

Tabla de contenido

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 FORMULACIÓN DEL ESTUDIO PROPUESTO	1
1.2 ANTECEDENTES Y TRABAJOS ANTERIORES.....	2
1.2.1 <i>Conceptos básicos sobre lateritas</i>	2
1.2.1.1 Origen y definición del término	2
1.2.1.2 Clasificación	3
1.2.1.3 Horizontes de un perfil laterítico ideal.....	5
1.2.1.4 Formación del suelo laterítico	7
1.2.2 <i>Lateritas en Chile: estado del conocimiento</i>	9
1.3 OBJETIVOS.....	11
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	11
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	11
1.4 HIPÓTESIS	12
2 ZONA DE ESTUDIO	13
2.1 GEOGRAFÍA Y CLIMA.....	13
2.2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	14
2.3 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL AFLORAMIENTO.....	16
3 METODOLOGÍA.....	17
3.1 SUELO.....	17
3.1.1 <i>Toma de muestras</i>	17
3.1.2 <i>Cuarteo</i>	17
3.1.3 <i>Análisis de metales nobles</i>	17
3.1.4 <i>Análisis de elementos mayores y trazas en roca total</i>	17
3.1.5 <i>Análisis mineralógico</i>	18
3.1.5.1 Difracción de rayos X en agregados orientados	18
3.1.5.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	19
3.1.6 <i>Producción de suelo y tasa de meteorización</i>	19
3.2 AGUA	19
3.2.1 <i>Preparación de botellas</i>	19
3.2.2 <i>Toma de muestras</i>	20
3.2.3 <i>Análisis de elementos mayores y trazas</i>	20
3.2.4 <i>Especiación y modelamiento de aguas</i>	20
4 RESULTADOS	21
4.1 GEOQUÍMICA DE ROCA TOTAL	21
4.1.1 <i>Elementos mayores</i>	21
4.1.2 <i>Elementos traza</i>	24
4.1.2.1 Metales de transición	24
4.1.2.2 Tierras raras	25
4.1.2.3 Elementos del grupo del platino y oro	28
4.1.2.4 Otros elementos traza litófilos.....	29
4.1.3 <i>Enriquecimiento, balance de masas y tasa de meteorización</i>	30
4.2 MINERALOGÍA	31
4.2.1 <i>Descripción macroscópica</i>	31

4.2.2 Descripción microscópica: cortes transparentes.....	31
4.2.3 Difractogramas	32
4.2.3.1 Fracción total.....	32
4.2.3.2 Fracción arcilla.....	33
4.2.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	33
4.3 ANÁLISIS DE AGUA	37
4.3.1 Parámetros in situ.....	37
4.3.2 Geoquímica de aguas.....	37
5 DISCUSIÓN	38
5.1 HORIZONTES DEL PERFIL LATERÍTICO DE CAMÁN.....	38
5.2 FORMACIÓN DEL SUELO LATERÍTICO.....	39
5.3 ENRIQUECIMIENTO EN ELEMENTOS CRÍTICOS.....	41
5.3.1 Metales nobles	41
5.3.2 Tierras raras.....	43
5.4 ESTIMACIÓN DE LA INTERACCIÓN AGUA-ROCA EN LA FORMACIÓN DEL SUELO	43
5.4.1 Especiación y modelamiento composicional del agua	43
5.4.2 Modelamiento interacción agua-roca.....	45
5.5 OTRAS IMPLICANCIAS ACERCA DE LA LATERITA DE CAMÁN.....	46
6 CONCLUSIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	50
ANEXOS	58
ANEXO 1.....	58
Concentración de elementos mayores y traza de las 5 muestras del perfil de Camán.	58
ANEXO 2.....	59
Concentración de elementos mayores y traza de las 2 muestras de agua de Camán. Ambas muestras tomadas el 6 de enero del 2016.....	59
ANEXO 3.....	60
Concentración de elementos mayores y traza de las muestras de roca de la localidad de Camán.	60
ANEXO 4.....	61
Matriz de correlación a partir de los elementos de las muestras de la laterita de Camán.	61
ANEXO 5.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
Razones calculadas a partir de las concentraciones de tierras raras.	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO 6.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
Razones calculadas a partir de las concentraciones de EGP	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO 7.....	63
Tasa de meteorización(R) y de producción de suelo (S) muestra 1 de agua.....	63
Tasa de meteorización(R) y de producción de suelo (S) muestra 2 de agua.....	64
ANEXO 8.....	65
Difractogramas de las muestras de la laterita de Camán.....	65
ANEXO 9.....	74
Imágenes SEM y espectro EDS. Todas las imágenes son de electrones retrodispersados	74
ANEXO 10	86
Comparación de composición del agua real y simulada para ambas muestras (valores en moles). ...	86
ANEXO 11	88

<i>Concentración de elementos mayores y traza del agua de lluvia de la estación Calle Calle, ubicada a 20 km de la laterita de Camán. Los datos fueron obtenidos desde la dirección general de aguas, medidas el 12 de septiembre del 2016.</i>	88
ANEXO 12	89
<i>Especiación para las muestras de agua de Camán</i>	89
ANEXO 13	90
<i>Cálculos de alturas a partir de los parámetros R y S muestra agua 1</i>	90
<i>Cálculos de alturas a partir de los parámetros R y S muestra agua 2</i>	91

