



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

FORMACIÓN DE LA LATERITA DE CAMÁN, XIV REGIÓN CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO.

SERGIO IGNACIO SALINAS ROZAS

PROFESOR GUÍA

JOSÉ MARÍA GONZÁLEZ JIMÉNEZ.

MIEMBRO DE LA COMISIÓN

LINDA DANIELE.

CLAUDIA CANNATELLI

Este trabajo ha sido financiado por proyecto **Fondecyt Iniciación #11140005** “*Decoding precious metals (platinum-group elements and gold) in upper mantle rocks of the Chilean Coastal Cordillera*”

**SANTIAGO DE CHILE
2016**

Resumen de la memoria para

optar al título de: Geólogo

Por: Sergio Ignacio Salinas Rozas

Fecha: 6/12/2016

Profesor guía: José María

González

Profesora co-guía: Linda Daniele

FORMACIÓN DE LA LATERITA DE CAMÁN, XIV REGIÓN CHILE.

Los suelos lateríticos son una de las fuentes de metales críticos (EGP y Au) y otros metales de interés económico como el Fe, Ni o Cr. En el caso de Chile, la existencia de estos suelos se ha reportado en la Cordillera de la Costa del centro sur del país, en particular en la localidad de Camán. En este trabajo de Título se investigan los procesos de formación de este suelo, la movilidad y redistribución de elementos durante el proceso de formación de la laterita, poniendo énfasis en los elementos del grupo del platino y el Au. Se determinó que este perfil está compuesto por un horizonte saprolítico inferior empobrecido en metales y un horizonte limonítico superior enriquecido en Ni, Fe, Cr EGP y Au. Los principales agentes participantes en la redistribución de elementos durante el proceso de laterización son la presencia de fronteras de pH y Eh, ligantes que transportan los elementos en solución (clorurados y orgánicos principalmente) y condiciones aptas para la deposición de nuevas fases minerales, como cambios en la oxidación o presencia de minerales con alta capacidad de adsorción de elementos, como las arcillas o los óxidos e hidróxidos de Fe. Finalmente, el estudio de las características del agua del sector sugiere que agua con características similares a la presente hoy en día en las inmediaciones del perfil pudo ser la responsable de la formación de la laterita. El modelado numérico de la interacción agua-roca indica que el agua de Camán tiene una alta capacidad de disolución de aquellos minerales que forman la roca y se encuentra además saturada con respecto a los minerales que conforman la laterita.

Agradecimientos.

En primer lugar quiero agradecer a mis profesores José María González y Linda Daniele, por la confianza depositada en mí para la realización de este estudio, por su guía, apoyo y consejos durante estos meses de trabajo, sin estos la culminación de esta memoria habría sido mucho más difícil.

Quiero agradecer a mis padres Sergio y Nadia, por siempre confiar en mí y apoyar mis decisiones, por todo el sacrificio que han realizado durante estos años, por los valores que me han entregado y por todo el cariño incondicional. A mis hermanos Cata, Diego y Esteli, por ser un pilar fundamental en mi vida, aunque no lo exprese su cariño y apoyo son todo para mí.

A mis tíos Jorge y Bachi y a mi prima Carolina, por haberme recibido como un hijo más durante mis primeros años de universitario, por tanto cariño y apoyo sin los cuales esos primeros años habrían sido cuesta arriba. Gracias por nunca hacer notar diferencias, al contrario, siempre he sentido un calor de hogar incomparable junto a ustedes.

A mi Aña, por siempre estar para mí en todo, por tanto cariño y comprensión y por tanta preocupación mostrada, gracias por mostrarme que el amor de una tía es tan incondicional como el de una madre. A mi Ita, gracias por todo lo que has hecho y haces por mí, gracias por tanto cariño, tantos besos y tantos abrazos, gracias por siempre estar atenta y dispuesta a cuidarme desde siempre, espero que nunca faltes en mi vida. A mi abuelita María y a mi tata, por enseñarme que el trabajo duro y la disciplina siempre tienen frutos, a pesar de que ya no están, siempre los llevo en mi corazón. A mis tíos Juan, Helga, Karina, Mónica, Carlos, José y Gastón por la preocupación, cariño, disposición y consejos entregados siempre.

A mis amigos Felipe y Matías, por enseñarme que la amistad real existe. A Felipe, gracias por siempre estar para mí, por tantas caminatas y conversaciones interminables, por levantarme en mis momentos más bajos y celebrar conmigo los más altos. Gracias por ser mi confidente y gracias por soportarme durante tanto tiempo de forma tan incondicional. A Matías, por todos estos años de amistad sincera, que a pesar de la distancia y el tiempo no han cambiado y no cambiarán.

A mis amigas de la U, Rocí, Caro, Anto, Nati Álvarez, Nati Aravena, Lesly, Cami, Marci, Cony, Isa, España y mis amigos Los \$eda, gracias por hacer de estos años los mejores años de mi vida, gracias por compartir tantos terrenos, tantas frustraciones, tantas horas de estudio, carretes y locuras sin sentido, gracias por aceptarme tal como soy y quererme así, su compañía estos años ha sido impagable.

Agradezco la ayuda técnica y disposición de Estefanía Camus, Javier Rivera, Verónica Rodríguez, Roberto, Julio y Blanca, sin su ayuda este trabajo habría sido más difícil. Finalmente agradezco al proyecto Fondecyt Iniciación #11140005 liderado por el Dr. José María González Jiménez, al Núcleo Milenio "Trazadores de metales en zonas de subducción" y al Centro de excelencia de geotermia de los Andes, CEGA, por el financiamiento para los diferentes análisis requeridos para el desarrollo de este trabajo.

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 <i>in situ</i>	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

1 Introducción

1.1 Formulación del estudio propuesto

A lo largo de la costa del centro y sur de Chile se encuentran diversos cuerpos de rocas ultramáficas encajados en rocas metapelíticas, a partir de los cuales se han generado distintos tipos de suelos. El desigual desarrollo de los diferentes suelos se ha debido a la diferente naturaleza de los protolitos, régimen hídrico y temperaturas. A pesar de que la presencia de estos perfiles de meteorización se conoce desde el siglo pasado no se han realizado estudios de detalle de la mineralogía y geoquímica de los mismos. La mayoría de los estudios realizados sobre estos suelos han tenido un enfoque agrícola con el objeto de definir qué tipos de cultivos son los más apropiados para desarrollarse en este suelo tan particular.

En otros países como Brasil, Australia, Cuba, República Dominicana y Estados Unidos la presencia de suelos bien desarrollados sobre rocas ultramáficas a atraído mucha atención ya que estos pueden llegar a tener concentraciones relativamente altas de metales nobles (elementos del grupo del platino (EGP) y Au). Asimismo algunos de estos suelos tienen en ocasiones concentraciones de Ni y Co tan elevadas que llegan a ser de importancia económica. Los EGP son un objetivo muy atractivo para la exploración minera debido a su carácter estratégico derivado de sus enormes aplicaciones en los procesos industriales modernos tales como sistemas de catalizadores, microelectrónica, refinamiento del petróleo e incluso en joyería. Además de este interés económico los EGP tienen una gran importancia como trazadores en los procesos de desarrollo del suelo, ya que estos elementos se consideran relativamente poco móviles en condiciones de baja temperatura, y su particular concentración en determinados horizontes del perfil pueden indicar procesos de mayor o menor madurez del suelo (Rollinson, 1993).

En este Trabajo de Título se realiza un estudio de detalle de un perfil de suelo desarrollado sobre rocas ultramáficas que afloran en las proximidades de la localidad de Camán, XIV región, Chile. Se pretende comprender si el mayor grado de desarrollo del suelo ha producido o no un enriquecimiento particular de metales nobles y otros elementos críticos en los diferentes horizontes del perfil de meteorización.

1.2 Antecedentes y trabajos anteriores

1.2.1 Conceptos básicos sobre lateritas

1.2.1.1 Origen y definición del término

Comúnmente en la literatura, a los perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ultramáficas, como el que es objeto del presente estudio, se les suele denominar como lateritas. Sin embargo, este término puede agrupar a otro tipo de protolitos. Así por ejemplo Buchanan, 1807 definió las lateritas como “una masa difusa sin estratificación aparente emplazada sobre los granitos, con un alto contenido de hierro y de color entre rojo y amarillo”. Desde ese momento hasta ahora han sido muchas las definiciones y usos que ha tenido el termino laterita, incluso teniendo la connotación de ser muy amplio y poco claro (Eggleton y Taylor, 1999). Una de las definiciones más usadas hoy en día es la de Schellmann, 1983 quien definió las lateritas como “conjunto de minerales formados como resultado de la intensa meteorización subaérea de rocas” y las clasifica dentro del grupo de “rocas o suelos residuales” con una asociación mineralógica típica de goethita, hematita, hidróxidos de aluminio, minerales de la caolinita y cuarzo residual. La razón $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ o tasa de meteorización debe ser menor que la de la roca madre caolinitizada, donde todo el aluminio está en los minerales de caolinita, todo el hierro como óxidos de hierro y todo el sílice en los minerales de caolinita o como cuarzo residual (Schellmann, 1983). La tasa de meteorización ha servido como base para poder clasificar los suelos residuales: razones menores a 1.33 son indicadores de una “laterita verdadera”, entre 1.33 y 200 se consideran “suelos lateríticos” y mayores a 200 indica un “suelo tropical”. Sin embargo estos valores no son los más idóneos para caracterizar un suelo debido a su alto rango y poca precisión en lo que definen, incluyendo todo tipo de lateritas, sin importar el protolito a partir del cual se formaron o su morfología. (modificado de Quinones, 1963).

Para que se desarrolle una laterita en un lugar determinado es necesario que existan una serie de características, enumeradas a continuación según Merril, 1987:

- a. Alta temperatura ambiente promedio, entre 25-40 °C y abundante materia orgánica para facilitar la percolación de agua y hacer de esta un fluido química y físicamente activo.
- b. Alta tasa de precipitaciones, para tener abundante agua fresca como solvente para generar la lixiviación.
- c. Relieve con baja pendiente para minimizar la erosión superficial.
- d. Alta tasa de percolación del agua para evacuar los fluidos lixiviantes.
- e. Una roca madre adecuada que permita el flujo pervasivo y continuo de agua y promueva la lixiviación y una mineralogía rica en Fe, Al, Ni, Cr, Mn entre otros.

1.2.1.2 Clasificación

Schellmann, 1983 diferenció los suelos lateríticos según el protolito a partir del cual fueron generados. Esta clasificación tiene su origen en el concepto de que el protolito original es el que controla los minerales y la geoquímica del suelo resultante. Esto se condice con el hecho que la meteorización que forma las lateritas se considera un proceso autóctono en donde ocurre pseudomorfismo a partir de fases minerales presentes en la roca madre y elementos disueltos en solución acuosa producto del ambiente lixiviante, los cuales precipitan bajo las nuevas condiciones, en particular, elementos alcalinos, alcalino-térreos, sílice y óxidos de hierro. El resto de los elementos que no precipiten bajo estas nuevas condiciones serán “evacuados” del ambiente, siguiendo el proceso de lixiviación. Por lo tanto existe una correlación directa entre la composición mineral de la roca madre y los elementos concentrados en el residuo de la meteorización o zona de acumulación laterítica. Los diferentes tipos de roca madres y los resultados esperados (tipos de lateritas) se muestran en la Tabla 1.

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.

Roca Madre	Elementos concentrados durante la laterización	Tipo de Laterita
Roca Ígnea promedio	Fe + Al	Laterita
Roca Ígnea máfica	Fe + (Al)	Laterita Ferruginosa
Granito/gneis	Al + Fe	Laterita (Ferruginosa)
Anortosita, basalto, andesita	Fe + Al	Laterita, Bauxita
Roca Sedimentaria Promedio	Fe + Al	Laterita
Arenisca Arcósica	Al + (Fe)	Bauxita
Complejo Alcalino/Carbonatita	Fe + Al + Ti	Laterita Bauxítica
Roca Ultramáfica	Fe + Ni + Cr	Laterita de Fe o Ni
Silicatos de Mn	Fe + Mn	Laterita de Mn
Yacimiento de hierro bandeado	Fe	Laterita de Fe

Los minerales más comunes encontrados en las lateritas son los minerales de hierro hematita (Hem) y goethita (Gt), los minerales de aluminio gibsita (Gbs) y bohemitita (Bhm) y los minerales de arcilla caolinita (Kln).

A continuación se muestra un tetraedro con los óxidos principales presentes en una laterita (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2) y agua en los vértices (Figura 1, A) y la posición relativa de la gibsita, caolinita, hematita y goethita con respecto a estos vértices. Conectando los vértices de la gibsita, caolinita y hematita y dejándolos como un triángulo aislado, se genera el diagrama de composición ternaria de la Figura 1, B, que

ilustra las posibles rocas que se forman con esta mezcla de minerales en ambientes lixiviantes. Al centro podemos ver el campo de las lateritas ricas en hierro (ferruginosas) y ricas en aluminio (bauxitas).

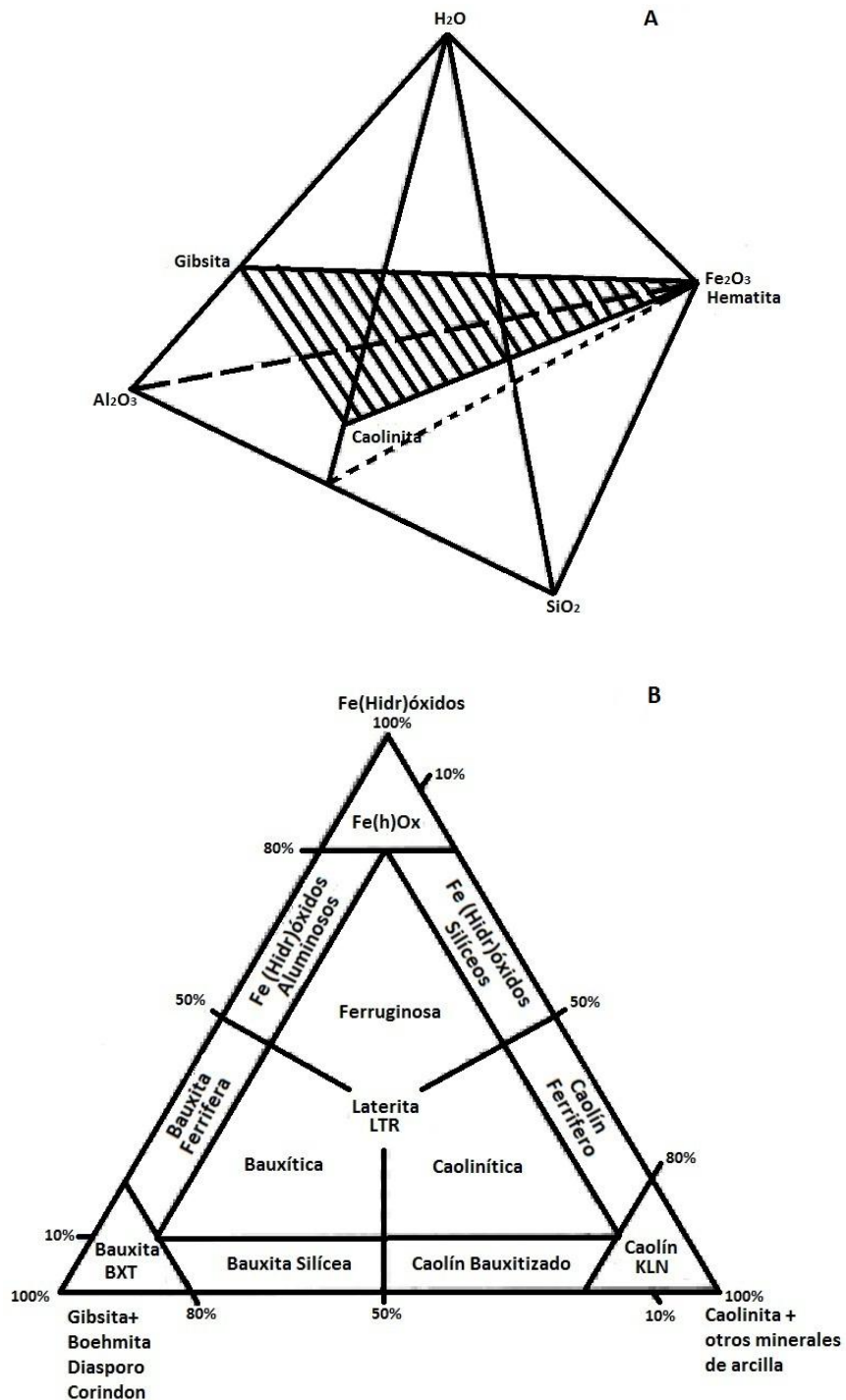


Figura 1. A. Tetraedro con los principales óxidos de una laterita más el agua. B. Diagrama de composición ternario para las rocas formadas por meteorización en ambientes tropicales (Aleva, 1994).

En la Figura 1, B se observan los diferentes tipos de lateritas que existen en función de la composición de la roca madre o protolito. Esto también se observa en la Tabla 1. Hasta la fecha han sido diversos los lugares del mundo donde se han reportado lateritas, en muchos de ellos se explotan para extraer metales como el Fe, Al, Co y Ni. En la Figura 2 se presentan los principales depósitos lateríticos reconocidos en el mundo. Queda de manifiesto que la mayoría de ellos se encuentran en las zonas tropicales, lugar donde se dan las condiciones climáticas más apropiadas para la generación de estos suelos. Sin embargo hay varios lugares en zonas más al norte o sur de los trópicos en donde también se han reportado depósitos lateríticos como en países del norte de Europa, Australia y la zona norte de Estados Unidos.

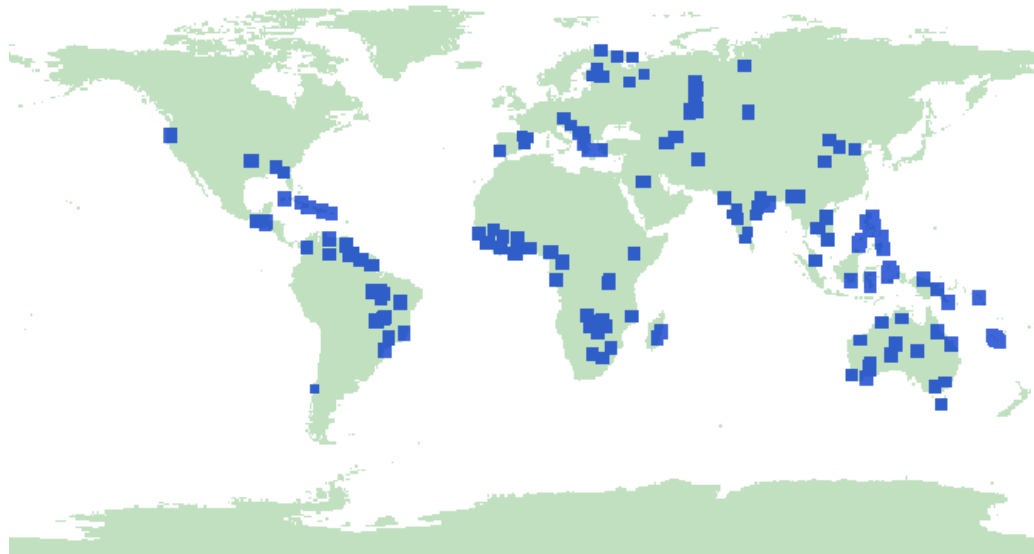


Figura 2. Distribución mundial de los principales afloramientos de lateritas. Modificado de Berger et.al. 2011, U.S. Geological Survey.

1.2.1.3 Horizontes de un perfil laterítico ideal

El perfil típico de una laterita se divide en zonas características u horizontes limitados entre sí por interfaces, las cuales marcan cambios más o menos abruptos de apariencia, composición del material y comportamiento químicos de ciertos elementos (Aleva, 1994). De base a techo se describen los siguientes horizontes e interfaces.

- a. Roca madre fresca, inalterada. Su techo es por lo general irregular o geoméricamente discordante, lo que representa el frente de meteorización inferior o interface 1.
- b. Saprolito, que se divide en *Saprock*: material transicional, menos del 20% de los minerales han sido alterados por la meteorización. Sobre este subhorizonte se encuentra el saprolito propiamente tal, en este nivel más del 80% de los minerales han sido alterados por la meteorización. Predominan arcillas (caolinita) y cuarzo residual. Aún puede observarse de forma parcial la fábrica original de la

roca madre. En este horizonte han ocurrido procesos de lixiviación y neoformación de minerales.

- c. Zona plásmica, compuesta principalmente por arcillas y en menor medida cuarzo residual. En este punto se ha perdido la fábrica original de la roca madre y el proceso de lixiviación ha sido mucho más intenso. Se encuentra sobre el saprolito y separado de este por la interface 2 (*Pedoplasation Front* en inglés).
- d. Zona de acumulación, separada de la zona plásmica por la interface 3 o frente de cementación. Este horizonte está dividido en la “zona moteada” que presenta estructuras secundarias de forma irregular y acumulaciones ferruginosas (motas) en una matriz de caolinita. Sobre este subhorizonte y separado por un contacto gradual se encuentra la laterita *sensu stricto*, con acumulación principalmente de minerales de Fe y Al y en menor medida de Ni, Mn, Co entre otros elementos. Predominan las estructuras secundarias ricas en Fe. En algunos perfiles lateríticos se ha desarrollado en el techo de la laterita una zona de acumulación de minerales de Fe de alta dureza llamada *duricrusts*.
- e. Zona de pedogénesis superficial, corresponde al nivel actual del suelo. Está separado de la zona de acumulación por el frente de meteorización superficial o interface 4. En este horizonte se encuentran materiales autóctonos pero predominan materiales alóctonos (transportados) de origen aluvial o coluvial.

Lo anterior se resume en la Figura 3 que muestra de forma esquemática los horizontes desarrollados en una laterita promedio.

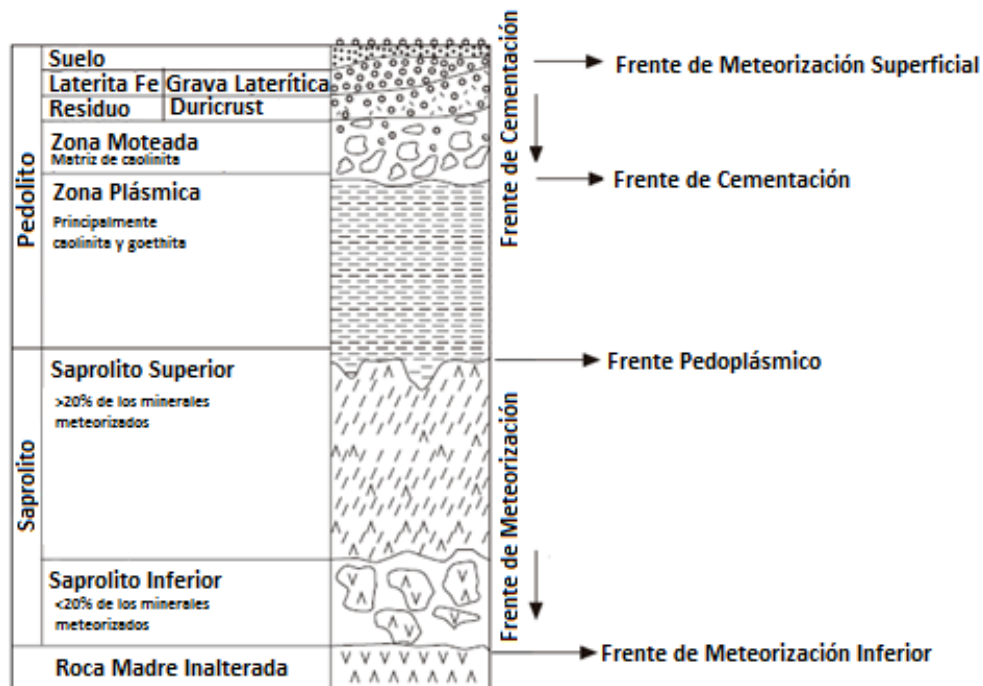


Figura 3. Perfil típico de una laterita. Se muestran los distintos horizontes y las diferentes interfaces. Modificado de Robb, 2005.

A pesar de lo mostrado anteriormente, no existe una terminología universal para referirse a las diferentes subcapas de las lateritas, al contrario, esta resulta ser muy

variada y no existe hasta la fecha un consenso al respecto. El perfil laterítico ideal de la Figura 3 puede no desarrollarse íntegramente, producto de la erosión mecánica o del desigual desarrollo que tenga a partir de la roca madre, que dependerá del grado de serpentización de la misma (Proenza, 2015).

1.2.1.4 Formación del suelo laterítico

El proceso de meteorización es fundamental en la formación de un suelo. Durante el transcurso de esto ocurren múltiples reacciones entre la roca madre y la atmósfera que culminan con la concentración residual de algunos elementos que quedarán enriquecidos en el perfil. En el caso de las lateritas, habrá un enriquecimiento en Al, Fe, Ni, Au, Mn y elementos del grupo del platino.

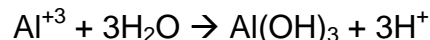
El proceso de meteorización química puede ser subdividido, muy a grandes rasgos, en las siguientes etapas (Leeder, 1999):

- a. Disolución de la roca madre y el transporte/remoción de iones solubles en solución.
- b. Producción de nuevos minerales como arcillas, óxidos, hidróxidos y carbonatos.
- c. Acumulación de materiales no alterados (de baja solubilidad) como sílice, aluminio y oro.

Los principales procesos químicos que contribuyen a la meteorización son disolución, oxidación, hidrólisis e hidrólisis ácida, los cuales serán descritos a continuación según Robb, 2005.

-Disolución de la mayoría de los minerales formadores de roca, entrando en solución muchos de sus elementos composicionales. La solubilidad de los diferentes elementos dependerá de su potencial iónico (razón entre la carga y el radio iónico), el pH del fluido que este generando la disolución (por ejemplo, Si es más soluble que Al en rangos de pH entre 5 y 9) y la hidratación que puedan sufrir algunos minerales (que expande la estructura cristalográfica ayudando a la degradación física y química de los minerales).

-La hidrólisis o hidrólisis ácida afecta principalmente al Al y al Fe, generando la precipitación de óxidos e hidróxidos de ambos elementos como gibbsita o goethita. Lo anterior se resume en la siguiente reacción para el Al (análogo para Fe):



La superficie de muchos silicatos pueden reaccionar con el ácido (iones H^+) desplazando iones metálicos e introduciéndolos en solución.

-Oxidación. Este proceso afecta principalmente al hierro, el cual pasa de ferroso (Fe^{+2}) a férrico (Fe^{+3}). Cuando esto ocurre, en minerales ferromagnesianos por ejemplo, se genera una descompensación de cargas haciendo inestable a los minerales y propensos a la meteorización.

La génesis de una laterita en si ocurre a partir de meteorización por medio de fluidos oxidantes y levemente ácidos. Estas condiciones generan la desestabilización de los sulfuros presentes en la roca madre siendo lixiviados la mayoría de los elementos calcófilos, alcalinos y alcalino-térreo junto con el enriquecimiento relativo de Si, Al y Fe en forma de minerales de arcillas y óxidos e hidróxidos de Fe y Al en los diferentes horizontes del perfil de suelo residual generado. Algunos elementos como Au, Cr, V, Sc, Ga tienden a asociarse por adsorción con los óxidos/hidróxidos de Fe. Otros elementos como Zr, Hf, Cr y Ti pueden encontrarse en las lateritas debido a que sus fases minerales (zircón, cromita, rutilo) son particularmente estables ante los procesos de meteorización (Wimpenny *et.al.*, 2007).

Como se vio en el diagrama composicional (Figura 1, B), Al y Fe son los principales elementos presentes. Si la laterita se enriquece en uno u otro dependerá de las condiciones Eh-pH al momento de la meteorización. La Figura 4 muestra las condiciones Eh-pH en las cuales precipitarán minerales de Fe mientras que el Al será lixiviado o atrapado en las fases arcillosas y viceversa.

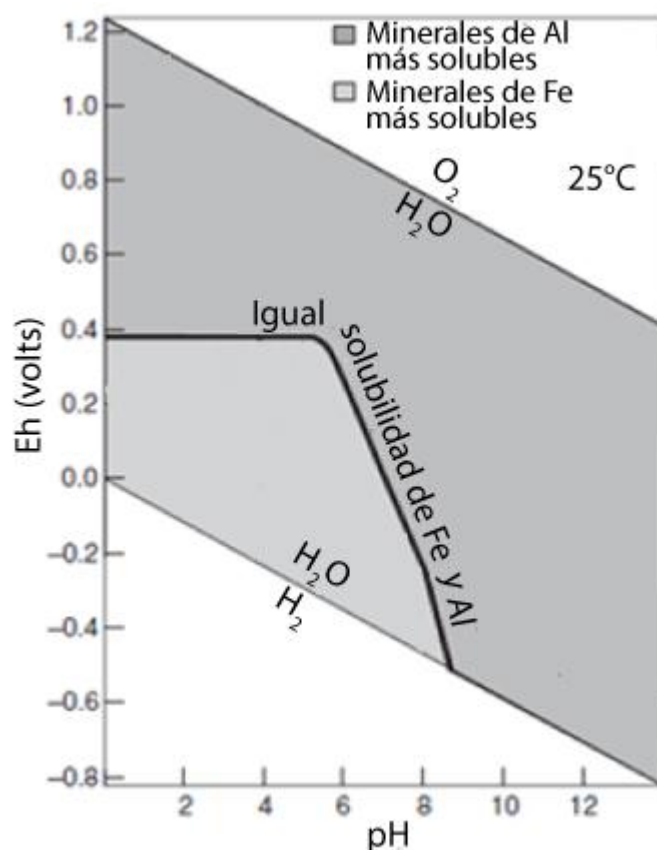


Figura 4. Campos de estabilidad de Fe y Al en las condiciones Eh-pH de la laterización. Modificado de Robb, 2005.

La línea negra representa las condiciones en las que la solubilidad del Fe y Al son iguales. Sobre la curva los minerales ricos en Al serán más solubles por lo que el aluminio será lixiviado, mientras que bajo la curva, las condiciones Eh-pH hacen que los

minerales de Fe sean más solubles por lo que el elemento lixiviado será este. De aquí se desprende que las condiciones Eh-pH de las aguas controlarán la movilidad relativa de Al y Fe y la consiguiente precipitación/disolución de minerales durante la formación de la laterita. Así, para condiciones Eh-pH dadas, se generarán óxidos/hidróxidos de Fe a partir de minerales primarios ricos en Fe, óxidos/hidróxidos de Al a partir de minerales primarios ricos en Al y arcillas a partir de los silicatos presentes (Robb, 2005).

El proceso de meteorización puede ser considerado como un reequilibrio de las fases minerales presentes a las condiciones termodinámicas y de Eh-pH al momento de la laterización.

1.2.2 Lateritas en Chile: estado del conocimiento

A lo largo de la zona centro sur de Chile, existen diversos afloramientos de rocas ultramáficas pertenecientes al complejo metamórfico Bahía Mansa (Muñoz-Cristi, 1931, Vergara, 1970, Zamarsky *et. al.*, 1973, Hervé, 1977, Alfaro, 1980, Höfer *et. al.*, 2001, Willner *et. al.*, 2005). El libro “Los grandes grupos de suelos en Chile, Roberts, 1959” describe los suelos desarrollados sobre estas rocas como afloramientos de color pardo rojizos ubicados en la zona costera entre Concepción y Maullín y hace mención a la alta concentración de óxidos de hierro y arcillas presente en los distintos horizontes del perfil del suelo. Sin embargo, el enfoque central del texto es el tipo de vegetación existente y los tipos de cultivos que podrían plantarse en él. De forma similar Pinochet, 1991 realiza un estudio del uso forestal del suelo de la Región del Maule donde nombra las características agrícolas de las lateritas.

Salazar *et. al.*, 2005 realizó un compendio de los tipos de suelos de la Región de los Lagos y define los suelos de la serie Bahía Mansa como Cambisoles o Inceptisoles y los define como “suelos formados por la meteorización de roca metamórfica en la cordillera de la costa, de clases texturales franco arenosa a franco arcillo limosa y colores pardo rojizo oscuro a pardo oscuro” definición que se corresponde con las características de algunas lateritas. Luzio, 2001 realiza un estudio de los inceptisoles de la Región de los Lagos centrándose en la alteración química durante la meteorización de rocas metamórficas que lleva a la formación de distintos tipos de arcillas en el suelo.

Sin embargo, el único estudio geológico realizado de perfiles lateríticos desarrollados sobre rocas ultramáficas en Chile es el publicado por Zamarsky *et. al.*, 1973 quienes describieron dos perfiles lateríticos desarrollados sobre las rocas ultrabásicas de la localidad de Camán en la provincia de Valdivia. Estos autores observaron un enriquecimiento en níquel, cobalto y hierro tal como se había descrito en esa fecha en otros cuerpos lateríticos de otras zonas del mundo. Este es el único trabajo geológico realizado en lateritas en la zona pero sin hacer mención a posibles enriquecimientos en metales nobles.

De acuerdo con lo descrito por Zamarsky *et al.*, 1973 en la localidad de Camán, el perfil laterítico presenta en su base serpentina con piroxenos relictos y vetas de carbonatos de hasta 2 mm. Inmediatamente sobre la serpentina describe una capa de serpentina lixiviada con presencia de óxidos e hidróxidos de Fe. Su textura original está alterada y presenta nódulos de óxidos de Mn. Sobre este nivel describe la laterita y reconoce 5 horizontes de material pelítico, texturalmente heterogéneo y de color amarillento en tonos cafés. Dentro de estos horizontes se encuentran fases cristalinas de textura hojosa (clorita, gibbsita y antigorita fuertemente alterados) y cúmulos de óxidos de Mn y fases pelíticas compuestas por arcillas. A medida que se avanza en la vertical se describe un aumento de las arcillas y los óxidos e hidróxidos de Fe y Mn. La parte superior del perfil cambia su color a café oscuro rojizo con disminución de los nódulos de Mn, presencia de granos de cuarzo y restos de esquistos sericíticos y serpentina lixiviada. Análisis químicos demuestran que la parte central del perfil se encuentra enriquecida en Mn, Co, Ni, Cr, Ti, Al, y Fe y empobrecida en Si y Mg. Este perfil fue denominado por el autor laterita ferruginosa fósil por sus características químicas y mineralógicas.

