

**REPUBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOCIENCIAS, MINERIA Y
QUIMICA**

**BENEFICIO DE ROCA FOSFORICA EN LOS
MUNICIPIOS DE NUEVO COLON, TURMEQUE Y
VENTAQUEMADA (BOYACA)**

Por:

JESUS ZAMBRANO P. Y EDUARDO ROMERO F.

1991

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	120
1. INTRODUCCION.....	120
1.1 ASPECTOS GENERALES	120
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	121
2. FUNDAMENTO TEORICO.....	121
2.1 ASPECTOS GEOLOGICOS	121
2.2 TEORIA DE LA FLOTACION	122
2.2.1 DEFINICION DE LA FLOTACION	122
2.2.2 FLOTACION A LA ESPUMA	122
2.2.3 IMPORTANCIA ECONOMICA DEL PROCESO	122
2.2.4 OBSERVACIONES EXPERIMENTALES	122
2.2.5 REACTIVOS DE FLOTACION	123
2.2.6 INTERACCION COLECTOR - SUPERFICIE DEL MINERAL	123
2.2.7 FORMACION DE ESPUMAS	124
2.2.8 CALIDAD DE LA ESPUMA DE FLOTACION	124
2.2.9 PRACTICA DE LA FLOTACION	124
3. PARTE EXPERIMENTAL.....	125
3.1 MATERIALES Y EQUIPOS.....	125
3.1.1 PROCESAMIENTO	125
3.2 CARACTERIZACION QUIMICA Y MINERALOGICA	125
3.2.1 ASPECTOS GENERALES.....	125
3.3 ACONDICIONAMIENTO Y FLOTACION.....	127
3.3.1 TAMAÑO DE PARTICULA.....	128
3.3.2 SECADO DE LAS FRACCIONES	128
3.4 ENSAYO A ESCALA PILOTO.....	131
4. ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	135
5. BIBLIOGRAFIA.....	139

FIGURAS

1 Mapa de reservas de roca fosfórica de la formación Plaeners en el sinclinal de Piranchón (Sur).....	126
2 Diagrama de flujo típico para flotación de roca fosfórica con ácidos grasos	129
3 Diagrama de flujo de molienda, concentración y acidulación de la roca fosfórica.....	132

TABLAS

1. Análisis de elementos metálicos de muestra de mineral fosfórico por espectroscopía de emisión.....	127
2 Granulometría vía seca por tamices de la serie U.S. Standard	128

3	Distribución del fósforo de acuerdo al tamaño de partícula (tamices de la serie U.S Standard)	131
4	Variación del tiempo de deslame.....	133
5	Variación del pH en el deslame.....	133
6	Variación del depresante (silicato de sodio).....	133
7	Variación del ácido oléico.....	134
8	Variación del pH de flotación.....	134
9	Variación de la cantidad de espumante (aceite de pino).....	134
10	Recuperación del fósforo (P_2O_5)	135

GRAFICAS

1	Análisis granulométrico.....	130
2	Curva de porcentaje de P_2O_5 en función del número de tamiz.....	136
3	Relación del P_2O_5 total y el P_2O_5 soluble en citrato de amonio neutro.....	136
4	Curva de recuperación del P_2O_5 en función del número de flotaciones de limpieza.....	137
5	Variación del enriquecimiento del P_2O_5 en función del número de flotaciones de limpieza.....	138



RESUMEN

Se hace énfasis en la necesidad de aprovechar los recursos de roca fosfórica en el país. Utilizando muestras de roca fosfórica tomadas en el área Turmequé-Ventaquemada en el departamento de Boyacá del nivel fosfático principal de la formación Plaeners, sinclinal de Piranchón, se hizo un estudio de concentración del mineral mediante el proceso de flotación. En esta forma se obtuvieron concentrados del 32% en P_2O_5 partiendo de un mineral con un contenido del 18.7%. En dicho estudio se hace una variación de todos y cada uno de los parámetros que intervienen en el proceso de flotación tales como tiempo de deslame, pH del deslame, concentración del reactivo depresante (silicato de sodio), concentración del reactivo colector (ácido oléico), nivel del espumante (aceite de pino) y pH de la flotación lo mismo que la recuperación del fósforo y flotaciones de limpieza.

