

III TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1 Formulación de problema	1
1.2 Objetivos.....	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
1.3 Hipótesis de trabajo	5
1.4 Metodología	5
2. Marco teórico	7
2.1 Unidades geomorfológicas	7
2.2 Evolución geomorfológica.....	10
2.3 Estudios previos	14
3. Modelando evolución de relieve y química	19
3.1 Procesos exógenos	19
3.2 Meteorización	19
3.3 Erosión y depositación.....	20
3.4. Regímenes de equilibrio	20
3.5. Modelos existentes.....	22
3.6. CIDRE	25
3.6.1 Balance de masa.....	26
3.6.2 Leyes de erosión y distancia de transporte	28
3.6.3 Clastos	32
4. Configuración del modelo de referencia	36
4.1 Marco temporal.....	36
4.2 Condiciones de borde.....	36
4.3 Parámetros del modelo de referencia.....	36
4.4 Resultados del modelo de referencia	42
4.5 Test de Sensibilidades.....	48
4.6 Análisis de perturbación	57
5. Discusiones.....	63
5.1 Representatividad del modelo de referencia	63

5.2 Acerca de perturbar el modelo	65
5.3 Alcances y limitaciones del modelo	67
6. Conclusiones	70
7. Bibliografía	71
8. Anexos	77

V ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Configuración de la malla del modelo	37
Tabla 2: Coeficientes de disolución utilizados, a PH neutro (6-8), obtenidos de Palandri y Khakara (2004).	37
Tabla 3: Resumen de configuración de parámetros erosivos y relacionados con los clastos para el modelo. Para el cálculo de la denudación del sistema se toman inicialmente los valores utilizados en Carretier et al. (2014) y luego se analiza el efecto de cambiar estos valores	38
Tabla 4: Valores promedio del empobrecimiento de los minerales modelados para cada punto de interés y promedio de empobrecimiento total para cada mineral modelado. Los porcentajes corresponden al volumen perdido con respecto al volumen inicial de cada mineral.	46
Tabla 5: Edades promedio de clastos para cada set de tamaño de clastos.	46
Tabla 6: Valores de empobrecimiento de Albita para cada tamaño y posición de clasto testeado.....	47
Tabla 7: Resumen de comparación de aspectos principales entre los datos medidos y modelados.....	47
Tabla 8: Parámetros analizados y rango de valores utilizados en la configuración inicial de los test de sensibilidad.....	48
Tabla 9: Variación de flujo químico y de empobrecimiento de albita y cuarzo al modificar el número de clastos y su diámetro.....	52
Tabla 10: Resumen de las características principales de los modelos propuestos. El modelo A (modelo de referencia) posee una alterabilidad sobreestimada y el modelo B posee una alterabilidad realista	55
Tabla 11: Resumen de parámetros dentro de los cuales CIDRE genera un relieve realista dentro de los valores utilizados.	57
Tabla 12: Resumen de características de los 2 modelos iniciales (A y B) y sus continuaciones (A1, B1, B2, B3 y B4). El modelo A (Modelo de referencia) se configuró con una alterabilidad mayor a lo esperado según la literatura. El modelo B se configuró con una alterabilidad cercana a lo existente en la literatura (Palandri & Khakara, 2004).....	62

Tabla 13: Resumen de resultados más relevantes obtenidos al variar la tasa de precipitaciones.....	77
Tabla 14: Resumen de resultados más relevantes obtenidos al variar la tasa el tamaño de los clastos.	79
Tabla 15: Resumen de resultados más relevantes obtenidos al variar el valor del largo de transporte.....	80
Tabla 16: Resumen de resultados más relevantes obtenidos al variar el valor de K_{br} con respecto a un valor de K_{all} fijo. En este caso $5E-5$	82
Tabla 17: Resumen de resultados más relevantes obtenidos al variar la temperatura.....	84
Tabla 18: Resumen de resultados más relevantes obtenidos al variar la tasa constante de disolución cinética (K_w).	86
Tabla 19: Resumen de resultados más relevantes obtenidos al variar el valor de D_1	88
Tabla 20: Resumen de resultados más relevantes obtenidos el valor de D_2	90
Tabla 21: Resumen de resultados más relevantes obtenidos el valor de K_1	92
Tabla 22: Resumen de resultados más relevantes obtenidos el número de clastos utilizados.....	94

