

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE CIENCIAS Y LETRAS  
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

**CONTRIBUCION AL ESTUDIO  
DE LAS ARENAS NEGRAS  
MAGNETICAS DE COSTA RICA**

Reinaldo Monge Valverde

Profesor Guía:

Lic. Armando Acuña Bonilla

Profesores Revisores:

Lic. Julio Thuel Sedó

Ing. Enrique Malavassi V.

**DEDICATORIA:**

A mis padres y  
a mi hermana.

**AGRADECIMIENTO:**

Agradezco al Lic. Armando Acuña B., Director del Departamento de Química, su ayuda y sus consejos en la realización de este trabajo, así como al Lic. Rodrigo López Agüero, por su colaboración como Jefe del Laboratorio Químico del Ministerio de Industrias en donde se realizaron todas las determinaciones analíticas.

Hago extensivo mi agradecimiento al Dr. César Dondoli B., Director de Geología Minas y Petróleo del mismo Ministerio y al Ing. Mario Fernández Castro, por la ayuda prestada en el suministro de las muestras y datos de localización de las arenas negras.

A todos ellos, mi eterna gratitud. -

## I N T R O D U C C I O N

El establecimiento de una planta siderúrgica con hornos eléctricos y a partir de la magnetita de las arenas negras, es factible en Costa Rica de acuerdo con algunos informes preliminares (15).

Estos informes, además de calificar como favorables el potencial de ganancia y la posición competitiva de la compañía planeada, recomiendan un mayor estudio de las características y del contenido y separación del hierro, de las arenas negras existentes en algunas costas del país.

Por lo tanto, se consideró de especial interés e importancia, realizar un cuidadoso estudio sobre las arenas negras cuyos yacimientos a la fecha eran conocidos y exponerlo bajo la forma de la presente Tesis de Grado.

El objetivo fundamental de esta tesis, es conseguir algunos datos experimentales sobre las propiedades y riqueza de las arenas negras, en cuanto a magnetita se refiere, mineral este último que puede constituirse en materia básica para la industria siderúrgica en nuestro país. Se hace notar dentro de este prefacio que por haberse realizado esta investigación sobre porciones de arenas tomadas superficialmente y sin seguir en forma rigurosa los procedimientos normales de muestreo, los datos y conclusiones deben entonces considerarse como un aporte más al estudio de estos minerales y pueden ser utilizados únicamente como informes preliminares en la proyección definitiva de plantas industriales.

El estudio se conduce a través de dos partes, una teórica que consiste fundamentalmente de las generalidades descriptivas y geológicas de las arenas, el hierro y sus minerales de importancia económica, y sobre la magnetita, sus yacimientos en Costa Rica y su extracción industrial. Después, la par-

te práctica está constituida por un trabajo analítico por el cual se obtienen interesantes datos sobre las propiedades físicas y químicas de las arenas negras que seguidamente son discutidos y permiten obtener algunas conclusiones que se exponen en el último capítulo del estudio. Se incluyen la selección de métodos prácticos, rápidos y de bajo costo para la extracción y análisis de la magnetita en las cuarenta y seis muestras de arenas negras investigadas. La composición granulométrica y química y la naturaleza de las impurezas, se exponen a través de diversos cuadros e ilustraciones, ya que estos factores se consideran muy importantes cuando se piensa usar este mineral como materia prima en siderurgia, puesto que en realidad, el hierro industrial no es un producto puro, sino que representa aleaciones del mismo con otros elementos que en parte se agregan y en parte se absorben durante su obtención, como impurezas no deseables que influyen notablemente en las propiedades físicas del metal.

## C A P I T U L O I

### LAS ARENAS

#### Conceptos generales y geológicos

##### Definición:

Arena es una denominación que se emplea para designar casi cualquier tipo de roca o mineral disgregado. Sin embargo, técnicamente este término está restringido por lo general para el mineral finamente subdividido de cuarzo con pocas impurezas de feldespato, mica y óxidos de hierro. Existen arenas cuarcíferas, arenas negras (magnetita, ilmenita), arenas coralinas, arenas selenitosas y otras (5).

##### Generalidades:

Realmente el nombre de arena corresponde a un cierto tipo de tamaño de las rocas fragmentadas, y no obstante cuando se le usa solo lleva para muchos geólogos la connotación de un alto contenido en cuarzo, lo cual permite cierta ambigüedad, dado que por el término arena debe reconocerse únicamente un concepto de tamaño (20).

Como la mayoría de las arenas, talvez un 90%, son cuarcíferas, esto nos lleva a la conclusión de que el otro 10% corresponde a otro tipo que se conoce con el nombre de arenas mixtas (13). El cuarzo es el constituyente más común y en las regiones donde abundan las rocas micáceas, se hallan en considerable cantidad la moscovita y la biotita blanqueada (32).

Entre los componentes subordinados de casi todas las arenas, tenemos los minerales de relativa dureza y alta densidad o pesados. A veces están presentes como minerales esenciales procedentes de la destrucción de las arenas mixtas especialmente de las rocas básicas de solidificación con hornblenda

y piroxeno; a veces con guijarros cristalinos o subderivados de ambos grupos (13). La composición de los fragmentos minerales pesados varía dentro de los límites más amplios y su determinación puede suministrar criterios para diferenciar depósitos de arenas de distintas edades y orígenes, por lo que resulta muy interesante verificar el análisis granulométrico por minerales pesados (13).

Las arenas residuales formadas por desintegración, se hallan compuestas, en su mayor parte, por minerales presentes en la roca madre que no estuvieron sujetos al desgaste ni a la descomposición en gran escala. Por otra parte, las arenas que han sido transportadas durante largo tiempo, se componen de minerales que son resistentes física o químicamente o ambas a la vez. Granate, magnetita, circón y rutilo se encuentran entre los minerales más indestructibles, pero los dos últimos no son abundantes. Si el transporte ha sido relativamente corto y rápido, la arena puede contener minerales que fueron triturados por completo en un proceso de mayor duración. La composición de la arena sugiere no sólo la extensión del transporte sino también el clima de la región donde ocurrió cierta progresiva erosión (32).

Un depósito rico en minerales alterables indica un clima muy seco, mientras que otro depósito notablemente pobre en tales minerales señala que la descomposición fue intensiva.

La naturaleza de la roca madre se halla también indicada por la composición de la arena que de ella se deriva. A este respecto son muy importantes las arenas que han sufrido poco transporte. El granate y la magnetita proceden con frecuencia del gneis y pizarras cristalinas; el cuarzo y el feldespato de gneis y granitos, etc.; las micas, de las pizarras cristalinas y de ciertas rocas eruptivas (32).

#### Arenas y Areniscas:

Los sedimentos de grano mediano son las arenas y las rocas correspon-

La disminución del tamaño de los granos ocurre de los cantos a las arenas. Pero como el tipo de transporte es muy distinto al de los elementos grandes, son relativamente raros los casos de tránsitos graduales de una a otra clase de materiales. El predominio del cuarzo como material más resistente es aún mucho mayor para las arenas que para los cantos (32).

La arena se convierte en arenisca cuando está cementada por un material que puede ser silíceo, calizo o arcilloso (13).

Las areniscas son esencialmente granos de cuarzo con algo de feldespato y otros minerales. La cohesión de los granos puede haberse producido mediante presión o por medio de un aglutinante y según el que sea, se clasifica la arenisca silícea, ferruginosa, calcárea o arcillosa (14).

Las areniscas grises deben sus variaciones de tonalidad a la proporción de partículas minerales negras, en especial magnetita. En las rocas eruptivas los colores grises oscuros se deben a una mezcla íntima de minerales negruzcos tales como la biotita, hornblenda, augita, magnetita, etc.

#### Arenas Terrígenas:

Son producidas por la desintegración de rocas pre-existentes, pero sólo lo comprenden partículas de tamaño de arena que han soportado al interperismo químico de la fuente y durante el transporte. Los granos pueden ser variables en composición química en su origen, dependiendo de las rocas de donde se derivan y de su ambiente climático. Las rocas básicas plutónicas que no contienen cuarzo producirán arenas hechas de feldespatos, minerales ferromagnésicos y magnetita. La arena derivada de las rocas metamórficas, comúnmente incluye una variedad de minerales en su origen, entre los cuales

cuarzo y el feldespato predominan y el granate, magnetita y otros minerales son localmente conspicuos. En la erosión de las rocas sedimentarias, las partículas de cuarzo fácilmente subsisten para ser concentradas y redepositadas. El ciclo puede pasar a través de una serie de etapas sedimentarias y, mientras tanto, todos los minerales menos durables, son gradualmente eliminados y casi sólo restan arenas de cuarzo puro.

Las series de minerales pesados pueden diferir en formaciones sucesivas en una región dada por cuanto las fuentes de formación pueden estar en direcciones diferentes. Tales diferencias pueden, sin embargo, deberse a que quedan al descubierto nuevos tipos de rocas en el área de origen al proceder la erosión.

La redondez y esfericidad juegan papeles diferentes en la sedimentación. La redondez da una medida de la atrición que la partícula ha experimentado, pero su influencia sobre el movimiento de la partícula es secundario; la esfericidad, por otro lado, tiene una fuerte influencia en el comportamiento dinámico. Una esfera no solamente rueda con más facilidad que otras formas, sino que como tiene el área de superficie más pequeña posible por unidad de volumen, tiene una velocidad mayor de asentamiento que cualquiera otra forma. La partícula en forma de lágrima puede ser una excepción, pero es difícil que se encuentre en los sedimentos (20).

#### Clasificación de las arenas:

Se subdividen por tamaños de acuerdo con la escala de Wentworth (20); sin embargo, una subdivisión más completa es por su composición (20).

Se propone clasificar las arenas en cuanto a su composición como se clasifican las areniscas:

1.- Cuarzo arenita o arenisca cuarzosa.- Los granos son predominantemente de cuarzo del total. Existen dos variedades de cuarcita: a) orto-cuarcita, si se introdujo cemento silíceo durante la diagénesis o el sepultamiento normal sedimentario; b) metacuarcita, si la roca es un producto de metamorfismo. En este grupo se incluye a la "arena verde" o arenisca glauconítica que contiene considerable glauconita y el resto normalmente cuarzo (20). De esta arena verde, Jost (42) obtuvo 222 g. por tonelada de vanadio. Todas aquellas arenas que tengan una composición similar a estas areniscas cuarzosas, se pueden llamar arenas cuarzosas.

2.- Arkosa.- Contiene un 25% de feldespato. El resto es cuarzo y una matriz de arcilla-caolín. En forma idéntica, las arenas que tengan una composición similar, se las puede llamar arenas de arkosa.

3.- Grauvaca.- Contiene 33% o más de material oscuro que se descompone ya sea en fragmentos de rocas o minerales o matriz; el resto normalmente es cuarzo con o sin feldespatos, fragmentos de roca de color claro y matriz de arcilla y limo bien litificado. Las arenas de composición similar se las puede llamar arenas de grauvaca.

4.- Arenas negras:- La arena negra está constituida por minerales pesados (33) y entre ellos se encuentra la magnetita, óxidos de estaño, ilmenita pero son menos frecuentes estos dos últimos (24). Las arenas ferríferas casi siempre contienen titanio (33).

Respecto a su composición, se pueden distinguir tres fracciones (1):

a) Minerales magnéticos que consisten de titanomagnetita, (magnetitas con cantidades apreciables de dióxido de titanio), magnetita o titanomagnetita con magnetita e ilmenita.

b) Materiales livianos (según la separación con bromoformo,  $d = 2.8$ ) - constituidos por cuarzo, plagioclasas, feldespatos potásicos, vidrio volcánico, pastas volcánicas, alenitas y carbonato de calcio.

c) Minerales pesados (densidad mayor de 2.8). Entre ellos están los - piroxenos, anfíboles, granate, epidoto, zircón, rutilo, monacita, titanita, minerales opacos (hematita), pseudobrookita, etc.

Este estudio se dedica únicamente a las arenas magnéticas del grupo primero o a).

Otra clasificación se puede efectuar respecto al origen de las arenas (20):

1- Arenas oolíticas, que son granos redondeados cuyo origen es la precipitación constructiva y componen las oolitas, las pisolitas y algunas arenas verdes.

2- Arenas fluvio-glaciares. Cuando los granos angulosos están sometidos a la corrosión o al frotamiento durante bastante tiempo, haciéndose menos angulosos y su aspereza ha sido modificada al arrastrarlas el agua corriente.

3- Arenas eólicas, de estructura no concéntrica en la superficie de fractura y de un diámetro de 0.75 mm. o menos, de origen eólico, marino o fluvial. Este redondeamiento se debe al agua circundante.

Las partículas menores son susceptibles de escapar al redondeamiento debido a que permanecen en suspensión, mientras son arrastradas por la corriente.

En el agua, las partículas de arena pueden ser angulares si el diámetro medio es menor de 0.75 mm. La humedad en la arena marín no sólo sirve como amortiguador para evitar el roce de unas partículas con otras, sino también para refrenar su transporte y manipulación por el viento.

#### Actividad Geológica de los Mares:

Esta actividad se manifiesta mediante la desintegración de las rocas

que forman las costas y el fondo de sus zonas no profundas, a la vez en el transporte de sedimentación de los productos de la desintegración. Esta última viene determinada por el movimiento del agua y por la presencia del mundo orgánico que puebla el mar. El carácter de estos dos últimos depende en gran parte de su profundidad, de la temperatura, presión y contenido salino del agua, así como de su transparencia.

El mar realiza una gran labor destructiva (abrasión) y de acarreo de material detrítico, lo mismo de estratificación de los sedimentos, es decir, formación de rocas sedimentarias. Este último aspecto de la actividad del mar es muy importante. Lógicamente, las rocas de las costas no son destruidas con la misma velocidad por las olas. En igualdad de condiciones, sobre esta velocidad influyen la resistencia o solidez de las rocas y el carácter de su sedimentación o sea, la tectónica de los rectores costeros de corteza terrestre. Es característico que la velocidad máxima de destrucción del litoral se observa en el caso en que las rocas sedimentarias yacen inclinadas hacia el continente y la mínima cuando la inclinación en que yacen va dirigida hacia el mar.

A consecuencia de los choques de las olas, contra las costas, se forma la plataforma de abrasión costera o zona de quebratamiento (20).

#### Ambientes de depósito:

Los ambientes de depósito generadores de las sedimentaciones que se acumulan en las distintas zonas del mar, se pueden clasificar en tres procesos o ambientes importantes (20): sedimentarios, marinos y mixtos.

#### Procesos sedimentarios:

En la naturaleza del sedimento influyen el clima y el relieve. El transporte

te se realiza en tres formas:

- a- en suspensión,
- b- en solución
- c- por tracción en el fondo, siendo los agentes principales el agua, el hielo y el aire.

### Transporte en el mar:

Este es el que más nos interesa. Las corrientes en el mar son generadas por los vientos, las mareas y las diferencias en gravedad específica.

Citemos ahora, muy someramente, las diferentes corrientes que juegan papel importante en la sedimentación:

a) Corrientes de deriva. Son creadas por la fricción del viento soplando sobre la superficie. Puesto que la fuerza de fricción es aplicada solamente en la superficie, su efecto desaparece rápidamente en la profundidad y es despreciable bajo los 600 pies. En los mares abiertos, tales corrientes se mueven lentamente y son someras, pero cuando están constreñidas por el contorno de las márgenes continentales, ganan tanto en profundidad como en velocidad.

b) Las corrientes de marea se originan debido a que la tierra gira entre dos combas. Como resultado de ello, las combas de marea se persiguen una a otra alrededor de la tierra de Este a Oeste. En el mar abierto las combas son muy bajas y el movimiento no es importante, pero al chocar contra la plataforma continental fluye una corriente y se retira con cada marea que pasa.

A diferencia de las corrientes de deriva, éstas no están limitadas a la superficie ya que son afectadas por los contornos del fondo y por el perfil de

la costa. El movimiento predominante es en una dirección debido a que el flujo puede ser más fuerte que el reflujó de la marea. Tiene una velocidad apreciable, pero menor que la corriente de turbidez.

c) Se originan corrientes de densidad dondequiera que las masas de agua difieran en gravedad específica y fluyen las más pesadas bajo las más ligeras, a las cuales desplazan. Tales desigualdades pueden originarse por diferencias de temperatura (g. específica varía inversamente con la temperatura), en la salinidad (aumenta con la salinidad), o los sedimentos en suspensión (que tienden a agregar más peso a la masa de agua). En el trópico, la rápida evaporación aumenta la salinidad hasta dar lugar a corrientes descendientes. Todas estas corrientes tienen baja densidad y el agua fluye en las áreas de alta a las de baja presión barométrica.

d) Johnson en 1939 (20) introdujo el nombre de corrientes de turbidez, para distinguirlas de otras clases de corrientes de densidad, debida a las variaciones de temperatura y de salinidad. La velocidad de este tipo de corrientes depende de la masa y de la concentración de los sedimentos en suspensión, así como de lo fuerte de la pendiente del fondo. Existen dos tipos: las constantes y las espasmódicas, que se desarrollan sólo cuando un gran volumen de sedimentos sueltos se ponen repentinamente en suspensión.