El segundo perfil laterítico descrito por Zamarsky *et al.*, 1973 se desarrolla a partir de esquistos sericíticos. Describe tres horizontes, el primero arcilloso con presencia de láminas de sericita, el segundo compuesto por material pelítico, granos de cuarzo, fragmentos de esquistos y abundante materia orgánica. Finalmente se observa una masa pelítica con fragmentos de esquistos y alta presencia de materia orgánica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Modelar la formación de la laterita de la localidad de Camán, provincia de Valdivia, y determinar si durante su desarrollo se produjo un enriquecimiento particular de metales nobles u otros elementos de interés metalogenético en los horizontes del perfil.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar concentración de elementos mayores, traza y ultratrazas en los diferentes horizontes del perfil de la laterita.
- Determinar la distribución de los minerales que conforman los diferentes horizontes del perfil.
- Realizar perfiles de distribución de metales nobles, en particular EGP y Au en los diferentes horizontes con el objeto de determinar posibles procesos de enriquecimiento.
- Definir los procesos de interacción agua roca y geomorfológicos que han generado el perfil laterítico con el objeto de establecer un modelo de movilización de metales nobles en condiciones de baja temperatura.

1.4 Hipótesis

El perfil laterítico de la zona de Camán se habría generado a partir de la meteorización de los cuerpos serpentínicos que se encuentran en su base. Producto de este proceso de generación de suelo elementos como el Au y los EGP habrían sido concentrados de manera particular en determinados horizontes del perfil. La distribución de estos elementos en la laterita estaría controlada por afinidades geoquímicas durante el proceso de meteorización y por diferentes relaciones agua-roca, temperatura y actividad biogénica.

2 Zona de estudio

2.1 Geografía y clima

La XIV Región de los Ríos se encuentra en la zona centro sur del país y está delimitada al norte por la IX Región de la Araucanía, al sur por la X Región de los Lagos, al este con Argentina y al oeste con el Océano Pacífico.

La Región de los Ríos presenta de este a oeste el perfil topográfico típico del resto del país: Cordillera de los Andes, depresión intermedia y Cordillera de la Costa y dentro de su gran extensión alberga diversos ecosistemas como el Bosque Valdiviano y grandes humedales.

La Cordillera de los Andes en esta latitud presenta alturas medias de 2000 metros sobre el nivel del mar y mantiene el vulcanismo característico de la zona centro sur del país, destacando los volcanes Villarrica (2814 m.s.n.m.) y Mocho-Choshuenco (2422 m.s.n.m.).

La depresión intermedia está dominada por cursos fluviales y sus respectivas morfologías y depósitos, dominando dos cuencas principales, la del Río Valdivia y la del Río Bueno y sus respectivos tributarios. Hacia la zona costera estos sistemas fluviales han generado extensos depósitos fluvio-estuariales (Educar Chile, Valdivia). En la zona además se han formado diversos lagos debido a la acumulación de depósitos morrénicos producto de la última glaciación.

La cordillera de la costa se caracteriza por ser poco continua y de baja altura, presentándose como suaves colinas con una altura máxima de 600 m.s.n.m. Localmente se denomina Cordillera de Mahundanche hasta el río Valdivia, desde donde se denomina Cordillera Pelada.

La región presenta un clima templado lluvioso con influencia oceánica y temperatura promedio de 11°C regulada en parte por los lagos y ríos de la región. La baja altura del relieve (tanto en la cordillera de la Costa como en la Cordillera de los Andes) hace que exista una escasa oscilación térmica. Las precipitaciones son abundantes durante todo el año con un total de 2000 mm repartido durante los diferentes meses. Las características de relieve y clima hacen posible que exista una extensa flora en la región caracterizada por el Bosque Valdiviano.

2.2. Marco geológico regional

La zona de estudio se ubica en la Cordillera de la Costa de la zona centro sur de Chile la cual está compuesta principalmente por rocas metamórficas e intrusivos graníticos sometidos a diferentes grados de deformación. Estas rocas en conjunto forman el denominado Basamento Metamórfico de la Cordillera de la Costa, el cual ha sido estudiado por diversos autores como Álvarez, 1970; González-Bonorino, 1970; Aguirre *et al.*, 1972; Hervé, 1974; Oyarzún y Clemmey, 1985, entre otros. Álvarez, 1970 estableció una edad precámbrica para el basamento metamórfico. Por otro lado, diversos autores utilizando métodos radiométricos, determinan una edad carbonífera para un importante episodio de metamorfismo y plutonismo en el basamento (González-Bonorino, 1970; Munizaga *et. al.*, 1973; Munizaga *et. al.*, 1985; Hervé *et. al.*, 1990).

El conjunto de rocas fue reconocido en un principio por Brügggen, 1950 y descrito por Illies *et.al.*, 1960, 1970 quienes las denominó Formación Piedra Laja en los alrededores de Valdivia. Posteriormente las rocas metamórficas de la Cordillera de la Costa fueron separadas en tres series: Serie Curepto, Pichilemu y Nirivilo por González-Bonorino en 1970, quedando el área de estudio asignada a la Serie Curepto. Posteriormente Aguirre *et. al.*, 1972 reagrupó estas series en una Serie Oriental y una Serie Occidental. El contacto entre ambas queda delimitado por una zona de cizalla de orientación NW–SE, de componente sinistral, denominada Falla Lanalhue (Glodny *et. al.*, 2008). Esta franja de rocas metamórficas fue asociada a un complejo acrecionario de subducción de edad Paleozoico Superior (Hervé, 1988), aunque localmente incluye rocas metavolcánicas de afinidades geoquímicas similares a aquéllas de ambiente de trasarco (Díaz *et. al.*, 1988).

La Serie Oriental definida por Aguirre registra evidencias de un metamorfismo de baja–intermedia presión y alta temperatura y está constituido por metagrauwacas, metapelitas y rocas corneanas asociadas a granitoides. Las facies metamórficas varían desde esquistos verdes a anfibolita o granulita (González–Bonorino, 1970; Aguirre *et al.*, 1972), mientras que la Serie Occidental registra metamorfismo en condiciones de temperatura baja-intermedia y alta presión conformada por metabasitas, esquistos micáceos, 'metachert' y serpentinitas. El grado de metamorfismo es bajo, correspondiendo a la facies de esquistos verdes (Hervé *et. al.*, 1974, 1977; Godoy, 1979; Willner *et. al.*, 2005).

La zona de interés (Figura 5) se encuentra en la Serie Occidental de Aguirre la cual fue redefinida en 2001 por Duhart *et.al.* como el Complejo Metamórfico Bahía Mansa compuesto por rocas metamórficas, que incluye a esquistos pelíticos a semipelíticos y menor proporción de metaareniscas, esquistos máficos, rocas máficas y ultramáficas y, más escasamente, metacherts y rocas miloníticas a ultramiloníticas.

Las rocas ultramáficas afloran como cuerpos aislados de pequeño a mediano tamaño. En su mayoría son peridotitas serpentinizadas y, en menor medida cuerpos

metagabrodioríticos, que ocurren, generalmente, dentro de franjas de esquistos máficos. Los afloramientos de estas rocas ultramáficas se distribuyen, de sur a norte en los alrededores de Valdivia, en las localidades de Cuesta Brava, San Carlos, Hueicolla, Los Ulmos, Camán, Morro Bonifacio, Los Ciruelos y Madre de Dios. En general, los cuerpos ultramáficos presentan una intensa serpentización que ha obliterado la mineralogía y las texturas primarias. Macroscópicamente algunos cuerpos ultramáficos presentan abundante magnetita. En las serpentinas se distinguen cuerpos con mineralogía relictiva de piroxeno (Hervé, 1977) y olivino (Barra *et al.*, 1998), serpentinas con antigorita y relictos de piroxenos (Alfaro, 1980), serpentinas con vetillas de talco, carbonatos y crisotilo (Barra *et al.*, 1998) y cuerpos con óxidos (cromita) y sulfuros (pirita, pirrotina y calcopirita). Microscópicamente se observa una textura acicular de cristales de crisotilo-antigorita, orientados en varias direcciones, con magnetita sobreimpuesta, micro vetillas de crisotilo y, localmente, talco y magnesita. (Duhart *et al.*, 2001).

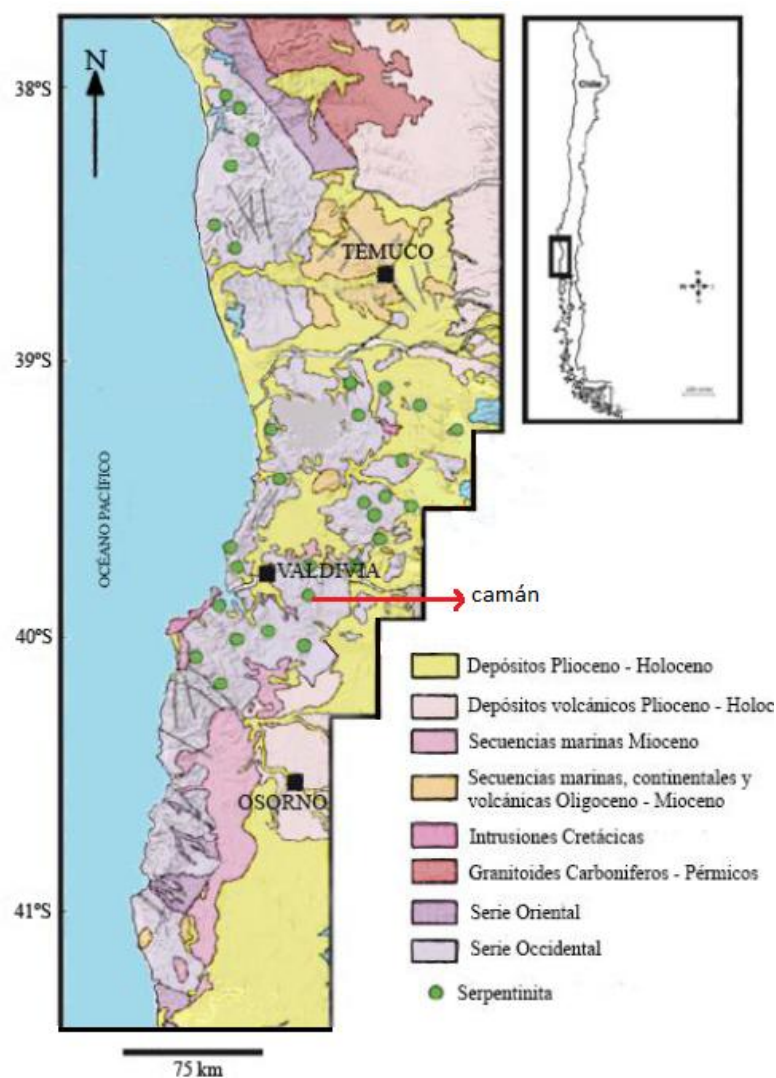


Figura 5. Mapa geológico de la zona centro sur del país. Modificado de Alfaro, 1982.

2.3 Localización y características del afloramiento

La laterita de Camán aflora en las proximidades de la localidad del mismo nombre, aproximadamente a 27 kilómetros al sur este de la ciudad de Valdivia, siguiendo la ruta 206 que une Valdivia con la localidad de Paillaco. El afloramiento se reconoce en la trinchera de la carretera y presenta cobertura vegetal en la mayoría de su superficie. El afloramiento tiene unas dimensiones aproximadas de 7 metros de alto y 60 metros de ancho, pero solo una porción de 7 por 8 metros aproximadamente se encuentra visible (Figura 6). En su base presenta relictos de la roca madre de tamaños variables entre 50 centímetros y 2 metros aproximadamente. En la vertical, el color cambia desde anaranjado oscuro brillante en la base volviéndose café oscuro opaco hacia el techo, lugar donde se encuentra el horizonte A actual del suelo, con alta presencia de vegetación. En los diferentes puntos de toma de muestra se puede evidenciar cambios en el color además de cambios en la cohesión de las partículas y presencia de minerales de hábito micáceo en diferentes proporciones.



Figura 6. Perfil de la laterita de Camán.

3 Metodología

3.1 Suelo

3.1.1 Toma de muestras

En terreno se realizó la toma de muestra de suelo para su posterior análisis. Se identificaron diferentes horizontes en la laterita por criterios de color principalmente. Una vez definido un punto de muestreo se procedió a raspar la parte más superficial y se tomaron incrementos con una pala de jardinería plástica ambientada hasta completar una muestra de aproximadamente 2 kilogramos. Cada muestra fue guardada en bolsas de plástico rotuladas y agujereadas para que pudiera así escapar la humedad contenida en el material.

3.1.2 Cuarteo

Cada una de las muestras fue cuarteada para así obtener submuestras homogéneas para los distintos análisis a los cuales fueron sometidas. Se procedió a dividir el suelo manualmente en cuatro partes de igual volumen con ayuda de guantes de látex y sobre una superficie limpia para evitar contaminación. De estos cuatro incrementos se tomó dos los cuales fueron unidos y homogenizados. Se realizó lo mismo con los otros dos incrementos. Finalmente los dos subgrupos fueron mezclados y se repitió el proceso anterior una vez más. Esto se realizó para cada una de las muestras. Terminado el proceso se tomaron las cantidades necesarias para cada uno de los análisis y fueron guardados en bolsas de muestras etiquetadas. El rechazo de cada muestra fue guardado.

3.1.3 Análisis de metales nobles

El análisis químico para obtener las concentraciones de los elementos del grupo del platino (EGP) y oro se realizó en Intertek Genalysis, Perth Australia. El procedimiento consistió en coleccionar los metales preciosos en una perla de sulfuro de níquel. Dicha perla fue disuelta en agua regia y la concentración de los metales de interés medida con un ICP-MS cuyos límites de detección fueron de 2ppb para el Au y 1ppb para todos los EGP (*Schedule of Services & Charges 2016 Australia, Intertek Genalysis*).

3.1.4 Análisis de elementos mayores y trazas en roca total

El análisis de elementos mayoritarios, trazas y ultratrazas se realizó en el laboratorio ALS *Geochemistry*. Para esto se realizó una fusión por borato de litio previo a una digestión ácida para finalmente realizar la lectura de los elementos con un ICP-MS, con límites de detección entre los 0.05 y los 10 ppm, según cada elemento.

3.1.5 Análisis mineralógico

3.1.5.1 Difracción de rayos X en agregados orientados

Para la preparación de muestra del análisis de rayos X (DRX) se necesitó aproximadamente 500 gramos de material, el cual fue homogenizado en 750 mililitros de agua en una batidora por alrededor de 15 minutos. Junto con el agua, a la muestra se le introdujo un anti aglomerante (calgon, 3 mililitros) para que no se formaran cúmulos de material. Posteriormente se introdujo el preparado en un equipo de ultra sonido por media hora, para así disolver todos los cúmulos que pudieran haber quedado del paso anterior. Finalmente las muestras se pasaron a los porta muestras de una centrifuga teniendo el cuidado que fueran de exactamente la misma masa, para lo cual se utilizó una balanza de alta precisión. Como las muestras estaban demasiado espesas se les agregó una pequeña cantidad de agua. Las muestras introducidas en la centrifuga fueron de 600 gramos aproximadamente. La centrifuga cumple la función de separar la muestra en distintas fases dependiendo de su tamaño quedando lo más grueso en la parte del fondo, una sección más fina en medio y por último las partículas tamaño arcilla disueltas en el líquido de la parte superior. Con mucho cuidado de evitar movimientos bruscos y en un solo paso se colocó este líquido con las arcillas en tubos de ensayo rotulados y se dejaron reposar por dos días, para que así las arcillas pudieran decantar. Pasado los dos días, se votó el agua que sobró del tubo de ensayo y las arcillas fueron puestas en un porta muestras de vidrio de 2x2 centímetros y se dejaron secar por dos días más. Esto constituye el agregado orientado de arcillas. Con estas muestras es posible analizar la mineralogía de arcillas presentes en el suelo ya que el agregado orientado orienta los filosilicatos según su lado más largo haciendo más fácil su detección posterior con la difracción de rayos X.

Para poder analizar la mineralogía total de la muestra se procedió a tomar 10 gramos de suelo el cual fue molido manualmente con un mortero de ágata. Este molido fue puesto en un tubo de ensayo y fue mezclado con agua hasta obtener una solución homogénea, la cual fue vertida en los porta muestras de vidrio y se dejaron secar durante dos días. Todos estos procedimientos se realizaron en el laboratorio de arcillas del CEGA ubicado en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

Finalmente los porta muestras de vidrio fueron llevados para el análisis de sus fases minerales al laboratorio de difracción de rayos X de polvo cristalino Bruker D8 Advance con una fuente Cu K α y un rango de barrido estándar de 2-80° (2 θ) del Departamento de Física de la Universidad de Chile y, posteriormente, tratados mediante el software Xpoder. Los agregados orientados enviados a difracción fueron sometidos a un barrido normal y a un barrido con el compuesto Etilenglicol el cual se introduce entre medio de las capas de las arcillas y las expande haciendo más fácil el análisis de estas en el difractómetro.

3.1.5.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Las muestras luego de haber pasado por la centrifuga quedaron separadas en diferentes fases según granulometría. La fase arcillas se utilizó para los agregados orientados llevados a DRX como se nombró anteriormente. Las otras dos fases fueron separadas manualmente en vasos de precipitado y se dejaron secar a temperatura ambiente por dos semanas. Luego de esto se obtuvieron fases secas de dos tamaños diferentes los cuales fueron analizados en el SEM utilizando imágenes de electrones secundarios, electrones retrodispersados y espectro EDS en dependencias del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Para el correcto uso del microscopio fue necesario participar de una capacitación de medio día en donde se enseñó el uso básico del SEM.

3.1.6 Producción de suelo y tasa de meteorización

A partir de datos de concentración de elementos tanto en suelo, roca y agua, es posible estimar una tasa de producción de suelo (S) y una de meteorización de la roca(R). El método utiliza elementos que provengan solo de la roca y que se encuentren además en el suelo generado y en el agua que causó la meteorización. Se asume un balance de masas entre la roca, el suelo y el agua, considerando que la cantidad de roca meteorizada es compensada por el suelo generado y por los solutos que queden en el agua, como se muestra en la siguiente ecuación (Wakatsuki y Rasyidin, 1992).

$$C_{i,r}R = C_{i,w}S + M_{i,w}$$

En la ecuación, el subíndice r indica roca madre, w indica la laterita e i un elemento cuya fuente sea la roca. C representa la concentración del elemento i en la roca o en el suelo en mgr/gr, M los miligramos del elemento i en un litro de agua, R la cantidad de roca meteorizada en gramos y S la cantidad de suelo formado durante la meteorización en gramos. La ecuación se resuelve para todos los elementos seleccionados (en este caso Fe, Al, Mg, Ca, Cr, Mn, Ni, Zn y Pd) y las incógnitas R y S se obtienen formando todas las parejas posibles entre los elementos nombrados. Los valores de R y S deben cumplir la relación $R > S > 0$ para poder ser usados en la estimación. Finalmente, una vez obtenidos los valores para cada horizonte se calcula un promedio por horizonte y uno general para todo el perfil.

3.2 Agua

3.2.1 Preparación de botellas

Para la toma de muestra de aguas fue necesario limpiar las botellas antes de esta labor. Se han usado botellas de 250 mililitros y han sido necesarias 3 por cada punto de muestreo según los procedimientos analíticos del laboratorio: una para cationes, aniones y trazas respectivamente. Las botellas fueron lavadas 3 veces con

agua de osmosis inversa con unos 5 mililitros de agua y agitadas durante 1 minuto. Posteriormente se procedió a un doble lavado con agua “mili q” siguiendo el procedimiento anterior. Para las contratapas y las tapas de cada recipiente se realizó el mismo procedimiento. Las botellas para cationes fueron dejadas en ácido nítrico durante 24 horas y lavadas dos veces con agua mili q.

3.2.2 Toma de muestras

La toma de muestra de aguas se realizó con la ayuda de un contenedor plástico ambientado con el agua del lugar. Una vez obtenido un litro se procedió a rellenar las botellas mediante una jeringa a la cual se le colocó un filtro de 0.45 micrómetros que evitó el paso de material coloidal. Con esta jeringa se llenó cada una de las botellas. A las botellas de cationes se le añadió 2.5 mililitros de ácido nítrico. Durante la toma de muestra, se realizó la medición *in situ* de los parámetros Eh, pH y conductividad del agua, los cuales fueron tabulados junto con el punto GPS. Estos fueron medidos con un multiparámetro HACH D-40. Una vez terminado el muestreo cada botella fue sellada con cinta aislante y guardada en un *cooler* y posteriormente refrigerada hasta que fueron entregadas al laboratorio.

3.2.3 Análisis de elementos mayores y trazas

Todos los análisis se realizaron en el laboratorio de geoquímica de fluidos del CEGA del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Los elementos traza (aniones y cationes) se midieron mediante espectrometría de masas cuadrupolo con fuente de plasma de acoplamiento inductivo y celda de colisión, modelo Thermo Scientific ICP-MS Q iCAP Q. En el caso de los elementos mayoritarios se utilizó un titulador automático Hanna HI-902C con electrodo de vidrio combinado para la determinación de carbonatos y bicarbonatos en agua usando el método de Giggenbach, un espectrofotómetro de absorción atómica con llama (F-AAS) modelo Perkin Elmer PinAAcle 900F, con nebulizador para cationes mayores (sodio, potasio, calcio y magnesio), y un cromatógrafo iónico modelo Thermo Scientific Dionex ICS-2100 para el análisis de aniones.

3.2.4 Especiación y modelamiento de aguas

Con el fin de determinar las especies minerales disueltas en el agua y hacer simulaciones con las mismas se utilizó el software libre PHREEQC que posee una extensa base de datos química y termodinámica para realizar modelamientos hidrogeoquímicos. Para este estudio se utilizó la base de datos sit.dat por poseer información de la mayoría de los elementos analizados, menos para el Pt y se realizaron especiaciones, reacciones de equilibrio entre el agua y diferentes fases minerales y un modelamiento directo tomando como punto de partida el agua lluvia promedio de la zona de estudio, como agentes de interacción los minerales presentes en las rocas y suelo de Camán y como punto final el agua tomada *in situ*.

4 Resultados

4.1 Geoquímica de roca total

4.1.1 Elementos mayores

La composición de elementos mayoritarios dentro de la laterita es muy variable (Anexo 1). El elemento de mayor concentración es el Fe (entre 40 y 52 % en peso) seguido del Al y el Si (entre 9 y 13 y 5 y 19 % en peso respectivamente). Entre estos tres elementos concentran más del 60% en peso dentro del perfil. El Cr presenta concentraciones entre 1.8 y 2.6 % en peso. El resto de los elementos presentan en general concentraciones menores al 1% en peso: el Ti entre 0.13 y 1 % en peso, el Mn entre 0.7 y 1.3 % en peso, el P entre 0.02 y 0.05 % en peso, Ca entre 0.03 y 0.06 % en peso, Mg entre 0.09 y 1% en peso. El K es un caso particular ya que casi no presenta variación dentro del perfil. El resto de los elementos mayores (Na, Sr y Ba) no serán considerados dentro del análisis debido a que sus concentraciones están bajo el límite de detección. Estas variaciones en la concentración de los elementos mayores no ocurren de forma homogénea dentro del perfil. En el caso de elementos como P, Ca y K las variaciones en la vertical son mínimas. Por otro lado, las concentraciones de Al, Si y Fe varían considerablemente, existiendo zonas de mayor concentración que otras (Figura 7).

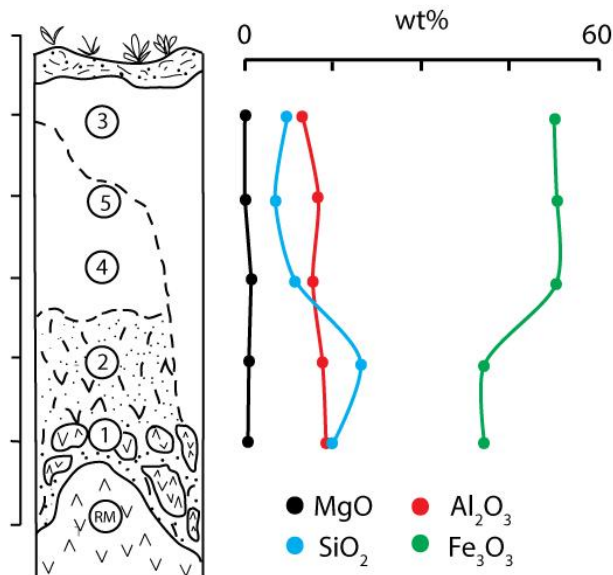


Figura 7. Distribución de la concentración (wt%) de Fe, Al, Si y Mg a lo largo de la laterita. a la izquierda se ve la ubicación relativa de cada muestra.

La concentración de SiO₂ desde la base al techo tiende a disminuir (de 14.6 a 5.3 % en peso), salvo en la muestra 2 en que aumenta muy levemente (10.55 % en peso) para dar paso luego a una disminución continua de sílice. El MgO permanece casi constante a través del perfil (~0.7% en peso), disminuyendo levemente en el techo (0.1

% en peso). Situación similar ocurre con el aluminio que no cambia su concentración durante todo el perfil (~11 % en peso) con una leve disminución en la parte superior (9% en peso). Ambos elementos al igual que la sílice presentan una disminución en su concentración hacia el techo del perfil. El hierro presenta un claro aumento hacia el techo de hasta un 12% en peso, constituyendo la zona más enriquecida en este elemento con respecto a la base.

En general, tanto sílice, aluminio y hierro no presentan buena correlación entre ellos, como se puede observar en la matriz de correlaciones (Anexo 4). Sílice y hierro presentan buena correlación negativa ($r=-0.92$), correlación media con el aluminio ($r=0.6$) y lo mismo entre Fe y Al ($r=-0.7$). Tanto Ca, K y Mg presentan factores de correlación muy buenos entre ellos y muy mala correlación con Al, Fe y Si.

En la Figura 8 se han representado las composiciones de las muestras estudiadas en el diagrama de Schellmann, 1983, pudiéndose observar que la laterita de Camán presenta un alto grado de laterización además de un aumento gradual en hierro desde la base al techo del perfil.

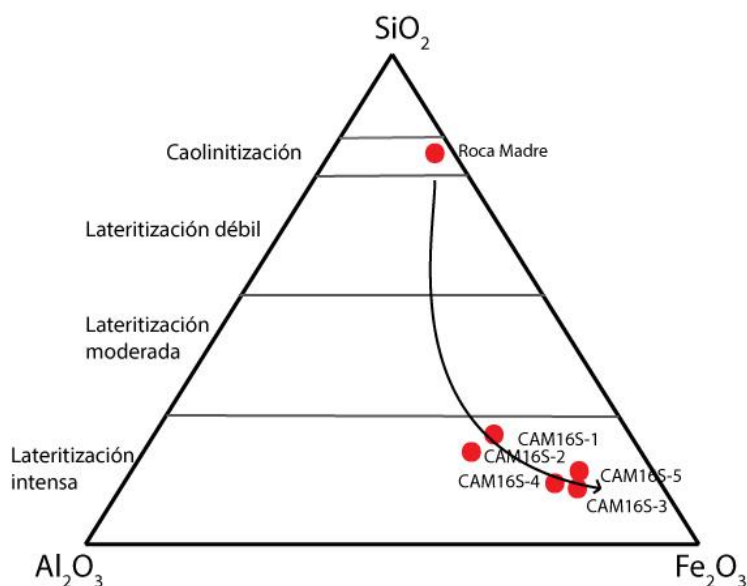


Figura 8. Diagrama ternario Fe₂O₃, Al₂O₃ y SiO₂ que muestra el grado de laterización y el incremento progresivo de hierro desde la base al techo de perfil.

Para poder visualizar los cambios químicos responsables de la formación de la laterita, Babechuka *et.al.*, 2014 definieron el índice de alteración de roca Ultramáfica (UMIA, por su sigla en inglés) según la siguiente ecuación:

$$UMIA=100x\frac{Al_2O_3+Fe_2O_3}{SiO_2+MgO+Al_2O_3+Fe_2O_3}$$

La Tabla 2 muestra los valores del UMIA para la laterita de Camán, desde donde se observa que la roca madre presenta un muy bajo valor para este índice, cercano al

10%, mientras que las diferentes muestras de la laterita presentan valores progresivamente más altos, entre el 70 y 90%, desde la base al techo.

Tabla 2. Valores del índice de alteración de roca ultramáfica, UMIA, para la laterita de Camán.

	Roca Madre	CAM16S-1	CAM16S-2	CAM16S-4	CAM16S-5	CAM16S-3
UMIA	10.59	78.2	72.71	87.05	92.4	89.04

Combinando esta ecuación con los gráficos AF-M-S (Figura9) y A-F-SM (Figura 10), es posible observar la pérdida de Si y Mg y el enriquecimiento de Fe y Al (Figura9) desde la roca madre a la laterita durante el proceso de meteorización, en particular en Fe (proceso de laterización, Figura 10), en todos los horizontes del suelo. Es claro además que esas ganancias y pérdidas están acompañadas por altos índices de alteración.

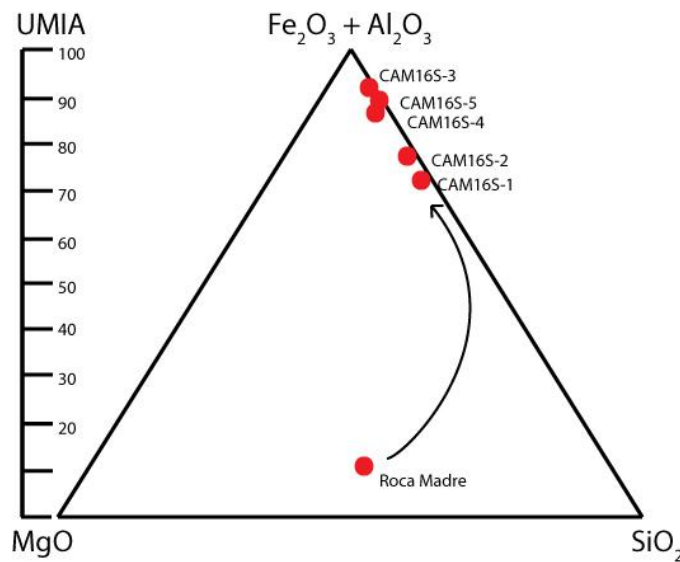


Figura 9. Triángulo AF-S-M para las muestras de la laterita de Camán.

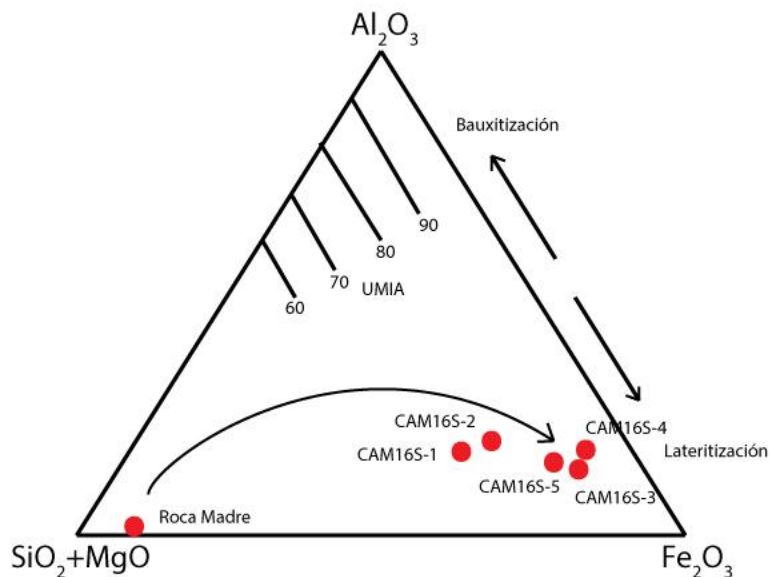


Figura 10. Triángulo A-F-SM para las muestras de la laterita de Camán.

De los tres triángulos observados, es claro el alto grado de alteración que presenta la laterita de Camán, lo que en particular aumenta desde la base al techo del perfil.

4.1.2 Elementos traza

La concentración detallada de los elementos traza dentro del perfil laterítico se encuentra en el Anexo 1.

4.1.2.1 Metales de transición

El Ni es el metal de transición de mayor concentración dentro del perfil variando entre 3100 y 6800 ppm, seguido por el Co (430-890 ppm). Zn presentan concentraciones entre 200 y 400 ppm y Cu entre 60 y 170 ppm aproximadamente. Sc es el elemento de este grupo de menor concentración variando entre 60 y 80 ppm. Los contenidos de V son menores que el límite de detección.

La distribución de los metales de transición es errática a lo largo del perfil (Figura 11). Existe una alta concentración de Ni en la muestra 3, y menores contenidos de este elemento en la muestra 5, ambas muestras del techo del perfil. A pesar de lo anterior, el Ni presenta una concentración anómala a medida que se va subiendo en la vertical. Un comportamiento similar presentan el Mn y el Co, los cuales a pesar de no tener un fuerte enriquecimiento en el perfil, aumentan su concentración a partir de la muestra 2 (base), con una disminución de esta en la muestra 5 (los tres metales tienen un patrón de distribución vertical similar). El cromo es otro elemento que presenta un aumento en su concentración de base a techo, pero con una leve disminución en la muestra 2 (base). El Zn presenta un aumento de concentración en la muestra 2, disminuyendo su concentración hacia el techo. El Cu presenta un aumento de concentración desde la base hasta la muestra 5, disminuyendo su concentración levemente en el techo del perfil. La tendencia general de los metales recién nombrados es al aumento de concentración desde la base hacia el techo del perfil, con una leve disminución en la muestra 5. El Sc tiene una concentración relativamente constante a lo largo del perfil, presentando variaciones insignificantes. A diferencia de los elementos anteriores, el Ti presenta su mayor concentración en la base, disminuyéndola abruptamente hacia el techo a partir de la muestra 2, desde donde presenta una concentración constante y baja (inferior al 1% en peso).

