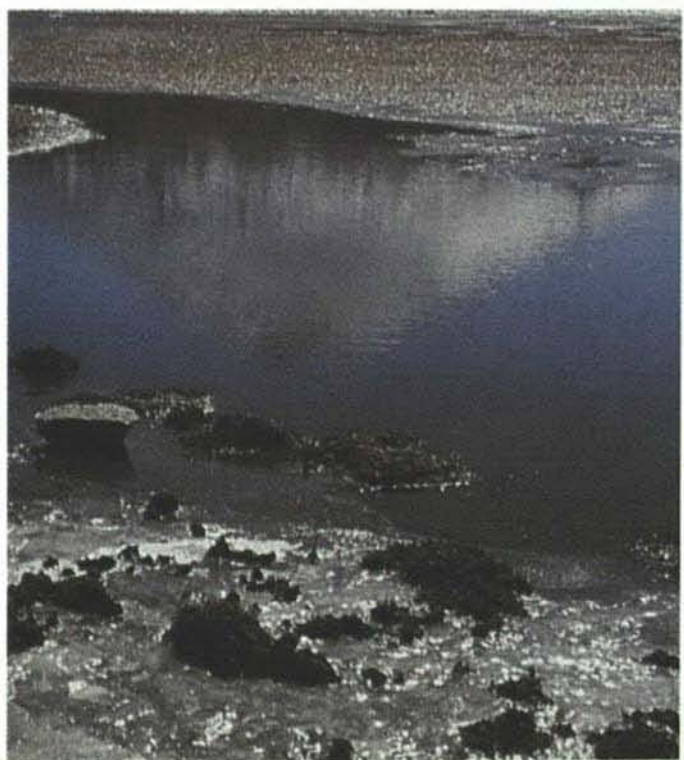


GEOLOGIA, GENESIS Y DISTRIBUCION GEOGRAFICA DE RECURSOS NO METALICOS DE CHILE

Por: Aníbal Gajardo Cubillos
Académico del Departamento de Geología
de la Universidad de Chile



INTRODUCCION

En Chile existe una gran variedad de recursos no metálicos, de amplia distribución en el territorio nacional, gran parte de los cuales han sido tradicionalmente explotados, tanto para su consumo en el mercado interno: calizas, arcillas, cuarzo, feldespato, caolín, como para abastecer mercados externos, generando importantes divisas al país: salitre, yodo, carbonato de litio, diatomita.

Desde el punto de vista de la historia y evolución de su aprovechamiento rentable, estos recursos pueden separarse en tres categorías: aquellos que están actualmente en explotación o lo han estado en forma continua o discontinua, en los últimos veinte años y que alcanza a un total variable entre 24 y 26 recursos; aquellos que estuvieron en explotación hace más de 20 años y que actualmente no se encuentran en tal situación o lo están a niveles muy reducidos y que son del orden de 10, y aquellos que nunca han sido explotados, que alcanzan a unos 6-8, entre los cuales existen algunos sin perspectivas de explotación y otros que presentan un significativo interés comercial.

Considerados en conjunto y atendiendo más a una definición geológico-genética que tecnológica, estos recursos alcanzan a un número superior a 50, que comprende:

Aridos	Fluorita
Arcillas comunes	Fosforitas
Arcillas plásticas	Grafito
Arcillas refractarias	Granate
Arcillas bauxíticas	Guano
Alunita	Litio
Alumbres	Magnesita
Andalucita	Mica
Apatita	Oxido de hierro
Arenas silíceas	Pumicita
Asbesto	Perlita
Azufre	Pirofilita
Baritina	Rocas de construcción
Bentonita sódica	Salitre
Bentonita cálcica	Sal común
Boratos	Sales de potasio

Caliza	Sales de magnesio
Calcita	Sulfato de sodio
Coquina	Tierras raras
Caolín	Titanio
Cimita	Talco
Cromita	Vermiculita
Cuarzo	Yodo
Diatomita	Yeso
Dolomita	Zeolitas
Feldespato	Zircón

Todos estos recursos se presentan en yacimientos que tienen una gran variedad de orígenes, características geológicas y distribución geográfica en el país y cuyo conocimiento actual es el producto de los estudios realizados por geólogos e ingenieros de minas, nacionales y extranjeros, esencialmente en las últimas décadas.

Dichos estudios han sido auspiciados fundamentalmente por organismos e instituciones del Estado, por universidades y centros de investigación científica y aplicada, por instituciones bancarias y crediticias y por empresas mineras y usuarias de materias primas, privadas y estatales, los que han producido un importante volumen de información.

La compilación y evaluación de esta información y la elaboración de un informe final que integre la totalidad del conocimiento geológico, minero, tecnológico y económico disponible acerca de estos recursos, ha sido la finalidad principal del estudio denominado Diagnóstico de la Minería No Metálica que se encuentra realizando INTEC Chile, a solicitud de la Corporación de Fomento de la Producción, CORFO, en cuyo desarrollo el autor ha actuado como geólogo consultor y cuyos resultados preliminares han sido expuestos en el Seminario Internacional "Perspectivas de la Minería No Metálica en Chile", realizado el 7 y 8 de junio de 1988, en Santiago.

En ese sentido, el presente trabajo se referirá a los procesos que han dado y dan origen a los yacimientos de recursos no metálicos chilenos y a la distribución de los más importantes de éstos en franjas o áreas, las que representan

importantes blancos para la prospección y evaluación geológica de los yacimientos. Estos estudios constituyen las etapas iniciales de cualquier actividad minera, en especial para aquellos recursos que presentan mejores ventajas comparativas respecto a su comercialización en los mercados internos o externos.

En consecuencia, los antecedentes geológicos expuestos en este trabajo comprenden parte de los resultados del mencionado diagnóstico, así como información geológica de propiedad del autor.

PROCESOS GENERADORES DE YACIMIENTOS DE RECURSOS NO METALICOS CHILENOS

Los procesos que han dado origen a los yacimientos de recursos no metálicos chilenos pueden agruparse en dos grandes categorías: Procesos Sedimentarios y Procesos Magmáticos, cada una de las cuales puede dividirse a su vez en diferentes procesos ocurridos durante la evolución geológica del territorio, desde el Paleozoico al Cenozoico y responsables, de acuerdo a sus características y a la influencia del medio ambiente, de la génesis, ya sea de importantes yacimientos de recursos no metálicos, como de simples manifestaciones mineralógicas sin interés comercial.

1. PROCESOS SEDIMENTARIOS

Los yacimientos relacionados con este proceso deben su origen esencialmente a la acción directa o indirecta del elemento agua y a los fenómenos de meteorización, erosión, transporte y deposición relacionados con ella. Considerados en conjunto, los procesos sedimentarios han generado y generan yacimientos de los más importantes recursos no metálicos del país, tanto para uso doméstico como para exportación.

