

# Tabla de contenido

Introducción .....	1
1.1    Formulación del problema.....	1
1.2    Objetivos.....	2
1.2.1    Objetivo general .....	2
1.2.2    Objetivos específicos.....	2
1.3    Hipótesis de trabajo .....	2
Metodología y Fundamentos Numéricos.....	4
2.1    Metodología.....	4
2.2    Fundamentos numéricos .....	6
2.2.1    Ecuaciones principales .....	6
2.2.1.1    Ecuaciones de conservación.....	6
2.2.1.2    Leyes de tasas de reacción .....	9
2.2.2    Métodos numéricos.....	9
2.2.2.1    Enfoque implícito global.....	9
2.2.2.2    Diferencias finitas integradas .....	10
2.2.2.3    Algoritmo de transporte en el enfoque implícito global.....	11
Antecedentes Geológicos.....	13
3.1    Marco geológico .....	13
3.1.1    Rocas estratificadas.....	14
3.1.1.1    Formación Abanico.....	14
3.1.1.2    Formación Farellones.....	15
3.1.2    Rocas intrusivas .....	16
3.1.2.1    Intrusivos del Paleoceno – Eoceno .....	16
3.1.2.2    Intrusivos del Eoceno-Mioceno Inferior .....	16
3.1.2.3    Intrusivos del Mioceno Inferior.....	16
3.1.3    Depósitos cuaternarios .....	16
3.1.3.1    Depósitos de terrazas continentales .....	16
3.1.3.2    Depósitos aluviales, coluviales y de relleno de valles.....	16
3.1.3.3    Depósitos gravitacionales .....	17

3.1.3.4	Depósitos glaciales.....	17
3.1.4	Estructuras.....	17
3.1.4.1	Zona de Falla Pocuro.....	17
3.2	Marco hidrogeológico .....	18
3.2.1	Características generales de la cuenca del Aconcagua.....	18
3.2.2	Sector San Felipe – Los Andes.....	19
3.3	Alteración hidrotermal asociada a la Zona de Falla Pocuro.....	21
Construcción Modelo Numérico .....		22
4.1	Código numérico .....	22
4.2	Definición de parámetros y escenarios de modelación .....	23
4.2.1	Parámetros comunes .....	23
	Parámetros comunes: mineralogía .....	23
	Parámetros comunes: hidroquímica .....	24
	Parámetros comunes: flujo y transporte .....	25
4.3	Sección modelada.....	25
4.4	Limitaciones .....	27
4.4.1	Limitaciones asociadas a la base de datos .....	27
4.4.2	Limitaciones asociadas a la estructura del software .....	27
4.5	Código de ejemplo.....	28
Resultados y discusión de simulaciones .....		33
5.1	Introducción.....	33
5.2	Relación de variación mineral – variación especies principales.....	34
5.3	Descripción y discusión de resultados.....	36
5.3.1	Escenario I .....	36
5.3.1.1	Mineralogía primaria .....	36
5.3.1.2	Mineralogía secundaria.....	37
5.3.1.3	Porosidad .....	37
5.3.1.4	Especies principales y pH.....	38
5.3.2	Escenario II .....	45
5.3.2.1	Simulación II.2.....	46
5.3.2.1.1	Mineralogía primaria.....	46
5.3.2.1.2	Mineralogía secundaria.....	46
5.3.2.1.3	Porosidad.....	47
5.3.2.1.4	Especies principales y pH.....	47
5.3.2.3	Simulación II.4 .....	53
5.3.2.3.1	Mineralogía primaria .....	53

5.3.2.3.2 Mineralogía secundaria .....	53
5.3.2.3.3 Porosidad .....	53
5.3.2.3.4 Especies principales y pH .....	54
5.3.3 Escenario III.....	60
5.3.3.1 Simulación III.1.....	61
5.3.3.1.1 Mineralogía primaria.....	61
5.3.3.1.2 Mineralogía secundaria.....	62
5.3.3.1.3 Porosidad.....	63
5.3.3.1.4 Especies principales y pH.....	63
5.3.3.2 Simulación III.2.....	69
5.3.3.2.1 Mineralogía primaria .....	69
5.3.3.2.2 Mineralogía secundaria .....	69
5.3.3.2.3 Porosidad .....	70
5.3.3.3.4 Especies principales y pH .....	70
5.4 Validación de modelos .....	76
5.5 Discusión de limitaciones del trabajo.....	81
5.5.1 Simulación de hornblenda como tremolita.....	81
5.5.2 Simulación de zona de falla.....	83
5.6 Discusión de la interacción agua –roca .....	83
5.6.1 Temperatura .....	83
5.6.2 Presión.....	85
5.6.3 Salinidad.....	85
5.6.4 pH .....	86
5.7 Evolución de la porosidad.....	86
5.8 Evolución de los fluidos asociados al sistema hidrotermal de la Falla Pocuro.....	88
Conclusiones.....	90
Bibliografía .....	92

