

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Presentación del problema	1
1.2. El caso de la Provincia de Limarí	6
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivo General	8
1.3.2. Objetivos Específicos	9
1.4. Hipótesis	9
1.5. Metodología	9
1.5.1. Antecedentes bibliográficos y mapa regional	10
1.5.2. Análisis morfotectónico general	11
1.5.3. Mapeo y análisis estructural de sensores remotos	11
1.5.4. Trabajo en terreno	12
1.5.5. Estudio digital de la deformación en la Cuenca Mesozoica	12
1.5.6. Análisis geométrico y pseudobalance de secciones	13
1.6. Otros antecedentes	13
2. Geología de la Zona en Estudio	14
2.1. Basamento Paleozoico	14
2.1.1. Superunidad Elqui SUE (Carbonífero)	15
2.1.2. Superunidad Ingaguas SUI (Pérmico-Triásico Inferior)	15
2.2. Cuenca Mesozoica	16
2.2.1. Cuenca Jurásica	16
2.2.2. Cuenca Cretácica	19
2.3. Intrusivos Terciarios	26
2.3.1. Grupo 1 (ca. 66-64 ma)	26
2.3.2. Grupo 2 (ca. 57 Ma)	26
2.3.3. Grupo 3 (ca. 50-48 ma)	27
2.3.4. Grupo 4 (ca. 43 ma)	27
2.3.5. Grupo 5 (ca. 41 ma)	28
2.3.6. Grupo 6 (ca. 34 ma)	28
2.4. Depósitos Neógenos-Cuaternarios	29
2.5. Estructuras	29
2.5.1. Falla Tulahuén	29
2.5.2. Falla Vicuña	30
2.5.3. Estructuras Secundarias	30

3. Resultados y Análisis	32
3.1. Análisis del Relieve Orogénico	32
3.2. Análisis Geológico Regional	35
3.3. Descripción de la estructura en la zona en estudio	38
3.3.1. Zona occidental	39
3.3.2. Zona oriental	41
3.4. Descripción de la deformación en la cuenca mesozoica	47
3.5. Interpretación de la estructura en la zona en estudio	53
3.5.1. Pseudobalance de sección tipo	54
3.5.2. Estimación de la profundidad de la estructura	56
3.5.3. Geometría de la estructura en profundidad	58
4. Discusión y Conclusiones	61
Bibliografía	67
5. Anexos	76
5.1. Anexo 1: Mapa Geológico-Estructural Sector Los Molles	76
5.2. Anexo 2: Análisis de Sensibilidad	78

Índice de figuras

1.1.	Izquierda, modelo de elevación digital de Sudamérica con principales rasgos tectónicos. Derecha, modelo de elevación digital de los Andes Centrales; en blanco se presentan las principales unidades morfotectónicas (Jordan, 1983; Mpodozis y Ramos, 1990); en azul segmentado, la ubicación aproximada del frente topográfico occidental. Además se muestran los principales sistemas de falla en Chile. Los segmentos negros A,B,C,D,E y F corresponden a las trazas de los perfiles topográficos de la Figura 3.1. El cuadro rojo muestra ubicación de la zona de estudio. El rectángulo negro muestra la ubicación de los mapas regionales de las Figuras 1.2 y 3.4 WTS, West-Vergent Thrust System (Muñoz y Charrier, 1996); FV, Falla Vicuña (Mpodozis y Cornejo, 1988); FSR-FP, fallas San Ramón y Pucuro (Farías, 2007); DC, Depresión Central; PC, Provincia Costera; CF, Cordillera Frontal; PreC, Precordillera; CP, Cordillera Principal; WAT, West Andean Thrust (Armijo <i>et al.</i> , 2015). Base topográfica: ASTER GDEM V2, NASA y METI.	4
1.2.	Izquierda, mapa tectónico de la Región de Coquimbo y parte sur de la Región de Atacama. Se muestran las principales unidades tectónicas consideradas en este trabajo (Basamento, Cuenca Mesozoica, Arco Mesozoico, Arco Terciario) y las morfounidades Provincia Costera y Cordillera Frontal. Línea blanca segmentada muestra ubicación aproximada del escalón topográfico. Se destaca la Falla Vicuña, y la zona en estudio. Notar la estrecha relación espacial entre el escalón topográfico y la Falla Vicuña. Los tres segmentos blancos O-E muestran ubicación aproximada de los modelos esquemáticos de la derecha. Derecha, modelos esquemáticos modificados de Moscoso y Mpodozis (1988) que muestran los estilos estructurales del borde occidental del Basamento en la Cordillera Frontal, y su relación con la deformación en su cobertura mesozoica. Basado en: Rivano y Sepulveda, 1986; Mpodozis y Cornejo, 1988; Nasi <i>et al.