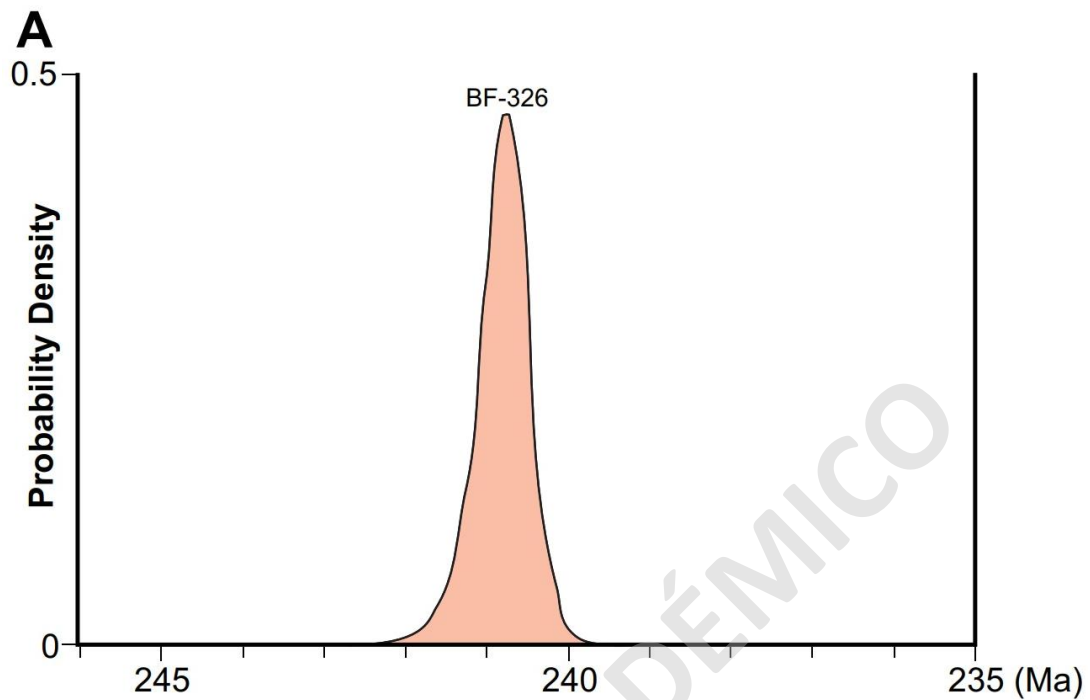
La formación fue asignada tentativamente al Cretácico por Raczyński (1963), gracias a la recolección de artrópodos de la familia de Cyzidae, además de flora fósil (Pérez, 1982b). Una edad mínima de K-Ar en biotitas obteniendo una edad de  $225 \pm 7$  Ma, la relacionó cronológicamente con los Estratos El Bordo, a pesar de las diferencias litológicas existentes entre ambas unidades (Marinovic & Lahsen, 1984).

#### **2.5.4 Estratos El Bordo (Triásico Medio – Triásico Superior)**

Esta unidad fue descrita en un principio por Fortt y Frutos (1976) bajo el nombre Serie El Bordo. Está constituida principalmente por cuarcitas y queratófiros, con intercalaciones sedimentarias transicionales y pantanosas, con restos de reptiles y plantas. Posteriormente, fue definida como Estratos El Bordo de manera informal por Fortt (1981), como una secuencia de volcanitas andesíticas con intercalaciones de sedimentitas, con presencia de restos vegetales, moluscos y vertebrados (Basso & Mpodozis 2012).

Los Estratos El Bordo afloran en el sector nororiente de la cordillera de Domeyko, noreste del Cerro Químal, en la cercanía del escarpe El Bordo. Sobreyace en discordancia angular a la Formación Agua Dulce, y subyace en contacto discordancia angular y de erosión a la Formación Tonel (Fortt et al., 1981).

A partir de la recolección de restos de vertebrados, y posteriormente el estudio de flora fósil, se atribuyeron los Estratos El Bordo al Triásico (Covacevich et al., 1981), lo cual fue respaldado a partir de dataciones U-Pb en circones de tobas, de  $240,8 \pm 0,6$  Ma, que afloran en el sector norte y noreste del cerro Químal (Basso & Marinovic, 2003). Y una edad a partir de dataciones U-pb en circones de tobas dacíticas recalculadas de  $238,7 \pm 0,4$  Ma (figura 7) (Irmis et al., 2021).



**Figura 7.** Gráficas de densidad de probabilidad para recalcular edades de circon U-Pb de los Estratos El Bordo del Salar Cuenca de Atacama en Chile. Extraído de Irmis et al., 2021.

### 2.5.5 Grupo Caracoles (Jurásico Medio-Jurásico Superior)

Descrita originalmente por Harrington (1961) en los cerros homónimos y redefinida posteriormente por Montaña (1976) y Ramírez y Gardeweg (1982). Constituida de base a techo por las formaciones Torcazas, Caracoles, Doralisa, Millonaria y Honda (Basso & Mpodozis 2012).

Este grupo está compuesto por calizas compactas con abundantes restos de bivalvos, gastrópodos, corales y vertebrados marinos que alternan con niveles de areniscas laminadas, calizas fisibles y compactas junto con areniscas cuarcíferas muy finas y lutitas fisibles fosilíferas, lutitas y arcillolitas muy fisibles y deleznales, con intercalaciones centimétricas de yeso hacia el techo, yeso macizo compacto, calizas pisolíticas y coquinoideas macizas (Basso & Mpodozis 2012).

El grupo aflora en el extremo oeste y suroeste de la zona de estudio, formando una franja con dirección aproximada NNE y SSO, en la zona de los cerros de Caracoles. Se dispone en discordancia erosiva sobre los Estratos La Loma. (Montaña, 1976).

Gracias al abundante material fósil descrito por diversos autores, se ha indicado una edad comprendida entre el Bajociano y Kimmeridgiano (Harrington, 1961; Montaña,



1976; Ramírez y Gardeweg, 1982), las cuales fueron corroboradas posteriormente por Rubilar (2000, 2001).

### **2.5.6 Formación Tonel (Cretácico Inferior – Cretácico Superior)**

Descrita originalmente por Brügger (1942) como Formación Salina de Purilactis y posteriormente definida formalmente por Dingman (1963) como Formación Tonel, en los Cerros Tonel, al sur de la cuesta Barros Arana (Fortt et al., 1981). La formación fue dividida en tres miembros, compuesta por un miembro inferior de conglomerados (con clastos de andesitas, riolitas, areniscas y lutitas procedentes de Estratos El Bordo), brechas y areniscas, un miembro medio de areniscas y limolitas, finamente laminadas con intercalaciones de evaporitas, y un miembro superior de una gruesa capa de evaporita, dentro de los que se observan inclusiones de bloques de lamprófidos descritos como restos desmembrados de un enjambre de diques básicos (Mpodozis et al., 2005).

Esta formación aflora a lo largo del escarpe El Bordo, como una franja de dirección NE-SO. Afloramientos aislados se encuentran al sur del Cerro Totola y en la Pampa Elvira. Se apoyan en discordancia angular y de erosión sobre los Estratos El Bordo y en contacto por falla con la Formación Purilactis (Fortt et al., 1976), la cual, hacia el norte, la cubre en concordancia (Mpodozis et al., 2005).

Originalmente, Dingman (1963) atribuyó una edad jurásica a la Formación Tonel, indicando que la unidad podría corresponder a facies continentales distales de la transgresión jurásica, con productos al oeste de la cordillera de Domeyko, representados por el Grupo Caracoles. Sin embargo, la presencia de discordancias progresivas y estructuras de depósitos típicamente acumulados en una zona de deformación compresiva activa, llevaron a indicar que la Formación Tonel representaría una asociación de sedimentos depositados durante las etapas iniciales del alzamiento de la cordillera de Domeyko (Arriagada et al., 2002; Mpodozis et al., 2005). Debido a la ausencia de material fosilífero y niveles volcánicos posibles de datar, a partir de relaciones estratigráficas y dataciones de K/Ar a biotitas y roca total de los diques que cortan la formación, de  $68 \pm 2$  Ma (Mpodozis et al., 2005) y  $61 \pm 3$  Ma (Arriagada, 1999), fue posible atribuirle un intervalo entre el Triásico Superior y el Cretácico Superior (Arriagada, 1999; Mpodozis et al., 2005).

### **2.5.7 Formación Purilactis (Cretácico Superior)**

Descrita por primera vez por Brügger (1942) bajo el nombre de “Formación Porfírica Purilactis” y posteriormente denominada por Dingman (1963) como Formación Purilactis, y descrita de igual forma en los trabajos de Arriagada (1999), Arriagada et al. (2002) y Mpodozis et al. (2000, 2005).

Constituida por tres miembros principales, donde: el miembro inferior consiste en areniscas con intercalaciones de limolita y evaporitas; un miembro medio correspondiente areniscas finas a gruesas con intercalaciones de limolitas y conglomerados, con clastos de andesitas y pórfidos riolíticos; y un miembro superior, correspondiente a areniscas y arcillolitas con marcas de fondo y horizontes de evaporitas y niveles de conglomerados con clastos de origen volcánico (Fortt et al., 1976).

La Formación Purilactis está intruida por un enjambre de diques de dirección N30°-40°O y N60°O de composición entre dacitas y andesitas basálticas.

El contacto basal de la Formación Purilactis corresponde a un nivel sobre facies evaporíticas del miembro superior de la Formación Tonel. Aflora en una franja elongada de dirección NE-SO, a lo largo de los escarpes el Bordo, desde la quebrada Guanacos, hasta el cerro Sombrero, por el sur.

A partir del registro de fósiles marinos del Jurásico Medio a Superior, re TRABAJADOS (Ramírez & Gardeweg, 1982) junto con presentar diques porfíricos, indican una edad acotada al cretácico tardío (Arriagada et al., 2000). Dataciones de Ar/Ar con un gran error sistemático en piroxenos muestran una edad de  $64 \pm 10$  Ma (Flint et al., 1989).

### **2.5.8 Complejo intrusivo Cerro Químal**

Descritos por primera vez por Fortt y Frutos (1976) y posteriormente por Ramírez y Gardeweg (1982). Conformado por un plutón constituido por granodioritas de anfíbola y biotita (que constituyen la cumbre del cerro Químal), dioritas y dioritas cuarcíferas de anfíbola y piroxeno, con presencia de cataclasis y vetillas con actinolita, junto con cuerpos satélites que intruyen a los Estratos El Bordo y granodioritas del Carbonífero superior-Pérmico (Fortt et al., 1976).

Este complejo intrusivo se observa aflorando en el cerro Químal y sus alrededores.

A partir de dataciones radiométricas de K/Ar a biotitas en granodioritas, se obtuvieron edades de  $66,4 \pm 1,4$  Ma y  $64,6 \pm 1$  Ma (Ramírez & Gardeweg, 1982), ligeramente mayores a las dataciones de K/Ar a biotitas en dioritas expuestas al sur del cerro Químal, donde se obtuvo una edad de  $68 \pm 2$  Ma (Andriessen & Reutter, 1994).

### **2.5.9 Formación Loma Amarilla (Eoceno – Oligoceno Inferior)**

Descrita por primera vez por Arriagada (1999) como Estratos de Loma Amarilla, y posteriormente elevado su rango a Formación Loma Amarilla por Mpodozis et al. (2005). Está compuesta por dos miembros, donde el miembro inferior corresponde a tobas, brechas y conglomerados con clastos volcánicos en una matriz tobácea, y el miembro inferior está compuesto por gravas y conglomerados poco consolidados, cuyos clastos incluyen fragmentos de granitoides y lavas andesíticas, dacíticas y riolíticas, con intercalaciones de areniscas y limolitas (Arriagada, 1999).

La Formación Loma Amarilla constituye gran parte de los afloramientos que forman el escarpe El Bordo, teniendo una estructura interna caracterizada por discordancias progresivas, indicativos de una zona de deformación activa (Ribba, 1976).

A partir de dataciones de K/Ar en Andesitas de anfíbola, provenientes de conglomerados volcanoclásticos cercanos a la base de la formación, se obtuvo una edad de  $59,1 \pm 2$  Ma.

## **2.6 Antecedentes en la zona**

Respecto al área de interés, el gran potencial de la región de Antofagasta tanto de carácter económico como científico ha incentivado a la realización de múltiples campañas de trabajo en la zona. Desde 1976 distintos autores han realizado múltiples trabajos, abordando la zona de estudio. Abarcan las características geológicas y paleontológicas, aportando cada vez más información y detalles sobre el área.

Esta información se toma como base en la realización de este trabajo, ayudando en un mejor análisis y comprensión de las características estructurales y paleo ambientales de la zona.

Fortt y Frutos (1976) realizaron un estudio sobre la geología regional de los cuadrángulos Cerro Químal y Llano La paciencia, en la que describen las características estratigráficas de las unidades presentes en la zona. Caracterizan la región geomorfológicamente como un sistema maduro de relativa alta energía en la actualidad (Fortt & Frutos, 1976). Y realizaron una columna esquemática de la zona (Figura 8). La zona de interés correspondiente a la Sierra de Químal. Es descrita como una secuencia muy afectada por fallas inversas, normales y pronunciados plegamientos, constituida principalmente por cuarcitas y andesitas con intercalaciones de facies sedimentarias con la presencia de restos de reptiles y plantas. Estimaron 600 metros de potencia, donde, a través de litocorrelación, asocian a los Estratos El Bordo al Triásico Medio (Fortt & Frutos, 1976).

Luego, Fortt (1981) realizó un estudio abordando la geología general de los cuadrángulos de Cerro Químal, Llano de Paciencia y Salar de Atacama. Realiza la reconstrucción de la estratigrafía y evolución tectónica del área, en rasgos generales. Los Estratos El Bordo son descritos como una secuencia de cuarcitas y andesitas de unos 1.200 m de potencia mínima, con gruesas intercalaciones de sedimentitas calcáreas, clásticas, silíceas y volcánicas riolíticas, las cuales se disponen en mayor proporción en la parte inferior y media, mientras que hacia el techo contienen restos fósiles de helechos, “estéridos”, ostrácodos y vertebrados (Fortt, 1981).

Los ostrácodos encontrados en el sector de Sierra de Químal, fueron asociados a los Estratos El Bordo, procediendo a adoptar el método de clasificación publicado por Pokorny (1978), en la que fueron halladas dos formas diferentes de Ostrácodos (Figura 9), donde se consideró que estos poseían afinidad hacia *Chamishaella*, junto con similitudes con Cavellinidae, los cuales presentan un rango de edad Silúrico-Triásico superior (Pokorny, 1971) y descartando una posible pertenencia a la familia Paraparchitidae, que presentan un rango Devónico-Pérmico (Fortt, 1982).

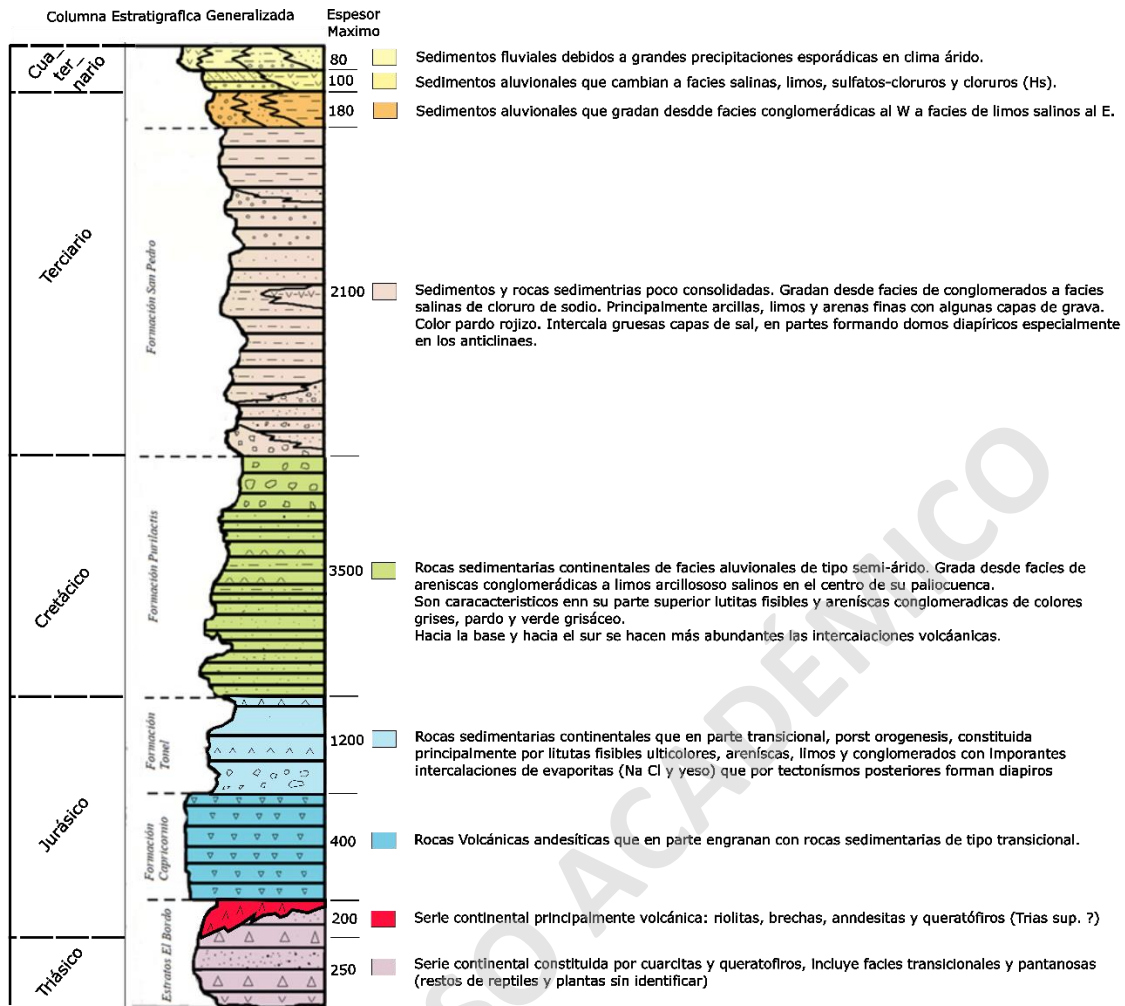
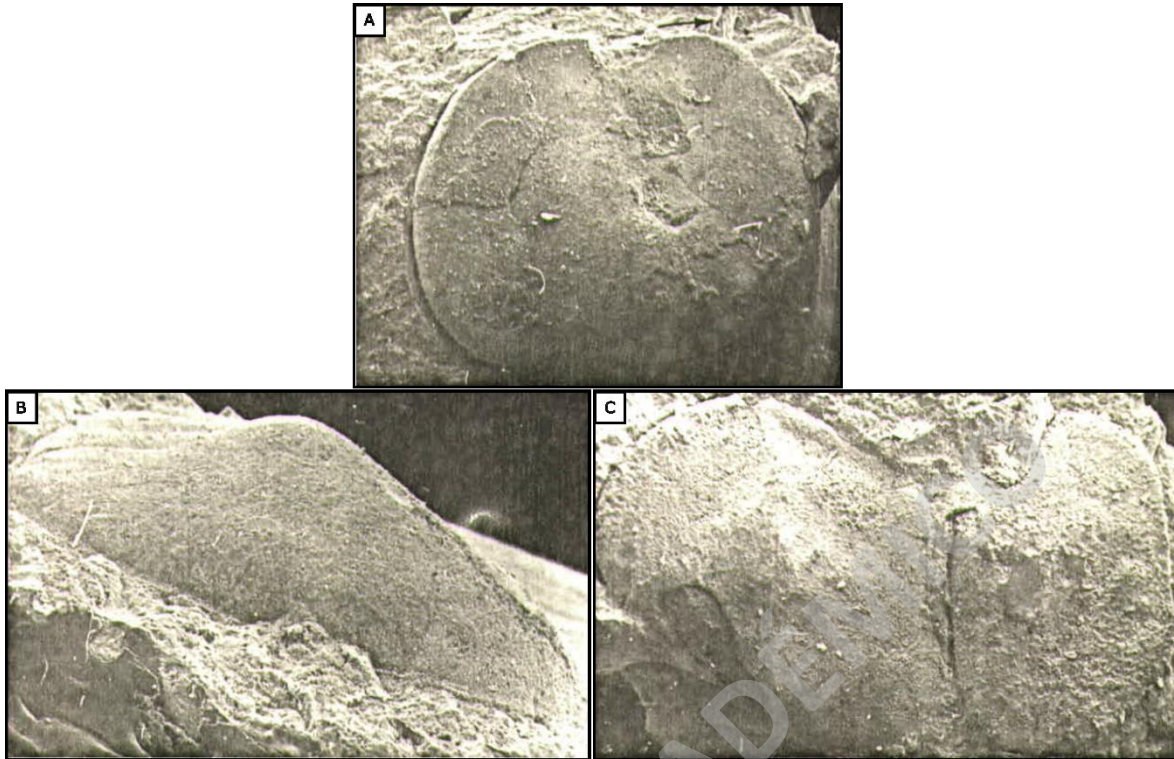


Figura 8. Columna estratigráfica esquemática extraída y modificada de Fortt & Frutos (1976). Describen y asocian unidades a formaciones de la zona.



**Figura 9.** Fotos de Ostrácodos del sector de Sierra de Químal donde es posible observar distintas características. A) Molde interno. Valva derecha, se observa con claridad el grupo circular de marcas secundarias del musculo aductor central y marca mandibular; B) Molde interno. En vista oblicua donde resalta la protuberancia del aro central de la valva; C) Dos valvas incompletas. La de la izquierda se encuentra levemente fracturada. Fotos extraídas de Fortt (1982).

Covacevich (1981) describió una serie de fósiles correspondientes informalmente a conostracos y ostrácodos en planos de estratificación a una secuencia sedimentaria que varía de areniscas de grano fino a limolitas, en el sector de la Sierra de Químal. Los ostrácodos se encontraban muy lixiviados, con su ornamentación muy gastada y contornos incompletos, mientras que los “estéridos”, familia actualmente correspondiente a Cyzidae, se caracterizaban por su forma redondeada y sub circular, sin poder observarse el desarrollo de la ornamentación concéntrica con detalle (Covacevich, 1981).

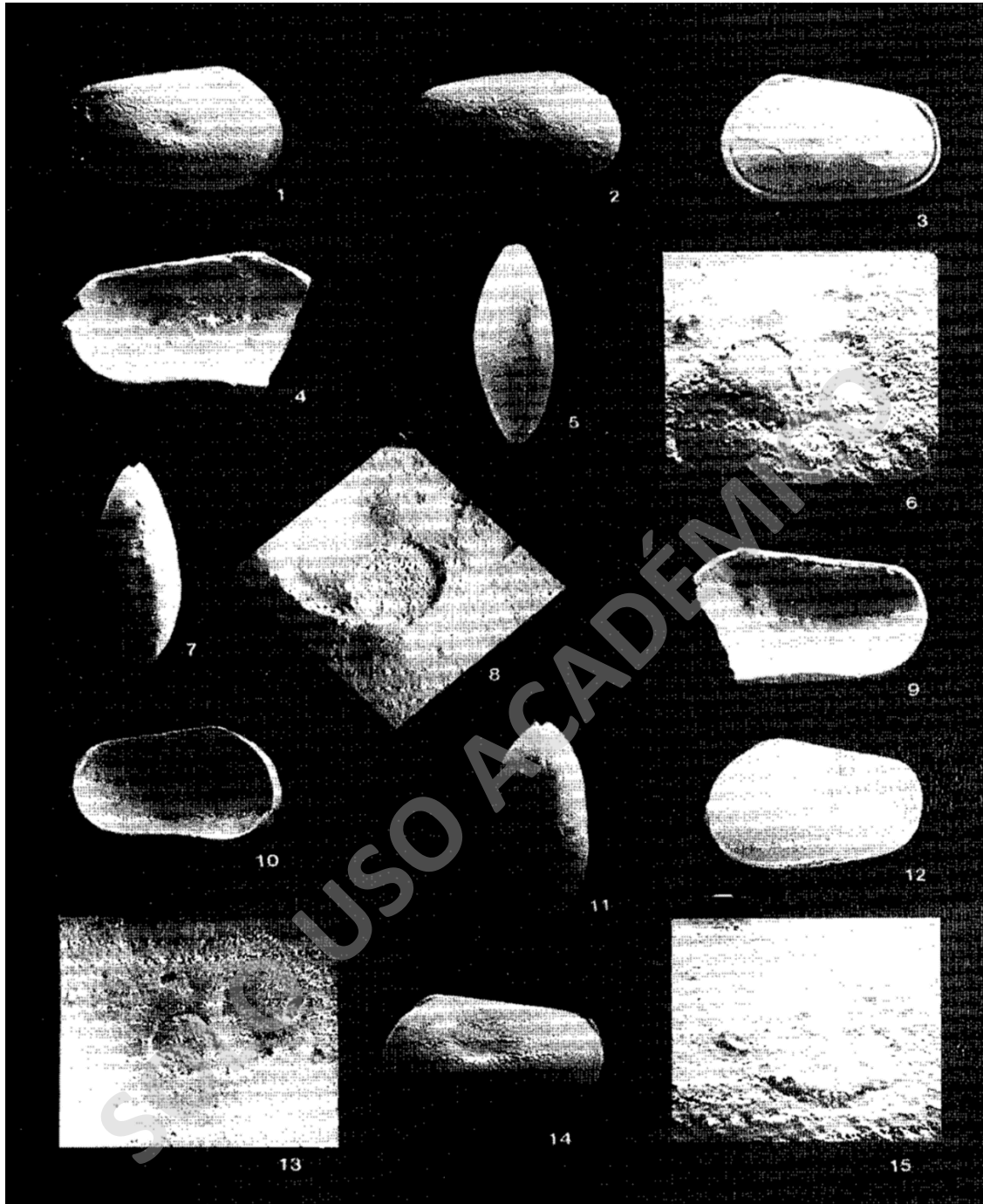
A su vez, fueron descritas muestras constituidas por diversos trozos de caliza muy silicificada, de gran dureza, que mantienen una fuerte reacción con el HCl diluido. Presentan moldes de ostrácodos rodeando restos de vertebrados. A partir de la unión de varias partes disociadas fue posible la realización de una mejor descripción del vertebrado. El esqueleto se encontraba dispuesto paralelamente a la estratificación y sus elementos se conservaron como moldes externos en la superficie de la roca, o bien con parte de la estructura ósea, siendo reemplazada por sílice. Los ostrácodos como el esqueleto de vertebrado son

indicadores de una depositación subacuática en un ambiente de continental de baja energía (Covacevich, 1981).

Ramirez & Gardeweg (1982) realizaron hallazgos de vertebrados en los Estratos El Bordo, correspondiente a Arcosaurios, Aetosauria, junto con la identificación de material no óseo correspondiente a improntas foliares (*Neocalamites* sp., *Taeniopteris* sp., y *Pterophyllum*) permitieron la asignación de los Estratos El Bordo al Triásico (Ramírez & Gardeweg, 1982).

Osorio y Rivano (1985) estudiaron muestras fósiles en niveles calcáreos pertenecientes a la Formación Pular, que corresponden a ostrácodos y compararon con muestras obtenidas del sector de la Sierra de Químal. Se analizaron sobre 300 especímenes, entre caparazones completos, valvas aisladas y moldes internos. Sus rasgos morfológicos fueron asociados a la familia de Paraparchitidae (figura 10), cuyo rango cronoestratigráfico se extiende desde el Devónico al Pérmico. Se les asignó aff. *Chamishaella* como una determinación tentativa a nivel genérico, aun cuando el borde ventral cóncavo y la ornamentación que desarrollan difiera de las formas lisas y bordes convexos del género *Chamishaella*, cuyo rango cronoestratigráfico, asignado por Sohn (1971, 1972), se asocia al Carbonífero Inferior-Pérmico, desde el Viséano al Changhsingiano Inferior (Osorio & Rivano, 1985).

Basso & Marinovic (2003) realizaron dataciones radiométricas en tobas dacíticas ubicadas en el sector Suroeste y Noreste de la Sierra de Químal de  $238,7 \pm 0,4$  Ma, asociando los Estratos El Bordo al Ladiniano (Basso & Marinovic, 2003). Estos datos fueron confirmados por Irmis et al (2021) donde se realizaron dataciones de Ar/Ar a clinopirozenos que entregaron una edad de  $240 \pm 0,6$ .