IV ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Arriba, modelo digital de elevación para la zona de Curacaví, que servirá de guía en este estudio. Figura tomada de Vázquez et al. (2016). Abajo, perfil de regolito insitu en la zona de Curacaví y sitio de toma de muestras para el mismo estudio. Imagen tomada de Ramírez (2015).....	3
Figura 2: Se ilustra en la presente figura los tipos de regolito y su espesor en función de la precipitación anual, evapotranspiración y temperatura. Curacaví está indicado en el rectángulo rojo. Figura adaptada de Strakhov, 1967; modificada por Ramírez, 2015. Los datos de la temperatura y precipitación anual fueron tomados de https://es.climate-data.org/location/21738/	4
Figura 3: Mapa geológico simplificado de los Andes de Chile Central y Argentina Centro-Oeste. Imagen de Farías (2008).	9
Figura 4: (Extracto e imagen de Farías et al., 2008) Modelo de evolución de la Depresión Central. (a) Condiciones iniciales dadas por el alzamiento regional de superficie. (b) Respuesta inmediata de la erosión formando empinados knickpoints separados uno de otro a la misma distancia en los ambos ríos mayores. (c) Retención del knickpoint a su arribo a los afloramientos de cuerpos graníticos y rápido retroceso en litologías menos resistentes. (d). Crecimiento de la red de drenaje del río cuyo knickpoint retrocede más rápido e inicio de capturas. (e) Captura del río principal y abandono de la red cuyo knickpoint está retenido por los cuerpos graníticos. (f) Alzamiento del borde costero que induce la	

acumulación sedimentaria, y mayor ingreso de sedimentos en la depresión debido a la mayor erosión en la Cordillera Principal e inicio de las glaciaciones montañosas.	12
Figura 5: Resultados de la modelación hecha por Berman et al. (2016). a) Reconstrucción de la temperatura durante el LGM. Puntos azules indican zonas donde la temperatura en el LGM fue menor que en el presente. b) reconstrucción de las precipitaciones durante el LGM, puntos verdes indican precipitaciones mayores a las actuales y puntos naranjos indican precipitaciones menores a las actuales. Imagen de Berman et al. (2016).	13
Figura 6: Abundancia relativa de las principales fases minerales identificadas con XRD para el saprolito y protolito de la zona de estudio. Figura tomada de Ramírez (2015).	14
Figura 7: Gráfico de empobrecimiento de Na vs profundidad. τ_{Na} , corresponde al volumen perdido, -1 indica un empobrecimiento del 100%, mientras que si es 0 indica empobrecimiento del 0%. Las líneas punteadas son proyecciones lineales de las tendencias entre 0 y 6.8 m, 9.1 y 23.8 m y 25.1 y 31.7 m. Figura tomada de Ramírez (2015).	15
Figura 8: Profundidad versus abundancia de las principales fases minerales en porcentajes relativos vs profundidad en el perfil de saprolito. Leyenda: Qz-cuarzo; Pl-plagioclasa; Hbn-hornblenda; Kln-caolinita. Se puede observar la disminución de la concentración relativa de plagioclasa al acercarse a la superficie, además de una tendencia de ligera disminución entre cuarzo y hornblenda. Ramírez (2015).	16
Figura 9: Perfiles en profundidad de los elementos relevantes en el saprolito. Na muestra un leve empobrecimiento al aumentar la profundidad. Si, Al muestran una tendencia similar pero menos marcada. Na, K, Rb, Mg, Ca y Ba no muestran patrón alguno. Gráficos tomados de Vázquez et al. (2016).	17
Figura 10: Perfil en profundidad para los modelos propuestos de las concentraciones de ^{10}Be . Al ajustar los perfiles resultan tasas de denudación de 62 y 42 m/Ma, para los dos valores extremos utilizados para la densidad del saprolito. Figura y datos tomados de Vázquez et al. (2016).	18
Figura 11: Modelo 1D de meteorización de regolito. El punto 0 indica la superficie, a indica el punto bajo el cual se está produciendo la disolución de una fase mineral reactiva, b indica el contacto entre regolito y roca madre, también es el nivel correspondiente al frente de meteorización. El eje horizontal indica la disolución relativa de la fase mineral, con valor 0 cuando la fase no ha reaccionado, y valor -1 cuando se ha diluido completamente. La línea azul indica la tasa de meteorización. En la imagen de la izquierda, se observa que se desarrolla un perfil de empobrecimiento antes de llegar a la superficie; mientras que, a la derecha al existir una mayor tasa de meteorización, no se alcanza a formar un perfil completo, erodándose físicamente la columna antes de generar un perfil completo. Imagen modificada por Martínez (2014), de Brantley & Lebedeva (2011).	21