Pueden distinguirse cuatro tipos de procesos sedimentarios responsables de la principal mineralización no metálica sedimentaria en Chile: Procesos Sedimentarios Clásticos, Procesos Sedimentarios Biogénicos

Procesos Sedimentarios Evaporíticos

Procesos de Meteorización.

1.1. Procesos Sedimentarios Clásticos

Corresponden a aquellos procesos que incluyen el transporte y depositación de materiales líticos fragmentales, provenientes de la meteorización y erosión de rocas preexistentes de muy variada naturaleza.

Desde el punto de vista de la génesis de recursos no metálicos en el país, estos procesos dan origen principalmente a los yacimientos de áridos, arcillas plásticas, arcillas comunes, arenas silíceas y arenas titaníferas, siendo los principales agentes del transporte en cuanto a la selección de los materiales involucrados, los fluviales y eólicos y los más importantes ambientes de depositación, los fluviales, lacustres y marinos litorales.

Típicamente los yacimientos de estos recursos consisten en cuerpos estratificados, de muy diferentes espesores y distribución areal que presentan diversos grados de compactación y tamaños de sobrecarga.

En el caso de los áridos, los mejores tipos de depósitos serán aquellos que se dispongan como parte de sedimentos de terrazas fluviales, como sedimentos de cauce actual y como sedimentos lacustres, ambientes también muy favorables para la formación de yacimientos de arcillas plásticas cerámicas y de arcillas comunes.

Para las arenas silíceas y arenas titaníferas, los ambientes de sedimentación más importantes son los ambientes litorales y supralitorales marinos, hasta donde los sedimentos han llegado transportados principalmente por cauces fluviales y han experimentado y experimentan en la actualidad rearrreglos eólicos, conformando depósitos tipo duna.

Los factores geológicos más importantes para la explotación de estos recursos de procesos clásticos son la homogeneidad mineralógica y petrográfica; la selección granulométrica de sus componentes; la ausencia de componentes nocivos (materia orgánica, vidrio volcánico,

sales minerales, etc.); la existencia de depósitos de grandes volúmenes y reducida sobrecarga y la baja o nula compactación y grado de litificación del sedimento, prefiriéndose, por consiguiente, aquellos depósitos de edad reciente que han sufrido escasos fenómenos post-depositacionales.

1.2. Procesos Sedimentarios Biogénicos

Son procesos que se refieren a la generación de recursos no metálicos debido a la sedimentación de los productos de la actividad vital de organismos animales y vegetales que habitan en ambientes subaéreos y en ambientes subacuáticos marinos y continentales. Dicha actividad vital se manifiesta tanto en la depositación de restos orgánicos (caparazones, huesos, dientes), materias fecales, restos vegetales y aceites orgánicos, como en la precipitación en la cuenca o ambiente subacuático de compuestos bioquímicos provenientes del metabolismo como son carbonato de calcio y sílice.

Los recursos más importantes en el país generados por este proceso son: calizas, diatomita, fosforita y guano, siendo los ambientes marinos infralitorales y en segundo término, los ambientes lagunares, los más favorables para la generación de yacimientos de interés económico de calizas, diatomita y fosforitas, y para el guano, los ambientes continentales supralitorales. En este grupo se ha considerado también el carbón, recurso que se origina en ambientes paludales continentales. Los yacimientos de estos recursos consisten en depósitos estratiformes, compuestos por mantos o capas de potencias decimétricas o métricas, intercaladas con horizontes clásticos o arcillosos y que pueden conformar espesores totales de decenas y hasta centenas de metros, como ocurre en algunas secuencias de calizas. En general, los mantos más importantes de calizas en explotación varían entre 8 y 25 m., los de diatomita entre 2 y 5 m., los de fosforita, reconocidos a la fecha, tienen espesores promedio inferiores a 3 m. y los de carbón, entre 0,8 y 2 m.

Con respecto al registro cronológico de estos recursos en el país, los de mayor diversidad son las calizas, cuyos yacimientos presentan un amplio rango de edades, conformando parte importante de secuencias metamórficas paleozoicas; de secuencias estratificadas marinas de lapso Jurásico-Cretácico Inferior; de secuencias lagunares del Cretácico Superior y de secuencias lacustres del Terciario.

Los yacimientos de carbón, por su parte, son de edades Terciaria Inferior y Terciaria Superior y las edades de los más importantes depósitos de diatomita, fosforita, y guano, se concentran en el Terciario Superior y Cuaternario, formando parte de unidades estratificadas de ambiente marino, las fosforitas y algunas diatomitas, y de ambiente continental, el guano.

Los factores geológicos más importantes para el aprovechamiento rentable de estos recursos se refieren a la existencia de depósitos de grandes volúmenes, composicionalmente homogéneos y de escasa sobrecarga.

Las calizas y las fosforitas son recursos utilizados fundamentalmente por su composición química y cuya principal propiedad es su contenido sobre 70% de CaCO_3 y sobre 20% P_2O_5 , respectivamente, y cuyos yacimientos de interés comercial, en general, deben contener reservas del orden de los millones de toneladas.

Las diatomitas son recursos cuya aplicación principal es como auxiliar filtrante, de modo que los yacimientos deben tener un bajo grado de compactación; buen estado de división y escaso fracturamiento de las frústulas de diatomeas; y ausencia de arena, arcillas, ceniza volcánica y sales minerales. Además, reservas del orden de millones de toneladas y escasa sobrecarga, ya que, al igual que los dos anteriores, su explotación más rentable es a rajo abierto y en el caso de las fosforitas y diatomita, desde yacimientos de poca edad, para prevenir la alta compactación de los mantos.

Los yacimientos de guano o covaderas, que dependen de la

actividad vital de las aves marinas que pueblan y han poblado el litoral más septentrional del país y de la persistencia de un clima árido en la zona, corresponden a depósitos antiguos de guano rojo o fosfatado, que presentan cubierta sedimentaria, y a depósitos más modernos de guano blanco o amoniacal.

1.3. Procesos Sedimentarios Evaporíticos

Son aquellos procesos relacionados con la depositación de compuestos químicos de acuerdo a su respectivo producto de solubilidad, debido a cambios de volumen del solvente, causados por su evaporación. Estos procesos dan origen a depósitos salinos de tipo continental o marino, que contienen importantes concentraciones de sales minerales, de interés económico, siendo en Chile de mayor importancia económica los depósitos continentales.

En general, los principales depósitos salinos o salares están compuestos por tres fracciones: una fracción sólida o costra salina, una fracción líquida o salmuera que contiene cationes y aniones en diversa concentración, y una fracción detrítica o clástica, en forma de arcilla y arena.

Los componentes salinos principales de los depósitos salinos chilenos son los carbonatos de calcio y magnesio, sulfatos de sodio, potasio, y calcio y cloruros de sodio, potasio y litio, además de boratos, yodatos y cromatos, los cuales representan recursos de alto interés económico.