## Índice de tablas

Tabla 4.1: Mineralogía y representación termodinámica correspondiente para una lava básica promedio de la Formación Abanico. Estimación basada en descripciones de Navarro (2014). .....	24
--	----

Tabla 4.2: Composición química de los fluidos a usar en los escenarios de modelación. Datos para Agua Actual de Benavente (2015), y Fluido Hidrotermal 2 de Mroczek et al. (2015).....	25
Tabla 5.1: Desglose de utilización de especies primarias en la formación de la mineralogía del sistema y del valor del volumen molar para cada mineral. Los valores son obtenidos desde la base de datos principal del software. ....	35
Tabla 5.2: Normalización de la participación de las especies principales en la formación de las fases minerales para un volumen de 100cm <sup>3</sup> . En celeste se destacan las especies utilizadas en la formación del respectivo mineral, y en salmón los protones ( <i>H</i> +) liberados en la formación de la fase en cuestión. ....	35

## Índice de figuras

Figura 1.1: Mapa Geológico de zona tipo en que se efectúan las simulaciones (modificado de Navarro (2014). Encerrado en un rectángulo rojo se señala la zona en que se efectúan las simulaciones. ....	1
Figura 2.1: Diagrama de flujo que esquematiza la metodología utilizada en este trabajo. El elemento Fin se alcanza cuando el escenario simulado logra representar la mineralogía secundaria observada en la zona de estudio. ....	5
Figura 3.1: Mapa Geológico de zona tipo en que se efectúan las simulaciones. Mapa modificado de Navarro (2014). ....	14
Figura 3.2: Zonificación Hidrogeológica del Valle del Río Aconcagua. Extraído de Mapa Hidrogeológico 1:1.000.000, DGA, 1989.....	20
Figura 3.3: Esquema del modelo genético para el sistema hidrotermal en ZFP. A) Foco calórico; B) Zona de convección con agua a alta temperatura; C) Zona de coexistencia de agua y vapor; D) Zona de vapor; E) Zona de agua caliente por enfriamiento de vapor; F) Aportes de aguas frías; G) Acuífero freático o somero calentado por aportes profundos; H) Fuente o surgencia con aguas termales. Digitalizado desde Hauser (1987).....	21
Figura 4.1: Esquema de distribución de un intrusivo hipabisal diorítico de piroxeno que se usa como base para definir el tamaño de la grilla de simulación. Imagen obtenida desde Navarro (2014). ....	26
Figura 4.2: Esquema de la configuración de diferentes variables de las simulaciones como: temperatura, mineralogía, hidroquímica, presión hidrostática y permeabilidad. En rincón inferior izquierdo se muestra ubicación de sección en el mapa. En rojo se muestra el perfil tipo de la sección modelada. ....	26
Figura 4.2. Desglose de código implementado para Simulación II.4 (I/IV).....	29
Figura 4.3. Desglose de código implementado para Simulación II.4 (II/IV) .....	30
Figura 4.4 Desglose de código implementado para Simulación II.4 (III/IV).....	31
Figura 4.5. Desglose de código implementado para Simulación II.4 (IV/IV) .....	32