El papel de las olas: Juegan un papel importante en el movimiento de los sedimentos, en los fondos someros de los mares puesto que cada una de las olas al pasar los impulsa hacia arriba.

Cada partícula bajo la superficie de las olas se mueve en círculo, pero los diámetros de los círculos decrecen exponencialmente con la profundidad, siendo la rapidez del decrecimiento más bien una función de la longitud de onda que de su altura. Teóricamente, el diámetro de la órbita en movimiento se reducirá a la mitad a la profundidad de  $1/9$  de L (longitud); en un cuarto,

a  $2/9$  de  $L$ ; en un octavo, a  $3/9$  de  $L$ ., etc. Una ola que tiene una altura de tres metros y 90 metros de longitud, producirá una órbita de unos treinta y ocho centímetros a una profundidad de treinta metros, pero solamente una de cinco centímetros a sesenta metros, y una de menos de seis milímetros a noventa metros de profundidad. Por lo tanto, aún las grandes olas de las tormentas no pueden afectar el fondo que se encuentra a una profundidad mayor de unos cuantos cientos de metros.

Cuando el viento empuja las olas, la fricción con la superficie del agua - lleva a cada partícula algo adelante, de modo que no regresa exactamente a la posición previa. Así se producen las corrientes de deriva y si el agua es bastante agitada, los sedimentos del fondo pueden moverse. Cerca del fondo del mar, las órbitas se transforman en elipses aplastadas y el movimiento es principalmente de vaivén.

Sólo en presencia de una corriente de fondo, aún muy suave, permite a la corriente trasladar partículas que de otro modo no sería posible mover.

#### Procesos o ambientes marinos:

Las condiciones marinas de depósito varían mucho, pero son menos conocidas que las terrestres debido a la dificultad de efectuar observaciones directas.

El estudio de los ambientes marinos abarca 4 zonas: litoral, nerítica, baltial y abisal. De ellas nos interesa únicamente las dos primeras, a las cuales nos referiremos ligeramente.

a) Litoral: Comprende el área entre los extremos de la marea alta y baja, es decir, es parte tierra y parte mar, según las circunstancias y en forma alternativa.

b) Nerítica. Se extiende desde el límite de la marea más bajas hasta el "cambio de pendiente" (20), que es un límite real y natural. Es un área de corrientes de fondo activas, afectadas por olas de tormenta y corrientes de marea. Esta zona es variable debido a su poca profundidad y cercanía a la tierra, porque yace generalmente al alcance de las olas y corrientes de fondo capaces de levantar y mover repetidamente los sedimentos del mismo y por último por su riqueza y variedad de la vida bentónica que resulta de la penetración de la luz solar y desarrollo de la vida vegetal.

Ambientes mixtos: En el estudio de los ambientes mixtos de depósito, lo que es importante es el marco geológico general y los procesos que predominan, no el origen de la línea costera.

Los principales agentes y ambientes de depósito son: las olas y corrientes costeras, mareas y corrientes de marea, ríos cargados de limo y, por último, los organismos presentes en el ambiente.

No obstante lo que se anotó anteriormente sobre el papel de las olas, es conveniente tratar el tema desde otro punto de vista que está íntimamente relacionado con los ambientes mixtos y por ello, se anotarán algunos conceptos como una parte de esta sección.

Ambiente dominado por las olas: Una costa acantilada en roca dura, difícilmente puede ser un sitio de mucho depósito, sin embargo, puede formarse un talud o angosta playa de cantos y material desgastado de los acantilados, que se acumula especialmente como playas semiconfinadas entre los promontorios (20).

Acción sobre las costas bajas y abiertas. Una playa típica se divide en:

a) Precosta, lisa y pendiente, que se extiende desde la más baja mar hasta un cambio de pendiente bien marcado, llamado berma, que se encuentra en la línea de pleamar normal y

b) Una trascosta, más accidentada, pero plana, que se extiende de la berma hasta el punto más lejano alcanzado por las olas, que en condiciones normales o naturales es comúnmente la base de un acantilado o la punta u orilla de una cresta de playa o una línea de médanos.

Los golpes de las olas pueden provocar mucha acción desintegradora, según se comprueba por la extensa erosión en las costas, ayudado por el efecto abrasivo de la arena llevada por el agua, máxime cuando hay corrientes rápidas. El efecto mecánico en el transporte es romper el material transportado en partículas más finas y redondear los bordes agudos de los fragmentos. Mientras más móvil sea el agente transportador, mayor finura y alisamiento tendrá el material (52).

Los materiales más resistentes como la ilmenita, magnetita y circonio, son retirados comúnmente del cuarzo y otros materiales ligeros y concentrados en capas separadas en las bermas y precosta.

Las conchas pueden estar presentes en abundancia y donde las olas son relativamente débiles, los minerales no resistentes son comunes o aún dominantes, pero el cuarzo no es común (20).

Los materiales transportados por las olas en la zona litoral o sean los sedimentos que acarrea, se clasifican en tres tipos:

- a- Clásticos o terrígenos
- b- Organógenos y
- c- Químicos (13)

Los primeros (o clásticos) comprenden arenas, lodos, cantos rodados, limo, detritos bastos, arenosos o limosos. Por detritos bastos se entiende los sedimentos integrados por fragmentos de más de 10 cm. de diámetro con cascos de 2 a 10 mm. Las arenas formadas por detritos de minerales o rocas son de 0.1 a 2 mm. de diámetro y pueden ser cuarcíferas o poligénicas; según sea la roca madre, las últimas pueden ser arenas poligénicas con alto contenido de caliza, piroxenos, magnetita, etc.

El tipo organógeno está compuesto por algas, colonias de coral por ejemplo, acumulaciones detríticas, que son sedimentos formados por productos de la meteorización de diversas conchas de organismos, mezclados con arena, grava, etc.

Por último, los sedimentos químicos formados por deposiciones de carbonato de calcio, óxidos de hierro y manganeso, sílice, cloruro de sodio, sulfatos de calcio, sodio y magnesio, etc.

Los sedimentos del lecho oceánico no entran en el estudio del presente trabajo.

#### Depósitos residuales en general

Ellos son los productos insolubles de la exposición de la roca a la intemperie, que han escapado a la distribución por los agentes de transporte y que todavía cubren las rocas a partir de las cuales han sido derivados.

Sus componentes pertenecen a dos clases:

- a) Minerales inalterables provenientes de las rocas adicionales y
- b) Productos insolubles de descomposición (52).

De la naturaleza de los minerales de la primera clase depende la cubierta -

rocosa, pero el cuarzo, feldespatos y muscovita, se encuentran entre los más comunes aun cuando los feldespatos son usualmente muy degradados. Los más raros, como la ilmenita, magnetita, circonio, turmalina, granate, rutilo, cromita y circón, pueden encontrarse y entre los minerales de la segunda clase los óxidos de hierro hidratados, óxidos hidratados de aluminio, sílice coloidal, silicatos de aluminio, etc. Ya que estos minerales no han sido afectados por el transporte, naturalmente no están clasificados en la playa y son angulares (52).

Los minerales pesados son en su mayor parte encontrados entre los granos más finos de la arena y frecuentemente están casi ausentes de los granos más gruesos. Entre estos minerales pesados pueden citarse la mayoría de los minerales de la primera clase a que se ha hecho referencia en esta página y que a causa de su desgaste, son de dimensiones aproximadamente iguales (32). La acumulación mineral pesada puede ser un diagnóstico para una formación particular si los minerales más raros se notan, así como también las particularidades cristalográficas y ópticas de los más comunes (52).

Entre las formaciones marinas, los depósitos de playa normalmente muestran el más alto grado de clasificación debido a que la arena ha estado por mucho tiempo sujeta a las oscilaciones y al desgaste producido por las olas.

Además, la estratificación de los depósitos de playa difieren notablemente de un sitio a otro. La precosta superior tiene la estratificación más regular, con largas láminas parejas y cruzadas y exhiben ordinariamente sólo la estratificación cruzada de ángulos muy pequeños. Pueden ser paralelas a la costa, a menos que la playa contenga montículos en forma creciente. La antecosta inferior con sus barras tiene una estratificación cruzada mucho más fuerte, con cortes y rellenos de estratificación cruzada tanto hacia tierra como hacia el mar. Los echados de estratificación cruzada son irregulares, pero comúnmente son dirigidos hacia tierra (20).

## C A P I T U L O   I I

### EL HIERRO Y SUS MINERALES MAS IMPORTANTES.-

#### Hierro. Generalidades:

El hierro es, después del aluminio, el elemento más abundante aunque raramente se le encuentra en su forma elemental. Un cinco por ciento respecto al total de los elementos de la tierra es hierro (24). Se encuentra en centenas de minerales, en arcillas y arenas. Se halla en mayor o menor cantidad en casi todas las rocas, especialmente en las que contienen anfíboles, piroxenos, micas, olivino. Los minerales que contienen hierro se presentan en forma de óxidos, sulfuros, carbonatos, silicatos y mezclas de ellos (31).

Los minerales que nos interesan en el presente trabajo son los óxidos de hierro. Los compuestos del hierro forman tres series que pueden ser referidos a óxidos según las siguientes fórmulas:

- a)  $FeO_3$  de número de oxidación 6,
- b)  $Fe_2O_3$  de número de oxidación 3 y
- c)  $FeO$  de número de oxidación 2.

El grado de oxidación más elevado corresponde a un anhídrido de ácido. Las sales derivadas de él o sales del ácido férrico, corresponden a la fórmula  $Me_2FeO_4$  y son análogas a las del ácido crómico y ácido mangánico, pero mucho menos estables que las de estos últimos (54).

El óxido de fórmula  $Fe_3O_4$  se puede considerar como derivado del ácido m-ferrroso y para algunos del ácido m-férrico de fórmula teórica:  $HFeO_2$ . Al formar la sal de hierro II daría origen a una sal de fórmula  $Fe(FeO_2)_2$  o sea  $Fe_3O_4$ , fórmula que representa químicamente a la magnetita.

Minerales de hierro de importancia económica (5):

Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	72.4% Fe	Mena magnética (negra)
Oligisto	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	70.0% Fe	Hematites roja
Limonita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	59-63% Fe	Hematites parda
Siderita	$\text{FeCO}_3$	48.2%	Hierro espático, banda negra, siderita arcillosa.
Goethita (31)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$		

En Kirk-Othmer (31), se nota una diferencia respecto a las fórmulas de Bateman (5), principalmente de las de limonita y goethita, ya que el primero considera que el monohidrato es la goethita. A la limonita le asigna la fórmula de  $2 \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , mientras Bargalló (4) indica que la fórmula de la limonita es  $\text{FeO} \cdot \text{OH}$ . Begeman (6), considera a la limonita como  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

En el continente americano, la magnetita y la hematita roja son las menas principales de hierro y la limonita y siderita lo son para Europa (5, 31).

La magnetita es la más rica en hierro, pero se encuentra en poca cantidad (arenas, yacimientos pequeños, generalmente en forma de inyecciones), mientras que el oligisto es más abundante y por lo tanto, el que más se emplea en la industria siderúrgica. Como dato de referencia, citemos que en un año normal promedio, la industria siderúrgica norteamericana emplea un 94% de oligisto, 5% de magnetita y 1% de limonita (5), aunque en (31) se indica y afirma que los porcentajes son de 90, 5 y 5 por ciento respectivamente.

Minerales básicos para obtener el hierro.

La importancia de estos minerales depende de su contenido en hierro. Cuanto menos hierro tenga un mineral, mayores serán sus impurezas y al fundirlo tanto mayor será la esco

ria que se produce y en consecuencia, mayor será el consumo de combustible.

De acuerdo con el estado actual de la industria, un contenido del 28% de hierro parece ser el mínimo para que el mineral pueda ser aprovechado por un tratamiento metalúrgico económico

Estos minerales no deben contener arsénico porque no son apropiados para obtener el hierro, ya que se considera como una impureza perjudicial para el proceso de fundición (54).

La constitución física del mineral es de gran importancia para su tratamiento metalúrgico.

Los minerales porosos son fácilmente accesibles a la influencia reductora de los gases del horno y permiten la reducción del metal en condiciones favorables. Si el mineral está reducido a un grano muy fino, gran parte del material se pierde al ser arrastrado durante el proceso de reducción por los gases del horno. El resto, que queda en forma de polvo fino, obstruye el horno y opone dificultades al paso de los gases.

Otros factores de importancia son la accesibilidad a los yacimientos, su extensión, el precio del mineral, etc.

#### Clases y orígenes de los yacimientos de minerales de hierro.

- |                               |   |                               |
|-------------------------------|---|-------------------------------|
| 1- Magmáticos                 | : | magnetita titanífera.         |
| 2- Metasomáticos de contacto: |   | magnetita, oligisto.          |
| 3- Reemplazamiento            | : | magnetita, oligisto.          |
| 4- Sedimentarios              | : | oligisto, limonita, siderita. |
| 5- Residuales                 | : | Oligisto, limonita.           |
| 6- Oxidación                  | : | Oligisto, limonita.           |

La magnetita puede ser formada por uno de los procesos enunciados o por com

binación de dos o más procesos (5).

Es indudable que los procesos magmáticos, sedimentarios y residuales dieron origen a los depósitos más importantes de los minerales de hierro.

Concentración magmática. Ciertos constituyentes accesorios o no comunes de los magmas pueden concentrarse en masas de suficiente volumen y riqueza, llegando a constituir yacimientos minerales de valor económico. Los representantes de la concentración magmática son muchos y están muy difundidos, pero los productos que rinden no son numerosos, aunque los depósitos en sí son de gran valor. Los yacimientos minerales magmáticos se caracterizan por su estrecha relación con las rocas ígneas intrusivas, intermedias o profundas. Son productos magmáticos que cristalizan a partir de los magmas.

La magnetita corresponde a un yacimiento magmático secundario de inyección de líquido residual o segregación de líquido residual (titanomagnetita); ambos de gran importancia económica (5).

Las menas magmáticas de óxidos de hierro de mayor importancia geoquímica (42) son las de hierro titanífero, las de cromita y las de magnetita. La primera y la última se encuentran a veces en granos independientes, pero por lo general, forman mezclas íntimas consistentes en láminas de ilmenita de espesor variable en los granos de magnetita. La magnetita de las rocas ígneas es casi siempre titanífera (titano-magnetita) y en este caso es evidente que el titanio IV sustituye en forma diadócica al hierro III y quizás en parte al hierro II. Sin embargo, la diadocia titanio hierro en la estructura de la magnetita no es muy extensa a temperaturas bajas. Si la disminución de la temperatura durante la cristalización es relativamente lenta, la ilmenita se separa de la magnetita formando inclusiones orientadas. Según Foslie (42) la miscibilidad de la ilmenita y de la magnetita es muy pequeña a todas las

temperaturas, mientras que el ortotitanato de hierro es isomorfo de la magnetita y puede formar con ella una serie extensa de cristales mixtos (titano-magnetita).

Si existe un exceso de óxido de hierro III con relación al dióxido de titanio, el ortotitanato es estable:



Formándose magnetita pobre en titanio, mientras que a bajas temperaturas:

$\text{Fe}_2\text{TiO}_4 \longrightarrow \text{FeTiO}_3 + \text{FeO}$ , que se incorpora a los silicatos.

Metasomáticos. Corresponde a los efectos de contacto de las emanaciones gaseosas a elevada temperatura que escapan durante la consolidación de los magmas intrusivos o poco después de la misma (5). Se divide, según Barrell (5) en dos tipos:

a- Metamorfismo de contacto, que no da origen a yacimientos minerales, salvo algunos no metálicos, y

b- Metasomatismo de contacto (efectos térmicos con adición procedente de la cámara magmática, diferencia del anterior) y que puede dar origen a yacimientos valiosos y bien acusados.

Reemplazamiento metasomático. Es el proceso más importante. Puede definirse como un proceso de solución y deposición capilar esencialmente simultáneo, en virtud del cual uno o varios minerales de formación anterior son substituidos por un mineral nuevo. Sin embargo, el proceso no es tan sencillo como lo indica la definición. Los minerales sustituyentes son acarreados en la solución y las sustancias substituidas son alejadas también en la solución; es un circuito abierto, no cerrado.

Sedimentación. Tiene como resultado, no sólo la formación de rocas sedimentarias comunes, sino también valiosos depósitos minerales de hierro, manganeso, cobre, fosfatos, hulla, etc. La formación de depósitos sedimentarios implica: una fuente adecuada de minerales, la reunión de éstos por solución u otros procesos, el transporte de los mismos al lugar de acumulación y el depósito de los materiales en el receptáculo sedimentario.