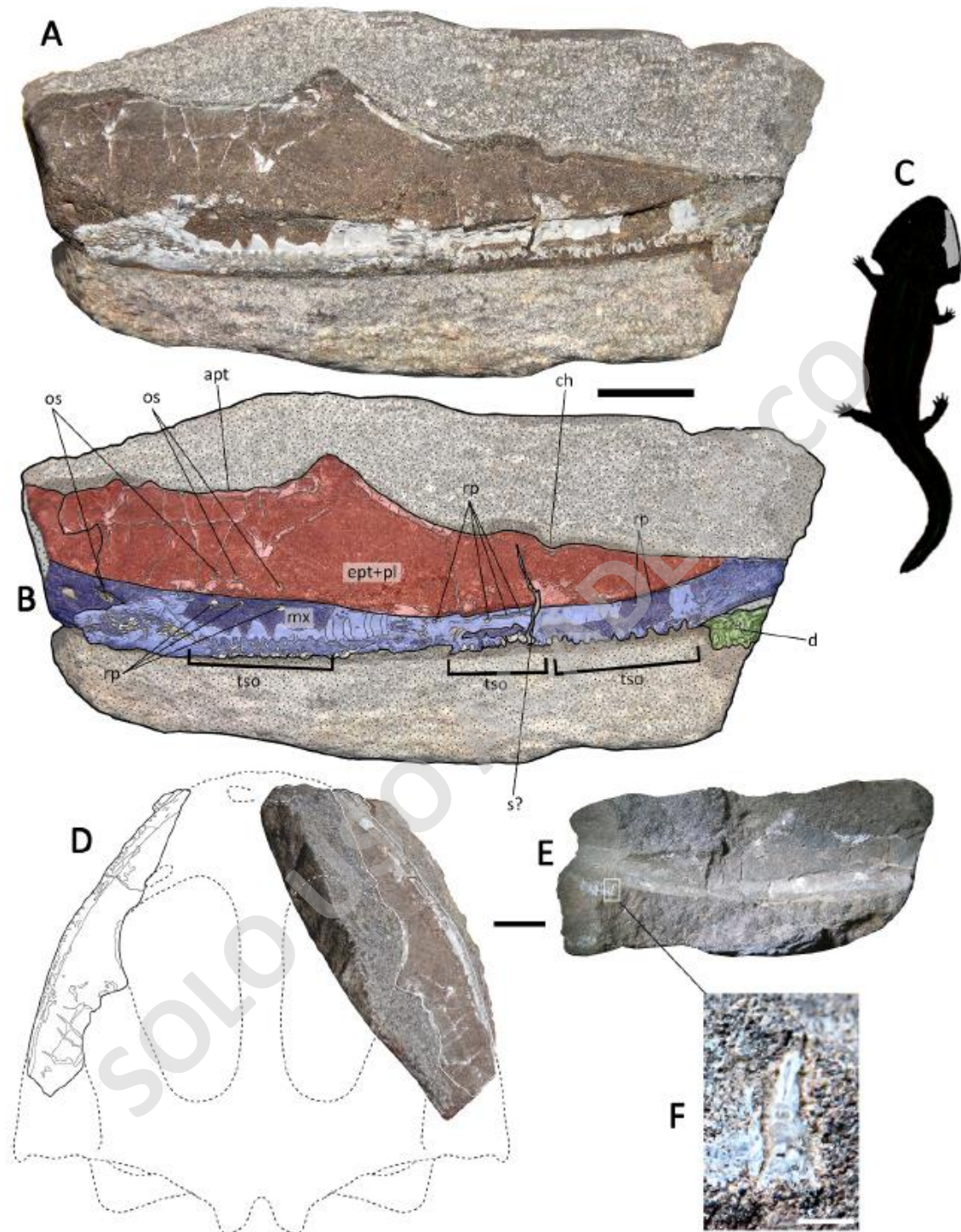
**Figura 10.** Muestras de ostrácodos recolectados y presentados por Osorio & Rivano (1985); 1. Vista externa, valva derecha; 2. Vista externa, valva derecha; 3. Molde interno, valva izquierda, es posible observar contorno de valva derecha; 4. Vista interna, fragmento de valva izquierda; 5. Vista dorsal, espécimen macho; 6. Detalle del área de impresiones musculares de (3); 7. Vista dorsal, espécimen macho; 8. Impresión mandibular y músculos aductores; 9. Vista interna, valva derecha; 10. Vista derecha, valva izquierda; 11. Vista dorsal, ejemplar hembra; 12. Molde interno, vista lateral derecha; 13. Detalle de impresiones musculares de (10); 14. Vista externa, valva izquierda, espécimen hembra; 15. Detalle de impresiones musculares de (12). Todas las figuras presentan un aumento de 12x, exceptuando (6), (8), (13), y (15) cuyo aumento es 50x.



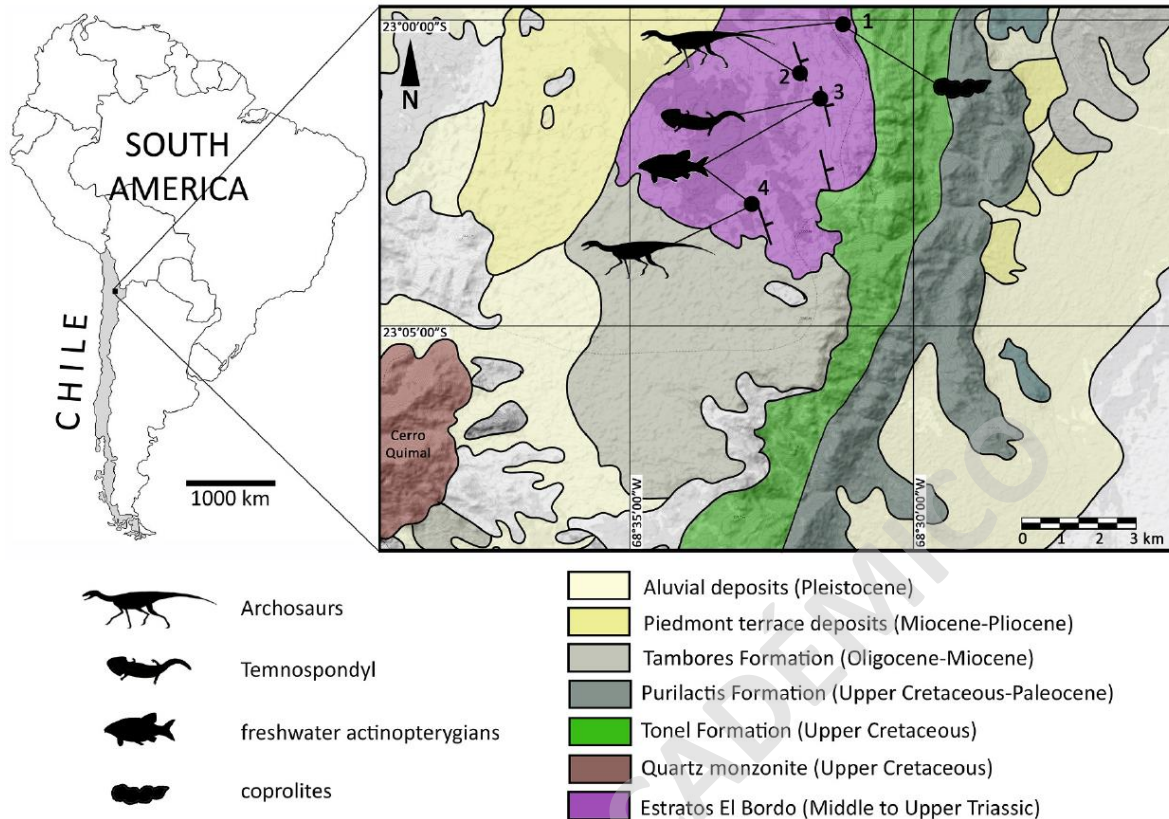


**Figura 11.** Correspondiente a un hueso asociado a un molde de reptil, donde la curvatura de la diáfisis y el tamaño concuerdan con las características de arcosaurios basales como aetosauria, sugiriendo una edad Triásica media-superior. Imagen extraída de Moreno (2001).

Otero et al. (2023) describió nuevos restos de vertebrados encontrados en la zona de estudio, incluyendo el primer registro de temnospóndilo (Fig 12) en la zona, además de actinopterigios referibles al clado Pseudobeaconiidae y una segunda forma con afinidades al pez óseo rayado *Guaymayenia paramillensis*. Estos nuevos vertebrados de agua dulce se suman a los registros previos de arcosaurios de Estratos El Bordo, representados por el aetosaurio *Chilenosuchus forttae*. Los vertebrados muestran afinidades con la diversidad conocida de la Cuenca Cuyana de Argentina, pero difieren de los registrados en el norte de Argentina (Cuenca Ischigualasto-Villa Unión) y el sur de Brasil (Cuenca de Paraná), sugiriendo una visión paleoambiental preliminar de los vertebrados continentales que habitaron en el margen suroeste de Sudamérica durante el Triásico. Junto con esto, se realizó un mapa general de la zona de estudio con zona donde se encontraron restos fósiles (Fig 13).



**Figura 12.** Temnospondyli indet. MUHNCAL.20,238, fragmento de cráneo. Punto 3 de la figura 13. A) Fotografía detallada del dorsolateral derecho; B) interpretación anatómica de lo anterior; C) Posición anatómica interpretada del fragmento de cráneo. D) Fragmento de cráneo y contorno con respecto a la vista central del cráneo; E) Contramolde del mismo fragmento de A y B; F) Primer plano de un diente conservado en contramolde. Extraído de Otero et al. 2023.



**Figura 13.** Mapa de la localidad estudiada y trazado de las principales unidades geológicas expuestas cerca del Cerro Químal, en la Región de Antofagasta, norte de Chile. Los círculos negros indican los puntos de procedencia. Extraído de Otero et al., 2023

### 3 Marco Teórico

#### 3.1 Estratigrafía y descripción estratigráfica

La estratigrafía es una ciencia que estudia los estratos y sus relaciones tanto espaciales como temporales. Uno de sus enfoques principales es buscar conocer a partir de la interpretación, los fenómenos acontecidos sobre la superficie de la Tierra gracias a la observación de los estratos. Esto a partir de distintos aspectos como la obteniendo el conocimiento del orden y condiciones de formación de estos, Y el conocimiento detallado de la naturaleza de las rocas, así como su contenido fósil, con la finalidad de poder determinar su génesis (Vera, 1994).

A través del cumplimiento de los aspectos mencionados, junto con la correlación temporal es posible insertar los datos locales y regionales de la zona, dentro de un contexto mucho

mayor, de manera que puedan precisar, elaborar y ser incluidos en la historia de la Tierra. (Vera, 1994)

## 3.2 Proveniencia sedimentaria

La proveniencia sedimentaria hace referencia a la fuente de la que proceden los sedimentos que componen las rocas sedimentarias, tomando en cuenta todos los factores contribuyentes a su formación (Dickinson, 1985; Arribas, 2010). Este concepto, en cuanto a petrología sedimentaria, tiene una connotación relacionada fuertemente con la composición modal de los depósitos sedimentarios (Dickinson y Suczek, 1979). Por esto, entender los diferentes procesos que afectan los sedimentos permite que se pueda llevar a cabo la reconstrucción de los ambientes de depositación y sus probables correlaciones. Aportando evidencias claves en el conocimiento de la evolución tectónica de una región en particular y la evolución paleogeográfica de cuanto a un contexto global (Sánchez y Centeno, 2000; Boggs, 2009).

Tanto las arenas como las gravas, al originarse como partículas sólidas pueden conservar la composición y la textura de la roca de la cual estas derivan, reflejando la marca original de la roca fuente (Sánchez y Centeno, 2000). Sin embargo, las muestras más utilizadas debido a que permiten analizar una porción estadísticamente más representativa del depósito son las areniscas. Ya presentan el tamaño suficientemente pequeño para poder observar en una sola lamina delgada, una cantidad considerable de granos (Sánchez y Centeno, 2000; Arribas, 2010).

Dickinson et al. (1983) Plantearon es posible determinar la naturaleza de la roca de fuente a partir de las proporciones relativas de los distintos tipos de granos de tamaño arena en el terreno de proveniencia de la cual derivan. Tanto las áreas de proveniencia como las cuencas de depositación pueden clasificarse de acuerdo con sus características tectónicas.

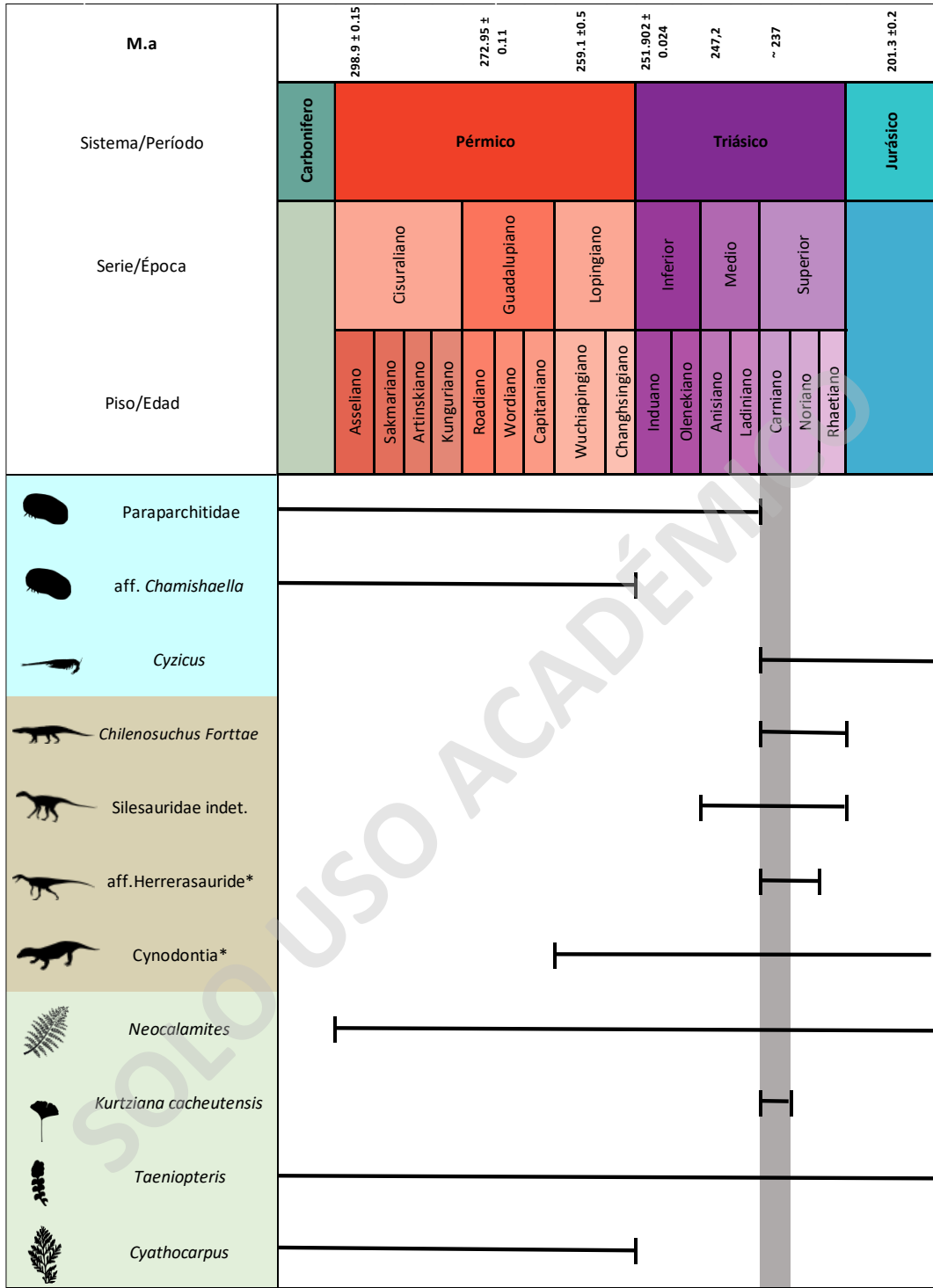
## 4 Formulación del estudio

### 4.1 Problemática

A pesar de ser un área de gran abundancia de información paleontológica y haber una serie de trabajos que describen y asocian las unidades del sector de Sierra de Químal y los Estratos El Bordo, el nivel de detalle de estos estudios, junto con la metodología descriptiva de los datos espaciales del registro fósil, sugieren una falta de acuerdo en cuanto la edad de las unidades correspondientes a los Estratos El Bordo (Tabla 1). Junto con una carencia en cuanto al detalle estratigráfico de sus estratos.

<b>TABLA COMPARATIVA DE POSIBLE RANGO DE EDAD DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>									
<i>Sistema/ Periodo</i>	<i>Serie/Época</i>	<i>Piso/Edad</i>	Autores						
			<i>Fortt. (1976, 1981, 1982)</i>	<i>Covacevich. (1981)</i>	<i>Ramírez &amp; Gardeweg (1982)</i>	<i>Osorio &amp; Rivano. (1985)</i>	<i>Moreno. (2001)</i>	<i>Basso &amp; Marinovic. (2003)</i>	<i>Irmis et al. (2022)</i>
Triásico	Superior	Rhaetiano		"Estéridos"	Arcosaur_ ios y vegetales	Recopi_ lación de inform_ ación de distinto s autores	CA-TIMS	CA-TIMS Recalculo	
		Noriano							
		Carniano							
	Medio	Ladiniano	Litocorreación						
		Anisiano							
	Inferior	Olenekiano							
Induano									
Pérmico	Lopingiano	Changhsingiano			Chami_ shaella y vegeta_ les	Recopi_ lación de inform_ ación de distinto s autores	CA-TIMS	CA-TIMS Recalculo	
		Wuchiapingiano							
	Guadalupiano	Capitaniano							
		Wordiano							
		Roadiano							
	Cisuraliano	Kunguriano							
		Artinskiano							
		Sakmario							
		Asseliano							

**Tabla 1.** Tabla comparativa de posibles rangos de edad para los estratos El Bordo, basada en la cronoestratigráfica internacional 2022, e información de estudios previos que abordan la zona de estudio y el motivo de la asociación que se les dio a las unidades. Se observa la gran variedad de rangos dadas por los distintos autores que han abordado la zona de estudio.



**Tabla 2.** Comparativa de biocrones del registro fósil descrito en el área de Sierra del Químal. Se observa un claro rango de mayor asociación fósil durante el piso Carniano. Dos géneros cuyo biocrón desaparece en el Pérmico tardío están también representados. El rango gris corresponde a la biozona de coincidencia de acuerdo con la información del registro fósil que se ha recolectado por distintos autores. La descripción de *Cyathocarpus* y *Chamishaella* pueden deberse al posible retrabajo fosilífero. Debido a la falta de coincidencia en algunos registros hay que considerar que la información bioestratigráfica proviene de distintos lugares y por tanto distintos niveles. Tanto el *Cynodontia* como el aff. *Herrerasauride* son muestras se incluyen a partir de la comunicación personal con Sergio Soto Acuña.

## 4.2 Hipótesis de trabajo

A partir de toda la información que hay de la zona de estudio, podemos relacionarla a un sector con un gran potencial de preservación fosilífera, y una asociación más detallada de ambiente puede permitir expandir considerablemente su potencial en cuanto a las investigaciones paleontológicas futuras en el área.

Tomando en cuenta los trabajos realizados en la zona, la hipótesis de este trabajo es que los niveles pertenecientes a Estratos El Bordo se asocian a ambientes de depositación lacustre y de llanuras de inundación.

## 4.3 Objetivos

### 4.3.1 Objetivo General

Proponer un modelo de ambiente sedimentario para Estratos El Bordo, en la zona de la Sierra de Químal, junto con una propuesta relacionada al estado estratigráfico.

### 4.3.2 Objetivos específicos

Caracterizar la litología asociada la zona de interés, incluyendo el detalle espacial de las agrupaciones de su contenido fósil.

Observar y detallar el contacto presente entre estratos que presenten variaciones litologías y de contenido fosilífero.

Realizar columnas estratigráficas representativas de la zona.

Generar propuestas de ambientes de depositación para las rocas que afloran en la zona de la Sierra de Químal.

Generar una propuesta sobre el estado estratigráfico de los Estratos El Bordo a partir de la información obtenida.

## 4.4 Metodología

La metodología aplicada durante la elaboración de este trabajo fue dividida en tres etapas, las cuales fueron basadas en la preparación del terreno y recopilación de información bibliográfica, correspondiente al Trabajo de gabinete 1; la recolección de datos en terreno, correspondiente al Trabajo en terreno; y su respectivo análisis, correspondiente al Trabajo de gabinete 2.

### 4.4.1 Trabajo gabinete 1

Corresponde a la etapa previa a la salida de terreno donde mediante la utilización de herramientas de recopilación de imágenes satelitales como Google Earth se ubicó la zona de estudio en el mapa. Hizo un reconocimiento de las principales rutas de acceso al área de estudio y se confeccionó un mapa a través del software ArcGIS (figura 15), Éste se basó en la fotointerpretación de distintas unidades presentes, mediante el reconocimiento de colores y texturas de las rocas del sector, usando de apoyo las cartas geológicas realizadas en la región de Antofagasta, tanto de Fortt & Frutos (1976) como Basso (2012). Con ello se realizó una columna esquemática de la zona de estudio (figura 15). Junto También se realizó la recopilación de información bibliográfica de los trabajos en el sector o que hayan abordado la zona de estudio.

### 4.4.2 Trabajo en terreno

Se realizó una campaña de terreno durante la primera quincena del mes de Julio 2022, a fin de recopilar información sobre las litologías presentes en el sector de la Sierra de Químal, junto con la descripción y detalle espacial del registro fósil presente. Esta información es recopilada y utilizada en la confección de múltiples columnas estratigráficas y perfiles. También se recolectaron muestras para cortes transparentes que aportan un mayor detalle a la descripción petrográfica de las rocas.

Durante la elaboración de este estudio se utilizaron los siguientes sistemas de clasificación usándolos como estándar descriptivo para facilitar la comparación con descripciones realizadas por otros autores:

- i. Diagrama QAPF de Streckeisen (1976): Descripción de rocas ígneas intrusivas
- ii. Diagrama QFL de Folk (1980): Descripción de rocas sedimentarias
- iii. Diagrama de Dunham (1966) Con el fin de clasificar rocas calcáreas



Durante esta campaña fueron designados distintas zonas para el levantamiento de columnas, cuyos puntos fueron tomas por un GPS Garrmin en sistema de coordenadas geográficas, de grados decimales, utilizando datum WGS84. Estos puntos fueron registrados de comienzo a fin de cada una de las secciones estratigráficas. Al igual que frente a las variaciones laterales y verticales de los distintos niveles estudiados (tabla 3).

La recolección de muestras se realizó mediante un martillo estratigráfico y geológico. Las muestras correspondían principalmente a limolitas y areniscas de diversas granulometrías, junto con lavas. Se extrajeron de forma orientada y en dimensiones promedios de 15 x 15 cm<sup>2</sup>. Las muestras fueron registradas en base al código:

AAMMDD/N

AA representa a los últimos dos dígitos del año de la campaña, MM al mes, DD al día de trabajo, y N al número de las muestras que fueron tomada aquel día. Permitiendo de esta manera que la fecha permita una combinación numérica única para el código de la muestra que sea extraída.

#### **4.4.3 Trabajo de gabinete 2**

Esta última etapa, procedió desde el 20 de Julio del 2022 hasta el 31 de Julio del 2022. Se analizaron los datos obtenidos durante la campaña de terreno y se contrastaron con la información recopilada a partir de informes y estudios anteriores. Se procedió al análisis de muestras de mano las muestras recopiladas durante el trabajo anterior. Finalmente se procedió a la confección más detallada de las columnas estratigráficas realizadas con anterioridad y actualización del mapa de la zona que fue realizado durante el trabajo de gabinete 1 para poder conocer la distribución y ordenamientos de las unidades en el sector de Sierra de Químal. Durante este trabajo fueron excluidas las sucesiones de lavas cubiertas que se encuentran entre los miembros sedimentarios descritos. Ya con este trabajo realizado, se pueden cumplir objetivos propuestos con anterioridad en el punto 4.3.

#### **4.4.4 Confección columna estratigráfica**

Para la confección de la columna estratigráfica se consideró la medición de los estratos en forma perpendicular a sus planos de estratificación, utilizando un bastón con una escala graduada cada 10 cm (bastón de Jacob). En la zona de estudio se realizaron 4 secciones

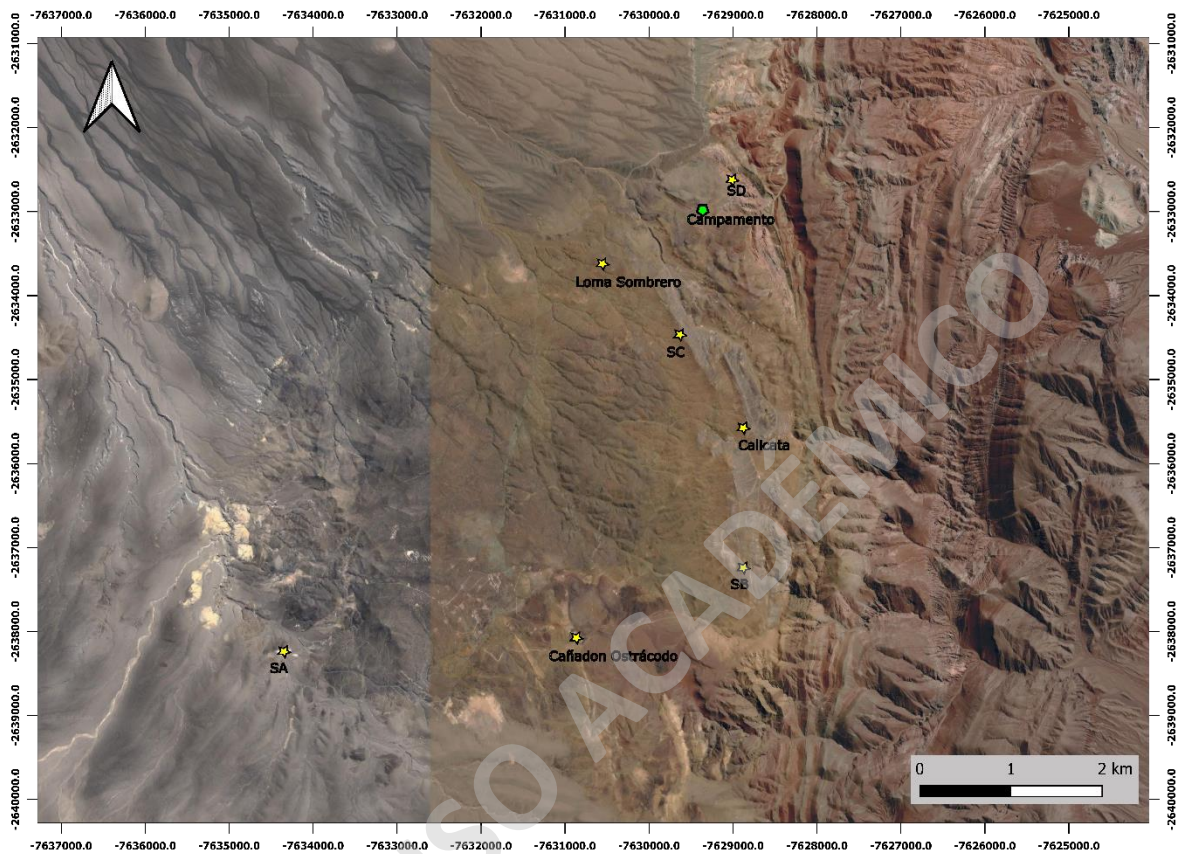
estratigráficas principales y 3 secciones menores (figura 14), las cuales fueron agrupadas en una única columna estratigráfica.

Las caracterizaciones geológicas de los distintos niveles estratigráficos en el afloramiento consistieron en el reconocimiento de contactos, estructuras sedimentarias, aspectos granulométricos, fosilíferos y cromáticos de sus respectivas litologías. En la identificación granulométrica se utilizó un comparador visual de sedimentología de Benvenuto y Paris (2018), mientras que, para la caracterización del aspecto cromático, se utilizó la carta de colores para roca producido por Munsell Rock Color Chart (2009). Datos estructurales que fueron tomados por unan brújula geológica y sus datos fueron registrados a partir de la anotación de la mano derecha.

La tabla 3 muestra las coordenadas (en forma de grados, minutos y segundos) tanto del campamento levantado en campaña, como de cada una de las secciones, tanto principales como menores, de la transecta SW – NE nombrada transecta Loma Peluda-Quebrada del Descanso, compuesta por la Sección principal A, B, C y D.

<i>Secciones principales</i>	<i>Coordenadas</i>		<i>Altura (msnm)</i>
	<i>19k</i>	<i>UTM</i>	
Campamento	547622	7455474	3267
SA	543004	7450654	3237
SB	547383	7454152	3294
SC	547926	7451673	3331
SD	547912	7455915	3258
<i>Secciones secundarias</i>			
Cañadón Ostrácodo	546170	7450834	3295
Calicata	548012	7453150	3323
Loma Sombrero	546458	7454980	3260

**Tabla 3.** Tabla de coordenadas geográficas de las 4 secciones principales levantadas en la transecta Loma Peluda – Quebrada del Descanso, en la zona de estudio, junto con las coordenadas de las 3 secciones secundarias levantadas y la posición del campamento.



**Figura 14.** Mapa de la zona de estudio con los puntos correspondientes a la zona en los que se recaudó la información para el levantamiento de las columnas estratigráficas ubicación de zona de estudio y rutas de acceso. Las marcas amarillas indican la ubicación de los puntos donde se realizaron estudios estratigráficos y la marca verde en el mapa muestra la ubicación del campamento.