Figura 12: Perfiles de empobrecimiento para la meteorización de albita en caolinita, se calcula como una meteorización iso-volumétrica para un sistema compuesto solo de albita y cuarzo. se analizan dos casos: transporte por difusión (a y b), y transporte tanto por difusión como por advección a la velocidad impuesta por la constante de Darcy a través del regolito y la roca base (c, d) a una tasa de erosión constante. Con suficiente advección, (c, d) la tasa de meteorización química aumenta. Con suficiente erosión (b, d), la tasa de meteorización se vuelve igual a la erosión, constituyendo un perfil de estado estacionario. Para los gráficos b y d, la muestra el empobrecimiento de la albita en función de la profundidad, mostrada para varias tasas de erosión E ($mka - 1$) en un estado de equilibrio. Cuando la tasa de erosión es pequeña respecto a la tasa de disolución, la albita es disuelta en profundidad, mostrando un frente de reacción plano, en caso contrario es posible una evolución de la disolución a lo largo del perfil. Figura tomada de Brantley y Levedeba (2010). 23

Figura 13: Geometría del problema solucionado por el modelo propuesta en el modelo por Braun et al. (2015), Se grafica una colina en 2D según que ha desarrollado una capa de regolito de espesor $B(x)$ por la propagación en profundidad del frente de meteorización. El alcance de este frente es de $z - B$. el regolito está atravesado por el nivel freático $H(x)$. Sobre este límite el regolito no está saturado, bajo éste, sí. Figura tomada de Braun et al. (2016). 24

Figura 14: Se muestra la evolución del modelo en condiciones anorogénicas donde la precipitación es disminuida de manera gradual y arbitraria. Las líneas sólidas representan la base de la capa de regolito (o frente de meteorización); las líneas punteadas representan la superficie de la topografía. Figura tomada de Braun et al. (2016). 25

Figura 15: Ilustración de los procesos de erosión y depositación en CIDRE. (a) Flujo múltiple y diferentes flujos calculados: q_s [$L^2 T^{-1}$] flujo entrante por unidad de ancho. T [$L T^{-1}$] tasa de transferencia de sedimento en cada dirección de caudal. ε [$L T^{-1}$] es la tasa de despegue de material (sedimento o roca madre) desde la celda en la dirección de mayor pendiente. D [$L T^{-1}$] tasa de sedimento depositado en la celda. q_s [$L^2 T^{-1}$] es el volumen lateral de flujo sedimentario depositado en la celda. Si es la pendiente en cada dirección de corriente. $w = \text{flujo} \cdot dx = \text{ancho de la celda}$. El agua que ingresa es propagada a celdas más bajas proporcionalmente a la pendiente local en cada dirección. (b) Probabilidad de que un clasto sedimento, se transporte o se despegue, usando los flujos calculados por CIDRE. Figura tomada de Carretier et al. (2016)..... 27

Figura 16: Leyes de producción de regolito. A la izquierda con $d1=0,5$ m; $d2=0,1$ m; $k1= 0,8$. A la derecha $d1=5$ m; $d2=1$ m; $k1=0,5$. Al aumentar $d1$ y $d2$, el incremento y decaimiento de ω es menos sensible al espesor del regolito. La ley humped alcanza un máximo de ω al existir cierto espesor de regolito. 31