Los factores que han determinado y determinan el origen y la permanencia de estos depósitos salinos en las tres regiones del norte del país, están relacionados con fenómenos geológicos, morfológicos, climáticos y estructurales presentes en el área desde el Terciario Superior.

Los primeros se refieren esencialmente a la existencia en la precordillera y cordillera andina, de rocas volcánicas de composición intermedia a ácida y de edades Terciario Superior y Cuaternario, que constituyen la fuente principal de los



elementos químicos que conforman los depósitos salinos.

Los aspectos morfológicos se relacionan con la existencia de cuencas de depositación y de entidades positivas del relieve como son la Depresión Intermedia o Pampa del Tamarugal y la Cordillera de la Costa. Esta última representa una verdadera barrera climática que contribuye a la persistencia de un clima extremadamente árido en ese sector del territorio, el que determina la existencia de una elevada tasa de evaporación, responsable de la precipitación de los compuestos y elementos químicos.

La estructura juega un importante papel, ya que las cuencas de depositación tienen en gran medida un control estructural y la recarga salina que se efectúa en especial desde la cordillera andina hacia los salares de cuencas preandinas y de la Depresión Intermedia, está determinada por la existencia de sistemas de fallas de dirección general E-W a NE-SW que afectan a las rocas fundamentales del área.

En ese sentido, los salares constituyen sistemas activos, en los cuales se está verificando permanentemente una recarga por aguas superficiales y subsuperficiales con diferentes concentraciones salinas, de modo que, de acuerdo a su ubicación geográfica este-oeste, estos depósitos presentan ciclos diarios o estacionales de disolución y generación de nuevos componentes salinos.

Desde un punto de vista de su

ubicación geográfico-morfológica y de su composición química principal, los depósitos salinos del norte del país pueden clasificarse en: salares de la Cordillera de la Costa, con su representante principal el Salar Grande, depósito salino fósil, compuesto por un cuerpo de halita cristalina de hasta 160 m de espesor y con pureza superior a 99% NaCl; salares de la Depresión Intermedia, entre los cuales se mencionan Bellavista-Pintados, Llamara y Lagunas, compuestos por una costra salina de cloruro de sodio, con sulfato de sodio y calcio; salares preandinos, representados por el Salar de Atacama, integrado por una costra de cloruro de sodio y salmuera saturadas en este compuesto, con cloruro de litio, potasio y magnesio; y salares y lagunas andinas que se caracterizan por sus costras de cloruros y sulfatos y la presencia de una fracción líquida preponderante, con marcados cambios composicionales determinados por las altas pluviosidades del denominado "invierno boliviano" y del invierno hemisférico; constituyen importantes depósitos de boratos, como los salares de Ascotán y Surire y representan depósitos de interés potencial por el litio y el potasio.

Los principales recursos no metálicos explotados actualmente en los salares del Norte de Chile corresponden a sal común, sulfato de sodio, cloruro de litio, cloruro de potasio y ulexita. El cloruro de litio, explotado por la Sociedad Chilena del Litio en el Salar de Atacama, es la base para la elaboración de carbonato de litio, producto de exportación. El cloruro de potasio, de la misma empresa, constituye parte esencial de la producción de nitrato de potasio de SOQUIMICH y la ulexita es la materia prima básica para la elaboración de ácido bórico en dos empresas ubicadas en la zona del norte del país.

Los procesos evaporíticos en cuencas marinas de ambientes regresivos, han ocurrido al menos en tres etapas del desarrollo geológico del territorio. La más antigua durante el Jurásico Superior y que se

manifiesta como un notable espesor de yeso, del orden de 200 m., y una distribución longitudinal en la cordillera andina, entre la II y IV Región; la segunda, en semejantes condiciones durante el Cretácico Inferior, que se evidencia fundamentalmente en la parte sur de la IV Región y la más moderna durante el Terciario Superior, reconocido en la Cordillera de la Costa de la I Región.

Aunque no corresponde propiamente a recursos generados en procesos evaporíticos, los campos de nitratos del Norte de Chile, únicos yacimientos de interés comercial existentes en el planeta, estarían relacionados genética, espacial y temporalmente con los depósitos salinos evaporíticos de la Depresión Intermedia, de acuerdo a las más difundidas teorías relacionadas con su origen. Ellas intentan explicar la fijación del nitrógeno atmosférico, principal incógnita en las hipótesis genéticas, por la actividad de bacterias nitrificantes que habrían habitado las playas y márgenes húmedos de los antiguos lagos salinos, antecesores de estos salares. La persistencia de estos depósitos de nitratos en el área habría estado condicionada esencialmente por factores climáticos y morfológicos, y la presencia de otros compuestos en el "caliche", como sulfatos, cloruros, yodatos, cromatos y boratos, se explica por los mismos factores litológicos y estructurales comentados anteriormente.

De esa forma, la mena o "caliche" tiene una composición aproximada de 20–25% de nitratos, 4–10% de cloruro de sodio; 1–2% de los iones calcio, potasio, boro, yodo y magnesio y 1–2% de agua, alcanzando la ganga de 41–76%.

Estos campos de nitratos entregan como recursos no metálicos de interés para el mercado externo e interno salitre sódico, salitre potásico, yodo, sulfato de sodio anhidro y ácido bórico, estos últimos tres como parte del proceso de recuperación del salitre efectuado por SOQUIMICH, en sus plantas de Pedro de Valdivia, Coya y María Elena.

1.4. Procesos de Meteorización

Corresponden a procesos de alteración superficial que experimentan las rocas por la acción de agentes atmosféricos, en especial del agua y que realizan fundamentalmente mediante hidrólisis y concentración residual, dando por resultado una roca compuesta por minerales diferentes de los originales, minerales neoformados y/o por minerales residuales del proceso.

Las condiciones más importantes para los procesos de alteración superficial se relacionan con el clima, la composición litológica de las rocas afectadas y al tiempo de duración del fenómeno, siendo el resultado la formación de un suelo que presentará contenidos variables de minerales de interés económico, ya sean neoformados o residuales.

Los procesos meteóricos más importantes formadores de recursos no metálicos son la laterización y la caolinización, que ocurren bajo condiciones climáticas muy características. La laterización, principal fenómeno de alteración superficial para la generación de yacimientos de bauxitas, arcillas bauxíticas, caolín y óxido de hierro, se verifica bajo las siguientes condiciones: existencia de una roca con minerales altamente solubles, de gran permeabilidad y porosidad; existencia de precipitaciones superiores a 2.000 mm/año y cubierta vegetal abundante, temperaturas superiores a 20°C, relieve plano y largos períodos de estabilidad tectónica.

Los yacimientos de arcillas bauxíticas y caolines lateríticos pueden ser en general de tres tipos morfológicos, siendo los yacimientos chilenos de los tipos interestratificados o primarios y detríticos o secundarios, provenientes estos últimos de la erosión y transporte de los materiales contenidos en los primeros. Los factores geológicos que determinan su interés potencial se refieren fundamentalmente a la homogeneidad composicional del recurso, en especial referida a un contenido de alúmina sobre 35% y a la presencia de una sobrecarga con una relación inferior a 6:3 respecto de los horizontes de interés, los cuales alcanzan espesores totales

superiores a 10 m.