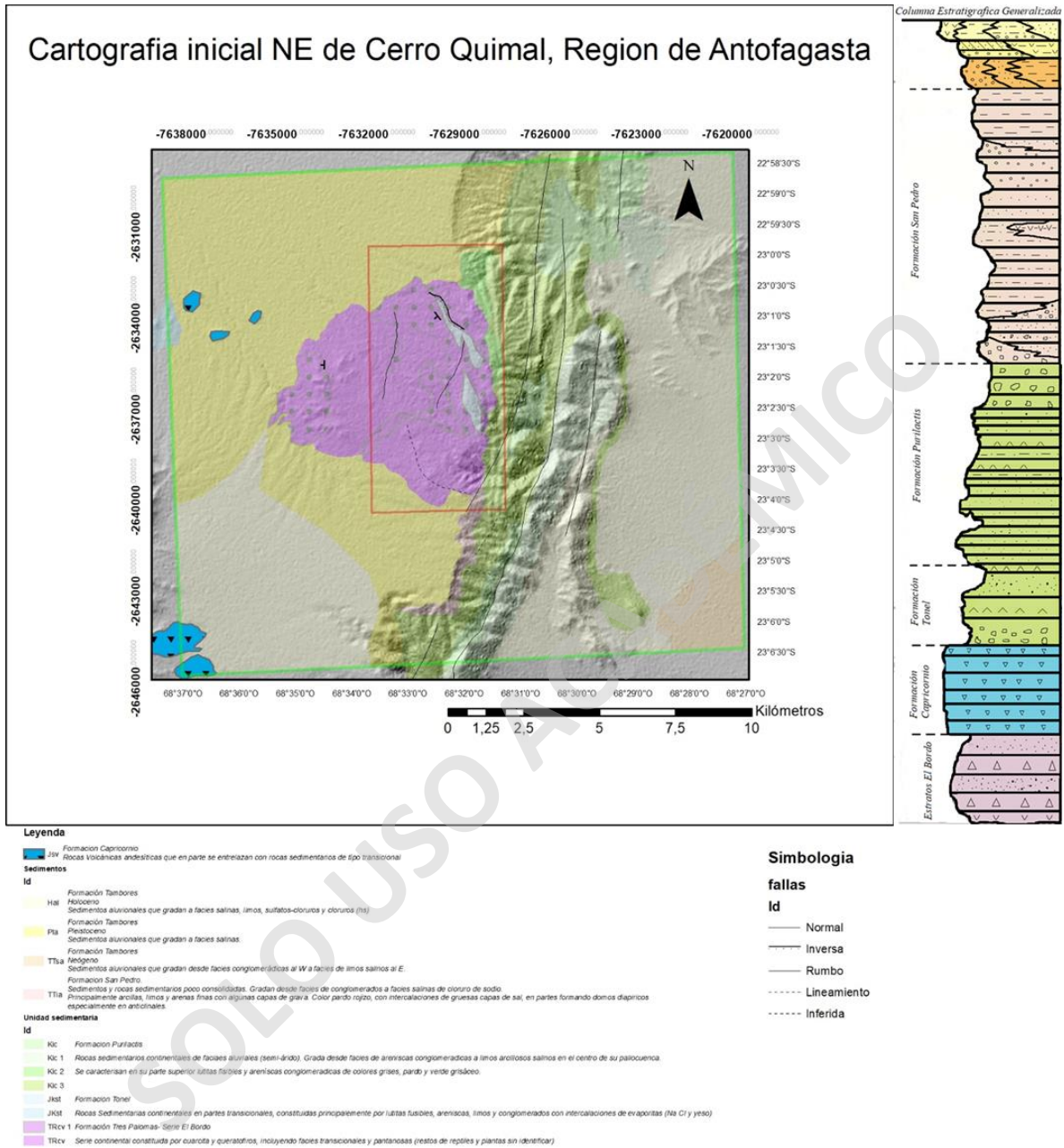
## 5 Resultados

### 5.1 Estratigrafía

Las secciones estratigráficas de la campaña 2022 fueron levantadas en puntos específicos siguiendo una transecta SW-NE. Considerando 4 secciones principales y 3 secundarias, donde una primera parte aborda de manera continua la sección SA (fig 17a y b), continuando con la sección SC (fig 20), complementada por la sección auxiliar Cañadón Ostrácodo (fig 23) y Loma Sombrero. La tercera parte correspondiente a la sección SB (fig 28), complementada por la sección secundaria Calicata. Finalizando con la Sección SD (fig 34). A partir de esta información se generó una columna compuesta total de 550 m de espesor, los cuales presentan capas cubiertas entre miembros que consisten en sucesiones de lavas que no fueron incluidas en las mediciones de la columna.

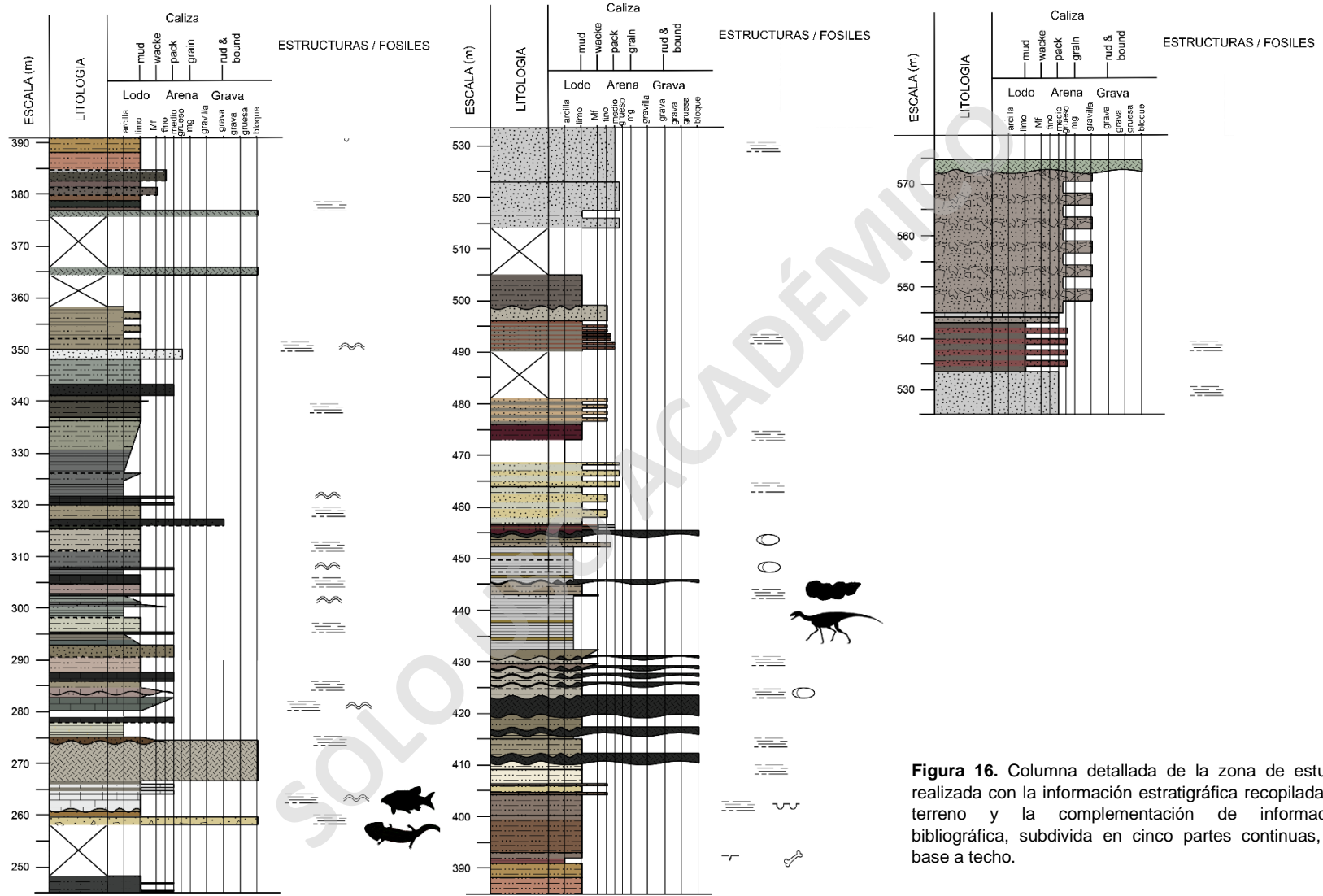
A grandes rasgos, Estratos El Bordo se caracteriza por presentar en su base una sucesión de limolitas de color grisáceo y calizas con pequeñas intercalaciones de arena media y predominancia de calizas microcristalinas hacia el techo. Esta intercalación de areniscas medias presenta una fauna de vertebrados tanto dulceacuícolas como continentales. En su sección media se presentan intercalaciones de lutitas y limolitas con presencia de restos de vertebrados dulceacuícolas y continentales correspondientes a Temnospondilos. Hacia el techo se presentan intercalaciones de arena fina y media con presencia de restos de arcosaurio, coprolitos y troncos fósiles. Esta sucesión presenta una gradación normal llegando a arenas gruesas y conglomerados en su sección superior, sin presencia de resto orgánico.

A continuación, se muestra un mapa de la cartografía inicial de la zona de estudio y sus unidades aledañas (fig 15). Y posteriormente la columna detallada de la zona de estudio junto con la leyenda y simbología que se utilizara. Las capas cubiertas entre miembros tanto primarios como secundarios no fueron incluidas en la medición (Fig 16). Para posteriormente presentar la descripción en detalle de las características litológicas de cada uno de los horizontes estratigráficos de los Estratos el Bordo presentes en la Sierra de Quimal.



**Figura 15.** Mapa preliminar y columna estratigráfica esquemática de unidades geológicas abarcando la zona de estudio, ubicadas al noreste del Cerro Quimal, Región de Antofagasta, utilizando el software ArcGIS y basándose en los trabajos de Fortt & Frutos (1976) y Basso (2012): a. muestra unidades que van desde el periodo Triásico hasta el periodo Holoceno, mostrando los Estratos El Bordo como parte del periodo Triásico Superior-Triásico medio; b. Perfil estratigráfico generalizado de la zona del cuadrángulo del Cerro Quimal, donde se observan la unidad perteneciente a los estratos El Bordo como parte de la base de la zona sin conocimiento de su potencia total o unidad inferior.

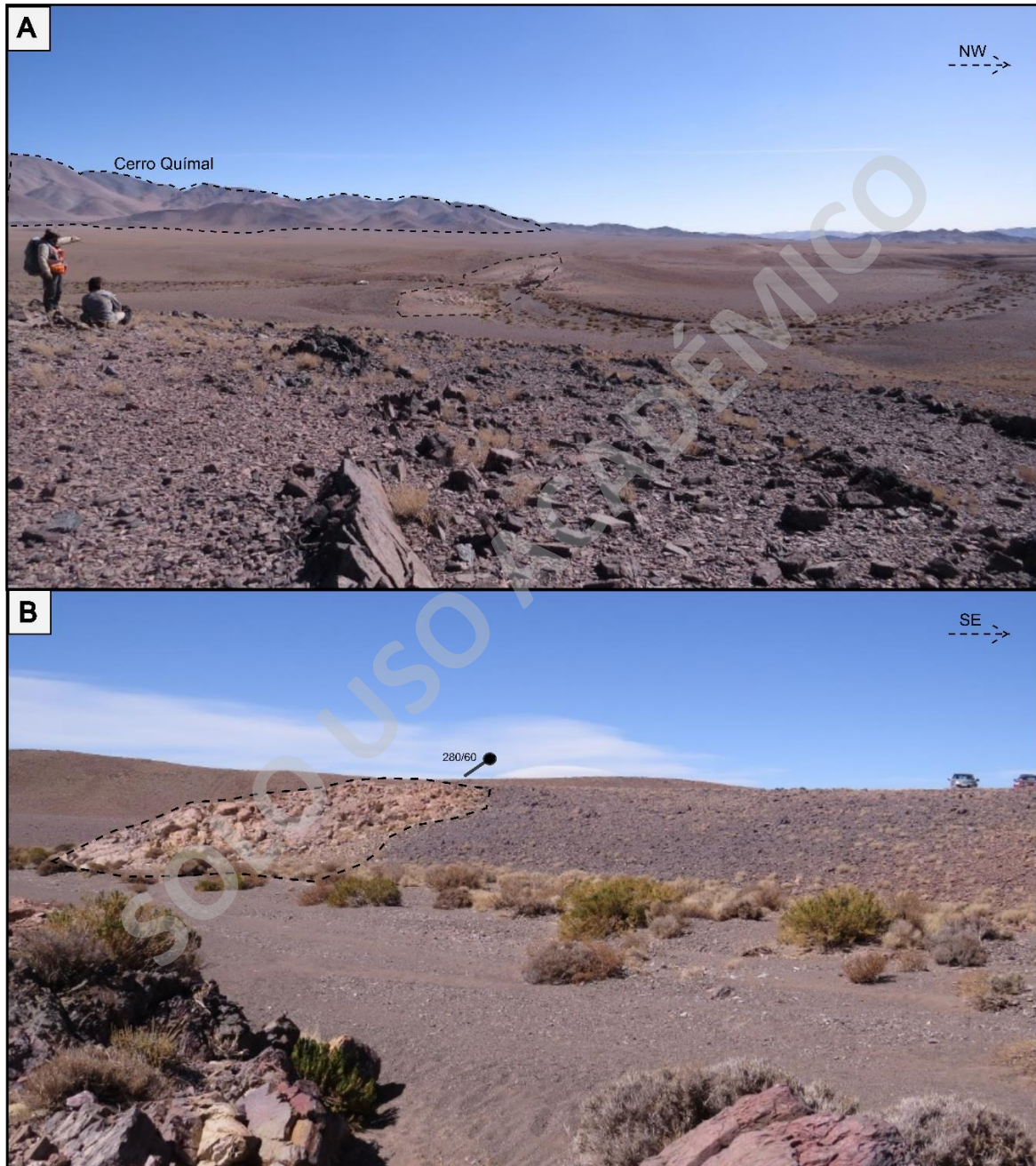




**Figura 16.** Columna detallada de la zona de estudio realizada con la información estratigráfica recopilada en terreno y la complementación de información bibliográfica, subdivida en cinco partes continuas, de base a techo.

### 5.1.1 Sección estratigráfica SA, Loma Peluda

Esta sección aflora en el sector SW de la zona de estudio (fig 14), presentando una orientación 280 y 60° de inclinación en el plano horizontal.



**Figura 17.** Fotos de la zona correspondiente al sector de Loma peluda. Es posible observar una vista en dirección SW (a) y NE (b). a) Es posible observar parte del Cerro Químal hacia el SW al igual que un pequeño cambio litológico marcado entre líneas. B) Se puede observar los cambios de litología entre lavas y rocas sedimentarias de grano fino a muy fino en la zona entremarcados y al igual que la orientación de los estratos. Las camionetas observadas en la imagen presentan una altura aproximada de 2.8 m de altura.



La columna comienza en su base con una capa delgada de limolita maciza subyaciendo una capa de caliza cristalina con presencia de cavidades rellenas con sílice de hasta 5mm. Siendo superpuesta por lavas dacíticas porfíricas.

La columna comienza en su base con intercalaciones de limolitas macizas y silicificadas con presencia de óxidos de hierro (FeOx), junto con capas de calizas cristalinas con presencia de cavidades rellenas con sílice en los niveles inferiores y vetillas de cuarzo. Intercaladas con niveles de lavas dacíticas porfíricas con feldespatos alterados a FeOx y patinas de Óxidos de Cobre (CuOx). Finalizando este nivel con una capa de calizas mudstone intercaladas con fragmentos terrígenos tamaño grava fina, con líticos subredondeados.

Posteriormente se presentan limolita silicificada en contacto concordante con capas de areniscas calcáreas polimicticas con cuarzo subredondeado dominante (Fig 18a) sobreyaciendola. Seguido de un nivel de caliza microcristalinas con bandas centimétricas de limolita calcárea en su techo donde se observan restos de vertebrados indiferenciados.

Sobreyaciendo el nivel previo se presentan lutitas silicificadas que transcicionan a calizas microcristalinas y luego microcristalina con nodlos de 0,5 c, aproximadamente. Seguido de una sucesión de limolita silicificada con presencia de vetillas de calcita, areniscas calcáreas intercalada con láminas de limolita en su techo, las cuales posteriormente aumentan su concentración y presentan intercalaciones dos tonos en capas de 2 a 3 cm. Las cuales en su techo se encuentran en contacto con tobas riolitas de 700 cm de espesor con un variado contenido de FeOx y alteración ferruginosa en fiames.

Finalmente la parte superior de la secuencia presenta calizas microcristalinas en contacto concordando con la capa inferior. Presenta lentes arcillosos discontinuos y fracturas rellenas con FeOx. Las figuras lenticulares contienen arena media polimíctica con tonos más claros en su techo (fig 18b).

A partir de los datos recopilados se generó una columna estratigráfica detalla de la sección (Fig. 19).



**Figura 18.** a) Arenisca calcárea sobreyaciendo a limonita silicificadas en contacto concordante neto, correspondiente a los niveles presentes ente los 16,5 y 17,5 m de potencia de a columna. b) caliza microcristalina con lentes arcillosos observable en laminas blancas marcadas.

Columna estratigráfica sección Loma Peluda

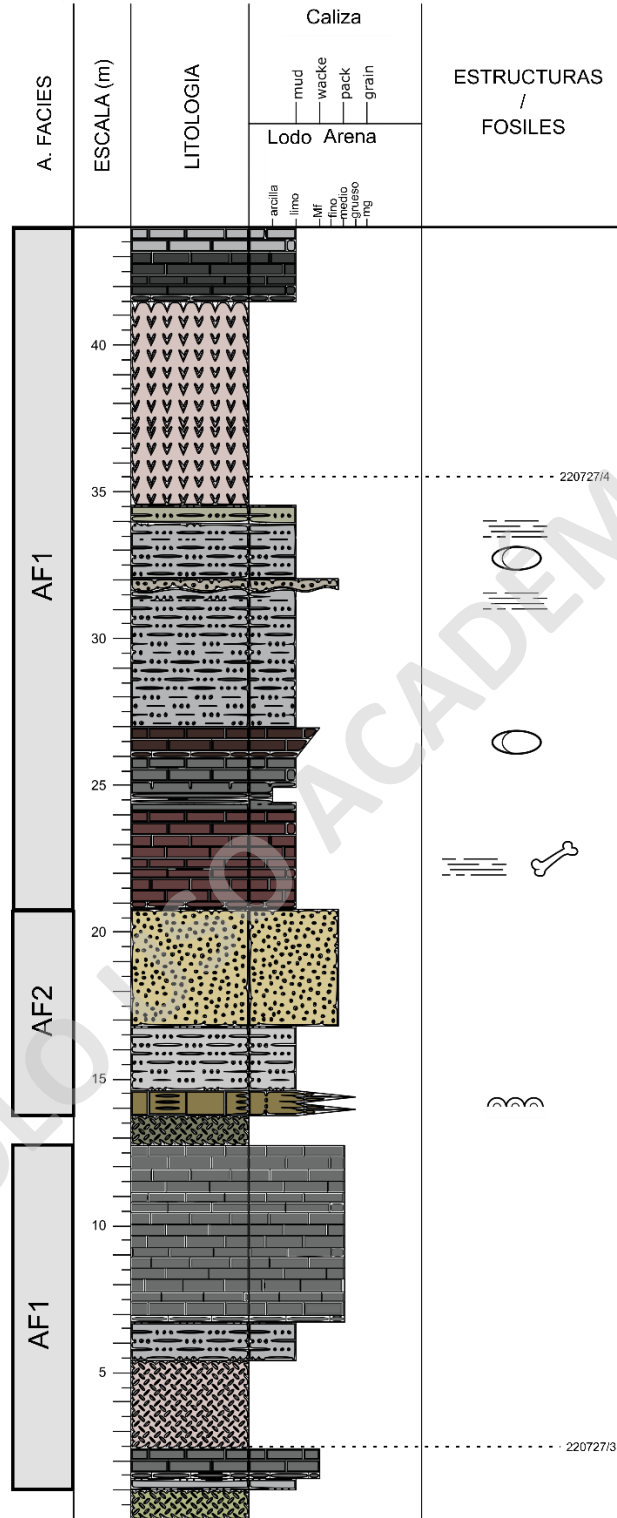


Figura 19. Columna estratigráfica correspondiente a la sección de loma peluda con sus respectivas facies asociadas. Se marcaron con líneas punteadas los códigos correspondientes a niveles donde se obtuvieron muestras para realización de cortes transparentes para análisis.

### 5.1.2 Sección estratigráfica SC, Loma Herrera

Esta sección aflora en el sector E de la zona de estudio (fig 14), la descripción estratigráfica se ve apoyada por las secciones secundarias Loma sombrero y Cañadón Ostrácodo, descritas en la subsección 5.1.3. Presenta un rumbo de  $318^\circ$  y  $50^\circ$  de manteo.



**Figura 20.** Imagen correspondiente a la zona de Loma Herrera con una vista hacia el sureste. Se aprecian rocas expuestas con inclinación hacia el Noreste. Es posible observar cambios de tonos a la distancia relacionadas con el contraste entre las zonas con una mayor concentración de vegetación y aquellas con rocas expuestas con mayor facilidad a la erosión de la zona. Las camionetas observadas en la imagen poseen una altura aproximada de 1.8 m.

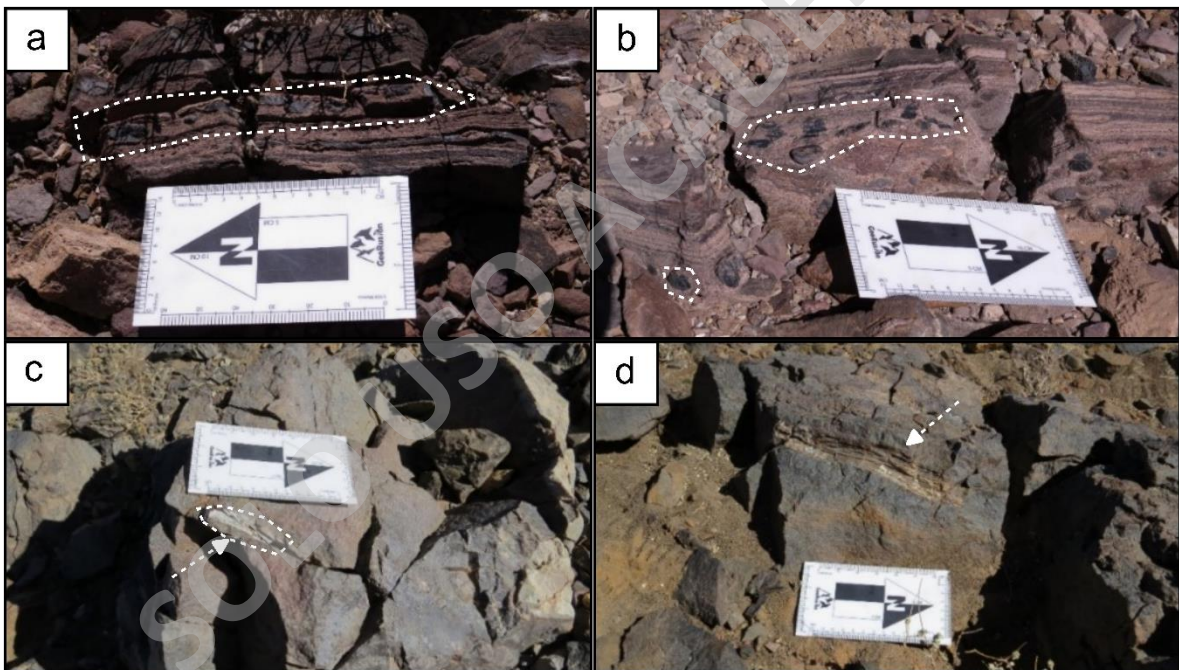
Sobre una base de lava porfidoblastica parcialmente cubiertas se presenta una intercalación de limolita con areniscas que van de arena media a muy gruesa, con laminación plano-paralela la cual hacia el techo comienza a presentar ondulitas y trazas fósiles de moldes que cruzan los niveles de sedimento fino y muy fino (Fig 21a y 21b). presentando también una mayor silicificación hacia el norte, con presencia de laminación y restos de madera fósil (Fig 21c y 21d).

Siguiendo se presentan niveles cubiertos con exposición parcial de lavas afaníticas con presencia de vetillas de carbonato, seguido de niveles de caliza cristalina paquidérmica con

una variación lateral con una segunda ocurrencia de estromatolitos en la sección, seguidos de un nivel de limolita calcárea en su techo.

Siguiendo se aprecian niveles con intercalaciones de caliza microcristalina y limolita calcárea subordinada con bandas leves silicificadas. Seguido de un nivel de caliza cristalina con ocasional desarrollo de concreciones y vetillas cristalinas perpendiculares ala estratificación en el techo.

La sección finaliza con un nivel de wackstone masiva en su porción basal, con desarrollo de textura microcristalina en la sección media. La cual cambia a mudstone, finalizando con yeso de deflación, activo.



**Figura 21.** a) intercalaciones de limolita con arenisca media a gruesa, estratificación paralela y contacto sinuoso ente ellas, junto con presencia de ondulitas y presencia de ostrácodos asociado al nivel presente entre los 20 y 22 metros de la columna local; b) trazas fósiles de moldes que cruzan los niveles de limolitas como de areniscas y ostrácodos hacia el techo del nivel; c) continuación del nivel de limolita, con mayor silicificación y fracturas rellenas con yeso d) Madera fósil presente en los niveles de limolita arenosa silicificada, asociada al nivel entre los 22 y 27 metros de la columna local.

Columna estratigrafica seccion Loma Herrera

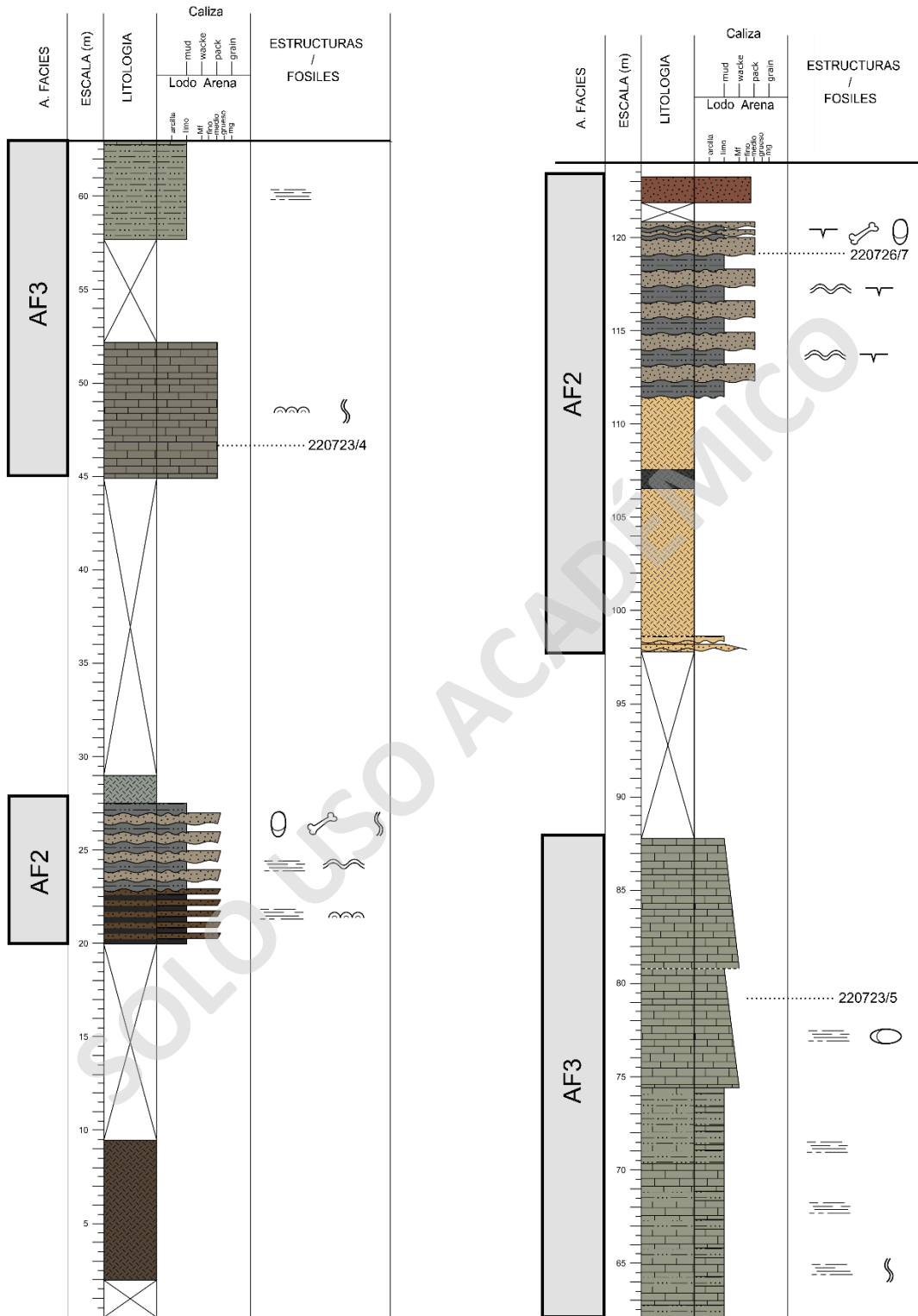


Figura 22. Columna estratigráfica correspondiente a la sección de Loma Herrera, subdivida en dos partes continuas, "de base a techo, con sus respectivas facies asociadas. Se marcaron con líneas punteadas los códigos correspondientes a niveles donde se obtuvieron muestras para realización de cortes transparentes para análisis. Esta columna incluye partes de la sección auxiliar de cañadón Ostrácodo a partir de los 97,5 metros.