Para nuestro estudio los orígenes residuales y de oxidación tienen poca importancia. Basta citar rápidamente que el único interés serían los derivados de las rocas básicas ígneas, que presentan depósitos extensos, impurificados con alúmina, bajo sílice, fósforo y azufre. Es de suma importancia para la bauxita y sulfatos de hierro.

Menas de hierro de origen marino (42).

Los sedimentos ricos en hierro, formados principalmente por hidróxido y óxido, son las menas más importantes de origen marino sedimentario. Se depositan en el agua dulce y en las partes poco profundas del mar. El depósito del mar es más importante que el de agua dulce, tanto en el aspecto geoquímico como en el técnico, por lo que se refiere a la extensión de los yacimientos formados. Los óxidos marinos se depositan a partir de las soluciones de la meteorización de origen continental y se precipitan en gran parte en forma de geles. La textura y composición química de los óxidos marinos es muy variable.

Las bacterias favorecen la precipitación del hierro en el agua de mar y en los lagos, en forma de hidróxidos de hierro III, quedando los ríos con una concentración de hierro de 2 a 8 g. por tonelada y en el agua de mar de 1 g. por tonelada. Los carbonatos también ayudan a precipitarlo, así como el pH del mar, que oscila entre 8.1 a 8.4 y, por lo tanto, el hidróxido de hierro

II que se forma por el medio alcalino, no es estable debido al hecho de que en el mar siempre existe oxígeno y este hierro II, que puede ser llevado - también por el agua de los ríos hacia el mar, es oxidado en parte a hidróxido de hierro III, coloidal y otra parte, forma complejos con el ión fluoruro que es utilizado por las plantas marinas (42).

Durante la descomposición química, los minerales de las rocas pasan al estado de solución iónica o coloidal o bien permanecen in situ en forma de residuos de la meteorización y de residuos hidrolíticos insolubles.

El hierro de las minas, transportado en forma de hierro II y III, forma complejos y las reacciones de deposición se completan con las reacciones de hidrólisis y de intercambio iónico. La magnetita puede así formarse de estas soluciones que llevan minerales ferruginosos (30).

En los sedimentos arenosos, la magnetita y la ilmenita tienen un orden de persistencia bastante alto, aunque menores que el cuarzo, granate, circón, biotita, turmalina y apatito. Además, la magnetita tiene una resistencia al transporte mayor que la ilmenita, por lo tanto, se concentra frecuentemente por el agua corriente y especialmente por las olas, formando bandas y capas de espesor variable que se pueden utilizar como menas valiosas. Estos depósitos fluviales o costeros de minerales pesados se presentan en las areniscas consolidadas en forma de capas bien conservadas cuyo carácter petrográfico pueden presentar variaciones locales. En ocasiones, la sílice desaparece por lixiviación y en su lugar se deposita la magnetita.

Freise (42), ha encontrado que el agua corriente desgasta mucho más aprisa - las rocas básicas que las ácidas. Estas contienen mucho cuarzo y son más ligeras, mientras que las básicas contienen olivino y son más pesadas (13). Como la magnetita se encuentra en las rocas metamórficas e ígneas, al meteorizarse dan origen al mineral más disgregado ya que tanto la magnetita como la ilmenita son bastante estables frente a la meteorización.

## C A P I T U L O   I I I

### LA MAGNETITA Y SU EXTRACCION INDUSTRIAL

#### LA MAGNETITA.- GENERALIDADES.

La magnetita corresponde, de acuerdo con Tyrrel (52), a la subdivisión del grupo férmico de las rocas ígneas. Este grupo, cuyo nombre recuerda a férrico ferroso y magnesiano, difiere del otro subgrupo, sálica, en la cual se encuentran la sílice y la alúmina. Se define por roca ígnea o eruptiva a aquellas rocas enfriadas de una masa de silicato fundido a gran temperatura, formadas en las entrañas de la tierra y que se conoce como magma (13).

En cuanto a su etimología, probablemente su nombre deriva de la localidad Magnesia en Macedonia, Una fábula citada por plinio (14), refiere el nombre de magnetita a un pastor denominado Magnes, quien fue el que descubrió el mineral en el monte Ida al notar que los clavos de sus zapatos y las herraduras de la montura se adherían al suelo.

#### Fórmulas, nombre químico y sinónimos:

- a-  $Fe_3O_4$
- b-  $FeO.Fe_2O_3$       (36)
- c-  $Fe (Fe_2O_4)$       (14)
- d-  $Fe (FeO_2)_2$       (4, 33)

Óxido ferroso férrico (36) (16), ferrato ferroso, m-ferrato de hierro II, m-ferrito ferroso (16, 4), piedra imán (14, 16, 44, 50), mineral magnético de hierro (44), hierro magnético (44, 50), hierro etíope (36), óxido de hierro II y Hierro III, óxido de hierro magnético (36).

#### Propiedades.

Color negro-rojizo o negro (44, 34); el hidratado es negro (36).

También se cita como de color negro opaco (14), al negro con brillo metálico en las superficies recientes y mate en las antiguas (16).

Produce una raya negra de brillo mate (14, 13, 44) y señal negra sobre la porcelana destruslada (43), distinguiéndose de la franklinita por la raya (14).

Se presenta bajo la forma de masas compactas o de sedimentaciones granulares en las distintas rocas (13); cristaliza en el sistema No. 1 (16, 50) o simétrico (34). Forma cristales octaédricos bastante comunes pero usualmente ocurre en agregados masivos granulares. Se encuentra también cristales hexaquisoctaédricos, aunque generalmente de habitus octaédricos, en algunos casos maclados (14). Más raro es encontrarlo formando cristales dodecaédricos los cuales pueden estar estriados paralelamente a las aristas con el octaedro. Las otras formas de la clase son raras (14). Normalmente macizo, granuloso, pero grano fino y compacto (14, 16).

Fractura concoidea (13) u octaédrica en algunos ejemplares (14). En las masas compactas da fractura granular (13).

Se considera una espinela ( $MgAl_2O_4$ ) de tipo especial (14, 31), con índice de refracción de 2.42 y se descompone a  $1538^{\circ}C$ , transformándose en óxido de hierro II (31, 44). La variedad amorfa funde a dicha temperatura y las dos formas son disueltas por los ácidos formando las sales de hierro II y III.

La magnetita se oxida a alfa  $Fe_2O_3$  en dos pasos (10):

1- Hay formación de gamma  $Fe_2O_3$  en el  $Fe_3O_4$ .

2- El gamma  $Fe_2O_3$  se encuentra en el producto final mezclado con el alfa  $Fe_2O_3$ . El punto final del primer paso consiste en la oxidación de la magnetita, formando sobre la superficie una capa delgada de alfa  $Fe_2O_3$ , o bien -

cuando la formación de la gamma  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se ha completado.

La oxidación y transformación de las formas gamma a alfa ocurre pronto y la estabilidad de una a otra se encuentra entre límites de temperatura muy cercanos (47). Gokhale (25) considera que un calor prolongado a  $800^\circ\text{C}$  basta para oxidar toda la magnetita a hematita, mientras Eggert (21) dice que el proceso de la oxidación viene determinado por el tamaño de las partículas del mineral, oxidándose las partículas grandes en dos pasos, mientras las finas o pulverizadas se oxidan en un solo paso a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

La magnetita forma muchos hidratos ninguno de los cuales puede caracterizarse fácilmente. El más común es el tetrahidrato.

La gravedad específica oscila entre 4.9 a 5.2 (13, 44) citando algunos autores valores fijos tales como 5.0 (16, 50, 24), 5.1 (43), 5.15 (28), 5.17 a 5.18 (36), 5.18 (14, 34) y 5.2 (31).

Respecto a la dureza, ésta oscila entre 5.5 a 6.0 (28, 44), siendo el dato más usual citado en la literatura de 6.0 (14, 16, 44, 50) en la escala de Mohs.

Teóricamente, la magnetita contiene un 72.4% de hierro y un 27.6% de oxígeno (14) y real del 40 al 70% (54). Contiene muchas impurezas, según el sitio de localización, siendo las más importantes el fósforo (0.02 a 3%), azufre y si éste es elevado, debe eliminarse por tostación. (Generalmente se presenta este inconveniente cuando la magnetita está impurificada con las piritas (54)); además, contiene magnesio, titanio (5, 20, 37, 42, 43); y algunas veces alúmina y carbonato de calcio (5).

La magnetita difiere en composición mineral, en la distribución del grano y en la abrasión del mismo, según sea la región de la cual proviene (27). Por

ejemplo en las arenas de ciertas playas del Japón (27), la magnetita más abundante se encuentra en la fracción del tamiz de 40 a 60 mallas, no obstante que en otros lugares el grano es mayor o menor (11).

Es infusible (14), insoluble en agua, lentamente soluble en HCl (14) y soluble en HCl caliente (36), dando su solución las reacciones del hierro; con el soplete sobre carbón no se funde ni desprende vapores, ni forma aureola; pulverizada y con la perla de bórax adquiere coloración amarilla en caliente y verde botella en frío (16,48).

#### Propiedades magnéticas.

Se reconoce fácilmente porque tanto los cristales como las masas cristalinas se comportan como imanes y los atraen los imanes artificiales (16, 44); pero es preciso tener en cuenta que esta propiedad no se manifiesta o es muy débil antes de haber estado algún tiempo en contacto con el aire (16). Es fuertemente magnético y la variedad conocida como piedra imán, actúa como un magneto natural (14, 34).

La fuerza coercitiva (causada por presiones en las partículas) de polvos magnéticos depende fuertemente de los tamaños de las partículas (39). Esto lo comprobó Starchik (49), creando cargas eléctricas sobre magnetitas, en un campo eléctrico, estudiando además su relación con la intensidad. Entre sus resultados obtuvo que la carga tiende a aumentar con las partículas pequeñas debido a su baja tensión superficial. Mientras que Shvets (46) cree que la susceptibilidad magnética aumenta con el tamaño del grano del mineral y aparentemente obtuvo en la práctica datos confirmatorios al efectuar gráficos de la susceptibilidad magnética contra el tamaño del grano, de 0.05 a 0.05 mm. de diámetro.

Otros autores consideran que la alteración por inducción del metal de la magnetita es una función de la temperatura y del eje del cristal que puede

determinarse por difusión eléctrica. La dirección más fácil magnetizable - del cristal de la magnetita es el eje (111) y este eje es el responsable del ferromagnetismo. Percherskii (40), considera que la magnetización de la magnetita depende de la presencia del titanio.

#### Localización de la magnetita:

Ampliando las referencias donde se habla en términos generales de las menas del hierro en el Capítulo anterior, se indican a continuación otras fuentes principales de la magnetita:

1- Se halla diseminada como mineral accesorio en muchas rocas ígneas junto con la ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) y la cromita  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  (14, 34, 42), siendo más abundante la magnetita (14, 42). Dana (14) clasifica la magnetita en el subgrupo de los minerales accesorios dentro de las rocas ígneas.

2- Es mineral frecuentísimo en las rocas eruptivas y metamórficas y no es raro encontrar granos de ella en las sedimentarias e incluso forma a veces arenas casi en su totalidad constituidas por granos de magnetita (16).

3- Es muy difundida en la naturaleza y superada únicamente por la hematita en las menas de hierro. Se encuentra como mineral accesorio en algunas rocas básicas y puede ser concentrada en masas por segregación magnética (34).

4- En muchas rocas aparece como huésped (26), junto con los anfíbolitos, piroxenos, y asociado a la biotita, hornblenda, augita y altos piroxenos.

5- En ciertos tipos de segregación magmática es uno de los principales constituyentes de la roca y forma así grandes masas de mineral. Dichas masas son generalmente titaníferas. Aparece en rocas metamórficas cristalinas y en rocas ricas de minerales ferromagnésicos y ferromagnesianos, tales como la diorita, gabros, peridotitas, etc. (14).

- 6- Aparece también en la granodiorita que es la roca abisal intrusiva más frecuente en la corteza terrestre, junto con el granito, gabro, piroxenita, etc. (13).
- 7- En McGraw (34) y Dana (14), se reportan inmensas capas y lentejones en rocas metamórficas antiguas.
- 8- En las magmas ígneas se ha encontrado magnetita y de acuerdo con Niggli (52), se le asigna la fórmula  $\text{Fe}(\text{Fe}_2\text{O}_4)$ , encontrándose de un 3 al 3.0%.
- 9- Se encuentra en los meteoritos, junto con la cromita, y en los lititos o meteoritos pétreos (42, 41).
- 10- Con características pseudomorfas y libre de titanio y vanadio, se ha encontrado una magnetita fibrosa (38) y que se cree representa una última intrusión de hierro en las venas serpentinizadas de rocas ultrabásicas.
- 11- También se encuentra en las cuarcitas ferrosas (28) en la cual la magnetita es el mineral principal para obtener el hierro.
- 12- En los compuestos oxidados relacionados con fenómenos volcánicos (42) se ha encontrado con cierta frecuencia.
- 13- Bateman (5) reporta la presencia de magnetita en cuencas de sedimentación, junto con intrusiones erosionadas y de asiento profundo en donde predomina la meteorización tropical profunda. En los Estados Unidos se presenta en regiones profundas cortadas por intrusiones plutónicas, con porcentajes de 60 a 70% de hierro.
- 14- Miller y Folk (37), encuentran magnetita e ilmenita como granos detríticos en 22 muestras de formaciones que varían de edad desde el Cámbrico al Mesozoico y que representan prácticamente todos los lechos rojos bien conoci -

dos en Estados Unidos. Generalmente son los minerales pesados predominantes pero en las capas grises o verdes, no se encontraron. De estas observaciones obtienen lo siguiente:

a- Bajo condiciones reductoras, tanto la magnetita como la ilmenita fácilmente desaparecen y no pueden ser reconstruidas.

b- Todos los lechos rojos se han derivado de fuentes de rocas ígneas o metamórficas, donde se encontraban ambos minerales.

15- Muchos yacimientos magmáticos se consideraban antiguamente como pertenecientes al grupo de inyecciones. Los minerales metálicos se concentraban posiblemente por diferencia de cristalización y son anteriores o contemporáneos con los minerales primarios ígneos asociados. No han permanecido en el lugar de acumulación inicial u original, sino que fueron inyectados en la roca huésped o en las rocas circundantes. La magnetita suele a veces encontrarse en esta forma de inyecciones, atravesando estructuras rocosas que la encierran, incluyendo fragmentos de rocas o se presentan en forma de diques u otras masas intrusivas. En forma de dique de magnetita titanífera citemos la de Cumberland (Rhode Island) y el mayor depósito de magnetita existente en el mundo: el de Kikuna, Suecia (5).

Bateman (5) ha sugerido que en la diferenciación de magmas ígneos básicos, ricos en hierro, titanio, volátiles y fundentes, los depósitos de mineral pueden formarse como una magma residual y por lo tanto, ser susceptibles de inyección. Si es así, pueden dejar de ser representantes de la clase de inyecciones magmáticas primarias. Los minerales magmáticos secundarios son masas de minerales pirogénicos que cristalizaron hacia el final del período magmático.

16- Por último, citemos las arenas de hierro magnéticas o titaníferas -

que están formadas por granos de magnetita con pequeñas cantidades de óxido de titanio, procedentes del desgaste de rocas feldespáticas, en que se presentan en gran escala, por la acción de los agentes atmosféricos (43).

Las materias más ligeras son arrastradas por las lluvias o las olas, depositándose la magnetita junto con el dióxido de titanio y otras materias pesadas (43).

17- Como hojas finas y dendríticas se ha encontrado entre las hojas de mica (14).

#### Usos.

Es un mineral importante como fuente del hierro (14, 5, 42, 44 y 55) y algunos lo consideran el mejor mineral para obtener este elemento (13, 16). Se emplea mucho como pigmento en pinturas, en linóleos, en cerámica, para ciertos vitriados y en la industria textil. Para estos usos la industria emplea tanto la magnetita natural como la artificial (31). Una mezcla íntima de magnetita y corindón constituyen la mayor parte del material conocido como esmeril (34).

Aproximadamente un 5% de la producción del hierro en los Estados Unidos proviene de la magnetita (5, 14, 31).

Se emplea en la construcción de electrodos (9) y fundamentalmente en ánodos para la electrólisis del cloro y los álcalis (29).

En la actualidad adquiere gran importancia como catalítico en la síntesis del amoníaco. Se emplea en forma finamente pulverizada y fundiéndolo (53) solo o con hematita (18 y 19) y se le agrega al producto fundido óxidos de aluminio, calcio, potasio y sílice (19). El producto resultante tiene una alta actividad catalítica (19). Esta actividad depende del radio  $Fe^{II}/Fe^{III}$ ,

(18).

