

# ESTUDIO GEOQUIMICO DE LOS PRODUCTOS DE INTEMPERISMO DE LAS ROCAS ULTRABASICAS (SERPENTINITAS) EN LA PROVINCIA DE VALDIVIA, CHILE

VITEZSLAV ZAMARSKY \* *Universidad de Chile*  
HUGO CONN D. *Instituto de Investigaciones Geológicas*  
MAURICIO TABAK B. *Instituto de Investigaciones Geológicas*

## RESUMEN

En el presente trabajo, realizado en la provincia de Valdivia, se indica la composición química y mineralógica de los productos de intemperismo de rocas ultrabásicas, su enriquecimiento en níquel, cobalto y hierro, y su comparación con los productos lateríticos de los países con clima tropical o semitropical. El estudio se realizó a través de dos perfiles verticales de la corteza de intemperismo desarrollada sobre afloramientos de serpentinitas y sobre esquistos. Las muestras fueron sometidas a análisis químicos y por difracción de Rayos-X, y sus resultados fueron comparados con los conocidos para los principales yacimientos tipo residual de níquel, cobalto y hierro, en Cuba.

Los resultados geoquímicos del perfil vertical desarrollado sobre afloramientos de serpentinitas permitieron establecer que el material estudiado muestra claramente una tendencia laterítica, quedando denominadas sus partes centrales como *lateritas ferruginosas*. Los materiales intemperizados se presentan enriquecidos en níquel, cobalto y hierro; sin embargo, no se puede establecer pronósticos económicos, debido a que el estudio fue restringido a una sola zona con presencia de cuerpos ultrabásicos.

## INTRODUCCION

En el mes de Marzo de 1972 se efectuaron los trabajos de muestreo geoquímico en el área de las anomalías magnéticas "Botija" y "Tres Chiflones" entre Valdivia y La Unión con el objeto de poder ubicar las rocas ultrabásicas, cubiertas por una fuerte capa de vegetación.

Al mismo tiempo fue estudiado un perfil del afloramiento de las serpentinitas, en el cual se presenta la corteza de intemperismo bien desarrollada.

Como objetivo de este estudio geoquímico se tuvo presente lo siguiente:

- a) Estudiar la composición química y mineralógica de los productos de las serpentinitas.
- b) Llevar a cabo una comparación de los productos de intemperismo de las rocas ultrabásicas en el sur de Chile con los productos lateríticos de los países con clima tropical o semitropical.
- c) Basándose en los resultados de este estudio geoquímico, ajustar el sistema del muestreo geoquímico local, sobre todo en esta primera etapa de prospección, para que las mues-

tras de suelo tomadas en el terreno fueran más representativas.

- d) Determinar si los productos de intemperismo estudiado representan la corteza de meteorización "fósil" o si se trata de un suelo reciente.
- e) En base a los perfiles estudiados, averiguar la existencia de posibilidades económicas respecto a contenidos en níquel, cobalto y hierro de los productos de intemperismo de las rocas ultrabásicas.

## BREVE DESCRIPCION DEL ORIGEN, COMPOSICION MINERALOGICA Y QUIMICA DE LOS PRODUCTOS DE INTEMPERISMO LATERITICO DE LAS ROCAS ULTRABASICAS Y LOS FENOMENOS GEOLOGICOS FUNDAMENTALES QUE INFLUYEN EN EL DESARROLLO DE LOS MISMOS

### 1. Aspectos Generales de los Productos de Intemperismo Laterítico en las Rocas Ultrabásicas.

A la producción de níquel y cobalto, se está dando en el mundo una gran atención. Esta situación se debe a una gama muy amplia en la utilización de ambos metales. Brevemente, es posible nombrar la utilización fundamental del níquel en las aleaciones ferrosas y no ferrosas (Ni-Cu; Ni-Mo), en super aleaciones utilizadas para la fabricación de turbinas, máquinas extractoras de gran tamaño, y las columnas de destilación que funcionan en ambientes muy agresivos y bajo condiciones de parámetros termodinámicos específicos muy elevados. El níquel se emplea en tipos de acero específicos que se utilizan para vehículos pesados, equipos de extracción y demás equipos que funcionan bajo parámetros de alta presión. Además del uso del níquel en los materiales decorativos y anticorrosivos, tiene empleo en la preparación de catalizadores. Otros usos del níquel se encuentran en la industria cerámica, de cristal y en las industrias químicas. Aprovechando el níquel como un metal bacteriorresistente, tiene empleo en técnicas sanitarias. Igualmente es de mucha importancia su relación con la industria militar, donde el níquel representa un metal estratégico.

El cobalto, al igual que el níquel, tiene aprovechamiento amplio en muchas ramas de la industria. Uno

\* Profesor checoslovaco en visita al Departamento de Geología

de sus usos principales se encuentra en la fabricación de aleaciones y aceros especiales, porque confiere a éstos gran resistencia. En la industria química, el cobalto tiene uso primordial como catalizador en los procesos de hidratación, desulfatación, oxidación y reducción. Además, la importancia del cobalto está creciendo sobre todo en relación con su aprovechamiento en la técnica atómica y nuclear moderna, en lo que a aplicaciones médicas de ésta se refiere.

A escala mundial se está planificando un gran aumento de la explotación de los minerales de níquel y cobalto para el próximo decenio, y con este fin en muchos países se está llevando a cabo un gran esfuerzo de prospección e investigación de nuevos yacimientos; no sólo de los de una ley de metal muy alta, sino especialmente de yacimientos con una ley relativamente baja, pero con reservas de mineral elevadas y de una relativa fácil explotación de las mismas.

Debido a esta situación, llegan al primer plano de interés no sólo los yacimientos niquelíferos tipo sulfúrico sino también aquellos cuyos mantos se originaron por medio del intemperismo (meteorización) laterítico de las rocas ultrabásicas.

## 2. Génesis de Yacimientos Tipo Residual de Níquel, Cobalto y Hierro. Su Zonación y Composición Mineralógica.

Los yacimientos tipo residual de níquel, cobalto y hierro están relacionados con la corteza de intemperismo laterítico de las rocas ultrabásicas (predominantemente serpentinitas). El intemperismo laterítico puede realizarse en condiciones de climas tropical y semitropical, principalmente a causa del cambio de período seco a lluvioso. El intemperismo laterítico de las rocas ácidas produce finalmente las lateritas propiamente tales, mientras que de las rocas ultrabásicas se originan principalmente productos de intemperismo enriquecidos por el hierro y el níquel.

El intemperismo laterítico representa, fundamentalmente, un largo proceso químico que se desarrolla sobre todo por medio de la circulación del agua relativamente caliente tanto en sentido vertical como horizontal. En el período de lluvia predomina la circulación del agua en sentidos horizontal y vertical, mientras que en el período seco predomina el movimiento del agua en sentido vertical tendiendo a acumularse paralelamente al rumbo de la roca subyacente.

Las rocas ultrabásicas (serpentinitas) son, de acuerdo con su composición mineralógica, muy inestables

en las condiciones de intemperismo laterítico y por lo tanto en esta zona supérgena se están descomponiendo fácilmente. El mayor desarrollo de la descomposición química surge predominantemente en los minerales del grupo de la serpentina. La descomposición total a óxidos libres, hidróxidos y carbonatos se desarrolla sólo bajo las condiciones de intemperismo laterítico. En la zona superior de las serpentinitas se acumulan el hierro y aluminio, y en el ambiente de oxidación principalmente se originan los óxidos e hidróxidos de Al y Fe. Por lo tanto, en este último ambiente predominan los minerales de Fe debido a que las rocas ultrabásicas en sí no contienen un porcentaje elevado de  $Al_2O_3$ .

Durante el avance del proceso de intemperismo laterítico de la roca ultrabásica madre, se empieza a desarrollar un horizonte diferente por estructura, textura y composición química de la roca madre. Este horizonte, cuyo material representa los productos de intemperismo laterítico de la roca ultrabásica, llega a un máximo de su evolución cuando demuestra una clara zonalidad vertical. En base a la composición de la roca y el carácter macroscópico, es posible dividir en el perfil vertical de la corteza de intemperismo de las rocas ultrabásicas, las siguientes zonas:

- I. Zona superior de intemperismo rojo (zona de oxidación).
- II. Zona intermedia de intemperismo verde (zona de reducción).
- III. Zona inferior de intemperismo gris (zona de lixiviación).
- IV. Roca madre subyacente más o menos compacta.

Las zonas denominadas difieren unas de otras por su composición química, mineralógica, y por la estructura y color de los productos de intemperismo.

**Zona superior de intemperismo rojo (zona de oxidación).** Esta zona está constituida por un material generalmente blando de color rojo y café rojizo, y contiene sobre todo los hidróxidos y óxidos de hierro como hematita, hidrohematita, maghemita ( $\gamma-Fe_2O_3$ ), en forma de granos irregulares o redondeados de un tamaño de hasta 2 cm, y goetita, hidrogoetita y minerales de aluminio, representados principalmente por gibbsita (hidrargillita) y ocasionalmente caolinita. La parte superior de este horizonte tiene color rojo-violáceo, su espesor es relativamente pequeño y muy variable, y sus contenidos en níquel son bajos. La parte inferior de la misma zona está constituida por un material blando de color café-rojizo. Está caracterizada

por una ley de níquel más alta ( a veces sobrepasa 1% de Ni) y generalmente por un espesor mayor, que la parte superior. Por sus condiciones de origen, la zona ha sido nombrada como la "zona de oxidación".

**Zona mediana de intemperismo verde (zona de reducción).** Bajo la zona de oxidación en el perfil vertical, se encuentra la zona de intemperismo verde, donde de acuerdo con las condiciones de reducción se produce un notable cambio de color, debido a la disminución y descomposición de los minerales predominantes en la zona anterior. El níquel bivalente, al igual que el magnesio, es muy movable y, bajo las condiciones de reducción, se produce su migración en sentido vertical. El mayor contenido de níquel se observa generalmente en la parte superior de esta zona, donde el metal está relacionado con los minerales de los grupos montmorillonita (nontronita) y clorita. El material intemperizado de esta zona tiene por lo general color verde o verde-amarillento.

**Zona inferior de intemperismo gris (zona de lixiviación).** En la zona de intemperismo gris (zona de lixiviación) se encuentra un mayor contenido de formas de sílice y en lugares donde el pH sobrepasa el valor

8 (ambiente básico) y la presión parcial de  $\text{CO}_2$  cae en el rango  $10^0$  a  $10^{-6,8}$ , se originan los carbonatos de Mg (magnesita, hidromagnesita). En esta zona predominan los minerales hidratados del grupo de la serpentina. En condiciones favorables se originan minerales que van de la antigorita níquelífera a nepouíta. La zona de intemperismo gris está a veces caracterizada por la presencia de vetas finas, lentes y nidos de garnierita, los cuales muy a menudo alcanzan hasta la roca ultrabásica madre compacta.

La distribución esquemática de los minerales principales en el perfil vertical de intemperismo de las rocas ultrabásicas está ilustrada en la figura 1.