### 5.1.3 Sección estratigráfica secundaria, Cañadón Ostrácodo

Esta sección aflora al SW de la sección SC, y al W de la sección SB (fig 14). Presenta un rumbo de  $335^\circ$  y  $45^\circ$  de manto.



**Figura 23.** Imagen correspondiente a la zona de la sección complementaria de Cañadón Ostrácodo con una vista hacia el Este. En primer plano es posible observar la porción de nivel expuesto en la zona con su plano de inclinación, marcado con una línea negra continua. Marcado en línea punteada se observa un afloramiento correspondiente a la sección de la Quebrada Peces, descrita en la subsección 5.1.4. la flecha negra apunta a un vehículo de altura aproximada de 1,8 m para mostrar una escala de las dimensiones observables en la imagen.

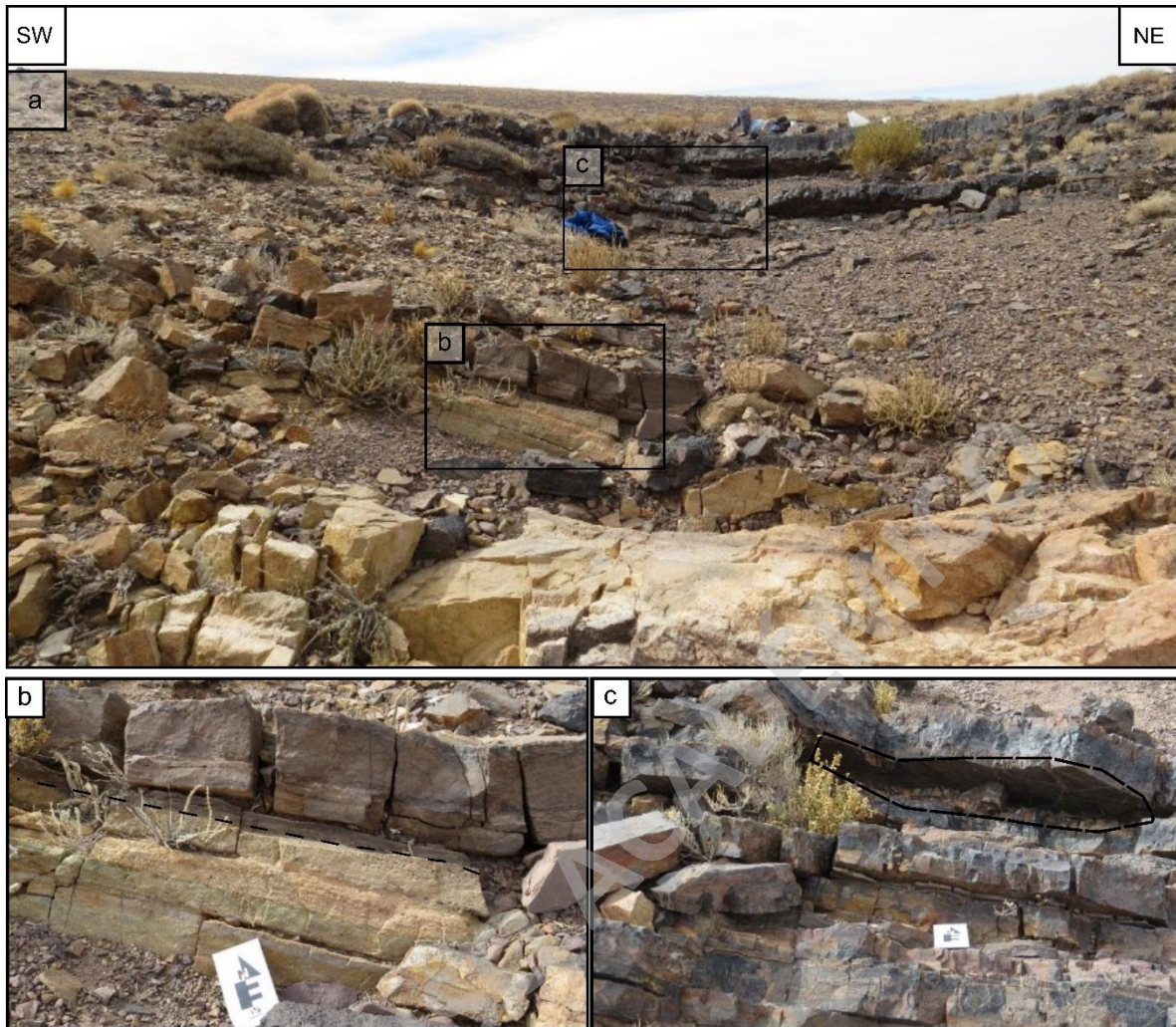
Esta sección presenta intercalaciones de capas centimétricas de lavas con niveles de arena fina y media con contactos ondulados entre ellas, con un nivel de limolita en su techo el cual es cortado por un cuerpo ígneo masivo, el cual a su vez se encuentra en contacto con cuerpos ígneos, tabulares paralelos al plano de estratificación (Fig 24). Los cuales presentan un fallamiento inverso al sector Este de la sección. Siguiendo se presenta una sucesión sedimentaria de limolitas con intercalaciones de areniscas medias subordinadas con gradación normal, donde se reconocen grietas de desecación, calcos de carga y presencia de láminas conteniendo moldes de conchostracos en la zona basal (Fig 25a y 25b) y presencia de restos de vertebrados en su techo (Fig 26). Finalmente, el techo de la

sección presenta una sucesión sedimentaria de conglomerado polimíctico, limolitas macizas y niveles con gradación de limo a arena fina sin estructuras aparentes.



**Figura 24.** Lava oscura con fracturamiento paralelo a los planos de estratificación y en contacto con cuerpo ígneo masivo. Presenta un fallamiento inverso local.





**Figura 25.** a) Imagen del sector medio de la columna donde se observan las distintas litologías presentes. Asociada los niveles presentes entre los 12 m y los 22 m aproximados de potencia. b.) Secuencia sedimentario de limolitas masivas predominantes, con intercalaciones de areniscas medias subordinadas con contacto concordante entre ellas; c) Se reconocen grietas de desecación junto con ondulitas simétricas.



**Figura 26.** Arenisca de tamaño de grano fino de tono rojizo con presencia de restos fósiles de vertebrado indeterminado. Presente en el nivel asociado a los 25 m de potencia en la columna local.

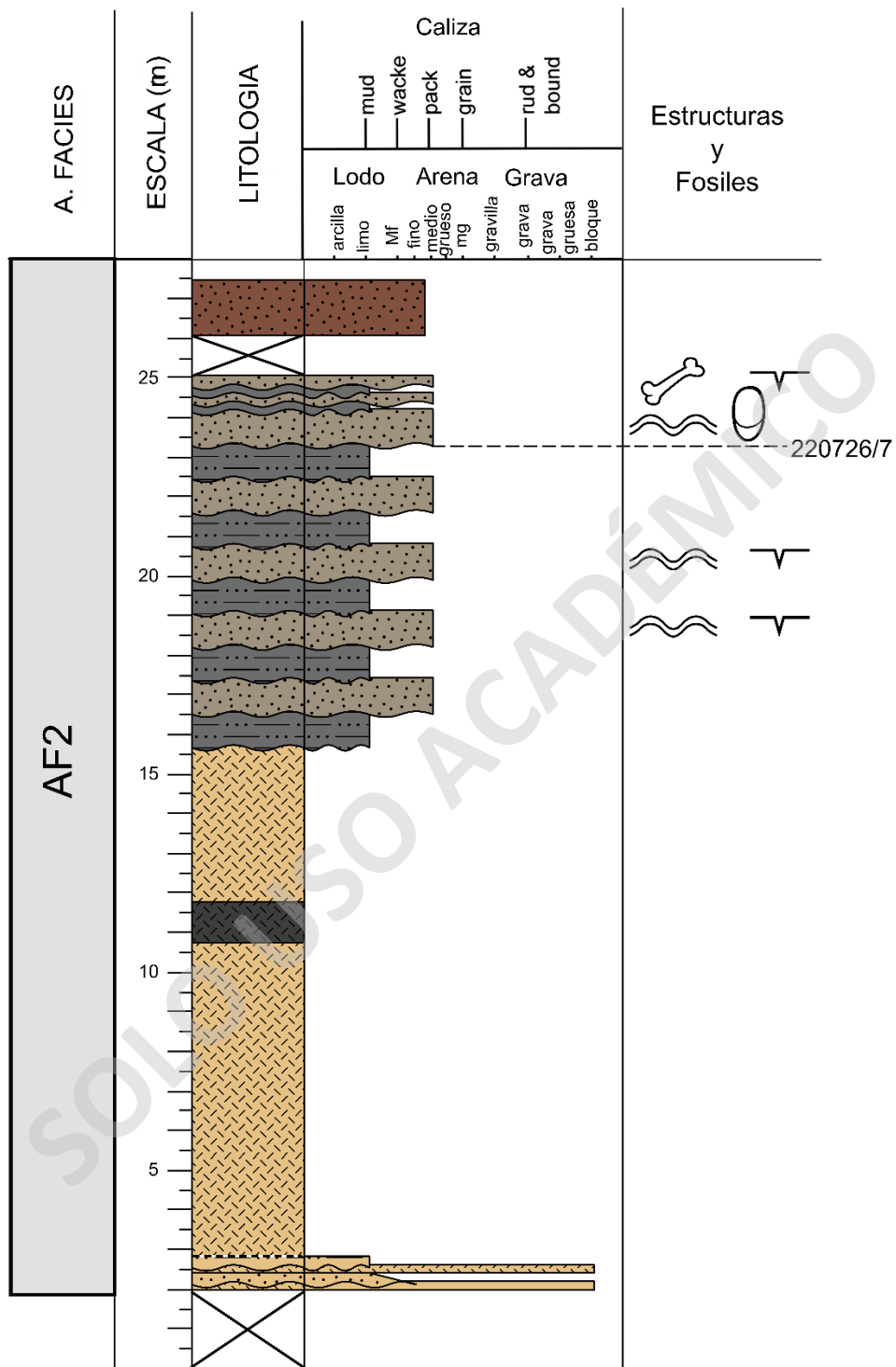


Figura 27. Columna estratigráfica correspondiente a la sección auxiliar Cañadón Ostrácodo. La línea punteada indica el nivel donde se obtuvieron muestras para la realización de cortes transparentes que fueron analizados en la sección 6,1.

### 5.1.4 Sección estratigráfica SB, Quebrada Peces

Esta sección aflora en el sector SE de la zona de estudio (fig 14), la descripción estratigráfica se ve apoyada por las secciones auxiliar Calicata. Presenta un rumbo de 356° y 65° de manto.



**Figura 28.** Imagen correspondiente a la zona de Quebrada Peces con una vista hacia el W.

La columna presenta de base a techo un nivel de limolita silicificada maciza en su base y con niveles estratificados con patinas de meteorización y superficie ondulada en su techo. Seguido de caliza cristalina a microcristalina con ondulitas de interferencia y estructuras en llamas (Fig 29a) las cuales en su techo presentan intercalación con limolitas macizas.

Seguido se presentan niveles de lavas dacíticas con textura de flujo y porfírica de 790 cm de potencia. Seguida de niveles de arena fina con gradación normal a limolita que finaliza en contacto con un nivel de lutita con presencia de patinas ferruginosas y arcillosas en sus planos de laminación.

Continua un nivel de caliza cristalina con ocasional presencia de bandas oolíticas irregulares (Fig 29b). La cual subyace un nivel de caliza mudstone que hacia el techo se torna cristalina, comenzando a presentar ondulitas longitudinales (Fig 29c).

Continua una intercalación de niveles de limolita y arenisca muy fina silicificadas con estratificación plano-paralela intercaladas con caliza cristalina y microcristalina con estratificación ondulosa y bandas negras con nódulos calcáreos redondeados en porción media. Seguido de una capa de limolita silicificada en la cual hacia el techo se forman wackes y finaliza con un nivel de arenisca media.

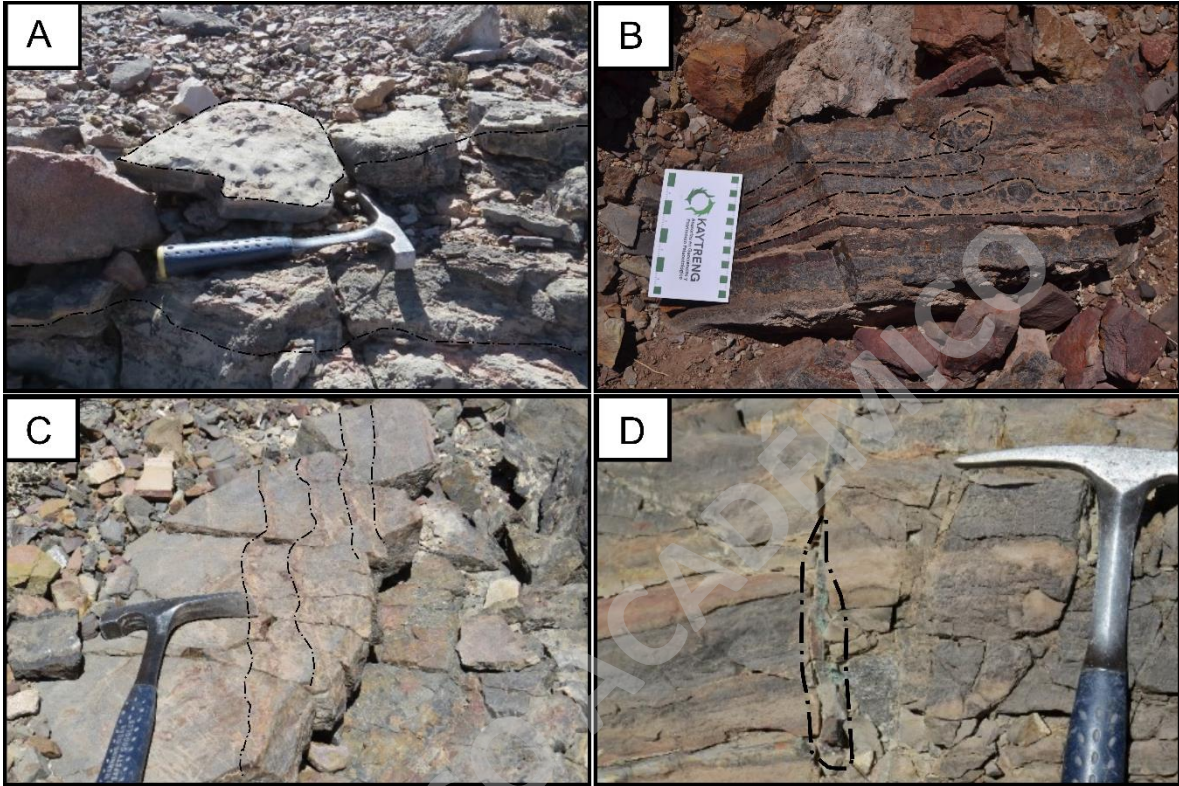
Sobre este nivel, se presenta un nivel de limolita silicificada con estratificación plano-paralela y figuras de erosión secundarias perpendiculares a la estratificación. Que en su porción inferior presenta gradación inversa a lutita y presencia de motas oscuras indeterminadas. Y en su sección superior presenta intercalación con lutitas y gradación normal a arenisca fina en las capas de limolita.

Posteriormente se presenta una sucesión de niveles de limolitas con gradación a lutita; limolitas con estratificación ondulosa intercalada con caliza cristalina; caliza microcristalina con laminación plano-paralela; lutita con presencia de foliación de fractura con caliza cristalina en su techo; limolita con estratificación plano-paralela y espaciamiento de capas de 5 a 10 cm junto con clastos flotantes de tamaño grava media a gruesa. Continuando con limolitas silicificadas con escasas intercalaciones de waques y lutitas centimétricas. Las cuales subyacen un nivel de caliza microcristalina silicificada con presencia de vetillas perpendiculares portadoras de CuOx (Fig 29d).

Siguiendo, se encuentra un nivel de brecha calcárea maciza con matriz recristalizada, seguido de limolita levemente silicificada con estratificación plano-paralela con capas de 10 cm de potencia y caliza cristalina con laminación ondulosa y nódulos calcáreos en bandas. Hacia su techo presenta estratificación ondulosa y nódulos que interrumpen la estratificación. Seguido de un nivel de lutita bien desarrollada con ocasionales capas de wackes de espesor centimétrico que en su techo presenta una gradación a limolita, con capas de lutita subordinada.

Posteriormente se encuentra un nivel de lutita con ocasionales capas de waques de espesor centimétrico seguido de un nivel de caliza microcristalina con laminación ondulosa. El cual es seguido de una sucesión de niveles de limolita silicificada con estratificación plano-paralela mal preservada que hacia su techo presenta gradación a waque y laminación irregular con vetillas carbonáticas; Limolita con estratificación plano-paralela en su sección inferior y maciza en su sección superior; Intercalación de limolita con caliza cristalina y cuarzoarenita de grano grueso recristalizado con cemento ferruginoso.

Finalmente, se presenta un nivel de lutita con limolita silicificada seguido de una zona cubierta y un nivel de lava dacítica que sobreyace en contacto concordante.

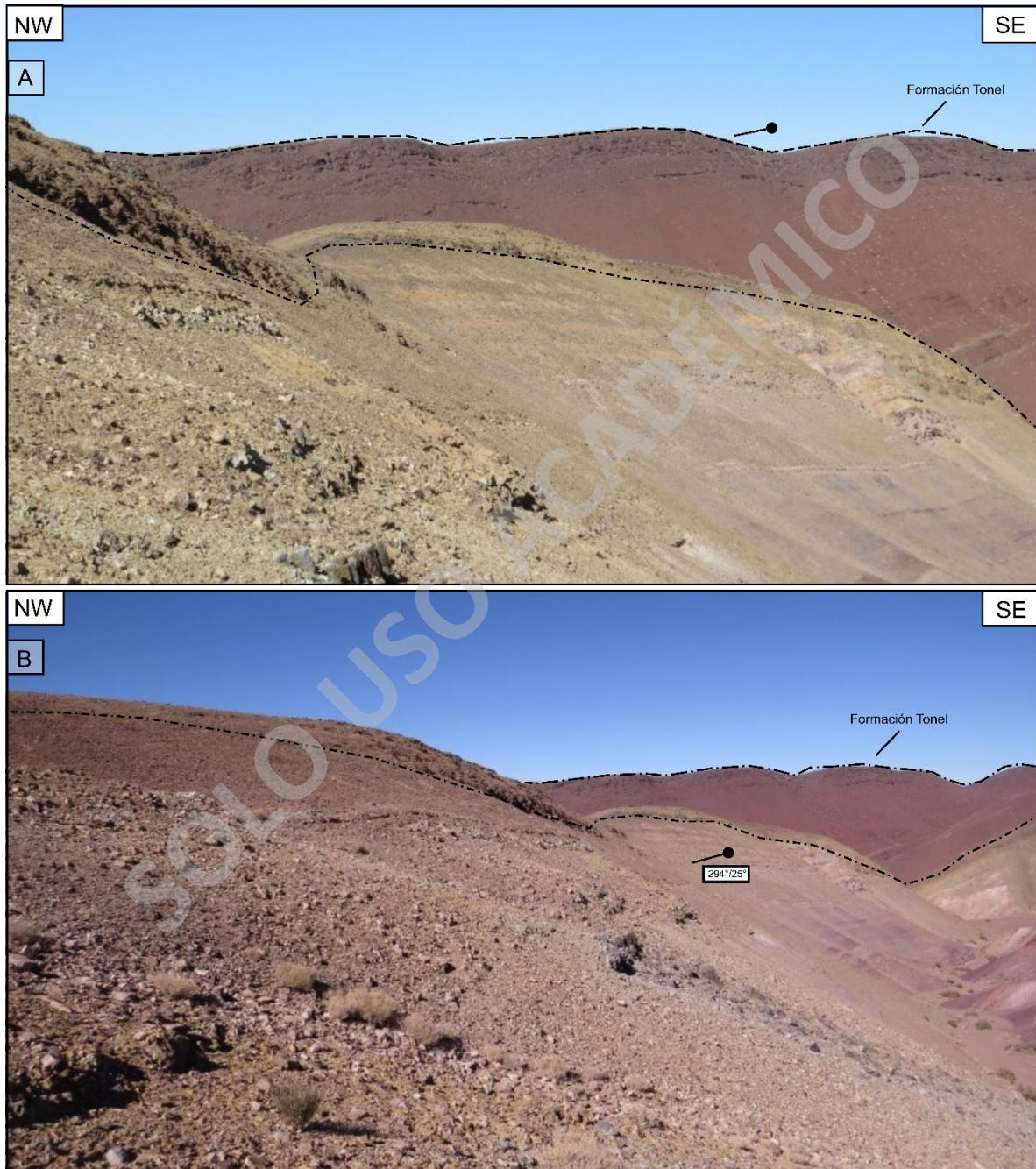


**Figura 29.** A) Caliza cristalina a microcristalina con planos de estratificación onduloso y ondulitas de interferencia; B) Caliza cristalina con ocasional presencia de bandas oolíticas irregulares; C) Presencia de ondulitas longitudinales, en caliza microcristalinas a mudstone, con laminación plano-paralela bien desarrollada; D) Caliza microcristalina silicificada con vetillas perpendiculares portadoras de óxidos de cobre.



### 5.1.5 Sección estratigráfica SD, Quebrada Descanso

Esta sección aflora en el sector NE de la zona de estudio (Fig 14), cercano al sector en el que fue levantado el campamento. Su techo se encuentra en contacto discordante con la Formación Tonel (Fig 31). Presenta una orientación  $294^{\circ}$  y  $25^{\circ}$ .



**Figura 31.** Imagen correspondiente a la zona de Quebrada del Descanso con una vista hacia el Noreste. A) Es posible observar el contacto con los estratos correspondientes a la Formación Tonel, con un plano de inclinación subhorizontal. B) se observa con menor aumento la zona donde se presenta un contacto discordante entre Estratos El Bordo y Formación Tonel.

Esta sección comienza en su base con una sucesión de lavas dacíticas intercaladas con niveles de limolita maciza y con estratificación. Seguido de intercalaciones de arenisca fina y maciza con nódulos ferruginosos en contacto gradacional y limolita maciza con cristales de calcita secundarios. Hacia el techo las capas de arenisca cambian a una tonalidad oscura, y la limolita presenta niveles centimétricos de limolita silicificada. Finalizando en su techo con lutita en contacto concordante.

Continúa con niveles de limolita maciza con grietas de desecación y presencia de concreciones con vertebrados, y limolita estratificada con intercalaciones de arenisca fina y presencia de meteorización esferoidal. Finalizando con un nivel de limolita laminación plano-paralela que es cortada por un filón afanítico con textura de flujo.

Posteriormente se presentan intercalaciones de limolita y arenisca fina seguida de una capa de lutita con presencia de limolita subordinada. La cual subyace a un filón compuesto de magnetita y hematita. Sobre el cual se sitúa un nivel de limolita estratificada con discontinuidad lateral y concreciones ferruginosas en la zona media.

Continúa un nivel de limolita estratificada que se encuentra siendo intruida por filones afaníticos. Seguido una sucesión de limolita estratificada con gradación inversa a arena muy fina. Seguido de una capa de lutita con presencia de limolita subordinada subyaciendo un nivel de limolita estratificada sobre la cual se encuentra un filón afanítico en contacto discordante erosivo. Finalizando con niveles de lutitas con presencia de limolita subordinada, y nódulos subelípticos en su sección media. Seguido de un nivel de limolita maciza la cual es cortada por un filón que sobreyace en contacto discordante. Y presenta intercalaciones con arena media y arena fina con estratificación plano-paralela y cemento ferruginoso con lentes de limo tanto en su base como techo.

Posteriormente se presenta una intercalación de limo macizo con arena fina y limo con laminación plano-paralela las cuales van gradando a arena media con cemento ferruginoso. Seguido de una cobertura que subyace a una intercalación de limolita maciza y arena fina con cemento calcáreo. Presentando hacia el techo presenta vetas de calcita secundaria en niveles de limo. Finalizando con un nivel de limolita macizo intercalado con cuarzoarenita de grano fina macizo, con variación lateral hacia el No y presentando troncos fósiles in situ (Fig 32a). El cual subyace un sector cubierto.

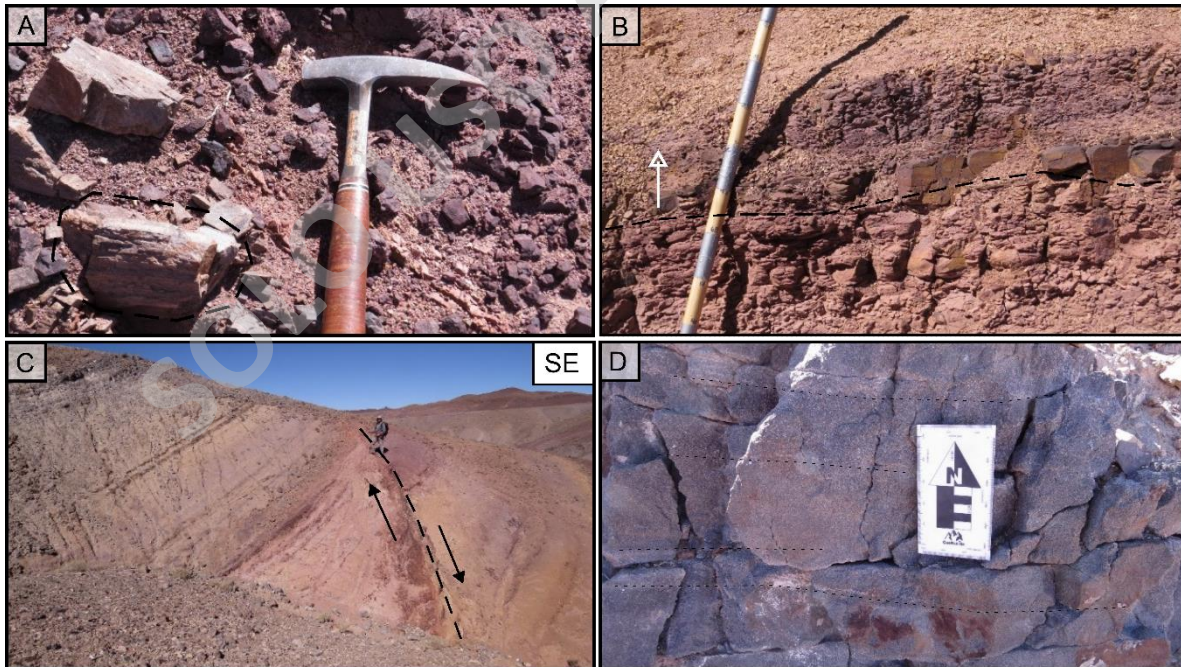
Después se presentan una sucesión de niveles intercalados de limolita y arena media con laminación plano-paralela seguido de arena fina y cuarzo arenita media de mala



competencia con vetillas de yeso secundario paralela a la orientación de los estratos. Sobre los cuales se presenta un nivel de limolita maciza de alta competencia en su base y menor competencia hacia el techo (Fig 32b). Nivel en el cual hacia el oeste se observa una falla local que genera un acuñamiento de limolita hacia el sur (Fig 32c). Seguido de una zona cubierta.