La estructura básica de la magnetita es aquella que lleva inclusiones catalíticas, que por lo general se la dan las formas aceleradoras de otros óxidos de hierro (18).

También se ha recomendado recientemente emplear la magnetita junto con la barita en los agregados de concretos especiales que sirven como escudo o protección de alta eficiencia contra las radiaciones gamma (45).

### EXTRACCION INDUSTRIAL DE LA MAGNETITA.

#### Fundamento y minerales de partida:

La extracción industrial de la magnetita se realiza mediante máquinas con magnetos con el fin de concentrar el mineral. Para ello se aprovecha la propiedad magnética que presenta el  $m$ -ferrato de hierro II, separándolo de las impurezas que lo acompañan y que en nuestro caso está constituida por la parte de la arena negra rica en componentes pesados y livianos, según se indicó anteriormente.

Su estudio tiene importancia porque es necesario emplear la maquinaria adecuada para la extracción según las características granulométricas, magnéticas, de medio ambiente (seco o húmedo) e impurezas que acompañan a la magnetita.

La magnetita se puede presentar en dos formas fundamentales: en las arenas negras como cristales pequeños o gránulos y en los yacimientos de inyecciones en forma cristalina y formando conglomerados.

En el primer caso -o sea la magnetita de las arenas- se tiene el material de un grano medio o fino (según la clasificación de Angelelli (1) y que aparece en páginas subsiguientes de este trabajo), a veces extrafino, listo para su

extracción mediante métodos magnéticos, mientras que el mineral de inyecciones debe reducirse de tamaño previamente a su extracción magnética o modificación especial más económica.

La segunda presenta el inconveniente de tener una ganga serpentinoso que hace difícil su tratamiento (33) y, por lo tanto, el método es diferente al seguido en la extracción de la magnetita de las arenas negras.

#### Preparación de los minerales.

El tamaño juega un papel importante ya que cuanto más pequeño sea, mejor será la transmisión de calor en el horno y cuanto más fino más dificultad habrá al paso de los gases; por tanto, el material debe tener cierto grado de finura respecto a su tamaño que guarde relación con la altura del horno.

Además, es necesario tener en cuenta que algunos materiales deben tostarse antes de su tratamiento en el horno, como sucede con las magnetitas que contienen cierta cantidad de azufre, o bien que por ser demasiado compactas, los gases reductores encuentran muy difícil el paso hacia el interior del mineral y se acostumbra esponjar éstos, calentando hasta el rojo para que se formen finas grietas por las cuales puedan penetrar los gases en su interior (55).

Si la magnetita proviene de inyecciones, deben triturarse antes de someterlas al horno.

La extracción del hierro de las magnetitas se verifica por el método de concentrados y procesos pirometalúrgicos basado en la aplicación del calor y gases reductores (34). El método de concentrados se realiza por dos operaciones fundamentales: por suspensión en el agua o flotación aplicado a granos muy finos, desde  $\frac{1}{2}$  a  $\frac{1}{4}$  de mm., y por separación magnética, que es la más u

sada, por lo que se le considera más detenidamente a continuación.

### Separación magnética.

La extracción de la magnetita de sus minerales tuvo al principio sus dificultades debido a que era preciso construir aparatos de marcha continua para los distintos tamaños de grano. Con base en estudios, resultaba la posibilidad de separar las sustancias fuertemente de las débilmente magnéticas, tales como óxidos de hierro, manganeso y sulfuros de ellos, junto con material silíceo con un cierto contenido de hierro, manganeso, níquel, cobalto, titanio, cromo y tungsteno. Estas técnicas introdujeron las instalaciones mecánicas independientes y en húmedo (55).

Este procedimiento llamado flotación, obtuvo un gran resultado en la separación. Se funda en que el agua fangosa del mineral junto con un aceite, se adhieren a las burbujas de aire cuando el peso específico de las partículas del mineral junto con las burbujas de aire es menor que el agua fangosa; aquéllas suben a la superficie y se reúnen allí formando una espuma que puede retirarse separadamente de las rocas que han quedado en el agua fangosa o que se han ido al fondo (55).

Este método se ha modificado, haciendo pasar el mineral junto con agua por bandas especiales, aprovechando la diferencia de densidades del mineral y la ganga. Después se efectúa, algunas veces, la separación magnética haciendo pasar el polvo transportado por la corriente de agua entre los polos de un electroimán, que retiene el mineral de hierro mientras la ganga es arrastrada por la corriente de agua (33).

La introducción del separador magnético debe considerarse como un gran éxito para la industria de la separación, pues gracias a él fue posible, por lo pronto, aislar mineral de igual peso específico partiendo de su comporta



vedad, fajas longitudinales y transversales, raspadores y de rocío.

e) La naturaleza del fenómeno magnético usado, tal como la atracción inducida, repulsión histérica, fuerza coersitiva de reacción, etc.

f) Movimiento de los magnetos: estacionario o móvil.

### Separadores para la magnetita.

Hay fundamentalmente dos tipos: separador de anillos o plataforma y el separador de tambor o rodillo. Y, por supuesto, muchas modificaciones a estos dos tipos entre los cuales se citan los siguientes:

1- Separador de anillo. El material entra por la parte superior y se distribuye uniformemente sobre un canal que conduce a los planos de alimentación que dirigen el material hacia el campo magnético de trabajo. Ahí son atraídos por los anillos polares y caen dentro del campo en el depósito colector donde son evacuados por canales. El material no magnético pasa sin sentir influencia alguna y cae en un colector central. Los aparatos se diferencian sólo en detalles constructivos o bien en la disposición e intensidad de los polos o carretes magnéticos.

En el separador de anillo o plataforma, puede ser tratado todo el material aún el más débilmente magnético en seco o húmedo. El tamaño del grano de dicho material no debe pasar, sin embargo, de los 3 mm.

2- Separador de magneto rotatorio. Actúa un bloque magnético giratorio que rota en sentido de las agujas del reloj, unido a un cilindro giratorio independiente, el cual adquiere un magnetismo inducido. El magneto rota más rápido que el tambor. El material no magnético fluye fácilmente y el magnético, que se adhiere al tambor, pasa por una cuchilla separadora o raspadora.

3- Separador de magneto estacionario. Cubre dos terceras a la mitad de la circunferencia. La carga se distribuye a lo largo de la parte superior del elemento del tambor. El magneto es fijo y actúa sobre un cilindro móvil que es limpiado por una barra horizontal, separando la magnetita adherida al cilindro, de las impurezas que no se adhieren al tambor giratorio.

4- Separador de doble tambor. Para cargas de un 40 al 52% se concentran y purifican mecánicamente, con lo que se obtiene un mineral con 65% de hierro.

Con el separador de tambor puede ser tratado en seco magnéticamente casi todo el material, tan sólo debe recomendarse un tratamiento húmedo para granos de más de 2 mm. de diámetro.

Como este tipo de separador es más barato que el de anillo, se procurará utilizar también los separadores de tambor para grano fino y emplear tan sólo los de plataforma cuando el grano inferior a los 2 mm. debe ser tratado imprescindiblemente en húmedo o bien cuando deban cumplirse condiciones especiales para grano fino difícil de tratar en separadores de tambor.

Estos separadores con número de campo superior a 12 (weber o gauss), producen por campo y por hora entre 20 a 1000 Kg; los separadores de anillo en seco dan de 5 a 200 Kg. por polo y con tratamiento húmedo entre 50 y 400 Kg. bajo las mismas especificaciones (51).

Sin embargo, a pesar de que los tambores son máquinas de baja intensidad magnética, se prefiere para la magnetita una separación de alta intensidad, con segunda separación del residuo.

5- Separadores magnéticos de polea. Existen de 12 a 30" de diámetro por 12 a 90" de ancho de faja y con velocidades de 125 a 500 pies por minuto.

Capacidad variable de 800 a 1850 pies cúbicos por hora, por pie de ancho. Poder de  $\frac{1}{2}$  HP para 12 x 12"; de 10 HP para 30" x 60". Poder de activación del magneto de 415 W para los de 12" x 12", hasta 3080 W para los de 24" x 78", y 7850 W para los de 42" x 60".

6- Entre los separadores para el tipo recolector o "pick up type", se emplea el tipo de separadores de fajas en serie, aunque también se usa con bastante eficiencia, el separador magnético tipo Wetherill (51).

El diámetro óptimo del tambor empleado en las extracciones es de 40 a 60 cm. con una distancia mínima de separación entre tambores no menor de 12 a 20 cms., de acuerdo con la intensidad del campo (17).

## C A P I T U L O I V

### YACIMIENTOS DE MAGNETITA EN COSTA RICA

Los yacimientos del tipo inyecciones son pocos y se localizan en cantidades pequeñas, principalmente en la provincia de Guanacaste. Dada la poca magnitud del mineral explotable, no se considera de interés económico su estudio.

En cambio, la magnetita presente en las arenas negras de nuestras costas sí puede considerarse de importancia. Se localiza en algunas playas de las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón. El mineral magnético de las arenas negras de los ríos no se considera de interés, desde el punto de vista de su explotación, ya que este tipo de material no es abundante.

En las zonas arriba enunciadas se encuentran las arenas negras en los lugares o playas de Junquillal, Callejones, Potrero, Brasilito, Prieta, Carbón, Ocotal, y Tamarindo, todas ellas en la provincia de Guanacaste. En la de Puntarenas: Caldera, Tivives, El Roble, Playa Hermosa y Playa Azul, y en la zona Atlántica, las más importantes son las de Puerto Viejo y Cahuita-Río Estrella.

De los estudios efectuados por la Dirección de Geología respecto a la estimación de reservas de magnetita, se nota que la distribución y cantidad del material magnético se encuentra en una extensión relativamente grande o sea que las diversas playas se encuentran muy distantes entre sí. Además, existen dos lugares costeros que presentan una playa muy pequeña, tales como las de Ocotal y Carbón, que a pesar de su gran pureza en óxido magnético no son factibles de explotación. Mientras que en la zona Atlántica se encuentran dos sitios muy cercanos con gran abundancia de magnetita y de gran pureza, lo cual favorece la explotación, salvo que presentan el inconveniente de falta de vías de penetración y de corriente eléctrica necesaria para los

altos hornos. Para aprovechar las reservas de esta zona sería necesario construir una pequeña planta generadora de energía eléctrica en la zona adyacen - te al sitio de extracción. También se podrían construir vías de comunica -- ción y conducir cables de alta tensión, aprovechando el proyecto hidroeléc - trico de Cachí. Pero es lógico deducir que este segundo sistema resulta bas tante oneroso.

En consecuencia se recomienda efectuar estudios de preferencia en la zona - del Pacífico, tanto geológicos como determinaciones químicas y físicas del mineral a extraer. Por consiguiente se podrían considerar algunos aspectos tales como:

- 1- Estudio geológico en las posibles zonas de explotación, con el fin de de terminar el origen de las arenas y el posible volumen de las rocas madres - (tentativo).
- 2- Estudios referentes a la reposición de la arena extraída de las playas y el tiempo necesario para regenerar su efecto y a la vez, el nuevo contenido magnético del material.
- 3- Con los datos anteriores, hacer un gráfico de posibles reservas marinas del material magnético contra años o meses, observando las variaciones en - magnetita.
- 4- Estudiar -si es posible- las corrientes de mareas y transporte marino en las zonas de posible extracción del mineral.
- 5- Efectuar medidas del proceso sedimentario en las zonas de estudio.
- 6- Calcular las reservas de magnetita hasta la tabla de agua y con perforacio - nes más profundas, con equipo adecuado, calcular la verdadera reserva del ma - terial magnético.

No obstante, las dificultades existentes en la actualidad se han verificado calculaciones tentativas de las reservas del óxido magnético hasta la tabla de agua, las cuales se estiman en 3.141.279 toneladas métricas (según la Dirección de Geología del Ministerio de Industrias), que se distribuyen así:

Zona de Puntarenas:

Caldera	104.458	
Tárcoles Norte	197.234	
Otras playas	1.019.613	
		1.321.613

Zona de Guanacaste:

Real	2.888	
Brasilito	144.853	
Potrero	387.332	
Prieta	35.343	
Callejones	60.797	
Junquillal	22.375	
Carbón	31.449	
		685.036

Zona del Atlántico:

Puerto Viejo	295.347	
Cahuita-Río Estrella	839.591	
		1.134.938

DISTRIBUCION GEOGRAFICA DE LA MAGNETITA



- 1.- Ocotál
- 2.- Potrero
- 3.- Brasilito
- 4.- Carbón
- 5.- Tamarindo
- 6.- Callejones
- 7.- Junquillal
- 8.- El Roble
- 9.- Caldera
- 10.- Tivives
- 11.- Playa Hermosa
- 12.- Cahuita
- 13.- Puerto Viejo

## C A P I T U L O V

### PARTE EXPERIMENTAL ANALITICA

#### Consideraciones previas.

Con relación al trabajo de laboratorio realizado, se hace notar que éste se orientó en la forma mediante la cual fuera posible obtener un mayor número de datos concernientes a la composición y características de las arenas representativas de algunos de los yacimientos más importantes conocidos hasta la fecha.

Los métodos analíticos seleccionados son los que generalmente se aplican en los distintos países y en cada caso se informa sobre las referencias o modificaciones incorporadas a los procedimientos empleados.

Los resultados se exponen, para mayor claridad, en cuadros o gráficos ya que es la forma usual de obtener una mejor interpretación.

Finalmente, el trabajo propiamente dicho, culmina con una discusión de los resultados y posteriormente, se proponen algunas conclusiones o recomendaciones con la única intención de contribuir al estudio de estos minerales y disponer de una serie de datos importantes sobre su composición y que sirvan como base para una futura proyección industrial de su aprovechamiento.

#### Obtención y preparación de las muestras:

La materia prima empleada en el presente trabajo consiste de cuarenta y seis muestras de arena negra de las costas del Pacífico y del Atlántico. Las muestras de las costas del Pacífico provienen de:

- a) Caldera, El Roble, Tivives, Playa Hermosa y Playa Azul.
- b) Zona del Guanacaste: Playas Bejuco, Brasilito, Potrero, Prieta, Callejo

Jones y Junquillal, Tamarindo, Playa Carbón y Playa Ocotal.

Las muestras de la zona del Atlántico provienen de Puerto Viejo y Cahuita-Río Estrella.

La mayoría de estas muestras fueron suministradas por gentileza de la Dirección de Geología del Ministerio de Industrias. Para la toma de ellas se usaron tubos metálicos los cuales se introdujeron en las playas a diferentes profundidades hasta la tabla de agua.

Unas pocas muestras -en número de tres- de las regiones de Caldera y Tamarindo, fueron suministradas por el Laboratorio Químico del Ministerio de Industrias.

Las muestras fueron cuarteadas antes de efectuar su análisis. Estas se encontraban en sacos especiales de tela que emplea la Dirección de Geología para dicho propósito. El peso de cada muestra fue aproximadamente de un kilogramo.

Sería interesante realizar un sistema de muestreo siguiendo perfiles perpendiculares a la línea de costa y otro de cuarteo corriente o normal a distancias de 100 metros o menos en las zonas previamente elegidas y a diferentes profundidades hasta la tabla de agua y perforaciones más profundas con equipo especial. Posiblemente el muestreo de perfiles indicaría las máximas concentraciones de mineral en la precosta, espaldones y bermas y si es posible, en las zonas litoral y parte de la nerítica (más difíciles de realizar).

#### Determinaciones

Se efectuaron determinaciones físicas y químicas. Dentro de las de carácter físico se incluyeron la granulometría, densidad técnica y la separación magnética.

En las determinaciones químicas se obtuvieron los porcentajes de hierro y sí-

Por último se realizó un estudio cromatográfico de los cationes o elementos presentes en la magnetita.

### Granulometría.

Método: Se siguieron los métodos números D-214-56 y D-546-55 del ASTM (2,3) los cuales fueron modificados con el fin de obtener datos más precisos. Para esto se usaron ocho tamices números 16, 18, 25, 40, 50, 70, 80 y 100 en lugar de los números 80 - 100 - 150 - 200 - y 30 - 100 y 200, respectivamente según los métodos que se emplean en el ASTM (2 y 3).

<u>Tamiz No.</u>	<u>No. de mallas por pulgada (Escala Tyler)</u>	<u>mm.</u>	<u>Abertura Pulgadas</u>
16	14	1.19	0.0469
18	16	1.00	0.0394
25	24	0.718	0.0288
40	35	0.420	0.0165
50	48	0.297	0.0117
70	65	0.210	0.0083
80	80	0.177	0.0070
100	100	0.149	0.0059

### Granulometría de las arenas negras:

Ver cuadro en página siguiente.

GRANULOMETRIA EN LAS ARENAS NEGRAS

1- Zona del Pacífico. Provincia de Puntarenas.