</i> , 1985; Pineda y Calderón, 2008; Moscoso <i>et al.</i> , 1982; Moscoso <i>et al.</i> , 2010; Arévalo, 2009; Mapa Geológico de Chile 1M (SERNAGEOMIN, 2003); Ragona <i>et al.</i> , 1995; Rodríguez, 2013; Mapas SIG del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).	5
1.3.	Mapa de ubicación de la zona en estudio	8
1.4.	Esquema de las relaciones entre las metodologías a seguir (rectángulos de colores) y cada uno de los objetivos específicos propuestos (rectángulos negros) para alcanzar el objetivo general de esta memoria (rectángulo marrón inferior).	10

2.1.	Columnas estratigráficas generales de la zona de estudio y sus relaciones laterales. columna a) representa las unidades en el sector nor-poniente de la zona de estudio; columna b) representa al sector centro de la zona de estudio; columna c) representa al sector nor-oriente de la zona de estudio. SUE, Super Unidad Elqui; SUI, Super Unidad Ingaguas; Jtc, Formación Tres Cruces; Jm, Formación Mostazal; Ja, Formación Algarrobal; Krt, Formación Río Tascadero; Kp, Formación Pucalume; Kqm, Formación Quebrada Marquesa; Kqlt, Formación Quebrada la Totora; Kv, Formación Viñita; Kle, Formación Los Elquinos. Ti1, Ti2, Ti3, Ti4, Ti5, Ti6a y Ti6b, grupos intrusivos terciarios.	25
3.1.	Perfiles topográficos oeste-este a lo largo del flanco occidental de los Andes chilenos, destacando el frente topográfico y las principales unidades morfotectónicas. Se muestra la latitud aproximada de las secciones, y la ubicación exacta de las trazas se ilustra en la Figura 1.1. En los perfiles C, D, E y F, se trazó la envolvente de la topografía para suavizar los efectos de las incisiones fluviales y glaciales. Escala vertical exagerada 5 veces. WTS, <i>West Thrust System</i> ; FV, Falla Vicuña; FSR, Falla San Ramón; WAT, <i>West Andean Thrust</i>	33
3.2.	Arriba, modelo de elevación digital de la Región de Coquimbo (ASTER GDEM V2, NASA y METI). Línea segmentada indica ubicación aproximada del escalón topográfico (Modificado de Rodríguez, 2013). El rectángulo de color negro muestra la zona en estudio. Se identifican las trazas este-oeste de los perfiles topográficos G, H e I. El círculo azul, indica el punto desde donde se tomó la fotografía de la Figura 3.3. Abajo, secciones topográficas O-E de la región de Coquimbo. Se señala la ubicación de la Falla Vicuña y la zona en estudio (Escala Vertical Exagerada). Notar el cambio de configuración del relieve al desaparecer la falla Vicuña en la zona en estudio. FV, Falla Vicuña.	34
3.3.	Fotografía que expone el escalón topográfico generado por la falla Vicuña en el valle del Río Elqui. Notar la diferencia de ~ 1 km en la vertical.	35
3.4.	Mapa Regional de la Región de Coquimbo, la parte sur de la Región de Atacama y parte de la Provincia de San Juan (Argentina). Basado en: Rivano y Sepulveda, 1986; Mpodozis y Cornejo, 1988; Nasi <i>et al.</i> , 1985; Pineda y Calderón, 2008; Moscoso <i>et al.</i> , 1982; Moscoso <i>et al.</i> , 2010; Arévalo, 2009; Mapa Geológico de Chile 1M (Sernageomin, 2003); Ragona <i>et al.</i> , 1995; Rodríguez, 2013; Mapas SIG del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). PiF, Falla Pinte; SFF, Falla San Felix; ABF, Falla Agua de los Burros; LPF, Falla La Plata; RF, Falla Rivadavia; BTF, Falla Baños del Toro; VF, Falla Vicuña; ECF, Falla El Chape; ZFR, Zona de Falla Romeral; LF, Falla Llimpo; MF, Falla Manquehua; PF, Falla Pocuro.	36