El procedimiento consistió en variar un parámetro en los diferentes ensayos dejando fijos los demás, con base en el mejor resultado en cuanto al aumento de P_2O_5 y lo mismo que a su recuperación en el concentrado, se seleccionó el mejor valor que a su vez se utilizó en los ensayos subsiguientes. Se hace lo mismo con todos y cada uno de los parámetros sometidos a estudio hasta encontrar los valores óptimos de cada uno de ellos con los cuales se obtuvo un concentrado del 32% en P_2O_5 con una recuperación del ochenta y cinco por ciento. Utilizando los valores óptimos de las variables que intervienen en el proceso de flotación se hacen ensayos a escala piloto en una celda con capacidad de cincuenta kilogramos, comprobándose en esta forma que los resultados del estudio tal como se realizaron a escala de laboratorio son válidos a escala industrial.

Se hace también un estudio económico del proceso con base en los costos de explotación, secado, molienda y proceso

de concentración por tonelada relacionándolo con el precio actualizado en el mercado de la roca fosfórica en el país.

1. INTRODUCCION

1.1. ASPECTOS GENERALES

El fósforo junto con el potasio y el nitrógeno son los elementos indispensables en la nutrición de las plantas, de ahí su gran importancia en la agricultura.

Al ser la roca fosfórica la principal fuente de fósforo, todo lo que se haga para su conocimiento en cuanto a exploración, cuantificación de reservas, beneficio y formas de aprovechamiento será bienvenido ya que el consumo del país en fertilizantes fosfatados depende en un noventa por ciento de las importaciones tanto de roca fosfórica como de sus derivados o sea los fertilizantes de alta solubilidad como los superfosfatos y fosfatos de amonio, cantidades que se consumen en orden de cientos de miles de toneladas al año en el país. Cabe señalar que a nivel mundial, el principal proveedor de roca fosfórica y de fertilizantes derivados de ésta son los Estados Unidos, principalmente La Florida, pero de acuerdo con políticas del gobierno norteamericano los Estados Unidos suspenderán exportaciones de este mineral en unos pocos años, produciéndose una disminución en la oferta de alrededor de cincuenta millones de toneladas al año en el mercado mundial, lo que traerá como consecuencia un aumento en el precio de la roca fosfórica y de sus derivados, entonces es oportuno que países como Colombia que dependen de las importaciones fomenten su búsqueda y estudio para un mayor y mejor aprovechamiento.

La producción actual de roca fosfórica en el país es de unas cuarenta mil toneladas al año provenientes de los depósitos de Sardinata, Norte de Santander, con una

producción anual de unas diez y seis mil toneladas con destino a la empresa Abonos Colombianos (ABOCOL) en la ciudad de Cartagena la cual es utilizada como materia prima para la producción de fosfatos solubles de uso agrícola para la agricultura nacional. Por otra parte en el departamento del Huila existen algunas explotaciones (áreas de Tesalia y Media Luna) donde se procesa la roca fosfórica para la aplicación directa en los suelos; algunas empresas de aquella región están haciendo intentos para elaborar superfosfatos solubles mediante el tratamiento con ácido sulfúrico. En el área de Pesca- Iza en Boyacá desde hace tiempo se ha intentado la explotación de la roca fosfórica pero por razones de orden técnico no se ha logrado asegurar una producción suficiente ni siquiera para satisfacer las necesidades de la agricultura regional. En la actualidad se realizan explotaciones a nivel de pequeña minería, lo que constituyen apenas explotaciones de subsistencia.

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

En reciente estudio exploratorio realizado por el INGEOMINAS, se identificaron en el área de Ventaquemada-Turmequé, algunos depósitos de roca fosfórica aptos para pequeña minería y con reservas del orden de veinte millones de toneladas pero con tenores inferiores al veinte por ciento en P_2O_5 los que se consideran no utilizables directamente para fines agrícolas, ni tampoco aptos para tratamiento industrial debido a su bajo contenido en fósforo. Sin embargo la ubicación de estos depósitos cercanos a regiones con agricultura intensiva hace que estos depósitos sean aprovechables mediante un tratamiento previo de beneficio por flotación con el objeto de aumentar el contenido de fósforo a valores superiores al treinta por ciento. Otros países como Brasil y Méjico aplican este mismo proceso para producir concentrados de más del treinta por ciento en fósforo y del orden de varios millones de

toneladas anuales a partir de minerales con tenores inferiores al diez por ciento. Entonces el objetivo principal es la obtención de concentrados de roca fosfórica de grado comercial a partir de mineral con tenores inferiores al veinte por ciento, que sean aptos para su utilización directa en la agricultura o para su acidulación y en esa forma aumentar su efectividad agronómica.