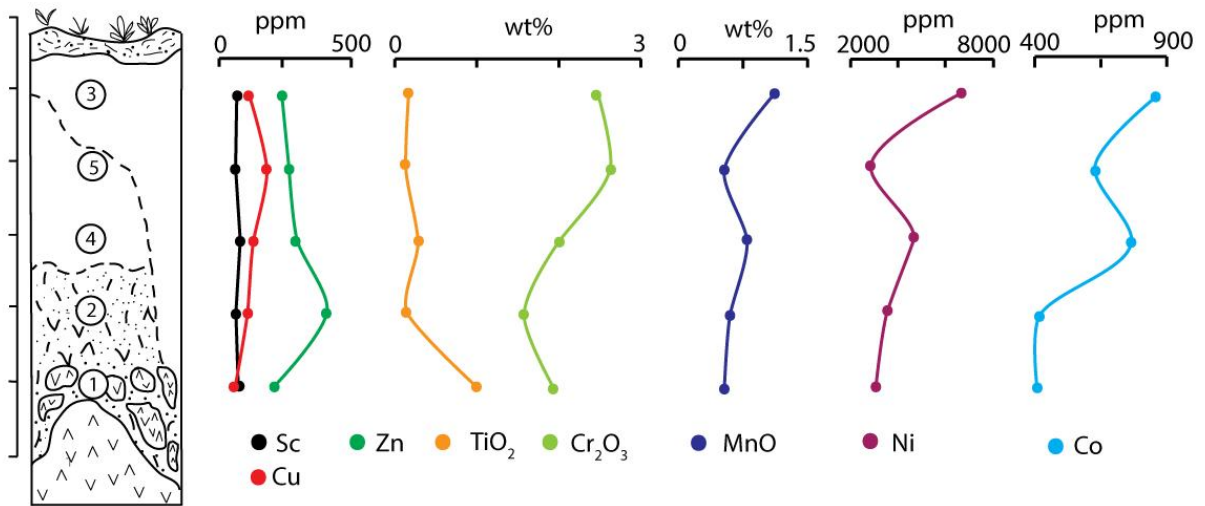


Figura 11. Distribución de la concentración de los metales de transición en la laterita de Camán.

La similar distribución de algunos de los metales también se observa en las correlaciones existentes entre ellos (Anexo 4). Ni, Co y Mn presentan muy buena correlación positiva ($r > 0.8$). El Cr presenta buena correlación con Co y Cu (r cercano a 0.7). Tanto Cr, Co y Ni presentan muy buena correlación con Fe ($r > 0.8$). Finalmente, Sc, Zn y Ti no presentan ningún tipo de correlación con el resto de los metales de transición.

4.1.2.2 Tierras raras

Los valores totales de tierras raras en el conjunto de muestras estudiadas varían 90 y 230 ppm aproximadamente (anexo 5). Los valores de tierras raras totales entre las muestras son muy disímiles existiendo diferencias de más del doble entre una muestra y otra. Las muestras 3 y 4 presentan valores similares (cerca de 100 ppm), misma situación ocurre en las muestras 1 y 5 (en el rango de 90 ppm). Entre estas cuatro muestras los valores son relativamente cercanos (entre 90 y 110 ppm), encontrándose las cuatro muestras en la parte media y superior del perfil. La muestra 2 (base) por otro lado presenta una concentración anómala con respecto a las otras muestras (valor de tierras raras totales de 230 ppm aproximadamente). Existe un comportamiento similar en la concentración de tierras raras livianas y pesadas (concentración mucho mayor en la muestra 2 con respecto a las otras muestras). En general las tierras raras livianas presentan mayor concentración que las pesadas en todas las muestras (Figura 12). Se muestra además que el Y presenta un comportamiento idéntico a los lantánidos dentro de la laterita, pero con una concentración mucho menor. En general, existe un aumento de la concentración de las tierras raras y el Y en la base del perfil (en particular en la muestra 2), mientras que hacia el techo la concentración disminuye y permanece prácticamente constante. Además se observa de forma gráfica que las tierras raras livianas presentan mayor concentración que las tierras raras pesadas, pero ambos grupos presentan patrones de distribución vertical muy similares.

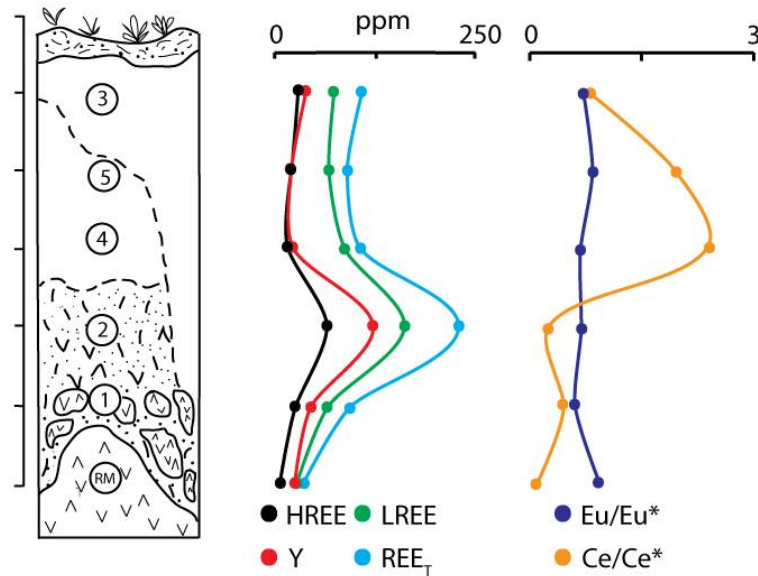


Figura 12. Distribución vertical de las REE totales, Y, LREE y HREE en la laterita de Camán (izquierda). Distribución de las anomalías de Eu y Ce (derecha).

A partir del patrón de REE de la Figura 13, es posible observar que en general existe un comportamiento similar (misma forma del patrón) entre las muestras 1 2 y 3 y entre las muestras 4 y 5. Además es clara la mayor concentración de elementos de tierras raras en la muestra 2 con respecto a las otras muestras. A grandes rasgos el patrón de todas las muestras presenta pendiente negativa hasta el Eu, a partir del cual la pendiente pasa a ser plana con un leve valor positivo.

Todas las muestras presentan anomalías negativas de Eu. Por otro lado, las muestras 1, 2 y 3 presentan anomalía negativa de Ce, mientras que las muestras 4 y 5 presentan anomalía positiva para este elemento (anexo 5). En las muestras en que el Ce presenta una anomalía positiva, La y Pr presentan anomalía negativa y viceversa. Todas estas anomalías están mucho más marcadas en la muestra dos que en el resto de las muestras.

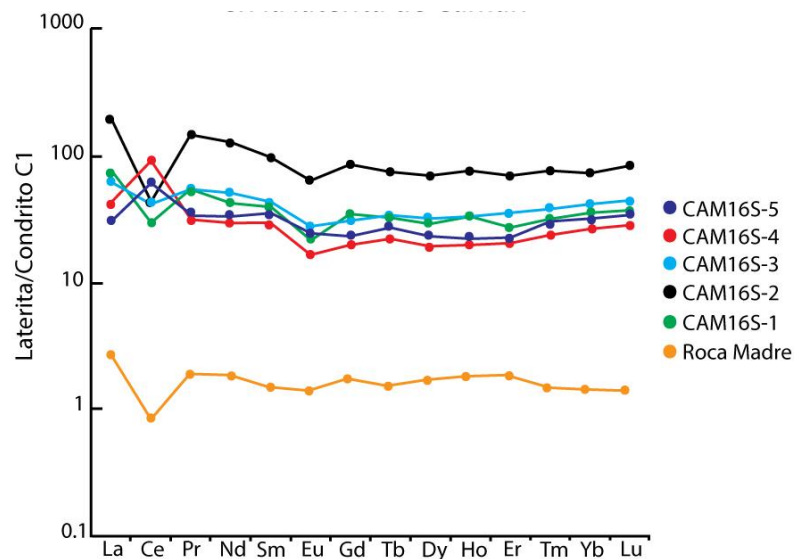


Figura 13. Patrón de REE de la laterita de Camán. Elementos ordenados según número atómico creciente.

Las tierras raras presentan muy buena correlación entre ellos ($r > 0.9$), menos el Ce que tiene valores de r negativos con el resto de los lantánidos. Del mismo modo es posible ver que las tierras raras tienen buena correlación negativa con el Fe, Cr y los EGP salvo con el Pd. Además presentan buena correlación positiva con Si, Zn, Zr y Hf (Anexo 4).

En el Anexo 5 se muestran los valores de las tierras raras totales (REE), las tierras raras livianas (LREE) y las pesadas (HREE) además de los valores de las razones de La/Y, $(La/Yb)_N$, anomalía de cerio $(Ce/Ce)^*$ y anomalía de europio $(Eu/Eu)^*$. Desde aquí es claro que las tierras raras alcanzan su máximo de concentración en la muestra CAM16S-2 (cerca de la base del perfil) y su mínimo en la muestra CAM16S-5 (hacia el techo). Las LREE están más concentradas que las HREE. Los valores de la razón La/Y son todos menores a 1 y muy cercanos entre ellos mientras que los valores de la razón $(La/Yb)_N$ son todos mayores a 1. Finalmente vemos que en general los valores de la anomalía de Eu se mantienen constantes y menores a 1 mientras que los de anomalía de Ce son menores a 1 en las muestras CAM16S-1, 2 y 3 y mayores a 1 en el resto de las muestras, presentando su máximo en la muestra CAM16S-4, lo que es visible además en la Figura 12.

Finalmente a partir de la Figura 12 y geoquímica de roca total del suelo (Anexo 1) es claro el aumento de concentración en la muestra CAM16S-2 de todas las REE menos del Ce, el cual presenta su máxima concentración en la muestra CAM16S-4, misma donde se presentan el máximo de anomalía de Ce. La anomalía de Eu se muestra constante a lo largo de todo el perfil.

4.1.2.3 Elementos del grupo del platino y oro

Los EGP dentro del perfil laterítico presentan distintas concentraciones y variaciones (Anexo 6). El total de EGP varía entre 79 ppb en la base (muestra CAM16S-2) hasta 190 ppb en el techo del perfil (muestra CAM16S-3). El resto de las muestras presentan concentraciones de EGP totales en el orden de los 140 ppb. El Ru varía entre los 54 y los 19 ppb, siendo el EGP de mayor concentración dentro del perfil, seguido del Pt que varía entre los 44 y 27 ppb. Ir presenta concentraciones entre 28 y 11 ppb, Pd entre 30 y 12 ppb y Os entre 25 y 6 ppb. El Rh es el EGP de menor concentración variando entre 9 y 4 ppb. Muy similar al Rh, el Au presentan muy bajas concentraciones variando entre los 8 y los 6 ppb. Estos últimos dos elementos son los que además presentan la menor variabilidad dentro del perfil, mientras que el Ru es el que presenta la mayor varianza, seguido de Pd y Os. No obstante, existe un enriquecimiento progresivo de todos los EGP desde la base hacia el techo del perfil (Figura 14).

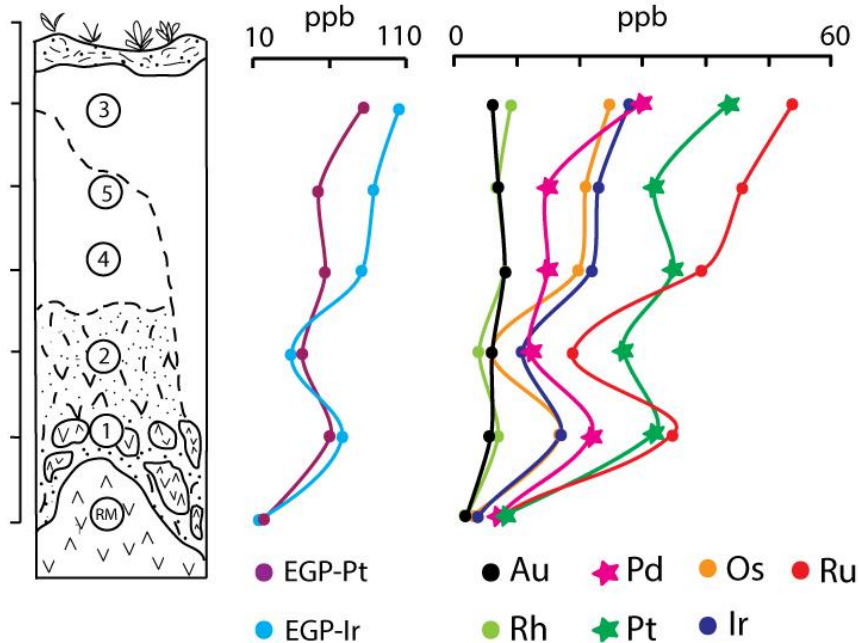


Figura 14. Patrones de distribución vertical en la laterita: EGP-Ir y EGP-Pt (izquierda), EGP y Au (derecha).

La Figura 15 también muestra un aumento de los EGP y Au desde la roca madre y a lo largo del perfil. Los patrones de distribución de los EGP son en general planos mostrando leves aumentos y disminuciones en Ru y Pd respectivamente. Se observa además que todas las muestras presentan una tendencia al aumento en Au.

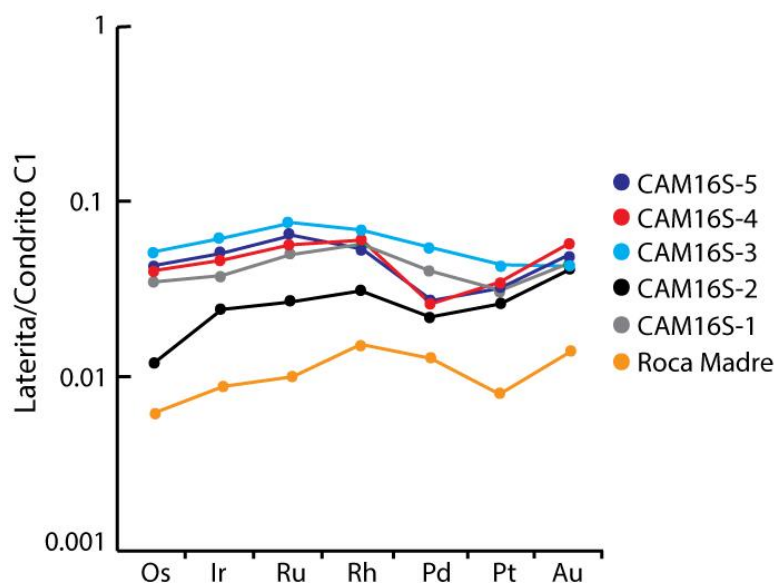


Figura 15. Concentración de EGP y Au en laterita y roca madre. Elementos ordenados según punto de fusión decreciente.

En general los EGP presentan buena correlación entre ellos (Anexo 4), en particular el Pt presenta muy buenas correlaciones con el resto de los EGP ($r > 0.8$). Del mismo modo, existe una muy buena correlación entre EGP-Ir y EGP-Pt. Contrario a lo anterior, el Au presenta muy mala correlación con los EGP (valores de r cercanos a 0.2).

Los EGP presentan buena correlación con Ni, Mn y W ($r > 0.5$), y salvo el Pd, presentan buena correlación con Fe, Cr y Co (valores de r mayores a 0.6). Además, presentan buena correlación negativa con Si, Al, tierras raras, Hf, Y y Zr.

Finalmente en el caso del Au, presenta muy buena correlación con As, Rb y Sr ($r > 0.7$) y buena correlación con Fe, Cu, Pb, Sn y Sc (valores de $r > 0.5$).

4.1.2.4 Otros elementos traza litófilos

Otros elementos analizados en el perfil laterítico son: Lu, Hf, Nb, Ta, U, Pb, Th y Zr.

El Zr es el elemento más abundante en el perfil y su contenido varía entre los 140 y los 30 ppm, seguido del Pb con concentraciones entre los 45 y los 4 ppm. Nb y Hf presentan concentraciones similares variando entre 9.6 y 4.5 ppm y 7.1 y 1.4 ppm respectivamente. Th presentan concentraciones entre 2.8 y 0.6 ppm Tanto Ta, U y Lu presentan las concentraciones más bajas variando entre 0.9 y 0.3 ppm.

Los contenidos de Ta y U son constantes a lo largo del perfil, con leves variaciones, Lu aumenta su concentración en la base del perfil (muestra 2) para después disminuirla hacia el techo en donde permanece casi constante. Th presenta un aumento constante de concentración desde la base hasta la muestra 5, para posteriormente disminuir en la muestra 3. Nb disminuye su concentración en la muestra

2 y en el techo (muestra 3), y aumenta en la parte central del perfil. Finalmente, Zr, Hf y Pb presentan un comportamiento similar (mismo patrón) aumentando sus concentraciones en la muestra 2 para disminuirlas en el techo, con un leve aumento en la muestra 5 (Figura 16).

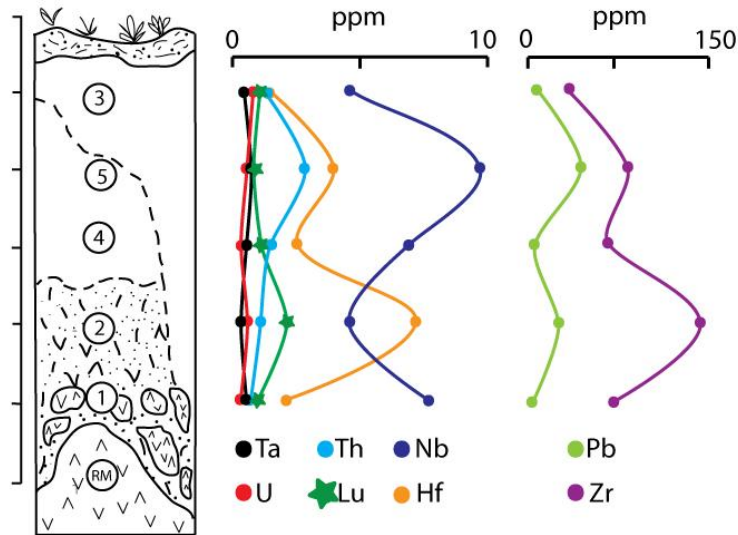


Figura 16. Distribución de los elementos Pb, Zr (derecha), Hf, Nb, Ta, Th, U y Lu (izquierda) a lo largo de la laterita.

A partir de la matriz de correlación es posible observar que los pares Nb-Ta y Lu-Hf tienen muy buenas correlaciones entre ellos. Zr tiene muy buena correlación tanto con Lu como con Hf, no así con Nb y Ta. Además el Zr presenta buena correlación con Si, tierras raras e Y, además de una buena correlación negativa con los EGP. Th presenta buena correlación con U, Nb, Ta, Fe, Cr, Cu y Sn. Finalmente Pb no presenta mayor correlación con ninguno de los elementos mencionados anteriormente, solo con Rb y Sr.

4.1.3 Enriquecimiento, balance de masas y tasa de meteorización

Para cada una de las muestras de agua se realizó el procedimiento de cálculo de los parámetros tasa de meteorización y tasa de producción de suelo (R y S), tomando 21 parejas posibles entre los elementos utilizados (en este caso Fe, Al, Mg, Ca, Cr, Mn, Ni, Zn y Pd). De estas 21 combinaciones, solamente 7 cumplieron la condición $R > S > 0$ para cada muestra de agua (Mn/Zn, Al/Ca, Fe/Mg, Fe/Ca, Cr/Mn, Cr/Ni y Cr/Zn). Los resultados presentaron gran variabilidad, pero a pesar de lo anterior, se calculó el promedio de R y S para cada una de las muestras de suelo y agua, y un promedio general, los cuales están disponibles en el anexo 7.

4.2 Mineralogía

4.2.1 Descripción macroscópica

La roca madre es de color verde oscuro con tonalidades grises a muestra de mano, mientras que en el afloramiento se observa en tonos grises oscuros. Está muy alterada, presentando bordes más claros y con tonalidades amarillas y naranjadas producto de la meteorización. Se presenta maciza aunque fracturada en grandes bloques en la zona inferior derecha (Figura 6). Macroscópicamente se observan minerales de estructura fibrosa de orientación paralela y tamaño variable posiblemente del grupo de la serpentina. Las muestras de suelo CAM16S-1 y CAM16S-2 presentan una fase primordial pelítica (compuesta posiblemente por arcillas y óxidos de hierro) además de una fase cristalina de textura hojosa correspondiente posiblemente a cristales de antigorita. En las muestras CAM16S-3, CAM16S-4 y CAM16S-5 la fracción pelítica aumenta considerablemente con respecto a la fase cristalina que disminuye su proporción además de disminuir el tamaño de los cristales hojosos. En algunas zonas es posible identificar pequeños cúmulos negros correspondientes a óxidos de manganeso.

4.2.2 Descripción microscópica: cortes transparentes

La roca a partir de la cual se desarrolló la laterita de Camán es una peridotita serpentizada de ambiente de subducción con un paso de hidratación abisal (Orellana, 2016), conformada por cristales de serpentina (antigorita) anhedral menor a 0.4 mm (~60 %) presente en vetillas o como dagas (Figura 17), carbonatos (magnesita) subhedrales de 10 mm (15 %) de hábito granular, óxidos de hierro (magnetita) subhedrales a euhedrales de 0.1-0.5 mm (10 %) de hábito granular, cromita porosa <0.5 mm (3 %) en hábito granular, bastitas de piroxeno de 0.5-1.0 mm (10 %) en hábito granular y talco <0.3 mm (2 %) en vetillas.

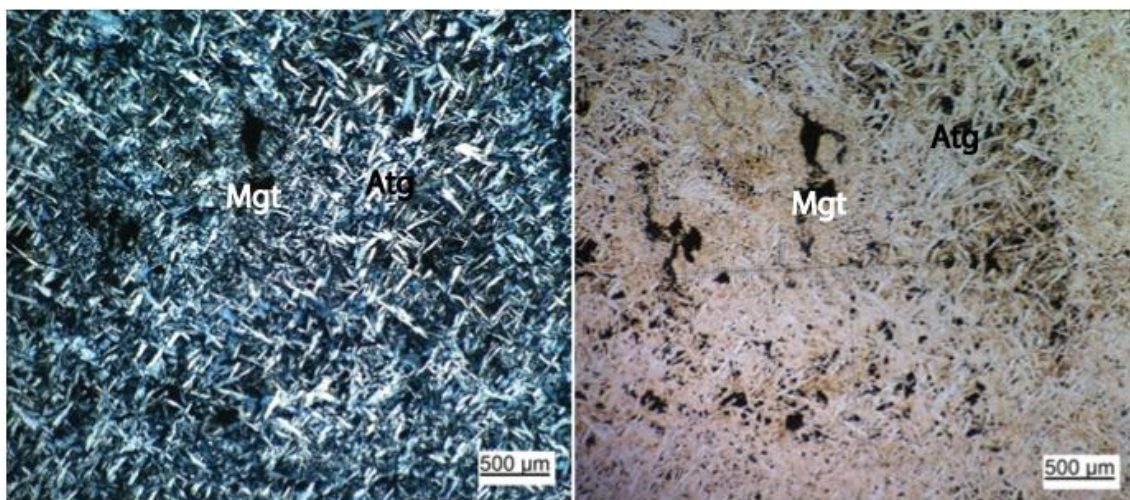


Figura 17. Serpentininas. 100X. A la izquierda nicoles cruzados, a la derecha nicoles paralelos. Atg: antigorita, Mgt: magnetita.

4.2.3 Difractogramas

4.2.3.1 Fracción total

A partir de los difractogramas (Anexo 8) se determinó la mineralogía principal de los diferentes horizontes de la laterita de Camán. Los principales minerales encontrados en la fracción total del suelo se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Mineralogía reportada para la fracción total a partir de análisis DRX.

	CAM16S-1	CAM16S-2	CAM16S-4	CAM16S-5	CAM16S-3
Hidróxidos					
Goethita					
Silicatos					
Antigorita					
Nimita					
Saponita					
Montmorilloni					
Chamosita					
Zircon					
Alanita					
Halloysita					
Clinocloro					
Óxidos					
Eskolaíta					
Cerianita					
Hematita					
Pirrolusita					
Cloruro					
Halita					
Carbonatos					
Caresita					
Charmanita					
Rancieita					
Sulfuro					
Ullmannita					
Sobolevskita					

El mineral predominante es la goethita y los óxidos e hidróxidos en general, los cuales se encuentran en todas las muestras y cuyos *peaks* de intensidad están siempre marcados de forma clara en los difractogramas de todas las muestras. Le siguen los filosilicatos de diversos grupos: del grupo de la serpentina destaca la antigorita, que queda relicta desde la roca madre. Seguido de esta es común encontrar minerales del grupo de la clorita, y en menor medida del grupo de la esmectita y caolinita, pero con *peaks* de intensidad menos claros.

La tabla 3 muestra que los filosilicatos son los que concentran en su estructura gran parte de los metales de transición como Mn, Co y Ni. De forma particular se encontró además óxidos e hidróxidos de manganeso, hierro y cromo, además de carbonatos de manganeso, hierro y aluminio en las muestras 1 y 5. Otros minerales encontrados de forma particular en las muestras 2 y 4 son zircón, alanita y cerianita, los cuales pueden presentar niveles de tierras raras dentro de su estructura (entre un 4 y

un 40% en peso). Finalmente, se detectaron *peaks* aislados del mineral de elemento del platino sobolevskita (PdBi) en las muestras 3 y 4.

4.2.3.2 Fracción arcilla

A partir de los agregados orientados generados tomando la fracción arcillosa de cada muestra, se obtuvo la siguiente mineralogía desde los difractogramas (Tabla 4).

Tabla 4. Mineralogía reportada para la fracción arcillosa a partir de análisis DRX.

	CAM16S-1	CAM16S-2	CAM16S-4	CAM16S-5	CAM16S-3
Hidróxidos					
Goethita					
Silicatos					
Antigorita					
Caolinita					
Orthochevkinita					
Óxidos					
Cerianita					
Carbonatos					
Charmanita					
Lantanita (Ce)					
Lantanita (Nd)					
Takovita					
Sulfuros					
Braggita					
Omeiita					
Telargpalita					
Erlichmanita					
Laurita					

Los minerales detectados en la fracción arcillosa del suelo corresponden a carbonatos hidratados con metales como Ni o Fe y tierras raras como Ce, filosilicatos del grupo de la caolinita y serpentina, y una gran abundancia de sulfuros de EGP, en especial de Pt, Pd, Os y Ru.

4.2.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

En la muestra CAM16S-1 tomada en la base del perfil se encontró un cristal de morfología subhedral con presencia de Er (2 % en peso), Al (5 % en peso), Fe (20 % en peso), Mn (20 % en peso), O (45 % en peso), Ni (1 % en peso) y Co (hasta 2 % en peso). El cristal es de forma irregular pero con algunas caras rectas y presenta algunos sobre crecimientos de otros pequeños cristales en su superficie (Figura 18 A y B). En la misma muestra CAM16S-1 se encontró un cristal de composición y forma anómalas con respecto al resto, con concentración de Fe cercana al 90% en peso y forma euahedral (Figura 18 C y D). En otra muestra de la base del perfil (CAM16S-2) se identificó un cristal de zircón con contenidos de Zr de entre 18 y 30 % en peso, Fe ~5 % en peso, Al ~2 % en peso, O entre 30 y 50 % en peso, Si entre 6 y 10% y Hf ~1%. El cristal es de

tamaño muy pequeño (2 micras su lado más largo) por lo que fue muy difícil obtener información de su morfología (Anexo 9).

En la muestra CAM16S-3 (techo del perfil) se identificaron cristales microscópicos de óxidos de Mn, de bordes irregulares pero caras un poco más planas con 30 % en peso de Mn aproximadamente, 45 % en peso de O, 3 % en peso de Fe y 2 % en peso de Al. De forma particular este cristal presenta un contenido anómalo de Ba de entre un 7 y un 12 % en peso. En esta misma muestra se han detectado cristales de óxidos de Fe con altos contenidos en Mn (12 % en peso Mn, 20 % en peso Fe) y con concentraciones de Ni y Cr muy disminuidas (menores al 0.5 % en peso en general). En esta muestra además se encontró un cristal de Zn con un pequeño cristal de Au en su superficie. El cristal principal es anhedral y hasta 80 % en peso de Zn. Su tamaño no supera los 20 micrómetros en su lado más largo (Figura 18, Ey F). El cristal de Au en su superficie está compuesto por 7 % en peso de Au y ~60 % en peso de Zn.

Otro tipo de cristales reconocidos presentan alta concentración de Fe y Au. Este último aparece en las superficies de los cristales de óxidos de Fe acompañado principalmente por O, menores concentraciones de Cl, C, Al, Fe, en menor medida N y en casos excepcionales de S. El Au solo fue encontrado en las muestras del techo del perfil (CAM16S-3 y CAM16S-5). Los cristales que contienen el Au son de morfología irregular (anhedrales) y en general su tamaño es inferior a las 20 micras. Las concentraciones de Au son variables, en algunos casos es el elemento mayoritario alcanzando valores superiores al 50 % en peso, mientras que en otros casos su concentración es inferior al 20 % en peso, predominando en el cristal el Fe o el Al. Las partículas de oro detectadas en estos cristales son de tamaño menor a las 5 micras y su forma es anhedral a subhedral, mostrando en algunos casos algunas caras rectas. La distribución de estas partículas en los cristales de óxidos de hierro es heterogénea, no siguen ningún patrón de distribución espacial detectable (Figura 18, G y H). En general en estos cristales con Au, el elemento predominante es el Fe, seguido del O, Al y el C. En concentraciones inferiores al 1% se detectó la presencia de Mg, Ca, Na, K, S, Cr, Mn, Ni, N.

Finalmente a lo largo de todo el perfil las morfologías encontradas fueron dos, amorfos y compuestos en su mayoría por O (50% en peso o más) y Fe (30% en peso) (Figura 18 I y J) y subhedrales de caras rectas y superficies planas, que a diferencia de los cristales amorfos, el % en peso del hierro es mayor o igual al de O (Figura 18 K y L). Ambos tipos de cristales presentan cantidades variables de otros metales como Al, Ni, Cr, Co o Mn.

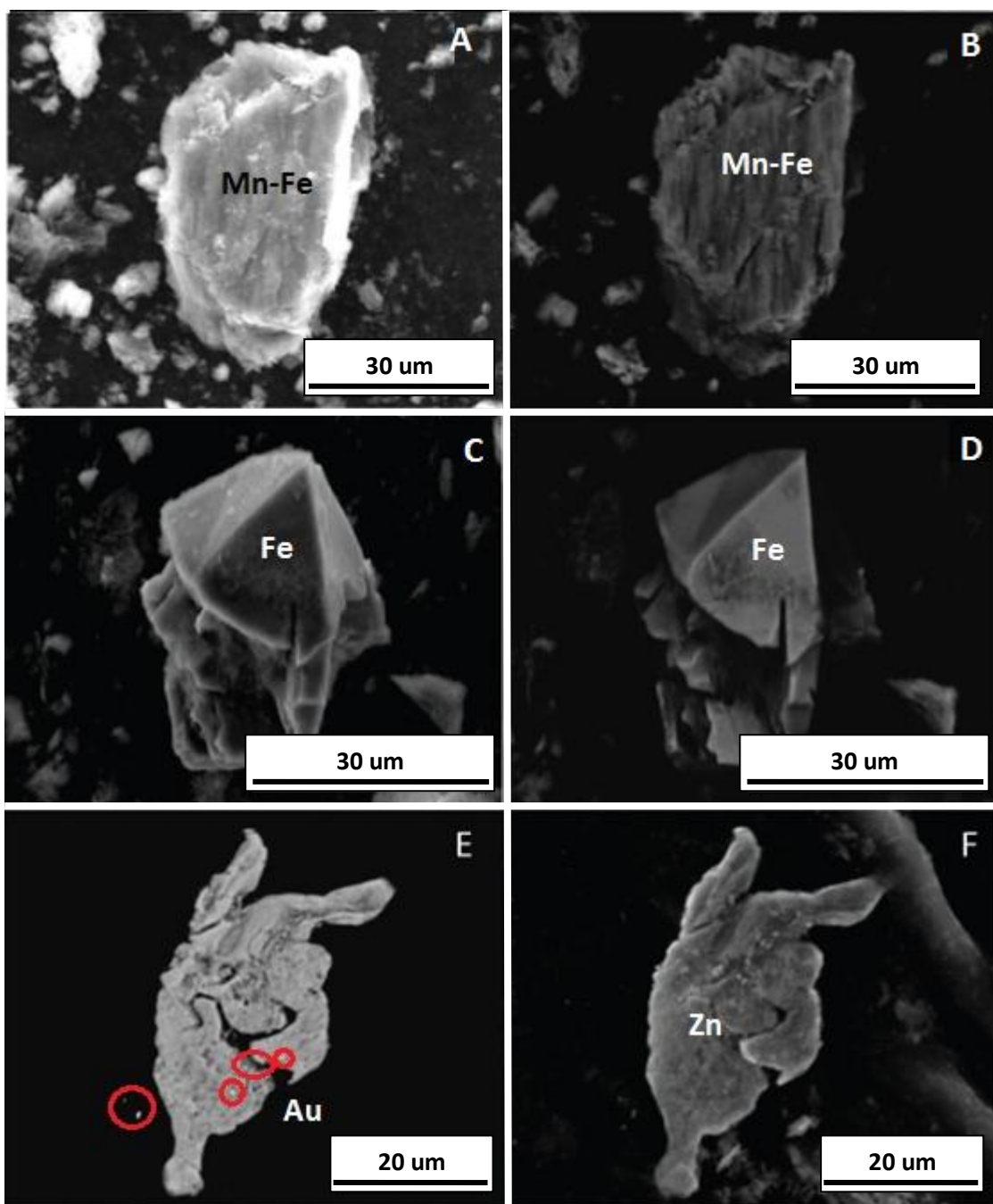


Figura 18. Sobre cada cristal se ha puesto el elemento mayoritario detectado en los espectros EDS. A y B, Cristal con Er (ETD y BSED respectivamente). C y D, Cristal euhedral de Fe (ETD y BSED respectivamente). E y F, Cristal de Zn con Au (BSED y ETD respectivamente).