Figura 5.1: Evolución de la tasa promedio de precipitación de la calcita en la simulación II.4. Se elige dicho modelo por ser el de más alta temperatura en que tiene sentido utilizar una tasa promedio (se excluye su uso en el escenario III porque la adición de masa al sistema le quita validez a la interpretación del promedio como valor representativo). .....	33
Figura 5.2: Zoom de figura 5.1 que muestra la evolución de la tasa promedio de precipitación para la calcita en los primeros 10 años de simulación. Se observa que en dicho periodo de tiempo se estabiliza en torno a un valor ( $9E-06$ mol/L medio poroso/s.). .....	34
Figura 5.3: Esquema de Escenario I. En esta simulación se evalúa si las condiciones actuales llevan a la precipitación de algún mineral secundario. CG: Condición geoquímica; HQ: Hidroquímica.....	36
Figura 5.4. Escenario I: Evolución en la concentración de especies principales formadoras de mineralogía secundaria en el punto (60, 50) de la grilla. En rojo se encierra el intervalo de tiempo en que las especies se equilibran con la litología. ....	39
Figura 5.5. Zoom correspondiente al rectángulo rojo seleccionado en Figura 5.4 abarcando el periodo en que las especies alcanzan valores estables.....	40
Figura 5.6. Simulación 1: Evolución de la mineralogía primaria en 1,000 años. a) Anortita; b) Albita; c) Diopsido y d) Tremolita. ....	41
Figura 5.7. Simulación 1: Evolución de la mineralogía secundaria en 1,000 años. a) Calcita; b) Clorita (chamosita); c) Wairakita y d) Epidota (zoisita).....	42
Figura 5.8. Simulación 1: Evolución de pH, porosidad y especies en 1,000 años. a) porosidad; b) <i>pH</i> ; c) <i>Ca</i> + + y d) <i>Mg</i> + +. ....	43
Figura 5.9. Simulación 1: Evolución de especies en 1,000 años. a) <i>Na</i> +; b) <i>Al</i> + + +; c) <i>K</i> + y d) <i>SiO<sub>2</sub></i> . ....	44
Figura 5.10: Esquema de Escenario II. En este escenario se evalúa si la circulación de fluidos a temperaturas mayores a la actual, conduce a la precipitación de la mineralogía secundaria. En verde y celeste se destacan las simulaciones descritas en esta sección los resultados de las simulaciones II.1 y II.2, son entregadas en Anexo A. CG: Condición geoquímica; HQ: Hidroquímica.....	45
Figura 5.11. Escenario II.2: Evolución en la concentración de especies principales formadoras de mineralogía secundaria en el punto (45, 50) de la grilla. ....	48
Figura 5.12. Escenario II.2: Zoom correspondiente al rectángulo rojo seleccionado en Figura 5.11 abarcando el periodo en que las especies alcanzan valores estables.....	48
Figura 5.13. Simulación 2.2: Evolución de la mineralogía primaria en 1,000 años. a) Anortita; b) Albita; c) Diopsido y d) Tremolita .....	49
Figura 5.14. Simulación 2.2: Evolución de la mineralogía secundaria en 1,000 años. a) Calcita; b) Clorita (chamosita); c) Wairakita y d) Epidota (zoisita).....	50
Figura 5.15. Simulación 2.2: Evolución de pH, porosidad y especies en 1,000 años. a) Porosidad; b) <i>pH</i> ; c) <i>Ca</i> + + y d) <i>Na</i> +. ....	51
Figura 5.16. Simulación 2.2: Evolución de especies en 1,000 años. a) <i>Mg</i> ++; b) <i>Al</i> +++; c) <i>K</i> + y d) <i>SiO<sub>2</sub></i> .....	52

Figura 5.17 Simulación II.4: Evolución en la concentración de especies principales importantes para la formación de la mineralogía secundaria en el punto (80, 25) de la grilla. En rectángulo rojo se muestra zona en que siguiente figura ejerce un zoom.....	54
Figura 5.18 Simulación II.4: Zoom correspondiente al rectángulo rojo seleccionado en Figura 5.17 abarcando el periodo en que las especies alcanzan valores estables.....	55
Figura 5.19. Simulación 2.4: Evolución de la mineralogía primaria en 1,000 años. a) Anortita; b) Albita; c) Diopsido y d) Tremolita. ....	56
Figura 5.20. Simulación 2.4: Evolución de la mineralogía secundaria en 1,000 años. a) Calcita; b) Clorita (chamosita); c) Wairakita y d) Epidota (zoisita).....	57
Figura 5.21. Simulación 2.4: Evolución de pH, porosidad y especies en 1,000 años. a) Porosidad; b) pH; c) Ca + + y d) Na +. ....	58
Figura 5.22. Simulación 2.4: Evolución de especies en 1,000 años. a) Mg++ b) Al+++; c) K+ y d) SiO <sub>2</sub> . ....	59
Figura 5.23: Esquema de Escenario III. En este grupo, se considera el efecto de un gradiente geotermal de 200 °C/km actuando sobre un bloque que se encuentra a 500 metros de profundidad (temperatura global 100°C) y en que además existen un aporte de fluidos profundos, cuya hidroquímica se explora en los dos modelos que componen el escenario. En verde y azul se destacan las características de dichos modelos (III.1 y III.2, respectivamente). CG: Condición geoquímica; HQ: Hidroquímica.....	61
Figura 5.24 Simulación III.1: Evolución en la concentración de especies principales importantes para la formación de la mineralogía secundaria en el punto (45, 50) de la grilla. En rectángulo rojo se muestra zona en que siguiente figura ejerce un zoom.....	64
Figura 5.25 Simulación III.1: Zoom correspondiente al rectángulo rojo seleccionado en Figura 5.24 abarcando el periodo en que las especies alcanzan un equilibrio con la litología. ....	64
Figura 5.26. Simulación III.1: Evolución de la mineralogía primaria en 1,000 años. a) Anortita; b) Albita; c) Diopsido y d) Tremolita. ....	65
Figura 5.27. Simulación III.1: Evolución de la mineralogía secundaria en 1,000 años. a) Calcita; b) Sílice; c) Wairakita y d) Epidota (zoisita).....	66
Figura 5.28. Simulación III.1: Evolución de pH, porosidad y especies en 1,000 años. a) Porosidad; b) pH; c) Ca + + y d) Na +. ....	67
Figura 5.29. Simulación III.1: Evolución de especies en 1,000 años. a) Mg++; b) Al+++; c) K+ y d) SiO <sub>2</sub> . ....	68
Figura 5.30 Simulación III.2: Evolución en la concentración de especies principales importantes para la formación de la mineralogía secundaria en el punto (45, 50) de la grilla. ....	71
Figura 5.31. Simulación III.2: Evolución de la mineralogía primaria en 1,000 años. a) Anortita; b) Albita; c) Diopsido y d) Tremolita. ....	72
Figura 5.32. Simulación III.2: Evolución de la mineralogía secundaria en 1,000 años. a) Calcita; b) Sílice; c) Wairakita y d) Epidota (zoisita).....	73
Figura 5.33. Simulación III.2: Evolución de pH, porosidad y especies en 1,000 años. a) Porosidad; b) pH; c) Ca + + y d) Na +. ....	74