El proceso de laterización principalmente conocido en el país y responsable de la existencia de los únicos yacimientos encontrados hasta ahora de arcillas bauxíticas y caolines bauxíticos, habría ocurrido durante el Cretácico Superior a Terciario Inferior, afectando a rocas volcánicas pre-existentes, aflorantes al norte de la ciudad de Santiago.

Estas arcillas presentan las más altas leyes en alúmina conocidas en el país, sobre 35% y se emplean para la elaboración de sulfato de aluminio, cemento Portland y productos refractarios, constituyendo las mejores arcillas refractarias nacionales.

Por su parte, los procesos de caolinización constituyen procesos de generación de depósitos de caolín a partir de la alteración meteórica de una roca granítica peniplanizada, tectónicamente estable, en ambientes entre cálido y templado-frío, lluvioso, con temperaturas superiores a 10°C y pluviosidad sobre 1.200 mm/año. El mecanismo consiste esencialmente en la hidrólisis de los feldespatos de la roca parental y en la subsecuente generación de minerales arcillosos del grupo de la caolinita, principales integrantes del recurso caolín y que alcanzan concentraciones entre 15 y 20 por ciento en el recurso.

Los principales procesos de caolinización de rocas graníticas han ocurrido en Chile durante el Terciario Superior y han afectado a las rocas del Batolito de la Costa de edad paleozoica, generando importantes yacimientos de caolín, de hasta 10 m de potencia, los principales de los cuales se localizan en la VI Región. Estos yacimientos son explotados para abastecer de caolines a las industrias de cerámica, pinturas, papel y gomas, principalmente.

2. PROCESOS MAGMATICOS

Son aquellos procesos relacionados con la actividad ígnea intrusiva y extrusiva y con los fenómenos de metamorfismo y alteración hidrotermal.

En relación a la génesis de recursos no metálicos chilenos, se consideran los siguientes cuatro procesos:

- Procesos Pegmatíticos
- Procesos Volcánicos
- Procesos Metamórficos
- Procesos Hidrotermales

2.1. Procesos pegmatíticos

Los procesos pegmatíticos generadores de recursos no metálicos en Chile, corresponden a la fase final de cristalización de magmas de tipo granítico y dan origen a cuerpos cristalinos de cuarzo, feldespato y micas, de variadas dimensiones. Las formas de los cuerpos son tanto irregulares, con contactos graduales con la roca cristalina que los contiene, indicativos de una cristalización "in situ", como tabulares, con contactos nítidos y regulares que indican emplazamiento de las fases silíceas y sílico-aluminosas en niveles superiores de los plutones graníticos, controlado por fracturamiento.

El cuarzo y feldespato se presentan en general como masas cristalinas, translúcido a transparente el primero y opaco el segundo, con colores que dependerán del contenido de impurezas. En general son blanco a blanco lechoso en el cuarzo de adecuadas propiedades tecnológicas y blanco grisáceo o salmón para el feldespato, dependiendo de su composición mineralógica de feldespato sódico o feldespato potásico, respectivamente. Es de cierta frecuencia el desarrollo de cristales hexagonales de cuarzo bien formado, denominado cristal de roca, de gran transparencia y colores blanco hialino, rosado y ahumado.

Ambos recursos son explotados principalmente debido a su composición química, constituyendo el cuarzo la principal fuente de sílice para diversas aplicaciones industriales y encontrándose en este tipo de yacimientos con leyes superiores a 96% SiO_2 . Los feldespatos, por su parte, son importantes fundentes metalúrgicos y aditivos en la industria del vidrio y cerámica, la que emplea feldespatos sódicos y potásicos, respectivamente.



Los factores geológicos de mayor relevancia para la ocurrencia de yacimientos de interés potencial de estos recursos indican la existencia de cuerpos de formas regulares, con dimensiones entre decenas y centenas de miles de toneladas y homogéneos composicionalmente, en especial en cuanto a leyes de sílice en el cuarzo y a la mineralogía en el feldespato, además de ausencia de impurezas, en especial de óxido de hierro.

Los episodios geológicos en los cuales se han emplazado batolitos o stocks de composición general granítica, que contienen cuerpos de cuarzo y feldespato pegmatítico en Chile, corresponden al Paleozoico Superior, al Jurásico y lapso Cretácico Superior - Terciario Inferior y son responsables en conjunto, de la gran cantidad de yacimientos conocidos y explotados de estos recursos, que se distribuyen en general entre la II y IV región del país.

2.2. Procesos Volcánicos

En Chile, estos procesos se relacionan directamente con la actividad volcánica de los numerosos centros eruptivos distribuidos a lo largo de la cordillera andina y expresada tanto en la emisión de lavas, lavas vítreas y materiales piroclásticos en la forma de cenizas volcánicas y piedra pómez (puzolanas), como en la actividad solfatarica que da origen a los depósitos volcánicos de azufre, característicos del territorio nacional.

Los procesos volcánicos responsables de la mineralización más

importante de este tipo en el país son esencialmente del Terciario Superior y del Cuaternario y han ocurrido prácticamente a todo lo largo de la cordillera andina, en especial entre los $17^{\circ}30'S$ y los $45^{\circ}00'S$. Los yacimientos de azufre tienen una importante distribución en este sector de la cordillera, en forma de dos franjas principales de mineralización, definidas por la ubicación de los correspondientes centros eruptivos: una franja septentrional entre los $17^{\circ}30'S$ y los $28^{\circ}00'S$, donde se ubican los principales yacimientos, normalmente sobre los 4.500 m.s.n.m. y una franja meridional, al sur de los $33^{\circ}00'S$, con yacimientos a alturas inferiores a 4.000 m.s.n.m.

Estos yacimientos consisten en general en mantos de "caliche de azufre" localizados en las faldas de los volcanes, en disposición paralela a la superficie del terreno, interestratificados en tobas y ceniza volcánica y material de acarreo. Tienen espesores entre 0,5 y 6,0 m promedio y presentan distinta coloración, textura, compacidad y pureza en azufre. También adoptan la forma de bolsones o lentes, que afloran o no, de acuerdo a la intensidad de la erosión.

Existen en general dos tipos de "caliche de azufre", uno de color amarillo, poroso y de aspecto terroso, cuya ley varía entre 40% y 75% S y otro, menos común, de color achocolotado o verdoso, con contenido en azufre entre el 80% y 95%.

Con respecto a la ceniza volcánica y piedra pómez, su origen se encuentra relacionado con los eventos de actividad volcánica explosiva de los centros eruptivos, la que genera grandes cantidades de estos materiales piroclásticos, compuestos por vidrio volcánico.