No. Mues.	Lugar	Mallas							
		16	18	25	40	50	70	80	100
2	Tivives	97.5	96.4	90.0	70.1	45.5	28.7	16.6	8.2
3	Caldera	99.5	99.3	98.2	84.4	68.3	33.4	14.6	3.5
5	Caldera	99.6	99.4	97.9	82.3	54.8	28.8	11.1	2.7
6	Caldera	99.6	99.4	98.3	86.5	61.1	26.0	12.6	8.5
17	Playa Hermosa Aeropuerto	79.7	76.3	69.0	50.5	32.0	14.0	8.1	3.3
18	Playa Azul	100	100	99.9	99.1	88.8	52.1	40.0	23.1
20	El Roble	92.3	83.5	67.3	37.4	17.8	6.4	3.1	0.6

2- Zona Provincia de Guanacaste. Península de Nicoya.

4	Bejuco (puerto)	98.9	98.7	97.0	81.8	58.8	35.6	23.9	11.2
19	Bejuco W 500 m No.4	98.5	97.9	93.9	73.3	54.5	31.9	21.3	9.8
21	Brasilito 0.4 m.	97.9	97.8	96.5	91.8	81.7	62.4	52.9	23.7
24	Brasilito 1.1 m.	92.0	91.2	87.1	77.3	62.1	49.5	39.9	29.5
26	Brasilito 1.5 m.	99.5	99.3	98.5	93.3	83.4	63.4	50.9	28.1
8	Brasilito 1.9 m.	98.0	97.0	91.5	74.4	54.9	32.5	20.0	9.3
23	Brasilito 2 m	96.7	95.6	89.5	58.2	35.3	16.7	12.3	7.6
25	Brasilito 2.0 m.	96.1	95.0	80.5	40.3	16.1	7.1	3.5	1.6

No. Mues.	Lugar	Mallas No.							
		16	18	25	40	50	70	80	100
22	Brasilito 3.1 m.	97.1	95.9	88.0	64.1	43.8	24.9	21.6	7.5
12	Potrero Superficial	99.9	99.8	99.7	92.3	74.5	28.5	13.0	8.9
27	Potrero 1.5 m.	86.2	83.7	72.0	45.7	27.2	14.6	8.9	4.7
14	Potrero 1.7 m.	99.4	92.0	81.4	55.4	32.7	15.2	8.7	3.9
10	Potrero 2 m.	96.8	92.8	83.2	61.4	38.1	17.6	10.6	5.0
28	Potrero 2.2 m.	86.6	84.6	74.9	58.7	45.4	32.2	24.8	13.7
9	Potrero 2.5 m.	99.0	95.5	97.1	89.0	70.4	44.2	27.2	14.4
11	Potrero 3 m.	97.4	96.2	89.3	65.3	46.2	28.4	12.1	5.1
7	Tamarindo	99.9	99.8	99.2	86.2	52.0	16.0	6.5	1.2
16	Tamarindo	99.9	99.7	99.0	86.0	53.1	18.3	7.6	2.1
15	Playa Carbón	100	100.0	99.9	99.4	79.0	9.2	5.9	0.8
1	Ocotai	100	100	100	99.9	92.2	47.2	28.0	13.0
13	Prieta 1.8 m.	99.6	99.5	99.2	95.6	78.0	44.4	27.1	9.6
29	Prieta 1.9 m.	99.0	98.5	95.0	76.5	59.4	34.6	23.1	10.2
30	Playa Calle Jones 1.0 m.	99.4	99.3	99.2	98.0	95.0	75.7	50.5	17.4
31	Playa Junqui llal 1.2 m.	99.8	99.6	98.8	96.6	91.9	61.0	35.8	12.5

3- Zona Atlántica.

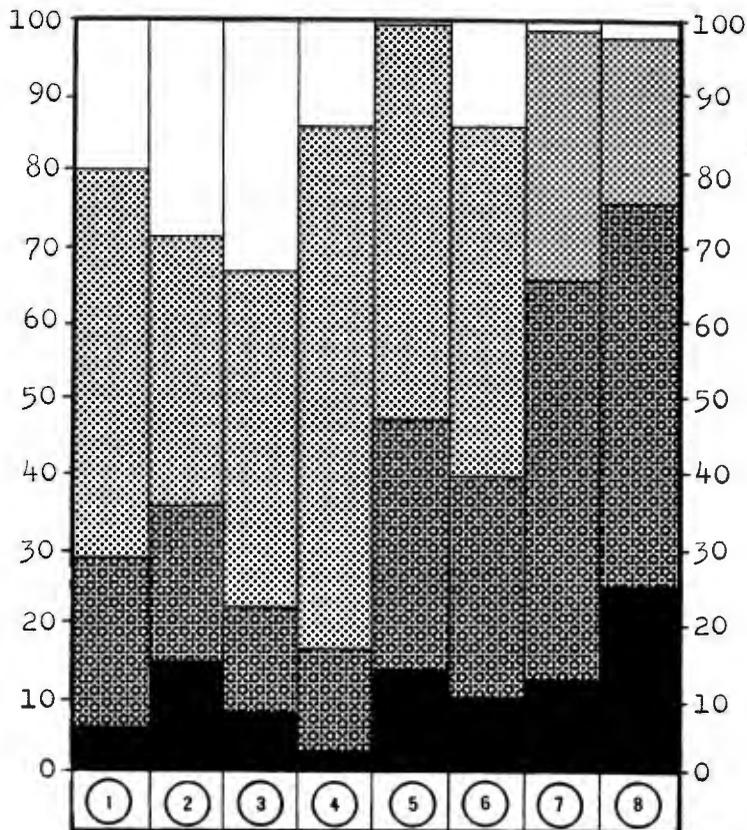
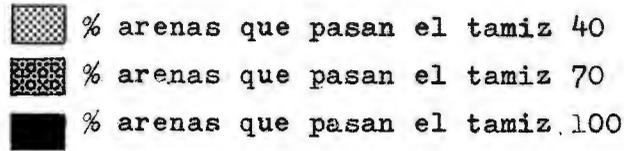
No. Mues.	Lugar	Mallas No.							
		16	18	25	40	50	70	80	100
33	Puerto Viejo 0.46 m.	100	99.9	99.8	95.0	91.3	48.8	32.0	13.0
32	Puerto Viejo 0.70 m.	100	100	100	99.9	98.8	85.5	69.5	17.2
36	Puerto Viejo 0.7 m.	100	100	100	99.9	95.5	49.2	26.3	10.4
38	Puerto Viejo 1.1 m.	100	100	100	99.9	92.6	49.1	35.5	12.4
35	Puerto Viejo 1.15 m.	100	99.9	99.8	99.7	98.1	66.2	52.2	11.5
34	Puerto Viejo 1.4 m.	99.8	99.8	99.7	99.6	97.5	76.5	54.8	17.8
40	Puerto Viejo 1.5 m.	99.9	99.8	99.7	98.6	83.3	34.6	20.5	6.6
37	Puerto Viejo 1.65 m.	100	100	100	99.8	98.0	70.1	43.3	13.7
39	Puerto Viejo 1.57 m.	99.6	99.5	99.4	97.7	73.3	32.4	18.5	6.0
41	Puerto Viejo 1.8 m.	100	99.9	99.8	99.6	89.9	49.0	28.6	10.2

Muestras de Cahuita-Río Estrella:

42	C-Río Estrella 0.33 m.	100	100	100	99.7	99.5	97.9	88.3	50.7
43	C-Río E. 1.3 m.	100	100	100	99.9	94.4	65.6	44.0	21.4
44	C-R.E. 1.5 m.	100	100	100	99.3	90.1	65.6	45.2	24.0
45	C-R.E. 1.8 m.	100	100	99.9	98.6	90.1	62.1	39.9	16.9
46	C-R.E. 2.0 m.	99.1	99.0	98.5	92.4	73.8	40.1	23.5	8.9

GRAFICO Nº 2

COMPARACION POR GRANULOMETRIA DE ARENAS, LAS PORCIONES QUE PASAN LOS TAMICES 40, 70 y 100. (POR ZONAS)



- 1.- Zona Tivives Caldera
- 2.- Zona de Brasilito
- 3.- Zona de Potrero
- 4.- Zona de Tamarindo
- 5.- Zona de Playa Carbón
- 6.- Zona de Ocotal
- 7.- Zona de Puerto Viejo
- 8.- Zona de Río Estrella

### Discusión.

Al aumentar el número de tamices se tuvo en mente la posibilidad de eliminar impurezas que contienen las arenas negras, sin pérdida apreciable de la magnetita. Además, mediante su estudio se pretende clasificar el tipo de arena y magnetita (respecto a su tamaño), según las indicaciones estipuladas por Angelelli y Chaar (1):

- a) Se consideran como arenas gruesas las que son retenidas por el tamiz 40.
- b) Medianas, las que son retenidas por el tamiz No. 70.
- c) Finas, las retenidas por el tamiz No. 100
- d) Muy finas, las que pasan el tamiz 100. Algunos aceptan que las partículas muy finas pueden ser aquéllas que pasan la malla 200. No se creyó necesario usar esta última malla.

Los datos se pueden aprovechar en dos formas: indicando el porcentaje que pasa por cada malla o bien el porcentaje retenido por cada malla.

En el primer caso se puede apreciar mejor el porcentaje que pasa cada malla si se tienen en mente dos aspectos básicos tales como aprovechamiento de tamices que eliminen impurezas y dejen pasar el material o arena magnética y la posibilidad de aplicar máquinas especiales de separación o extracción de la magnetita, de acuerdo con la cantidad de materia que pasa por una determinada malla, según sea el óxido magnético de grano mediano, fino o extra fino.

### Densidad Técnica:

Es una densidad aproximada y se realiza mediante el uso de una probeta para determinar el volumen desplazado por una masa previamente pesada. Se respecta el nombre de Densidad Técnica según Smith (48).

29	Prieta 1.9 m.	3.14	20.5	9.0	18.9
30	Playa Callejones 1.0 m.	3.17	21.5	1.1	10.4
31	Playa Junquillal 1.2 m.	3.12	19.8	1.9	9.5

Método:

Se siguió el método del ASTM (2) bajo el número D-212-48, con ciertas modificaciones que se detallan a continuación.

La densidad técnica se realizó en una probeta de 10 ml. con graduaciones de 0.1 ml.

Se pesó 2.0 gramos del material o arena y se agregó a la probeta que contiene entre 5 y 6 ml. de agua destilada. Se anota el aumento de volumen experimentado. Se repitió la operación añadiendo 5.0 gramos de muestra. Se obtuvieron los datos promedio del aumento de volumen por gramo de muestra y se calculó la densidad.

Porcentajes de Magnetita en las arenas negrasI- Zona del Pacífico. Provincia de Puntarenas.

No. Mues. tra.	Lugar de procedencia de las arenas y su profundidad.	Dens. aprox. de la arena M = 5.25	% Magnetita teórico, calculada a partir de la densidad.	%Magnetita en la arena que es retenida por la magnetita No. 70	%Magnet. total en la arena - Método del imán
2	Tivives	3.12	19.8	5.3	21.0
3	Caldera	4.16	58.8	27.2	62.0
5	Caldera	4.00	52.9	19.8	46.0
6	Caldera	3.96	51.4	21.4	52.4
17	Playa Hermosa Aerop.	2.85	8.7	2.2	5.6
18	Playa Azul	3.03	16.3	5.4	14.9
20	El Roble	2.85	8.7	1.8	5.6

2- Zona de Guanacaste.

No. Mue <sub>s</sub> tra.	Lugar de procedencia de las arenas y su profundidad.-	Dens. aprox. de la arena M = 5.25	% Magne - tita teóri - co calcula - da a par - tir de la densidad.	% Magne - tita en la arena que es reteni - da por la malla 70	% Magne - total en la arena. Método del imán.
4	Puerto Rejuco	3.39	30.2	20.3	29.4
19	Puerto Rejuco 500 vs. 0 No. 4	3.00	15.2	3.1	7.2
21	Brasilito 0.4 m.	2.88	10.9	15.0	21.2
24	Brasilito 1.1 m.	3.28	25.9	19.7	24.7
26	Brasilito 1.5 m.	3.00	15.2	3.5	16.7
8	Brasilito 1.9 m.	3.25	24.6	18.8	28.5
23	Brasilito 2.0 m.	2.90	11.2	9.2	12.4
25	Brasilito 2.0 m.	2.92	12.1	8.4	10.1
22	Brasilito 3.1. m.	3.12	19.8	9.1	15.2
12	Potrero (superficial)	4.10	56.7	47.6	65.2
27	Potrero 1.5 m.	2.95	13.3	7.2	9.2
14	Potrero 1.7 m.	3.23	24.0	19.7	25.9
10	Potrero 2.0 m.	3.25	24.7	20.5	27.3
28	Potrero 2.2 m.	2.95	13.3	3.8	7.3
9	Potrero 2.5 m.	3.51.	34.4	19.1	39.2
11	Potrero 3.0 m.	3.13	20.1	12.8	24.3
7	Tamarindo	5.00	90.6	74.9	91.0
16	Tamarindo	5.00	90.6	76.3	96.0
15	Playa Carbón	4.95	88.7	88.7	96.0
1	Playa Ocotal	4.88	85.7	47.8	88.0
13	Prieta 1.8 m.	4.20	60.4	35.5	65.7
29	Prieta 1.9 m.	3.14	20.5	9.0	18.9
30	Playa Callejones 1.0 m.	3.17	21.5	1.1	10.4
31	Playa Junquillal 1.2 m.	3.12	19.8	1.9	9.5

3- Zona de Limón.

No. Mues	Lugar de procedencia de las arenas y su profundidad.-	Dens. aprox. de la arena M = 5.45	% Magnetita teórica calculada a partir de la densidad.	% Magnetita en la arena que es retenida por la malla No.70	% Magnetita total en la arena. Método del imán.
33	Puerto Viejo 0.46 m.	4.00	45.2	10.5	44.8
32	Puerto Viejo 0.70 m.	4.75	73.6	4.7	72.3
36	Puerto Viejo 0.7 m.	4.00	45.2	16.4	43.9
38	Puerto Viejo 1.1 m.	4.16	51.4	17.2	51.6
35	Puerto Viejo 1.15 m.	4.65	69.8	22.9	81.0
34	Puerto Viejo 1.4 m.	4.65	69.8	10.4	76.8
40	Puerto Viejo 1.5 m.	3.65	32.2	12.0	33.9
37	Puerto Viejo 1.65 m.	5.00	83.0	19.6	82.4
39	Puerto Viejo 1.57 m.	3.77	36.8	7.9	25.0
41	Puerto Viejo 1.8 m.	4.00	45.2	12.7	47.8
42	Cahuita-R. Estrella 0.33m	3.92	41.8	0.2	36.3
43	Cahuita-R. Estrel. 1.3 m.	3.80	37.9	3.2	34.1
44	Cahuita-R. Estrel. 1.5 m.	3.31	22.2	3.8	25.9
45	Cahuita-R. Estrel. 1.8 m.	3.92	41.8	4.0	35.5
46	Cahuita-R. Estrel. 2.0 m.	3.76	36.3	7.0	29.8

Discusión:

El cálculo del porcentaje de la magnetita contenida en la arena negra se realizó de acuerdo con el concepto de Smith (48), adaptándolo a este mineral:

$$\begin{aligned} 2.65 x + 5.25 y &= A \cdot 100 \\ x + y &= 100 \end{aligned}$$

- 2.65 = Representa la densidad promedio de las impurezas expresadas como sílice (48).
- 5.25 = Es la densidad promedio de la magnetita de la zona del Pacífico. Este factor se sugiere en este trabajo. Para la magnetita de la zona Atlántica, se propone el factor de 5.45. Estos datos se obtienen del estudio de los cuadros últimos (porcentaje de la magnetita en las arenas negras).
- x = Indica el por ciento de impurezas, expresado como sílice (en las determinaciones deben expresarse como sílice impura y por lo tanto, no es necesario hacer los análisis químicos para obtener datos de sílice pura)
- y ≠ representa el por ciento de magnetita impura presente en la muestra o arena negra.
- A = Es la densidad de la arena, obtenida por el método en estudio.

Como se observa, éste es un método empírico pero de suma importancia en la estimación rápida del contenido de mineral de una muestra. Este método es empleado en los Estados Unidos bajo un concepto tentativo.

Es importante hacer notar que el dato empleado para la magnetita -en lo referente a densidad- debería ser de 5.20, según se explicó en el Capítulo II (propiedades de la magnetita). No obstante, los resultados prácticos -obtenidos y aceptando el límite de error permitido en este tipo de análisis o sea del 10%, se estimó que los valores teóricos a usar para la densidad de la magnetita se deberían corregir a 5.25 y 5.45 como se explicó anteriormente.