Como ya fue señalado, la división del perfil de intemperismo laterítico de las rocas ultrabásicas en zonas características, está basada principalmente en el cambio de períodos lluvioso a seco, y a la presencia de agua con alto contenido en  $\text{CO}_2$ . El período lluvioso tiene carácter "descendente" en la migración de los elementos disueltos en el agua. Al mismo tiempo, el agua enriquecida en bicarbonato, lixivia la serpentinita madre y las partes inferiores del perfil del intemperismo. En el período seco, el carácter de mi-

Fig. 1.- DISTRIBUCION ESQUEMATICA DE LOS MINERALES PRINCIPALES EN EL PERFIL VERTICAL DEL INTEMPERISMO DE LAS ROCAS ULTRABASICAS.

|   | Serpentinita madre compacta, fracturada. | Zona del intemperismo gris-zona de lixiviación. | Zona del intemperismo verde-zona de reducción. | Zona del intemperismo rojo-zona de oxidación. |
|---|--|---|--|---|
| Oxidos, óxidos hidratados e hidróxidos de Fe, Al (hematita, magnetita, goetita, gibbsita y otros) |  |   |  |   |
| Minerales del grupo de montmorillonita (principalmente nontrita)                                  |  |   |  |   |
| Minerales del grupo de clorita (clinoclora, pennina, talcoclora)                                  |  |   |  |   |
| Minerales hidratados del grupo de serpentina (antigorita níquelífera, carbonatos de Mg).          |  |   |  |   |
| Varias formas de $\text{SiO}_2$ de bajo grado de cristalización. (Calcocenia, opala).             |  |   |  |   |

gración de los elementos disueltos en el agua tiene sentido "ascendente". Principalmente los elementos hierro y níquel están migrando a las partes superiores del perfil de intemperismo en forma metacolooidal, probablemente gracias a una capa protectora muy fina de material orgánico (especialmente en caso de capas de intemperismo de poco espesor) o en forma de soluciones. Para el hierro, por ejemplo, y de acuerdo con los valores Eh y pH, éste se encuentra en estado bivalente en forma de  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$  y sube a las partes superiores del perfil, es decir, se está acumulando en las zonas de intemperismo rojo y verde. En las partes superiores del perfil de intemperismo (cuando existen grandes espesores), enriquecidas en oxígeno, ocurre la oxidación y la nontronitización. La zona de intemperismo rojo contiene exceso de oxígeno proveniente tanto del existente en el aire como del disuelto en el agua, y está contribuyendo a formar las condiciones de oxidación. Según Garrels y Christ (1965), en soluciones de pH entre 6,8 y 8,3, el níquel se libera, dependiendo de su concentración en la solución (coeficiente de actividad), y siendo independiente del potencial Eh. Por lo tanto, en la zona de intemperismo rojo, ya que los valores de pH están por debajo del valor 6,8, el níquel permanece en la solución. La concentración de níquel en esta zona se basa predominantemente en la absorción por los hidróxidos de hierro. Los contenidos de níquel en esta zona muestran valores siempre menores en relación con la zona de reducción (figs. 2 y 3) lo que concuerda con lo expuesto.

La nontronita se origina principalmente en un medio de Ph relativamente estrecho: 7,0 - 7,5, independientemente del potencial Eh. Estos valores de Ph para la nontronita, que representa el mineral fundamental de níquel en la zona de intemperismo verde, concuerdan con el intervalo en el cual el níquel se libera de la solución. En este ambiente - zona de intemperismo verde - y de acuerdo con su concentración en la solución, el níquel es absorbido por las partículas coloidales de nontronita, pasando posteriormente a constituir nontronita cristalina. Además, como consecuencia de una alta actividad de absorción de la nontronita cristalina por el níquel, éste continúa siendo absorbido por este mineral. Este es el mecanismo, que contribuye a que en la zona de intemperismo verde, se encuentren altas concentraciones de níquel.

Por un mecanismo similar, las cloritas - además de la nontronita - también contribuyen a elevar las concentraciones de níquel en esta zona. Por su composición química, las cloritas que corresponden a la serie de clinoclora-pennina-talcoclora (Kudelásek y Mátl,

1970) son las que más favorablemente contribuyen a este proceso. Las cloritas se encuentran en la parte inferior de la zona de intemperismo verde y el origen de ellas está ligado a la presencia de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . La presencia de hierro bivalente en las cloritas indica el mayor grado de reducción del ambiente en comparación con el que origina la nontronita.

La distribución típica de los elementos fundamentales en el perfil vertical de la corteza de intemperismo laterítico de las rocas ultrabásicas está ilustrada en las figuras 2 y 3, las que presentan los perfiles "clásicos" de los yacimientos tipo residual de hierro, níquel y cobalto, en Cuba.

La división del perfil de la corteza de intemperismo laterítico de las rocas ultrabásicas antes expuesta, debe comprenderse sólo esquemáticamente y puede relacionarse a un tipo de mineral autóctono ideal. En realidad, como consecuencia de la redepositación de los productos de intemperismo, de un cambio posible de las condiciones climatológicas y finalmente de la posibilidad que un perfil de intemperismo no haya evolucionado plenamente, se obtiene que, en muchas ocasiones, en vez de la zonalidad clásica tengamos perfiles incompletos o de diferente ordenación de las zonas individuales.

Durante un cambio posterior de las condiciones climatológicas, desfavorable para el origen de los productos de intemperismo laterítico, puede producirse en ellos una estabilización determinada en cuanto a la asociación mineralógica. Estos productos de intemperismo laterítico pueden designarse como "fósiles". Como ejemplo de los mismos pueden servir los yacimientos niquelíferos residuales en los Urales (URSS), Szklary (Polonia), St. Egedien (RDA), Kremze, y Bojanovice (Checoslovaquia) y otros.

### 3. Composición Química de los Productos de Intemperismo.

La figura 2 muestra la composición química promedio de los productos de intemperismo laterítico de las rocas ultrabásicas (de la corteza de intemperismo) en el yacimiento Pinares de Mayari, ubicado en la costa norte de la provincia de Oriente en Cuba, donde de acuerdo con los datos obtenidos en el perfil geológico se distinguieron las siguientes zonas:

- I. parte superior de la zona de intemperismo rojo (zona de oxidación), parte ferruginosa.
- II. parte inferior de la zona de intemperismo rojo (zona de oxidación).
- III. zona de intemperismo verde (zona de reduc-

Fig. 2.- DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES EN EL PERFIL VERTICAL DE LA CORTEZA DE INTEMPERISMO DEL YACIMIENTO PINARES DE MAYARI, CUBA.

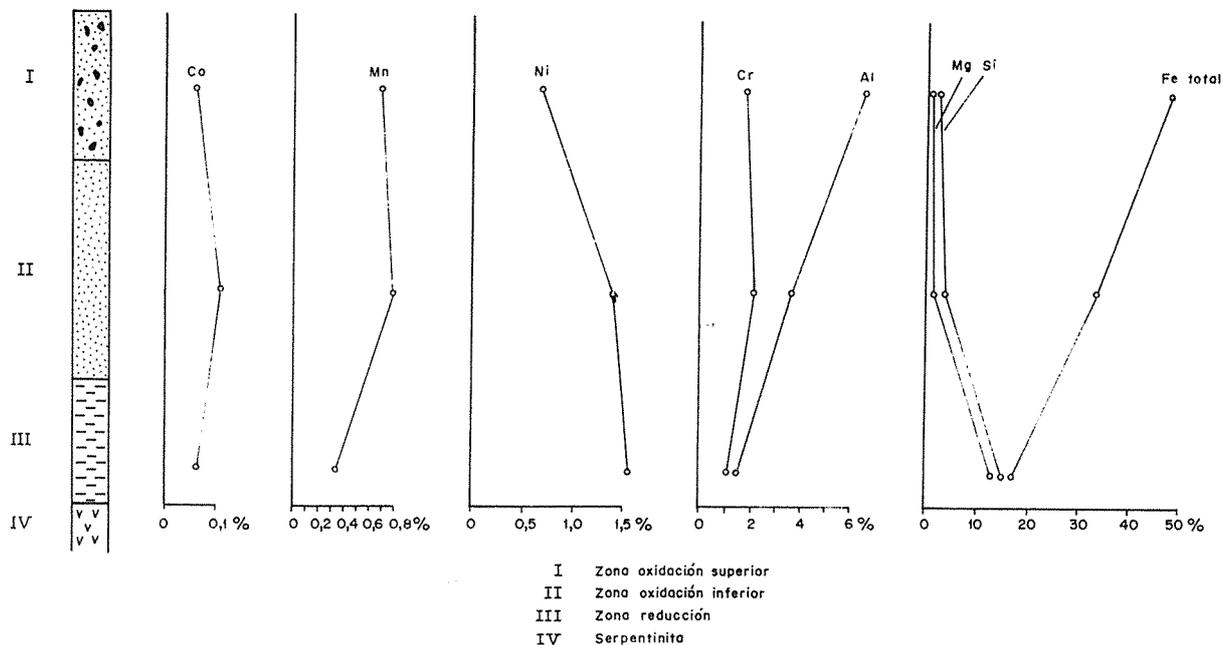
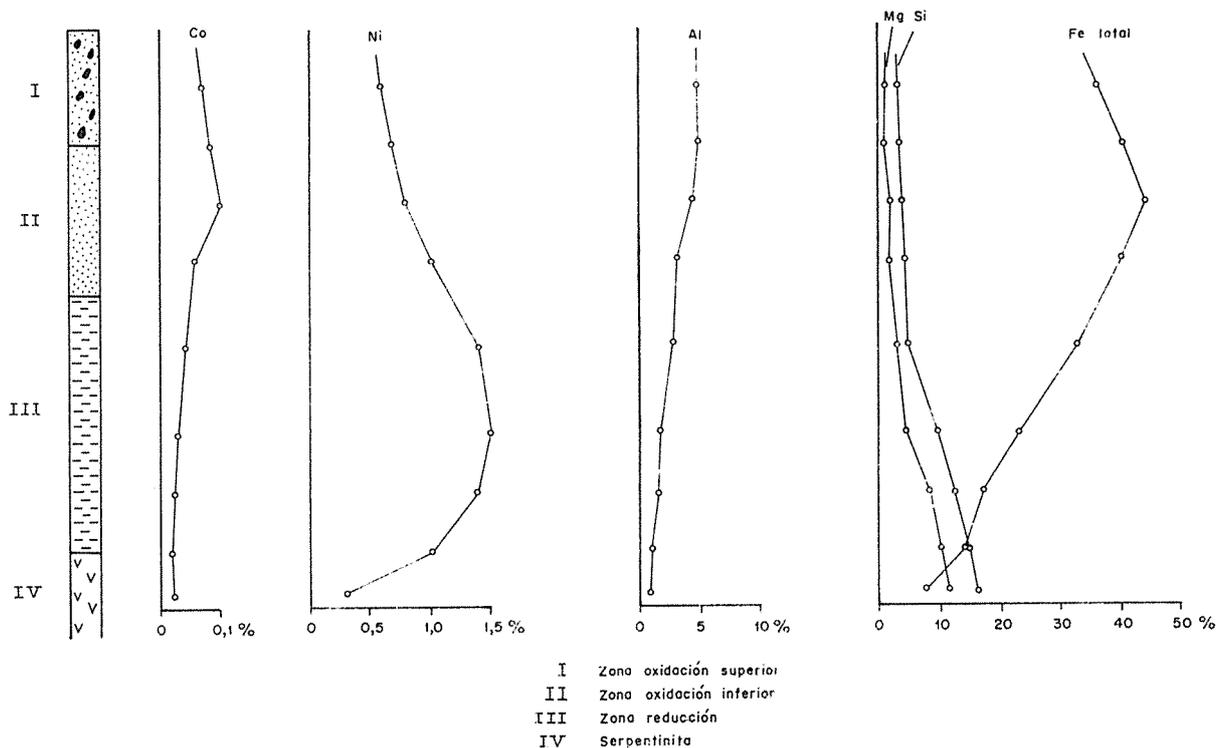


Fig. 3.- DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES EN EL PERFIL VERTICAL DE LA CORTEZA DE INTEMPERISMO DEL YACIMIENTO NICARO, CUBA.



ción).