Ellos experimentan transporte eólico y fluvial esencialmente, dando origen a depósitos sedimentarios en cuencas de tipo subacuático y subaéreo, distribuidas en Chile al oeste de los volcanes andinos, ocupando superficies extensas en la Pampa del Tamarugal y en la Depresión Intermedia, al sur de los $33^{\circ}00'S$.

Los yacimientos se presentan como mantos de disposición sub-horizontal a horizontal, de espesores variables entre metros y decenas de metros que cubren grandes extensiones areales, interestratificados o no, en secuencias sedimentarias clásticas o arcillosas, presentando por consiguiente, sobrecargas de muy diverso espesor, composición y grado de compactación.

Aquellos yacimientos de mayor interés y sujetos actualmente a explotación para la fabricación de cemento puzolánico, principal uso de este recurso en el país, comprenden secuencias de espesores superiores a 15 m que cubren áreas de decenas de km² y con sobrecargas que corresponden a suelos de no más de 0,30 m de espesor.

2.3. Procesos Metamórficos.

Los procesos metamórficos responsables de la generación de yacimientos de recursos no metálicos en Chile, son del tipo de metamorfismo de contacto, generado por la intrusión de rocas de composición principalmente granítica y granodiorítica, de edades Paleozoica y Mesozoica, en rocas metamórficas, volcánicas y sedimentarias, de semejante rango cronológico.

El proceso consiste en una alteración de las rocas preexistentes por efectos termales y en la subsecuente generación de rocas o minerales de interés económico, siendo los recursos más importantes mármol, andalucita, granate y apatita, además de grafito y talco, de importancia secundaria.

Los yacimientos de mármol presentan el más amplio registro cronológico y la mayor variedad de ambientes geológicos, encontrándose en rocas metamórficas de edades Paleozoica Inferior, en secuencias sedimentarias del Paleozoico Superior y en secuencias volcánico-sedimentarias y sedimentarias del Cretácico Inferior. Los cuerpos de mármol son del tipo manto, de espesores variables, pero en general sobre 10 m, que forman parte de secuencias de variados espesores y el recurso presenta colores blanco a blanco grisáceo, bien cristalizado, siendo su aplicación principal la construcción

y la ornamentación.

Los principales factores geológicos relacionados con yacimientos de interés se refieren a su homogeneidad litológica, persistencia de sus características físicas (color, brillo), ausencia de sistemas de fracturamiento intenso que dificultan el normal aprovechamiento del recurso y escasa o nula sobrecarga.

Su distribución está restringida a las regiones III a IV, que se caracterizan por sus afloramientos de calizas metamorfizadas y a las regiones XI y XII donde se conocen importantes yacimientos de mármoles en el Lago General Carrera y en el Archipiélago Madre de Dios, respectivamente.

Los depósitos de andalucita de principal interés se localizan en la Cordillera de la Costa de Chile Central Sur, en la zona de contacto entre las rocas metamórficas paleozoicas y el basamento granítico de la misma edad, que conforman dicha cordillera.

La andalucita se presenta en pizarras aluminicas, en concentraciones entre 5% y 20% y con leyes del orden de 50% de alúmina (AL₂O₃), constituyendo un recurso que no se encuentra en explotación. Presenta, sin embargo, interesantes perspectivas industriales, en la medida que se definan las propiedades de sus Yacimientos "in situ" y sedimentarios, mediante los respectivos estudios geológicos.

Los depósitos de granate se han generado en procesos metamórficos de dos tipos geológicos y cronológicos: uno de ellos relacionados con la intrusión del basamento granítico paleozoico en las rocas metamórficas de la Cordillera de la Costa y el otro relacionado con la intrusión de rocas graníticas del Cretácico Superior en rocas sedimentarias del Cretácico Inferior, que afloran especialmente en la III Región. Los granates de la Cordillera de la Costa se explotan en yacimientos sedimentarios, para la elaboración de papel de lija.

Los yacimientos de apatita se han generado en procesos de metamorfismo y metasomatismo de contacto, relacionados con la intrusión de rocas graníticas del Cretácico Su-

perior en rocas principalmente volcánicas de edades Jurásica y Cretácica Inferior que afloran en la parte noroeste de la IV Región y suroeste de la III Región.

El control principal de la mineralización es de tipo estructural y corresponde a fallas y fracturas de diversas magnitudes, siendo los cuerpos de apatita normalmente vetiformes, además de presentarse como bolsones y lentes, con rumbos que corresponden a la estructura regional. Sus dimensiones son generalmente discretas, con corridas que varían desde pocos metros hasta decenas de metros, pudiendo superar ocasionalmente los 100 m, lo que determina que los principales distritos correspondan a agrupamientos locales de tales cuerpos.

La ley de la apatita de estos yacimientos es variable entre 12 y 28% P₂O₅, siendo del orden de 28% la ley mínima explotable para la elaboración de abonos. Actualmente se explotan algunos yacimientos de la IV Región con leyes entre 15 y 20% P₂O₅, utilizándose el mineral para elaborar alimento para aves.

2.4. Procesos Hidrotermales.

Los procesos hidrotermales se relacionan con la alteración generada por fluidos que corresponden a las manifestaciones póstumas de la cristalización de magmas graníticos y que afectan tanto a las rocas intrusivas como a las secuencias estratificadas, volcánicas y sedimentarias, por ellas instruidas. El fenómeno genera diversos recursos minerales de interés económico.

En Chile, estos procesos son responsables de una variada mineralización representada principalmente por caolín, cuarzo y baritina, y por calcita, cimita y pirofilita, de menor desarrollo e interés.

La mineralización de caolín se relaciona con las fases de alteración argílica y argílica avanzada, en las cuales se ha producido un reemplazo parcial o total de los minerales originales y de la masa fundamental de las rocas volcánicas, por minerales arcillosos, principalmente caolinita y halloysita, lo que genera una coloración blanco a blanco amarillento característica. Existe también mineralización de cimita, pirofilita

y alunita, acompañando a los minerales de caolín y evidenciando los diversos grados de la alteración.

Esta mineralización se presenta relacionada con estructuras de fracturamiento mayores, adoptando la forma de extensos cuerpos irregulares y también vetas y vetillas, que pueden constituir yacimientos de interés económico, cuya explotación se realiza a rajo abierto.

El caolín generado en procesos hidrotermales tiene leyes promedio al natural de 25 a 30% Al_2O_3 y grados de blancura de alrededor de 70 a 75 GE.

Existen tres episodios principales en la evolución geológica del territorio en los cuales se han generado depósitos de caolín hidrotermal y que corresponden a la intrusión de grandes batolitos graníticos de edades jurásicas, cretácica superior-terciaria inferior y terciaria superior, en rocas estratificadas, volcánicas y sedimentarias de edades paleozoica y cenozoica.