Figura 17: Disolución de un clasto compuesto inicialmente por 3 fases minerales: una fase muy soluble (negro), otra de poca solubilidad (gris) y una tercera casi insoluble (gris claro). Previo a la disolución el tamaño del clasto está determinado por las condiciones iniciales y se considera como volumen inicial la proporción de

superficie con respecto a la esfera equivalente. Una vez se diluye el clasto, la nueva área de cada mineral se pondera con respecto a una nueva esfera equivalente, la esfera de mayor tamaño se considera como el contorno del nuevo clasto post-disolución. Este proceso evita que, al modelar dentro de un mismo clasto minerales con tasas de solubilidad muy distintas, el espacio dejado por la rápida disolución, sea considerado como espacio no vacío en el modelo. Imagen de S. Carretier et al. (Sometido). 34

Figura 18: Representación de las celdas en que CIDRE discretiza el espacio modelado como celdas de base cuadrada de lado dx , y como se calcula el flujo químico asociado a la meteorización de clastos en ellas presentes. A: se calcula el flujo disuelto de las distintas capas de sedimento en función del volumen disuelto de cada clasto, y se calcula el total de volumen disuelto para una celda como la sumatoria de cada flujo disuelto calculado en cada clasto de la celda. B: al calcular el flujo disuelto de una celda, se muestra la ecuación que se utiliza al calcular el flujo total del sistema incluyendo las celdas con y sin clastos. Imagen de S. Carretier et al. (Sometido). 35

Figura 19: Configuración del modelo en $t=0$. a) muestra el bloque que representa las peneplanicies descritas para la zona (Vázquez et al., 2016). Adicionalmente se ilustra la disposición puntos de interés en los cuales los clastos se distribuirán a modo de sondaje. b) Disposición en profundidad de los clastos para cada punto de interés presentes en a). En el instante $t=0$ disponen los clastos en profundidad, desde este punto, hasta un metro dentro de la roca, con un espaciamiento de 2 cm. 41

Figura 20: Evolución del relieve y de la capa de regolito a lo largo del modelo. Se observa la orientación general del modelo N-S. desarrollo de knickpoints, y su avance en dirección E. Se remarca en la figura, el área que correspondería a la zona de toma de muestras en los que se basa este estudio (Ramírez, 2015; Vázquez et al., 2016). 43

Figura 21: Desarrollo de la tasa de erosión y el espesor promedio de la capa de regolito durante los 10 Ma de evolución que calcula el modelo, representando desde el inicio del Mioceno hasta la actualidad. La altitud promedio en un inicio es de 2000 metros, simulando un bloque plano, y luego se deja erodar sin movimiento tectónico por lo que el decrecimiento observado es solamente debido a denudación. 44

Figura 22: Desarrollo de la tasa de erosión y el flujo químico durante los 10 Ma de evolución que calcula el modelo, representando desde el inicio del Mioceno hasta la actualidad. El comportamiento inestable del flujo químico entre los 1 y 3 Ma, corresponde a una fase de relieves abruptos en los bordes del modelo, con salida y reingreso fuerte de clastos. El alto valor del flujo químico se relaciona con la facilidad de la biotita en ser disuelta y la alta frecuencia de reingreso de clastos, además de ser una función aun en desarrollo de CIDRE. 44

Figura 23: Vista en profundidad del empobrecimiento de albita para cada punto de interés. El valor 0 indica que un clasto ha perdido todo su volumen de albita, mientras que un valor 1 indica que no ha perdido volumen. Los clastos a mayor