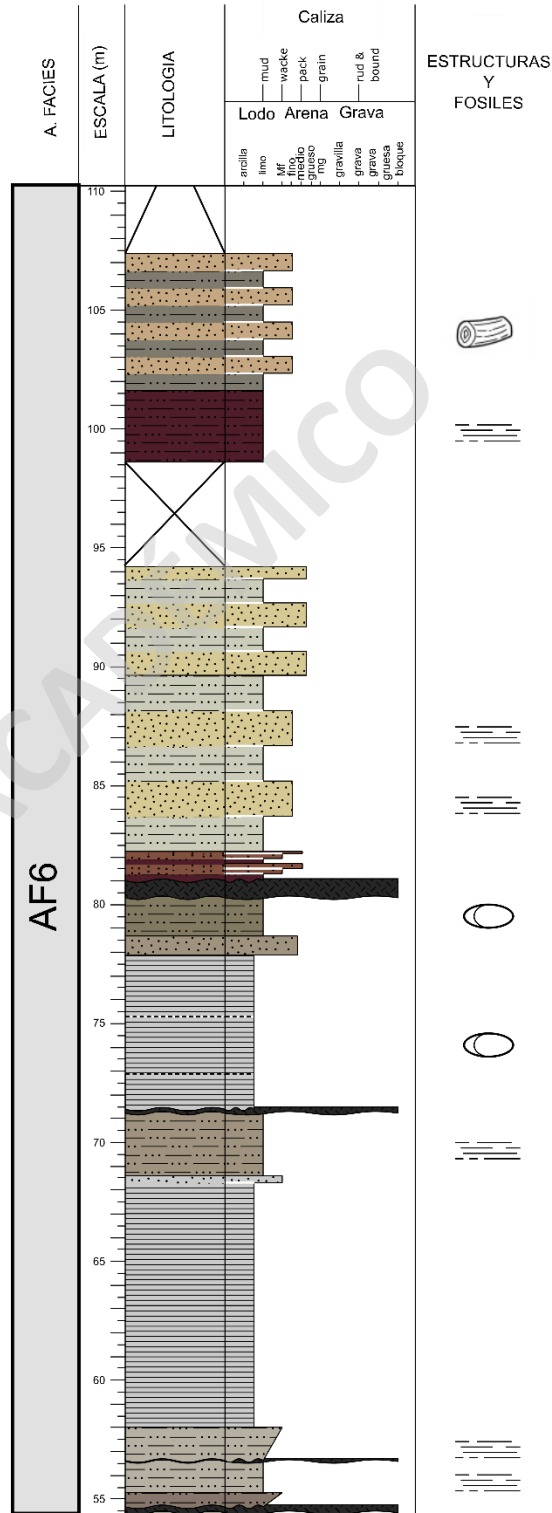
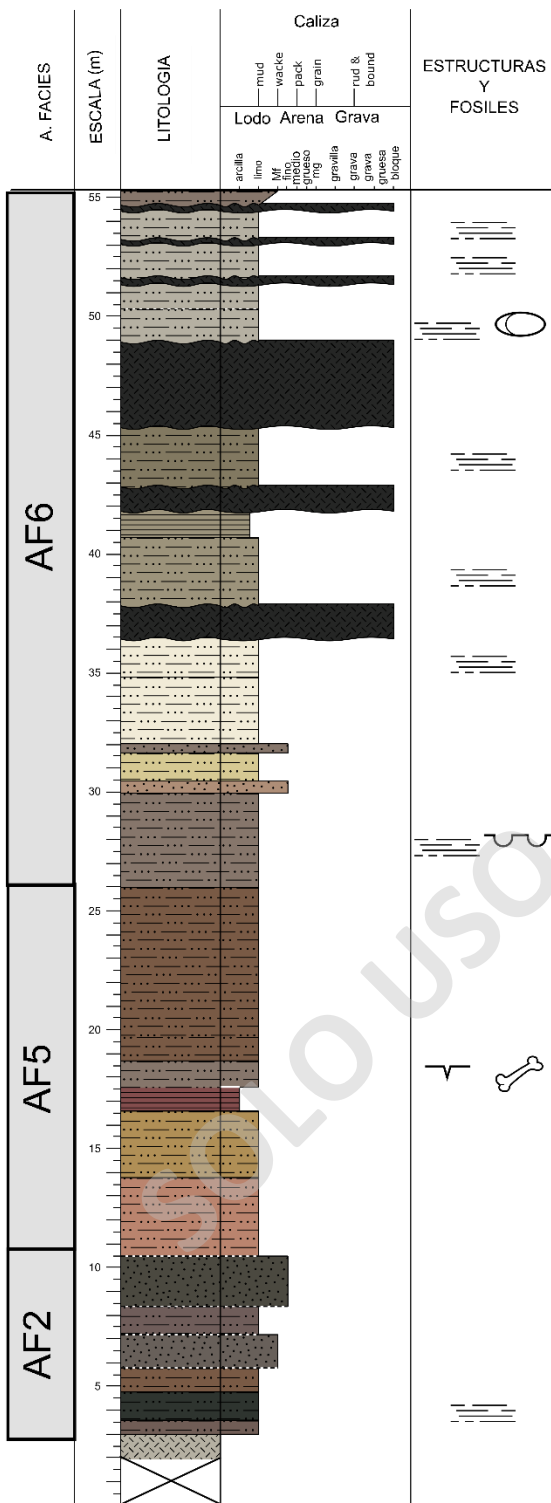
Posteriormente se observa un nivel de cuarzoarenita con cemento calcáreo y minerales oxidados indiferenciados de grano medio a grueso, estratificación plano-paralela hacia el techo y leve laminación en sectores con acumulación de cuarzo, paralelo a la estratificación (Fig 32d). Seguido de una secuencia de limolita y arenisca gruesa con laminación plano-paralela intercalada con niveles de caliza de baja potencia.

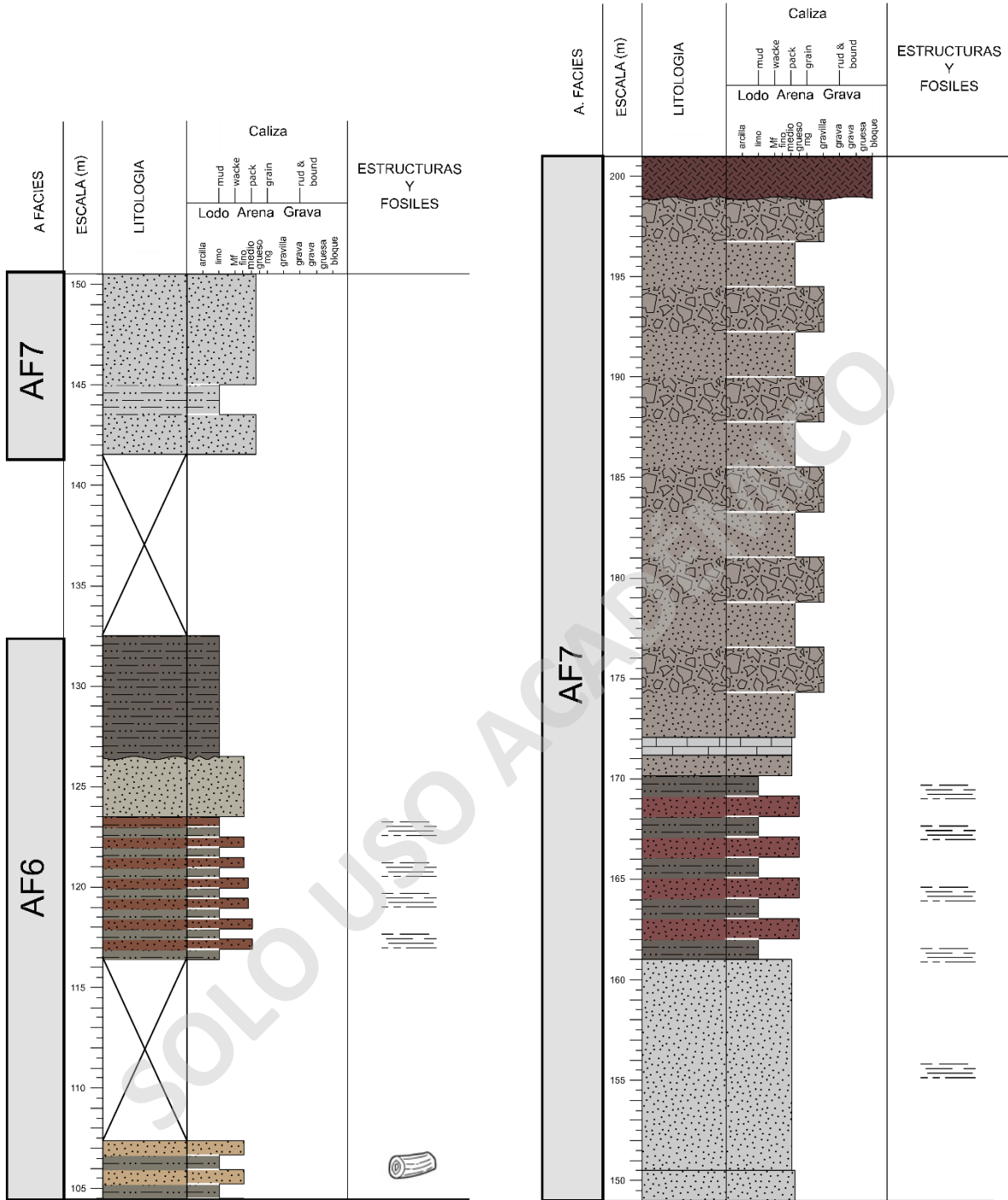
Finalmente se observa un nivel compuesto por arena media con cemento calcáreo y nódulos de feldespatos oxidados. Seguido de packstone silicificada y arena media con niveles de lavas dacíticas intercalándose que aumentan su concentración hacia el techo, y una intercalación de arena media, gruesa y conglomerados. (Posiblemente asociada a la formación tonel. Sobreyaciendo en contacto discordante erosivo con el nivel anterior.



**Figura 32.** A) Presencia de troncos fósil in situ en limo macizo intercalado con cuarzo arenita de grano fino macizo; B) Limolita maciza de alta competencia en la base y menor competencia en el techo, es posible observar un cambio de tonalidad entra ambas caras expuestas; C) falla normal local que genera el acuñamiento de nivel de limolita; D) Cuarzo arenita con estratificación plano-paralela y leve laminación en sectores con acumulación de cuarzo, paralelos a la estratificación.

Columna estratigráfica seccion Quebrada Descanso





**Figura 33.** Columna estratigráfica correspondiente a la sección de Quebrada del Descanso, subdivida en cuatro partes continuas, de base a techo.

A partir de todos los datos estratigráficos recopilados y bibliográficos se generó una segunda columna, generalizada del sector con el fin de poder realizar una asociación de facies más efectiva y comprensible (fig 34).



## 5.2 Análisis de facies

Durante la elaboración de este capítulo se tratará el análisis sedimentológico a través de las características estratigráficas que conforman las distintas unidades. Utilizando el concepto de facies, correspondiente a las características que definen a una unidad sedimentaria (Boggs, 2006; Nichols 2009). Estas características toman en consideración la dimensión de los estratos, tipos de estructuras sedimentarias presentes, tamaños y tipo de granos y el contenido biológico de los cuerpos rocosos (Middleton, 1973; Reading y Levell, 1996).

El análisis de facies consiste en el reconocimiento de características presentes en los cuerpos rocosos que permitan reflejar las condiciones en las que fueron formados (Reading y Levell, 1996). El estudiar estas características específicas en las facies permite la interpretación de distintos procesos de formación como, por ejemplo: la definición de litofacies (unidad definida por características litológicas) que permite determinar los procesos relacionados al transporte y deposición de los sedimentos que generaron el cuerpo rocoso. Por otro lado, tanto las biofacies como icnofacies (definidas por su contenido biogénico) aportan la información sobre la paleoecología desarrollada durante y después de la deposición de los sedimentos (Nichols, 2009).

Las características asociadas a un ambiente de deposición se encuentran determinadas por la combinación de los procesos que interactúan dentro del medio sedimentario (Nichols 2009; Arche 2010). Producto de esto es que la facies se agrupa en asociaciones de estas que determinan la combinación de procesos dominantes dentro de este medio. Permitiendo de esta manera inferir y reconstruir paleoambientes al momento de su deposición a partir de la interpretación de sedimentos en términos físicos, químicos y biológicos. Es importante notar que la interpretación de facies en rocas sedimentarias sin estructuras presentes es normalmente dudosa, y el uso de datos adicionales como información geoquímica, mineralógica o paleontológica puede ser necesaria para obtener un mejor contraste del ambiente de deposición y facies asociadas (Einsele, 2000).

La tabla 3 muestra el análisis de facies desarrollado para este trabajo. Como resultado de este, se puede observar cómo los niveles fueron agrupados en 10 facies distintas, las cuales fueron asignadas con una breve interpretación sobre el proceso de deposición involucrado.

**Tabla N°4 Analisis e interpretacion de facies**

Facies	Litologia	Geometria	Estructuras Sedimentarias	Aspecto fosilifero		Proceso deposicional
				Fosiles de cuerpo	Iconofosiles	
F1: Limolita	Limolita	Tabular	Maciza a estratificacion plano-paralela	No se observan	No se observan	Depositos por decantacion del material en suspension. Posible perturbacion por flujo de muy baja densidad.
F2: Lutita	Lutita	Laminar	Laminacion plano paralela	No se observan	No se observan	Deposito por decantacion de material en suspension que posteriormente se compacta y consolida formando capas.
F3: Intercalacion de Lutita y limolita	Limolita	laminar	Estratificación plano-paralela	No se observan	No se observan	Depositos por decantacion de material en suspension con influencia de un flujo de muy baja a baja energia.
F4: Intercalacion de limolita y arenisca	Medianamente madura texturalmente. Arena muy fina a arena gruesa; subangulosa con esfericidad alta	Lenticular y tabular	Estratificación plano paralela, heterolitica y ondulosa	Fosiles de diversa integridad, vertebrados y troncos	No se observan	Deposito de material por flujo de baja a alta densidad. Con acumulacion de materia organica en regimen bajo.
F5: Arenisca maciza	Madura texturalmente arena fina a gruesa	Lenticular y tabular	maciza	No se observan	No se observan	Deposicion rápida derivada a partir de flujos laminares.
F6: Arenisca con estratificacion plano paralela	Medianamente madura texturalmente. Arena muy fina a arena gruesa subangular, esfericidad media	Lenticular y tabular	Estratificacion plano-paralela, gradacion normal e inversa	No se observan	No se observan	Depositos de tracción asociado a flujo unidireccional de ao y alto regimen.
F7: Conglomerado macizo clasto soportado	Inmaduro texturalmente. Fragmentos mayores: grava guresa; subredondeados; esfericidad media/alta. Matriz: arena media a gruesa	Lenticular y tabular	Maciza a estratificacion plano-paralela. Gradaciones normales	No se observan	No se observan	Deposicion tractiva de alta energia asociado a flujos unidireccionales de carácter turbulento.
F8: Caliza microcristalina	Maciza con cristales subhedrales	maciza	maciza, estratificaicon plano-paralela	No se observan	No se observan	Precipitacion quimica de carbonato de calcio en ambiente acuatico con una limitacion en la formacion de cristales o a partir de proceso de recristalizacion.
F9: Caliza cristalina	Maciza con cristales subhedrales, estaticacion ondulosa bien desarrollada en casos. En su mayoria con vetillas con relleno posterior.	maciza	maciza, estratificacion plano-paralela a ondulosa	Ocasionalmente moldes de invertebrados	Trazas vermiculares irregulares ocasionales.	Precipitacion quimica de carbonato de calcio en ambiente acuatico tranquilo.
F10: Caliza microcristalina con gradacion a caliza cristalina	Maciza concristales subhedrales, con vetillas en gran medida con relleno posterior.	maciza	maciza, estratificacion plano-paralela a ondulosa	No se observan	No se observan	Precipitación y recristalización de carbonato de calcio en presencia de agua subterránea rica en minerales.

Tabla 4

Las facies anteriormente mencionadas fueron agrupadas en 7 asociaciones de facies distintas con el fin de poder reconocer subambientes de depositación. Al mismo tiempo se buscó que cada asociación de facie fuera única, para poder facilitar la comprensión e interpretación del paleoambiente general de la unidad de estudio. De esta manera, las asociaciones fueron nombradas como AF seguida de un número que permita su diferenciación efectiva.

### **5.2.1 Sección Loma Peluda**

#### ***AF1: Limolitas macizas silicificada y calizas cristalinas con OxFe.***

**Descripción.** La asociación de facies AF1 corresponde a una intercalación de limolitas y calizas de la facies F1 y F9. Esta asociación presenta estratos principalmente tabulares. En los niveles superiores la caliza presenta fragmentos terrígenos tamaño grava fina, con líticos subredondeados polimíctico con dominancia de cuarzo. Los contactos basales son nítidos. Esta asociación de facies carece de contenido fosilífero.

**Interpretación:** Esta asociación de facies corresponde normalmente a ambientes de plataforma carbonáticas somera o plataforma de margen pasivo. Aunque de igual forma, en menor medida puede corresponder igualmente a un ambiente lacustre con abundante depositación de sedimentos carbonatados y siliciclásticos.

La presencia de limolita maciza con óxidos de hierro puede ser indicativa de la presencia de material erosionado y transportados por el río. El contacto concordante neto con la caliza sugiere un cambio gradual en las condiciones de sedimentación y el ambiente, posiblemente relacionado con cambios en el clima o en la dinámica fluvial (García-Garmilla, 2011).

#### ***AF2: Arenisca calcárea silicificada y limolita silicificada.***

**Descripción:** La asociación AF2 corresponde a una intercalación de areniscas y limolitas de la facies F1 y F5. Esta asociación presenta niveles principalmente tabulares. En los niveles base la arenisca presenta intercalaciones de láminas de limolita en el techo mientras que la limolita silicificada presenta estratificación plano-paralela, además de contenido de nódulos ferruginosos y patinas de OxFe. En la sección Loma Herrera hay presencia de trazas fósil, de moldes que cruzan los niveles de limolita y areniscas, además de ostrácodos

indet hacia el techo. también hacia el norte, aumenta el grado de silicificación de la roca, se observa laminación plano-paralela, junto con restos de madera y hueso fósil indet.

**Interpretación:** Esta asociación de facies puede corresponder principalmente a un ambiente de llanura de inundación o un ambiente fluvial en el que la sedimentación se produjo en un ambiente de alta energía. La presencia de fósiles y madera puede ser representativa tanto de facies de plataforma interna con influencia de ríos, como de llanuras de inundación con depósitos de inundaciones periódicas. Los estromatolitos se asocian comúnmente con ambientes acuáticos como lagos, mares poco profundos y plataformas continentales. Los ostrácodos se encuentran comúnmente en ambientes de aguas dulces y salobres como lagos, ríos, humedales. (Catuneanu, 2009).

El contenido de O<sub>2</sub>Fe sugiere una exposición prolongada de los sedimentos a la oxidación atmosférica en ambientes subaéreos, con saturación de agua y oxígeno, posiblemente ambientes fluviales y lacustres (Tucker, 2001).

### 5.2.2 Sección Quebrada Peces

**AF3: limolita maciza y estratificada, caliza cristalina y microcristalina con estratificación plano-paralela.**

**Descripción:** La asociación de facies AF3 corresponde a una secuencia de limolitas, caliza cristalina y caliza microcristalina de la facies F1, F8 y F9. Esta asociación presenta estratos principalmente tabulares. En los niveles inferiores la limolita presenta estratificación plano-paralela, hacia el techo presenta superficie ondulosa. En la zona superior la caliza presenta planos de estratificación ondulosa y ondulitas de interferencia, mientras que las calizas cristalinas presentan intercalaciones con limolitas macizas. Esta asociación de facies carece de contenido fosilífero en la sección Quebrada peces. Mientras que en la sección Loma Herrera presenta niveles de calizas cristalinas con variación lateral en donde se genera una segunda ocurrencia de estromatolitos en la sección y Hacia el techo se observa laminación plano-paralela con moldes de invertebrados en concreciones.

**Interpretación:** Esta asociación de facies puede corresponder principalmente a un ambiente de baja energía y en condiciones de tranquilidad, como pueden ser lagos o ambientes marinos protegidos. Principalmente plataformas carbonatadas (Tucker, 2001).



La limolita maciza puede ser representativa de una sedimentación en ambientes de aguas de baja energía y condiciones tranquilas, mientras que las calizas microcristalinas y cristalinas son típicas de depósitos de plataforma carbonatada. La laminación plano-paralela en calizas sugiere una depositación en ambientes tranquilos de aguas someras, y la presencia de estromatolitos y moldes sugieren una posición somera. Mientras que la intercalación de limolita indicaría cambios en las condiciones de sedimentación, como puede ocurrir por influencia de factores climáticos o cambios en la dinámica sedimentaria (Folk, 1962).

***AF4: limolita, lutita, caliza cristalina y microcristalina con niveles esporádicos de arenisca.***

**Descripción:** La asociación de facies AF4 corresponde a una secuencia de limolita con estratificación plano-paralela, lutita, caliza cristalina y microcristalina con laminación, e intercalación de limolita con lutita, de las facies F1, F2, F3, F8, F9. Esta asociación presenta gradación de limolita a lutita en su nivel inferior, calizas cristalinas con láminas oolíticas, en la intercalación de limolita y lutita se encuentra de manera aislada niveles asociados a la facie F4, la zona media presenta limolita silicificada con estratificación ondulosa mal preservada, caliza microcristalina con laminación plano-paralela. Hacia el techo se presenta estratificación plano-paralela en limolita. Esta asociación de facies carece de contenido fosilífero.

**Interpretación:** Esta asociación de facies puede corresponder a ambientes de plataforma carbonatada poco profunda con cambios en el régimen de energía y tasa de sedimentación.

La limolita maciza con gradación a lutita y limolita con estratificación plano-paralela representan ambientes de plataforma de aguas someras, mientras que la intercalación de lutita y limolita maciza sugieren un ambiente de baja energía como lago, llanura de inundación o zona de estuario, con cambios en el régimen de energía. La presencia de caliza cristalina y microcristalina con estratificación ondulosa sugieren periodos de mayor energía (Flügel, 2010).

***AF5: Limolita estratificada, lutita, arenisca fina maciza.***

**Descripción:** La asociación de facies AF5 corresponde a una secuencia de limolita silicificada estratificada, lutita bien desarrollada y arenisca maciza, de las facies F1, F2, F5.

Esa asociación presenta gradación de lutita a limolita con lutita subordinada y lentes de arena media bien cementada en el nivel medio. La preservación de la estratificación plano-paralela en las limolitas va disminuyendo de base a techo. La caliza cristalina en la base presenta alteración argílica moderada. En la sección de Quebrada Descanso presenta presencia de grietas de desecación y restos fósiles de vertebrado indiferenciado.

**Interpretación:** Esta asociación de facies puede corresponder a un ambiente continental fluvial o lacustre.

La limolita con estratificación plano-paralela nos sugiere un ambiente de baja energía y sedimentación fina, como planicie de inundación. La lutita bien desarrollada y caliza cristalina con estratificación ondulosa sugieren un ambiente lacustre, con sedimentos químicos que se depositan en ambientes tranquilos y someros. La presencia de lentes de arena en niveles de lutita puede ser indicativo de un ambiente deltaico o estuarino. Mientras que la presencia de grietas de desecación son características de ambientes de baja energía como llanuras de inundación y los ambientes palustres (Catuneanu, 2009).

### 5.2.3 sección Quebrada Descanso

**AF6: *Limolita estratificada, Lutita con limolita, limolita con arenisca estratificada, arenisca fina.***

**Descripción:** La asociación de facies AF6 corresponde a una secuencia de limolita con estratificación plano-paralela intercalada con niveles de arenisca fina, lutita intercalada con limolita, limolita con estratificación plano-paralela, limolita maciza, y arenisca fina, de las facies F1, F2, F3, F4, F5 y F6. Esta asociación presenta patina ferruginosas en niveles base de limolita estratificada. En la zona media el nivel de limolita presenta discontinuidad lateral y concreciones ferruginosas. Hacia el techo la limolita observada presenta gradación inversa a arena muy fina. Y las lutitas presentes se intercalan con niveles subordinados de limolita tanto en la base como en el techo. Esta asociación de facies presenta troncos fósil in situ en niveles de limolita. Esta asociación de facies no se aprecia en otras zonas de la columna.

**Interpretación:** Esta asociación de facies puede corresponder principalmente a un ambiente de llanura de inundación con aporte fluvial.

La limolita con estratificación plano-paralela intercalada con niveles de arenisca fina puede ser depositada en un ambiente de canal de baja energía o planicie de inundación, con fluctuaciones en el régimen hidrológico. La lutita intercalada con limolita puede depositarse en ambientes de planicies de inundación o un algo con fluctuaciones en el régimen. La limolita con gradación a arena muy fina sugiere un aumento en la energía de depositación, en transición a un ambiente tranquilo, similar a una llanura de inundación, que pasa a uno más activo, afín a un canal fluvial (Miall, 2017).

***AF7: Limolita con arena, arena fina maciza, arena estratificada y conglomerados.***

**Descripción:** La asociación de facies AF7 corresponde a una secuencia de limolita intercalada con arena media levemente magnetizada con gradación normal a arena muy fina, arena fina cuarcífera maciza de mala competencia, limolita, arenisca cuarcífera con cemento calcáreo, limolita intercalada con arenisca gruesa con estratificación plano-paralela, arena media maciza, intercalación de arena media, arena gruesa y conglomerados de las facies F1, F4, F5, F6, y F7. Esta asociación presenta un acuñamiento del nivel medio de limolita, contacto ondulado entre limolitas y la intercalación de arenisca fina y arenisca cuarcífera media. Hacia el techo se observa un nivel aislado de caliza cristalina correspondiente a la facie F9. Sobre las cuales se depositan los últimos niveles de arenisca media, arenisca gruesa y conglomerados. Esta asociación carece de contenido fósil.

**Interpretación:** Esta asociación de facies puede corresponder principalmente a un ambiente fluvial de baja energía con fluctuación en su régimen hidrológico.

La presencia de limolitas y arenas finas con laminación plano-paralela indican depósitos de planicie de inundación. La arena fina con arenisca cuarcífera gruesa maciza presenta una acumulación de sedimentos en barras de canal fluvial, donde la arena fina se depositaría en canales activos. La limolita sugiere acumulaciones de sedimentos en ambientes de bajo flujo. La intercalación de limolita con arenisca gruesa puede corresponder a canales fluviales con fluctuaciones en su caudal donde se depositan capas alternantes de sedimentos finos y gruesos. La presencia de conglomerados indica sedimentación en un ambiente de alta energía, probablemente asociado con canales de río activos.

## 5.3 petrografía

La petrografía sedimentaria es la rama de la geología que se encarga del estudio de las rocas sedimentarias, enfocándose en su composición mineral, textura, estructura nivel microscópico mediante la observación de secciones o laminas delgadas. Esta disciplina se centra en la observación y descripción detallada de los granos, fragmentos y minerales que componen las rocas sedimentarias, así como de su distribución y organización. La petrografía sedimentaria es una herramienta esencial para el estudio de la sedimentología, permiten identificar las características de los sedimentos y rocas, así como inferir en los procesos geológicos que actuaron durante su formación. La petrografía sedimentaria se realiza mediante el análisis de muestras de rocas sedimentarias, utilizando diversas técnicas microscópicas y químicas.

En este trabajo se estudiaron las diferencias composiciones y texturales de las rocas sedimentarias que conforman las distintas secciones de la zona de estudio. Donde fueron recolectada 13 muestras de las cuales 10 fueron estudiadas con fines petrográficos y 2 tienen como objetivo un estudio de análisis de circones. Resultados que no serán expuestos en el trabajo presente. Para los parámetros descriptivos utilizados para reconocer distintos tipos de granos son los sugeridos por Boggs (2009) y para la descripción de rocas carbonatas se usó el parámetro descrito por Dunham (1962).

### 5.3.1 Clasificación de láminas delgadas

A continuación, se clasifican textural y composicionalmente 7 de las 10 muestras extraídas durante la campaña que fueron utilizadas con fines petrográficos. estas muestras pertenecen a distintas secciones, las cuales serán mostradas en la tabla N°4.

Para fines de este estudio fueron descritas las muestras que formaban parte de rocas sedimentarias mientras que aquellas correspondientes a rocas ígneas serán utilizadas en estudios posteriores.