#### IV. serpentinita-madre compacta.

La figura 3 muestra la distribución de los elementos principales de la corteza de intemperismo laterítico en el yacimiento Nicaro en la parte norte de la provincia de Oriente en Cuba. Las curvas de los elementos individuales fueron trazadas en base de los datos promedios de los análisis químicos en el perfil geológico detallado.

- I. parte superior de la zona de intemperismo rojo parte ferruginosa (zona de oxidación),
- II. parte inferior de la zona de intemperismo rojo (zona de oxidación).
- III. zona de intemperismo verde (zona de reducción).
- IV. serpentinita madre poco descompuesta.

#### 4. Principales Factores Geológicos que Influyen en el Origen y Desarrollo de la Corteza de Intemperismo.

Durante la evolución y el desarrollo del proceso geoquímico de intemperismo laterítico de las rocas ultrabásicas juegan un papel importante una serie de factores de carácter generalmente geológico, de los cuales dependen directamente el tipo de desarrollo y la composición mineralógica (zonalidad) de los horizontes de la intemperización. Los factores principales son los siguientes:

- Grado de tectonización del macizo ultrabásico.
- Contactos de los cuerpos ultrabásicos con las rocas vecinas.
- Relieve inicial de las rocas ultrabásicas.
- Presencia de rocas sedimentarias sobreyacentes.
- Tipo original de la roca ultrabásica - madre.

**Tectónica del macizo (cuerpo ultrabásico).** El sistema tectónico y estructural del macizo ultrabásico juega un papel muy significativo en el origen y desarrollo de la corteza de intemperismo. En el estado inicial de la evolución de los horizontes de intemperismo los sistemas de las líneas tectónicas actúan como una matriz, la que puede predestinar el tipo de desarrollo de la corteza de intemperismo de la roca ultrabásica-madre. La evolución puede, según el carácter, la orientación, y la abundancia de las zonas de debilidad en la roca madre, dar origen a tipos de cortezas de intemperismo extremadamente diferentes en cuanto a ordenación espacial. Así, entonces, puede originarse el tipo de "área" (tipo dimensional) y el tipo "lineal" (con una sola dimensión predominante).

Las dislocaciones, es decir las zonas mecánicamente

heterogéneas, representan, en condiciones de intemperismo laterítico, un ambiente relativamente muy favorable en relación al origen de los productos de intemperismo de la roca madre, debido a que en estas zonas aumenta el contenido de oxígeno disuelto en el agua.

A lo largo de las zonas tectónicas pueden entonces formarse acumulaciones del material intemperizado en cantidades mayores, formando varios tipos de cuerpos en forma de cono, de bolsillo y otros, contrastando con la forma y espesor de los productos de intemperismo en las partes de la roca madre no afectada por las fracturas tectónicas. El relieve de la roca madre durante el avance del proceso de intemperismo, en partes afectadas por la tectónica, se desarrolla en forma más irregular. Debido a esto, en el perfil de intemperismo se pueden distinguir los bolsones llenos del material blando intemperizado y las serpentinitas compactas, las que se presentan muy a menudo en forma de columnas.

El avance del intemperismo laterítico de las rocas ultrabásicas (serpentinitas) en las zonas con dislocaciones, afectado por la fuerza de gravedad, se ilustra esquemáticamente en la figura 4.

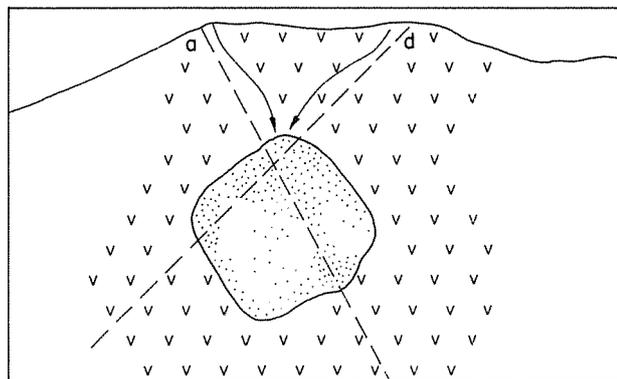
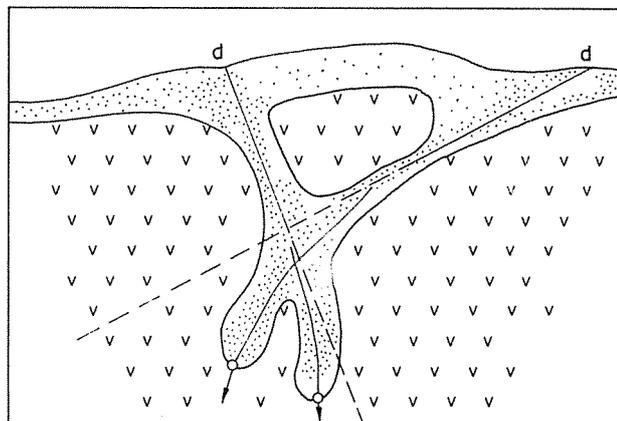
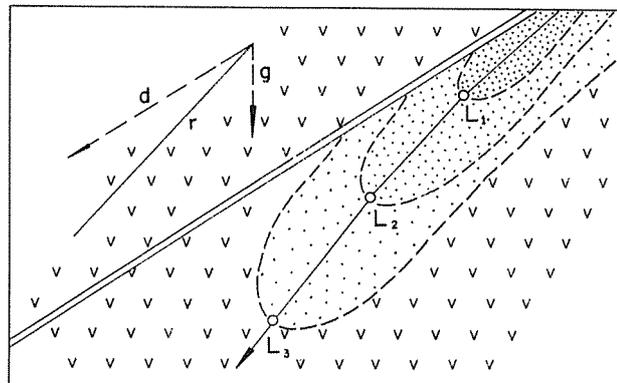
El hecho de que el intemperismo en las zonas tectónicas da lugar a un relieve moderno (secundario) de la morfología inicial de la roca ultrabásica madre, es muy importante desde el punto de vista económico. En muchas ocasiones se comprobó que con este fenómeno pueden relacionarse varios errores en el cálculo de reservas de los productos útiles de intemperismo y pueden producirse grandes pérdidas del mineral explotado.

**Contactos entre el macizo ultrabásico y las rocas vecinas.** Así como la intensidad del proceso de intemperismo depende de la predisposición tectónica, existe una influencia significativa de la zona de contacto de la roca ultrabásica madre con las rocas encajadoras.

El proceso de intemperismo en estas zonas alcanza profundidades relativamente mayores. Este factor geológico puede servir como una de las causas por las cuales los productos de intemperismo pueden conservarse parcialmente en el ambiente de la fuerte denudación posterior. Como ejemplo pueden servir los yacimientos residuales fósiles de níquel y hierro, producto de intemperismo laterítico de las serpentinitas, en la parte sur de Moravia (Checoslovaquia).

Estos yacimientos tienen la forma de cuenca, pro-

Fig. 4.- ORIGEN DE LOS BOLSONES DE LAS MENAS RESIDUALES EN DEPENDENCIA CON LAS DISLOCACIONES.



LEYENDA

- d Dislocación
- g Gravitación
- r Rumbo resultante del intemperismo
- $L_1, L_2, L_3$  Puntos límites de las etapas sucesivas del intemperismo
-  Menas residuales
-  Serpentina
-  Grieta abierta-cerrada

longada de acuerdo con el rumbo de la predisposición tectónica. Los mayores espesores de la corteza de intemperismo están conservados en las zonas del contacto de serpentinitas con las rocas metamórficas encajadoras (fig. 5).

**Relieve inicial de las rocas ultrabásicas.** El relieve geomorfológico inicial del macizo (cuerpo) ultrabásico intemperizado tiene una gran influencia en la ampliación de la corteza de intemperismo. Este fenómeno puede ser causa de que se originen sólo algunas zonas en el perfil vertical de intemperismo y por lo tanto el perfil "clásico" no se complete.

Como un ejemplo típico del papel del relieve original del macizo ultrabásico puede servir la evolución diferente de los yacimientos de hierro, cobalto y níquel en la parte norte de la provincia de Oriente en Cuba (yacimiento Nicaro, Moa y Pinares de Mayari), figura 6.

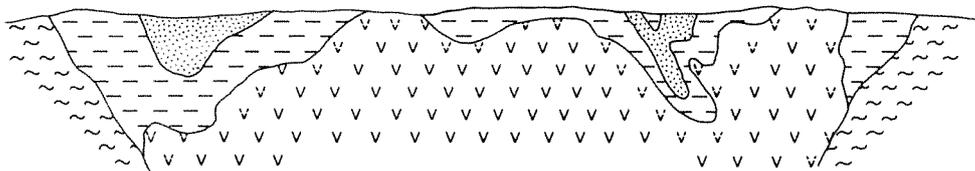
Yacimiento Pinares de Mayari. Está situado en el extremo occidental en la provincia de Oriente. Los productos de intemperismo de las serpentinitas enriquecidas en níquel, cobalto y hierro, están desarrollados en un área de unos 120 kilómetros cuadrados, localizándose en una *amplia meseta*, cuyas alturas alcanzan unos 500-600 m sobre el nivel del mar. La meseta,

durante la evolución de la corteza de intemperismo, *ha rebasado* el relieve local.

Para los horizontes de intemperismo de este yacimiento son característicos:

- 1<sup>o</sup> El espesor del perfil vertical de los productos de intemperismo es casi constante y relativamente bajo en las partes centrales del yacimiento (el tipo autóctono de las menas del mineral), mientras los espesores son mayores en las partes del borde del yacimiento, es decir, en lugares con un relieve suavemente inclinado, donde además del tipo autóctono de la corteza de intemperismo está presente el tipo alóctono, originado por medio de una redepositación de los productos de intemperismo.
- 2<sup>o</sup> La presencia de una zonalidad relativamente pobre del perfil vertical de la corteza de intemperismo en las partes centrales del peneplano, donde en general está desarrollada sólo la zona de intemperismo rojo, y una zonalidad más variable en los bordes del yacimiento, donde está desarrollada además de la zona de oxidación, la zona de intemperismo verde (zona de reducción).
- 3<sup>o</sup> El relieve de las peridotitas serpentinizadas y las serpentinitas subyacentes es casi regular.

Fig. 5.- ESQUEMA DEL DESARROLLO DE LA CORTEZA DEL INTEMPERISMO EN LOS CONTACTOS DEL MACIZO ULTRABASICO CON LAS ROCAS VECINAS



L E Y E N D A

- |  |                               |
|--|-------------------------------|
|  | Zona del intemperismo rojo    |
|  | Zona del intemperismo verde   |
|  | Serpentinita                  |
|  | Rocas metamórficas (gneises). |

- 4<sup>o</sup> Los contenidos en níquel de los productos de intemperismo son relativamente bajos, pero constantes.

Yacimiento Nicaro. Está desarrollado en una área de 100 km<sup>2</sup> y se encuentra situado en terreno muy montañoso, cuyo *rebasamiento* relativo alcanza hasta 500 m. El perfil de la corteza de intemperismo se caracteriza por lo siguiente:

- 1<sup>o</sup> Una gran variabilidad del espesor de los productos de intemperismo. Están aquí presentes los tipos autóctono y alóctono del mineral.
- 2<sup>o</sup> La zonalidad del perfil de intemperismo se presenta completa (están aquí presentes todas las zonas de intemperismo laterítico, incluso la transición continua de los productos de intemperismo en la serpentinita - madre compacta subyacente).
- 3<sup>o</sup> El relieve de las serpentinitas subyacentes se presenta en forma muy irregular.
- 4<sup>o</sup> Los contenidos de los componentes útiles (níquel, cobalto y hierro) son significativamente variables en relación con el yacimiento Pinares de Mayari y tienen una ley promedio de níquel más elevada (1,3 - 1,4<sup>o</sup>/o de Ni).