2. FUNDAMENTO TEORICO

2.1. ASPECTOS GENERALES

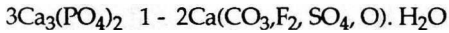
La roca fosfórica continental consiste esencialmente de fluorapatita submicrocristalina, $Ca_{10}F_2(PO_4)_6$, la cual contiene un exceso de flúor y una pequeña cantidad de sodio.

Los compuestos $Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6$, $Ca_9H_2O(PO_4)_6$ y $Ca_{10}CO_3(PO_4)_6H_2O$, forman una serie extensa de soluciones sólidas con fluorapatita, algunos de cuyos miembros ocurren en rocas geológicamente recientes. La roca fosfórica de Curazao es esencialmente un hidrato de fosfato tricálcico $Ca_{10}(F,OH)_2(PO_4)_6$

El hueso animal libre de materia orgánica, es un carbonato de apatita, $Ca_{10}CO_3(PO_4)_6H_2O$, isomorfo en fluorapatita. La oxiapatita $CaO(PO_4)_6$ y puede ser preparada calentando la hidroxiapatita o hueso a 900 grados centígrados. Los depósitos de roca fosfórica del mundo consisten de varios minerales amorfos y apatitas microcristalinas; ciertas fosforitas en Francia consisten esencialmente de fosfato tricálcico coloidal, colofona, estafelita cristalina y dalita cristalina. Se concluyó que las fosforitas estaban conformadas por los siguientes compuestos en solución sólida:

Dalita	$9CaO.3P_2O_5 . CaCO_3.H_2O$
Francolita	$9CaO.3P_2O_5 .Ca(F_2CO_3).H_2O$
Colofana	$9CaO.3P_2O_5 .CaCO_3.H_2O+x H_2O$
Fluorapatita	$9CaO3P_2O_5 .CaF_2$
Hidroxiapatita	$9CaO3P_2O_5 Ca(OH)_2$

El principal constituyente de la fosforita, también llamada roca fosfórica o hueso de fósiles es una sustancia amorfa con propiedades muy características para ser reconocida como un material distinto; es llamado colofana y tiene la siguiente fórmula aproximada:



También se ha establecido que hay un número de minerales comunmente definidos, que ocurren en la roca fosfórica. Algunos de ellos son:

Volquerita	$\text{Ca}_{10}\text{O}(\text{PO}_4)_6$
Dalita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Podolita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCO}_3$
Estafelita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaF}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Colofanita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \times 0(2\text{CaF}_2\text{CO}_3) \text{ y } 2\text{H}_2\text{O}$

Los resultados del análisis químico indican que el hueso es un carbonato de apatita $\text{Ca}_{10}\text{CO}_3(\text{PO}_4)_6$, con hidroxiapatita y carbonato de calcio. Los huesos de fósiles se han descrito como colofana.

Puesto que los compuestos mencionados anteriormente están estrechamente relacionados en su composición química, es difícil identificarlos en los materiales submicrocristalinos en que ocurren en la naturaleza. Los tamaños de las pequeñas partículas de las impurezas no fosfáticas, hacen difícil la interpretación de los resultados de análisis. Esto hace prácticamente imposible determinar la distribución correcta del flúor y CO_2 de las impurezas.

2.2. TEORIA DE LA FLOTACION

2.2.1. DEFINICION DE LA FLOTACION

La flotación es un proceso de separación de materiales sólidos en pulpa acuosa; consiste en formar con ciertos minerales un complejo más liviano que el conjunto restante, sobre el cual este complejo puede flotar y ser separado fácilmente.

2.2.2. FLOTACION A LA ESPUMA

En una pulpa compuesta por sólidos finos y agua, se forman agregados estables entre burbujas de aire y uno o varios sólidos seleccionados; estos agregados son transportados en forma de espuma a la superficie de la pulpa.

Generalmente algunos sólidos se adhieren a las burbujas de aire gracias a la intervención de reactivos químicos particulares o específicos que son los llamados COLECTORES y que son capaces de hacer selectivamente esos minerales hidrófilos o hidrófobos.