La mineralización de cuarzo hidrotermal está relacionada con el desarrollo de zonas de alteración sílicea, donde la sílice se presenta reemplazando tanto los fenocristales, como la masa fundamental de las rocas volcánicas afectadas por la alteración.

El control de la mineralización es estructural y litológico, lo que da origen a vetas de relleno y vetas de reemplazo, mostrando estas últimas relictos de la textura original.

El cuarzo es normalmente microcristalino, translúcido, con colores blanco grisáceo, blanco amarillento y gris pardo y su contenido en sílice varía en general entre 92 y 95%, lo que permite su uso esencialmente para fundición.

Este proceso genético corresponde fundamentalmente a dos episodios geológicos en el país. El más antiguo se relaciona con el emplazamiento de plutones graníticos jurásicos en secuencias volcánicas y sedimentarias de edades triásica y jurásica. El segundo proceso se relaciona con la alteración hidrotermal generada por intrusivos graníticos del lapso Cretácico Superior - Terciario Inferior, en secuencias volcánico-sedimentarias del Cretácico Inferior y Superior.

La mineralización de baritina hidrotermal se relaciona con la alteración de rocas con alto contenido en bario, mediante soluciones hidrotermales sulfuradas y la depositación del mineral resultante en planos de fallas, fracturas y estratificación, en zonas de brechas y canales de disolución.

Los cuerpos vetiformes resultantes del proceso, tienen contactos tajantes con la roca de caja y significativas variaciones en longitud, profundidad y disposición espacial. Debido a sus formas complejas y a tamaños pequeños, en términos relativos, la explotación de estos depósitos vetiformes es de alto costo.

La baritina de los depósitos chilenos tiene peso específicos general variable entre 4,1 y 4,3, colores blanco rojizo, blanco grisáceo y blanco amarillento y es opaca a translúcida. Su explotación actual es fundamentalmente para uso interno, destinándose prácticamente el total de la producción a la Empresa Nacional de Petróleo, ENAP, para su uso en lodo de perforación petrolífera.

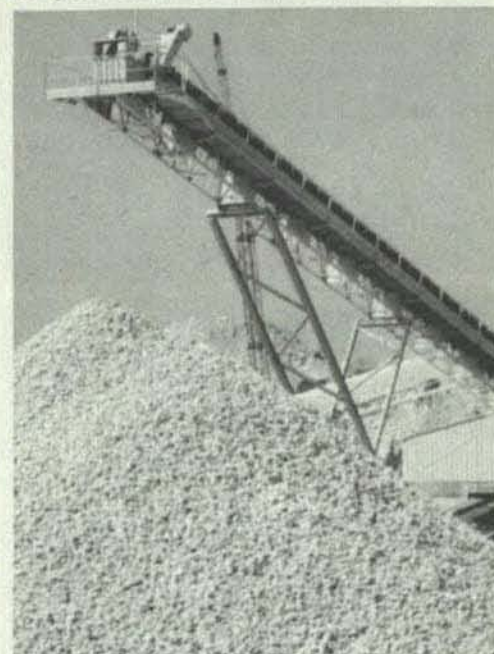
El origen de los yacimientos de baritina vetiforme en Chile se relaciona con tres episodios geológicos de emplazamiento de magmas graníticos, ocurridos durante el Jurásico, Cretácico Superior - Terciario Inferior y Terciario Superior.

En general, los depósitos hidrotermales vetiformes no son los tipos geológico-genéticos más adecuados de estos tres recursos analizados, siendo de mayor interés los yacimientos de meteorización de caolín, los pegmatíticos de cuarzo y los estratiformes de baritina. Sin embargo, los yacimientos mencionados continúan siendo explotados para el consumo interno.

DISTRIBUCION GEOLOGICO-GEOGRAFICA DE YACIMIENTOS DE RECURSOS NO METALICOS CHILENOS

Las unidades litológicas en las que se manifiestan los procesos de generación de recursos no-metálicos chilenos ya descritos y en las que se localizan los yacimientos de cada tipo genético, tienen una distribución general norte-sur en el país y constituyen Franjas de Mineraliza-

ción y/o Areas de Interés Prospectivo para los respectivos recursos y sus yacimientos.



Las principales franjas de mineralización derivadas de los procesos genéticos discutidos, son las siguientes:

1. Franjas de Mineralización de Procesos Sedimentarios.

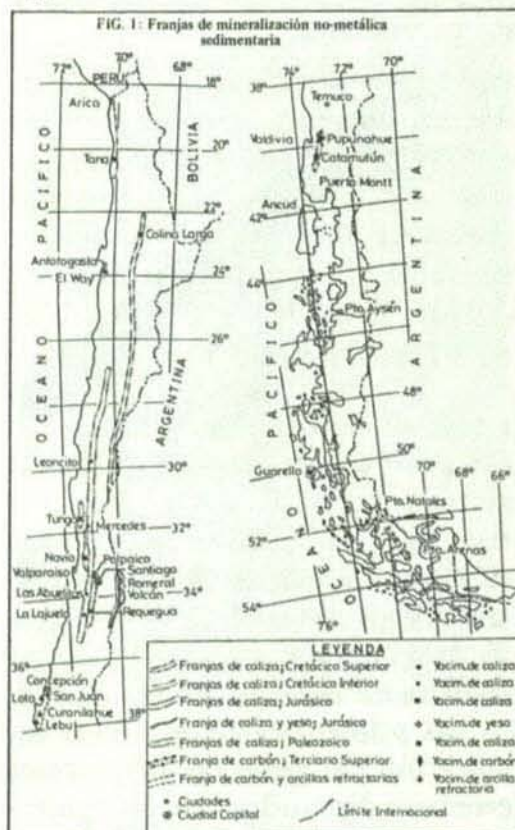
Comprenden las unidades litológicas representativas de algunos de los principales procesos sedimentarios de tipo clástico, biogénico, evaporítico y de meteorización que han ocurrido desde el Paleozoico al Cenozoico, en ambientes marinos y continentales subacuáticos y sub-aéreos.

Las principales franjas de mineralización sedimentaria son las siguientes:

1.1. Franjas de Yacimientos de Calizas y de Calizas y Yeso.

Corresponden a extensos afloramientos de calizas, de edades Paleozoica Superior, Jurásica, Cretácica Inferior y Cretácica Superior que se distribuyen principalmente en la Cordillera de la Costa, en la precordillera y Cordillera Andina y en la zona de los canales, en Chile Austral (fig. 1). En general continúan calizas y calizas en parte recristalizadas las paleozoicas, ubicadas entre los 31°00'S y los 32°00'S y entre los 50°00'S y los 51°00'S; calizas y calizas y yeso las jurásicas, distribuidas al norte de los 35°00'S, hasta los 18°30'S; calizas fundamentalmente las del Cretácico Inferior, entre los 27°00'S y los 36°00'S y la del Cretácico Superior, locali-

zada entre los 33°00'S y los 35°00'S.