Yacimiento Moa. Está localizado en la parte oriental de la provincia de Oriente y comprende un área de unos 200 km<sup>2</sup>. El yacimiento está desarrollado en un *terreno poco montañoso* con *rebasamiento* relativo máximo de unos 300 m. Los rasgos característicos de este yacimiento son los siguientes:

- 1<sup>o</sup> En el yacimiento Moa, de acuerdo a su relieve, predominan los productos de intemperismo alóctonos como consecuencia de una fuerte re-depositación posterior. Los mantos lateríticos se presentan generalmente con mayores espesores, que a veces alcanzan hasta 30 m.
- 2<sup>o</sup> La zonalidad del perfil vertical de intemperismo se presenta en forma completa. La zona superior del perfil (zona de oxidación) representa la parte más desarrollada mineralógicamente. La estratificación se observa en capas horizontales y diagonales.
- 3<sup>o</sup> El relieve de las rocas ultrabásicas subyacentes (serpentinitas) se observa desarrollado en forma bastante regular, y el macizo serpentinitico presenta relieve tipo terraza.
- 4<sup>o</sup> El contenido en níquel de los productos de intemperismo es poco variable, con valores relativamente bajos.

Los perfiles esquemáticos de los yacimientos mencionados y el desarrollo de los productos de intemperismo están ilustrados en la figura 6.

De la comparación de estos tres yacimientos se observa que la división geomorfológica inicial del macizo ultrabásico intemperizado tiene una gran influencia en la formación de los productos de intemperismo, no sólo en cuanto a la cantidad, sino también en cuanto a composición mineralógica y química de los mismos.

**Presencia de rocas sedimentarias sobreyacentes.** La presencia de rocas sedimentarias sobreyacentes en los productos de intemperismo laterítico impiden, en gran medida, la denudación de estos productos. Como ejemplo pueden servir las menas níquelíferas en la parte sur de Moravia (Checoslovaquia) en las cuales existen actualmente sólo unos relictos de la continua y bien desarrollada antigua corteza.

La presencia de estos relictos de la antigua corteza de intemperismo está muy bien relacionada con la ocurrencia de las rocas sedimentarias sobreyacentes que, en este caso, están constituidas por gravas, arenas y arcillas de probable edad cretácica inferior.

**Tipo original de la roca madre ultrabásica.** Pocos años atrás predominaba entre los investigadores que estudiaban los procesos de la meteorización laterítica, la opinión de que los contenidos de níquel se presentaban con valores altos en tales productos, cuando ellos se originaban predominantemente de las serpentinitas derivadas de un magma peridotítico no diferenciado con un contenido promedio de níquel relativamente elevado. Las serpentinitas, derivadas de las peridotitas de un magma básico diferenciado, tienen por lo general los contenidos promedios más bajos, debido a que la mayor parte del níquel se encuentra en los minerales sulfúricos (pentlandita) durante el proceso de lixiviación magmática. De acuerdo a lo expuesto la corteza de intemperismo laterítico, en estos tipos de serpentinitas, muestra generalmente contenidos en níquel de escaso valor económico.

En los yacimientos residuales en Moravia Sur (Checoslovaquia) se estudió la correlación entre el tipo de la roca madre primaria, su contenido en níquel, y la concentración en níquel de los productos de intemperismo laterítico tipo autóctono. Las serpentinitas estudiadas, de los yacimientos níquelíferos de Moravia, corresponden predominantemente a harzburgitas, harzburgitas duníticas y en menor parte a iherzolitas

duníticas y wehrlitas, de las cuales han sido derivadas. Los contenidos en níquel de la roca madre en los yacimientos individuales no difieren significativamente (la diferencia máxima en cuanto al contenido en níquel presenta intervalos entre 0,0 y 0,10<sup>o</sup>/o en Ni), pero si difieren significativamente los contenidos en níquel en los productos de intemperismo.

Por lo expuesto anteriormente, se deduce que el grado de concentración en níquel de los productos de intemperismo laterítico no depende tanto de la composición química y del tipo de la roca ultrabásica madre, sino, y probablemente en escala mayor, de las condiciones y el grado de avance del propio proceso de intemperismo laterítico.

BREVE RESUMEN DE LOS YACIMIENTOS NIQUELIFEROS MUNDIALES TIPO RESIDUAL. SU COMPOSICION MINERALOGICA Y LEYES DE CONCENTRACION

Los minerales tipo "laterítico" de níquel, cobalto

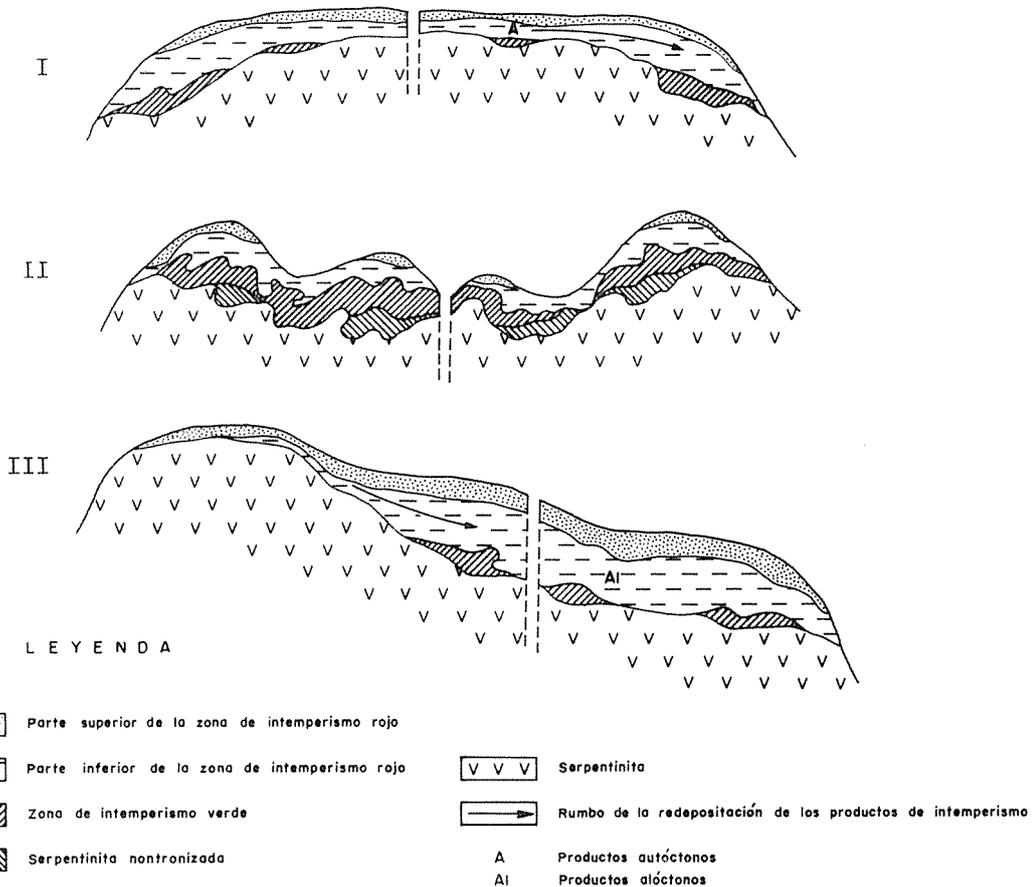
y hierro representan el potencial más grande conocido en el mundo en comparación con otros tipos de menas niquelíferas. A los más grandes yacimientos de este tipo pertenecen los de Cuba, Nueva Caledonia, Unión Soviética, Filipinas e Indonesia. Ultimamente han sido prospectados por métodos de exploración geológica nuevos yacimientos, especialmente en Brasil, E.E.U.U., Venezuela, República Dominicana, India, Pakistán, Japón, Madagascar, Grecia, Puerto Rico, Sudáfrica, Australia, Guinea, etc. La concentración promedio de mineral encontrada en los yacimientos prospectados es la siguiente: 1<sup>o</sup>/o de Ni; 0,05<sup>o</sup>/o de Co; 40<sup>o</sup>/o de Fe total.

A continuación se expone una breve información sobre los yacimientos mundialmente conocidos:

Cuba

En la actualidad son conocidos tres yacimientos de

Fig. 6.- PERFILES ESQUEMATICOS DE LOS YACIMIENTOS PINARES DE MAYARI (I), NICARO (II), Y MOA (III).



gran importancia económica: Pinares de Mayari, Nicaragua y Moa, ubicados en la parte norte de la provincia de Oriente. Su explotación se efectúa a "rajo abierto".

Las reservas de estos yacimientos representan aproximadamente unos 700 millones de toneladas de mineral con ley de 1,0% en níquel. Los principales minerales que contienen la mineralización en níquel son los siguientes: nontronita, montmorillonita ferruginosa, clorita, antigorita, óxidos e hidróxidos de hierro.

#### Nueva Caledonia (E.E.U.U.)

Las informaciones publicadas indican reservas de níquel metálico que representan unos 16 millones de toneladas del metal en el yacimiento y unas 220 millones de toneladas de mineral con contenido promedio de 0,2% en cobalto.

Predominantemente, el níquel se encuentra relacionado a los hidrosilicatos, de los cuales la garnierita es el mineral principal.

#### Unión Soviética

Grandes reservas de mineral se conocen en el área central de los montes Urales y en el sur de Siberia (en las inmediaciones de la cuenca del río Yenisey). Los yacimientos de níquel, cobalto y hierro pertenecen a la corteza de intemperismo laterítico de las serpentinitas de edad jurásica. El níquel está relacionado a hidrosilicatos.

#### Filipinas

Las informaciones existentes suponen reservas de mineral que representan unos 120 millones de toneladas con una ley aproximada de 1,0% en níquel. Además existen grandes reservas de mineral con ley de níquel más baja.

#### Puerto Rico

Estudios realizados suponen reservas de mineral "laterítico" que representan unas 100 millones de toneladas con una ley promedio de 1,0% en níquel.

#### Borneo, Celebes

La ley promedio de níquel conocida por medio de la exploración geológica alcanza a 0,5%. Las reservas de mineral no están especificadas.

#### Estados Unidos de Norteamérica

Los yacimientos niquelíferos tipo laterítico residual están ubicados sobre todo, en el área de Oregón y sus alrededores. De acuerdo a la información geológica existente la ley de níquel en el mineral alcan-

za en varios lugares el 1,5%. Las reservas totales no han sido publicadas.

Los principales minerales que contienen mineralización en níquel son los siguientes: montmorillonita, nontronita, antigorita, y óxidos e hidróxidos de hierro.

#### Grecia

El yacimiento niquelífero está situado en el área de Atalanda y Larimna. Según lo publicado, las reservas totales contienen unos 100.000 toneladas de níquel metálico proveniente de minerales niquelíferos-ferruginosos y 12.000 toneladas que proviene de silicatos. La ley promedio en níquel del mineral tipo silicato alcanza a 2%.

#### Polonia

El yacimiento niquelífero está situado en el área de Kotniel-Szklary y representa un producto de intemperismo laterítico de las serpentinitas.