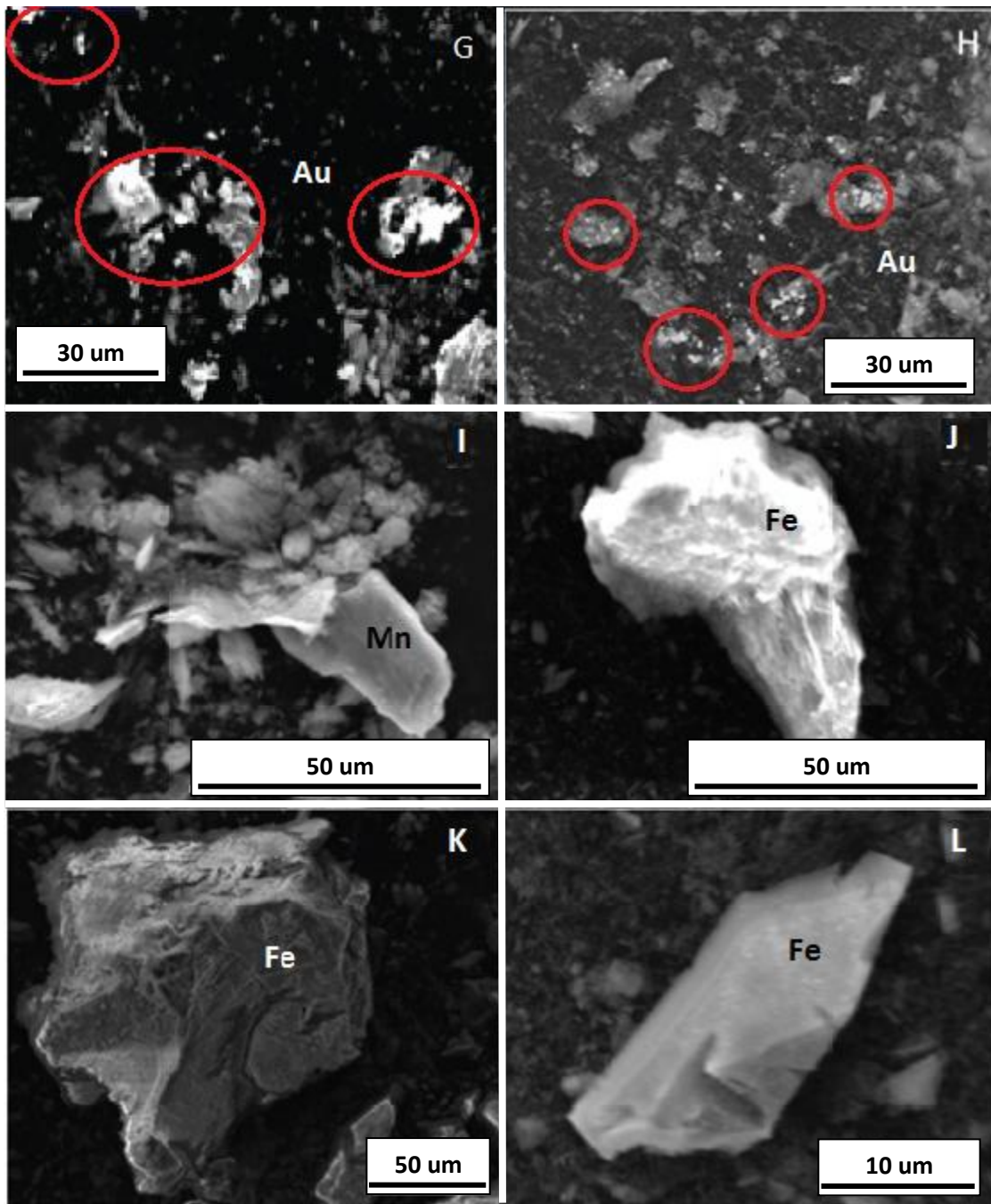


Figura 18. (Continuación). G y H, Cristales de oro muestra CAM16S-5 (BSED). I y J, Cristales de morfología anhedral (ETD). K Cristal subhedral (ETD) y L, Cristal euhedral (ETD).

4.3 Análisis de agua

4.3.1 Parámetros *in situ*

La Tabla 5 muestra los valores de pH, Eh, conductividad eléctrica y temperatura asociados tomados en terreno a partir de dos muestras de agua representativas ubicadas en los alrededores de la laterita de Camán.

Tabla 5. Parámetros termodinámicos de las muestras de agua de la localidad de Camán.

Muestra	C.E. (uS/cm)	T (°C)	pH	Eh (mV)
Muestra 1	20.14	14.7	5.9	241.7
Muestra 2	61.0	22.1	7.22	163.5

La muestra 1, tomada desde un arroyo superficial que pasa por el borde de la laterita presenta condiciones oxidantes y ligeramente ácidas. La muestra 2 fue tomada desde la llave de una casa aledaña a la laterita, y su proveniencia es cerro arriba desde el lugar de toma de muestra, con una etapa intermedia de almacenamiento en un contenedor metálico desde donde es distribuida para su posterior consumo. Esta muestra presenta condiciones oxidantes pero levemente alcalinas, a diferencia de la muestra 1. Los valores de conductividad de ambas muestras indican que están muy débilmente mineralizadas, en particular la muestra 1.

4.3.2 Geoquímica de aguas

A partir de los análisis de agua (anexo 2) podemos ver que las mayores concentraciones son de los iones Cl^- y el K^+ con concentraciones de 17 y 16 ppm respectivamente. Los iones HCO_3^- , Na^+ , Mg^{+2} y NO_3^{-2} son los que siguen al K y el Cl alcanzando concentraciones de 2.4 ppm, 1.72 ppm, 1.31 ppm y 1.03 ppm respectivamente. Otros iones importantes para este estudio son el Al (7.3 ppb), Fe (5.9 ppb), Mn (4.7 ppb) y Ni (3.6 ppb). Para el caso de la muestra 2, K y Cl son nuevamente los iones con mayor concentración, con 28.2 y 21.3 ppm respectivamente, seguido por HCO_3^- con 9.7 ppm, Na (1.94 ppm), Mg (1.95 ppm) y Ca (1.46 ppm). Algunos metales con altas concentraciones relativas son el Fe (17.5 ppb), Al (15.6 ppb), Zn (15 ppb), Ag (9.2 ppb) y Cu (5.45 ppb). En ambas muestras se detectaron valores de Pd de 15 ppt, y en la muestra 2 se detectaron 0.6 ppt de Pt.

5 Discusión

5.1 Horizontes del perfil laterítico de Camán

A partir de las tendencias de los diferentes elementos analizados, parámetros texturales y mineralógicos es posible establecer los siguientes subhorizontes dentro del perfil laterítico de Camán (Figura 19): (1) saprolítico (muestras CAM16S-1 y CAM16S-2), (2) limonítico inferior (muestras CAM16S-4 y CAM16S-5) y (3) limonítico superior (muestra CAM16S-3).

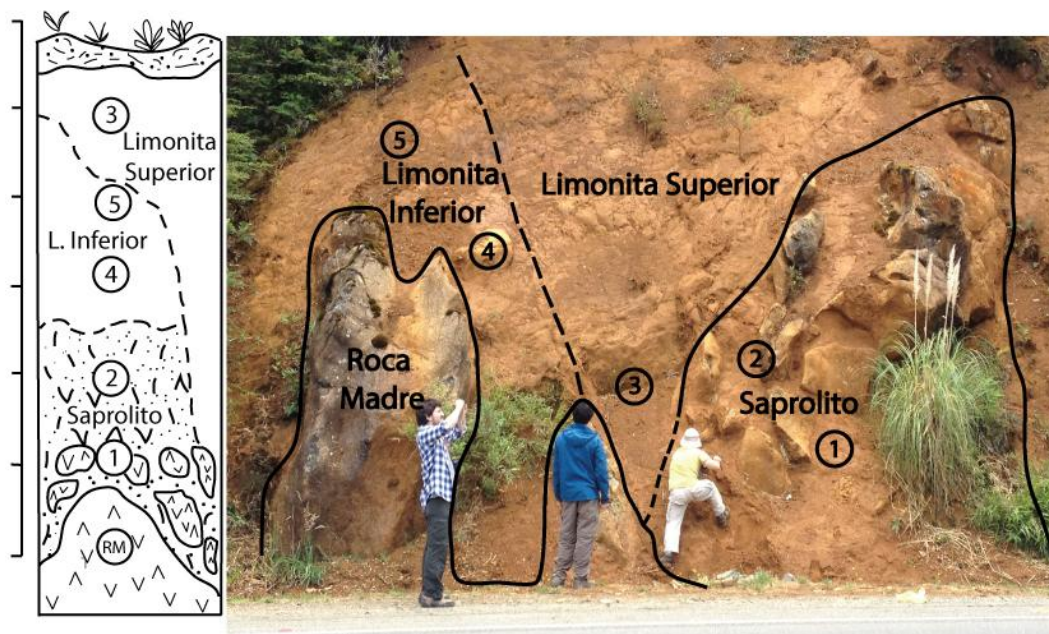


Figura 19. Subdivisión del perfil laterítico de Camán (derecha). A la izquierda se muestra una columna esquemática con el orden de las muestras tomadas en terreno, que en ambos casos se encuentran en círculos numerados. La línea punteada indica contacto inferido.

El horizonte saprolítico se caracteriza por la presencia de fragmentos de roca disgregada y por mineralogía relictas (antigorita) de hábito hojoso, mineral predominante en la roca madre. Esto se expresa en los contenidos de roca total por una mayor concentración de sílice y las menores concentraciones de hierro y otros metales de transición como níquel, cromo y manganeso, además de las menores concentraciones de EGP y Au (Figuras 7, 11 y 14).

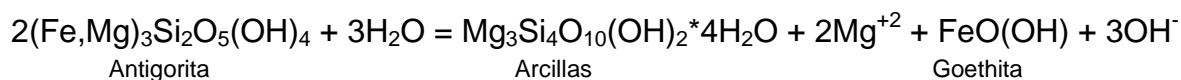
El horizonte limonítico inferior queda definido por una disminución drástica de minerales macroscópicos relictos respecto del horizonte saprolítico, siendo predominante la fase pelítica (mayor a un 80 % en algunos casos). Se diferencia del anterior por un fuerte aumento en hierro, metales de transición y EGP así como de contenidos mucho menores de sílice y titanio (Figuras 7 y 11); los patrones de tierras raras de esta zona también son opuestos a lo observado en el horizonte anterior (Figura 13).

El horizonte limonítico superior presenta la misma textura que el horizonte limonítico inferior, aunque mayores concentraciones de EGP y Ni además de presentar el mínimo en la concentración de Al. Este horizonte además presenta un patrón de tierras raras con anomalías opuestas a la zona limonítica inferior, lo que lo distingue de este último.

5.2 Formación del suelo laterítico

El perfil laterítico de Camán presenta un incremento progresivo de Fe, Ni, Co, Cr y Mn y una disminución en Si, Al y Mg, desde el horizonte saprolítico hasta el horizonte limonítico. En los diagramas ternarios de las figuras 8, 9 y 10 se observa el incremento de Fe y pérdida de Si, Mg y Al desde la roca madre hacia la laterita, y dentro de la laterita desde el saprolito al horizonte limonítico superior, además del incremento del índice de alteración, lo que sugiere un alto grado de madurez del perfil de Camán, producto de una meteorización intensa. Los altos contenidos de Fe en nuestro suelo nos permite definirlo como una laterita. La distribución desigual que se observa entre los diferentes elementos (Figuras 7 y 11) se debe a la movilidad diferencial que tiene cada uno de ellos durante el proceso de laterización, lo cual dependerá de sus afinidades geoquímicas y capacidad de formar minerales bajo las nuevas condiciones (Zarasvandi *et.al.*, 2010). Así, algunos metales se enriquecerán de forma residual o secundaria, mientras que elementos como Si, Mg y Al serán lixiviados.

La distribución de los elementos anteriormente reseñada se ve reflejada en variaciones mineralógicas dentro del perfil, las cuales pueden ser interpretadas como cambios en las condiciones de Eh y pH (Gray *et.al.*, 1996). El saprolito, generado por la disgregación mecánica durante las fases iniciales de la meteorización, presenta silicatos relictos de la roca madre (principalmente antigorita, bastitas y en menor medida talco) que generan la mayor concentración de sílice. Además, la disgregación producto de la meteorización se observa en la presencia de zircones en el saprolito, marcados por un alza en las concentraciones de Zr y Hf, las cuales no se encuentran en el horizonte limonítico. En el horizonte limonítico inferior, existe un aumento en la concentración de Fe y Ce, disminución del Si y Al y un cambio en la anomalía de Ce de negativa a positiva. Estos cambios pueden interpretarse como un cambio a condiciones más oxidantes y ácidas, lo que causa la disolución de los silicatos (por hidrólisis ácida) en particular de la antigorita, lo que genera arcillas, hidróxidos de hierro y liberación en solución de elementos como el Mg^{+2} , lo que se observa en la siguiente reacción (Gallardo, 2008).

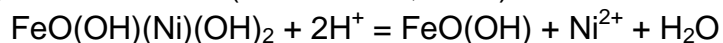


Durante el desarrollo de esta reacción el Fe^{+2} de la antigorita puede entrar en solución dando lugar, cuando las condiciones son relativamente más oxidantes, a Fe^{+3} (estado más estable), el cual es fijado en forma de goethita o hematita (Nahon y Tardy,

1985). Dicho cambio de condiciones queda demostrado en nuestro caso por el fuerte aumento de la concentración de Fe de hasta en un 10% en peso por encima del horizonte saprolítico. Esta diferencia en la concentración del Fe refleja su naturaleza ligeramente móvil y dependiente de las condiciones redox (Aiglsperger, 2011, 2016). Asimismo, las anomalías positivas de Ce sobre este nivel y el aumento en las concentraciones de Ce en la muestra CAM16S-4, también indicarían un cambio relativo de condiciones reductoras a oxidantes (paso de Ce^{+3} a Ce^{+4} , más estable) (Eliopoulos, 2000, Braun *et.al.*, 1990).

Dentro del horizonte limonítico (sobre la muestra CAM16S-4) dominan los óxidos e hidróxidos de Fe y los silicatos mayoritarios pasan a ser arcillas del grupo de la clorita, esmectita y caolinita. Ambos grupos de minerales tienen una alta capacidad de adsorción de otros elementos como Ni, Co, Mn, Cr y tierras raras (Traore *et.al.*, 2008a, Calagari *et.al.*, 2015), lo cual ayudó al enriquecimiento de estos en los horizontes superiores. Lo anterior se observa en la alta correlación de Fe con el resto de los metales y por pequeñas concentraciones de los mismos en cristales de goethita detectados en SEM.

Una segunda frontera redox se identifica hacia el techo del perfil entre las muestras CAM16S-5 y CAM16S-3 (paso de la limonita inferior a la superior), la cual queda definida por una fuerte anomalía negativa en Ce. Dicha frontera puede explicarse por un ambiente localmente más ácido y reductor, muy probablemente debido a la acción de fluidos húmicos derivados de la descomposición de la materia orgánica. En esta frontera se encuentran las mayores concentraciones de metales nobles, lo cual indica el efecto fijador que tienen los fluidos reductores (Reith *et.al.*, 2010, 2014, 2016). La disminución del pH por encima del horizonte limonítico inferior representado por la muestra CAM16S-5 habría sido también responsable de la liberación del Ni, explicando las menores concentraciones de este elemento en la muestra CAM16S-5 en comparación con la muestra CAM16S-3. El Ni retenido en la goethita por reemplazo isomórfico (Ni^{+2} por Fe^{+3} , hasta en 75%, Trivedi y Axe, 2001) es liberado en ambiente ácido, según la siguiente reacción (Dublet *et.al.*, 2015):



La liberación de Ni y otros metales como Co y Mn de este horizonte del perfil puede estar marcando además el límite inferior de influencia de las aguas meteóricas percolantes: la menor presencia de agua en este nivel haría que la goethita pasara a hematita (no hidratada) la cual posee menor capacidad de retención de minerales por adsorción (Tardy y Nahon, 1985, Proenza, 2015.). El Ni liberado producto de esto puede ser adsorbido en horizontes inferiores por otros cristales de goethita o por cristales de antigorita (reemplazo de Mg por Ni debido a radios similares), constituyendo antigorita niquelífera $(\text{Mg,Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Proenza 2015, Gallardo *et.al.*, 2010, Marsh *et.al.*, 2010). La fuente primaria de Ni en la peridotita serpentinizada es la antigorita, y

previo al proceso de serpentización sufrido por esta el Ni se encontraba en olivinos, mineral que representa la mayor fuente de Ni en el manto.

Las condiciones generales ácidas del perfil pueden inferirse a partir de la razón La/Y (Crinic y Jurkovic, 1990) cuyo valor es menor a 1 en todas las muestras (anexo 5).

5.3 Enriquecimiento en elementos críticos

5.3.1 Metales nobles

Los EGP han sido considerados tradicionalmente como elementos inertes, no obstante un gran número de trabajos recientes han demostrado que éstos pueden llegar a ser movilizados y reconcentrados durante los procesos supérgenos (Augé *et.al.*, 1995, Traoré *et al.*, 2006, Proenza *et.a.*, 2008a, 2008b, Aiglsperger *et.al.*, 2014). En el caso de algunos suelos lateríticos desarrollados a partir de rocas ultramáfica ha quedado demostrado la formación de horizontes particularmente enriquecidos en estos elementos (Bowles, 1986, Bao *et.al.*, 2004, Traoré *et.al.*, 2006, Ndjigui y Bilong., 2010, Aiglsperger *et.al.*, 2015). En el perfil laterítico de Camán existe un incremento progresivo de los contenidos de EGP y Au desde la base del perfil al techo que se correlaciona directamente con el incremento del contenido de Fe y con el incremento de minerales como goethita. Esta observación indica un mecanismo muy efectivo de enriquecimiento de metales nobles asociado al desarrollo del suelo laterítico, el cual durante la lixiviación de la roca madre generó la concentración residual de EGP en el techo del perfil y una deposición en menores concentraciones en los horizontes más bajos, pero aun así, en mayor contenido que la roca madre. Los patrones de difracción de rayos X muestran la presencia de minerales del grupo del platino en el techo del perfil. Los cristales de laurita típicamente se forman en condiciones magmáticas lo que sugiere una dispersión por procesos mecánicos de los minerales del grupo del platino (MGP) originalmente presentes en la serpentinita. Durante los estadios iniciales del desarrollo del perfil, la interacción de fluidos con la roca madre produce una disgregación mecánica que resulta en la degradación de los cristales de cromita y otros minerales portadores de EGP eventualmente presentes en ella. En una etapa más avanzada de ataque químico, los cristales de cromita son progresivamente disueltos a la vez que los MGP, lo que resulta en la puesta en solución de los metales nobles que ante cambios en las condiciones redox pueden ser fijados durante la precipitación de los óxidos e hidróxidos que se encuentran presente en todo el perfil (Wimpeny *et.al.*, 2007). Esto puede explicar la correlación positiva que se observa de base a techo de perfil entre EGP, Cr y Fe. Dicho transporte de los EGP se produce en forma de complejos clorurados, hidroxidados, bisulfurados u orgánicos (Bowles, 1986, Bao *et.al.*, 2004, Robb, 2005). En el perfil de Camán se tiene prueba de todos ellos, ya que los espectros EDS obtenidos en SEM arrojan cantidades no menores de Cl y C en cristales de óxidos e hidróxidos de hierro, este último, rico en complejo OH. Algunos autores han sugerido que durante el desarrollo de los suelos lateríticos, este proceso de

movilización de los EGP tiene lugar en condiciones Eh de entre 0.3 y 1.11 y de pH de entre 3 y 7 (Wimpenny *et.al.*, 2007, Ndjigui y Bilong, 2010 y Suarez *et.al.*, 2010), condiciones que se dan hasta el día de hoy en el agua de escorrentía circundante a la laterita (pH= 5.9, Eh=0.24 mv), la cual logra disolver pequeñas cantidades de Pd desde la roca (15ppt) (anexo 2). Por otro lado, la fijación de los EGP en los horizontes superiores del perfil puede tener lugar en forma de nanopartículas o en solución sólida en las estructuras de las arcillas, óxidos e hidróxidos de hierro (Ndjigui y Bilong, 2010) en condiciones reductoras (Aiglsperger *et.al.*, 2014, 2015, Eliopoulos y Economou Eliopoulos, 2000). Esta interpretación es consistente con la correlación positiva que existe desde la base hacia el techo del perfil entre EGP y Fe (anexo 4) (Travis *et.al.*, 1976).

Sin embargo, y a pesar del enriquecimiento global de EGP que se observa desde la base hacia la zona superior del perfil, dicho enriquecimiento no es homogéneo para todos los EGP. Utilizando la razón de EGP/Pt (anexo 6) se puede advertir un grado de movilidad diferente para cada uno de los EGP (Barnes *et.al.*, 1985, LeBlanc, 1991, Augé *et.al.*, 1995, Bowles, 1995 y Ndjigui y Bilong, 2010). A partir de los valores de estas razones es posible establecer un comportamiento similar entre Ir, Os, Pd y Rh (todos muestran razones con respecto al Pt mayores a 1) y diferente al Ru el que presenta una razón Pt/Ru menor a 1. Tomando ambos hechos, es posible establecer que tanto Os, Ir, Rh y Pd son más móviles que el Pt, al contrario del Ru que sería menos móvil que Pt, lo que ha sido reportado por Ndjigui *et.al.*, 2008 y Aiglsperger *et.al.*, 2015. Este tópico ha sido abordado por Traore *et.al.*, 2006, quienes afirman que a pesar de que la movilidad de los EGP es diferencial, aún existe mucho debate al respecto. Esta movilidad diferencial evidencia diferentes capacidades de los EGP para entrar en solución al momento de la meteorización (Gray *et.al.*, 1996). Así las menores concentraciones de Pd con respecto a Pt se deben a que este último es más soluble y además precipita antes que el Pd dentro de las estructuras de los óxidos e hidróxidos de Fe, debido a la mayor estabilidad de sus complejos en solución (Robb, 2005). Eliopoulos *et.al.*, 2000 reportan que el Pd es liberado desde la roca madre en condiciones avanzadas de la meteorización a diferencia del Pt que al ser más soluble es liberado antes. Además de esto, el Pd no presenta afinidad con el Fe sino que con fases minerales del Al (Gray *et.al.* 1996, Eliopoulos y Economou Eliopoulos, 2000) las que no han sido encontradas en el perfil, por lo que a diferencia del Pt no entrará en fases minerales.

La concentración de los EGP en la roca madre juega un rol directo en la distribución de estos dentro del perfil: los EGP con mayor concentración en la roca madre (Pd, Ru y Pt) son los de mayor concentración en la laterita, contrario a lo que ocurre con Rh, Ir y Os (Figura 14).

El caso del oro es muy similar al de los EGP: su disolución durante el ambiente supérgeno hace que entre en solución acuosa de la mano de complejos clorurado,

bisulfurados y orgánicos (Bao *et.al.*, 2004). Los complejos orgánicos además actúan como agentes de transporte y como biofijadores del oro en ambiente supérgeno como ha sido demostrado experimentalmente por Reith *et.al.*, 2010, 2014 y 2016. Cabral *et.al.*, 2011 afirman que la influencia de la materia orgánica sobre el Au en los procesos nombrados es más eficiente que en los EGP, más aún si el ambiente es polimetálico, como el caso de la laterita de Camán, lo que permite el crecimiento *in situ* de partículas de Au, como las encontradas dentro del perfil en el horizonte limonítico (muestras CAM16S-3 y CAM16S-5).

5.3.2 Tierras raras

La figura 12 muestra una clara disminución de los contenidos de tierras raras desde la base al techo del perfil (Maksimovic y Panto, 1991) con un fuerte enriquecimiento en la muestra CAM16S-2. Una posible interpretación es que estos elementos quedaron secuestrados en silicatos de la roca madre y no fueron removilizados durante el proceso de laterización, como por ejemplo en zircones. Otra alternativa es que dichos elementos fueran lixiviados desde la parte superior del perfil por fluidos ácidos durante la laterización y redepositados en los horizontes basales (Lottermoser, 1990, Ndjigui *et.al.*, 2008) y posteriormente atrapados por arcillas o minerales de hierro. Las menores concentraciones de HREE con respecto a las LREE y los valores de $(La/Yb)_N > 1$ sugieren un claro fraccionamiento debido a la movilidad diferencial de esos elementos en respuesta a cambios en las condiciones Eh-pH (Aiglsperger, 2016, Braun *et.al.*, 1990, Abedini *et.al.*, 2013, Ndjigui *et.al.*, 2008, Topp *et.al.*, 1985). Condiciones de pH ácidas y presencia de Zr en la muestra CAM16S-2 producen la disminución en la concentración de HREE frente a LREE (Nesbitt *et.al.* 1990).

5.4 Estimación de la interacción agua-roca en la formación del suelo

5.4.1 Especiación y modelamiento composicional del agua

A partir de los datos de química de agua, los parámetro *in situ* de cada muestra y utilizando el software PHREEQC se realizó la especiación para ambas muestras de agua para conocer la actividad de cada una de las especies disueltas y los índices de saturación con respecto a las distintas especies minerales. Se considerará que las muestras están en equilibrio cuando los valores de los índices de saturación están entre -0.05 y 0.05, sobresaturación para $SI > 0.05$ y subsaturación para $SI < -0.05$, según Merke y Planer-Friedrich, 2008.

El agua se encuentra sobresaturada con respecto a las fases oxidadas e hidroxidadas de metales como Fe, Al, Cr, Co y Mg, además de Ag en ambas muestras. Adicionalmente, se encuentra subsaturada y cercana al equilibrio con fases sulfatadas,

carbonatadas, oxidadas e hidroxidadas de metales de transición, además de Al, Mg, y Ag. Ambas muestras se encuentran sobresaturadas en Pd.

Se ha simulado las reacciones de equilibrio de interacción agua-roca considerando los minerales de las rocas precursoras de la laterita. Las simulaciones realizadas indican que ocurre un leve cambio en la química general del agua registrándose cambios en los moles de elementos disueltos. Las mayores diferencias sin embargo se han registrado en las condiciones de oxidación, pH y en la especiación. Para el caso de la muestra 1, tanto el pH como el pe aumentan de 5.9 a 8.46 y de 4.03 a 5.39 respectivamente. El agua está saturada con respecto a minerales de arcilla (del grupo de la serpentina, caolinita, illita y esmectita), óxidos e hidróxidos de hierro y cromo y en menor medida en carbonatos y Pd. Para el caso de la muestra 2 nuevamente hay un aumento en los valores de pH y pe, desde 7.22 a 8.26 y desde 2.76 a 5.31. Además de esto, el agua se satura con respecto a una mineralogía similar a la muestra 1: arcillas, óxidos e hidróxidos de Fe-Cr y Pd.

Con el fin de obtener un agua de composición similar a la medida en Camán se realizaron dos simulaciones a partir de agua de lluvia medida en la estación Calle Calle de la dirección general de aguas (DGA), ubicada a 20 km de la laterita de Camán. En la primera simulación se hizo reaccionar el agua de lluvia hasta alcanzar el equilibrio con los minerales presentes en la roca, obteniéndose un agua saturada en arcillas y óxidos de Fe, Mg, Al y Cr. Esta simulación no presenta mayores diferencias en la especiación con respecto al agua medida en Camán, pero si en los valores de pH y pe, siendo ambos valores siempre mayores a los medidos (tabla 6). En la segunda simulación se hizo reaccionar el agua de lluvia con la mineralogía presente en la especiación de cada una de las muestras de agua tomadas en Camán. El resultado fue una solución saturada en minerales oxidados de Fe y Cr y arcillas, pero con variaciones en los valores de pH y pe, donde nuevamente los valores de pH fueron mayores a los medidos, pero el pe de la muestra 1 resultó menor (tabla 6).

Tabla 6. Comparación de las variaciones de pH y pe para las muestras tomadas en terreno y las simuladas en PHREEQC.

		pH	pe
Medido	Muestra 1	5.9	4.085
	Muestra 2	7.22	2.763
Simulación 1	Muestra 1	8.57	4.448
	Muestra 2	8.57	4.448
Simulación 2	Muestra 1	6.78	3.249
	Muestra 2	6.361	4.216

Además de lo anterior es posible hacer una comparación de la composición de las aguas reales y simuladas. Si bien existen variaciones de hasta 4 órdenes de magnitud para los moles de algunos elementos, estas variaciones ocurren en el rango

de los 10^{-8} a los 10^{-12} moles, por lo que se consideran variaciones insignificantes. El detalle de las especiaciones, los equilibrios de las 2 simulaciones para cada muestra de agua, además de los datos químicos del agua de lluvia de Valdivia se encuentran disponibles en el anexo 10 y 11 respectivamente.

A partir de la especiación y equilibrio de fases del agua de Camán y simulaciones a partir del agua lluvia del sector se puede inferir que estas aguas son las responsables de la formación de la laterita de Camán. El agua de la zona es capaz de disolver los minerales de la roca madre y saturarse en los minerales constituyentes de la laterita, por lo que bajo las condiciones adecuadas estos minerales podrían comenzar a precipitar a partir del agua actual, generando el suelo laterítico. Lo mismo ocurre para las muestras de agua simuladas a partir del agua lluvia del sector. No obstante lo anterior, las condiciones de pH del agua de Camán tienden a ser alcalinas a levemente ácidas y la actividad de los elementos saturados es de pocos moles, por lo que si precipitaran los minerales constituyentes de la laterita, lo harían en pequeñas cantidades. Además de lo anterior es claro que la localidad de Camán presenta las condiciones de precipitación necesarias que aseguran un suministro abundante de agua para la lixiviación, abundante materia orgánica que facilita el mismo proceso, una roca madre adecuada y relieve moderado pero no las condiciones de temperatura necesarias para este proceso, las cuales no obstante debieron haber existido en el pasado para que se desarrollara la laterita. Teniendo las consideraciones recién expuestas queda demostrado que la laterita de Camán está en desarrollo actualmente debido a la interacción del agua del lugar con las peridotitas serpentinizadas de su base, por lo que no sería una laterita fósil como lo postularon Zamarsky *et.al.* 1973 sino que un suelo que está en desarrollo.

5.4.2 Modelamiento interacción agua-roca

Utilizando los valores de geoquímica del suelo, la roca y el agua es posible hacer una estimación del suelo generado y de la roca meteorizada, como fue explicado en los puntos 3.2.6 y 4.1.3. Al mezclar los valores de suelo generado y roca meteorizada y utilizando valores de densidad de peridotitas serpentinizadas y lateritas de la literatura (Ogunsanwo, 1989, Amadi *et.al.*, 2015 y McCrea *et.al.*, 1990, Deschanps, 2013) fue posible estimar un volumen de roca meteorizada y un volumen de suelo generado (anexo 12). Podemos asumir que tanto el ancho como el frente de la roca y la laterita son idénticos, por lo que podemos simplificar estos volúmenes y tomarlos como alturas (figura 20).

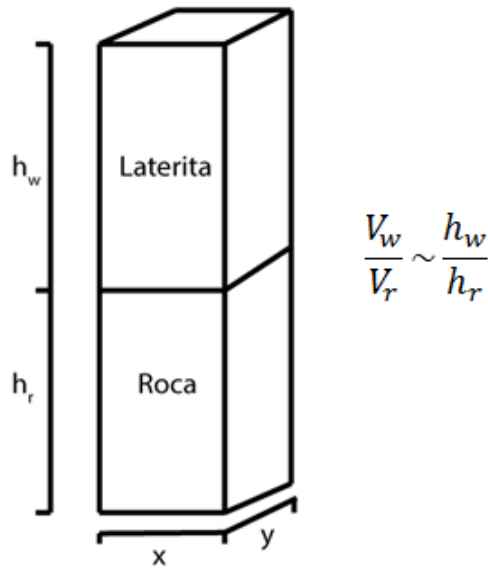


Figura 20. Simplificación del volumen de la laterita y roca por alturas.

Usando estas alturas de suelo generado y roca meteorizada podemos asumir un valor de 1m de laterita y obtener cuantos metros de roca fueron necesarios meteorizar para producirlo. Así, para el caso de la muestra 1 de agua, un metro de laterita sería generado a partir de la meteorización de 5.3 m de roca, mientras que para la muestra 2, un metro de laterita sería generado a partir de 5.38 m de peridotita serpentinizada. Por lo tanto, si los 7 metros actuales de laterita que se observan en Camán fueron generados a partir de la muestra de agua 1 se debió meteorizar una altura aproximada de 37.1 m de peridotita y si hubiese sido generada a partir de la muestra de agua 2 se debió meteorizar una altura de 37.66 m de roca. Es importante mencionar que estos valores son una aproximación de primer orden. El detalle de estos cálculos se encuentran en los anexos 7 y 12.

5.5 Otras implicancias acerca de la laterita de Camán

Si bien las concentraciones de elementos metálicos dentro del perfil no son tan altas como para considerarla un blanco económicamente rentable de explotación, las variaciones de elementos críticos (REE, EGP y Sc) que se observan en el perfil hacen de este un blanco atractivo para la exploración de estos elementos. En general, se considera que pueden llegar a ser económicamente rentables por la gran variedad de elementos concentrados en el mismo lugar y a la facilidad de extracción de los mismos, además de tener la ventaja de no contener grandes concentraciones de elementos potencialmente peligrosos y tóxicos durante la extracción como As, S, Hg o elementos radioactivos.

El caso de Camán sienta un precedente para el estudio y exploración futura de este tipo de suelos dentro de la zona centro sur de Chile, la cual como se mencionó al principio, presenta bastantes afloramientos de lateritas desarrolladas sobre rocas

ultramáficas, las cuales pueden ser exploradas y estudiado su potencial de concentración de metales críticos, que como se vio en este estudio no deja de ser interesante.