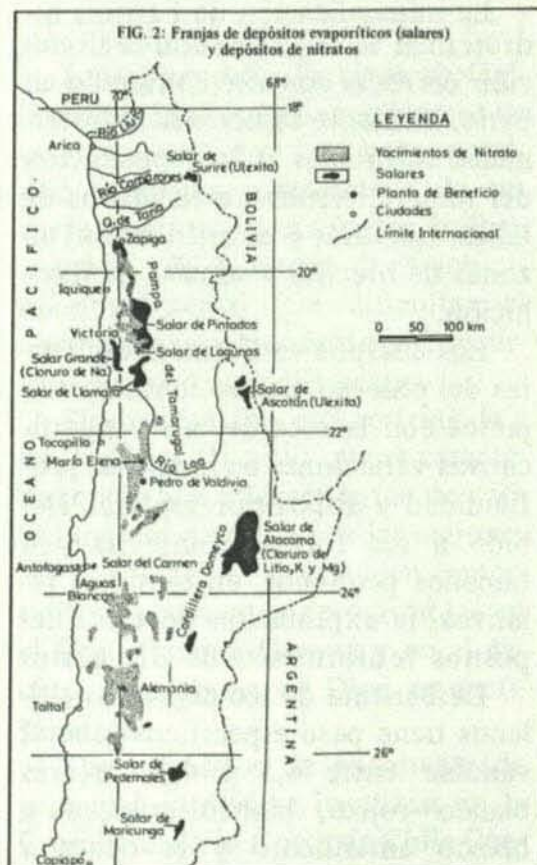


1.2. Franjas de Yacimientos de Carbón y Arcillas Refractarias.

Es posible distinguir tres franjas de depósitos de carbón de interés comercial actual en Chile, todas ellas ubicadas en el sector sur y austral del territorio (fig. 1). La más septentrional corresponde a los afloramientos de secuencias sedimentarias marino-continuales del Terciario Inferior que contienen mantos de carbón y niveles de arcillas caoliníferas refractarias, en el litoral sur entre los 36°40'S y los 37°40'S. Hacia el sur, en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, entre los 39°30'S y los 41°00'S, se localiza una franja de afloramientos de rocas sedimentarias continentales con mantos de carbón y, en el extremo austral de Chile continental, entre los 51°30'S y los 54°00'S, se reconoce una tercera franja con depósitos de carbón, en rocas sedimentarias del Terciario Superior, explotada en la mina Pecket, XII Región.

1.3. Franjas de Yacimientos Evaporíticos (Salares) y Depósitos de Nitratos.

Corresponden al extenso conjunto de cuencas cerradas de sedimentación y evaporación, localizadas en el sector septentrional del país, I a III Regiones, entre los 19°00'S y los 27°00'S (fig. 2). Estos salares se



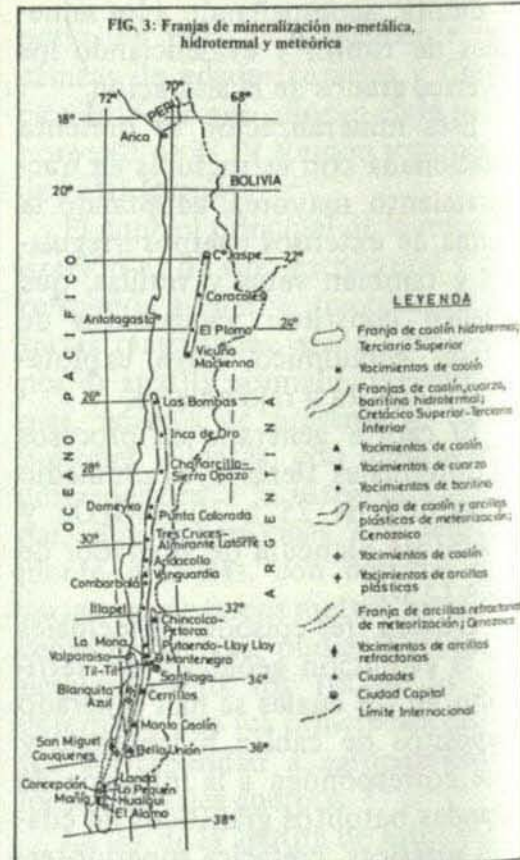
distribuyen desde la Cordillera de la Costa hasta la Cordillera Andina y contienen una gran variedad de recursos no-metálicos en forma de sales solubles en salmueras y costras salinas. Debido a lo anterior, constituyen, junto con los depósitos de nitratos, importantes yacimientos de cloruro de sodio, sulfato de sodio, yodo, boratos, litio y salitre sódico y potásico.

1.4. Franja de Yacimientos de Caolín de Meteorización del Cenozoico.

Corresponde esencialmente a los afloramientos de rocas graníticas del Batolito de la Costa, distribuidos entre los 33°00'S y los 38°30'S, afectados por intensos procesos de caolinización meteórica. Contiene los más importantes yacimientos de caolín para la industria cerámica y del papel conocidos en el país (fig. 3).

1.5. Franja de Yacimientos de Arcillas Refractarias de Meteorización del Cenozoico.

Se relaciona con los afloramientos de rocas metamórficas del Basamento Cristalino de la Cordillera de la Costa, afectadas por procesos de alteración superficial, distribuidos en el litoral sur, entre los 35°30'S y los 37°00'S. Contiene los únicos yacimientos de arcillas refractarias caoliníferas conocidos en la zona meridional del país (fig. 3).



2. Franjas de Mineralización de Procesos Magmáticos.

Comprenden las unidades litológicas que evidencian algunos de los más importantes procesos magmáticos de tipo pegmatítico, volcánico, metamórfico e hidrotermal, ocurridos en el lapso Paleozoico-Cenozoico en el territorio nacional.

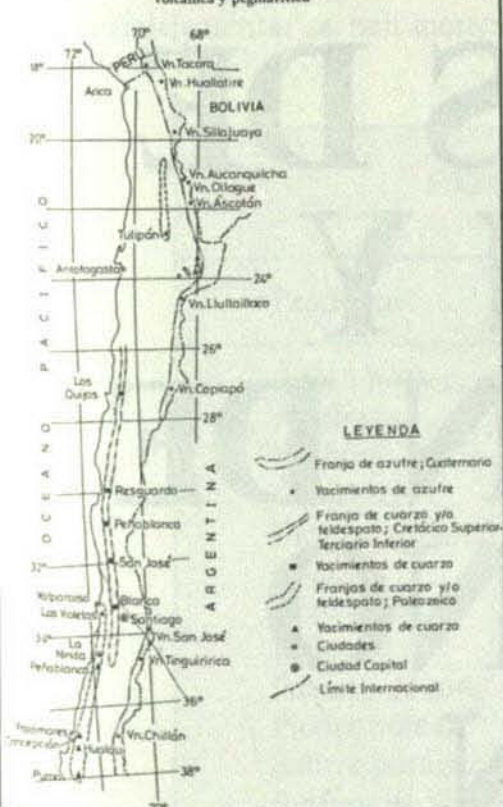
2.1. Franja de Yacimientos de Cuarzo y Feldespato Pegmatíticos del Paleozoico.