**Tabla N°5 de codigos de laminas delgadas para descripcion petrografica**

N°	Codigo de muestra	Seccion perteneciente	Nivel correspondiente a su seccion	Tipo de roca
1	220727/4	A	15	Toba vitrea
2	220727/3	A	2	Dacita
3	220726/7	C	20	Sedimentaria quimica
4	220726/4	B	43	Sedimentaria clastica
5	220726/2	B	17	Riolita
6	220726/1	B	4	Sedimentaria quimica
7	220723/5	C	12	Sedimentaria quimica
8	220723/4	C	7	sedimentaria clastica
9	220722/3	C.Ostrácodo	6	Sedimentaria quimica
10	220722/2	C. Ostrácodo	6	Sedimentaria quimica

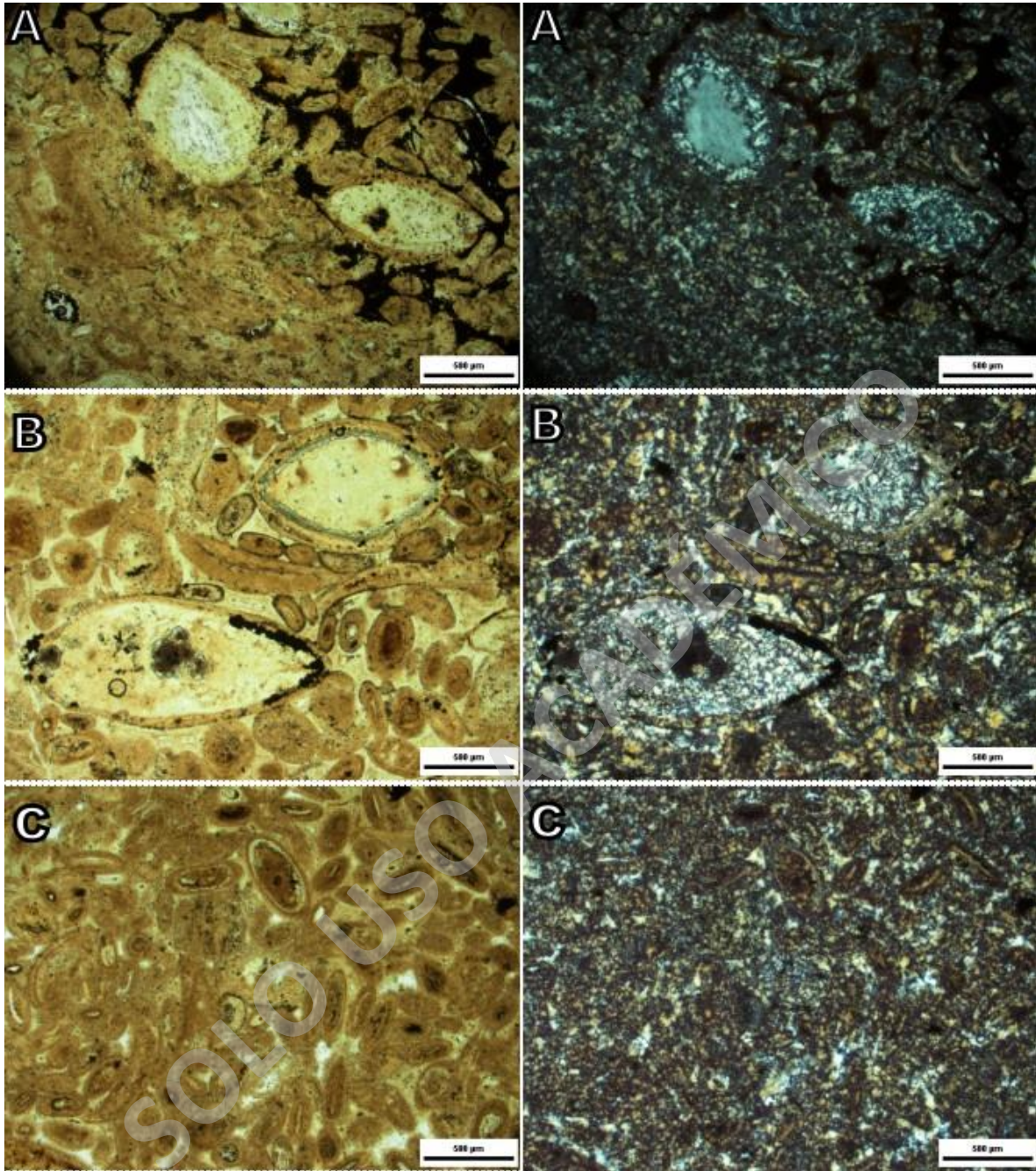
**SB 220726/7**

**Nombre:** Packstone

**Descripción:** la lámina presenta cambios texturales dentro de la misma de base a techo, en su base es posible observar una un sector sobresaturado en micrita y fragmentos terrígenos. Hacia el techo la concentración de micrita disminuye, dando paso a la presencia de ostrácodos y pellet y en menor medida oolitos subesfericos (fig 35a).

Hacia el techo la presencia de ostrácodos es más abundante, los oolitos se aprecian en mayor proporción y la concentración de pellet va disminuyendo. La textura observada se asemeja más a una grainstone (Fig 35b).

Ya hacia el techo la concentración de ostrácodos disminuye, quedando fragmentos de valva a la vista. Sugiriendo una concentración de estos en la base por densidad, hay un cambio gradual en la textura y se aprecia una predominancia tanto del pellet como de los oolitos (Fig 35c).

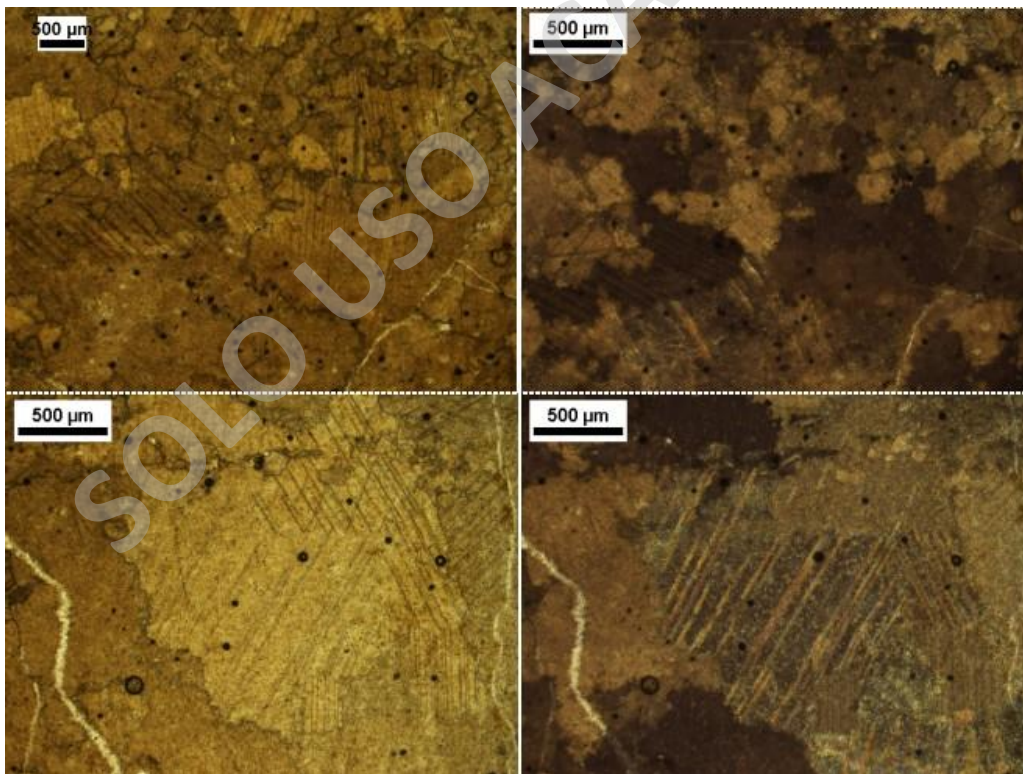


**Figura 35.** Imágenes de las láminas delgadas de la muestra 220726/7, tomadas en nicols paralelo y cruzado. Con una magnificación de N4X, se pueden observar tres cambios texturales en la misma lamina de base a techo; a) Packstone con presencia de ostrácodos, pellet, y oolitos con un claro contacto y cambio textural de la lámina; B) grainstone con mayor concentración de oolitos y de pellet; c) fragmentación de ostrácodos y predominancia de oolitos y pellet.

## SB 220726/1

**Nombre:** Caliza micritizada

**Descripción:** Corresponde a una roca química la cual de base a techo presenta diferencias tanto en su distribución de cristales como en texturas. En la base hay presencia de cristales de calcita de 0.1 mm a 0.5 mm micritizados con presencia de maclas polisintéticas en cristales sobre los 0.3 mm (fig 36) manteniendo una proporción de un 80% de cristales sobre 0.3. hacia el costado del corte la proporción de cristales bajo 0.3 mm aumenta a un 40% y se aprecian fragmentos terrígenos de 0.05mm con buena esfericidad y redondeamiento en un 2%. La zona central la concentración de micrita aumenta quedando en un 75% en comparación a un 20% de calcita. De igual forma hay un aumento en el tamaño del material terrígeno presente que corresponde al 5%. Hacia el techo es posible observar un aumento en la concentración de cristales de calcita gradual, llegando a un 80%, mientras que la micrita solo forma parte del 15% y los fragmentos terrígenos mantienen su concentración de 5%. Se observan a través de la lámina, algunas vetas rellenas con carbonato de calcio las cuales son posteriores al proceso de diagénesis.

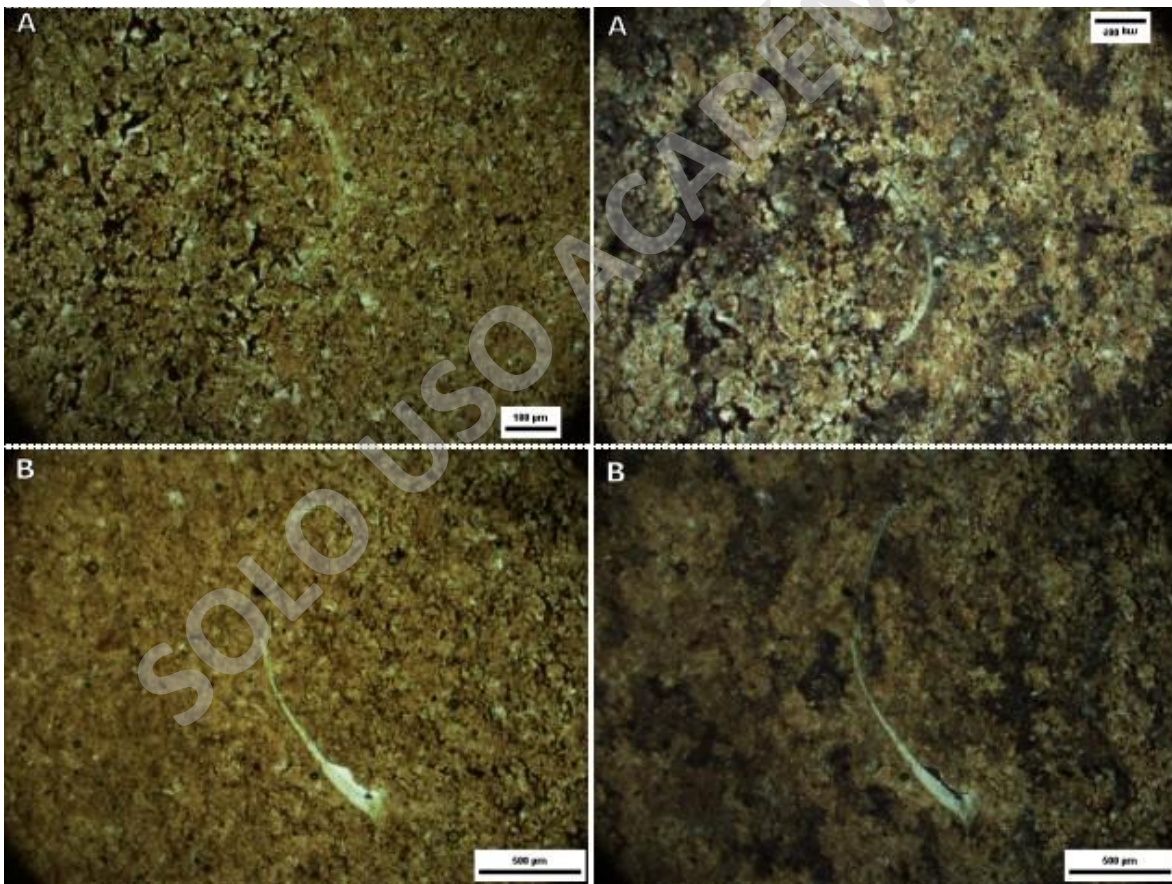


**Figura 36.** Imágenes de las láminas delgadas de la muestra 220726/1, tomadas en nicoles paralelo y cruzado. Con una magnificación de N4X. a) calcita micritizada con predominancia de micrita, y fragmentos sobre 0.3 mm con maclas polisintéticas. b) caliza cristalina con predominancia en los cristales se calcita.

## SC 220723/5

**Nombre:** Caliza cristalina

**Descripción:** La lamina corresponde a una roca sedimentaria química la cual presenta gradación lateral que es posible observar cómo pasa de presentar una concentración de calcita fragmentada en un 50% y un 45% de micrita con un 4% de fragmentos terrígenos y un 1% fragmentos de valvas de ostrácodos. La concentración de cristales aumenta hacia el costado derecho (Fig 37a). hacia el costado es posible observar un aumento en la concentración de calcita en un 60% con un 35% de micrita y un 4% de fragmentos terrígenos con una segunda valva de ostrácodo y posteriormente a un costado vuelve a gradar reduciendo la concentración de calcita a un 45% y la micrita a un 45% (Fig 37b).



**Figura 37.** Imágenes de las láminas delgadas de la muestra 220723/5, tomadas en nicols paralelo y cruzado. Con una magnificación de N4X. se pueden observar dos cambios texturales en la misma lamina de izquierda a derecha; a) caliza cristalina con cambio en la concentración de calcita y micrita, con presencia de valvas de ostrácodos y cambio textural de la lamina; b) calcita cristalina con una gradación lateral a microcristalina con presencia de valva de ostrácodo fragmentada.



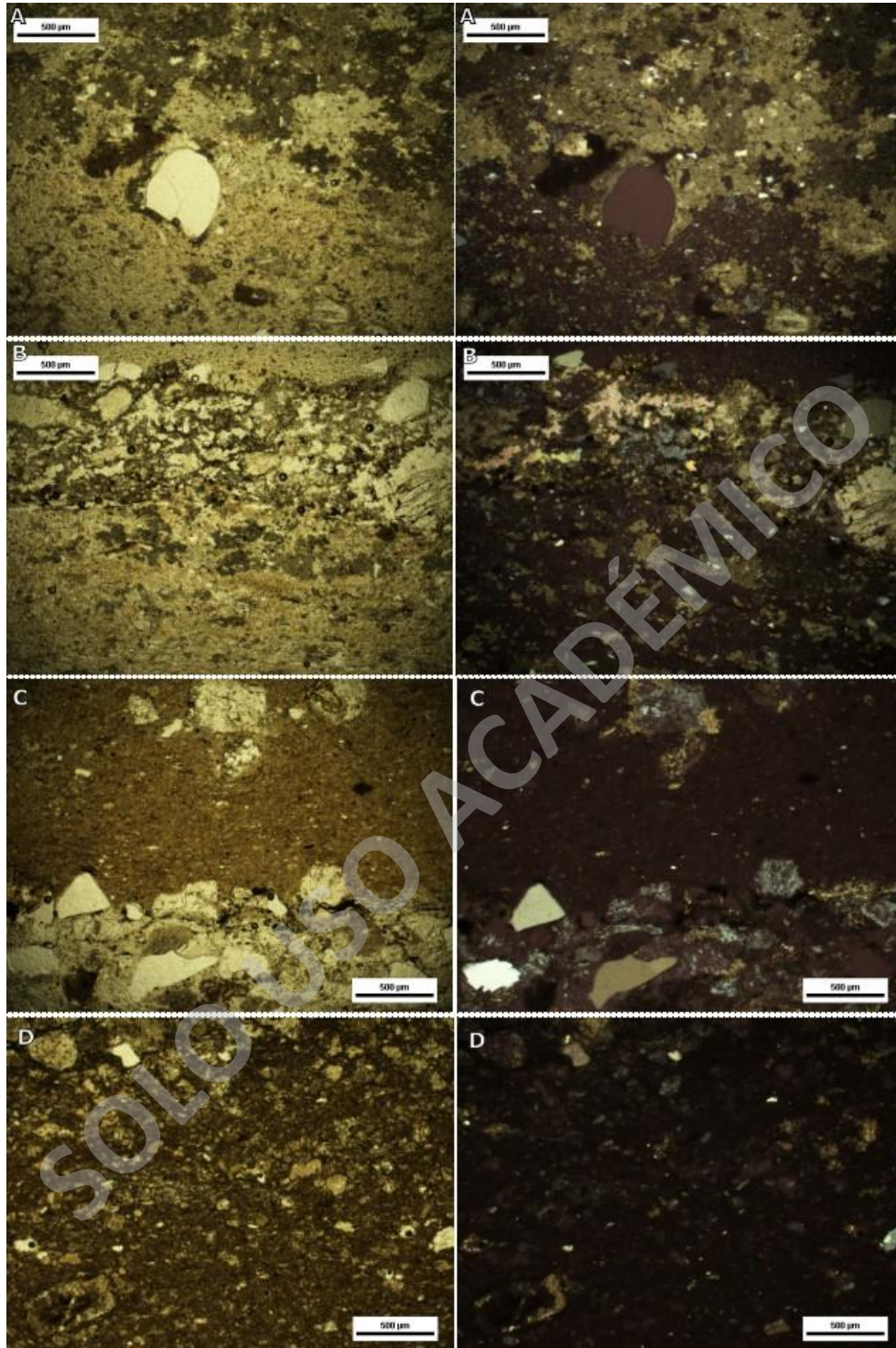
## SC 220723/4

**Nombre:** Limolita arenosa

**Descripción:** Esta lamina se encuentra subdivida en 4 partes. La primera parte (fig 38a) Corresponde a una limolita arenosa. Mal seleccionada, polimíctica, con predominancia de clastos de micrita. Tiene una proporción considerable (50%) de cuarzo policristalino. El esqueleto está compuesto por un 60% de cuarzo, 2% feldespato potásico, 8% plagioclasa, 10% fragmentos líticos volcánicos y un 20% de carbonato de calcio, correspondiente a micrita. La forma de los cristales es subhedrales. El empaquetamiento de la roca es matriz soportado y presenta cemento de composición calcárea en drusa. La selección de la roca es baja y su contacto entre clastos es tangente, destacándola como una roca submadura texturalmente mientras que su madurez composicional presenta un índice de 1.5. La segunda parte corresponde a una caliza cristalina con fragmentos de la limolita mencionada anteriormente (fig 38b).

La tercera parte corresponde a una limolita arenosa. Mal seleccionada, polimíctica, con un 80% de matriz y 20% de esqueleto con predominancia de clastos monomineral de 0.2 mm máximos de diámetro. Tiene una proporción considerable (70%) de cuarzo policristalino. El esqueleto está compuesto por un 70% de cuarzo, y un 30% de carbonato de calcio, correspondiente a calcita. La forma de los cristales es subhedral. El empaquetamiento de la roca es matriz soportado y presenta cemento de composición calcárea en drusa. La selección de la roca es baja y su contacto entre clastos es tangente y completo, destacándola como una roca submadura texturalmente mientras que su madurez composicional presenta un índice de 2.3. hacia el techo el porcentaje de fragmentos mayores aumenta mientras que el tamaño máximo de estos disminuye.

La cuarta parte presenta un contacto sinuoso con la parte anterior y corresponde a una arenisca limosa, de mala selección, polimíctica con un 20% de matriz, 74% de esqueleto, 5% de cemento y 1% de porosidad. Con predominancia de clastos monomineral de 0.6 mm máximos de diámetro. Presenta un 15% de fragmentos terrígenos, 30% de cuarzo policristalino, 15% de cuarzo monocristalino, 5% de plagioclasa, 5% de micas blancas y un 20% de carbonato de calcio, correspondiente a calcita. La forma de los cristales son subhedrales. El empaquetamiento de la roca es clasto soportada y presenta cemento calcáreo en drusa y el contacto entre sus clastos es tangente. Destacándola como una roca submadura texturalmente, con una madurez composicional con un índice de 2.25. Hacia el techo disminuye el porcentaje de calcita aumentando el cuarzo policristalino.

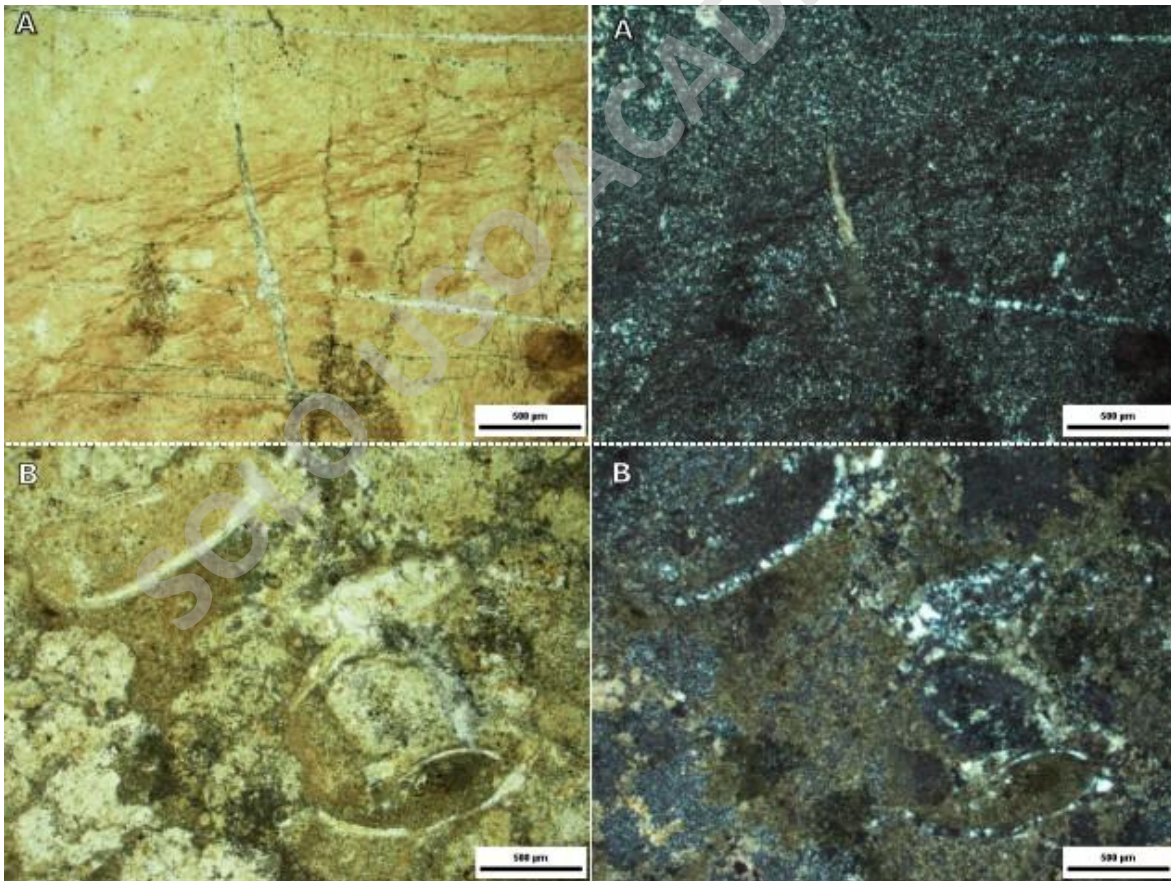


**Figura 38.** Imágenes de las láminas delgadas de la muestra 220723/4, tomadas en nicoles paralelo y cruzado. Con una magnificación de N4X. a) se observa limolita arenosa con predominancia de cuarzo policristalino y carbonato de calcio. b) calcita con fragmentos de la parte 1. c) Limolita arenosa es posible observar el contacto con la parte anterior. d) Arenisca limosa con predominancia de cuarzo y fragmentos terrígenos.

### Cañadón Ostrácodo 220722/3

**Nombre:** Limolita calcárea

**Descripción:** Esta lamina corresponde a una a una limolita calcárea. Mal seleccionada, polimíctica, con predominancia de clastos de micrita. Tiene una proporción considerable de carbonato de calcio. El esqueleto está compuesto por un 40% de cuarzo, 10% feldespato potásico, 10% fragmentos terrígenos y un 40% de carbonato de calcio, correspondiente a micrita. La forma de los cristales es subhedrales. El empaquetamiento de la roca es matriz soportado y presenta cemento de composición calcárea en drusa. La selección de la roca es baja y su contacto entre clastos es tangente, destacándola como una roca submadura texturalmente mientras que su madurez composicional presenta un índice de 2 (Fig 39a). También es posible observar restos de valvas pertenecientes a ostrácodos, fragmentadas y rodeadas por micrita (Fig 39b). Al igual que algunas vetas rellenas con carbonato de calcio que son posteriores a la diagénesis de la roca.



**Figura 39.** Imágenes de las láminas delgadas de la muestra 220722/3, tomadas en nicols paralelos y cruzados. Con una magnificación de N4X. a) se observa limolita arenosa con predominancia de cuarzo policristalino. Con vetillas rellenas de carbonato; b) limolita calcárea con restos de ostrácodos con micrita adyacente.

## **Cañadón Ostrácodo 220722/2**

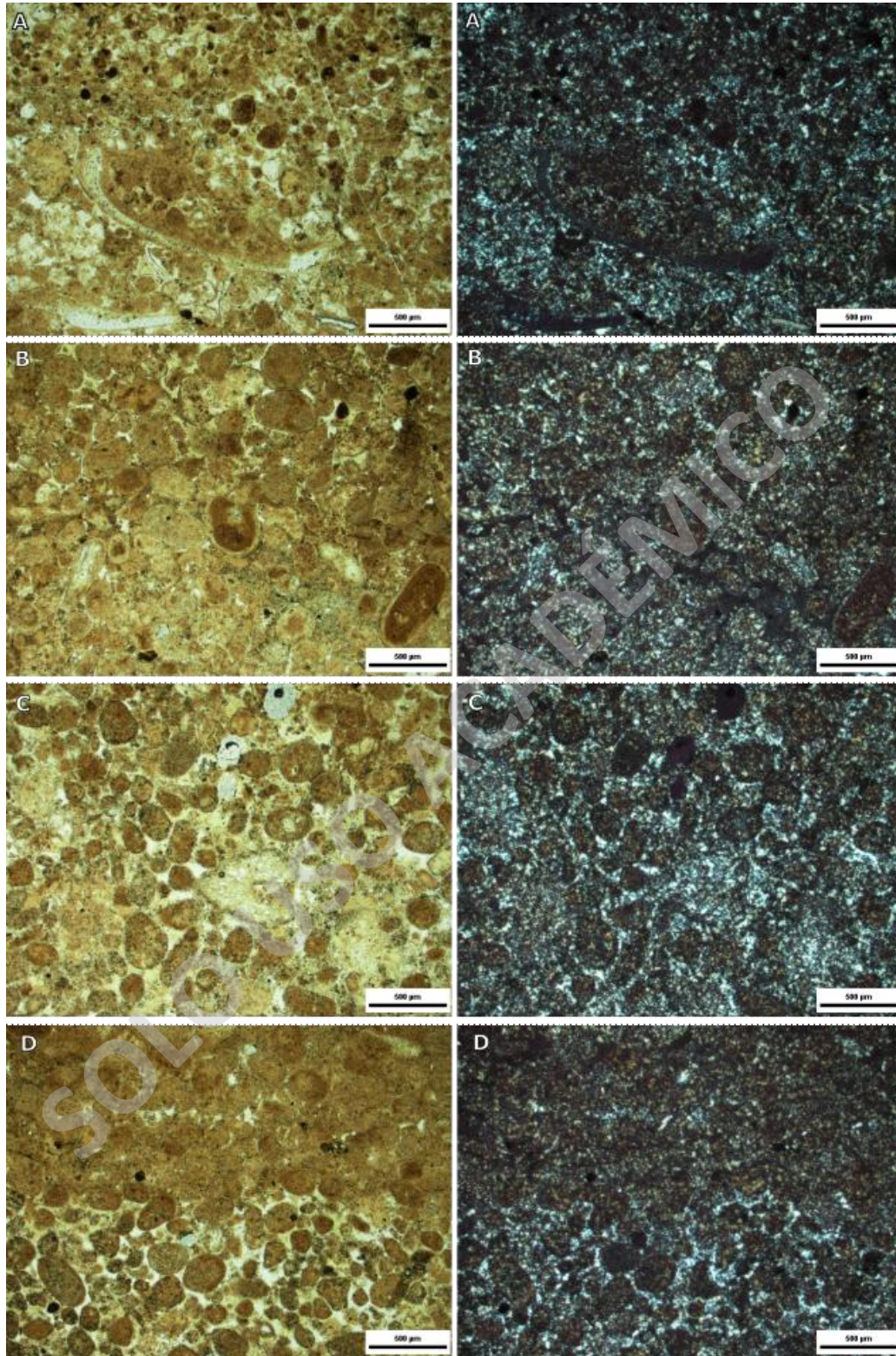
**Nombre:** Limolita calcárea

**Descripción:** Esta lamina se encuentra subdivida en 4 partes. La primera parte (fig 40a) Corresponde a una limolita calcárea. Mal seleccionada, polimíctica, con predominancia de clastos de micrita. Tiene una proporción considerable (40%) de cuarzo policristalino. El esqueleto está compuesto por un 40% de cuarzo, 10% feldespato potásico, 10% fragmentos terrígenos y un 40% de carbonato de calcio, correspondiente a micrita y pellet. La forma de los cristales es subhedrales. El empaquetamiento de la roca es matriz soportado y presenta cemento de composición calcárea en drusa. La selección de la roca es baja y su contacto entre clastos es tangente, destacándola como una roca submadura texturalmente mientras que su madurez composicional presenta un índice de 2. Presenta tanto fragmentos de valvas de ostrácodos como una concentración de pellet hacia el techo.

La segunda parte presenta un aumento en la concentración de oolitos, reduciendo la concentración de pellet presente (Fig 40b).

En la tercera parte la concentración de oolitos se mantiene, pero su dispersión es mayor, la concentración de pellet se mantiene y vuelven a aparecer restos de valvas de ostrácodos (Fig40c).

Ya finalizando en el techo, la concentración de pellet vuelve a aumentar y la lámina presenta un cambio gradual de una limolita calcárea a una caliza microcristalina con presencia de oolitos y pellet (Fig 40d).