### Fracción magnética.

Consiste en minerales magnéticos separados por el imán y que corresponden a varios minerales presentes en las arenas negras que tienen la propiedad de ser atraídas por los magnetos. Esta fracción presenta color oscuro debido a la presencia de magnetita, titanomagnetita e ilmenita, siendo las dos primeras dominantes.

La proporción del mineral magnético varía en las diferentes playas, no obstante se pueden hacer conclusiones en zonas adyacentes cuyos promedios de magnetita son bastante cercanos, lo que nos indica la posibilidad de tener una roca común, ya que las diferentes rocas que producen estos materiales magnéticos, al disgregarse, hacen variar las concentraciones locales.

Esta fracción magnética separada por los imanes o magnetos, arrastran impurezas tales como sílice, óxidos de aluminio y hierro, óxidos de titanio, sales de manganeso, vanadio y otras en muy pequeñas proporciones. Por lo tanto, el contenido o separado magnético no indica el contenido real de magnetita y por ende, es necesario hacer un análisis químico de valoración.

### Método.

Se realizó con 200 gramos del material, previamente cuarteados y se practicó el método de la separación magnética, mediante un pequeño imán, el cual se pasó varias veces sobre la arena negra. Se pesaron las dos porciones o sea, la extraída por el imán y la no magnética y luego se calcularon los porcentajes.

Los resultados se exponen a continuación:

No.	Lugar de procedencia	% Magnetita total en la arena
2	Tivives	21.0

No.	Lugar de procedencia	% magnetita total en la arena
3	Caldera	62.0
5	Caldera	46.0
6	Caldera	52.4
17	Playa Hermosa Aeropuerto	5.6
18	Playa Azul	14.9
20	El Roble	5.6

---

Zona del Guanacaste:

4	Puerto Bejuco	29.4
19	Puerto Bejuco 500 vs. O. No. 4	7.2
21	Brasilito 0.4 m.	21.2
24	Brasilito 1.1 m.	24.7
26	Brasilito 1.5 m.	16.7
8	Brasilito 1.9 m.	28.5
23	Brasilito 2.0 m.	12.4
25	Brasilito 2.0 m.	10.1
22	Brasilito 3.1 m.	15.2
12	Potrero (superficial)	65.2
27	Potrero 1.5m.	9.2
14	Potrero 1.7 m.	25.9
10	Potrero 2.0 m.	27.3
28	Potrero 2.2 m.	7.3
9	Potrero 2.5 m.	39.2
11	Potrero 2.5 m.	24.3
7	Tamarindo	91.0
16	Tamarindo	96.0
15	Playa Carbón	96.0
1	Ocotal	88.0

No.	Lugar de procedencia	% magnetita total en la arena
13	Prieta 1.8 m.	65.7
29	Prieta 1.9 m.	18.9
30	Playa Callejones 1.0 m.	10.4
31	Playa Junquilla 1.2 m.	9.5

#### Zona del Atlántico.

33	Puerto Viejo 0.46 m.	44.8
32	Puerto Viejo 0.7 m.	72.3
36	Puerto Viejo 0.7 m.	43.9
38	Puerto Viejo 1.1 m.	51.6
35	Puerto Viejo 1.15 m.	81.0
34	Puerto Viejo 1.4 m.	76.8
40	Puerto Viejo 1.5 m.	33.9
37	Puerto Viejo 1.65 m.	82.4
39	Puerto Viejo 1.57 m.	25.0
41	Puerto Viejo 1.8 m.	47.8
42	Cahuita-Río Estrella 0.33 m.	36.3
43	Cahuita-Río Estrella 1.3 m.	34.1
44	Cahuita-Río Estrella 1.5 m.	25.9
45	Cahuita-Río Estrella 1.8 m.	35.5
46	Cahuita-Río Estrella 2.0 m.	29.8

#### Discusión:

Antes de efectuar la separación magnética de las arenas negras, se consideró adecuado separar ciertas impurezas que tienen dichas arenas mediante el uso

de un tamiz. Se sugiere una malla No. 25 para las arenas del Pacífico y una No. 50 para las arenas del Atlántico.

Si se efectúa dicha tamización existe menos posibilidades de arrastre de impurezas por el mineral magnético durante el proceso de extracción con magnetos.

Se recomienda el empleo de dos separadores magnéticos como mínimo. Uno del tipo tambor (doble tambor para trabajo en seco) y otro del tipo polea, ambos colocados en serie con el fin de obtener una mejor separación del mineral.

Si se desea una mejor separación del material magnético, resultaría importante colocar cuatro o cinco separadores magnéticos con diferentes intensidades del campo y en serie. Así se lograrían separar las porciones más magnéticas (con baja intensidad del campo) de las poco magnéticas (alta intensidad del campo). Se lograría obtener mayores concentraciones de ciertos minerales en una porción determinada tales como magnetita, titanomagnetita, e ilmenita.

Se consideró en este estudio preliminar de las arenas negras un factor que se denominó magnetita real o verdadera.

Se basa en el hecho práctico de separación del material magnético. Según sea la fuerza del imán o intensidad del magneto, el tiempo que transcurra al pasar el material por el imán (método industrial) o viceversa en el laboratorio, la altura de separación magneto-arena, número de veces que se pone en contacto el material extraído con el imán, tamaño de las partículas y otros factores de menor importancia, que unidos todos ellos, producen una diferencia apreciable en el porcentaje de material extractable.

Esto nos conduce a una diferencia en el porcentaje de pureza, de acuerdo -

con las variaciones que pudieran efectuarse prácticamente.

Este error puede ser corregido al multiplicar el por ciento de extracción - por el por ciento de pureza de la magnetita, obteniéndose un por ciento real o verdadero de la muestra.

#### Fracción no magnética.

Esta corresponde al residuo de las arenas negras que queda después de pasar por los magnetos.

Es una porción abundante, de color blanco crema a pardo oscuro, de acuerdo - con las zonas y de menor densidad que el material magnético.

Entre ellas nos encontramos dos grupos de minerales: pesados y livianos. - Entre los primeros se encuentran los piroxenos con sus dos especies más abundantes: hipersteno y augita, que corresponden a granos más alargados y redondos u ovals respectivamente. En estado fresco encierran inclusiones opacas. Los anfíboles de colores verde a castaño, granate, rosado pálido y en menor proporción incoloro, de forma redondeada y bordes subangulosos. Epidoto, que es muy escaso, monacita, titanita y entre los que ofrecen mayor importancia, rutilo y zircón.

Entre los minerales livianos se encuentran cuarzo, plagioclasas, de forma similar al cuarzo, feldespatos potásico, vidrio volcánico, pastas volcánicas, alteritas de diverso origen, translúcidas u opacas, que reflejan colores blanco-amarillentos a castaño y aun rojizo. También se encuentra carbonato de calcio.

#### Resultados:

Ver página siguiente.

No.	Lugar de procedencia	% de material no magnético
2	Tivives	79.0
3	Caldera	38.0
5	Caldera	54.0
6	Caldera	47.5
17	Playa Hermosa, Aeropuerto	94.4
18	Playa Azul	65.1
20	El Roble	94.4
Zona del Guanacaste:		
4	Puerto Bejuco	70.6
19	Puerto Bejuco t00 vs. 0. No. 4	92.8
21	Brasilito 0.4 m.	78.8
24	Brasilito 1.1 m.	75.3
26	Brasilito 1.5 m.	83.3
8	Brasilito 1.9 m.	71.5
23	Brasilito 2.0 m.	87.6
25	Brasilito 2.0 m.	89.9
22	Brasilito 3.1 m.	84.8
12	Potrero, superficial	34.8
27	Potrero 1.5 m.	90.8
14	Potrero 1.7 m.	74.1
10	Potrero 2.0 m.	72.7
28	Potrero 2.2 m.	92.7
9	Potrero 2.5 m.	60.8
11	Potrero 3.0 m.	75.7
7	Tamarindo	9.0
16	Tamarindo	4.0

No.	Lugar de procedencia	% de material no magnético
15	Playa Carbón	4.0
1	Ocotlán	12.0
13	Prieta 1.8 m.	34.3
29	Prieta 1.9 m.	81.1
30	Playa Callejones 1.0 m.	89.6
31	Playa Junquillas 1.2 m.	90.5
Zona del Atlántico:		
33	Puerto Viejo 0.46 m.	55.2
32	Puerto Viejo 0.7 m.	27.7
36	Puerto Viejo 0.7 m.	56.1
38	Puerto Viejo 1.1 m.	48.4
35	Puerto Viejo 1.15 m.	19.0
34	Puerto Viejo 1.4 m.	23.2
40	Puerto Viejo 1.5 m.	66.1
37	Puerto Viejo 1.65 m.	17.6
39	Puerto Viejo 1.57 m.	75.0
41	Puerto Viejo 1.8 m.	52.2
42	Cahuilla-Río Estrella 0.33 m.	63.7
43	Cahuilla-Río Estrella 1.3 m.	65.9
44	Cahuilla-Río Estrella 1.5 m.	74.1
45	Cahuilla-Río Estrella 1.8 m.	64.5
46	Cahuilla-Río Estrella 2.0 m.	70.2

#### Interpretación:

Del cuadro anterior se obtiene una respuesta al contenido de material no magnético que queda como residuo de la extracción. Esto conduce a determi-

nar el sitio aproximado de desecho donde dichos materiales deben alojarse.

Si se conoce la magnitud del residuo que se espera, se pueden determinar con bastante precisión, los sitios de desecho y su capacidad para soportar dichos materiales.

Sin embargo, pareciera conveniente que estos materiales no magnéticos pudieran ser aprovechados ya sea como material de construcción o bien efectuar estudios sobre los mismos y determinar si es factible la extracción del rutilo y del circonio que posiblemente se encuentran en ellos. Además, puede ser una fuente de importancia para obtener titanio.

#### Análisis cromatográfico cualitativo en papel.

##### Métodos:

Corrientemente se emplean dos métodos: uno de columna y otro de placa.

a) El método de Cramer (12) o sea el de columna ofrece la ventaja de poder utilizar un solvente barato y fácil de conseguir: ácido acético glacial 75%, metanol 25%. Mediante su uso se identifican fácilmente: hierro, cromo, aluminio, titanio y vanadio. Este método se puede hacer semicuantitativo, usando testigos de concentración conocida.

b) El método de placa (22 y 23), es el más práctico pues tiene una serie de ventajas como son el empleo de dos reveladores: Acido kójico-oxima y sulfuro de sodio. Es muy rápido y se adapta fácilmente para identificar los metales o iones que acompañan a la magnetita y sus soluciones ácidas.

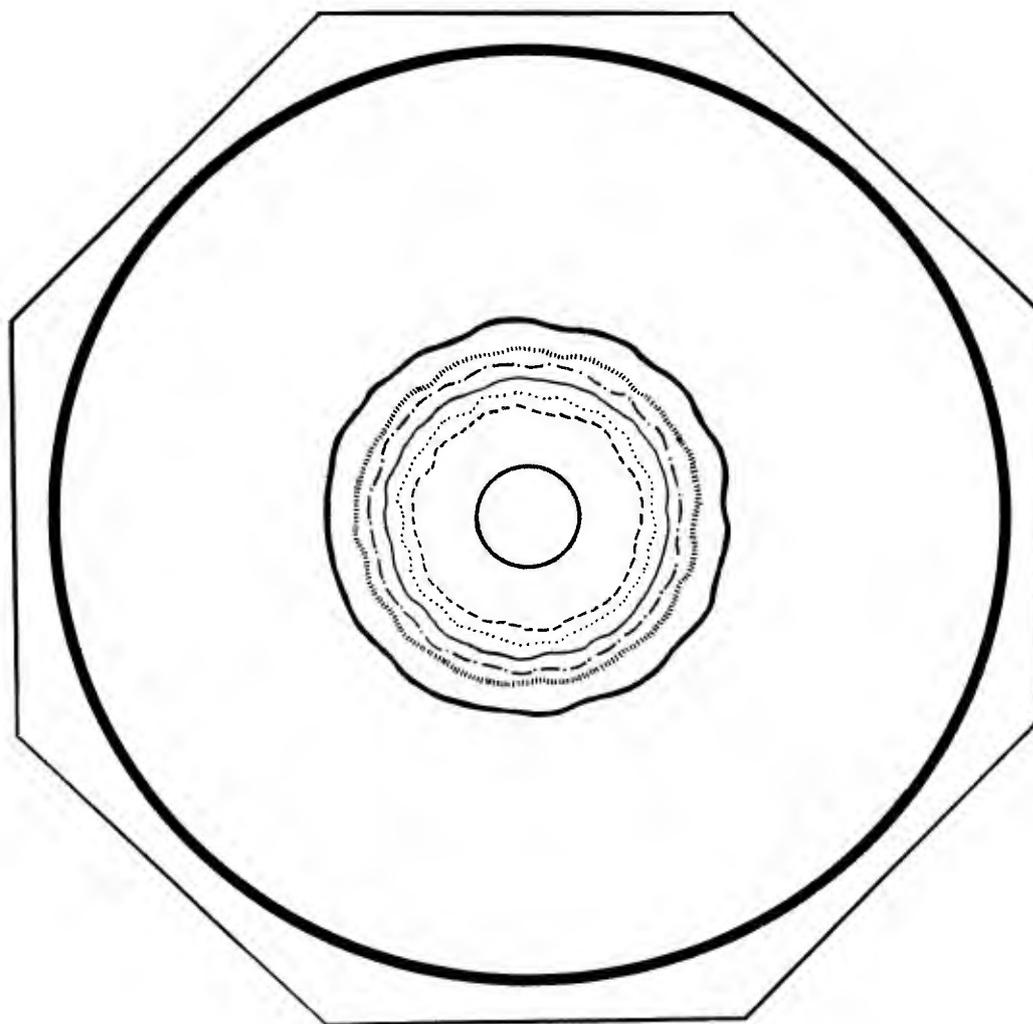
La aplicación cromatográfica nos puede ayudar en la estimación rápida y semicuantitativa, de la magnetita, ayudándose con el uso de la lámpara ultravioleta (método de placa).

El cromatograma se revela y desarrolla en un lapso de media a una hora. Sería interesante determinar este método por el sistema de capa delgada, con el fin de disminuir el tiempo de análisis.

Al comparar ambas técnicas se puede observar que el método de Elbeith o de placa ofrece las siguientes ventajas: se identifican más cationes, es más rápido el desarrollo, se tienen varios reactivos generales que desarrollan coloraciones sobre varios cationes al mismo tiempo, pero se tarda mucho en la preparación de la muestra.

El método de Cramer tiene menos interferencias, debido a que es más específico sobre el grupo  $R_2O_3$  y, por lo tanto, hay mayor separación en los cationes. Además, la técnica es diferente a la de Elbeith y exige menos preparación de la muestra. Se puede hacer semicuantitativo.

GRAFICO N° 3  
ESQUEMA DEL METODO CROMATOGRAFICO DE PLACA  
Distribución de los cationes.  
(Elbeih & Gabra, 22, 23)



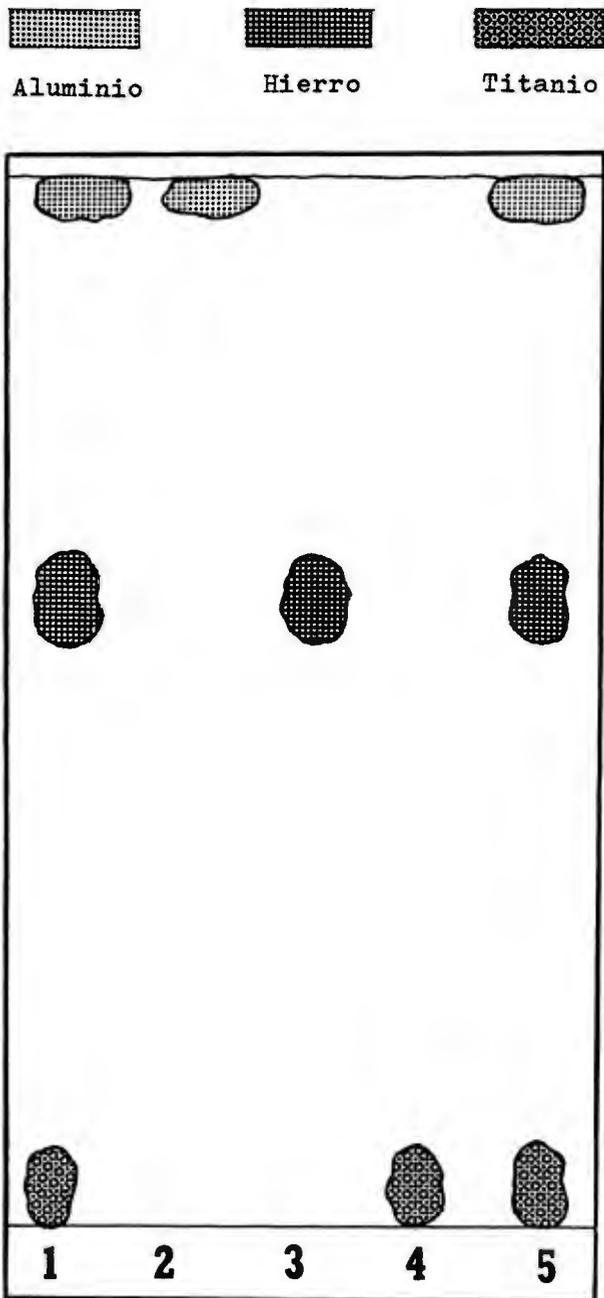
- Punto de partida
- Titanio
- ..... Magnesio
- ~~~~ Manganeso
- . - . Aluminio
- Vanadio
- ~~~~ Hierro
- Borde del papel cromatográfico

Nota:

Se han colocado las manchas de los cationes,  
según los datos obtenidos en nuestra práctica.