Figura 5.34. Simulación III.2: Evolución de especies en 1,000 años. a) $Mg^{++}$ ; b) $Al^{+++}$ ; c) $K^+$ y d) $SiO_2$ .....	75
Figura 5.35: Grilla de simulación. En verde se marcan los puntos en los que se evalúa la concentración de los iones principales para la validación. ....	76
Figura 5.36. Evolución del pH en los 1,000 años de simulación. Las franjas roja y azul delimitan los valores máximos y mínimos, respectivamente, asociados a la Zona San Felipe - Los Andes. Las tres series restantes corresponden a 3 puntos de control sobre la grilla. ....	77
Figura 5.37. Validación Resultados (I/II). Se grafica la evolución de los iones principales en los 1,000 años de simulación para las condiciones actuales. En rojo y azul se fijan los límites asociados al valor máximo y mínimo, respectivamente, reportado en la ZSFLA* (Zona de San Felipe - Los Andes). a) $Na^+$ ; b) $Al^{+++}$ ; c) $K^+$ y d) $SiO_2$ A) $Na^+$ ; b) $Cl^-$ ; c) $SiO_2$ ; d) $K^+$ .....	79
Figura 5.38. Validación Resultados (II/II). Se grafica la evolución de los iones principales en los 1,000 años de simulación para las condiciones actuales. En rojo y azul se fijan los límites asociados al valor máximo y mínimo, respectivamente, reportado en la ZSFLA* (Zona de San Felipe - Los Andes). A) $HCO_3^-$ ; b) $Ca^{++}$ ; c) $Mg^{++}$ ; d) $SO_4^{--}$ ..	80
Figura 5.39: Comparación de la evolución de la mineralogía entre el escenario I y uno en que se impone que la tremolita sólo puede disolverse. A) Tremolita; b) Diópsido; c) Calcita y d) Porosidad. ....	82
Figura 5.40: Evolución de tasa promedio de precipitación/disolución de los minerales en los escenarios I y II, que comparten la misma configuración, pero progresivamente va aumentando la temperatura conforme se pasa de la simulación I (25°C) a la II.4 (100°C), representando cada punto el valor de la tasa promedio en la respectiva simulación.....	84
Figura 5.41. Evolución de la porosidad durante el transcurso de la simulación III.1 tomando 5 puntos de la grilla, que representan diferentes sectores de la zona de mezcla. Si bien se incluyen los datos de la porosidad para los 1,000 años de simulación, sólo se muestran 500 años en el eje horizontal, esto porque para ese tiempo, todos los puntos analizados alcanzan su valor mínimo ( $1E-12$ %). ....	87
Figura 5.42. Diagrama de actividad que ilustra la estabilidad de minerales de potasio y calcio ante cambios en la razón $aK + aH^+$ y la razón $aCa^{++} + aH^+$ a 260°C, en presencia de cuarzo (Navarro, 2014). ....	88
Figura 5.43: Diagrama que esquematiza la evolución planteada para el sistema geotermal asociado a la ZSFLA. Estadio 1, Wrk = Wairakita; Qz = Cuarzo (Sílice) . Estadio 2, Ep = Epidota (Zoisita); Chl = Clorita. Estadio 3, Cc = Calcita. El * en la condición de aumento en la relación $aCa^{++} + a2H^+$ indica que los procesos que explican dicha condición (disminución de temperatura y dilución con agua de recarga) pueden ocurrir de forma independiente o conjunta. ....	89