3.5.	Sección esquemática con los principales rasgos geológicos regionales y su relación con el relieve orogénico.	38

- 3.6. Principales rasgos estructurales de la zona en estudio. La falla Vicuña corta la cuenca mesozoica, cabalgando las unidades del Cretácico Inferior en el bloque oriental, por sobre la Formación Los Elquinos del Cretácico Superior tardío en el bloque occidental. Esta falla decapita parcialmente al Anticlinal Guanto (informal). Al este, aparece el Sinclinal Guanto, el cual parece genéticamente relacionado con la falla Vicuña, dando paso, en la esquina más oriental, a la Falla Rapel. Esta última cabalga, en dirección oeste, al basamento por sobre la cuenca mesozoica. Esta configuración estructural bien definida en el sector norte, desaparece de manera transicional hacia el sur, donde la cuenca comienza a bascularse de manera suave ($\sim 20^\circ$) hacia el noroeste, en el borde norte del macizo de Basamento, y de manera más abrupta, en su borde occidental. Estas flexuras de la cuenca alrededor del macizo y en dirección opuesta a este, generan monoclinales de casi 9 km de longitud de onda que rodean al basamento. Por su parte, la falla Tulahuén, que se expone con una traza recta, con rumbo NNE-SSO, pone en contacto lateral las rocas del Cretácico Superior tardío en el bloque occidental con las del Cretácico Superior temprano, en el bloque oriental. Esta culmina en su tramo norte al converger con la falla Vicuña. Ver Anexo 1 para leyenda de unidades geológicas e información más detallada. El rectángulo negro indica la ubicación de la Figura 3.12. 40
- 3.7. Imagen de Google Earth con orientación NNE y vista a la Quebrada Luncas (Anexo 1). Se observa un pliegue anticlinal simétrico en la Formación Los Elquinos (Kle), en cuyo núcleo aloja un plutón del primer grupo intrusivo (Ti1, 66-64 ma). Su orientación aproximada es N-S y posee una longitud de onda cercana a los 9 km. 41
- 3.8. a) Imagen de Google Earth con orientación SSO, en la que se aprecia una falla normal de alto ángulo en el contacto entre el basamento (bloque este) y la cuenca jurásica (bloque oeste). b) Fotografía de la misma falla, tomada desde el valle del Río Los Molles. Bz, Basamento; Jtc, Formación Tres Cruces; Jm, Formación Mostazal; Krt, Formación Río Tascadero. 42
- 3.9. Arriba, fotografía panorámica oeste-norte-este del sector centro-norte de la zona en estudio, tomada desde la cumbre del funicular Los Molles. Abajo, interpretación geológica-estructural de la fotografía. Se observan dos cordones de montaña oeste-este separados por el Río Palomo, que exhiben configuraciones estructurales diferentes. En el cordón de los cerros Buitre y las Cruces, en el sector de Quebrada las Represas, se observa el paquete Cretácico basculado al oeste con una inclinación de entre 40° y 50° . Este se encuentra levemente cabalgado hacia el este sobre sí mismo por la Falla Río Palomo. En este sector nace el extremo sur del anticlinal Guanto que acompaña a la Falla Vicuña hacia el norte (Figura 3.6). Hacia el este, se observan las formaciones cretácicas Pucalume (Kp) y Río