Índice de Figuras

FIGURA 1. A. TETRAEDRO CON LOS PRINCIPALES ÓXIDOS DE UNA LATERITA MÁS EL AGUA. B. DIAGRAMA DE COMPOSICIÓN TERNARIO PARA LAS ROCAS FORMADAS POR METEORIZACIÓN EN AMBIENTES TROPICALES (ALEVA, 1994).....	4
FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE LOS PRINCIPALES AFLORAMIENTOS DE LATERITAS. MODIFICADO DE BERGER ET.AL. 2011, U.S. GEOLOGICAL SURVEY.....	5
FIGURA 3. PERFIL TÍPICO DE UNA LATERITA. SE MUESTRAN LOS DISTINTOS HORIZONTES Y LAS DIFERENTES INTERFACES. MODIFICADO DE ROBB, 2005.	6
FIGURA 4. CAMPOS DE ESTABILIDAD DE FE Y AL EN LAS CONDICIONES EH-PH DE LA LATERIZACIÓN. MODIFICADO DE ROBB, 2005.	8
FIGURA 5. MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA CENTRO SUR DEL PAÍS. MODIFICADO DE ALFARO, 1982.	15
FIGURA 6. PERFIL DE LA LATERITA DE CAMÁN.	16
FIGURA 7. DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN (WT%) DE FE, AL, SI Y MG A LO LARGO DE LA LATERITA. A LA IZQUIERDA SE VE LA UBICACIÓN RELATIVA DE CADA MUESTRA.	21
FIGURA 8. DIAGRAMA TERNARIO Fe_2O_3 , Al_2O_3 Y SiO_2 QUE MUESTRA EL GRADO DE LATERIZACIÓN Y EL INCREMENTO PROGRESIVO DE HIERRO DESDE LA BASE AL TECHO DE PERFIL.	22
FIGURA 9. TRIÁNGULO AF-S-M PARA LAS MUESTRAS DE LA LATERITA DE CAMÁN.	23
FIGURA 10. TRIÁNGULO A-F-SM PARA LAS MUESTRAS DE LA LATERITA DE CAMÁN.	23
FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS METALES DE TRANSICIÓN EN LA LATERITA DE CAMÁN.	25
FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE LAS REE TOTALES, Y, LREE Y HREE EN LA LATERITA DE CAMÁN (IZQUIERDA). DISTRIBUCIÓN DE LAS ANOMALÍAS DE EU Y CE (DERECHA).	26
FIGURA 13. PATRÓN DE REE DE LA LATERITA DE CAMÁN. ELEMENTOS ORDENADOS SEGÚN NÚMERO ATÓMICO CRECIENTE.....	27
FIGURA 14. PATRONES DE DISTRIBUCIÓN VERTICAL EN LA LATERITA: EGP-IR Y EGP-PT (IZQUIERDA), EGP Y AU (DERECHA).....	28
FIGURA 15. CONCENTRACIÓN DE EGP Y AU EN LATERITA Y ROCA MADRE. ELEMENTOS ORDENADOS SEGÚN PUNTO DE FUSIÓN DECRECIENTE.	29
FIGURA 16. DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS Pb, Zr (DERECHA), Hf, Nb, Ta, Th, U Y Lu (IZQUIERDA) A LO LARGO DE LA LATERITA.....	30
FIGURA 17. SERPENTINAS. 100X. A LA IZQUIERDA NICOLES CRUZADOS, A LA DERECHA NICOLES PARALELOS.....	31
FIGURA 18. SOBRE CADA CRISTAL SE HA PUESTO EL ELEMENTO MAYORITARIO DETECTADO EN LOS ESPECTROS EDS. A Y B, CRISTAL CON ER (ETD Y BSED RESPECTIVAMENTE). C Y D, CRISTAL EUHEDRAL DE FE (ETD Y BSED RESPECTIVAMENTE). E Y F, CRISTAL DE ZN CON AU (BSED Y ETD RESPECTIVAMENTE). G Y H, CRISTALES DE ORO MUESTRA CAM16S-5 (BSED). I Y J, CRISTALES DE MORFOLOGÍA ANHEDRAL (ETD). K CRISTAL SUBHEDRAL (ETD) Y L, CRISTAL EUHEDRAL (ETD).....	36

FIGURA 19. SUBDIVISIÓN DEL PERFIL LATERÍTICO DE CAMÁN (DERECHA). A LA IZQUIERDA SE MUESTRA UNA COLUMNA ESQUEMÁTICA CON EL ORDEN LAS MUESTRAS TOMADAS EN TERRENO, QUE EN AMBOS CASOS SE ENCUENTRAN EN CÍRCULOS NUMERADOS. LA LÍNEA PUNTEADA INDICA CONTACTO INFERIDO.....	38
FIGURA 20. SIMPLIFICACIÓN DEL VOLUMEN DE LA LATERITA Y ROCA POR ALTURAS.....	46

Índice de Tablas

TABLA 1. TIPOS DE LATERITAS FORMADOS SEGÚN SU ROCA MADRE. SE ENCUENTRA DESTACADO LAS LATERITAS GENERADAS A PARTIR DE ROCAS ULTRAMÁFICAS. MODIFICADO DE ALEVA, 1994.	3
TABLA 2. VALORES DEL ÍNDICE DE ALTERACIÓN DE ROCA ULTRAMÁFICA, UMIA, PARA LA LATERITA DE CAMÁN.	23
TABLA 3. MINERALOGÍA REPORTADA PARA LA FRACCIÓN TOTAL A PARTIR DE ANÁLISIS DRX.....	32
TABLA 4. MINERALOGÍA REPORTADA PARA LA FRACCIÓN ARCILLOSA A PARTIR DE ANÁLISIS DRX.	33
TABLA 5. PARÁMETROS TERMODINÁMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA DE LA LOCALIDAD DE CAMÁN.	37
TABLA 6. COMPARACIÓN DE LAS VARIACIONES DE PH Y PE PARA LAS MUESTRAS TOMADAS EN TERRENO Y LAS SIMULADAS EN PHREEQC.....	44