Finalmente, es posible comparar la composición química del agua de la laterita de Camán con la norma chilena de agua potable (Nch409/1 Of.2005) y observar que se encuentra por debajo de los límites máximos permitidos, por lo que a pesar de disolver minerales desde la roca y saturarse en minerales oxidados de metales como Cr, Fe o Ni, la interacción activa del agua con la laterita no representa un riesgo para la salud de las personas que consumen esta agua. Lo anterior queda reafirmado al observar la distribución del Cr, elemento presente en el agua, en la roca madre y en la laterita. Este elemento cuyo estado más tóxico para la salud es Cr⁺⁶ representa una mínima parte del Cr total disuelto en el agua, en el rango de los 10^{-24} a los 10^{-29} moles. Otros elementos nocivos para la salud reportados por la OMS como el Pb, As o Se también se encuentran en concentraciones varios órdenes de magnitud menores a los máximos permitidos.

6 Conclusiones

La laterita de Camán puede clasificarse como una laterita niquelífera, debido a sus altas concentraciones de Ni dentro de todo el perfil (superior a los 2500ppm en las zonas más pobres). Debido a la alta concentración de Fe con respecto a Al y Si la laterita de Camán se considera que tuvo un alto grado de laterización. Debido a la no variación de parámetros como la anomalía de Eu y la distribución análoga de tierras raras y otros elementos trazas inmóviles dentro del perfil, se considera que este proceso de laterización ocurrió *in situ*.

Los procesos supérgenos, responsables de la formación de la laterita de Camán, son capaces de redistribuir los elementos de formas particulares dependiendo de sus propiedades geoquímicas o de sus afinidades con ciertas fases minerales. Es así que algunos elementos serán fuertemente lixiviados al punto de desaparecer del ambiente (Si y Mg), otros serán levemente lixiviados y redistribuidos dentro del perfil en menores concentraciones (Al, Ti) y otros serán enriquecidos en varios órdenes de magnitud (Fe, Ni, Cr, EGP y tierras raras).

El proceso de adsorción es muy eficiente en la concentración de elementos metálicos con afinidad al hierro, causando un enriquecimiento secundario de estos elementos al atraparlos desde soluciones acuosas, impidiendo así que sean lixiviados del sistema.

El grado de enriquecimiento de elementos como EGP, tierras raras y metales de transición dependerá fuertemente de la concentración inicial de estos elementos en la roca madre (en general los elementos con menores concentraciones iniciales poseen menores concentraciones en la laterita, a pesar de haber sido enriquecidos), variaciones en las condiciones de oxidación (las que promoverán la deposición de elemento por el cambio en sus valores de valencia), variaciones en las condiciones de pH (las cuales promoverán la disolución y paso a solución de los elementos para que sean transportados) y la presencia de materia orgánica y actividad microbiana (la que facilitará la fijación de elementos metálicos, además de ser un factor controlador de las condiciones Eh-pH).

Los principales procesos que llevan al enriquecimiento de elementos metálicos dentro del perfil laterítico de Camán son la lixiviación producto de la meteorización ocurrida durante la formación del suelo, transporte por medio de ligantes en solución y deposición dentro de fases minerales neoformadas.

Elementos sensibles a los cambios de oxidación o de pH ayudan a detectar condiciones existentes al momento de su deposición como la frentes de acción de la materia orgánica o aguas de percolación superficial. En particular, Fe y Ce resultan ser buenos indicadores de cambio, ya que variaciones en sus concentraciones son muy marcadas en los horizontes de meteorización.

La presencia de ligantes de distinta naturaleza es esencial para el transporte en solución de elementos como tierras raras, EGP y Au, cuya re deposición dependerá fuertemente de la estabilidad de estos complejos frente a las condiciones existentes en los diferentes horizontes del perfil, lo que determinara enriquecimientos diferenciales dentro del mismo. En este estudio puede concluirse que los complejos de mayor importancia tanto para el transporte como para la fijación de elementos de interés son los complejos clorurados y los complejos orgánicos.

Los EGP, considerados inertes, presentan un enriquecimiento residual debido a la lixiviación de otros elementos y además presentan movilidad dentro de perfil, enriqueciéndose fuertemente con respecto a la roca madre, distribuyéndose y re depositándose de forma diferencial dentro del perfil en horizontes cuyas condiciones de Eh y pH fueran más adecuadas (ácidas y reductoras). Además se demuestra que existe una movilidad diferencial entre los EGP, la que dependerá de la capacidad de estos de entrar en solución y posteriormente de entrar en la estructura de minerales formados durante el proceso de laterización.

La ayuda de *software* especializado como PRHEEQC permiten la especiación y el cálculo de simulaciones en diferentes condiciones para las aguas del lugar. Así, se ha podido determinar que éstas, bajo las condiciones actuales, no están dentro del campo de la laterización, pero que por su alta saturación con respecto a minerales presentes en el suelo y su alta capacidad de interacción con la roca madre pueden ser las responsables de la formación de la laterita de Camán en la actualidad, por lo que no sería un suelo fósil como fue postulado por Zamarsky et.al. 1973. Además fue posible establecer que a pesar de la interacción entre el agua y el suelo, y a la presencia de metales potencialmente nocivos dentro de la laterita, la interacción agua-roca-laterita no representa riesgos ambientales ni para la salud de las personas que consumen el agua del sector.

Bibliografía

- Abedini, A., Calagary, A. (2013). Rare Earth Elements Geochemistry of Sheikh-Marut Laterite Deposit, NW Mahabad, West-Azarbaidjan Province, Iran. *ACTA GEOLOGICA SINICA*, 87, 176-185.
- Aguirre, L.; Hervé, F.; Godoy, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile, an outline. *Krystalinikum*, 9, 7-19.
- Aiglsperger, T., Proenza, J., Labrador, M. (2011) Geochemistry and Mineralogy of PGE in the Falcondo Ni-laterite Deposits, Dominican Republic. 11th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits (SGA), At Antofagasta (Chile).
- Aiglsperger, T., Proenza, J., Lewis, J., Longo, F. (2014). Is Microbial Activity Causing PGM Neoformation in Ni-Laterites? Evidence from Falcondo (Dominican Republic). *Revista de la sociedad española de mineralogía macla* n° 19.
- Aiglsperger, T., Proenza, J., Zaccarini, F., Lewis, J., Garuti, G., Labrador, M., Longo, F. (2015) Platinum group minerals (PGM) in the Falcondo Ni-laterite deposit, Loma Caribe peridotite (Dominican Republic). *Mineralium Deposita*, 50, 105–123.
- Aiglsperger, T., Proenza, J., Lewis, Labrador, M., Svojtka, M., Rojas-Purón, A., Longo, F., Durisova, J. (2016). Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Reviews*, 73, 127-147.
- Aleva, G. (1994). Laterites: concepts, geology, morphology and chemistry. *ISRIC - World Soil Information, European Commission*. 179 páginas.
- Alfaro, G. (1980). Antecedentes preliminares sobre la composición y génesis de las cromitas de La Cabaña (Cautín). *Revista Geológica de Chile*, 11, 29-41.
- Alfaro, G. (1982). Distribución de la mineralización de la Cordillera de la Costa entre los 38° y 40° latitud sur. *Congreso Geológico Chileno*, 3., 38-59.
- Alvarez, O. (1970). Estudio geológico de los yacimientos de hierro de la Cordillera de Nahuelbuta. *Memoria de Título (Inédito)*, 122.
- Amadi, A., Akande, W., Okunlola, I., Jimoh, M. (2015). Assessment of the Geotechnical Properties of Lateritic Soils in Minna, North Central Nigeria for Road design and Construction. *American Journal of Mining and Metallurgy*, 3 (1), 15-20.
- Augé T, Legendre O (1995) Platinum-group element oxides from the Pirogues ophiolitic mineralization, New Caledonia; origin and significance. *Econ Geol*, 89, 1454–1468.

- Babechuka, M., Widdowson, M., Kamber, B. (2014). Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chemical Geology*, 363, 56–75.
- Bao, Z., Zhao, H., Guha, J., Williams-Jones, A. (2004). HFSE, REE, and PGE geochemistry of three sedimentary rock-hosted disseminated gold deposits in southwestern Guizhou Province, China. *Geochemical Journal*, 38, 363-381.
- Barnes, S., Naldrett, A., Gorton, M. (1985). The origin of the fractionation of platinum group elements in terrestrial magmas., *Chem. Geol.*, 53, 303-323.
- Barra, F., Rabbia, O., Alfaro, G., Miller, H., Höfer, C., Kraus, S. (1998). Serpentinitas y cromititas de la Cabaña. *Revista geológica de Chile*, 25, n°1.
- Berger, V., Singer, D., Bliss, J., Moring, B. (2011). Ni-Co laterite deposits of the world: Database and grade and tonnage models: U.S. Geological Survey Open File Report, 26, 2011-1058.
- Bowles, J. (1986). The development of platinum-group minerals in laterites. *Economic Geology*, 81, 1278-1285.
- Bowles JFW (1995) The development of platinum-group minerals (PGM) in laterites: mineral morphology. *Chron Rech Min*, 520, 55–63.
- Braun, J., Pagel, M., Muller, J., Bilong, P., Michard, A., Guillet, B (1990). Cerium anomalies in lateritic profiles. *Geochimica et Cosmochimica*, 54, 781-795.
- Brüggen, J (1950). *Fundamentos de la Geología de Chile*. Instituto Geográfico Militar: 374.
- Buchanan, F. (1807). A journey from Madras through the countries of Mysore, Canara and Malabar. *Universitätsbibliothek Heidelberg*, 2, 1-86.
- Cabral, A.R., Radtke, M., Munnik, F., Lehmann, B., Reinholz, U., Riesemeier, H., Tupinamba, M., Kwitko-Ribeiro, R., (2011). Iodine in alluvial platinum-palladium nuggets: Evidence for biogenic precious-metal fixation. *Chem. Geol.* 281, 125–132.
- Calagari, A., Farahani, F., Abedini, A. (2015). Geochemical characteristics of a laterite: the Jurassic Zan deposit, Iran. *Acta Geodyn. Geomater.*, 12, 67-77.
- Crinci, J., and Jurkovic, (1990). Rare earth elements in Triassic bauxites of Croatia Yugoslavia. *Travaux*, 19, 239-248.
- Deschamps, A., Godard, M., Guillot, S., Hattori, K. (2013). Geochemistry of subduction zone serpentinites: A review. *Lithos*, 178, 96-127.

- Díaz, L.; Vivallo, W.; Alfaro, G.; Cisternas, M.E. (1988). Geoquímica de los esquistos paleozoicos de Bahía Mansa, Osorno, Chile. *In Congreso Geológico Chileno*, 5, 75-96.
- Dublet, G., Juillot, F., Morin, M., Fritsch, E., Fandeur, D., Brown jr, G.E. (2015). Goethite again explain Ni depletion in upper units of ultramafic lateritic ores from New Caledonia. *Geoch. Cosmoch*, 160, 1-15.
- Duhart, p., McDonough, M., Muñoz, J., Martin, M., Villeneuve, M. (2001). El complejo metamórfico Bahía Mansa en la cordillera de la costa del centro sur de Chile. *Revista geológica de Chile*, 28.
- Eggleton, T., Taylor, G. (1999). Selected thoughts on laterite. *Proceedings of the Third National Regolith Conference*, 209-226.
- Eliopoulos, D., Economou-Eliopoulos, M. (2000). Geochemical and mineralogical characteristics of Fe–Ni and bauxitic-laterite deposits of Greece. *Ore Geology Reviews*, 16, 41-58.
- Gallardo Alonso, T. (2008). Caracterización mineralógica del perfil laterítico de Ni de Loma Ortega. *República Dominicana*, 1-95.
- Gallardo, T., Tauler, E., Proenza, J., Lewis, J., Galí, S., Labrador, M., Longo, F., Bloise, G. (2010). Geology, Mineralogy and Geochemistry of the Loma Ortega Ni Laterite Deposit, Dominican Republic (2010). *Revista de la sociedad española de mineralogía macla* nº 13.
- Glodny, J.; Echtler, H.P.; Collao, S.; Ardiles, M.; Buron, P.; Figueroa, O. (2008). Differential Late Paleozoic active margin evolution in south-central Chile (37°-40°S) -the Lanalhue Fault Zone. *Journal of South American Earth Sciences*, 26, 397-411.
- Godoy, E. (1979). Metabasitas del basamento metamórfico chileno: nuevos datos geoquímicos. *In Congreso Geológico Chileno*, 2, 133-148.
- González-Bonorino, F. (1970). Series Metamórficas del basamento cristalino de la Cordillera de la Costa de Chile Central. *Universidad de Chile, Departamento de geología*, 37,1-81.
- Gray, D., Schorin, K., Butt, C. (1996). Mineral associations of platinum and palladium in lateritic regolith, Ora Banda Sill, Western Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 57, 245-255.
- Hervé, F. (1974). Petrology of the cristalline basement of Nahuelbuta Mountains, South-Central Chile. *Ph.D. Thesis (Unpublished)*, 86.
- Hervé, F., (1977). Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, Southcentral Chile. *In: Ishikawa, T., Aguirre, L. (Eds.), Comparative studies on*

the geology of the Circum Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile. : Japan Society for the Promotion of Science. Japan Society for the Advancement of Science, Tokyo, 1–51.

- Hervé, F. (1988). Late Paleozoic subduction and accretion in southern Chile. *Episodes*, 11, 183-188.
- Hervé, F., Pankhurst, R., Brook, M., Alfaro, G., Frutos, J., Miller, H., . . . Amstutz, G. (1990). Rb-Sr and Sm-Nd data from some massive sulfide occurrences in the Metamorphic Basement of south-central Chile. *In Stratabound Ore Deposits in the Andes (Fontboté, L.; Amstutz, G.C.; Cardozo, M.; Cedillo, E.; Frutos, J.; editors)*. Springer-Verlag, 221-228.
- Höfer, C., Kraus, S., Miller, H., Alfaro, G., & Barra, F. (2001). Chromite-bearing serpentinite bodies within an arc-backarc metamorphic complex near La Cabaña, south Chilean Coastal Cordillera. *Journal of South American Earth Sciences*, 14, 113-126.
- Illies, H. (1960). Geologie der Gegend von Valdivia, Chile. *Neues Jahrbuch Geologie und Palaöntologie Abhandlungen*, 111, 30-110.
- Illies, H. (1970). Geología de los alrededores de Valdivia y volcanismo y tectónica en márgenes del Pacífico de Chile Meridional. Instituto de Geología y Geografía, Universidad Austral de Chile: 64 p.
- Leblanc, M. (1991). Platinum group elements and gold in ophiolitic complexes: distribution and fractionation from mantle to oceanic floor. *Ophiolite genesis and evolution of the oceanic lithosphere*, 231-260.
- Leeder, M. (1999). *Sedimentology and Sedimentary Basins from Turbulence to Tectonics*. University of Leeds. 581 páginas.
- Lottermoser, B. (1990). Rare-earth element mineralisation within the Mt. Weld arbonatite laterite, Western Australia. *Lithos*, 24, 151-167.
- Luzio, W. (2001). Inceptisols from coastal cordillera in the X Region, Chile (40°15' - 40°00'). *R.C. Suelo Nutr. Veg.*, 1, n°2.
- Maksimovic, Z., Panto, G, (1991). Contribution to the geochemistry, of rare earth elements in the karst-bauxite deposits of Yugoslavia and Greece, *Geoderma*, 51, 93-109.
- Marsh, E., Anderson, E. (2010). Ni-Co laterite deposits: U.S. geological survey open file report 2011, 1259-1268.
- McDounough and Sun, (1995), The composition of earth, *Chemical geology*, 120, 223-253.
- McCrea, A., Anand, R., Gilkes, R. (1990). Mineralogical and physical properties of lateritic pallid zone materials developed from granite and dolerite. *Geoderma*, 47, 33-57.

- Merkel, B., Planer-Friedrich, B. (2008). *Groundwater Geochemistry A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems*. Springer. 218 p.
- Munizaga, F., Aguirre, L., & Hervé, F. (1973). Rb/Sr ages of rocks from the Chilean metamorphic basement. *Earth and Planetary Science Letters*, 18, 87-92.
- Munizaga, F., Hervé, F., Drake, R., Brook, M., Pankhurst, R., & Snelling, N. (1985). Geochronology of the granitoids: Chilean Lake region 38°-42° S. L., No. 35. *Universidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones*, 167-170.
- Munizaga, F.; Hervé, F.; Drake, R.; Pankhurst, R.J.; Brook, M.; Snelling, N. (1988). Geochronology of the Lake Region of South-Central Chile (39°-42°S): Preliminary results. *Journal of South American Earth Sciences*, 1, 309-316.
- Muñoz Cristi, J. (1931). Informe preliminar sobre los yacimientos platiníferos de Comau, Provincia de Chiloé. Unpublished report, Departamento de Minas y Petróleo, Santiago, Chile, 9 p.
- Nahon, D., Tardy, Y. (1985). Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hematite and Fe³⁺ kaolinite in bauxites and ferricretes: an approach to the mechanism of concretion formation. *American Journal of Science*, 25, 865-903.
- Ndjigui, P., Bilong, P. (2010) Platinum-group elements in the serpentinite lateritic mantles of the Kongo–Nkamouna ultramafic massif (Lomié region, South-East Cameroon). *Journal of Geochemical Exploration*, 107, 63-76.
- Ndjigui, P., Bilong, P., Bitom, M., Dia, A. (2008) Mobilization and redistribution of major and trace elements in two weathering profiles developed on serpentinites in the Lomié ultramafic complex, South-East Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 50, 305-328.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M. (1990) Formation and diagenesis of weathering profiles. *J. Geol.* 97, 129– 147.
- Ogunsanwo, O. (1989). Some properties of A sedimentary laterite soil as engineering construction material. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 10, 31-139.
- Orellana, F. (2016). Petrología de las rocas máficas y ultramáficas en la serie occidental del centro sur de Chile (39°- 40°s). *Memoria de Magister*. 93 p.
- Oyarzún, R., & Clemmey, H. (1985). Las mineralizaciones bandeadas de hierro y de sulfuros masivos estratoligados de la Cordillera de Nahuelbuta, Chile. *In Geología y Recursos Minerales de Chile (Frutos, J.; Oyarzún, R.; Pincheira, M.; editors)*. Editorial de la Universidad de Concepción, 2, 739-773.
- Pinochet, F., 1991. Los suelos forestales de la región del maule. *REVISTA "UNIVERSUM" Universidad de Talca*, 60-77.

- Proenza, J. (2015). Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en Yacimientos Lateríticos. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, macla nº 20.
- Proenza, J., Lewis, J., Galí, S., Tauler, E., Labrador, M., Melgarejo, J., Longo, F., Bloise, G. (2008a). Garnierite Mineralization from Falcondo Ni-Laterite Deposit (Dominican Republic). *Revista de la sociedad española de mineralogía* macla nº 9.
- Proenza, J., Zaccarini, F., Rudashevsky, N., Cabri, L., Garuti, G., Rudashevsky, V., Lewis, J., Longo, F., Galí, S., Labrador, M., Tauler, E., Bloise, G. (2008b) Platinum Group Minerals (PGM) in Ni-Laterites from Falcondo (Central Dominican Republic). *Revista de la sociedad española de mineralogía*, macla nº 9.
- Quinones, P. J., (1963). Compaction characteristics of tropically weathered soils. Unpublished Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois: 134 p.
- Reith, F., Fairbrother, L., Nolze, G., Wilhelmi, O., Clode, P., Gregg, A., Parsons, P., Wakelin, S., Pring, A., Hough, R., Southam G., Brugger, J. (2010). Nanoparticle factories: Biofilms hold the key to gold dispersion and nugget formation. *Geology*, 38, 843-846.
- Reith, F., Campbell, S., Ball, A., Pring, A., Southam, G. Platinum in Earth Surface Environments (2014). *Earth Science Reviews*, 131, 1-21.
- Reith, F., Zammit, C., Shar, S., Etschmann, B., Bottrill, R., Southam, G., Kilburn, M., Oberthür, T., Ball, S., Brugger, J. Biological role in the transformation of platinum-group mineral grains (2016). *NATURE GEOSCIENCE , LETTERS*, 9, 294-298.
- Robb, L., 2005. Introduction to ore-forming processes. Blackwe publishin. 385 páginas.
- Roberts, R. Y Diaz, C.1959. Los grandes grupos de suelos de Chile. *Agr. Tec. Chile*, 19, 1-36.
- Salazar, O., Casanova, M., Luzio, W., (2005). Correlation between world reference base and soil taxonomy for the soils from the 10th «los lagos» region of chile. *R.C.Suelo Nutr. Veg.*, 7, 14-21.
- Schellmann, W., (1983). A new definition of laterite. *Geol. Survey India Memoirs*, 120, 1-7.
- Suárez, S., Prichard, H., Velasco, F., Fisher, P., McDonald, I. (2010). Alteration of platinum-group minerals and dispersion of platinum-group elements during progressive weathering of the Aguablanca Ni–Cu deposit, SW Spain. *Mineralium Deposita*, 45, 331–350.
- Taylor, S., McLennan, S. (1985). The continental crust: Its composition and evolution. Oxford:Blackwell, 312.

- Topp, S., Salbu, B., Roaldset, E. (1984). Vertical distribution of trace elements in laterite soil (Suriname). *Chemical Geology*, 47, 159-174.
- Traore, D., Beauvais, A., Auge, T., Chabaux, F., Parisot, J., Cathelineau, M., Peiffert, C., Colin F. (2006). Platinum and palladium mobility in supergene environment: the residual origin of the Pirogues River mineralization, New Caledonia. *Journal of Geochemical Exploration*, 88, 350-354.
- Traoré, D., Beauvais, A., Chabaux, F., Peiffert, C., Parisot, J., Ambrosi, J., Colin, F. (2008a). Chemical and physical transfers in an ultramafic rock weathering profile: Part 1. Supergene dissolution of Pt-bearing chromite. *American mineralogist*, 93, 22-30.
- Traoré, D., Beauvais, A., Chabaux, F., Peiffert, C., Parisot, J., Ambrosi, J., Colin, F. (2008b). Chemical and physical transfers in an ultramafic rock weathering profile: Part 2: Dissolution vs. Accumulation of platinum group minerals. *American mineralogist*, 93, 31-38.
- Travis GA, Keays RR, Davison RM (1976) Palladium and iridium in the evaluation of nickel gossans in Western Australia. *Econ Geol*, 71, 1229–1243
- Trivedi, P., Axe, L., (2001). Predicting divalent metal sorption to hydrous Al, Fe and Mn oxides. *Environ.Sci Technol.*, 35, 1779-1784.
- Varajaoa, C., Colinb, F., Vieillardc, P., Mel, A., Nahone, D. (2000). Early weathering of palladium gold under lateritic conditions, Maquina Mine, Minas Gerais, Brazil. *Applied Geochemistry*, 15, 245-263.
- Vergara, L. (1970). Prospección de yacimientos de cromo y hierro en La Cabaña, Cautín. Memoria de Título. *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 96.
- Wakatsuki, T., Rasyidin, A. (1992). Rates of weathering and soil formation. *Geoderma*, 52, 251-263.
- Willner, A.P.; Thomson, S.N.; Kraner, A.; Wartho, J.A.; Wijbrans, J.R.; Hervé, F. (2005). Time markers for the evolution and exhumation history of a Late Palaeozoic paired metamorphic belt in North-Central Chile (34°-35°30'S). *Journal of Petrology*, 469, 1835-1858.
- Wimpenny, J., Gannoun, A., Burton, K., Widdowson, M., James, R., Gíslason, S. (2007). Rhenium and osmium isotope and elemental behaviour accompanying laterite formation in the Deccan region of India. *Earth and Planetary Science Letters*, Elsevier, 261, 239-258.
- Zamarsky, V., Conn, H., Tabak, M. (1973). Estudio geoquímico de los productos de intemperismo de las rocas ultrabásicas (serpentinitas) en la provincia de Valdivia, Chile. *Revista geológica de Chile*, 1, 81-102.

Zarasvandi, H., Zamanian, E., Hejazi. (2010). Immobile elements and mass changes geochemistry at Sar-Faryab bauxite deposit, Zagros Mountains, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 107, 77-85.

Anexos

Anexo 1.

Concentración de elementos mayores y traza de las 5 muestras del perfil de Camán.

	Concentración	CAM16S-1	CAM16S-2	CAM16S-3	CAM16S-4	CAM16S-5	L.D.
SiO ₂	wt%	14.6	19.6	7.5	8.5	5.3	0.01
Al ₂ O ₃	wt%	13.9	13.2	9.69	11.5	12.5	0.01
Fe ₂ O ₃	wt%	40.6	40.9	52.3	52.8	52.8	0.01
CaO	wt%	0.06	0.06	0.03	0.12	0.03	0.01
MgO	wt%	0.59	0.73	0.2	1.09	0.09	0.01
K ₂ O	wt%	0.03	0.03	0.03	0.07	0.03	0.01
Cr ₂ O ₃	wt%	1.87	1.6	2.5	2.03	2.61	0.01
TiO ₂	wt%	1.00	0.2	0.2	0.24	0.13	0.01
MnO	wt%	0.71	0.77	1.34	0.96	0.7	0.01
P ₂ O ₅	wt%	0.03	0.03	0.03	0.05	0.02	0.01
LOI	wt%	20.6	20.5	18	18.35	19.5	x
Total	wt%	93.99	97.5	91.7	95.75	93.7	x
As	ppm	12	21	16	27	23	5
Co	ppm	439	451	890	797	656	1
Cu	ppm	66	105	112	128	178	1
Li	ppm	10	10	10	10	10	1
Ni	ppm	3100	3650	6860	4600	2960	1
Pb	ppm	4	26	6	45	7	2
Sc	ppm	71	63	66	78	62	1
Zn	ppm	210	399	294	263	236	2
Ba	ppm	36	82.4	99.8	40.2	21.7	0.5
Cs	ppm	0.14	0.12	0.11	0.13	0.04	0.01
Ga	ppm	16.2	13.8	16.4	17.6	22.9	0.1
Hf	ppm	2	7.1	1.4	2.5	3.9	0.2
Nb	ppm	7.6	4.5	4.6	6.8	9.6	0.2
Rb	ppm	1	0.8	0.8	1.9	0.7	0.2
Sn	ppm	2	2	2	3	4	1
Sr	ppm	3.1	3.2	2.1	8.5	1.7	0.1
Ta	ppm	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	0.1
Th	ppm	0.66	1.05	1.2	1.43	2.81	0.05
U	ppm	0.3	0.54	0.4	0.5	0.7	0.05
W	ppm	2	2	5	2	3	1
Y	ppm	48.9	126	42.2	24	21.5	0.5
Zr	ppm	70	143	34	67	83	2

Anexo 2

Concentración de elementos mayores y traza de las 2 muestras de agua de Camán. Ambas muestras tomadas el 6 de enero del 2016.

		SSMA1	SSMA2	L.D.
Na	mg/L	1.7	1.9	0.05
K	mg/L	16	28.2	0.12
Ca	mg/L	0.6	1.5	0.2
Mg	mg/L	1.03	1.9	0.03
F	mg/L	0.11	0.15	0.05
Cl	mg/L	17	21.3	0.05
SO ₄	mg/L	0.7	0.78	0.05
NO ₃	mg/L	1.31	0.06	0.05
HCO ₃	mg/L	2.4	9.7	x
Li	ug/L	0.4	0.33	0.03
B	ug/L	3.55	4.3	0.04
Al	ug/L	7.3	15.6	0.9
Cr	ug/L	1.3	2.1	0.04
Fe	ug/L	5.9	17.5	1.7
Mn	ug/L	4.7	2.4	0.004
Co	ug/L	0.3	0.14	0.001
Ni	ug/L	3.6	3.5	0.007
Cu	ug/L	1.2	5.45	0.1
Zn	ug/L	4.9	15	0.2
As	ug/L	< 0.008	0.05	0.008
Rb	ug/L	1.05	1.45	0.001
Sr	ug/L	3.75	6.29	0.001
Ag	ug/L	2.5	9.3	0.002
Cs	ug/L	0.015	0.028	0.0002
Ba	ug/L	4.02	3.75	0.01
Pb	ug/L	0.07	0.21	0.002

Anexo 3

Concentración de elementos mayores y traza de las muestras de roca de la localidad de Camán.

	Concentración	C11	C31	C32
SiO ₂	wt %	42.7	38.68	41.79
Al ₂ O ₃	wt %	1.1	0.99	1.67
Fe ₂ O _{3(T)}	wt %	7.42	8.35	8.29
MnO	wt %	0.2	0.1	0.14
MgO	wt %	36.59	39.23	35.55
CaO	wt %	0.01	0.03	< 0.01
TiO ₂	wt %	0.02	0.02	0.02
P ₂ O ₅	wt %	0.07	0.07	0.07
L.O.I	wt %	12.06	12.92	12.3
Total	wt %	100.1	100.4	99.8
Cr	ppm	3531	2501	2696
Co	ppm	103	113	116
Cu	ppm	5.63	9.05	9.46
Ni	ppm	3354	2508	2553
Zn	ppm	84.8	42.9	44.8
Mn	ppm	1228	866	919
Sc	ppm	7.48	9.88	10.2
Hf	ppm	0.36	0.21	0.15
Nb	ppm	0.89	0.5	0.51
Ta	ppm	0.11	0.04	0.03
Th	ppm	0.07	0.14	0.12
Y	ppm	76.2	2.02	2.04
Zr	ppm	1.52	4.85	3.35
U	ppm	0.03	0.03	0.02
Pb	ppm	0	0.6	0.53

Anexo 4

Matriz de correlación a partir de los elementos de las muestras de la laterita de Camán.