Tascadero (Krt) sobreyaciendo a la Formación Algarrobal (Ja) del Jurásico. Este paquete se prolonga hacia el este de manera subhorizontal. Notar el acuñamiento gradual de la Formación Río Tascadero en esta misma dirección. El Cordón de los cerros de La Morena y las Moteadas muestra a la cuenca mesozoica envolviendo al basamento (Bz) y basculada al O en el frente del macizo. En el extremo oeste, la Formación Río Tascadero exhibe un sinclinal asimétrico, analizado con mejor detalle en las Figuras 3.13 y 3.14. Notar la deformación diferencial en esta formación, en contraste a las otras unidades mesozoicas, la cual posee el doble del espesor observado en la misma inmediatamente al norte. Dos fallas inversas de vergencia al W cortan a todas las unidades. Fotografía por R. Lacassin. 43

3.10. Fotografía panorámica E-S-O tomada desde el funicular Los Molles. Se expone la Cuenca Mesozoica basculada al oeste, apoyada sobre el macizo de Basamento. Bz, Basamento; Jm, Formación Mostazal; Krt, Formación Río Tascadero; Kp, Formación Pucalume; Kv, Formación Viñita. Fotografía por R. Lacassin.	46
3.11. Fotografía panorámica W-N-E tomada desde el Cerro Morro Blanco. Se expone la Cuenca Mesozoica basculada al oeste, apoyada sobre el macizo de Basamento. Una falla inversa de alto ángulo desplaza parte del macizo hacia el suroeste por sobre la cuenca. La Formación Río Tascadero exhibe deformación interna en forma pliegues anticlinal y sinclinal, con una longitud de onda de ~ 600 mt.	46
3.12. Mapa Detalle de la deformación en la cuenca mesozoica en el piedemonte de la Cordillera Frontal. Se ilustran las líneas de estratificación que pudieron ser reconocidas a través de análisis de fotografías aéreas, imágenes satelitales y fotografías de terreno. Los cuadros negros Sector Los Molles, Sector Mostazal y Sector El Maitén indican ubicación de las Figuras 3.13, 3.15 y 3.16 respectivamente. Para detalle de leyenda y simbología ver Anexo 1.	48
3.13. Arriba, acercamiento al mapeo estructural en el sector Los Molles. Líneas blancas indican trazas de estratificación de la Formación Río Tascadero (Krt). Círculo rojo y flecha indican lugar y orientación de la fotografía de la Figura 3.14. Segmento A-A' indica traza de perfil inferior. Abajo, perfil A-A' con las líneas de estratificación de la Krt en perspectiva. Estas forman un pliegue sinclinal asimétrico de 1 km de longitud de onda y cuyo eje se encuentra basculado al noreste. Su limbo oriental posee manteos cercanos a los 80ř, y el occidental, aproximadamente 35ř. Se encuentra desgarrado por una pequeña falla inversa en su flanco oriental. Este cabalgaría hacia el este a través de una falla que ha sido inferida duplicando a la unidad y en la cual se emplazaría un dique de la unidad Ti(4) (43 ma). Al oriente, un plegamiento complejo pero de menor longitud de onda se encuentra cortado por la falla inversa que yuxtapone a la formación jurásica Algarrobal por sobre la Krt. Para simbología y leyenda en detalle, ver Anexo 1.	49
3.14. Fotografía de terreno tomada desde el Funicular Los Molles hacia el NO de la situación descrita en la Figura 3.13. Notar la asimetría de los limbos del sinclinal, y su plano axial basculado al este. Fotografía por R. Lacassin.	50