Se distribuye como dos sub-franjas, una septentrional, entre los 20°40'S y otra en la parte más occidental del sector central-sur del país, entre los 33°00'S y los 38°30'S (fig. 4). Esta última corresponde geológicamente al Batolito de la Costa, de composición tonalítica-grano-diorítica, asignado al Paleozoico Superior.

2.2. Franja de Yacimientos de Cuarzo y Feldespato Pegmatíticos del Mesozoico-Cenozoico.

Está relacionada espacial y genéticamente con los grandes cuerpos batolíticos del lapso Cretácico Superior - Terciario Inferior, que se distribuyen como una faja discontinua de afloramientos, en especial al sur de los 26°00'S, ocupando una posición longitudinal en el territorio, hasta aproximadamente los 35°00'S (fig. 4).

FIG. 4: Franjas de mineralización no-metálicas, volcánica y pegmatítica



2.3. Franja de Yacimientos de Azufre y Ceniza Volcánica.

Esta franja está definida por la cadena volcánica andina, integrada por los centros eruptivos pleistoceno-holocénicos que se distribuyen en la Cordillera Andina según dos sub-franjas: una septentrional, entre los $17^{\circ}30'S$ y los $28^{\circ}00'S$ y una meridional, al sur de los $33^{\circ}00'S$. Esta franja contiene los importantes yacimientos exhalativos de azufre y parte de los depósitos de puzolana, en especial en su tramo norte y es potencialmente favorable para la ocurrencia de yacimientos de perlita y basalto (fig. 4).

2.4. Franja de Yacimientos de Caolín, Cuarzo y Baritina Hidrotermales del Mesozoico.

Relacionada con los batolitos graníticos del lapso Cretácico Superior - Terciario Inferior, esta franja se distribuye en posición longitudinal central en el territorio, entre los $26^{\circ}00'S$ y los $36^{\circ}00'S$ y contiene los más importantes depósitos de este tipo de recursos en el país, además de cimita y pirofilita (fig. 3).

2.5. Franja de Yacimientos de Caolín Hidrotermal del Cenozoico.

Se localiza en la Cordillera Andina de la zona central del país, entre los $32^{\circ}00'S$ y los $33^{\circ}30'S$, relacionada con los intrusivos graníticos del Terciario Superior y contiene importantes yacimientos en explo-

tación y depósitos de interés potencial de este recurso (fig. 3).

2.6. Franja de Yacimientos de Apatita y Mármol de Contacto Metamórfico del Mesozoico.

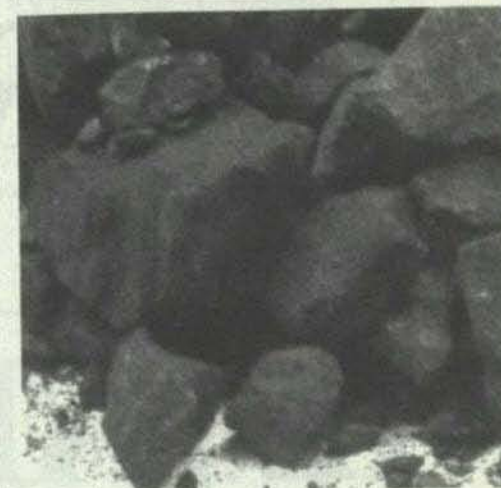
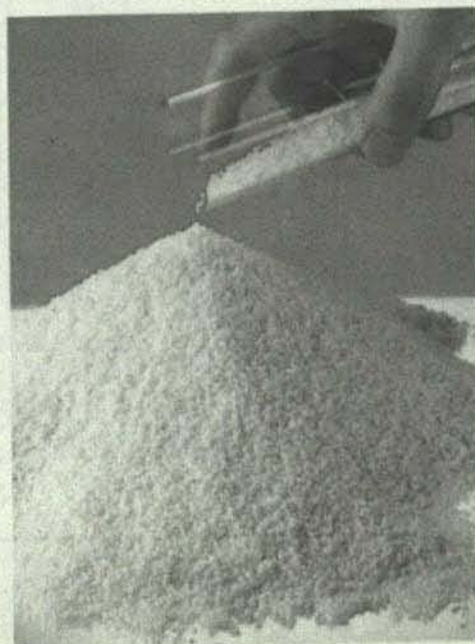
Distribuida en la zona norte del país, especialmente entre los $28^{\circ}00'S$ y los $30^{\circ}00'S$, está relacionada genéticamente con las aureolas de metamorfismo termal generadas por el emplazamiento de intrusivos graníticos del lapso Cretácico Superior - Terciario Inferior, en rocas estratificadas del Mesozoico. Contiene la totalidad de los yacimientos de apatita conocidos en el país y parte importante de los yacimientos de mármol de contacto y de óxido de hierro.

2.7. Franja de Depósitos de Granate y Andalucita.

Corresponde a la denominada Serie Oriental del Basamento Metamórfico de la Cordillera de la Costa, distribuida en el litoral central-sur del país, aproximadamente entre los $34^{\circ}00'S$ y los $38^{\circ}00'S$, generada por metamorfismo termal debido al emplazamiento del Batolito de la Costa en secuencias estratificadas paleozoicas y/o más antiguas. Contiene depósitos "in situ" y sedimentarios de ambos recursos.

CLASIFICACION DE RECURSOS NO-METALICOS CHILENOS DE ACUERDO A SUS PERSPECTIVAS GEOLOGICAS

Las características geológico-genéticas y tecnológicas de los yaci-



mientos de recursos no-metálicos chilenos y su distribución geográfica en Franjas de Mineralización, permiten establecer una clasificación preliminar respecto de sus perspectivas geológicas de aprovechamiento rentable, a corto y mediano plazo.

La clasificación es la siguiente:

GRUPO I: Muy Buenas a Excelentes Perspectivas Geológicas:

Litio, Salitre, Sulfato de Sodio, Yodo, Boratos, Sal Común, Diatomita.

GRUPO II: Buenas a Muy Buenas Perspectivas Geológicas:

Azufre, Arcillas, Baritina, Caolín, Cimita, Feldespato, Pumicita, Recursos Calcareos, Recursos Silíceos, Rocas de Construcción, Sales de Potasio, Sales de Magnesio, Bentonita Cálcica, Dolomita, Alunita, Andalucita, Fosforita, Yeso.

GRUPO III: Escasas a Regulares Perspectivas Geológicas:

Apatita, Granate, Mica, Talco, Vermiculita, Zeolitas, Titanio, Zircón.

GRUPO IV: Sin Perspectivas Geológicas:

Asbesto Crisotilo, Bentonita Sódica, Cromita, Fluorita, Grafito, Magnesita, Perlita, Tierras Raras.