	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	K2O	Fe2O3	Cr2O3	TiO2	MnO	As	Co	Cu	Ni	Pb	Sc	Zn	ΣREE
SiO2	1																
Al2O3	0.61	1															
CaO	0.15	0.10	1														
MgO	0.44	0.24	0.95	1													
K2O	-0.25	-0.22	0.91	0.75	1												
Fe2O3	-0.93	-0.75	0.02	-0.26	0.42	1											
Cr2O3	-0.94	-0.57	-0.49	-0.73	-0.11	0.82	1										
TiO2	0.36	0.59	0.10	0.17	-0.16	-0.63	-0.38	1									
MnO	-0.37	-0.94	-0.09	-0.16	0.13	0.51	0.36	-0.36	1								
As	-0.30	-0.17	0.52	0.39	0.68	0.54	0.09	-0.70	-0.09	1							
Co	-0.78	-0.95	0.05	-0.17	0.42	0.90	0.68	-0.56	0.82	0.33	1						
Cu	-0.68	-0.28	-0.17	-0.37	0.14	0.74	0.67	-0.75	-0.06	0.71	0.42	1					
Ni	-0.32	-0.93	-0.08	-0.13	0.13	0.47	0.31	-0.37	1.00	-0.09	0.80	-0.08	1				
Pb	0.13	-0.07	0.89	0.86	0.87	0.16	-0.42	-0.34	0.01	0.78	0.17	0.11	0.03	1			
Sc	-0.10	-0.08	0.87	0.75	0.85	0.14	-0.23	0.34	0.14	0.20	0.25	-0.32	0.13	0.60	1		
Zn	0.59	-0.09	-0.01	0.20	-0.13	-0.29	-0.50	-0.51	0.15	0.22	-0.14	-0.07	0.21	0.34	-0.38	1	
ΣREE	0.81	0.27	0.05	0.31	-0.20	-0.58	-0.72	-0.25	-0.17	0.12	-0.48	-0.22	-0.11	0.31	-0.36	0.93	1
LREE	0.79	0.27	0.12	0.38	-0.12	-0.55	-0.73	-0.27	-0.18	0.19	-0.46	-0.19	-0.12	0.39	-0.31	0.93	1.00
HREE	0.82	0.27	-0.19	0.09	-0.44	-0.65	-0.64	-0.17	-0.13	-0.12	-0.52	-0.29	-0.08	0.05	-0.53	0.90	0.96
Os	-0.91	-0.67	-0.17	-0.43	0.17	0.78	0.85	-0.08	0.56	-0.05	0.79	0.31	0.51	-0.29	0.24	-0.68	-0.89
Ir	-0.91	-0.81	-0.22	-0.47	0.16	0.86	0.88	-0.30	0.69	0.04	0.89	0.40	0.64	-0.23	0.13	-0.48	-0.76
Ru	-0.91	-0.72	-0.31	-0.56	0.05	0.80	0.91	-0.19	0.61	-0.07	0.81	0.38	0.56	-0.36	0.07	-0.57	-0.82
Rh	-0.80	-0.70	0.00	-0.24	0.30	0.71	0.70	0.00	0.66	-0.09	0.81	0.12	0.61	-0.16	0.43	-0.63	-0.85
Pd	-0.32	-0.58	-0.42	-0.47	-0.29	0.19	0.42	0.23	0.73	-0.67	0.47	-0.35	0.71	-0.57	0.03	-0.30	-0.47
Pt	-0.63	-0.89	-0.19	-0.35	0.09	0.63	0.62	-0.18	0.91	-0.20	0.86	0.02	0.88	-0.22	0.19	-0.26	-0.56
Au	-0.52	-0.16	0.68	0.45	0.88	0.63	0.22	-0.33	-0.07	0.84	0.43	0.55	-0.09	0.70	0.59	-0.30	-0.36
Ba	0.30	-0.54	-0.25	-0.09	-0.27	-0.11	-0.17	-0.32	0.71	-0.26	0.26	-0.33	0.75	-0.04	-0.26	0.71	0.51
Cs	0.58	0.10	0.57	0.71	0.31	-0.52	-0.73	0.53	0.19	-0.32	-0.18	-0.88	0.22	0.34	0.63	0.16	0.24
Ga	-0.80	-0.07	-0.25	-0.50	0.04	0.65	0.80	-0.25	-0.23	0.35	0.29	0.81	-0.28	-0.23	-0.16	-0.61	-0.66
Hf	0.62	0.47	-0.03	0.17	-0.22	-0.45	-0.52	-0.34	-0.51	0.34	-0.57	0.16	-0.47	0.27	-0.51	0.76	0.87
Nb	-0.49	0.39	-0.06	-0.25	0.05	0.26	0.46	0.21	-0.60	0.16	-0.13	0.48	-0.65	-0.23	0.03	-0.77	-0.63
Rb	-0.14	-0.12	0.95	0.82	0.98	0.27	-0.22	0.05	0.10	0.52	0.31	-0.06	0.10	0.82	0.94	-0.20	-0.21
Sn	-0.68	0.01	0.00	-0.23	0.25	0.63	0.61	-0.41	-0.34	0.65	0.23	0.90	-0.38	0.10	-0.08	-0.41	-0.44
Sr	-0.02	-0.08	0.98	0.89	0.97	0.20	-0.33	-0.03	0.06	0.59	0.24	-0.06	0.06	0.90	0.88	-0.04	-0.05
Ta	-0.57	0.27	-0.17	-0.36	0.00	0.39	0.57	-0.06	-0.54	0.31	-0.03	0.70	-0.58	-0.21	-0.15	-0.62	-0.54
Th	-0.67	-0.11	-0.28	-0.47	0.00	0.65	0.71	-0.58	-0.22	0.56	0.28	0.97	-0.26	-0.07	-0.38	-0.23	-0.32
U	-0.34	-0.04	-0.15	-0.24	0.04	0.46	0.38	-0.76	-0.27	0.74	0.13	0.92	-0.28	0.20	-0.46	0.21	0.14
W	-0.54	-0.82	-0.63	-0.71	-0.34	0.54	0.70	-0.39	0.81	-0.27	0.70	0.20	0.79	-0.49	-0.35	-0.01	-0.31
Y	0.90	0.36	-0.08	0.23	-0.37	-0.74	-0.76	-0.04	-0.19	-0.15	-0.60	-0.41	-0.13	0.11	-0.41	0.86	0.96
Zr	0.73	0.65	0.09	0.30	-0.17	-0.60	-0.66	-0.13	-0.65	0.26	-0.73	0.00	-0.61	0.29	-0.38	0.65	0.85

	Lr	Hf	Os	Ir	Ru	Rh	Pd	Pt	Au	Ba	Cs	Ga	Hg	Nb	Rb	Sn	Sr	Ta	Th	U	W	Y	Zr	
1																								
0.94	1																							
-0.90	-0.84	1																						
-0.77	-0.72	0.97	1																					
-0.83	-0.75	0.98	0.99	1																				
-0.85	-0.82	0.97	0.93	0.93	1																			
-0.52	-0.29	0.66	0.65	0.68	0.72	1																		
-0.57	-0.48	0.84	0.89	0.86	0.89	0.86	1																	
-0.29	-0.60	0.30	0.28	0.20	0.30	-0.44	0	1																
0.48	0.59	-0.13	0.04	-0.03	-0.03	0.45	0.41	-0.55	1															
0.25	0.20	-0.28	-0.34	-0.38	-0.03	0.19	0.03	-0.17	0.33	1														
-0.64	-0.66	0.56	0.51	0.57	0.36	-0.12	0.08	0.49	-0.68	-0.85	1													
0.88	0.81	-0.88	-0.77	-0.80	-0.94	-0.76	-0.79	-0.15	0.12	-0.16	-0.23	1												
-0.62	-0.65	0.32	0.17	0.26	0.16	-0.27	-0.24	0.43	-0.94	-0.58	0.86	-0.20	1											
-0.14	-0.44	0.14	0.08	-0.01	0.30	-0.22	0.07	0.78	-0.27	0.48	-0.08	-0.29	0.02	1										
-0.40	-0.53	0.33	0.32	0.33	0.15	-0.44	-0.13	0.69	-0.71	-0.80	0.93	0.02	0.80	0.10	1									
0.03	-0.30	-0.01	-0.04	-0.14	0.15	-0.34	-0.04	0.77	-0.21	0.49	-0.16	-0.13	-0.06	0.98	0.08	1								
-0.53	-0.56	0.31	0.22	0.30	0.11	-0.34	-0.23	0.46	-0.85	-0.77	0.94	-0.06	0.96	-0.08	0.91	-0.14	1							
-0.30	-0.35	0.32	0.37	0.38	0.10	-0.34	-0.06	0.47	-0.49	-0.95	0.91	0.12	0.66	-0.18	0.94	-0.19	0.84	1						
0.16	0.05	-0.07	0.04	0.01	-0.26	-0.61	-0.30	0.43	-0.27	-0.83	0.63	0.52	0.37	-0.16	0.80	-0.09	0.60	0.89	1					
-0.35	-0.16	0.66	0.78	0.77	0.61	0.79	0.85	-0.30	0.56	-0.30	0.15	-0.46	-0.27	-0.41	-0.09	-0.48	-0.16	0.15	-0.03	1				
0.94	0.99	-0.90	-0.80	-0.83	-0.84	-0.32	-0.54	-0.58	0.54	0.33	-0.74	0.79	-0.64	-0.34	-0.59	-0.20	-0.60	-0.46	-0.06	-0.28	1			
0.86	0.78	-0.95	-0.89	-0.91	-0.99	-0.81	-0.90	-0.15	-0.01	-0.02	-0.29	0.97	-0.13	-0.20	-0.04	-0.05	-0.06	0.00	0.38	-0.64	0.80	1		

Anexo 7

Tasa de meteorización(R) y de producción de suelo (S) muestra 1 de agua

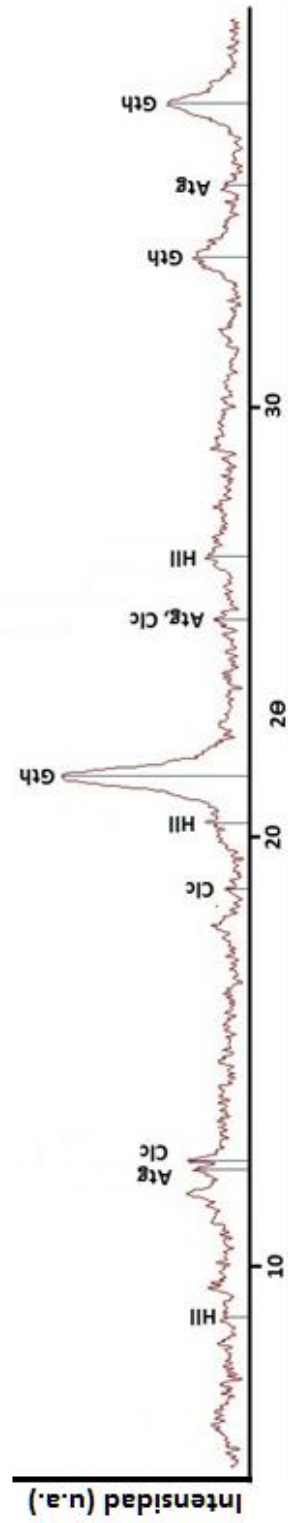
	CAM16S-1		CAM16S-2		CAM16S-3		CAM16S-4		CAM16S-5		
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	
SSMA1 mg/L	Al/Fe	-0.0007	-0.0002	-0.0008	-0.0002	-0.0051	-0.0008	-0.0024	-0.0004	-0.0018	-0.0003
	Al/Mg	-0.0140	-0.0059	-0.0148	-0.0063	-0.0201	-0.0043	-0.0169	-0.0142	-0.0156	-0.0034
	Al/Ca	-3.2341	-0.2902	-2.0757	-0.1969	170.8998	21.9870	-0.9993	-0.1084	6.4135	0.6395
	Fe/Mg	0.0046	0.0009	0.0046	0.0009	0.0046	0.0007	0.0046	0.0007	0.0046	0.0007
	Fe/Ca	-1.0179	-0.2011	-0.7912	-0.1552	-24.2870	-3.7243	-0.6661	-0.1012	9.4130	1.4297
	Mg/Ca	0.0043	-0.1600	0.0044	-0.1293	0.0041	-0.5245	0.0043	-0.0866	0.0036	-1.0492
SSMA1 mg/L	Cr/Mn	-0.0169	-0.0039	-0.0067	-0.0019	-0.0050	-0.0009	-0.0073	-0.0016	0.0357	0.0057
	Cr/Ni	0.0016	0.0003	0.0018	0.0004	0.0019	0.0003	0.0017	0.0003	0.0015	0.0002
	Cr/Cu	-0.1643	-0.0375	-0.0563	-0.0153	-0.1009	-0.0175	-0.0607	-0.0128	-0.0543	-0.0089
	Cr/Zn	0.5005	0.1137	-0.0973	-0.0263	0.7301	0.1261	2.0230	0.4237	0.2563	0.0417
	Cr/Pd	-0.0026	-0.0007	-0.0042	-0.0013	-0.0025	-0.0005	-0.0043	-0.0010	-0.0057	-0.0010
	Mn/Ni	0.0004	-0.0008	0.0003	-0.0007	0.0002	-0.0004	0.0003	-0.0006	0.0005	-0.0008
	Mn/Cu	-0.2728	-0.0507	-0.1107	-0.0194	-0.3937	-0.0386	-0.1156	-0.0163	-0.0399	-0.0083
	Mn/Zn	0.2466	0.0442	-0.4728	-0.0804	0.1641	0.0154	0.2154	0.0285	0.3408	0.0623
	Mn/Pd	0.0009	-0.0007	-0.0027	-0.0013	-0.0005	-0.0005	-0.0027	-0.0010	-0.0007	-0.0010
	Ni/Cu	-0.0208	-0.0200	-0.0144	-0.0121	-0.0289	-0.0123	-0.0150	-0.0099	-0.0058	-0.0067
	Ni/Zn	-0.0351	-0.0329	-0.0181	-0.0149	-0.0756	-0.0315	-0.0456	-0.0286	-0.0277	-0.0275
	Ni/Pd	0.0005	-0.0007	-0.0003	-0.0013	0.0001	-0.0005	-0.0003	-0.0010	0.0002	-0.0010
Cu/Zn	0.0389	-0.0127	0.0197	-0.0094	0.0517	-0.0066	0.0619	-0.0051	0.0721	-0.0032	
Cu/Pd	0.1376	-0.0007	0.1272	-0.0012	0.1362	-0.0005	0.1276	-0.0010	0.1216	-0.0010	
Zn/Pd	0.0828	-0.0007	0.0767	-0.0012	0.0827	-0.0005	0.0808	-0.0010	0.0812	-0.0010	

Tasa de meteorización(R) y de producción de suelo (S) muestra 2 de agua

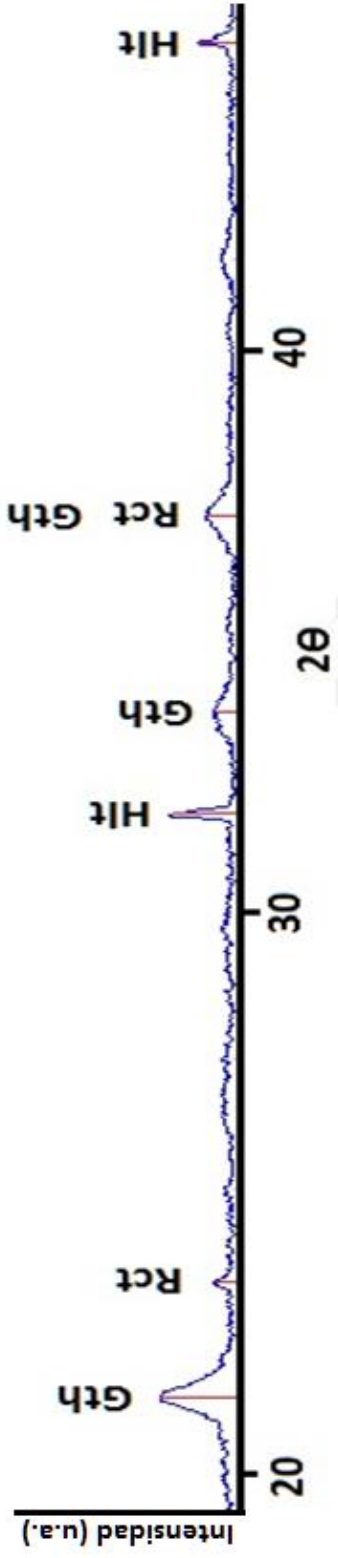
	CAM16S-1		CAM16S-2		CAM16S-3		CAM16S-4		CAM16S-5	
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
	-0.0062	-0.0016	-0.0021	-0.0008	-0.0014	-0.0004	-0.0023	-0.0006	0.0147	0.0023
Cr/Mn	0.0014	0.0002	0.0015	0.0002	0.0016	0.0002	0.0015	0.0002	0.0014	0.0001
Cr/Ni	-0.7814	-0.1778	-0.2687	-0.0725	-0.4805	-0.0832	-0.2894	-0.0608	-0.2591	-0.0423
Cr/Cu	1.5352	0.3489	-0.2992	-0.0807	2.2396	0.3870	6.2069	1.3000	0.7859	0.1279
Cr/Zn	-0.0023	-0.0007	-0.0039	-0.0013	-0.0022	-0.0005	-0.0041	-0.0010	-0.0054	-0.0010
Mn/Ni	0.0010	-0.0003	0.0009	-0.0002	0.0009	-0.0001	0.0009	-0.0002	0.0010	-0.0003
Mn/Cu	-1.3525	-0.2475	-0.5611	-0.0949	-1.9424	-0.1882	-0.5851	-0.0794	-0.2154	-0.0404
Mn/Zn	0.7788	0.1418	-1.5300	-0.2581	0.5141	0.0495	0.6788	0.0914	1.0810	0.1998
SSMA2 mg/L	-0.0013	-0.0007	-0.0050	-0.0013	-0.0028	-0.0005	-0.0050	-0.0010	-0.0030	-0.0010
Mn/Pd	-0.1040	-0.0953	-0.0736	-0.0575	-0.1429	-0.0589	-0.0765	-0.0474	-0.0326	-0.0321
Ni/Cu	-0.1114	-0.1019	-0.0587	-0.0460	-0.2368	-0.0973	-0.1439	-0.0885	-0.0886	-0.0851
Ni/Zn	0.0005	-0.0007	-0.0004	-0.0013	0.0000	-0.0005	-0.0004	-0.0010	0.0002	-0.0010
Ni/Pd	-0.0734	-0.0915	-0.2121	-0.0682	0.0191	-0.0473	0.0928	-0.0367	0.1660	-0.0231
Cu/Zn	0.6728	-0.0005	0.6642	-0.0010	0.6717	-0.0004	0.6646	-0.0008	0.6596	-0.0008
Cu/Pd	0.2586	-0.0006	0.2529	-0.0012	0.2585	-0.0005	0.2566	-0.0009	0.2571	-0.0009
Zn/Pd	-0.0014	-0.0003	-0.0016	-0.0004	-0.0104	-0.0016	-0.0048	-0.0008	-0.0036	-0.0006
Al/Fe	-0.0265	-0.0060	-0.0280	-0.0064	-0.0380	-0.0045	-0.0320	-0.0143	-0.0295	-0.0035
Al/Mg	-8.2847	-0.7433	-5.3174	-0.5043	437.7629	56.3202	-2.5601	-0.2778	16.4279	1.6382
SSMA2 mg/L	0.0087	0.0017	0.0087	0.0016	0.0087	0.0013	0.0087	0.0013	0.0087	0.0013
Fe/Mg	-2.6073	-0.5151	-2.0266	-0.3974	-62.2086	-9.5394	-1.7062	-0.2592	24.1103	3.6621
Fe/Ca	0.0079	-0.4100	0.0081	-0.3314	0.0074	-1.3439	0.0079	-0.2219	0.0061	-2.6882
Mg/Ca										

Anexo 8.

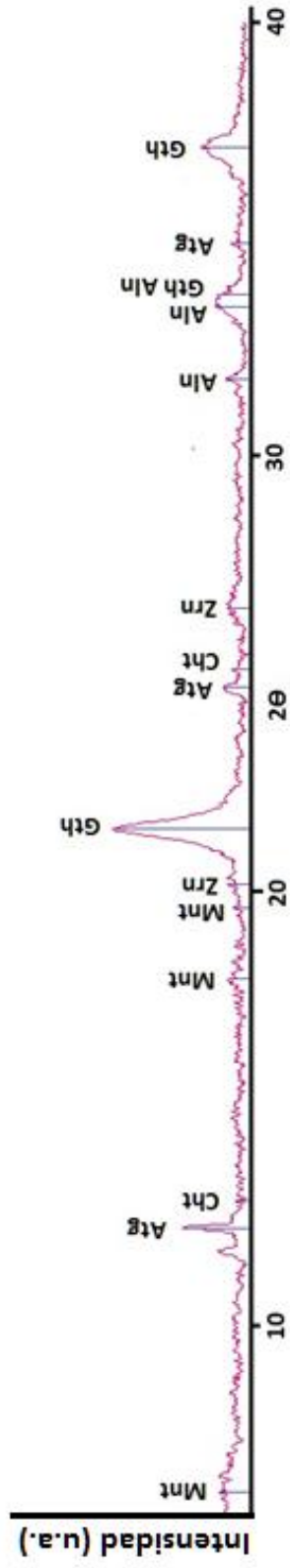
Difractogramas de las muestras de la laterita de Camán.



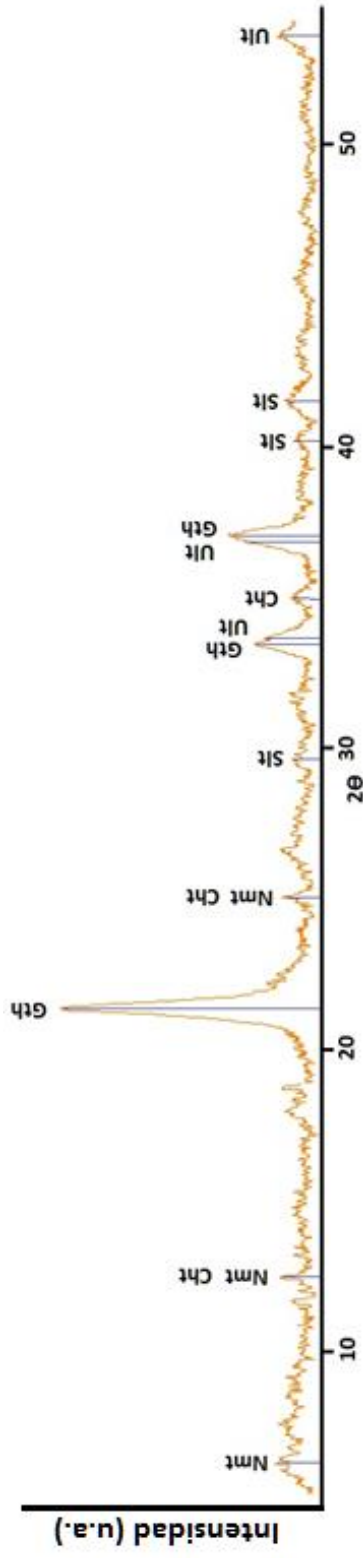
Difractograma muestra CAM16S-1 Fracción total. Hll: Halloysita, Atg: Antigorita, Clc: Clinocloro, Gth: Goethita.



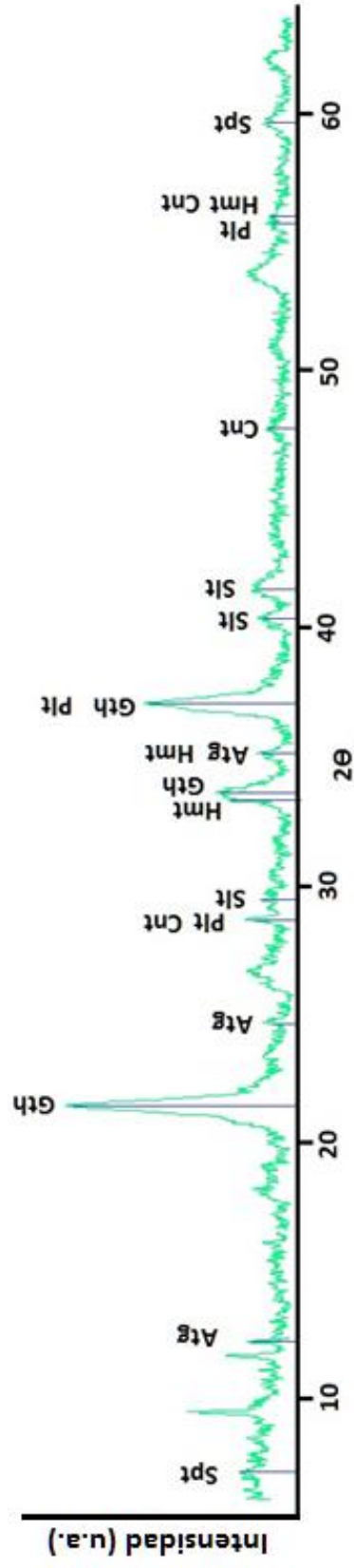
Difractograma muestra CAM16S-1 Fracción total. Hlt: Halita, Gth: Goethita, Rct: Rancieita.



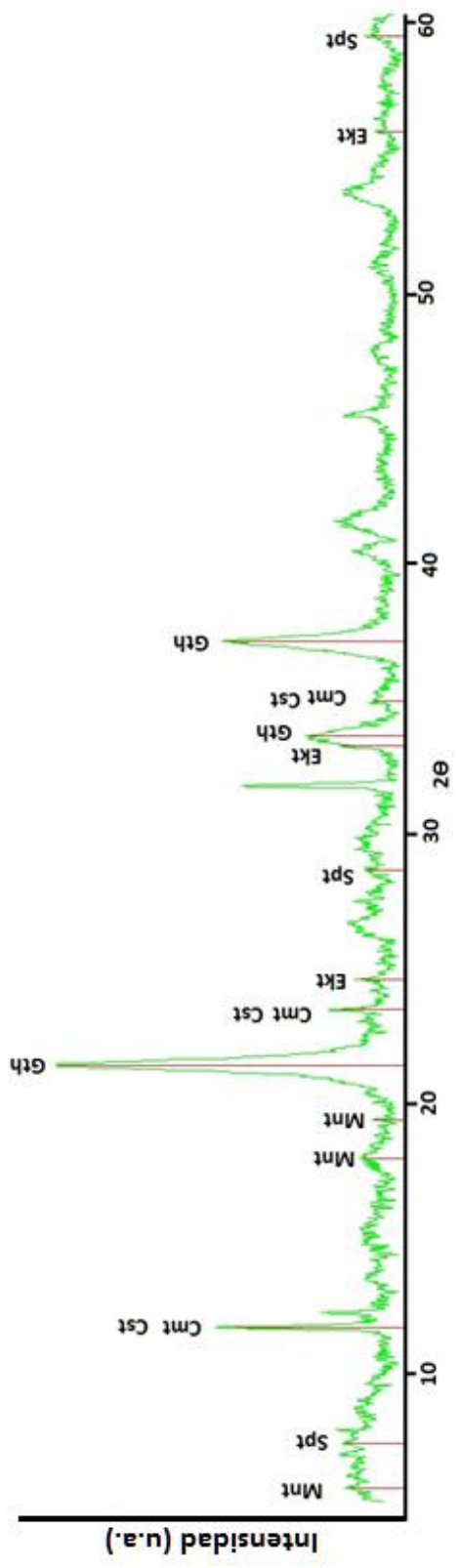
Difractograma muestra CAM16S-2 Fracción total. Gth: Goethita, Mt: montmorillonita, Atg: Antigorita, Zrn, Zircon, Aln: Alanita, Cht: Chamosita.



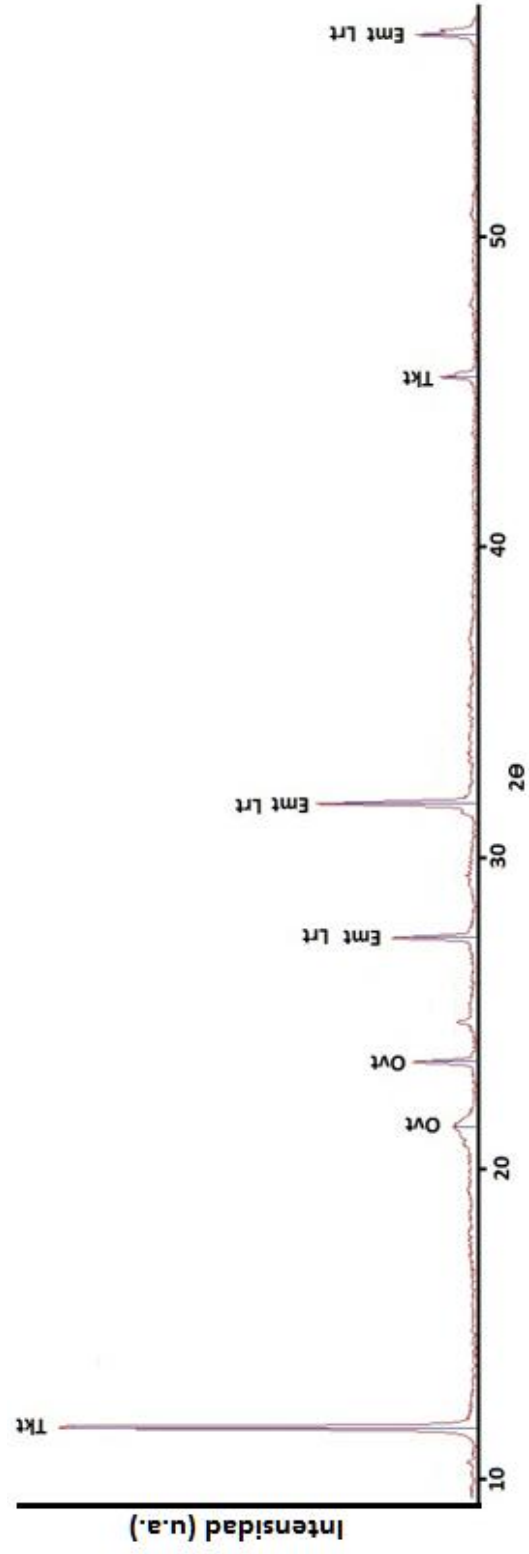
Difractograma muestra CAM16S-3 Fracción total. Ullm: Ullmannita, Gth: Goethita, Slr: Sobolevskita, Nmt: Nimita, Cht: Chamosita.



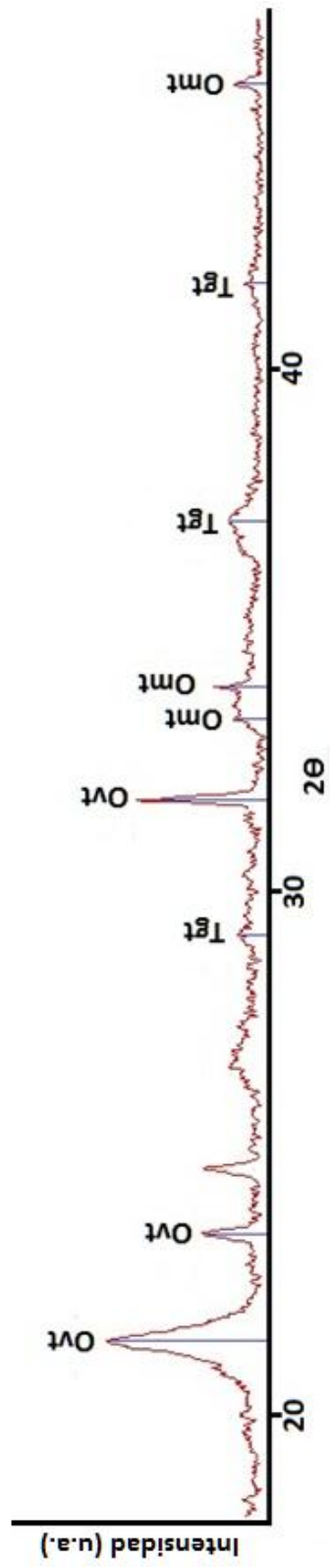
Difractograma muestra CAM16S-4 Fracción total. Cerianita: Cnt, Hematita: Hmt, Pirolusita: Plt, Saponita: Spt, Antigorita: Atg, Goethita: Gth, Sobolevskita: Slt.



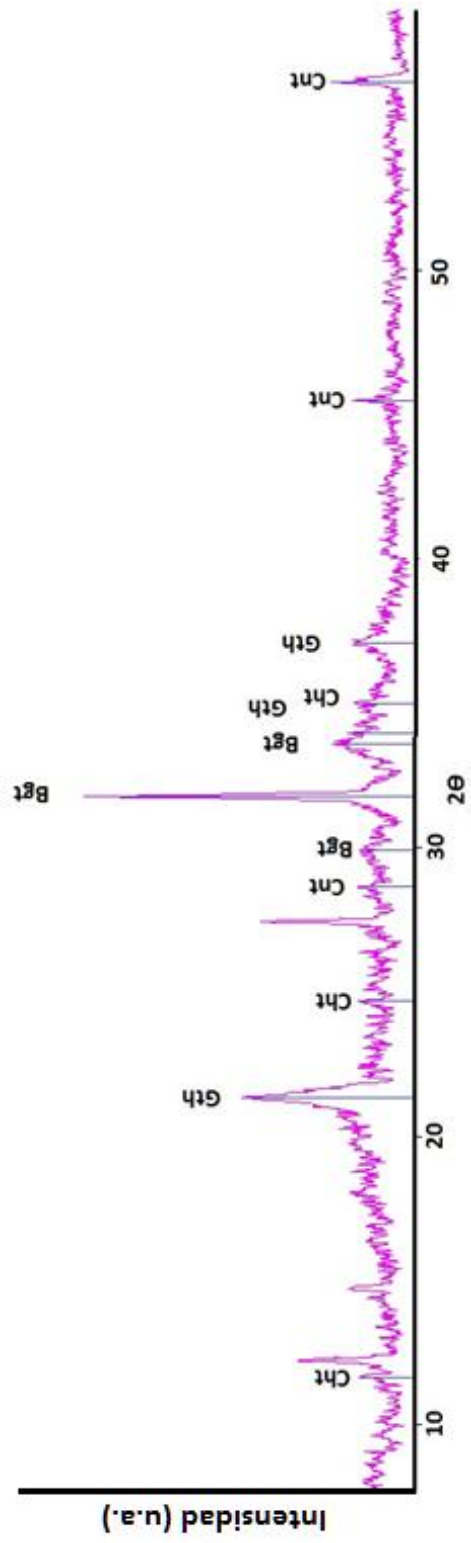
Difractograma muestra CAM16S-5 Fracción total. Goethita: Gth, Saponita: Spt, Charmanita: Cmt, Caresita: Cst. Eskolaíta: Ekt



Difractograma muestra CAM16S-1 Fracción arcillosa. Lrt: Laurita, Ovt, Orthochevkinita, Emt: Erlichmanita, Tkv: Takovita.



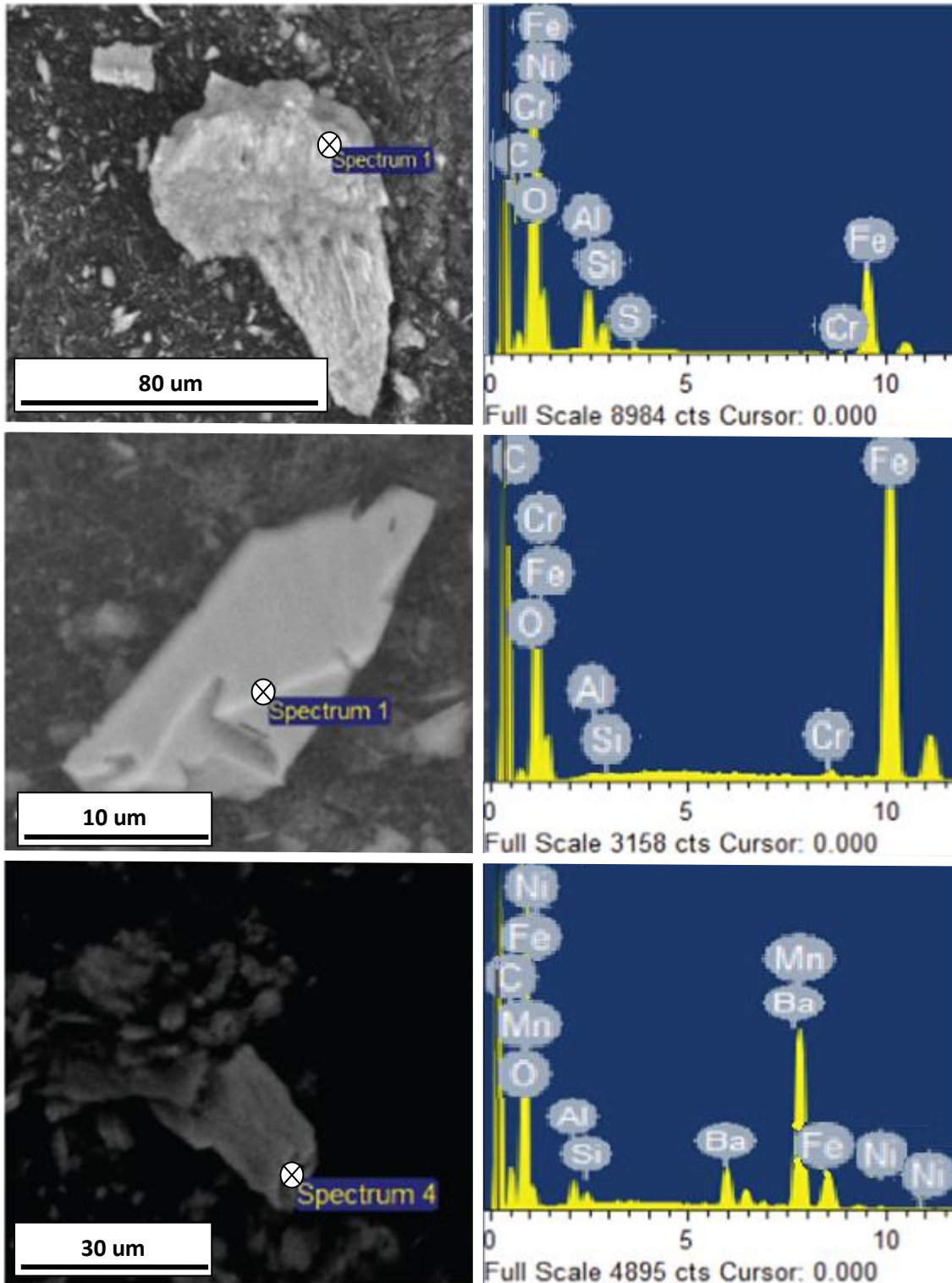
Difractograma muestra CAM16S-2 Fracción arcillosa. Ovt, Orthochevkinita, Tgt: Telargpalita, Omt: Omeiita.