3.15. Arriba, acercamiento al mapeo estructural en el sector Mostazal, entre los valles de los ríos Los Molles y Mostazal. Abajo, perfil B-B' con las líneas de estratificación de la Formación Río Tascadero (Krt) en perspectiva (escala horizontal igual a la vertical), cuya potencia en esta zona se puede estimar en casi 2 km. Se observa a la Krt basculada hacia el oeste 30ř-45ř, y un pliegue monoclinal al oeste en su interior, con una longitud de onda de ($\sim 1,5$ km). Se reconoce un set de intrusivos tabulares perteneciente a la unidad Ti(4), concordantes con dicho basculamiento. Para simbología y leyenda en detalle, ver Anexo 1.	51
3.16. Arriba, acercamiento al mapeo estructural en el sector El Maitén, entre los valles de los ríos Mostazal y San Miguel. Abajo, perfil C-C' con las líneas de estratificación en perspectiva (escala horizontal igual a la vertical). Se observa deformación interna en la Formación Río Tascadero, exhibiendo un par anticlinal-sinclinal de longitud de onda de aproximadamente 600 mt, y cuyos planos axiales se encuentran basculados al este. Para simbología y leyenda en detalle, ver Anexo 1.	52
3.17. Fotografía de terreno tomada hacia el norte, documentando lo detallado en la Figura 3.16.	53

3.18. Sección tipo de la zona en estudio, generada mediante el método Kink. Retrata los principales rasgos y la geometría de primer orden de la deformación en la cuenca mesozoica. Para esto, se hace una serie de consideraciones detalladas en el texto. Se señalan los datos de manto utilizados, y los nombres de las principales fallas. La ventana inferior es un acercamiento al detalle en la zona del sinclinal de Los Molles. Las líneas rojas corresponden a los ejes axiales, y el segmento negro superior indica los vértices de los trazos A-A' B-B1-B2-B3-B4-B' en el Mapa Anexos. Notar el acuñamiento de 5' de la Formación Río Tascadero hacia el este. Área con cruces indica posición aproximada de intrusivo terciario. Ver Anexo 1 para simbología y leyenda en detalle.	55
3.19. Figura de Woodward <i>et al.</i> (1985) ilustrando el método geométrico para estimar la profundidad de un despegue con base en el área deformada. Para este es necesario una serie de supuestos detallados en el texto. Escogiendo un nivel guía, se debe conocer el acortamiento (La-Lc) y el área generada por la deformación (A2). . . .	57
3.20. a) Modelo rampa-despegue generado en el Software Move, que mejor reproduce las características de primer orden del frente de deformación documentado en superficie. La geometría de la estructura consiste en un despegue principal a 20 km de profundidad, una rampa de 37' de inclinación al este seguida de una segunda rampa a 12,5 km de profundidad y un <i>splay</i> frontal a 48' de inclinación. b) Una tercera rampa a una profundidad de 24 km se agrega para reproducir la continuidad subhorizontal de la cuenca hacia el este. c) Al modelo se le incorporan las fallas que se identificaron en superficie.	59
3.21. Arriba, modelo numérico de la Figura 3.20. Abajo, perfil tipo pseudobalanceado de la zona en estudio. Notar que la geometría monoclinial de la Cuenca Mesozoica y su longitud de onda de aproximadamente 10 km, están satisfactoriamente reproducidos por el modelo de la figura superior.	60
4.1. Figura modificada de Mitra (2002). Se muestra un tipo de estructura de acomodo al plegamiento de paquetes estratificados. A esta se le denomina <i>Limb Wedge Thrust</i> y se da en los limbos de pliegues anticlinales y sinclinales en que existe una diferencia en el <i>strain</i> de las unidades que lo componen.	64
5.1. Análisis de sensibilidad llevado a cabo mediante el software MOVE.	78