profundidad indican la localización de la interfaz <i>roca madre-regolito</i> . Los valores de empobrecimiento mostrados corresponden a la etapa final del modelo cuyos clastos son fijados a 2 mm de diámetro.....	45
Figura 24: Fase final del modelo, a los 10 M.a, evaluado en distintas combinaciones $K_{br} - K_{all}$, cada grilla corresponde a la fase final al utilizar los valores indicados en los ejes. Para el caso en que K_{all} es menor o igual a K_{br} que el modelo no considera de igual manera ambos coeficientes y que parte del cálculo ejecutado por CIDRE es de carácter probabilístico, es posible que se desarrolle relieve en estos casos, aunque levemente.	50
Figura 25: Resultado de variar en la configuración inicial del modelo el largo de transporte y su efecto en el empobrecimiento de albita y la edad promedio de los clastos antes de salir del sistema.	51
Figura 26: Comportamiento del modelo al variar parámetros sensibles de la ecuación 17. Se muestran el espesor de regolito y el empobrecimiento de albita al variar la constante de alterabilidad K_w (arriba), y d_1 (abajo). La construcción del perfil de empobrecimiento se realiza en zonas con regolito de aproximadamente 20 metros de potencia.	54
Figura 27: Evolución del relieve para los modelos propuestos durante 10 Ma generado por CIDRE, además de el espesor de regolito graficado según intensidad de color para cada configuración.....	56
Figura 28: a) Cambio en el relieve y el espesor de regolito durante el modelo de continuación (A_c). b) Evolución de la altitud promedio y el espesor promedio de regolito en los 10 ka que dura el segundo período agregado, al modificar la tasa de precipitaciones inicial ($r = 0.4$ m/a).....	58
Figura 29: Desarrollo de la capa de regolito al variar K_w . los valores límites del eje de las abscisas representan el inicio del LGM (-20 ka) y el presente (0 ka). El modelo $B_c.4$ sigue la misma evolución que el modelo $B_c.1$ hasta los 10ka, punto donde se separa al volver K_w a su valor inicial. Al considerar todo el tiempo modelado, los modelos $B_c.1$ y $B_c.4$ poseen el mismo valor promedio de K_w , pero con distintos resultados.	60
Figura 30: Evolución de la capa de regolito para el modelo $B_c.4$. Dado que se busca analizar un cambio en la alterabilidad del sistema, el cambio climático se interpreta para este modelo como un cambio en la constante de disolución cinética (K_w). En el instante $T = 0$, el valor de K_w pasa de $1E-4$ a $8E-3$ m/a. Este valor se mantiene constante hasta $T = 10ka$, momento en que vuelve a su valor inicial. El espesor de regolito está graficado según intensidad de color.	61
Figura 31: Evolución del espesor de regolito del modelo $B_c.5$. K_w tiene valor $8E-3$ m/a, en el primer período (desde 0 a 10ka) y $1E-4$ m/a, el valor inicial, en el segundo (10 – 1000 ka). El punto de cambio climático, que indica una vuelta a condiciones áridas, está ubicado a los 20 ka y corresponde al tramo ascendente de la curva entre los 0 y 20 ka. Posteriormente, bajo un clima semiárido el modelo se reequilibra representado como el tramo descendente de la curva posterior a los 20 ka. El reequilibrio desde condiciones de baja a alta alterabilidad ocurre en	

menos de 10 ka versus 1 Ma que es lo que demora el reequilibrio en sentido opuesto.....	61
Figura 32: Esquema del efecto observado al variar la alterabilidad, según lo representado en la figura 29. W es la tasa de producción de regolito. Se observa que, para un sistema con distintos períodos de alterabilidad, el valor esperado de W dependerá de cómo se distribuyan estos períodos a lo largo del historial del sistema. Para el caso de Curacaví, un clima semiárido es capaz de generar regolitos gruesos si es que han existido períodos de alta alterabilidad dentro de la historia del sistema, y que, además, esta capa gruesa de regolito puede ser preservada en un clima árido.....	67
Figura 33: Etapa final de la evolución del relieve en el presente test de sensibilidad.....	78
Figura 34: Etapa final de la evolución del relieve en el presente test de sensibilidad.....	81
Figura 35: Etapa final de la evolución del relieve en el presente test de sensibilidad.....	83
Figura 36: Etapa final de la evolución del relieve en el presente test de sensibilidad.....	85
Figura 37: Etapa final de la evolución del relieve en el presente test de sensibilidad.....	87
Figura 38: Etapa final de la evolución del relieve en el presente test de sensibilidad.....	89
Figura 39 Etapa final de la evolución del relieve en el presente test de sensibilidad.....	91
Figura 40: Etapa final de la evolución del relieve en el presente test de sensibilidad.....	93