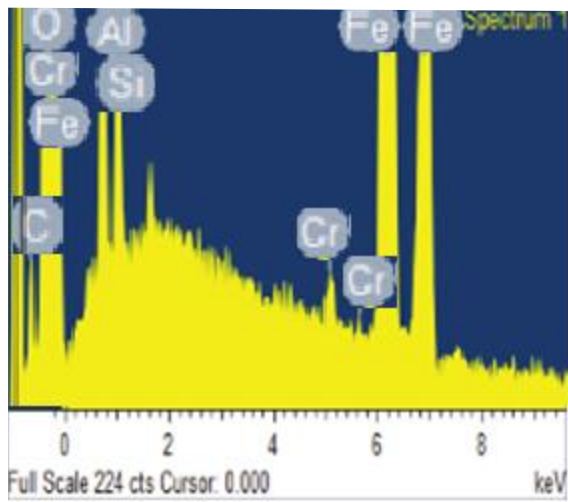
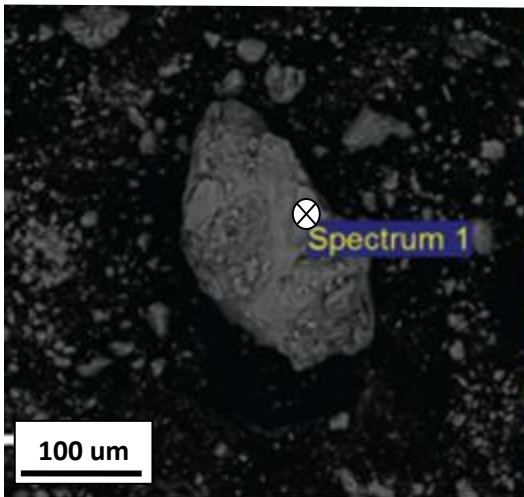
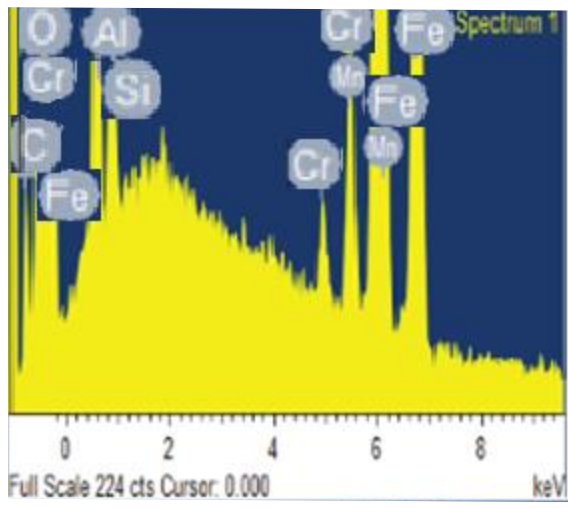
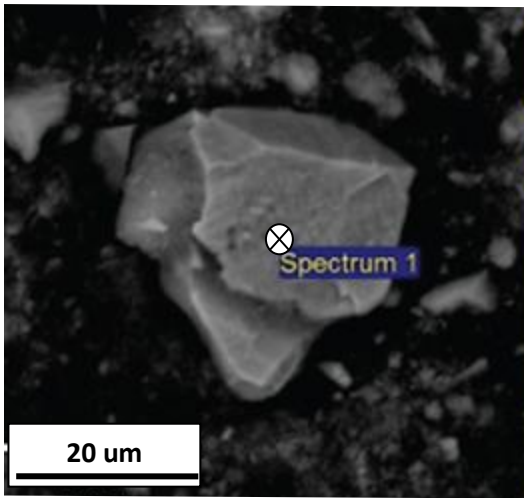
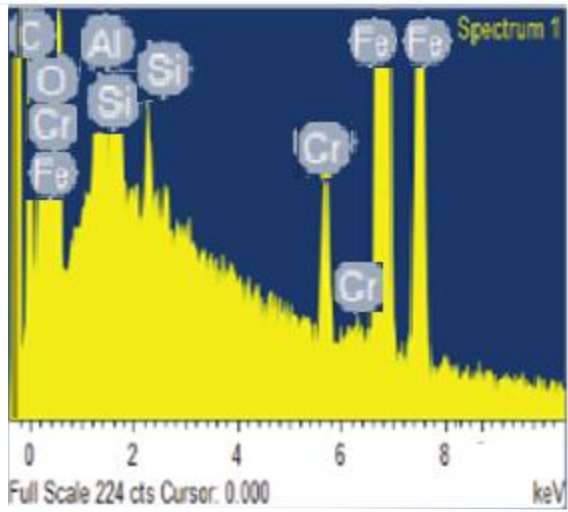
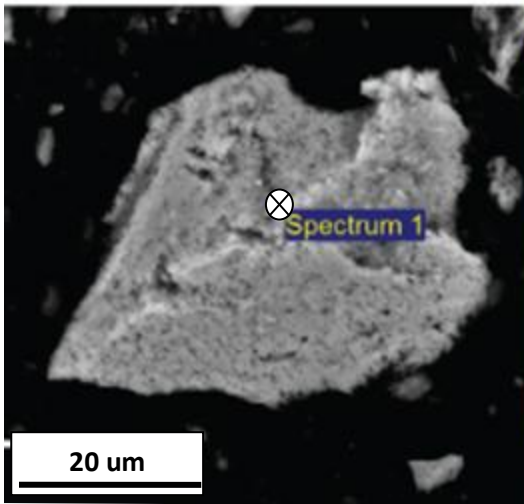


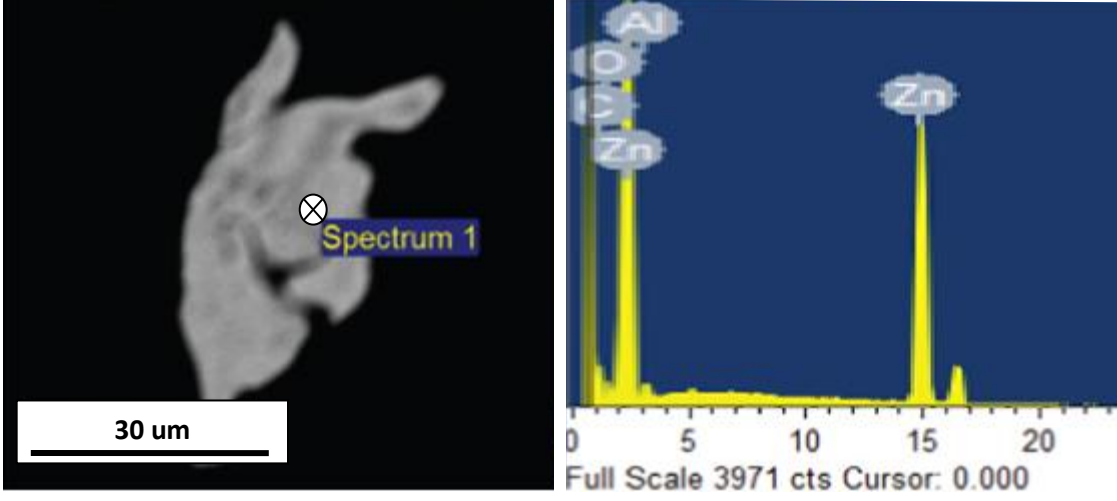
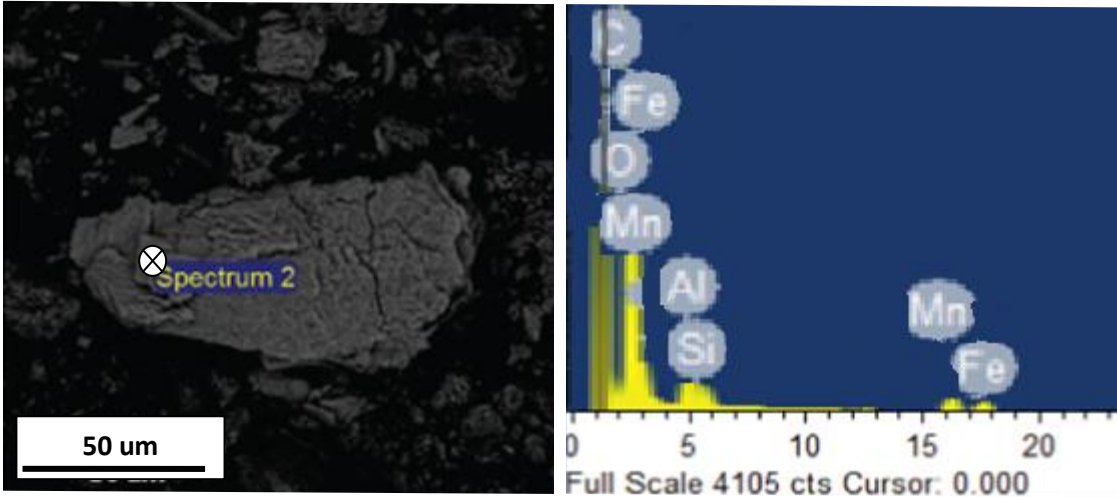
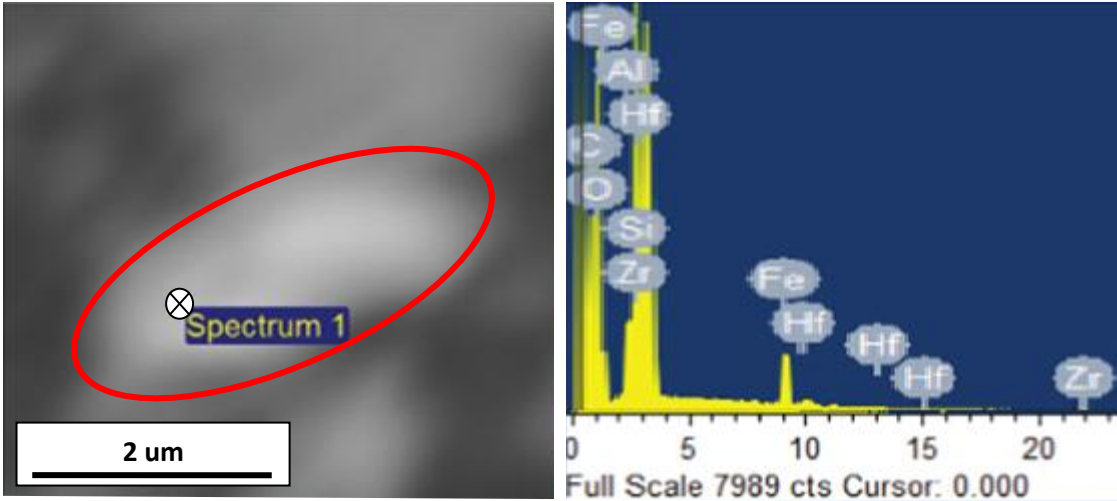
Difractograma muestra CAM16S-4 Fracción arcillosa. Cht: Charmanita, Gth: Goethita, Bgt: Braggita, Cnt: Cerianita..

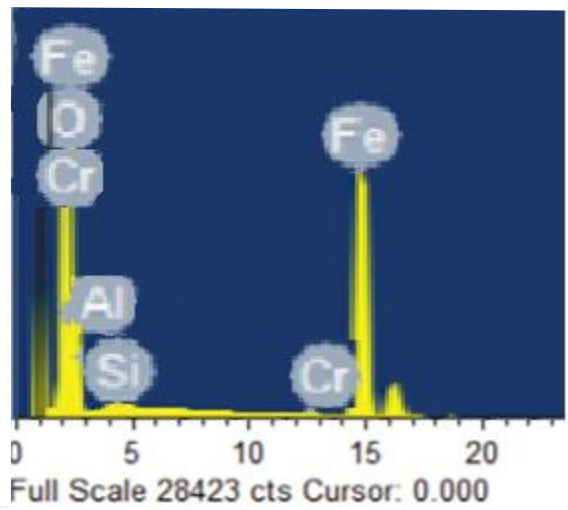
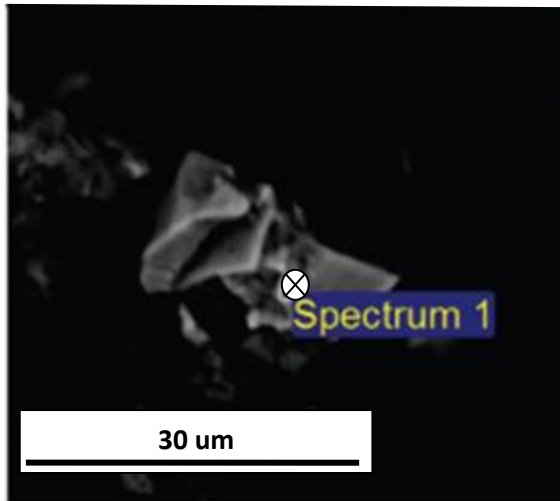
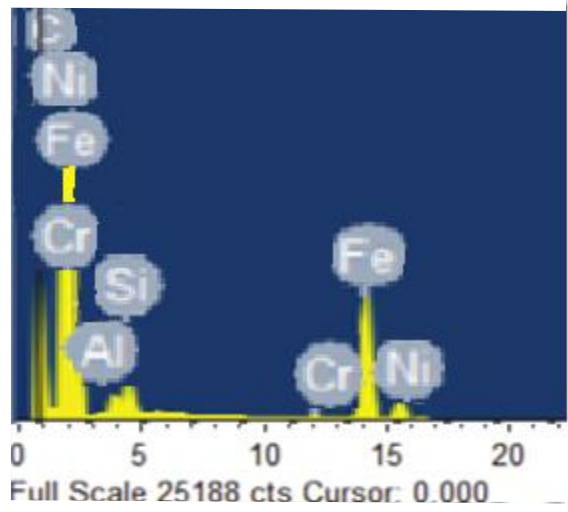
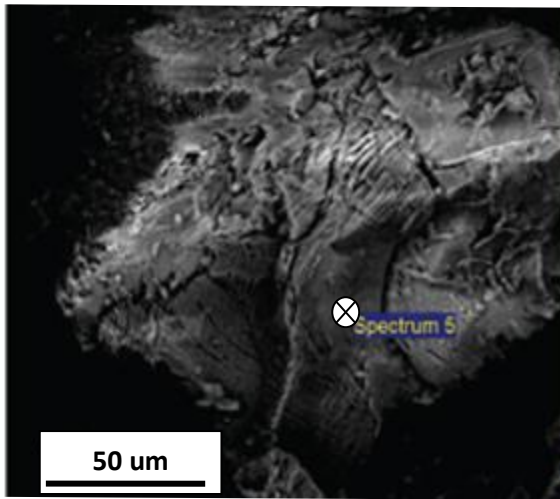
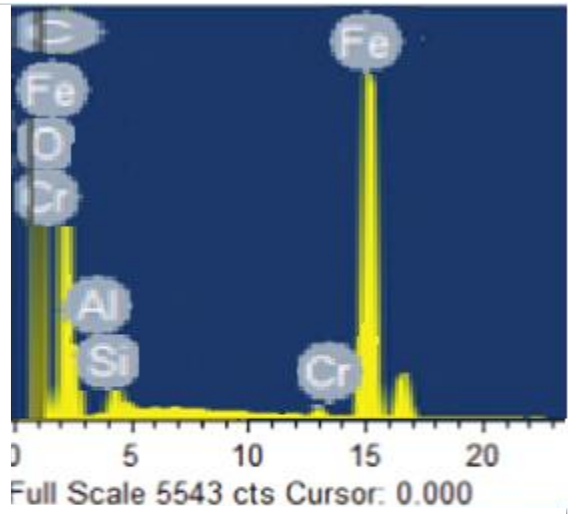
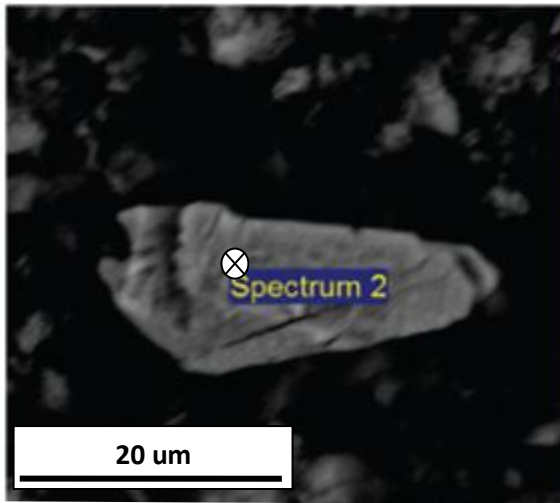
Anexo 9

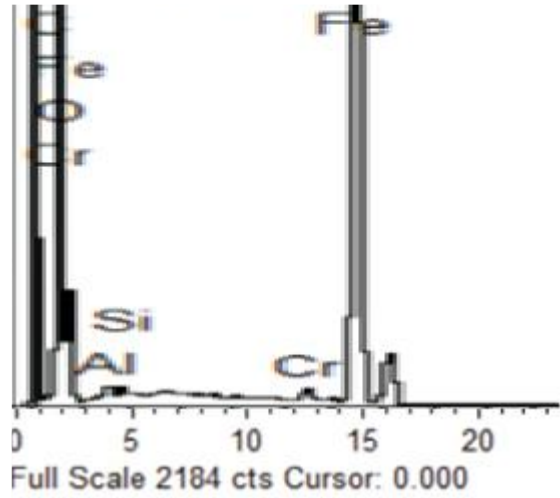
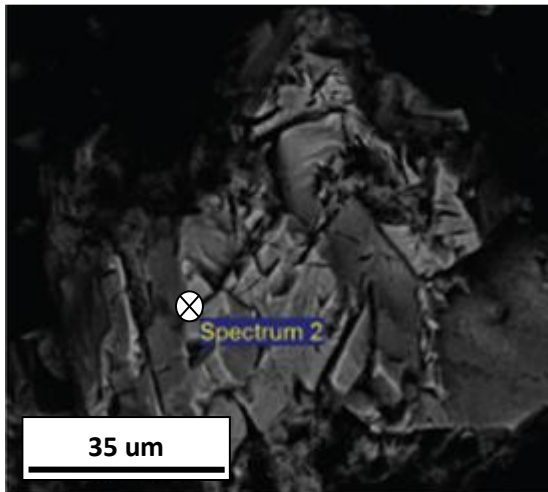
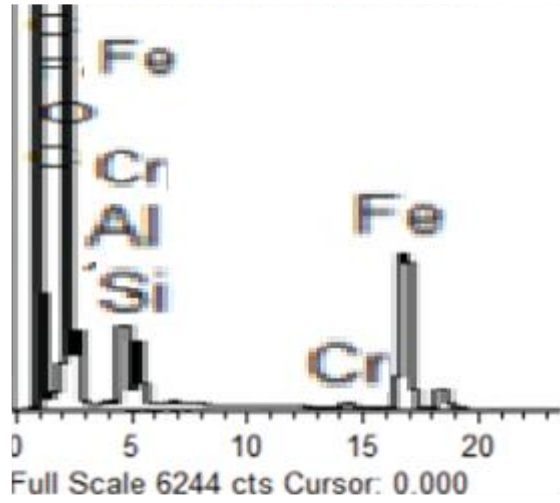
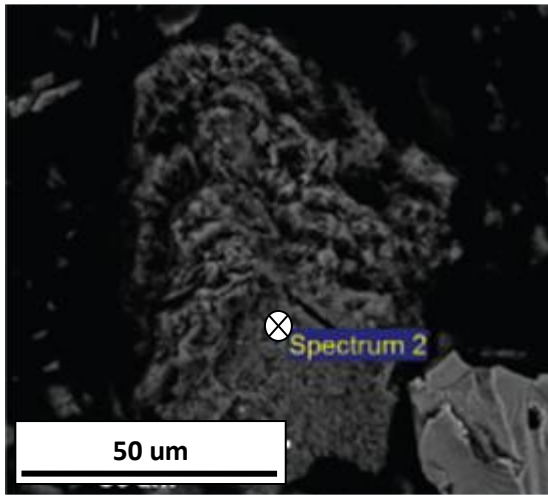
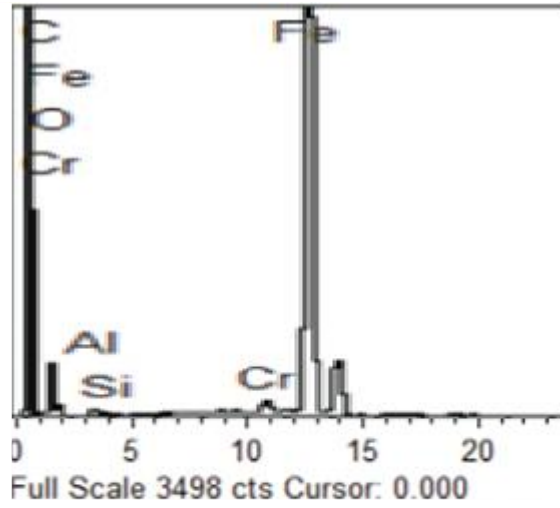
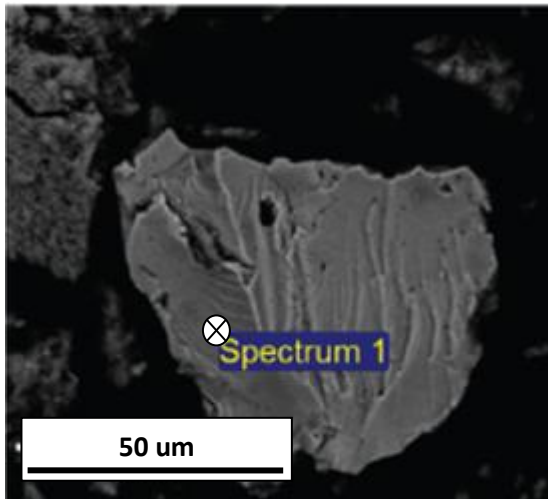
Imágenes SEM y espectro EDS. Todas las imágenes son de electrones retrodispersados.

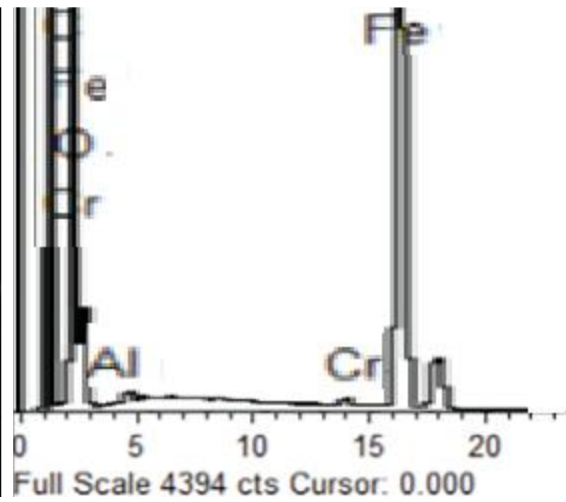
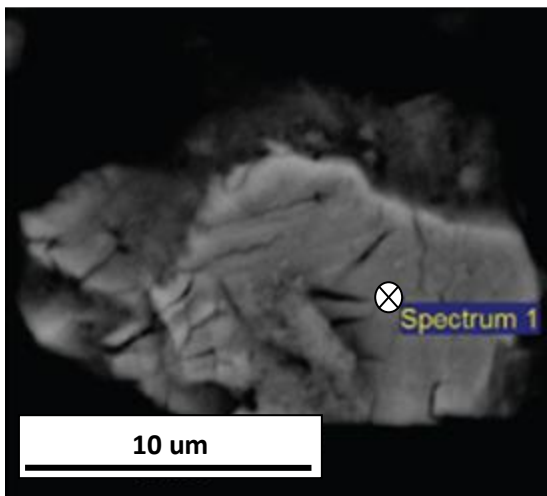
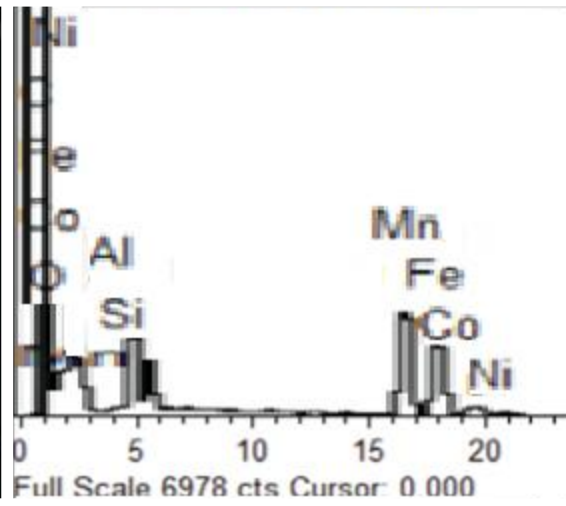
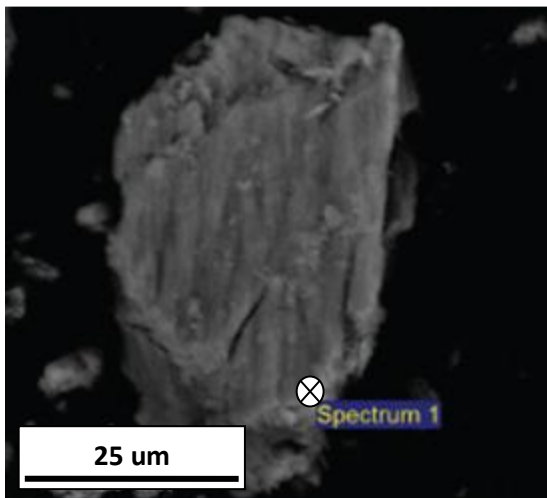
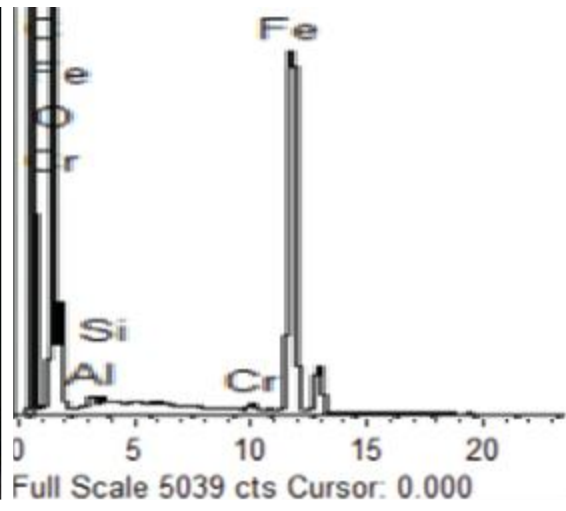
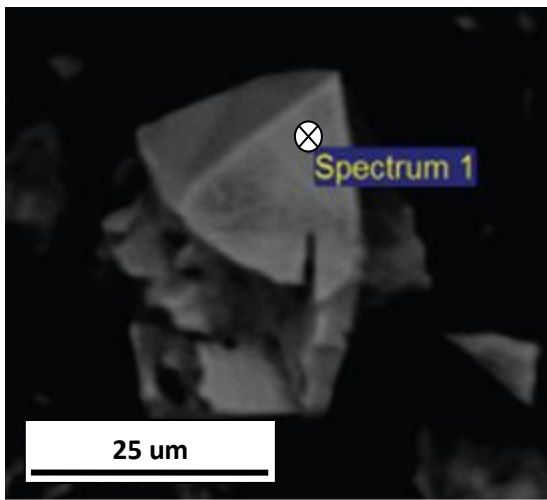


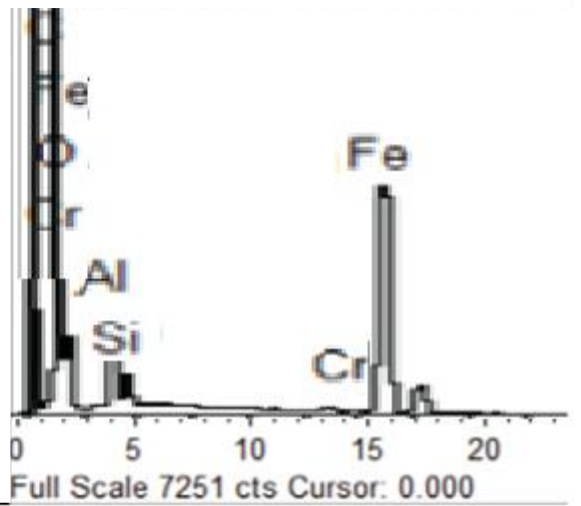
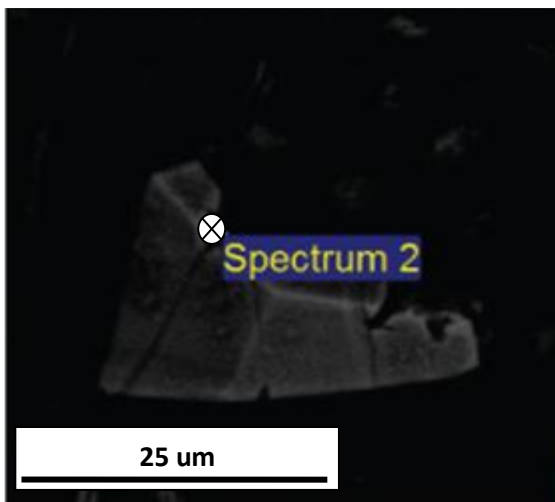
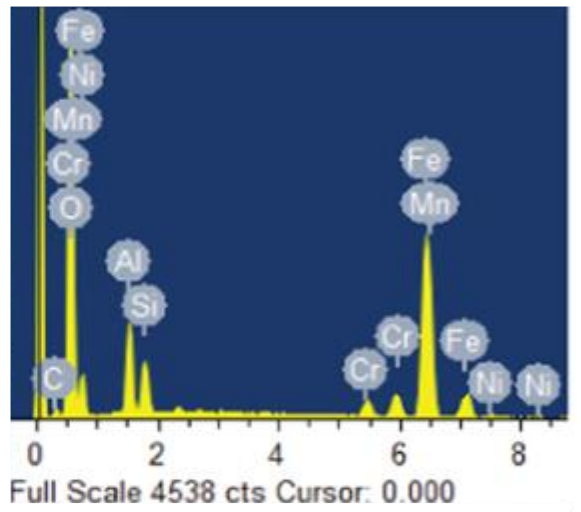
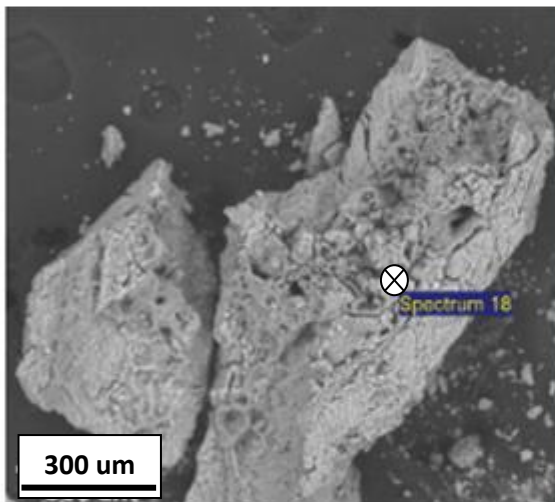
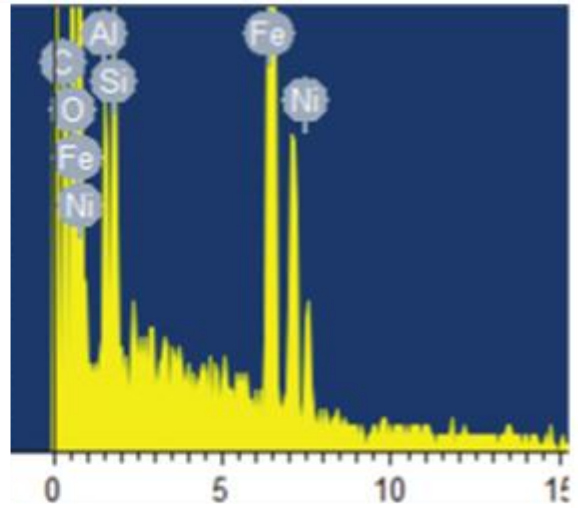
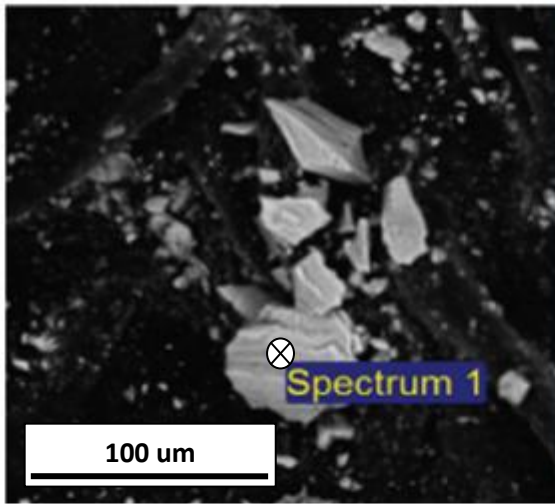