**Figura 40.** Imágenes de las láminas delgadas de la muestra 220722/2, tomadas en nicols paralelo y cruzado. Con una magnificación de N4X. a) Se observa limolita calcárea con predominancia de cuarzo policristalino. Con presencia de restos de valvas de ostrácodos, pellet y oolitos; b) limolita calcárea con presencia abundante de pellet y oolitos con micrita adyacente; c) Limolita calcárea con abundancia de pellet, reducción en el porcentaje de oolitos y aparición nuevamente de ostrácodos. D) Limolita calcárea con cambio gradual a caliza microcristalina con gran concentración de pellet y oolitos.

## 7 Discusión

Aun cuando el detalle estratigráfico de nuestro país sea alto y aunque ha habido un aumento significativo en el número de investigaciones y hallazgos de fósiles, el periodo triásico sigue siendo un periodo importante para la comunidad científica, albergando un variado registro paleontológico, que incluye vertebrados, plantas fósiles, y microorganismos, que permiten un mayor entendimiento de los eventos que ocurrieron durante dicho periodo en nuestro continente y país.

Se han realizado propuestas de ambientes y temporalidad de las sucesiones basadas tanto en la correlación estratigráfica como en el registro fósil de la zona de estudio, con variaciones en cuanto al detalle estratigráfico como ambientes descritos y sugeridas por autores desde Fortt & Frutos (1976) hasta Otero et al. (2023). Basso y Marinovic (2003) obtuvieron una edad de 238 Ma para la base de la sucesión e Irmis et al. (2022) recalcularon y disminuyeron el error de dicho fechado.

### 1. Análisis del ambiente sedimentario local de Sierra del Químal.

En el estudio de los Estratos El Bordo, Fortt & Frutos (1976) caracterizaron esta secuencia como una mezcla de rocas ígneas extrusivas y sedimentarias que coexisten con facies sedimentarias transicionales y pantanosas con restos de reptiles y plantas.

Covacevich (1981) a partir del análisis de ostrácodos, su distribución espacial y la escasa disociación de sus restos óseos, interpretó que la depositación de estos organismos fue en un medio subacuático, tranquilo y de escasa profundidad.

Posteriormente, Fortt (1981) enfocándose en el análisis de fósiles de vertebrados y ostrácodos, asocia la zona a un ambiente de depositación continental, donde episodios de condiciones lagunares son evidentes. Además, cuenta con la presencia de un importante volcanismo cercano, indicando un contexto con actividad volcánica notable y condiciones climáticas templadas.

Y, finalmente Fortt (1982), basándose en el estudio de ostrácodos, redefinió las condiciones de depositación, tomando en consideración la prolongada presencia de niveles de lavas en la parte inferior de la zona estudiada, considerando las condiciones como extremas y desfavorables para la vida orgánica. Asocio la parte

inferior de la secuencia a un ambiente transicional, posiblemente una laguna costera salobre con conexión al mar, proporcionando un entorno favorable para la proliferación de ostrácodos en la zona de estudio. Asimismo, la parte superior de la secuencia se relacionó con un ambiente lagunar continental, indicando una transición hacia condiciones puramente terrestres y sugiriendo la existencia de episodios lagunares recurrentes durante el proceso de sedimentación.

Fortt, en resumen, interpreta los Estratos El Bordo como una secuencia que refleja una transición de ambientes a lo largo del tiempo. Comenzando con un ambiente transicional con posible influencia marina, que transiciona hacia un entorno puramente continental, respaldando la idea de un proceso de regresión marina en la región.

En este trabajo a partir de la asociación de facies sedimentarias se plantea un ambiente sedimentario subdividido en 3 posibles microambientes, los cuales se les asocian a distintos miembros de la unidad

Microambiente 1: Los niveles de limolita maciza y calizas cristalinas en la base de la zona de estudio sugieren un ambiente de plataforma carbonatada o de margen pasivo, y la presencia limolitas con óxidos de hierro en contacto gradual sugiere un cambio en las condiciones de sedimentación. La presencia de calizas con planos de estratificación ondulosa se encuentra posiblemente relacionados con cambios en las condiciones de sedimentación relacionados con cambios en la dinámica fluvial de la zona.

Tanto la presencia de intercalaciones de niveles de areniscas y limolitas con estratificación plano-paralela con presencia de fósiles y madera, como niveles de limolita maciza con gradación a lutita y limolita con estratificación plano-paralela, son representativas de ambientes someros de baja energía con posibles periodos de mayor energía. La presencia de estromatolitos al igual que los ostrácodos, y el contenido de O<sub>x</sub>Fe son indicadores de una exposición prolongada de los sedimentos a ambientes con saturación de agua y oxígeno se asocian comúnmente con ambientes acuáticos poco profundos como lacustres o palustres. La presencia y distribuciones de fósiles de Ostrácodos bien preservados y con una concentración elevada son representativos de un ambiente somero lacustre, donde se produjeron eventos que desestabilizaron las condiciones ambientales en la que estos

organismos podían coexistir. Posiblemente relacionadas a eventos de aumentos en la temperatura y mayores condiciones de evaporación (Flügel, 2010).

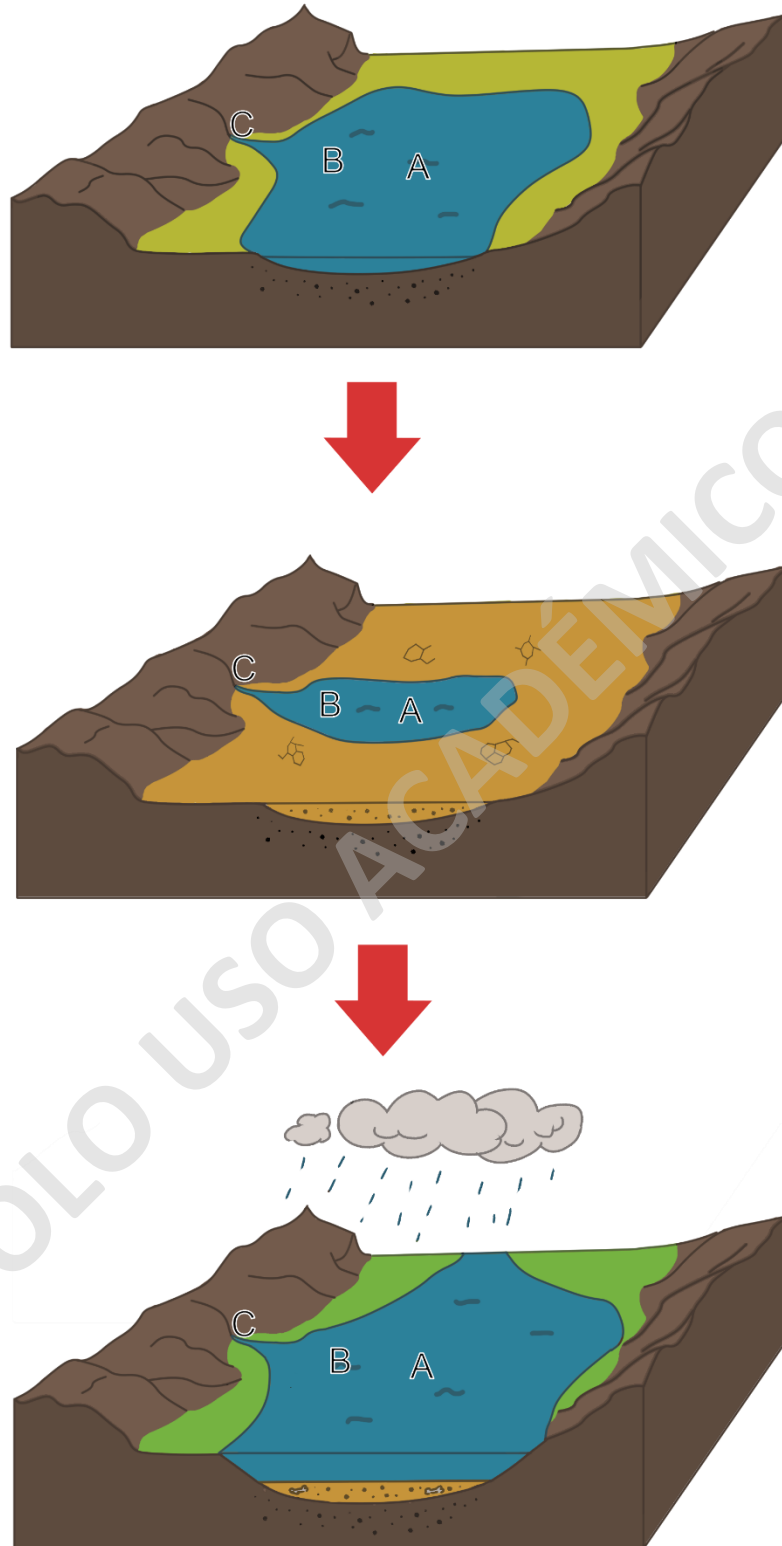
Microambiente 2: En los niveles medios de la columna estratigráfica se presentan niveles de limolita con estratificación plano-paralela intercalada con lutita, caliza cristalina con estratificación ondulosa y presencia tanto de lentes de arena en lutitas como grietas de desecación en limolitas. Además, se observan niveles de mayor potencia compuestos por areniscas finas a medias macizas asociadas a ambientes transicionales someros de baja a media energía con periodos de posible sequias con exposición subaérea (Catuneanu, 2009).

Microambiente 3: Finalmente, en la sección superior de la columna, se presentan niveles secuenciales de limolita con intercalaciones de arena fina y lutita con patinas ferruginosas con gradación normal y presencia de troncos in situ, relacionado con un aumento en el nivel de energía. Seguido de esto, hay una secuencia de niveles limolita con areniscas finas cuarcíferas que presentan una gradación inversa a arenas gruesas, asociándose a un ambiente de canal fluvial con fluctuaciones en su caudal. La sección finaliza con depósitos de conglomerados asociados a canales fluviales de río activo (Miall, 2017).

Bajo esta premisa, debido a la carencia de indicadores sedimentológicos y fosilíferos, se descarta la presencia de un ambiente con aporte marino. Mientras que la presencia de los estromatolitos, secuencias sedimentarias de lutita intercalada con limolita, presencia de niveles de calizas cristalinas y microcristalinas, son indicadoras de ambientes tranquilos, sino que también ricos en carbonatos, que se asocian tanto a ambientes de planicies de inundación como lacustres.

En resumen, a partir del análisis exclusivamente sedimentario de la zona, Estratos El Bordo se entenderían como una secuencia que refleja una transición de ambientes continentales a lo largo del tiempo. Comenzando con un ambiente lacustre somero de baja energía, junto con presencia de un importante volcanismo cercano, indicando un contexto con actividad volcánica notable y condiciones climáticas templadas, que transiciona periódicamente a ambientes más extremos finalizando con una transición a un ambiente fluvial de río.





**Figura 41.** Figura ilustrativa de posibles cambios en el medio ambiente que pueden generar depósitos descritos en la zona de estudio, evolucionando de un ambiente lacustre a uno más árido y finalmente a un ambiente asociado a llanuras de inundación. A) corresponde al sector asociado a un ambiente lacustre somero. B) corresponde a un sector donde es posible observar depósitos asociados a ambientes lacustres con transición a fluviales. C) correspondería al sector donde se generan depósitos asociados a un ambiente con aporte principalmente fluvial.

### 1.1 Origen de fuente sedimentaria

Durante el Triásico, producto de tectónica extensional, se produjeron dos episodios de rift, cuya generación de fallas normales asociadas a estos procesos dieron origen a la cuenca de Domeyko.

De acuerdo con Gonzales F. (2017), el primer episodio synrfit generó litarenitas feldespáticas y volcarenitas. Donde los altos contenidos de cuarzo en areniscas de las formaciones triásicas Quebrada del Salitre y Sierra de Varas detectadas en estudios de proveniencias, sitúan gran parte de las muestras en el área a una proveniencia de orógeno reciclado. Sin embargo, se considera que tanto en la Formación Quebrada del Salitre como en Sierra de Varas hay influencia marina y tomando en consideración estudios petrográficos, la tectónica extensional de ese periodo y el submuestreo de gran parte de formación Sierra de Varas. es posible asociar la genesis de la zona de estudio a un ambiente tectónico desarrollado durante el Ladiniano correspondiente a un arco magmático.

Aun cuando no se realizó conteo modal en este trabajo. Hay características petrográficas que permiten avalar un aporte local en la zona. La predominancia en las muestras sedimentarias de una concentración extensivas de mono minerales da indicios de un fuerte retrabajo y aporte de fuente local asociado a una cuenca de carácter endorreico y aquellos componentes de aporte carbonatico es in situ que se encuentra próxima a un arco magmático. Por lo que dentro de un régimen extensivo. La zona de estudio se consideraría una cuenca endorreica bajo una perspectiva de red de drenaje y bajo la perspectiva tectónica se consideraría una cuenca de intra-arco extensional.

### 2. Formalización de Estratos El Bordo.

De acuerdo con las características litológicas de los cuerpos rocosos estudiados, es posible la categorización de los Estratos El Bordo como unidad litoestratigráfica, cuyos estratos se encuentran interrumpidos en sectores por discontinuidades.

Para el correcto establecimiento de una nueva unidad estratigráfica formal es necesario cumplir con la definición, caracterización y descripción adecuadas, de acuerdo con la guía estratigráfica internacional.

Nomenclatura: Debido a la diferencia en los nombres dados entre distintos autores de manera informal, es necesario darle una denominación a la zona estudiada que

permita una clara asociación con los nombres referenciados por los autores previos al sector. Por lo anterior, se propone mantener como nombre fuente, el sector geográfico de la zona, llamándose entonces Formación El Bordo.

Debido a las características litológicas de la Formación Tuina, definida inicialmente por Raczynski (1963) y ubicada al oeste de la Cordillera de Domeyko. La cual subyace en discordancia con la formación Tonel y se subdivide en tres miembros. Donde el miembro inferior está constituido principalmente por lavas andesíticas, brechas andesíticas, y con intercalaciones de lavas dacíticas y conglomerados de clastos angulosos. El miembro medio que consiste en areniscas, limolitas y conglomerados continentales. Y el miembro superior, predominante en la formación, compuesto de lavas andesíticas, brechas volcánicas, lavas riolíticas y tobas de lapilli y cristalinas (Gómez Schulz, I. 2017). Es posible considerar una relación entre el techo de esta formación, con Formación El Bordo ya que una intercalación tobácea en el miembro superior entregó una edad U-Pb en circones de  $236.3 \pm 2.5$  Ma (Henríquez et al., 2014). Cercana a los  $238,7 \pm 0,4$  recalculados en circones a tobas dacíticas en la base de la unidad de estudios. No obstante, esta relación aun es escasa para poder considerar Formación El Bordo como parte de la Formación Tuina, ya que las características litológicas difieren con las descritas en este trabajo. Pero no se descarta la posibilidad que tanto la base de Formación El Bordo como el techo de Formación Tuina presenten tobas dacíticas de procedentes de un mismo evento.

En cuanto al estratotipo, se toma en consideración la localización geográfica de Escarpe El Bordo, ubicada entre los  $23^{\circ} 0'30.27''$  y  $23^{\circ}04'30.1''$  latitud sur, y los  $68^{\circ}35'12.0''$  y  $68^{\circ}31'40.8''$  longitud oeste, a 70 kilómetros al sureste de la ciudad de Calama, región de Antofagasta, Chile.

Descripción de la unidad en el estratotipo: Una descripción general del estratotipo, corresponde a una sucesión sedimentaria de ambiente continental lacustre con transición a fluvial. Presentándose un cambio en la estratigrafía desde su base a techo, la cual es subdivida en 3 miembros. Donde el miembro basal consiste en secuencias de limolitas, arenisca calcárea junto con calizas cristalinas y microcristalina intercaladas con niveles de lavas dacíticas, con ocurrencia hacia el techo de trazas fósil, y ostrácodos indet en niveles de limolita, y presencia de niveles con estromatolitos en niveles de calizas cristalinas. El miembro medio se presentan

una secuencia de lutita que grada hacia limolitas estratificadas con lutita subordinada y lentes de arena media, con presencia de grietas de desecación en niveles de limolitas. Y el miembro superior presenta en su base intercalaciones de limolita estratificada con niveles de arenisca fina con grabación a muy fina, con presencia de troncos fósil in situ en niveles de limolitas. Hacia el techo se observan niveles de limolita intercalada con arenisca gruesa con estratificación plano-paralela, arena media maciza, intercalación de arena media, arena gruesa y conglomerados.

Aspectos regionales: La zona de El Bordo cubre un área aproximada de 43km<sup>2</sup>. Asociada a un ambiente lacustre con transición a fluvial. Y aun cuando no se hayan realizado descripciones de un mayor contenido fósil de las muestras recolectadas durante la campaña, de acuerdo a la información estudiada y publicada por autores previos la zona de estudio cuenta con la presencia de un abundante registro fósil correspondiente a invertebrados: Estromatolitos, ostrácodos indet de agua dulce, *cyzicus*, Paraparchitidae; Flora fósil: Troncos indet, neocalamites, *kurrtziana cacheutensis*, *taeniopteris*; Vertebrados: Silesaurade indet, *Chilenosuchus forttae*, *pseudoneaonide*, *temnospondilo* y *Guaymayenia paramillensis*.

Edad: De acuerdo con el estudio realizado por Basso & Marinovic (2003) a partir de la realización de dataciones radiométricas en tobas dacíticas ubicadas en el sector Suroeste de la Sierra de Químal de 240±0,6 Ma, se asoció la base de zona de estudio al piso Ladiniano. Estos datos posteriormente fueron confirmados por Irmis et al (2021) donde se realizaron dataciones de U-Pb en circones de tobas dacíticas que entregaron una edad de 238,7±0,4, en la base. Aun cuando no hay registro de dataciones hacia el techo de la zona de estudio, esta se encuentra subyaciendo a la Formación Tonel, de una edad cretácica a partir de dataciones de K/Ar a biotitas y roca total que cortan la formación, tomada a partir de un contacto discordante angular, lo que indicaría la posible presencia de un hiato temporal entre ambas.

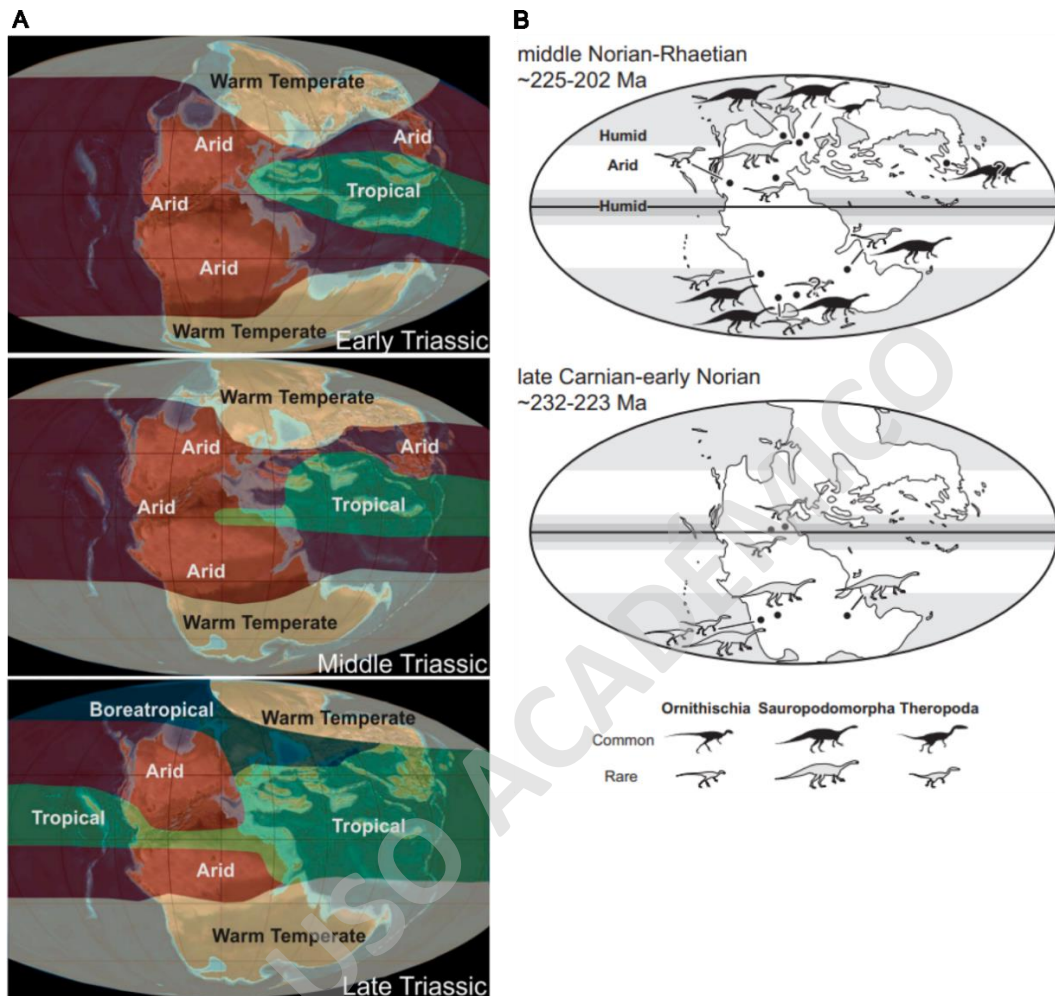
Correlación con otras unidades: tomando en consideración la información recopilada con autores previos que han investigado en la zona, la Formación El Bordo se encuentra hacia el este, en contacto discordante angular con la Formación Tonel, de edad cretácica, con una génesis asociada a depositación durante periodos de alzamiento de la cordillera de Domeyko. Hacia el Sur, sobreyaciendo en contacto discordante angular, se encuentra la Formación Tambores, de edad oligocena-

miocena, con una litología consistente de paraconglomerados y areniscas poco consolidadas, depositados en el área comprendida entre el borde oeste del Salar y el flanco oriental de la Cordillera de Domeyko. Hacia el sur se encuentra en contacto por una inconformidad con el Complejo Intrusivo Cerro Químal.

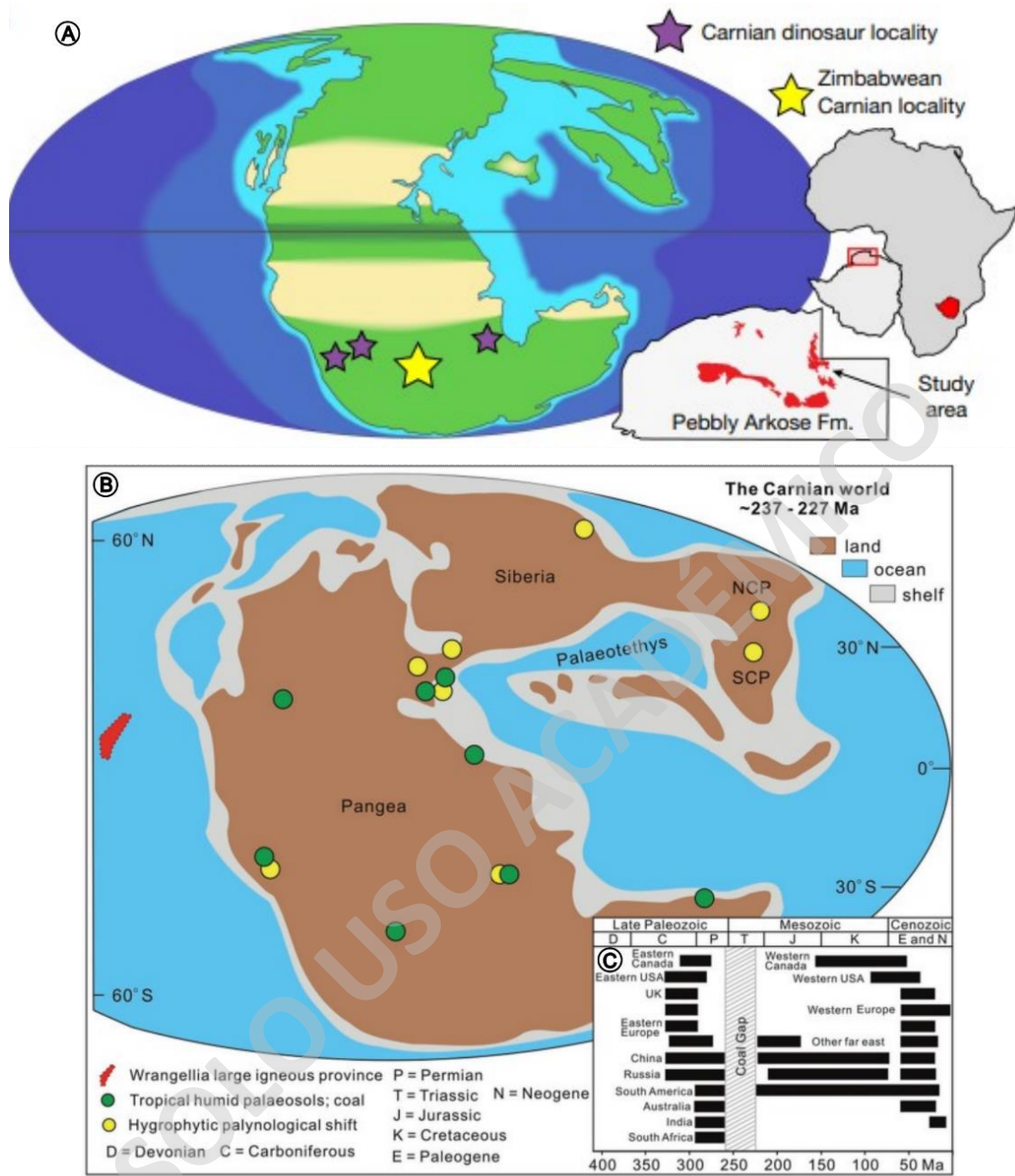
Genesis: El origen de la formación fue discutido en el punto 1.1 de la discusión, tomando en consideración estudios petrográficos, la tectónica extensional de ese periodo y el submuestreo de gran parte de formación Sierra de Varas, es posible asociarlo a un ambiente tectónico desarrollado durante el ladiniano correspondiente a un arco magmático. Pero aun es necesario estudios posteriores de proveniencia sedimentaria de muestras obtenidas de la zona de estudio para poder confirmar su génesis.

3. Implicancias regionales y globales del registro sedimentario, ambiental, y fosilífero. El Período Triásico fue el escenario del origen y la diversificación temprana de los ecosistemas mesozoicos después de la extinción masiva del final del Pérmico. Y durante este tiempo, la configuración del supercontinente Pangea, fue uno de los factores que caracterizó el periodo, Donde la configuración paleogeográfica combinada con un alto nivel del mar global y sin presencia de casquetes polares, junto con procesos de grandes erupciones de provincias ígneas, habrían tenido un efecto extraordinario en el clima global (fig 42a) (Whiteside et al. 2015). Durante este periodo, la presencia de los primeros dinosaurios y sus parientes eran escasas a bajos niveles latitudinales a inicios del período Triásico Tardío, aumentando su abundancia entre 10 a 15 millones posteriormente (fig 42 b).

Dentro de las distintas localidades descritas con registros de fósiles asociados al piso Carniano es posible observar una distribución latitudinal similar entre formaciones ubicadas en distintos continentes en la actualidad y cambios tanto ambientales como geoquímicos relacionados con el Episodio Pluvial Carniano (fig 43).

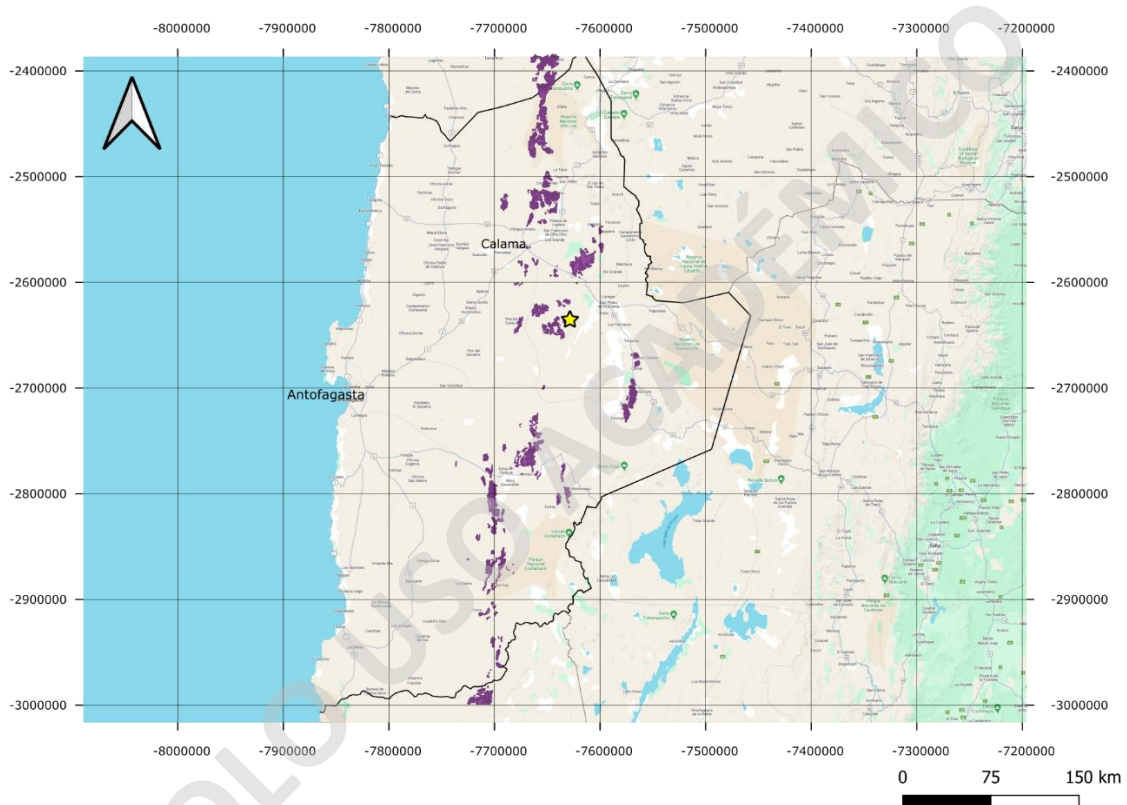


**Figura 42.** a) Mapas paleogeográficos del Período Triásico y zonas paleoclimáticas inferidas a partir de indicadores litológicos. (extraído de Mancuso et al. 2021); b) Mapa esquemático del Triásico Tardío que muestra las zonas climáticas latitudinales (11, 12) y la distribución de los principales clados de dinosaurios. Cada símbolo de dinosaurio en la mayoría de los casos representa una región con múltiples localidades fosilíferas que contienen el clado ilustrado. Los signos de interrogación indican incertidumbre geocronológica para ocurrencias de saurópodomorfo en Tailandia (extraído de Whiteside et al., 2015).