La composición química promedio del mineral explotado es la siguiente:

|                                |        |                                |        |
|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|
| Ni                             | 0,7 %  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,65 % |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16,5 % | MgO                            | 16,0 % |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,5 %  | SiO <sub>2</sub>               | 52,6 % |

#### Albania

La composición química promedio del mineral niquelífero explotado es la siguiente:

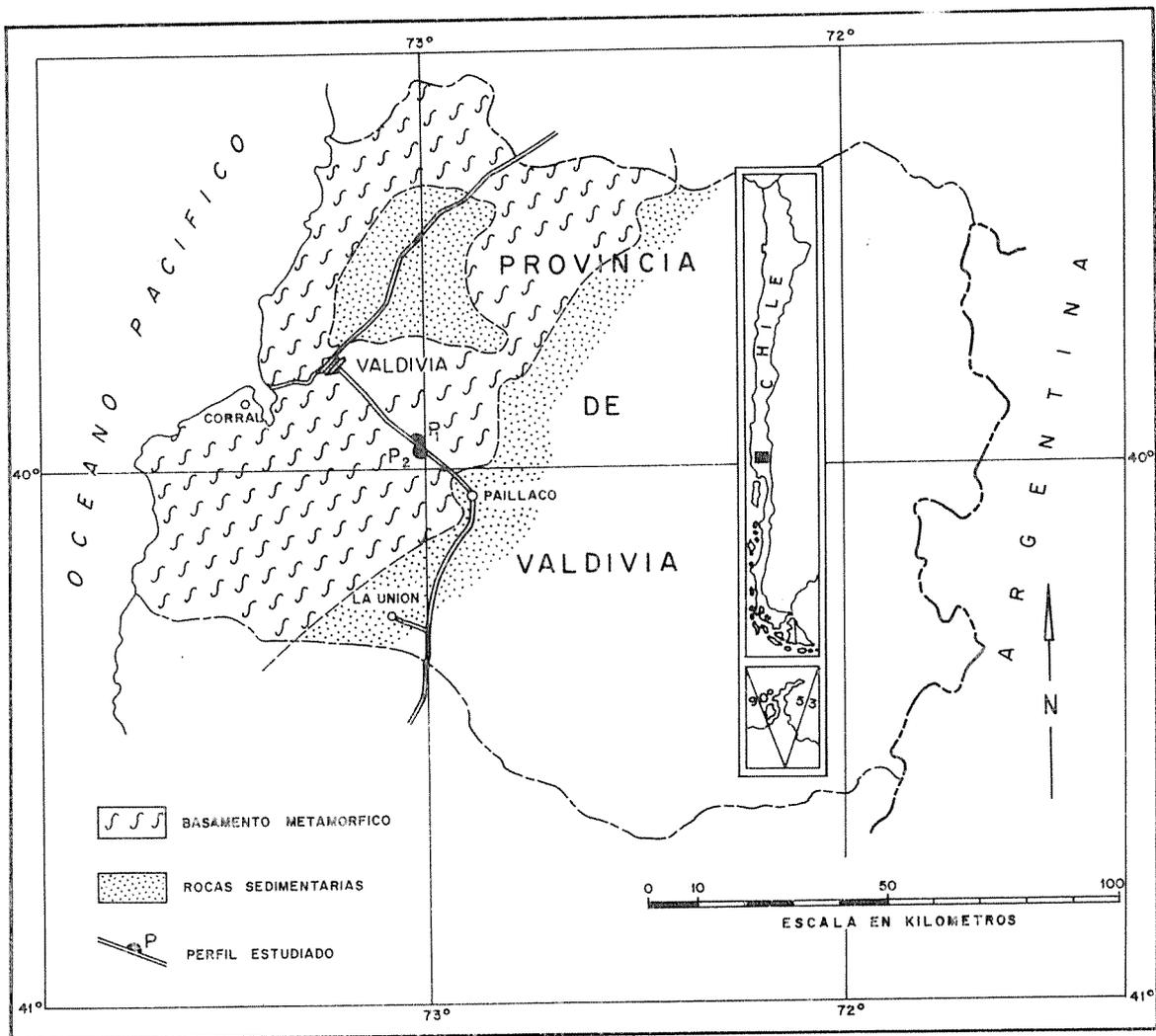
|                                |              |                  |               |
|--------------------------------|--------------|------------------|---------------|
| Ni                             | 0,9 - 1,02 % | MnO              | 0,3 - 0,6 %   |
| Co                             | 0,06 %       | CaO              | 3 %           |
| Fe total                       | 53 - 69 %    | MgO              | 1,7 %         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4 - 6 %      | SiO <sub>2</sub> | 5,98 - 6,61 % |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,5 %        |                  |               |

Los datos presentados tienen un carácter orientativo.

### ESTUDIO GEOQUIMICO DE PERFILES DE INTemperismo EN SERPENTINITAS, PROVINCIA DE VALDIVIA

De acuerdo con el objetivo de este trabajo se ha estudiado el perfil vertical (P1) de la corteza de intemperismo ubicado en el corte de la carretera principal entre Valdivia y Paillaco, en el kilómetro 28 (fig. 7). La localidad estudiada muestra una sucesión bien desarrollada de los productos de meteorización de las rocas ultrabásicas de esta zona. Con el fin de comparar el tipo y composición de los suelos desarrollados

Fig. 7.- MAPA DE UBICACION



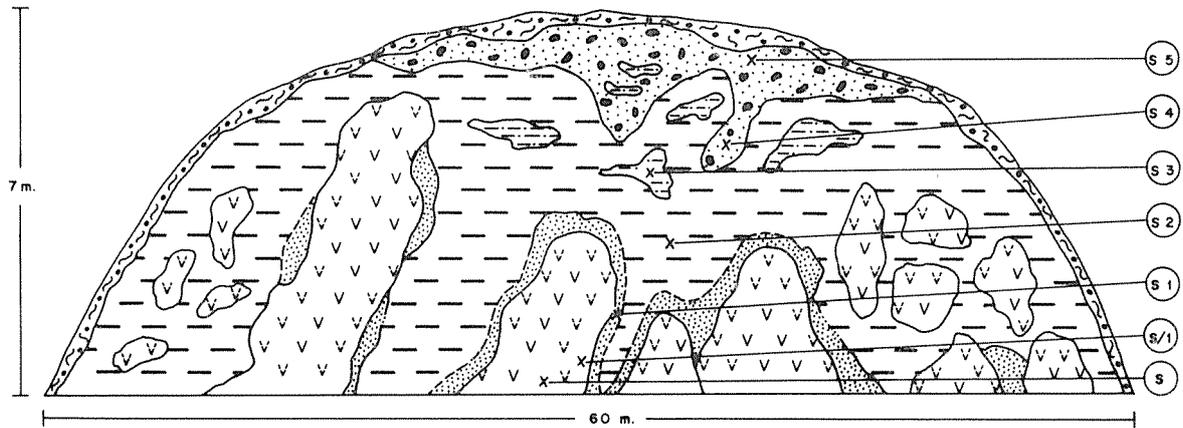
en esta localidad con los tipos y suelos desarrollados en los esquistos de los alrededores se ha estudiado, de modo orientativo, el perfil P2 ubicado a un kilómetro al sureste del perfil P1, sobre la misma carretera.

### 1. Descripción Geológica de los Perfiles y su Minerología.

**Perfil de intemperismo en serpentinitas (P1).** La base del perfil P1 (fig. 8) está formada por roca ultrabásica fresca. La serpentinita, es decir, la roca-madre, es de color gris oscuro a gris verdoso. En la masa principal de la roca es posible observar macroscópicamente piroxenos de un tamaño promedio de 1/2 mm y minerales del grupo de la serpentina. Además se observan piroxenos cuyo tamaño alcanza hasta 4 mm y no muestran una orientación predominante. Los piroxenos de gran tamaño están diseminados en la roca en

concentraciones mayores. La serpentinita se presenta compacta y maciza, con fracturamiento fino relleno ocasionalmente con carbonatos los que aparecen en forma de vetas con un espesor máximo de unos 0,2 mm. En los planos de fisura de la serpentinita están a menudo presentes minerales secundarios en forma de fibras y hojas compactas con una orientación paralela color verde-oliva o verde-gris (picrolita). La presencia de estos minerales proviene de un movimiento tectónico anterior relativamente fuerte, el que posiblemente estaría relacionado con la división de la serpentinita en forma de bloques y favorecería también el origen y tipo de meteorización supérgena posterior de la roca ultrabásica madre. La serpentinita que se observa en la base del perfil estudiado, presenta bloques compactos con forma de columnas cónicas y rodeados de los productos de intemper-

Fig. 8.- PERFIL ESQUEMATICO (P I) DE LA CORTEZA DE INTEMPERISMO DESARROLLADA EN SERPENTINITAS (Zamarsky et al, 1972).



LEYENDA

|  |                        |   |  |
|--|------------------------|---|--|
|   | Serpentinita fresca    |    | Laterita ferruginosa                           |
|   | Serpentinita lixiviada |    | Parte superior de la zona de intemperismo rojo |
|   | Zona de transición     |    | Suelo superficial                              |
|  | Laterita ferruginosa   |  | Muestras tomadas                               |

rismo; en cambio en la zona inferior a media de la corteza de meteorización se presentan cuerpos aislados de menor tamaño. El límite irregular entre la roca madre (serpentinita) y sus productos de intemperismo demuestran un ambiente de oxidación supérgena característico. La muestra S es la roca madre.

Sobre la roca madre, en una capa de 20 a 40 cm de espesor, se encuentra la serpentinita lixiviada. La serpentinita lixiviada es la muestra S/1. En comparación con la serpentinita fresca, no alterada, esta roca se presenta de color blanco grisáceo y su decoloración se debe a la lixiviación. El carácter general de esta roca es heterogéneo, presentando núcleos irregulares de serpentinita no alterada de color gris claro, con una densa red de vetillas y zonas más claras de color verde y verde amarillento, que se deben a la aparición de los óxidos e hidróxidos de Fe. La serpentinita lixiviada conserva aún restos de la textura de la roca fresca, pero ésta se presenta más desintegrada. En partes más alteradas y relativamente más frágiles aparecen acumulaciones de óxidos de manganeso de color negro o gris oscuro. Este material se presenta como pseudo-

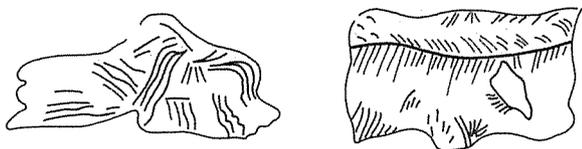
morfosas de formas cúbicas que alcanzan hasta 0,5 cm y se disponen, tanto aisladamente como agrupadas, en forma de nidos o pequeños filones prolongados, paralelamente al rumbo de las fracturas (fig. 9).

La serpentinita lixiviada da origen a un material pelítico, texturalmente heterogéneo, de color amarillo con tonos café. Este horizonte, representado por la muestra S1, aparece poco desarrollado formando una capa más o menos continua de un espesor limitado y que corresponde a la parte inferior de la corteza de intemperismo. La transición entre la serpentinita lixiviada y este horizonte aparece generalmente continua, y está compuesta principalmente por una fase macroscópicamente cristalina y una fase formada por material pelítico. La fase cristalina, texturalmente hojosa, consiste de frágiles agregados de clorita y antigorita fuertemente alterados por la intemperización. Las hojas de clorita se presentan de colores amarillento-café claro, gris claro, gris verdoso e incoloras. La textura de los agregados se representan esquemáticamente en la figura 9. Los agregados de hojas, que alcanzan hasta 1 cm de largo, conforman un carácter

Fig. 9.- ESTRUCTURAS TÍPICAS DE LAS MUESTRAS DEL PERFIL. (P 1)

MUESTRA S 1

Estructura de hojas



3 : 1

MUESTRA S 2

Parte pelítica blanda

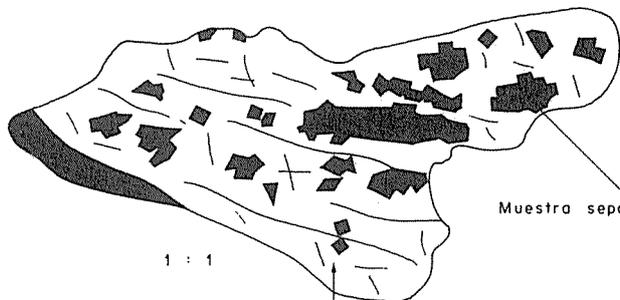


3 : 1

Oxidos de Mn.