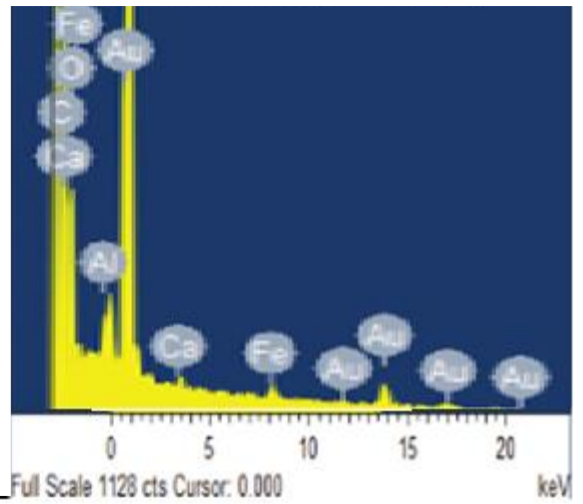
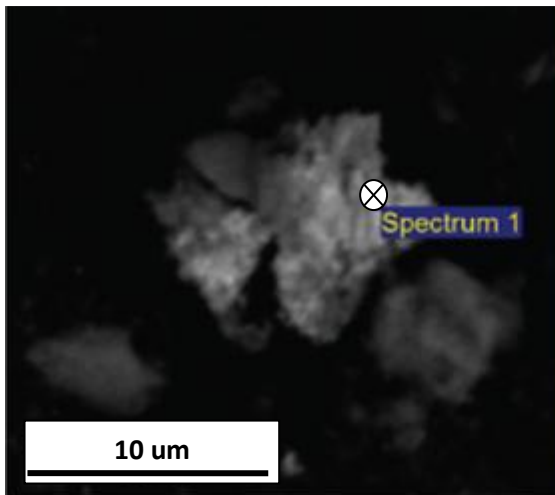
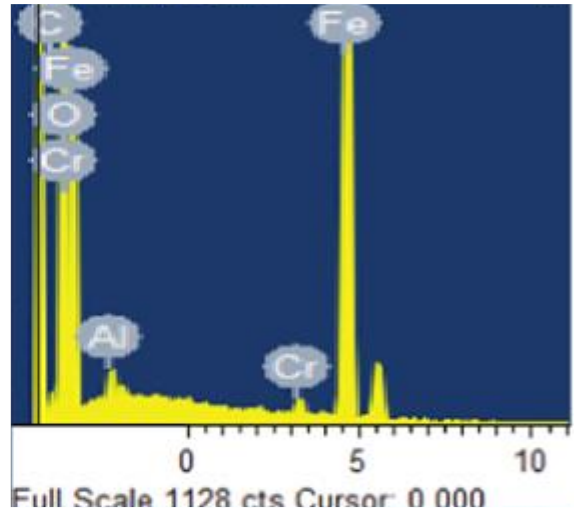
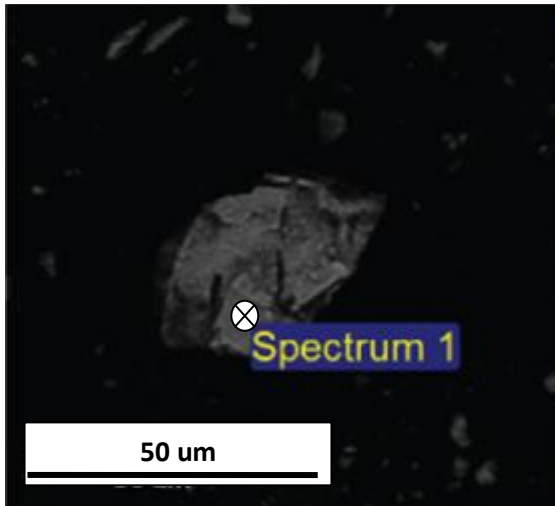
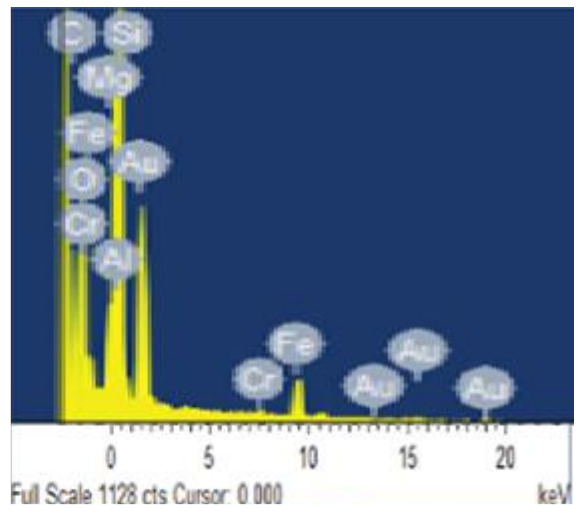
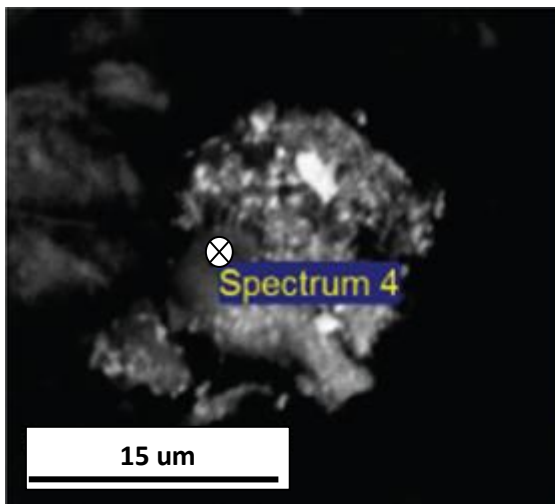


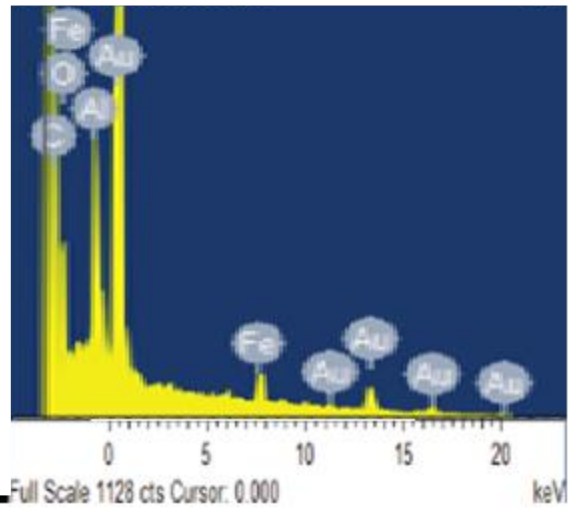
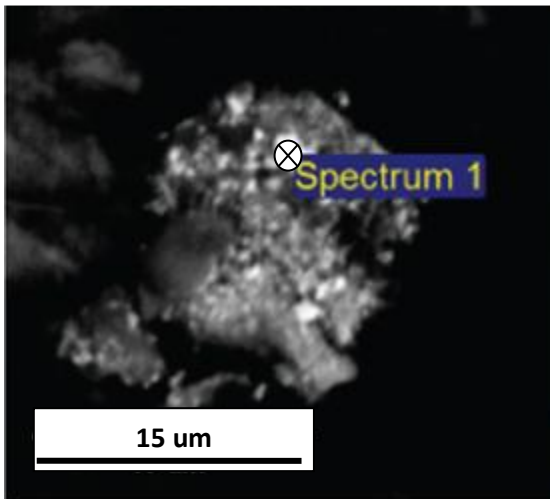
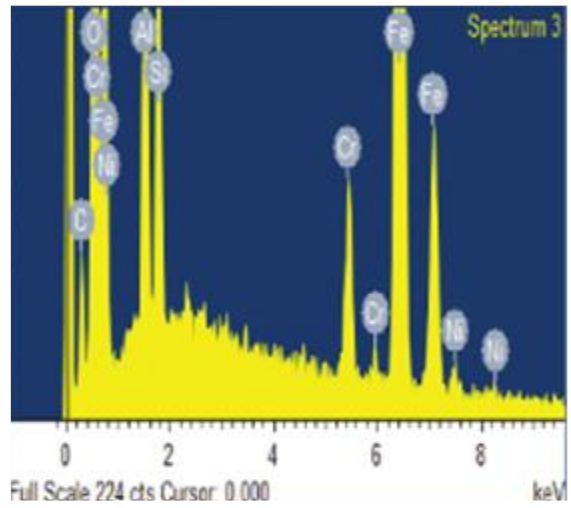
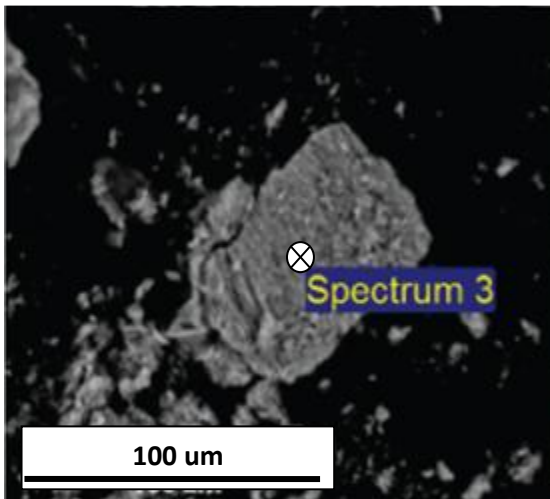
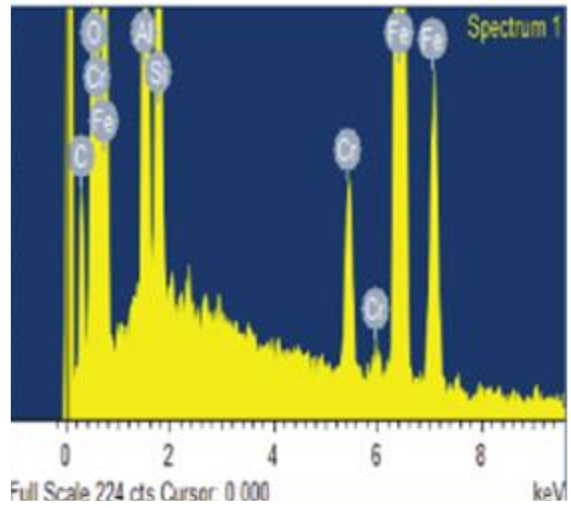
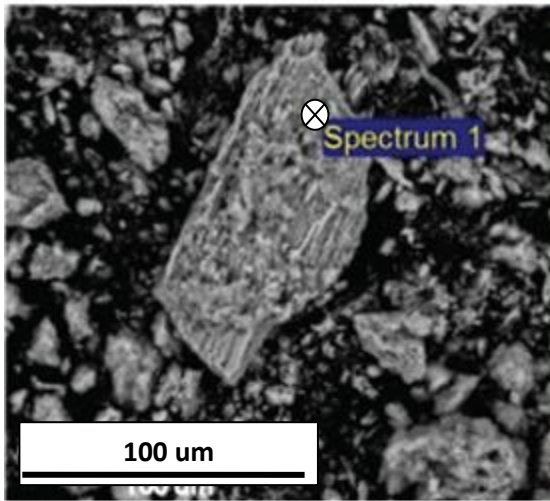


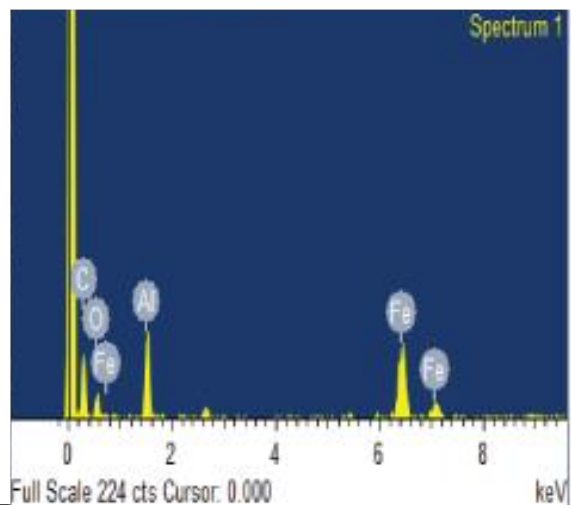
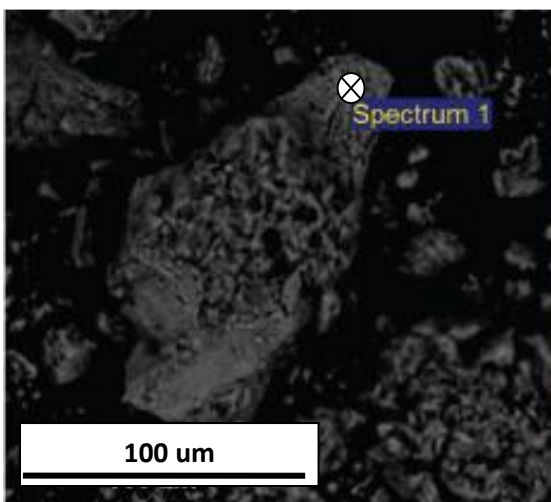
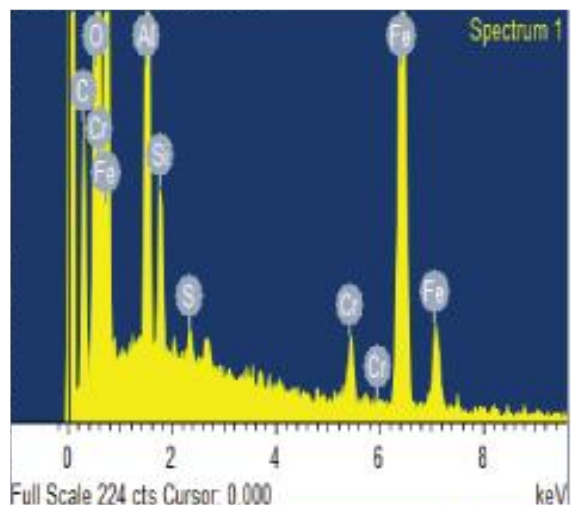
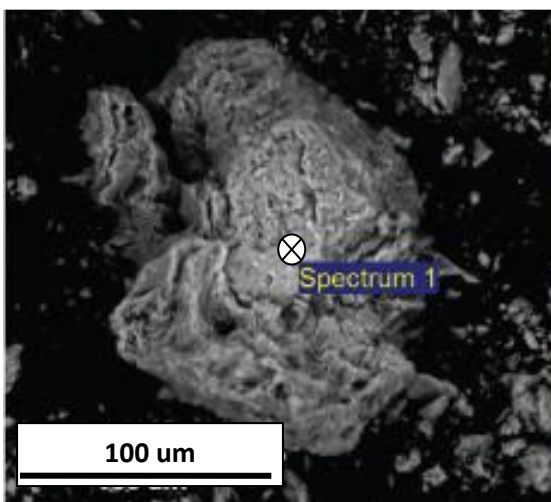
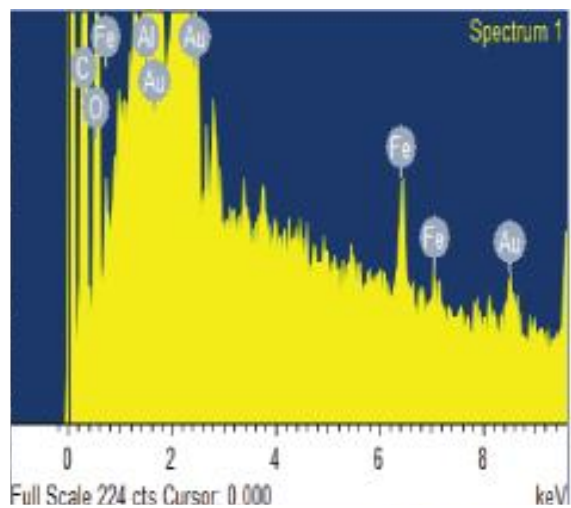
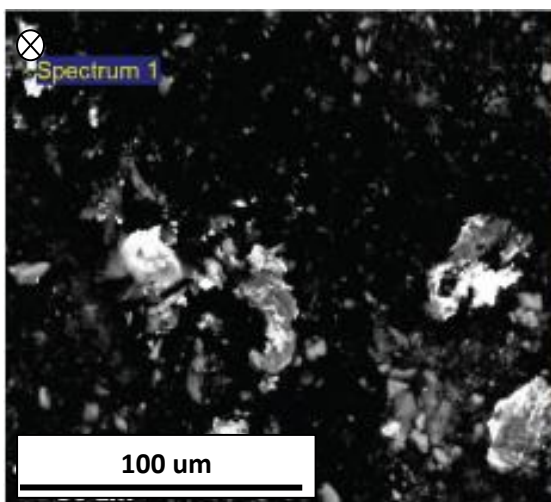


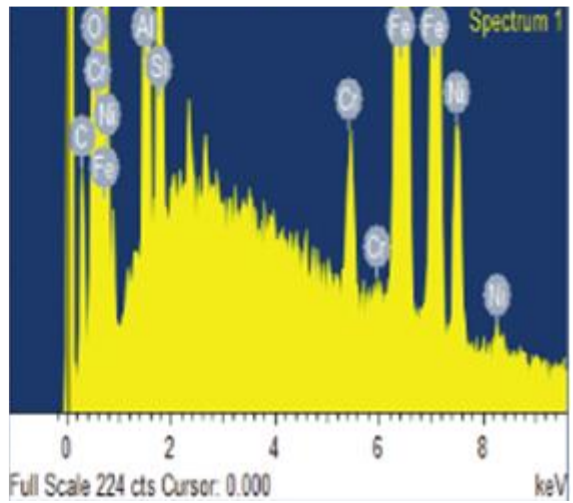
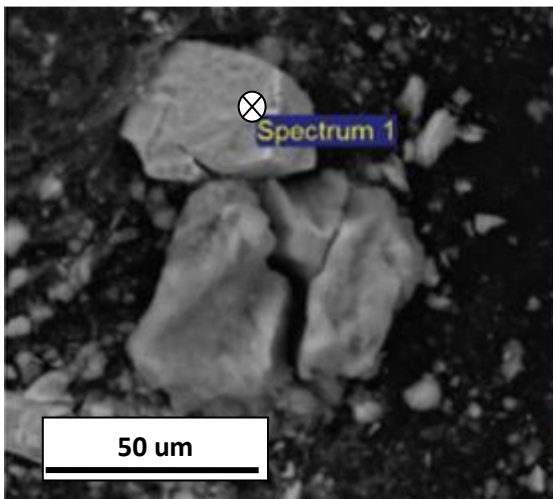
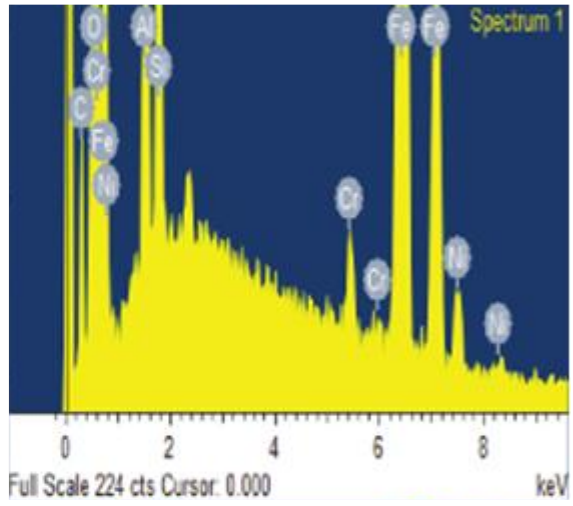
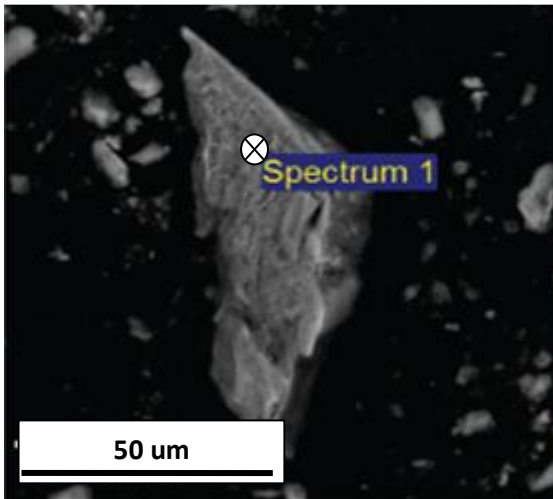
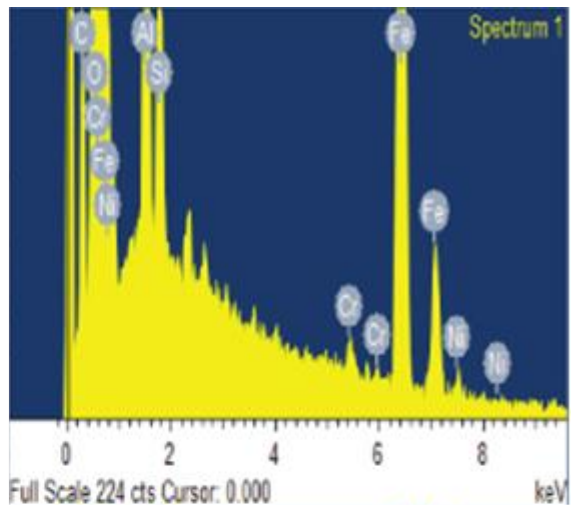
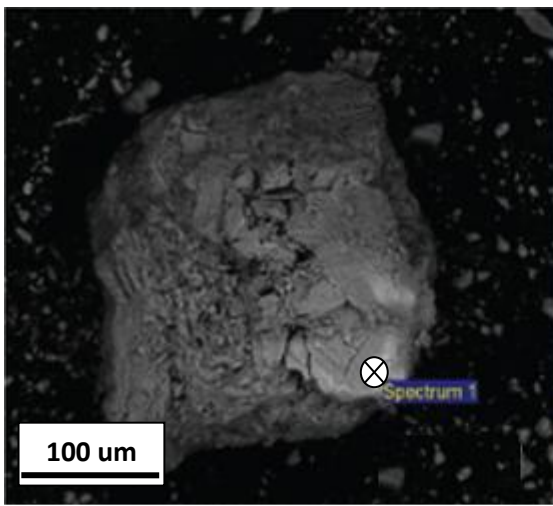


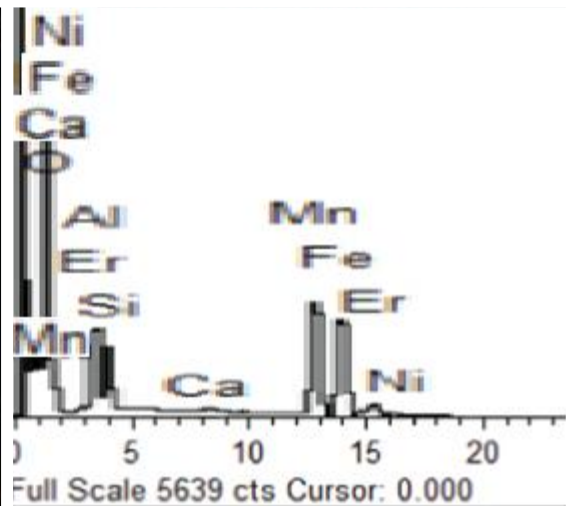
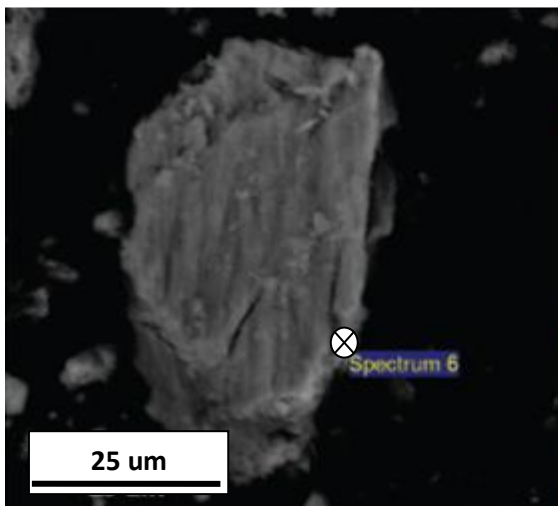
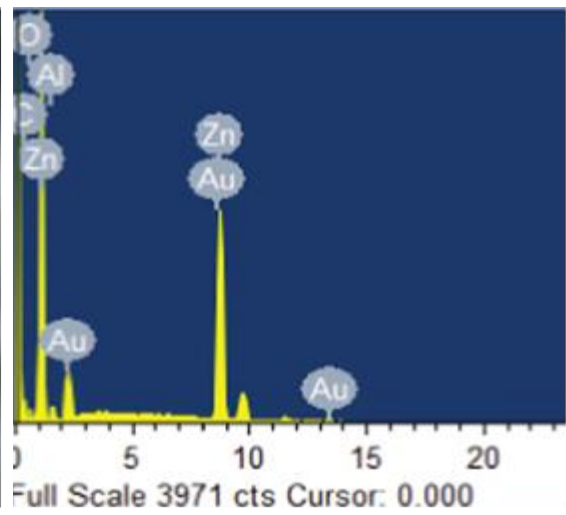
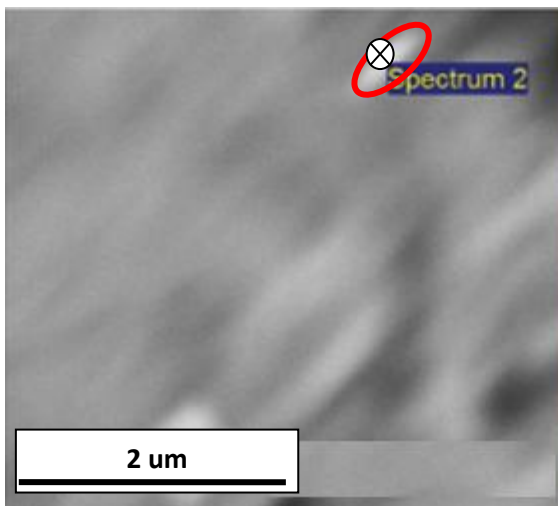












Anexo 10

Comparación de composición del agua real y simulada para ambas muestras (valores en moles).

	Real m1	Sim m1 minerales agua	Sim m1 minerales roca
Ag	2.33E-08	8.62E-12	9.27E-12
Al	2.71E-07	6.28E-08	3.71E-06
B	3.28E-07	4.63E-05	4.63E-05
Ba	2.93E-08	1.82E-11	1.82E-11
Ca	1.42E-05	1.27E-04	1.27E-04
Cl	4.80E-04	2.04E-06	7.05E-05
Co	4.92E-09	1.80E-12	3.39E-07
Cr	1.09E-08	3.78E-08	1.27E-09
Cu	1.81E-08	1.57E-07	1.57E-07
F	5.79E-06	1.32E-06	1.32E-06
Fe	1.06E-07	1.11E-08	1.29E-10
K	4.09E-04	1.90E-05	1.90E-05
Li	5.91E-08	2.16E-09	2.16E-09
Mg	4.24E-05	3.15E-09	2.14E-04
Mn	8.56E-08	1.82E-07	1.82E-07
N	9.35E-05	8.30E-05	8.30E-05
Na	7.48E-05	1.79E-04	1.79E-04
Ni	6.20E-08	1.70E-07	1.70E-07
Pb	3.57E-10	4.83E-12	4.83E-12
Pd	1.41E-10	1.49E-05	1.88E-12
Rb	1.24E-08	5.85E-12	5.85E-12
S	7.29E-06	2.19E-05	2.19E-05
Sr	4.32E-08	5.71E-12	5.71E-12
Zn	7.49E-08	1.53E-09	1.53E-09

	real m2	Sim m2 minerales agua	Sim m2 minerales roca
Ag	8.58E-08	1.47E-11	9.27E-12
Al	5.78E-07	2.86E-07	3.71E-06
B	4.00E-07	4.63E-05	4.63E-05
Ba	2.73E-08	1.82E-11	1.82E-11
Ca	3.64E-05	1.27E-04	1.27E-04
Cl	6.01E-04	3.34E-10	7.05E-05
Co	2.38E-06	7.81E-07	3.39E-07
Cr	1.79E-08	9.15E-08	1.27E-09
Cu	8.58E-08	2.01E-05	1.57E-07
F	7.90E-09	1.32E-06	1.32E-06
Fe	3.13E-07	7.67E-05	1.29E-10
K	7.21E-04	1.90E-05	1.90E-05
Li	4.76E-08	2.16E-09	2.16E-09
Mg	8.02E-05	7.14E-11	2.14E-04
Mn	4.38E-08	1.82E-07	1.82E-07
N(5)	4.28E-06	8.30E-05	8.30E-05
Na	8.44E-05	1.79E-04	1.79E-04
Ni	5.96E-08	1.70E-07	1.70E-07
Pb	1.02E-09	4.83E-12	4.83E-12
Pd	1.41E-10	1.99E-05	1.88E-12
Rb	1.71E-08	5.85E-12	5.85E-12
S(6)	8.12E-06	2.19E-05	2.19E-05
Sr	7.19E-08	5.71E-12	5.71E-12
Zn	2.29E-07	1.53E-09	1.53E-09

Anexo 11

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.

Elemento	Concentración	
Cl	2.5	mg/L
Ca	5.08	mg/L
K	0.73	mg/L
Fe	0.16	mg/L
Mg	1.18	mg/L
N	1.16	mg/L
Na	4.12	mg/L
Parámetros fisicoquímicos		
T	14.33	°C
Cond	47.53	mhos/cm
pH	7.74	

Anexo 12

Especiación para las muestras de agua de Camán

Muestra 1			Muestra 2		
Fase	SI	Fórmula	Fase	SI	Fórmula
Ag	1.97	Ag	Ag	3.45	Ag
Barita	-2.6	BaSO ₄	Boehmita	1.9	AlO ₂ H
Boehmita	0.59	AlO ₂ H	Chlorargyrita	-0.8	AgCl
Cromita	2.7	FeCr ₂ O ₄	Chomita	10.35	FeCr ₂ O ₄
CoFe ₂ O ₄	4.76	CoFe ₂ O ₄	Co(OH) ₂	-4.07	Co(OH) ₂
Corindon	-2.19	Al ₂ O ₃	CoFe ₂ O ₄	16.48	CoFe ₂ O ₄
CrO ₂	-5.41	CrO ₂	CoO	-5.5	CoO
Cu	-4.33	Cu	Corindon	0.55	Al ₂ O ₃
CuCr ₂ O ₄	0.84	CuCr ₂ O ₄	CrO ₂	-2.82	CrO ₂
Cuprita	-4.78	Cu ₂ O	Cu	-1.65	Cu
Dawsonita	-4.51	NaAlCO ₃ (OH) ₂	CuCr ₂ O ₄	8.31	CuCr ₂ O ₄
Delafossita	4.47	CuFeO ₂	Cuprita	0.93	Cu ₂ O
Diasporo	1.02	AlHO ₂	Zincita	-3.62	ZnO
Eskolaita	5.92	Cr ₂ O ₃	Delafossita	10.57	CuFeO ₂
Ferrita-Cu	-4.47	CuFe ₂ O ₄	Diasporo	2.31	AlHO ₂
Ferrita-Zn	-5.33	ZnFe ₂ O ₄	Dolomita	-4.47	CaMg(CO ₃) ₂
Gibbsita	0.47	Al(OH) ₃	Eskolaita	10.25	Cr ₂ O ₃
Goethita	0.67	FeOOH	Fe(OH) ₃	-1.1	Fe(OH) ₃
Hematita	2.28	Fe ₂ O ₃	FeO	-5.95	FeO
Magnesiocromita	-1.4	MgCr ₂ O ₄	Ferrita-Ca	-2.65	CaFe ₂ O ₄
Magnesita	-5.48	MgCO ₃	Ferrita-Cu	5.49	CuFe ₂ O ₄
Magnetita	-3.85	Fe ₃ O ₄	Ferrita-Mg	-1.86	MgFe ₂ O ₄
Nantokita	-5.63	CuCl	Ferrita-Zn	5	ZnFe ₂ O ₄
Pd	4.21	Pd	Gibbsita	1.73	Al(OH) ₃
PdO	-7.83	PdO	Goethita	4.05	FeOOH
Rhodocrosita	-5.54	MnCO ₃	Yeso	-5.14	CaSO ₄ :2H ₂ O
Siderita	-5.53	FeCO ₃	H ₂ O(g)	-1.66	H ₂ O
Smithsonita	-6.32	ZnCO ₃	Hematita	9.07	Fe ₂ O ₃
Sphaerocobaltita	-6.8	CoCO ₃	Magnesiocromita	6.29	MgCr ₂ O ₄
Tenorita	-4.08	CuO	Magnesita	-3.12	MgCO ₃
ZnCO ₃ :H ₂ O	-5.82	ZnCO ₃ :H ₂ O	Magnetita	6.33	Fe ₃ O ₄
ZnCr ₂ O ₄	10.09	ZnCr ₂ O ₄	Manganita	-8.5	MnO(OH)
			Pd	3.55	Pd
			PdO	-7.76	PdO
			Siderita	-3.14	FeCO ₃
			Smithsonita	-3.82	ZnCO ₃
			Trevorita	6.37	NiFe ₂ O ₄

Anexo 13

Cálculos de alturas a partir de los parámetros R y S muestra agua 1

	CAM16S-1		CAM16S-2		CAM16S-3		CAM16S-4		CAM16S-5	
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
Fe/Mg	0.0046	0.0009	0.0046	0.0009	0.0046	0.0007	0.0046	0.0007	0.0046	0.0007
Al/Ca					170.8998	21.9870			6.4135	0.6395
Fe/Ca									9.4130	1.4297
Cr/Ni	0.0016	0.0003	0.0018	0.0004	0.0019	0.0003	0.0017	0.0003	0.0015	0.0002
Cr/Zn	0.5005	0.1137			0.7301	0.1261	2.0230	0.4237	0.2563	0.0417
Mn/Zn	0.2466	0.0442			0.1641	0.0154	0.2154	0.0285	0.3408	0.0623
Cr/Mn									0.0357	0.0057
promedio	0.1883	0.0398	0.0032	0.0006	34.3601	4.4259	0.5612	0.1133	2.3522	0.3114
			promedio general		7.4930	R				
					0.9782	S				
densidad roca (dr)		2.6								
densidad laterita (dl)		1.8								
	CAM16S-1		CAM16S-2		CAM16S-3		CAM16S-4		CAM16S-5	
	Vol r (dr/R)	Vol s (dl/S)	Vol r	Vol s	Vol r	Vol s	Vol r	Vol s	Vol r	Vol s
promedio	0.0724	0.0221	0.0012	0.0003	13.2154	2.4588	0.2158	0.0629	0.9047	0.1730
Si asumimos que S m de suelo se generaron a partir de R m de roca:										
1 m suelo	327.8939	cm	355.4793	cm	537.4668	cm	342.9978	cm	522.9343	cm
	3.2789	m	3.5548	m	5.3747	m	3.4300	m	5.2293	m
con promedio general	Vol r	Vol s								
	2.8819	0.5434								
1 m suelo	530.3108	cm								
	5.3031	m								