**Figura 43.** Imágenes esquemáticas de Pangea durante piso Carniano. A) Localidad del norte de Zimbabwe y distribución geográfica de otras localidades con dinosaurios del Carniano en la misma paleolatitudinal con composición taxonómica similar en todo el sur de Pangea. Estrellas de color morado son representativas de la base de la Formación Ischigualasto en argentina, Formación Santa María en Brasil, y Formación Maleri en India (extraída de Griffin et al., 2021); B) Cambios ambientales y geoquímicos durante el Episodio Pluvial del Carniano (CPE) y paleogeografía durante el Carniense y ubicación de los datos que indica cambios ambientales durante el CPE (extraído de Zhang et al., 2023); C) Cambios a largo plazo en la distribución del carbón que muestran la brecha de carbón del Pérmico Superior al Triásico Medio (extraído de Zhang et al., 2023).

Tomando en consideración el contexto regional durante el periodo Triásico, si bien el registro estratigráfico de este periodo en Chile no es amplio y en su mayoría las formaciones triásicas presentan rocas de origen ígneo o asociadas a ambientes marinos distribuidas extensionalmente en la franja de la cordillera de Domeyko (fig 44). Es posible realizar una comparativa entre Formación El Bordo y unidades aledañas de edad similar, como Formación Tuina, Formación Pular, y Formación Sierra de Varas.



**Figura 44.** Imagen representativa de la distribución de unidades triásicas en la región de Antofagasta. Estas corresponden a unidades tanto sedimentarias de origen continental como marino, e ígneas, distribuidas a lo largo de la cordillera de Domeyko. En amarillo se muestra el sector correspondiente a la Formación El Bordo.

Formación Tuina: subdividida en tres miembros. Donde el miembro inferior está constituido principalmente por lavas andesíticas, brechas andesíticas, y con intercalaciones de lavas dacíticas y conglomerados de clastos angulosos. El miembro medio que consiste en areniscas, limolitas y conglomerados continentales. Y el miembro superior, predominante en la formación, compuesto de lavas andesíticas, brechas volcánicas, lavas riolíticas y tobas de lapilli y cristalinas.



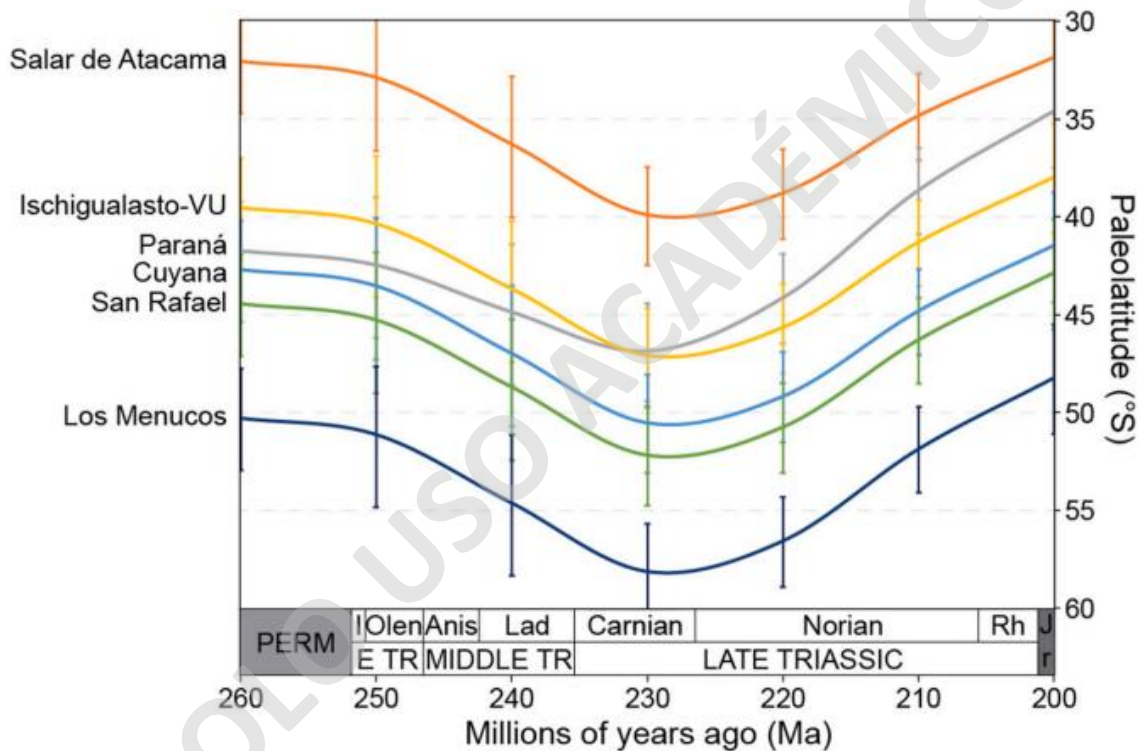
Presenta un registro fósil de conchostracodos de la familia *Cyzidae*; y hoja de *Equicetácea*. Asociándose a un ambiente de depositación continental con desarrollo importante de volcanismo de carácter andesítico y subordinadamente dacítico, habiendo ocurrido además depositación sedimentaria con componentes clásticos principalmente volcánicos en un ambiente posiblemente lacustre o lagunar.

Formación Pular: presenta en su base una sucesión sedimentaria con gradación normal que va desde conglomerado clastosoprotado, polimíctico compuestos de riolita, tobas riolíticas y andesitas a areniscas fina con estratificación cruzada. Subyaciendo niveles de conglomerados matriz soportado con clastos bien subredondeados envueltos en una matriz de grano grueso. Y finaliza con lutitas bituminosas con intercalaciones centimétricas de calizas con fauna de ostrácodos y algas estromatolíticas. La cual finaliza con areniscas tobáceas bien estratificadas y una ignimbrita masiva, fragmentaria. Dentro del registro paleontológico se observan un contenido de Palinomorfos, restos de plantas: *Pseudoctenis fissa*, *Kurtziana cacheutensis*, *Dicroidium odontopteroides var. Odontopteroides*; Conchostracodos: *Euestheria forbesi*; y microfauna calcárea descrita como *Volganella sp.* Asociándose a dos ambientes de depositación donde el primero correspondiente a su base se relaciona a una parte distal de un ambiente de río trenzado y un segundo ambiente relacionado a un ambiente tranquilo de dominio lacustre de agua dulce.

Formación Sierra de Varas: Corresponde a una secuencia de rocas piroclástica y volcanosedimentarias, con una sección de rocas calcáreas en su base e intercalaciones de rocas clásticas y calcáreas marinas en su sección superior con incorporaciones de un cuerpo subvolcánico dacítico (González et al., 2015). Dentro del registro paleontológico se presentan impresiones foliales de *Taniopteris*, *Pterophyllum*, Dipteridaceae y Ginkgoephyta, *Dicroidium sp.* Y *Neocalamites sp.* Abundantes en los niveles calcáreos y tobáceos, junto con presencia de estéridos y bivalvos. De acuerdo con el registro estratigráfico, Formación Sierra de Varas corresponde al relleno de una cuenca sedimentaria continental, donde su nivel base representa una sucesión transgresiva de eventos de depositación fluvial de sedimentos volcanoclasticos intercalados con flujos piroclásticos y depósitos de caíd. Su miembro medio registra la evolución de un ambiente lacustre y la presencia de calizas estromatolíticas sugieren una actividad volcánica explosiva (Contreras et al., 2014). Y las primeras intercalaciones calcáreas del miembro superior se pueden

interpretar como depósitos de plataforma calcárea somera correspondiente a las primeras evidencias de transgresión marina en la cuenca (González et al., 2015).

De igual forma es posible realizar comparaciones con formaciones descritas de edad similar presentes en Argentina, producto de su distribución cercana a la Formación el Bordo durante el periodo Triásico medio-superior (fig 45), como son las formaciones Chañares, Ischichuca y Ischigualasto, las cuales son parte del Grupo Agua de la Peña, formadas durante el triásico medio-tardío, a partir de una etapa sinrift (Milana y Alcober 1995).



**Figura 45.** Paleolatitud aproximada de cuencas clave del Triásico de América del Sur, con intervalos de confianza del 95%. Extraído de Mancuso et al., 2021.

Formación Chañares: compuesta por conglomerados volcanoclasticos y matriz tobácea con gradación a areniscas y pelitas rojizas. Interpretados como eventos mantiformes generados por flujos de detritos y barro volcánico. Dentro del registro paleontológico de la formación se encuentran arcosaurios proterochámpsidos, dinosauriformes y Pseudosuchia. A su vez se presentan terápsidos Traversodóntidos, chinicuodóntidos, Probaignognátidos, Stahleckeridos,

Kannemeyeriids. Constituyendo uno de los mejores registros de tetrápodos del Triásico Medio.

Formación Ischichuca - Los Rastros: La Formación Ischichuca según López et al (1989) representa junto a la formación Los Rastros, diferentes situaciones de paleogeográficas de un mismo sistema deposicional. Ischichuca está integrada por importantes espesores de pelitas negras, asociadas a facies lacustres, junto con facies distales y de frentes deltaicos. Esta Formación se encuentra representada por parasecuencias de barras de desembocadura que alcanza una potencia de 800 m aproximadamente. Constituida por facies distales del sistema fluvio-deltaico-lacustre. Mientras que la formación Los Rastros presenta un contacto transicional con la unidad inferior, y un espesor máximo de 500m con acuñaamiento hacia el noreste. En los tramos inferiores predominan depósitos correspondientes en su mayoría a llanuras deltaicas bajas, asociadas a barras de desembocadura, canal distributivo y de desbordamiento, mientras que en la sección superior predominan depósitos fluviales, con cuerpos canalizados arenoso-conglomerádicos. Dentro del registro paleontológico de la formación se encuentran paleovetebrados: *Myrilepis elongatus*. Invertebrados: *Cyzycus*, *Palacomutela gelabra*, *Palacomutela occidentalis*. E Inicitas: *Rigalites ischigualastianus*.

Formación Ischigualasto: Esta Formación presenta una potencia máxima de 900m, y presenta una secuencia dominada por elementos finos de arcilla, tobas grises y grises verdosas, con intercalación de bancos de areniscas lenticulares y lentes de arcilla carbonosa (Stipanovic y Bonaparte, 1970). La base de la unidad está definida por una discontinuidad estratigráfica, con niveles de conglomerados avalados por más de un centenar de mediciones de paleocorrientes que coinciden con medidas Oeste – Suroeste. Y su techo se relaciona con una discordancia angular asociada a cambios ambientales de importancia (López Gamundi et al, 1989). Se encuentra descrita como una unidad granocreciente con ciclos internos granodecrecientes de menor jerarquía, los cuales comienzan con areniscas gruesas con estratificación cruzada planar y en artesa, que gradan a limolita con intensas bioturbaciones y ocasionales niveles carbonosos, asociados principalmente a depósitos generados por sistemas fluviales de mediana a alta sinuosidad. Dentro del registro paleontológico se encuentran anfibios: *Laberintodontidos*, *Capitosaurios*. Reptiles: *Lepidosaurios*, *Rincosaurios* de planicies de inundación, *Arcosaurios acuáticos* (ribereño), *Proterochámpsidos acuáticos* (ribereño), *Poposáuridos* de planicies de

inundación, ornitosuquios, dinosaurios, terópodos tanto de planicies de inundación como de posibles tierras altas, terapsidos, y dicinodontes de planicies de inundación, entre otros.

En cuanto al contexto global, se presentan formaciones triásicas, tanto en África, India y Madagascar. Tomando en consideraciones las formaciones Pebbly Arkose, Manda beds y Ntawere, que comparten características sedimentarias y de registro fósil similares a la zona de estudio. La Formación Ntawere es parte de una formación de edad asociada al triásico medio, ubicada en Zambia, con presencia de fósiles de sinápsidos, arcosaurios y temnospondilos, similares a la zona de estudio. Su litología basal va desde mudstone de tonalidad gris y rojiza a arenisca conglomerática con características sugerentes de un sistema de depositación fluvial con laminación cruzada entre mudstone y arenisca fina que indicarían variaciones de energía en sus canales de depositación. Hacia el techo se presentan secuencias con laminación planar y ondulitas cruzadas de arenisca y niveles macizos de mudstone con bioturbaciones, indicando la presencia de depósitos de planicies de inundación proximales a los canales fluviales. Y se hipotetiza dos conjuntos separados en el tiempo a partir del análisis de tetrapodos presentes. Donde un primer miembro basal fue correlacionado bioestratigráficamente con el periodo Carniano y su miembro superior asociado de forma generalizada al triásico superior. La formación Manda (también conocida como Manda Beds) es una formación Triásica en Tanzania con presencia de fósiles vertebrados de arcosaurios, cinodontes, dicinodontes, temnospondilos, entre otros. Similares al a zona de estudio. A partir de análisis sedimentológico y de paleocorrientes además de un análisis de facies se determinó que la formación Manda presenta una variación que va desde paraconglomerados masivos, arenisca laminada y masiva, niveles de mudstone, limo y arcilla con una dominancia de gradación normal. Asociada a ambientes de carácter fluvial dominado por canales de depósitos de arena que implican pérdidas de energía de transporte, junto con la posible existencia de ríos meándricos.

Aun cuando hay una abundancia en el registro fósil de las unidades descritas anteriormente y las interpretaciones de ambientes corresponden a facies lacustres y fluviales, la litología difiere comparándola con la unidad de estudio. Esta unidad

consiste en una secuencia de niveles finos calcáreos intercalados con calizas tanto cristalinas como microcristalinas en la base, las cuales son indicadores de periodos de posibles sobresaturaciones y precipitación de carbonatos en aguas poco profundas, la cual puede producirse por eventos de cambios climáticos drásticos. Esta teoría se sustenta de igual manera por la abundancia de ostrácodos presente en los niveles de calizas en el sector de Cañadón Ostrácodos, y su distribución observada en las láminas 220722/2 y 220722/3. Ya que una explicación para presentarse una concentración elevada de estos organismos es la desestabilización del hábitat en el que se encontraban, lo que se puede relacionar a un posible aumento en las temperaturas presentes durante ese periodo, asociado también al volcanismo activo presente a nivel regional.

Si bien las condiciones regionales se asocian a extensos eventos de volcanismo durante el periodo triásico, las secciones medias y superiores de la zona de estudio se asocian a ambientes lacustres de baja profundidad y fluviales. De igual forma la presencia de troncos y registro de flora fósil descrita en el sector nos hablan de condiciones en las que no solo podían habitar y sobrevivir vertebrados y microorganismos, sino, condiciones templadas con humedad que permite la adaptabilidad y crecimiento de flora en la zona.

Estas condiciones específicas pueden deberse a que la zona de El Bordo se formó en una cuenca durante el alzamiento de la cordillera de Domeyko y la formación de la Cordillera de Los Andes. Esto proporcionó condiciones en las que se producirían aumentos de temperatura que desestabilizarían el hábitat de microorganismos, y mantendrían niveles de humedad para el crecimiento de distintas plantas.



**Figura 46.** Figura ilustrativa del proceso de precipitación en la zona de estudio durante el periodo cálido del triásico. Al evaporarse las fuentes de agua en la zona, producto al enclaustramiento de la cuenca generada por la cordillera de los andes y la formación de la cordillera de Domeyko, la humedad en el ambiente presenta dificultades acumulándose en el mismo sector hasta sobresaturarse en el ambiente y comenzar a condensarse y precipitar.

## 8 Conclusión

A partir de los resultados estratigráficos, bioestratigráficos, y petrográficos realizados durante este trabajo se llegó a las siguientes conclusiones con respecto a la hipótesis formulada.

1. Se construyó una columna estratigráfica de 500 metros aproximados de potencia de la sección sedimentaria carbonáticas y clástica de Estratos El Bordo, solo considerando las mediciones de los niveles entre miembros primarios y secundarios. Mientras que Los niveles de lavas que cubren estas capas no se incluyeron en las mediciones de la columna estratigráfica.
2. Se realizaron asociaciones de facies que permiten la identificación de 3 ambientes de depositación. Relacionados con miembros sedimentarios informales pertenecientes a los estratos El Bordo. El primer miembro consiste en una secuencia dominada por limolitas y lutitas con laminación plano-paralela, que contiene restos de ostrácodos y vertebrados fósiles, finalizando con tobas cristalinas y líticas. El segundo miembro está compuesto por calizas cristalinas predominantes y microcristalinas subordinadas, con presencia de estromatolitos, bioturbaciones, ostrácodos y restos fósiles de vertebrados. Sobreyace un nivel de arenas medias con laminación plano-paralela y ondulitas centimétricas. El tercer miembro consiste en niveles de limolitas arenosas y arenas finas a medias, intercaladas con calizas cristalinas y microcristalinas, con laminación plano-paralela y ondulosa, y niveles centimétricos de materia orgánica. El último miembro comienza con una base de limolitas con lutitas bicolores y contacto erosivo, seguida de niveles de arena media intercalados con limolitas, que presentan una gradación inversa hasta llegar a una intercalación de conglomerados con niveles de limolita y arena media subordinada. Este último miembro muestra laminación plano-paralela, concreciones y restos de vertebrados y troncos fósiles en el nivel base. No se descarta la posibilidad de una gradación lateral.
3. Se interpretó la sucesión sedimentaria de los estratos El Bordo como un ambiente lacustre somero, con presencia de organismos triásicos de agua dulce, como los ostrácodos y los Pseudobeaconiidae, y la presencia de fósiles de vertebrados

continentales descritos previamente, los cuales tienen una distribución cercana en cuanto a sus restos. La presencia de niveles de materia orgánica, así como de calizas cristalinas y microcristalinas, indica un ambiente enriquecido en materia orgánica con episodios de estancamiento y sobresaturación de carbonatos, posiblemente debido a condiciones ambientales cálidas.

4. Se propone la caracterización formal de la unidad estratos el bordo, cambiando su nombre y estatus estratigráfico a Formación El Bordo. Compuesto por 3 miembros informales de 250 m, 100 m, y 150 metros de potencia aproximadamente
5. Se estima que, a pesar de las condiciones de alta actividad volcánica y elevadas temperaturas a escala global durante el periodo Triásico, la presencia de asociaciones de facies palustres y someras en lugar de facies fluviales y aluviales sugiere un aislamiento local de la zona frente a las condiciones globales de ese periodo. Que se atribuye idealmente a un sistema orogénico común. En este contexto, se propone que los procesos geológicos regionales, como la actividad tectónica y la configuración paleogeográfica, pueden haber desempeñado un papel significativo en la determinación de las facies presentes en el registro estratigráfico del Triásico en esta área específica.



## 9 Recomendaciones.

A partir de los resultados y conclusiones de este trabajo se recomiendan las siguientes acciones dentro del área de la Sierra de Químal, con el objetivo de poder complementar y resolver incertidumbres que aún se encuentran asociadas al área.

1. Resolver en terreno el levantamiento de una columna estratigráfica en el sector descrito por Basso y Mpodozis como miembro 2, y poder de esta manera reconocer, complementar y posicionar esta zona dentro de la columna estratigráfica completa y resumida del área de estudio.
2. Realizar dataciones radiométricas de cuerpos ígneos estratificados en la zona media y techo del área de estudio con el fin de poder obtener un rango más acotado para la zona de estudio y de igual forma determinar un posible rango más específico de edad a los eventos de depositación de los niveles con limolitas calcáreas con colonias de microorganismos fósiles.
3. Realizar una caracterización de los niveles de lavas, ignimbritas y tobas con el fin de poder acotar la potencia efectiva de la unidad, a través de la estratigrafía, perfiles estructurales, geoquímica de la roca total. Además de cartografía geológica y apoyo de imágenes satelitales.
4. Realización de mayor número de campañas paleontológicas con el fin de poder detallar y esclarecer aún más información sobre los distintos organismos y microorganismos que pueden ayudar a la interpretación de macro y microambientes durante el periodo Triásico.
5. Realizar campañas de comparación directa entre la zona de estudio y las formaciones aledañas y de edad triásica cercanas con el fin de poder completar la información necesaria para la formalización de la zona de estudio.

# Bibliografía

Amilibia, A., & Skarmeta, J. (2003). La inversión tectónica de la Cordillera de Domeyko en el Norte de Chile y su relación con la intrusión de sistemas porfídicos de Cu-Mo: Actas del 10° Congreso Geológico Chileno, Concepción.

A. Amilibia, F. Sàbat, K.R. McClay, J.A. Muñoz, E. Roca, G. Chong, The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean Mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko, *Journal of Structural Geology*, Volume 30, Issue 12, 2008, Pages 1520-1539, ISSN 0191-8141, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.08.005>.

Audax, Syprian & Kiwango, & Mishra, Diwakar. (2020). Sedimentology and Paleocurrent Study of the Early Triassic Rocks in the Ruhuhu Basin, SW Tanzania. 46. 383-396.

Basso, M., Mpodozis, C., 2012. Carta Cerro Químal, región de Antofagasta. Carta Geológica de Chile 143, 1-48.

Basso, M.; Marinovic, N. 2003. Antecedentes geocronológicos de volcanismo triásico en la zona de los Estratos El Bordo, Antofagasta, Chile. In Congreso Geológico Chileno, No. 10, Actas CD-ROM. Concepción.

Boggs Jr, S. (2009). Principles of sedimentology and stratigraphy. Pearson Education.

Charrier. R., Pinto, L., and Rodríguez, M.P. 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Origen in Chile. Chapter 3. The Geology of Chile. The Geological Society, London, p. 21-114.

Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J. P., Blum, M. D., Dalrymple, R. W., Eriksson, P. G., ... & Willis, B. J. (2009). Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 92(1-2), 1-33.

Covacevich, W. 1981. Informe Paleontológico Interno N° 29, Hoja Toconao. Informe (Inédito), Instituto de Investigaciones Geológicas: 28 p. (\*)

Einsele, G. (2000). Sedimentary Basins: Evolution, Facies, and Sediment Budget. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Espinoza Vargas, M. E. (2019). El rift de Domeyko en la evolución de Gondwana suroccidental e implicancias en la construcción del orógeno Andino= The Domeyko rift in the evolution of southwestern Gondwana and insights on the Andean building.

Flint, S.; Hartley, A.; Rex, D.; Guise, P.; Turner, P. 1989, Geochronology of the Purilactis Formation, Northern Chile: an insight into late cretaceous/early tertiary basin dynamics of the central Andes. *Revista Geológica de Chile* 16 (2) : 241-246.

Flügel, E. (2010). Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application. Springer-Verlag.

Folk, R. L. (1962). Spectral subdivision of limestone types. In Ham, W. E. (Ed.), Classification of carbonate rocks: a symposium (pp. 62-84). American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1.

Fortt, A. 1981. Geología General de los Cuadrángulos: Cerro Químal, Laguna Tevinquiche, Llano de la Paciencia y Salar de Atacama, II Región (Inédito), Instituto de Investigaciones Geológicas: 48 p. (\*)

Fortt, A. 1982. Estudio de ostrácodos de la Formación El Bordo. Región de Antofagasta, Chile. Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica. 38 p.

Fortt, A.; Frutos, J. 1976. Geología de los Cuadrángulos Cerro Químal y Llano de la Paciencia. (Inédito), Instituto de Investigaciones Geológicas: 53 p. (\*)

García-Garmilla, F., Arribas, J., López-Gómez, J., & Mas, R. (2011). Sedimentología y estratigrafía. Pearson Educación.

Gómez Schulz, I. (2017). Límite oriental del patrón de rotaciones tectónicas de los Andes Centrales, Norte de Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144280>

Irmis, R. B., Mundil, R., Mancuso, A. C., Carrillo-Briceño, J. D., Ottone, E. G., & Marsicano, C. A. (2022). South American Triassic geochronology: Constraints and uncertainties for the tempo of Gondwanan non-marine vertebrate evolution. *Journal of South American Earth Sciences*, 103770.

Kokogian, D.A. & Spalletti, Luis & D., Morel & Artabe, Analia & Martinez, Ricardo & Alcober, Oscar & Milana, Juan & Zavattieri, Ana & Papú, O.H.. (1999). Los depósitos continentales triásicos.

Miall, A. D. (2017). *The geology of stratigraphic sequences* (Vol. 1). Springer.

Miall, A. D. (2021). *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology* (2nd ed.). Springer International Publishing.

Miall, A. D. (2021). *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology* (2nd ed.). Springer International Publishing.

Middleton, G. V.; Hampton, M. A., 1973. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition. In: *Turbidites and Deep Water Sedimentation. Short Course Notes*, American Geophysical Institute-Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists.

Moreno, K. 2001. Informe Preliminar Prospección Estratos de El Bordo Cerro Químal, II Región. Informe (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería: 9 p. Santiago. (\*)

Moscoso, R. 1979. Geología de una franja transversal a la Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes a la latitud de Domeyko (29°S), Región de Atacama. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 166p. Santiago.

Nichols, G., 2009. *Sedimentology and stratigraphy*. 2nd edition, Wiley & Sons, p. 419.

Niemeyer, H., & Urrutia, C. (2009). Transcurrencia a lo largo de la Falla Sierra de Varas (Sistema de fallas de la Cordillera de Domeyko), norte de Chile. *Andean geology*, 36(1), 37-49.

Osorio, R.; Rivano, S. 1985. Paraparchitidae (Ostracoda) del Paleozoico superior en la Formación Pular (Harrington, 1961), Quebrada de Pajonales, vertiente occidental de la Sierra de Almeida, Antofagasta. In *Congreso Geológico Chileno*, No. 4, Actas 1: 439-457. Antofagasta.

Otero, R.A., Rubilar-Rogers, D., Soto-Acuña, S., Vargas M., A., Mella Rojas, G., Ugalde, R., Rojas, O., Rojas, J., & Novas, F.E. (2023). New records of continental vertebrates from the

Triassic of the Atacama Desert, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 121, 104155. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104155>.

Ottone, E. G. ., & Marsicano, C. A. . (2017). Groeber y el Triásico en la Argentina. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 74(1), 74-80. Retrieved from <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/265>

Peacock, Brandon & Steyer, J. Sébastien & Tabor, Neil & Smith, Roger. (2017). Updated geology and vertebrate paleontology of the Triassic Ntawere Formation of northeastern Zambia, with special emphasis on the archosauromorphs. *Journal of Vertebrate Paleontology*. 37. 8-38. 10.1080/02724634.2017.1410484.

Ramirez, C. & Gardeweg, M. 1982. Hoja Toconao, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, nO 54, 117p.

Reading, H. G. (2018). *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. John Wiley & Sons.

Reading, H. G., & Collinson, J. D. (1996). *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy* (Vol. 1). John Wiley & Sons.

Reading, H. G.; Levell, B. K., 1996. Controls on the sedimentary record. In: *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy* (Ed. Reading, H. G.). Blackwell Science, Oxford, p: 5-36.

Tucker, M. E. (2001). *Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks* (3rd ed.). Wiley-Blackwell.

Raup, D. M., & Sepkoski Jr, J. J. (1984). Periodicity of extinctions in the geologic past. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 81(3), 801-805.

Whiteside, Jessica & Lindström, Sofie & Irmis, Randall & Glasspool, Ian & Schaller, Morgan & Dunlavey, Maria & Nesbitt, Sterling & Smith, Nathan & Turner, Alan. (2015). Extreme ecosystem instability suppressed tropical dinosaur dominance for 30 million years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 112. 10.1073/pnas.1505252112.

Zhang, Peixin & Yang, Minfang & Jing, Lu & Jiang, Zhongfeng & Zhou, Kai & Xu, Xiaotao & Ye, Wang & Wu, Li & Chen, Huijuan & Zhu, Xuran & Guo, Yanghang & Ye, Huajun & Shao, Longyi & Hilton, Jason. (2023). Floral response to the Late Triassic Carnian Pluvial Episode. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 11. 1199121. 10.3389/fevo.2023.1199121.