Minerales alterados con estructura de hojas.

MUESTRA S/1

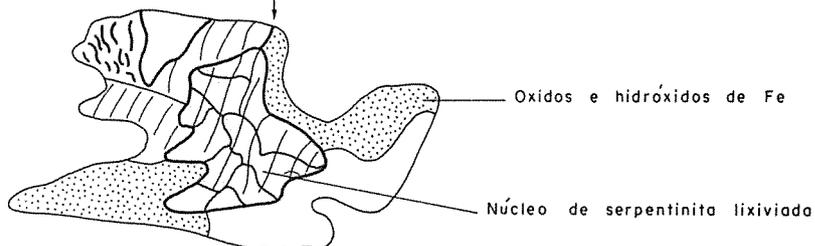


1 : 1

Muestra separada S/1-1

S/1 Serpentina alterada (lixiviada)

DETALLE



4 : 1

Oxidos e hidróxidos de Fe

Núcleo de serpentinita lixiviada

“textural” al material en este horizonte. En los agregados descritos aparecen a menudo finas láminas de (0,2 mm de espesor) de óxidos de manganeso de color negro con tono azul oscuro. Además de las formas más cristalinas descritas aparecen esporádicamente en este horizonte unas hojitas blancas de gibbsita que alcanzan tamaños de 1 mm. La fracción pelítica, de color amarillo, amarillo-café, tiene carácter arcilloso y está íntimamente ligada con los agregados cristalinos de clorita.

La muestra S2 representa la masa principal de la corteza de intemperismo. Este horizonte intermedio, el más desarrollado en el perfil estudiado, aparece en forma irregular, con espesores variables, formando bolsones entre los bloques de la serpentinita, y está constituido por material arcilloso de color amarillo claro. Este horizonte, en comparación con el horizonte inferior, representa los “ocres texturales” caracterizados por el aumento de fracción pelítica. La fase cristalina está compuesta por agregados hojosos, los que están fuertemente alterados, principalmente a óxidos e hidróxidos de hierro. La gibbsita, en forma de hojitas blancas cuyo tamaño alcanza hasta 2-3 mm, aumenta su concentración relativa. En la fracción pelítica de color café amarillento aparecen a menudo pequeñas concentraciones de óxidos de manganeso de color gris oscuro o negro de forma irregular (laminitas, lentes microscópicos, nidos). La textura general del material intemperizado de este horizonte principal está ilustrada esquemáticamente en la figura 9.

En las partes superiores del horizonte de los “ocres texturales” aparecen acumulaciones en forma de lentes pequeños o cuerpos irregulares de un material blando, pelítico, de color amarillo a pardo oscuro. La muestra S3 representa este material. En la masa principal de este material se encuentran numerosas laminitas, lentes y cuerpos irregulares microscópicos, partículas finamente granuladas y en forma de riñones, constituidas por óxidos de manganeso. Las observaciones realizadas indican que las partículas negras o gris oscuras están ligadas con la masa principal de óxidos e hidróxidos de hierro.

En este material no se observa la fracción macroscópicamente cristalina, y en estado seco la textura se presenta porosa.

La parte superior de la corteza de intemperismo se observa formada por dos zonas macroscópicamente diferenciables, estando la inferior constituida por un material blando de color café oscuro, y la superior (superficie del perfil) formada por un material blan-

do de color café rojizo, más heterogéneo que la anterior. La muestra S4 representa al material de la zona inferior y la muestra S5 representa al material de la zona superior.

Este horizonte, formado por estas dos zonas, se presenta como una capa de espesor variable, a veces en forma de bolsones, en donde se observa una notable disminución de las partículas de óxidos de manganeso. Otra característica de este horizonte es la presencia de restos de serpentinita lixiviada, conjuntamente con granos de cuarzo y fragmentos de esquistos sericíticos, provenientes de las inmediaciones, la mayor abundancia de restos vegetales y la ausencia de partículas de óxidos de manganeso. En cambio, la zona inferior (muestra S4) se caracteriza por estar compuesta por un material más homogéneo constituido por óxidos e hidróxidos de hierro y restos de partículas de óxidos de manganeso, y por la ausencia de fragmentos de esquistos y partículas de cuarzo.

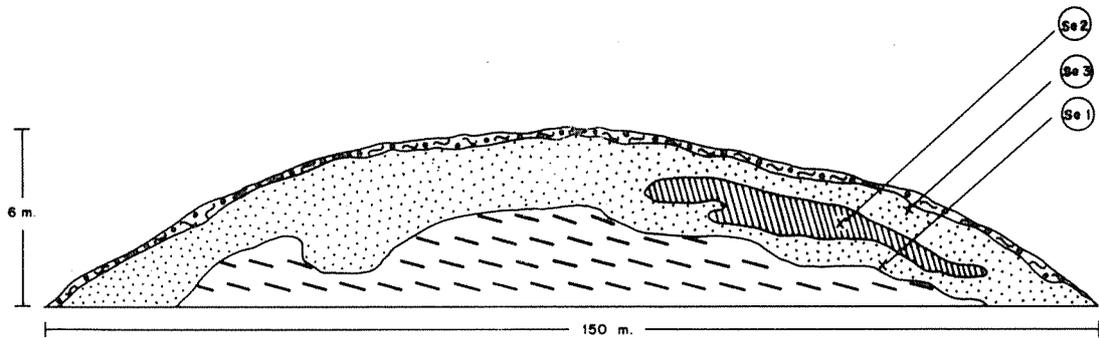
**Perfil de intemperismo en esquistos sericíticos (P2).** De la corteza de intemperismo de los esquistos sericíticos (perfil comparativo P2) se han tomado 3 muestras representativas (fig. 10). La muestra Se1 representa la parte inferior del perfil del suelo. Esta capa está constituida por un material arcilloso, muy poroso, de color amarillo o crema. Se observa la formación de canalitos por la superposición de los poros.

En la masa blanda principal aparecen hojitas blancas de sericita, las que alcanzan hasta el tamaño de 0,1-0,2 mm. Además se observan finas partículas irregulares de óxidos de manganeso de color gris acero, las que se encuentran en escasa cantidad y distribuidas irregularmente.

La muestra Se2 representa la parte central de este perfil vertical. Esta parte está formada por un material pelítico de color café oscuro el cual al secarse forma grietas poligonales de contracción. En la masa principal están presentes formas irregulares de color crema, compuestas sólo por la fracción pelítica y lentes de color amarillo limitados bruscamente por el material café oscuro. El material de la muestra contiene también numerosos pequeños fragmentos de esquistos subyacentes, de granos de cuarzo, y una gran cantidad de materia orgánica.

La muestra Se3 representa la superficie del suelo estudiado. El material de la muestra se presenta de color café claro. Consiste en una masa pelítica en la que aparecen formas irregulares de color crema, fragmentos de esquistos de pequeño tamaño y finas ho-

Fig. 10.- PERFIL ESQUEMATICO VERTICAL (P2) DEL SUELO DESARROLLADO EN LOS ESQUISTOS SERICITICOS.



LEYENDA

|   |                          |
|---|--------------------------|
|  | Esquistos sericiticos    |
|  | Masa principal del suelo |
|  | Horizonte intermedio     |
|  | Suelo superficial        |
|  | Muestras                 |

jas constituidas por sericita. Al igual que en las muestras anteriores se encuentra presente la materia orgánica.

## 2. Muestreo

Las muestras seleccionadas en terreno, correspondientes a los perfiles P1 y P2 ya descritos, contienen aproximadamente un 30% de humedad en estado natural. Con el fin de eliminar la mayor parte de esta humedad y evitando contaminarlas, fueron mantenidas en recipientes especiales durante el tiempo necesario.

Una vez secas las muestras se sometieron a cuarteo. La porción representativa en estado natural fue sometida a estudios macroscópicos con el fin de establecer las diferentes fases presentes. Distinguidas estas fases se procedió, en el resto de la muestra natural al estado seco, a separar macroscópicamente las fases ya ubicadas, para posteriormente estudiarlas.

Enseguida las muestras representativas (cuarteadas) fueron pulverizadas a mano en un mortero de ágata teniendo presente el evitar la posible contaminación.

De acuerdo al procedimiento anterior, las muestras que se consideran para el presente estudio, resultan ser:

|       |   |
|-------|---|
| S     | : roca madre (serpentinita fresca)                                  |
| S/1   | : serpentinita lixiviada  |
| S/1-1 | : fracción pelítica de la serpentinita lixiviada (S/1)              |
| S1    | : fracción de la zona de transición                                 |
| S1/1  | : fracción separada macroscópicamente de la zona de transición (S1) |
| S2    | : Ocre texturales   |
| S2/1  | : fracción no pelítica de la zona principal (S2)                    |
| S2/2  | : fracción pelítica de la zona principal (S2)                       |
| S3    | : lentes pelíticos en los ocre texturales                           |
| S4    | : zona inferior del horizonte superior de intemperismo rojo         |
| S5    | : zona superior del horizonte superior de intemperismo rojo         |
| S5/1  | : fracción pelítica de la zona superior (S5)                        |
| Se1   | : zona inferior del perfil de suelo (P2)                            |
| Se2   | : zona central del perfil de suelo (P2)                             |
| Se3   | : zona superficial del perfil de suelo (P2)                         |

Las muestras S, S/1, S1, S2, S3, S4 y S5 correspondientes al perfil P1 ya han sido descritas y aparecen ubicadas esquemáticamente en la fig. 8; las correspondientes al Perfil P2 aparecen ubicadas esquemáticamente en la fig. 9.

S/1-1 : Esta muestra representa la fracción pelítica, de color café grisáceo, de la parte más alte-

rada de la serpentinita lixiviada, y aparece en forma pseudomórfica de mineralizaciones anteriores.

- S1/1 : Esta muestra representa una mezcla de fases en forma de agregados hojosos, correspondiente a la muestra S1.
- S2/1 : Esta muestra representa una mezcla de fases en forma de agregados hojosos, correspondiente a la muestra S2.
- S2/2 : Esta muestra representa la fracción pelítica, de color amarillento claro, de la zona principal (S2).
- S5/1 : Esta muestra representa la fracción pelítica, de color café rojizo, de la zona superior del horizonte superior de intemperismo rojo (S5).

Las muestras fueron sometidas a análisis mediante las siguientes disciplinas: difracción de rayos X y análisis químicos.

### 3. Resultados de los Análisis Químicos y su Interpretación

Todas las muestras, correspondientes al Perfil P1 y P2, fueron sometidas a análisis químicos. Los resultados de estos análisis se muestran en las tablas 1

y 2.

Estos análisis fueron realizados en el Laboratorio Químico del Instituto de Investigaciones Geológicas por el químico Sra. Gisela Leiser Sch., bajo la dirección del Jefe del Laboratorio, Sr. Hernán Cusicanqui R.