Gráfico Nº 4.

ESQUEMA DEL METODO CROMATOGRAFICO DE CRAMER  
(12)



- Muestras:
- 1.- Muestra de magnetita
  - 2.- Aluminio patrón
  - 3.- Hierro patrón
  - 4.- Titanio patrón
  - 5.- Muestra de magnetita

## Análisis químico Cuantitativo.

### Sílice:

Método: Se determinó como sílice impura, después de disolver la muestra en HCl concentrado, adicionándole unas gotas de ácido nítrico concentrado. Se desecó 4 ó 5 veces y se redisolvió en ácido clorhídrico concentrado (7, 8).

### Hierro:

Método: Se siguió el método yodométrico de Cook (58), pág. 486, 7,6 del Remington (1953).

### Resultados:

Ver cuadros en páginas siguientes.

ANALISIS DE LA MAGNETITA

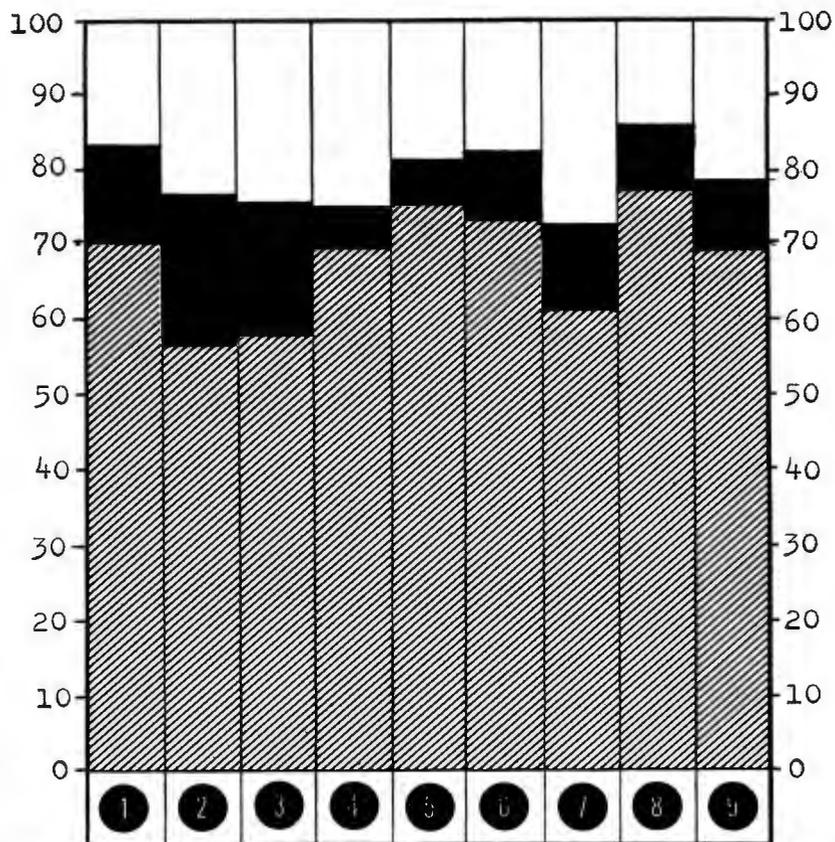
No. Mues.	Lugar de procedencia de la magnetita y su profundidad.	% SiO <sub>2</sub>	% Fe	% Magnetita en base al % de Fe	% verdadero de magnetita en las arenas negras.
<u>1- Zona del Pacífico. Provincia de Puntarenas:</u>					
2	Tivives	25.8	42.7	59.1	12.4
3	Caldera	8.3	55.0	76.1	47.2
5	Caldera	6.0	55.3	76.5	35.1
6	Caldera	6.2	51.5	71.1	37.0
17	Playa Hermosa	42.4	29.5	40.8	2.3
18	Playa Azul	15.6	48.6	67.2	10.0
20	El Roble	25.7	43.8	60.6	3.4
<u>2- Zona del Guanacaste</u>					
4	Puerto Bejuco	14.7	39.3	54.4	16.0
19	Puerto Bejuco 500 vs. 0 No. 4	13.3	42.8	59.2	4.2
21	Brasilito 0.4 m.	10.9	46.0	63.7	13.4
24	Brasilito 1.1 m.	13.3	46.5	64.4	15.8
26	Brasilito 1.5 m.	13.9	44.6	61.7	10.2
8	Brasilito 1.9 m.	17.5	43.4	60.0	17.1
23	Brasilito 2.0	23.9	38.5	53.3	6.6
25	Brasilito 2.0 m.	41.2	27.0	37.4	3.8
22	Brasilito 3.1 m.	20.6	42.0	58.1	8.8
12	Potrero, superficial	15.3	50.8	70.3	45.9
27	Potrero 1.5 m.	21.4	37.8	52.3	4.8
14	Potrero 1.7 m.	19.6	42.0	58.1	15.0
10	Potrero 2.0 m.	17.5	41.9	58.0	15.8
28	Potrero 2.2 m.	17.1	39.6	54.8	4.0

No.	Lugar de procedencia de la magnetita y su profundidad.	% SiO <sub>2</sub>	% Fe	% Magnetita en base al % de Fe	% Verdadero de magnetita en las arenas negras.
9	Potrero 2.5 m.	15.0	44.8	62.0	24.4
11	Potrero 3.0 m.	23.2	39.1	54.1	13.2
7	Tamarindo	4.8	50.2	69.5	63.0
16	Tamarindo	6.2	50.3	69.6	66.8
15	Playa Carbón	6.2	54.3	75.2	72.2
1	Playa Ocotal	8.9	53.0	73.4	64.8
13	Prieta 1.8 m.	9.8	45.2	62.6	41.1
29	Prieta 1.9 m.	13.1	42.8	59.2	11.2
30	Playa Callejones 1.0 m.	18.8	39.6	54.8	5.7
31	Playa Junquilla 1.2 m.	9.4	38.9	53.8	5.1

### 3- Zona Atlántica

33	Puerto Viejo 0.46 m.	12.6	58.5	81.0	36.3
32	Puerto Viejo 0.70 m.	8.6	60.8	84.1	60.9
36	Puerto Viejo 0.70 m.	10.6	57.8	80.0	35.1
38	Puerto Viejo 1.1 m.	7.3	55.5	76.8	39.6
35	Puerto Viejo 1.15 m.	4.6	60.0	83.0	67.2
34	Puerto Viejo 1.4 m.	11.3	59.9	82.9	63.5
40	Puerto Viejo 1.5 m.	10.0	44.5	61.5	20.8
39	Puerto Viejo 1.57 m.	9.6	53.5	74.0	61.0
37	Puerto Viejo 1.65 m.	5.1	55.1	76.3	19.1
41	Puerto Viejo 1.8 m.	7.2	51.2	70.9	33.8
42	Cahuita-Río Estrella 0.33m	11.3	54.1	74.9	27.1
43	Cahuita-R.Estrella 1.3 m.	10.4	51.5	71.3	24.3
44	Cahuita-R.Estrella 1.4 m.	8.6	47.4	65.6	17.0
45	Cahuita-R.Estrella 1.8 m.	7.0	48.3	66.9	23.7
46	Cahuita-R.Estrella 2.0 m.	8.5	48.2	66.7	19.9

GRAFICO Nº 1  
 PUREZA DE LA MAGNETITA POR ZONAS



 SILICE  
 MAGNETITA

- 1.- Tivives- Caldera
- 2.- Brasilito
- 3.- Potrero
- 4.- Tamarindo
- 5.- Playa Carbón
- 6.- Ocotal
- 7.- Prieta
- 8.- Puerto Viejo
- 9.- Cahuita-Río Estrella

Los porcentajes que se indican en el presente gráfico, corresponden a los promedios de las determinaciones efectuadas en las diversas muestras.

ZONAS IMPORTANTES DE EXPLOTACION DE LA MAGNETITA

(Basado en la pureza de la magnetita)

CUADRO No. 1

Lugar y zona	% Fe	% magnetita	% SiO <sub>2</sub>	Retenido por la ma No. 70 (en porcentajes).
<u>Zona 1 - (Puntarenas)</u>				
Tivives - Caldera	50.9	70.4	12.9	40.5
<u>Zona 2 - Guanacaste</u>				
Brasilito	41.1	56.8	20.2	65.0
Potrero	42.0	58.1	18.4	65.8
Prieta	44.0	60.9	11.5	34.5
Tamarindo	50.3	69.6	5.5	80.8
Playa Carbón	54.3	75.2	6.2	92.4
Playa Ocotal	53.0	73.4	8.9	54.2
<u>Zona 3 - Atlántico</u>				
Puerto Viejo	55.7	77.1	8.7	13.4
Cahuíta-La Estrella	49.9	69.0	9.2	3.6

PROMEDIO DE LA PUREZA EN HIERRO, MAGNETITA Y SILICE POR ZONASCUADRO No. 2

Lugar y zona	% Fe	% Magnetita	% SiO <sub>2</sub>
<u>Zona 1:</u>			
Tivives-Caldera	50.9	70.4	12.9
<u>Zona 2:</u>			
a) Tamarindo-Ocotal-Carbón	52.6	72.7	6.9
b) Brasilito, Potrero, Prieta, Bejuco, Callejones y Junquillal	40.5	56.0	14.7

Lugar y zona	% Fe	% Magnetita	% SiO <sub>2</sub>
<u>Zona 3 (Atlántico)</u>			
Puerto Viejo, Cahuita, Río Estrella	52.8	73.0	9.0

PROMEDIO DE LA PUREZA EN HIERRO, MAGNETITA Y SILICE  
POR ZONAS EXPLOTABLES

CUADRO No. 3

Lugar y zona	% Fe	% Magnetita	% SiO <sub>2</sub>
Tivives - Caldera	50.9	70.4	12.9
Tamarindo - Ocotal y Carbón	52.6	72.7	5.9
Brasilito, Potrero y Prieta	42.4	58.6	16.7
Puerto Viejo-Cahuita	52.8	73.0	9.0

PORCENTAJE REAL O VERDADERO DE LA MAGNETITA EN LAS  
ARENAS NEGRAS POR ZONAS (100% de pureza)

CUADRO No. 4.

Lugar	% real de la magnetita	Kg./ton. de 1000 Kg.
Caldera - Tivives	32.9	329
Brasilito	10.8	108
Potrero	17.6	176
Tamarindo	64.9	649
Ocotal	64.8	648

Lugar	% real de la magnetita	Kg/ton. de 1000 Kg.
Carbón	72.2	722
Callejones - Junquillal	5.4	54
Puerto Bejuco	10.1	101
Puerto Viejo	43.7	473
Cahuita-Río Estrella	22.4	224

Por "magnetita real o verdadera" se entiende en el cuadro anterior, el porcentaje de magnetita extraído por el método del imán (A), multiplicado por su pureza (B)

$$A \times B = \text{Magnetita real}$$

### Discusión:

El método seguido en la determinación de la sílice es muy sencillo y rápido y no ofreció ningún inconveniente.

La determinación del hierro sí presentó algunas dificultades. En la magnetita éste se encuentra en presencia de titanio IV. Si se emplea un reductor de Jones o cloruro de estaño II es posible que cierta cantidad de titanio III se forme en la disolución clorhídrica del hierro III objeto de reducción. Esto conduce a un posible error al titular el hierro II (que se formó por reducción) con permanganato o dicromato. Mientras que si se emplea el método yodométrico, el titanio IV prácticamente no interfiere y por lo tanto, los resultados son más exactos. Además, es importante recordar que el titanio III puede valorarse con hierro II, de esta manera al formarse aquél durante la reducción del hierro III y titanio IV, por cualquiera de los métodos usuales, parte del mismo vuelve a su número de oxidación mayor, pero como se agrega exceso de agente reductor, siempre tendremos la presencia del

titanio trivalente en la disolución clorhídrica del hierro II.

Debido a estas posibles interferencias que pueden alterar el resultado, se prefirió seguir el método yodométrico que emplea Cook en las titulaciones del hierro trivalente. Este método es sencillo y rápido y aprovecha las propiedades oxidantes del hierro III mediante la titulación yodométrica.

La comparación de los métodos yodométricos y permanganométricos dieron resultados que se diferencian en algunos casos en 0.3%.

Los resultados obtenidos en los cuadros anteriores son por el método yodométrico.

Los gráficos de pureza de hierro y sílice indican aproximadamente si existen errores apreciables en los métodos empleados, ya que ellos dos, junto con el titanio y aluminio (se estiman en un 12 al 18%), son los elementos más importantes en la magnetita. En el laboratorio se aprecia lo anterior, al realizarse los análisis por sílice y  $R_2O_3$

#### Comportamiento a temperaturas de ignición.

Se realizaron varias pruebas basadas en la ignición de un gramo de magnetita a  $800^{\circ}$  y  $1100^{\circ}C$ . Los resultados obtenidos no justifican el reporte de un cuadro de presentación.

La prueba de la ignición presenta una serie de factores que ofrecen cierto interés.

En primer lugar, se trató de aprovechar la presencia del hierro II en la magnetita, con el fin de oxidarlo. El aumento de peso nos daría -expresado en porcentaje- el por ciento de óxido magnético de la muestra. Sin embargo, -debido quizás a los diversos hidratos de la magnetita y la presencia de o-

tras sustancias interferentes, no determinadas, no se lograron resultados satisfactorios al comparar los resultados obtenidos con el método volumétrico por yodometría.

Se trató de corregir un posible error mediante el aumento de temperatura (de 800° a 1100°), aumento de las horas de 3 a 7, pero los resultados no fueron concluyentes para la mayoría de los casos. Por eso se creyó que no era necesario un cuadro de resultados.

#### Análisis espectrográfico.

Por último se incluye el Método Espectrográfico con el deseo de obtener mejores referencias. Las determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio Mineralógico-Petrográfico de la Dirección de Geología, por los Ings. Agrs. Olman Sánchez y Rolando Castillo.