**Corteza de intemperismo en el Perfil P1.** De los análisis químicos presentados en la tabla 1 y en la figura 11, donde está ilustrada esquemáticamente la distribución de los componentes principales a través del perfil vertical de la corteza de intemperismo, es posible distinguir la roca ultrabásica fresca y la roca lixiviada, de los productos de la meteorización, cuya transición es relativamente brusca. Los valores denotan la transición continua de la serpentinita fresca a lixiviada, ya que aumenta el contenido de  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  y  $Fe_2O_3$  y disminuye sustantivamente el contenido de  $SiO_2$  y  $MgO$ . La relación entre el contenido de hierro trivalente y bivalente, el elevado valor de Pb y la presencia de pseudomorfas de óxidos de manganeso, puede indicar cierto índice de la posible alteración parcial de la roca madre, anterior al proceso de intemperismo.

TABLA 1. Análisis químicos de serpentinitas y sus productos de intemperismo

|               | Muestras medias (°/o en peso) |        |       |       |       |       |       | Muestras separadas (°/o en peso) |       |       |       |       |
|---------------|-------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|               | S                             | S/1    | S1    | S2    | S3    | S4    | S5    | S/1-1                            | S1/1  | S2/1  | S2/2  | S5/1  |
| $SiO_2$       | 39,43                         | 37,53  | 14,16 | 6,97  | 3,09  | 7,99  | 27,99 | ---                              | 24,92 | 8,22  | 7,10  | 28,53 |
| $TiO_2$       | 0,01                          | 0,01   | 0,11  | 0,16  | 0,13  | 0,23  | 1,22  | 0,04                             | ---   | ---   | ---   | ---   |
| $Al_2O_3$     | 1,53                          | 4,18   | 14,87 | 12,25 | 8,99  | 13,19 | 22,93 | ---                              | 8,41  | 11,18 | 11,64 | 23,21 |
| $Cr_2O_3$     | 0,23                          | 0,35   | 2,64  | 2,79  | 3,29  | 1,71  | 0,28  | 0,04                             | 1,36  | 2,73  | 2,72  | 0,28  |
| $Fe_2O_3$     | 4,09                          | 8,31   | 49,62 | 59,63 | 62,33 | 56,18 | 9,25  | ---                              | 27,65 | 60,83 | 56,04 | 12,39 |
| $FeO$         | 3,11                          | 2,43   | 0,00  | 0,23  | 0,45  | 5,22  | 9,99  | ---                              | 9,69  | 0,00  | 0,27  | 7,16  |
| $MnO$         | 0,08                          | 0,08   | 0,97  | 0,98  | 1,76  | 0,68  | 0,14  | 5,04                             | 0,44  | 0,90  | 0,62  | 0,15  |
| $NiO$         | 0,25                          | 0,15   | 0,70  | 0,92  | 0,55  | 0,36  | 0,05  | 0,04                             | 0,61  | 0,92  | 0,84  | 0,05  |
| $MgO$         | 39,04                         | 33,24  | 0,45  | 0,41  | 0,22  | 0,18  | 2,21  | ---                              | 0,79  | 0,69  | 0,16  | 2,11  |
| $CaO$         | 0,18                          | 0,07   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---                              | ---   | ---   | ---   | ---   |
| $Na_2O$       | 0,44                          | 0,47   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---                              | ---   | ---   | ---   | ---   |
| $K_2O$ p.p.m. | 25                            | 17     | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---                              | ---   | ---   | ---   | ---   |
| $CoO$         | 0,01                          | 0,01   | 0,08  | 0,11  | 0,26  | 0,13  | 0,02  | 0,14                             | 0,03  | 0,10  | 0,06  | 0,02  |
| $P_2O_5$      | 0,26                          | 0,39   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---                              | ---   | ---   | ---   | ---   |
| S             | 0,138                         | 0,016  | 0,070 | 0,126 | 0,101 | 0,040 | 0,038 | ---                              | ---   | ---   | ---   | ---   |
| $H_2O^+$      | 11,08                         | 11,52  | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---                              | ---   | ---   | ---   | ---   |
| $H_2O^-$      | 0,20                          | 2,01   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---   | ---                              | ---   | ---   | ---   | ---   |
|               | 100,69                        | 100,77 |       |       |       |       |       |                                  |       |       |       |       |
| En p.p.m.     |                               |        |       |       |       |       |       |                                  |       |       |       |       |
| Cu            | 15                            | 25     | 10    | 80    | 105   | 160   | 126   | ---                              | ---   | ---   | ---   | ---   |
| Pb            | 8                             | 10     | 6     | 18    | 42    | 25    | 28    | ---                              | ---   | ---   | ---   | ---   |
| Zn            | 60                            | 53     | 280   | 234   | 4200  | 176   | 75    | ---                              | ---   | ---   | ---   | ---   |



en un perfil vertical autóctono completo. Por lo tanto, estas anomalías se consideran como un índice de la redeposición de la parte superficial de la corteza de intemperismo estudiada.

Los valores obtenidos de los elementos en trazas (Cu, Pb, Zn) son elevados, y como los datos obtenidos son escasos, no se ha llegado a conclusiones concretas.

**Corteza de intemperismo en el perfil P2.** Los resultados de los análisis químicos están presentados en la tabla 2, y en la figura 12 está representada la distribución esquemática de los componentes principales en el perfil vertical de la corteza de intemperismo.

Aunque macroscópicamente el carácter del material de este tipo de suelo se presenta similar al material del Perfil P1, los análisis químicos demostraron una diferencia notable. Esta diferencia proviene de los valores encontrados para los componentes analizados y de la distribución de ellos a través del perfil estudiado. A pesar de las diferencias generales observadas, la composición química de la muestra Se3 y S5 demuestran una similitud relativa (muestras de la parte superficial de los dos tipos de suelo). Este hecho confirma una vez más que la parte superficial del Perfil P1 no pertenece a los productos autóctonos de intemperismo.

TABLA 2. Análisis químicos de muestras de suelo de rocas metamórficas ácidas (esquistos sericíticos)

|                                | Se1    | Se2   | Se3   |
|--------------------------------|--------|-------|-------|
|                                | o/o    |       |       |
| SiO <sub>2</sub>               | 31,54  | 29,79 | 22,14 |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,36   | 1,66  | 1,68  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22,52  | 23,13 | 26,75 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,18   | 0,23  | 0,19  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14,43  | 15,52 | 17,16 |
| FeO                            | 0,99   | 1,89  | 2,30  |
| MnO                            | 0,08   | 0,06  | 0,16  |
| NiO                            | 0,04   | 0,04  | 0,04  |
| MgO                            | 1,07   | 1,24  | 0,91  |
| CoO                            | 0,01   | 0,01  | 0,02  |
| S                              | 0,074  | 0,072 | 0,068 |
|                                | p.p.m. |       |       |
| Cu                             | 75     | 75    | 75    |
| Pb                             | 41     | 30    | 39    |
| Zn                             | 66     | 78    | 65    |

#### 4. Resultados del Análisis por Difracción de Rayos X y su Interpretación

Las muestras S1, S2, S3, S4, S5, S/1-1, S1/1, S2/1, S2/2 y S5/1 fueron sometidas a estudios por difracción de rayos X. Los resultados de los análisis de estas muestras, correspondientes al Perfil P1, se muestran en la tabla 3, y su representación gráfica se encuentra en la figura 13.

La determinación de las fases mineralógicas permitieron demostrar que la masa fundamental de la corteza de intemperismo del perfil estudiado (P1) está compuesta principalmente por goetita y óxidos de manganeso, los cuales se desarrollan en la parte inferior del suelo, dan indicios de aumentar en la parte laterítica, y disminuyen significativamente en la superficie. Además, en la zona de intemperismo rojo están presentes hematita, magnetita, gibbsita y bayerita. Esta asociación de minerales es característica de la zona de oxidación de los productos lateríticos de las rocas ultrabásicas. La clorita y antigorita están presentes sólo en la parte inferior del perfil (zona de transición), y desaparecen en el horizonte laterítico. La clorita aparece nuevamente en la superficie (S5). La presencia de clorita en cantidad significativa, la de cuarzo, feldspatos, y yeso (minerales exóticos), la disminución de goetita, y la desaparición de óxidos de manganeso, en la parte superficial del perfil (S5), confirman la redeposición del material de esta zona.

Además de los estudios por difracción de rayos X y análisis químicos, las muestras al estado natural, secas y pulverizadas, fueron sometidas a una comprobación por intensidad del fluido magnético, y a manera informativa presentamos sus resultados:

| Muestra | Intensidad del fluido magnético |
|---------|---------------------------------|
| S/1-1   | ---                             |
| S1      | muy suave                       |
| S1/1    | ---                             |
| S2      | suave                           |
| S2/1    | fuerte                          |
| S2/2    | suave                           |
| S3      | muy fuerte                      |
| S4      | fuerte                          |
| S5      | menos fuerte                    |
| S5/1    | menos fuerte                    |
| Se1     | ---                             |
| Se2     | ---                             |
| Se3     | ---                             |

Fig. 12.- DISTRIBUCION DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES EN EL PERFIL VERTICAL DE SUELO DE ROCA METAMORFICA.