ANALISIS ESPECTROGRAFICO

Por monas

Lugar de procedencia	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	CaO	TiO <sub>2</sub>	V	Mo
1- <u>Provincia de Puntarenas.</u>									
1- Tivives-Caldera	5-15	75-85	1-5	3-4	0.2-0.4	1.3-2.0	5-10	0.3-0.6	0.002
2- <u>Playa Hermosa-Playa Azul, El Roble</u>									
2- Zona de Guanacaste	15-25	55-65	1-5	3-4	0.2-0.4	1.0-2.5	5-10	0.3-0.6	0.002
3- <u>Zona de Guanacaste</u>									
3- Brasilito	10-20	55-75	1-5	3-5	0.2-0.3	1.0-2.3	5-10	0.2-0.5	0.002
4- Potrero	10-20	65-75	1-5	2-5	0.2-0.4	1.0-3.0	5-10	0.2-0.6	0.002
5- Prieta	5-15	70-80	1-5	2-5	0.2-0.5	1.0-3.0	5-10	0.2-0.6	0.002
6- Tamarindo	5-15	75-85	1-5	2-3	0.2-0.4	0.5-2.0	5-10	0.2-0.6	0.002
7- Ocotal	5-15	75-85	1-5	2-3	0.2-0.4	1.0-2.0	5-10	0.3-0.6	0.002
8- Carbón	5-15	75-85	1-5	2-3	0.2-0.4	0.5-1.0	5-10	0.3-0.6	0.002
9- Callejones, Junquillal	10-20	65-75	1-5	2-5	0.2-0.4	2.0-3.0	5-10	0.3-0.6	0.002
3- <u>Zona del Atlántico</u>									
10-Puerto Viejo	5-15	75-90	1-5	2-6	0.1-0.4	0.5-1.0	5-10	0.1-0.6	0.002
11-Cahuita-Río Estrella	5-15	75-85	1-5	2-7	0.2-0.4	0.5-2.0	5-10	0.3-0.6	0.002

b) la formada por las playas Ocotal, Carbón y Tamarindo, con porcentajes combinados del 75 al 82% y una pureza en óxido magnético de hierro -

## C O N C L U S I O N E S

- 1- Del análisis granulométrico se desprenden algunas conclusiones:
  - a- Las arenas del Pacífico contienen granos más gruesos que las arenas de la zona Atlántica (según las zonas estudiadas).
  - b- La magnetita se encuentra retenida de un 40 al 75% en la malla No70 en la región del Pacífico, lo que indica que tiene un tamaño mediano del 50 al 70% y un tamaño fino del 30 al 50%. El porcentaje de magnetita extra fina puede ser hasta de un 12% en algunas regiones del Guanacaste.
  - c- La magnetita del Atlántico es más fina y los factores de retención de la malla No. 70 oscilan entre 0.6 al 14.0%, por lo que se puede clasificar como magnetita mediana un 10%. El resto o sea el 90%, - corresponde aproximadamente a un 45 al 60% de grano fino y del 30 - al 40% de grano muy fino o extra fino.
  - d- Lo anterior indica que la fuerza de las olas, factores marinos va - rios tales como sedimentación, ambientes de depósito y otras condi - ciones geológicas son de mayor efecto en la zona del Atlántico.
- 2- La suma de los porcentajes de sílice y hierro en la magnetita, varían - del 81 al 86% para la región del Pacífico, sección de Puntarenas, y del 73 al 82% para la zona del Guanacaste. Mientras la zona del Atlántico representada por las magnetitas de Puerto Viejo y Cahuita, oscilan en - tre el 78 y 85%.
- 3- En la región del Guanacaste existen dos zonas: a) compuesta por Prie - ta, Potrero y Brasilito con variaciones de porcentaje sílice-hierro del 72 al 77%, con un contenido promedio de 59% de magnetita, y otra zona o b) la formada por las playas Ocotal, Carbón y Tamarindo, con porcenta - jes combinados del 75 al 82% y una pureza -en óxido magnético de hierro-

promedio del 72%. Por supuesto, esta última tiene menor cantidad de sílice que la perteneciente a la zona primera.

- 4- Del análisis químico por hierro y sílice, se observa que cuanto más pequeña sea la cantidad de magnetita extraída de la arena, mayor es el conjunto de impurezas expresado como sílice y, por consiguiente, menor es la pureza en hierro.
- 5- Con respecto al grado de pureza (magnetita real o verdadera), se propone como zonas primarias de explotación las siguientes:
  - a) La zona comprendida entre Tamarindo, Ocotal y Carbón
  - b) La zona de Cahuita-Puerto Viejo
  - c) La zona de Tivives y Caldera
  - d) La zona de Brasilito, Potrero y Prieta.
- 6- Los datos de 46 muestras por triplicado dieron tres tipos de resultados al ser sometidas a temperaturas de ignición:
  - a- La muestra perdió peso
  - b- La muestra ganó peso parcialmente, y
  - c- La muestra aparentemente dio resultados ligeramente menores que el método de valoración yodométrica.

Las magnetitas de Caldera y Tamarindo dieron aparentemente por la prueba a la ignición, resultados que son del 3 al 5% menores que los datos obtenidos por métodos químicos. Esto conduce a suponer:

- 1) que dicho material en estas zonas tiene una cantidad muy pequeña de hidratos, o
  - 2) que ese 3 al 5% no sea magnetita sino hematita u óxido de hierro III.
- 7- Se adaptó el método del cálculo de mineral extractable por la determina-

ción de la densidad y se proponen dos factores teóricos para la magnetita:

a) 5.25 para la zona del Pacífico y b) 5.45 para la región del Atlántico.

B- Se recomienda un estudio colateral sobre la riqueza en titanio de estas arenas, ya que se encuentra en cantidad apreciable, de acuerdo con los resultados obtenidos por el método espectrográfico, así como la posible extracción de rutilo.

## R E S U M E N

Se realizó un estudio de las arenas negras magnéticas de Costa Rica de las costas de Guanacaste, Puntarenas y Limón como zonas de yacimiento y posible explotación posterior.

Se hizo una clasificación de las arenas y de la magnetita en ellas contenida. Se adaptó el método de la densidad técnica para la determinación rápida del mineral magnético y se propusieron factores teóricos, deducidos de la práctica, con el fin de obtener resultados aceptables al contenido real de la magnetita en las arenas negras.

Se realizaron análisis mecánicos de extracción, análisis cromatográficos y químicos. Los resultados fueron presentados en cuadros y gráficos, acompañados de la discusión correspondiente.

Se expuso como referencia un cuadro de análisis espectrográfico realizado por la Dirección de Geología, como una contribución al presente trabajo.

Al final, se presentaron las conclusiones del caso y se ofrecieron diversas recomendaciones, particularmente sobre futuras investigaciones colaterales relacionadas con la extracción de la magnetita y el estudio de sus impurezas tales como el titanio y el rutilo.

B I B L I O G R A F I A

- 1- Angelelli V. y Chaar, E. Las Arenas de la Bahía San Blas, su investigación por minerales de hierro, titanio y circonio. Comisión de Energía Atómica. Buenos Aires, 1964.
- 2- ASTM Standards Books of ASTM Standards Part III. Metals Test Methods (except Chemical Analysis). Publ.: Amer. Soc. for testing and Materials. Philadelphia, Pa., 1961.
- 3- ASTM Standards Book of ASTM Standards Part IV. Cement, Lime, Gypsum, Mortar, Concrete, Mineral Aggregates. Publ.: Amer. Soc. for testing and Materials Philadelphia, Pa., 1961.
- 4- Bargalló, M. Química Descriptiva, Inorgánica y Orgánica. Primera edición. Manuel Marín, México, 1959.
- 5- Bateman, A. M. Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico. Trad. de la 2a. ed. americana por Dr. J. L. Amorós. Ediciones Omega S. A., Barcelona, España, 1957.
- 6- Begeman, M. L. Procesos de Manufactura. Trad. al español de la 4a. ed. inglesa por Ing. L. Dignowity. Co. Editorial Continental S. A., México, 1960.
- 7- Berl-Lunge-D'ans Métodos de Análisis Químico Industrial. Tomo II, segunda parte. Trad. de la 6a. ed. alemana por J. Castells. Editorial Labor S. A., Barcelona, España, 1949.
- 8- Bermejo, M. M. Tratado de Química Analítica Cuantitativa. Imprenta Seminario Conciliar. Santiago de Compostela, España, 1958.
- 9- Bianchi G., Caprioglio G. et al. Electrochemical behavior of oxygen and hydrogen on magnetite electrodes. C. A. 9567 g (57), 1962.
- 10- Colombo, U., Fagherazzi G., et al. Mechanisms in the first stage of oxidation of magnetites. C. A. 15487 a (60), 1964.

- 11- Cornelius H.P. y Cornelius M. Fundamentos de Geología General. Trad. del alemán por J. M. Ríos, 2a. ed. Editorial Alhambra S. A., Madrid, 1960.
- 12- Cramer F. Paper Chromatography. Trad. L. Richards Mc Millan & Co., Ltda., New York, 1954.
- 13- Chariguin, M.M. Geología General. Trad. del ruso por A. Fierro Menu. Ed. Grigalbo S. A., Barcelona, 1964.
- 14- Dana-Hurlbut, C. S., Jr. Manual de Mineralogía. Trad. de 16a. ed. americana por Dr. J.L. Amorós. Editorial Reverté S. A. Barcelona, España, 1956.
- 15- De Beausset, V. S. Desarrollo Industrial de Costa Rica. Trad. por Cardiso. San José, Costa Rica, 1964.
- 16- De la Cámara, M.S.M. Manual de Geología. 3a. ed. Cía Editorial Continental, S. A., México, 1953.
- 17- Derback, V. G. Operation of the drum separation during wet concentration of magnetite ore. CA 12925 d (60), 1964.
- 18- Dimitrov, M. Catalysts for the synthesis of ammonia. CA. 13214 b (57), 1962
- 19- Dmitrenko, L. M. et al. Selection of a raw material for the preparation of a catalyst for the synthesis of ammonia. C.A. 7497 f (60), 1964.
- 20- Dunbar, C.O. y Rodgers, J. Principios de Estratigrafía. Trad. de M. Alvarez Jr., de la 3a ed. inglesa. Compañía Ed. Continental, S. A., México, 1963.
- 21- Eggert, K. On the oxidation of natural magnetite. C.A. 10199 f (60), 1964.
- 22- Elbeith I. I. M. & Gabra, G. G. An antipyrine - EDTA - Dioxane solvent for Inorganic Paper Chromatography. Chem. Analyst, vol. 51, No. 1, pág. 15 1962.
- 23- Elbeith, I.I.M. & Gabra, G.G. Scheme for Inorganic Micro Qualitative Analysis based on circular Paper Chromatography. Chem. Analyst vol. 52, NO. 2 (36-40), 1963.

- 24- Emmons, W. H., Allison, I, et al. Geology Principles and Processes. Fifth ed., Mc Graw Hill Co. Inc., New York, 1960.
- 25- Gokhale, K.V.G.K. Studies on the oxidation of magnetite. C. A. 2173 i (56), 1962.
- 26- Hagner, A. F. Host rocks as a source of magnetite ore, Scott Mine Sterling Lake, N. York, - C. A. 6640 a (60), 1964.
- 27- Haroda, H. The Mineralogical composition of iron sand ares in Yamakawa, Onejime, Kogoshima Prefecture. C. A. 5618 e (57), 1962.
- 28- Illarionov, A. A. Magnetite in iron ores of the Kursh magnetic anomaly. C. A. 7808 c (60), 1964.
- 29- Jeitner, F. Electrode shapes and materials for - the chloro alkali electrolysis. C. A. 5714 b (57), 1962.
- 30- Kalinin, D. V. Formation of magnetite in contact - metamomatic iron ore deposits. C. A. 10810 c (57), 1962.
- 31- Kirk, R. E. & Othmer, D. F. Enciclopedia de Tecnología Química. Trad. del inglés por O. G. Carrera y colaboradores. Tomo IX, 1a ed. es pañola. UTEHA, México, 1962.
- 32- Lahee, F. H. Geología Práctica. Trad. de la 5a. ed. americana por Dr. R. Candel Vila. Ediciones Omega S. A., Barcelona, España, 1958.
- 33- Losana, L. y Ferrer, M.J. Ma. Metalurgia. Primera edición española. Manuel Ma rín, ed., Barcelona, España, 1951.
- 34- Mc Graw Hill ed. Encyclopedia of Science and Techno - logy. Vol. 7, pág. 259. Mc Graw Hill Book Co., New York, 1960.
- 35- Idem. Vol. 6, pág. 48, Magnetite. Mc Graw Hill Book Co, New York, 1960.
- 36- Merck & Co., ed. The Merck Index of Chemicals and - Drugs. Sexta edición. Merck & Co., Inc. - Rahway N.J., U.S.A., 1952.

- 37- Miller, D. W. Jr. & Folk, R. L. Occurrence of detrital magnetite and ilmenite in red sediments: new approach to significance of redbes. A. Assoc. Petroleum Geologist Bull. Vol. 39 (338-345), 1955.
- 38- Mukherjee, S. Veins of asbestos and fibrous magnetite. C. A. 6906 c (57), 1962.
- 39- Oosterhous, G.W. van, & Klomp, C.J. Effect on grinding on the magnetic properties of magnetite and Zn ferri-rite. C.A. 1726 f (57), 1962.
- 40- Pecherskii, D. M. Statistical analysis of causes of different magnetization of granites in the Verkhoyansk-Chukosh folded region and the Okhotsk-Chukosh volcanic belt. C.A. 7818 a (60), 1964.
- 41- Pokrzywnicki, J. Supposed fall of a slag-like aplin-ter at Oylewo, district of Minsk Mazowiecki. C.A. 3909 b (60), 1964.
- 42- Rankama K. & Sahama, G. Geoquímica. Trad. del inglés por I. Bolívar Izquierdo. Ed. Aguilar S. A., Madrid, 1954.
- 43- Rhead, E. L. Metalurgia. Trad. de la vigésima primera ed. inglesa por E. Días-Varela. 3a. ed. española. Ed. Labor S. A., Barcelona, España, 1957.
- 44- Rose, A. y Rose, E. Diccionario de Química y de Productos Químicos. Trad. al español por Dr. J. Castañer Gargallo. Ediciones Omega S. A., Barcelona, España, 1959.
- 45- Shirayama, K. Radiation Shielding Concrete. C. A. 7708 a (58), 1963.
- 46- Shvets, I. N. Dependence of magnetic properties of powdered magnetite on grain size. C. A. 2646 g (60), 1964.
- 47- Simon, A. y Hermann, H.J. Differential Thermal analysis of magnetites. C.A. 5382 g (58), 1963.

- 48- Smith, O. C. Identification and Qualitative Chemical Analysis of Minerals. Second ed. D. Van Nostrand Co., Inc. New York, 1953.
- 49- Starchik, L. P. Electrical changes created on mineral particules during their separation in a electrostatic field. C. A. 474 h (57), 1952.
- 50- Strong, R. K. Kingzett's Chemical Encyclopaedia, 7a ed. D. Van Nostrand Co., Inc. New York, 1946.
- 51- Taggart, A. F. Handbook of mineral dressing ores - Industrial Minerals . J. Wiley & Sons Inc., New York, 1960.
- 52- Tyrrel, G. W. Principios de Petrología. Introducción al estudio de las ciencias de las rocas. Trad. por Ing. O.M. Becerril R. Compañía ed. Continental S. A., México, 1961.
- 53- Ueda, R. Electron microscope studies of reduction of metal oxides by hydrogen. V. The progress of reduction of fused magnetite for ammonia synthesis. C. A. 3710 h (60), 1964.
- 54- Ullmann, F. Enciclopedia de Química Industrial. Sección II, tomo II. 2a. ed. Trad. del alemán por Dr. J. Estalella. Ed. G. Gili, S. A. Barcelona, 1950.
- 55- Ullmann, F. Enciclopedia de Química Industrial. Sección IV, tomo VII, 2a. ed. Trad. del alemán por Dr. J. Estalella. Ed. G. Gili S. A., Barcelona, 1950.
- 56- Willard, H.H., Furman, N.H. & Bricker, C. E. Análisis Químico Cuantitativo. Ed. Marín S. A., México, 1963.
- 57- Yamaguchi, S. The ferrimagnetic structure of magnetite. C. A. 1731 e (57), 1962.
- 58- Cook, F. Farmacia Práctica de Remington. Trad. al español de O. G. Carrera. UTEHA, México, 1953.

## S U M A R I O

Profesores Guía y Revisores

Dedicatoria y Agradecimiento

	Pág.
Introducción	1
CAPITULO I : <u>Las arenas. Conceptos generales y geológicos.-</u>	3
- Definición	3
- Generalidades	3
- Arenas y areniscas	4
- Arenas terrígenas	5
- Clasificación de las arenas	5
- Actividad geológica de los mares	6
- Ambientes de depósito	10
- Depósitos residuales	15
CAPITULO II: <u>El Hierro y sus Minerales más importantes.-</u>	17
- Hierro. Generalidades	17
- Minerales de hierro de importancia económica	18
- Minerales básicos para obtener el hierro	18
- Clases y orígenes de los yacimientos de los minerales de hierro	19
- Menas de hierro de origen marino	22
CAPITULO III: <u>La Magnetita y su Extracción Industrial.-</u>	24
- La Magnetita. Generalidades	24
- Fórmulas, nombre químico y sinónimos	24
- Propiedades	25

- Propiedades magnéticas	27
- Localización de la magnetita	28
- Usos	31
<u>Extracción Industrial de la Magnetita.-</u>	32
- Fundamento y minerales de partida	32
- Preparación de los minerales	33
- Separación magnética	34
- Separadores para magnetita	36
 CAPITULO IV: <u>Yacimientos de Magnetita en Costa Rica.-</u>	 39
 CAPITULO V : <u>Parte Experimental Analítica.-</u>	 43
- Consideraciones previas	43
- Determinaciones	44
- Granulometría	45
- Granulometría de las arenas negras	46
- Densidad Técnica	50
- Fracción magnética	51
- Fracción no magnética	55
- Análisis cromatográfico cualitativo en papel	62
- Análisis químico cuantitativo	66
- Análisis de la magnetita	67
-Zonas importantes de explotación de la magnetita	69
- Promedio de pureza en Hierro, magnetita y sílice por zonas	69
- Promedio de pureza en hierro, magnetita y sílice por zonas explotables	70
- Porcentaje real o verdadero de la magnetita en arenas negras por zonas	70
- Análisis espectrográfico	73

CONCLUSIONES	75
RESUMEN	76
BIBLIOGRAFIA	79

- o -