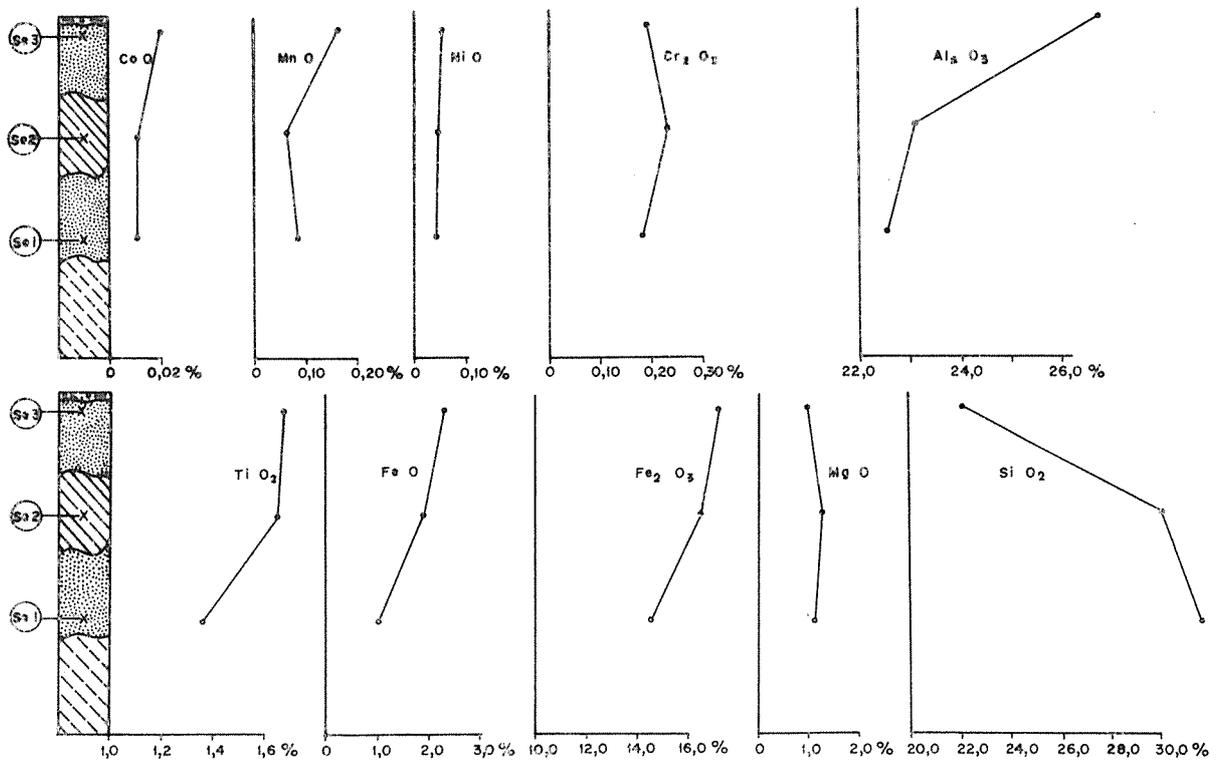
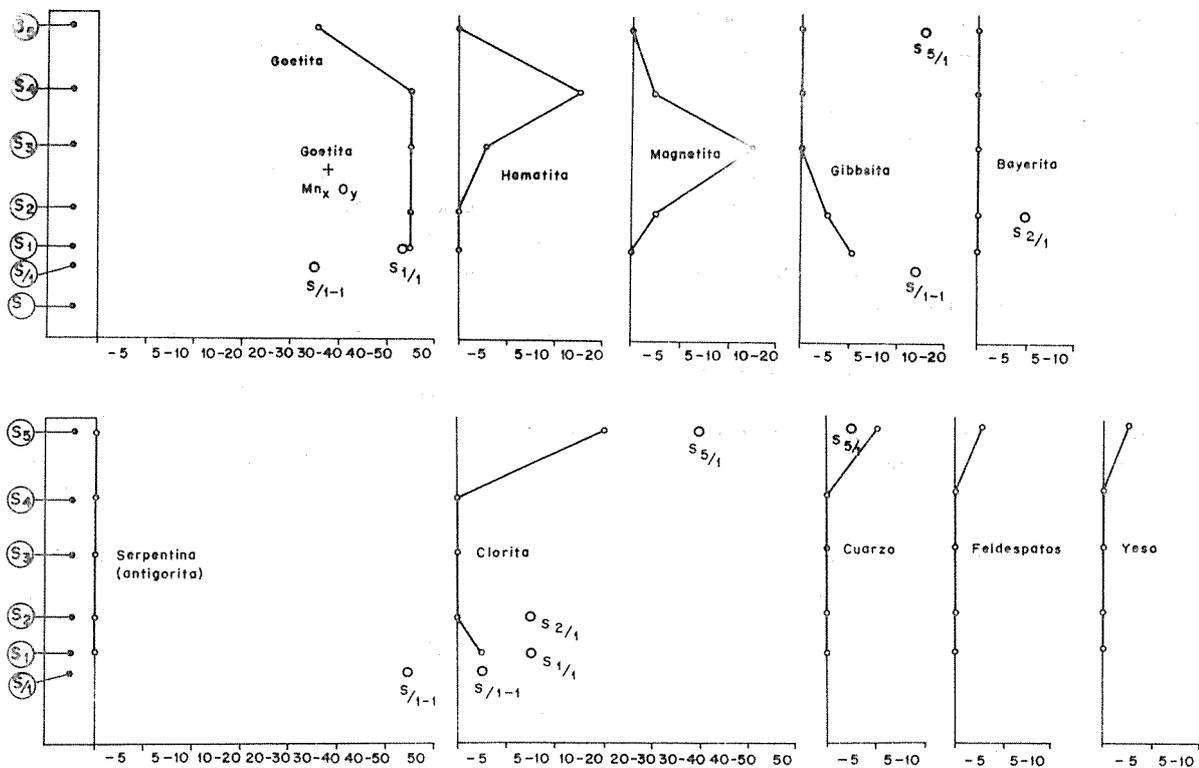


TABLA 3. Resultados de los análisis de difracción de rayos X ( en <sup>o</sup>/<sub>10</sub> aproximado de elemento presente en la muestra )

| Fase inicial                             | S1   | S2   | S3    | S4    | S5     | S/1 - 1 | S1/1 | S2/1 | S2/2 | S5/1  |
|--|------|------|-------|-------|--------|---------|------|------|------|-------|
| Goetita + Mn <sub>x</sub> O <sub>y</sub> | + 50 | + 50 | + 50  | + 50  | 30-40* | 30-40   | + 50 | + 50 | + 50 | xx    |
| Hematita                                 | xx   | xx   | - 5   | 10-20 | xx     | xx      | xx   | xx   | xx   | xx    |
| Magnetita                                | xx   | - 5  | 10-20 | - 5   | xx     | xx      | xx   | xx   | xx   | xx    |
| Gibbsita                                 | 5    | - 5  | xx    | xx    | xx     | 10-20   | xx   | xx   | xx   | 10-20 |
| Bayerita                                 | xx   | xx   | xx    | xx    | xx     | xx      | xx   | 5    | xx   | xx    |
| Serpentina                               | xx   | xx   | xx    | xx    | xx     | + 50    | xx   | xx   | xx   | xx    |
| Clorita                                  | - 5  | xx   | xx    | xx    | 20     | - 5     | 5-10 | 5-10 | xx   | 30-50 |
| Cuarzo                                   | xx   | xx   | xx    | xx    | 5      | xx      | xx   | xx   | xx   | - 5   |
| Feldspatos                               | xx   | xx   | xx    | xx    | - 5    | xx      | xx   | xx   | xx   | xx    |
| Yeso                                     | xx   | xx   | xx    | xx    | - 5    | xx      | xx   | xx   | xx   | xx    |

\* El valor de la muestra S5 corresponde sólo a Goetita.  
 xx No se detectó la fase mineral.

Fig. 13.- DISTRIBUCION ESQUEMATICA DE FASES MINERALES PRESENTES EN EL PERFIL VERTICAL (P 1).



## CONCLUSIONES

El estudio geoquímico del perfil vertical de la corteza de intemperismo ubicado entre Valdivia y Paillaco, en el sur de Chile, permite llegar a las siguientes conclusiones:

1) El material principal de la corteza de intemperismo desarrollado en las rocas ultrabásicas del basamento cristalino (serpentinitas) muestra, de acuerdo con los resultados obtenidos, un notable enriquecimiento en MnO, CoO, NiO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y una fuerte disminución en MgO y SiO<sub>2</sub>. En la parte central del perfil fueron determinados los siguientes minerales: goetita, óxidos de manganeso, hematita, magnetita, gibbsita y bayerita. En la parte inferior aparecen cloritas y minerales del grupo de la serpentina (antigorita). La comparación de las fases mineralógicas, determinadas mediante los estudios por difracción de rayos X, con los resultados de análisis químicos, muestra indirectamente la presencia de formas coloidales (limonitas) en las muestras estudiadas.

2) Comparando la composición química y mineralógica, la distribución de los componentes principales y fases de minerales presentes a través del perfil, con el carácter de la corteza de intemperismo de los yacimientos tipo residual, de Ni, Co, y Fe, es posible llegar a la conclusión de que el material estudiado muestra claramente una tendencia laterítica, quedando denominadas las partes centrales *lateritas ferruginosas*. En el perfil estudiado (P1) aparece desarrollada la zona de intemperismo rojo (zona de oxidación), mientras que la zona de intemperismo verde (zona de reducción) se presenta poco desarrollada. La falta de zonación completa demuestra que el material intemperizado alcanzó bajo grado de desarrollo lo cual indica que el tiempo necesario para el origen del intemperismo laterítico fue limitado.

3) No se han encontrado minerales de níquel, por lo que suponemos que la mayor parte del níquel está relacionada con los óxidos e hidróxidos de hierro.

- 4) No se han encontrado minerales de cobalto, por lo que suponemos que el cobalto está relacionado con los minerales de manganeso.
- 5) De acuerdo al carácter macroscópico del perfil estudiado, a su composición química y a su composición mineralógica, es posible confirmar que el material estudiado representa, en gran parte, un suelo "fósil"; en el cual se ha establecido un relativo equilibrio químico posterior. Al origen de este suelo influyó además, el clima adecuado, el relieve inicial de la serpentinita madre y su tectónica de bloques. Probablemente una parte del perfil (parte de la zona superior) fue eliminado mediante erosiones posteriores.
- 6) La presencia de fragmentos de serpentinita alterada, cuarzo y yeso, en la muestra S5, demuestra que la parte superficial representa el horizonte redepositado, mientras las partes central e inferior representan el suelo autóctono. Esta confirmación es de suma importancia y debe tenerse presente en muestreos geoquímicos cuyo objetivo sea ubicar cuerpos ultrabásicos que no afloran. Las muestras del suelo tomadas en la superficie no muestran en todos los casos valores representativos del tipo del suelo estudiado y a veces pueden ser muy similares a valores de tipos de suelo diferentes, desarrollados en los esquistos de las inmediaciones (Perfil P2). A la redepositación de la parte superficial de los suelos en la zona estudiada influyen tres factores: el clima, el cual se presenta con fuertes lluvias durante la mayor parte del año, la configuración topográfica y la dislocación tectónica de la roca ultrabásica de la región.
- 7) Con respecto a las posibilidades económicas del suelo estudiado, este estudio indica la presencia de materiales intemperizados enriquecidos en níquel, cobalto y hierro. El estudio de un solo perfil de intemperismo no permite establecer pronósticos económicos, y para llegar a tales conclusiones sería necesario realizar un estudio más amplio que comprendiese también otras zonas con presencia de cuerpos ultrabásicos.

#### BIBLIOGRAFIA

- Alexander, L.T., and J.G. Cady, 1962, Genesis and Hardening of laterite in soils: U.S. Dept. Agriculture Soil Conserv. Service Tech. Bull., p. 1282.
- De Vletter, D.R., 1965, How Cuban nickel ore has

- formed, a lesson in laterite genesis: Eng. Mining Jour., p. 84 - 87.
- Garrels, R.M., and Ch.L.Christ, 1965, Solutions, Minerals and Equilibria: Harper and Row, New York.
- Ginsburg, I.I., Rukavichnikova, I.A., 1951, Mineraly drevney kory vyvetrivania Urala: Izd. A.N. SSSR.
- Goles, G.G., 1967, Trace elements in ultramafic rocks; in P.J.Wyllie: Ultramafic and related rocks, p. 352 - 362.
- Kokta, J., Kudelásek, V., 1965, Niklonosné nerosty od Polánky: Casopis pro mineralogii, 10, n. 1.
- Krauskopf, K.B., 1967, Introduction to geochemistry: Internat. series in the earth and planetary sciences, p. 193 - 201.
- Kudelásek, V., Mátl, V., 1970, Kura zvetrávání serpentinitu na jihozápadní Morave: Informe en la conferencia en el aniversario de 90 naci. de univ. prof. dr. V. Rosický, Brno.
- Kudelásek, V., Zamarsky, V., Maroxová, I., 1967, La mineralogía del intemperismo de las rocas ultrabásicas de la costa norte de la provincia de Oriente, Nicaro, Moa: Rev. Geología, Acad. Cienc. Cuba, Año 1, n.1. p. 50 - 76.
- Kudelásek, V., Zamarsky, V., 1971, Las rocas ultrabásicas en condiciones del intemperismo laterítico: Inst. Invest. Geol., Dip. Provincial de Barcelona, v. XXVI, Dic. 1971, p. 77-91.
- Linchenat, A., Shirokova, I., 1965, Individual characteristics of nickeliferous Iron (laterites) deposits of the northeastern part of Cuba (Pinares de Mayari, Nicaro and Moa): Cong. Internat. de Geología en India.
- Schellmann, W., 1971, Über Beziehungen lateritischer Eisen-, Nickel-, Aluminium- und Manganerze zu ihren Ausgangsgesteinen: Mineral. Deposita, 6 n. 4, p. 275 - 291.
- Strnad, J., 1968, Desarrollo del conocimiento geológico y del aprovechamiento de las menas residuales niquelíferas: Rev. Tecnológica, 6, n. 1 - 2, Cuba.
- Turekian, K.K. y K.H. Wedepohl, 1961, Distribution of the elements in some major units of the earth's crust: Bull. Geol. Soc. Am. 72, p. 175 - 192.
- Vinogradov, A.P., 1962, Average contents of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the earth's crust: Geochemistry, 1962, p. 641 - 664.