2.2.3. IMPORTANCIA ECONOMICA DEL PROCESO

La flotación a la espuma data desde comienzos del siglo, es un proceso muy importante dada la explotación intensiva de yacimientos de materias primas minerales; como los yacimientos minerales de buena calidad están en vía de agotamiento, se ha hecho necesario recurrir a yacimientos minerales de baja calidad por lo que se ha hecho imprescindible el proceso de concentración por flotación.

2.2.4. OBSERVACIONES EXPERIMENTALES

El proceso de flotación es el resultado de un conjunto de fenómenos complejos que no están bien dilucidados actualmente. Las dificultades de su investigación se debe a la intervención de un gran número de variables y a múltiples interacciones entre estas variables.

Para poder emplear este proceso, se deben tener en cuenta tres condiciones esenciales:

- 1) Obtención de burbujas de aire estables que puedan formar espumas.
- 2) Adhesión de los minerales a flotar, a las burbujas de aire.
- 3) No adhesión de las partículas que no se deseen flotar.

En la práctica lo que se ha podido concluir es que la flotación es un fenómeno de superficie y que las interfases entre las tres fases gaseosa, líquida y sólida juegan un papel muy importante. En la práctica estas tres fases son el aire, el agua y un mineral sólido.

2.2.5. REACTIVOS DE FLOTACION

Para tener las condiciones favorables de la flotación, hay que hacer intervenir reactivos específicos que deben tener influencia en los siguientes factores:

- 1) La mayoría de los minerales, cuando están contaminados en la superficie, se adhieren al agua y no al aire; ellos son hidrófilos y aerófilos.
- 2) La parafina y otras sustancias hidrocarbonadas se adhieren al aire y no al agua, ellas son hidrófobas y aerófilas.
- 3) Numerosos minerales se pueden hacer adherentes al aire y no al agua cuando se les agrega en pulpa acuosa ciertos reactivos químicos bien seleccionados.
- 4) Según los reactivos químicos seleccionados se puede a menudo hacer los minerales adherentes bien al aire (burbuja) o bien al agua.

Sólo algunos minerales como el azufre, el carbón y la molibdenita son poco humectables por el agua y poseen flotabilidad natural, es decir que ellos tienen tendencia a adherirse al aire y no al agua.

Los reactivos de flotación que son llamados también colectores deben ser moléculas heteropares es decir compuestos orgánicos donde la molécula tiene dos partes bien distintas:

- 1- Un grupo hidrocarbonado no polar que es atraído por el aire en la burbuja pues es hidrófobo.

- 2- Un grupo polar, generalmente ionizado o ionizable que es adsorbido a la superficie del mineral a flotar.

Para modificar la adhesión de los minerales, sea al aire o sea al agua se emplean los reactivos llamados activantes o depresantes.

Para hacer posible la flotación se hace necesario obtener burbujas de aire estables que puedan tomar los minerales hidrófobos y mantenerlos en una espuma persistente.

Para estabilizar las burbujas se utilizan reactivos tensoactivos que modifican la tensión interfacial líquido-gas. Son también moléculas heteropares en las cuales el grupo hidrocarbonado se orienta hacia el aire, pero el grupo polar que de preferencia es no ionizable es atraído por el dipolo que es el agua, pueden ser catiónicos o aniónicos dependiendo si su carga es positiva o negativa.

Como ejemplo se citan dos casos típicos de reactivos colectores:

- 1- Acido oleico



parte no polar o hidrófoba

parte polar o hidrófila

- 2- Acido sulfónico



Parte polar o hidrófila

parte no polar o hidrófoba

2.2.6. INTERACCION COLECTOR - SUPERFICIE DEL MINERAL

La atracción del grupo polar del colector a la superficie del mineral puede resultar por:

- 1- Una atracción puramente física debida a la atracción de las cargas eléctricas.
- 2- Una afinidad química que da lugar a una quimiadsorción, es decir, a una reacción química de superficie.
- 3- Una combinación variable debida a los dos tipos de atracción.

En la capacidad colectora de un reactivo es importante el pH, pues siempre habrá para cada tipo de mineral competencia entre los iones del colector y los otros iones presentes en la pulpa. Por consiguiente en el caso de los colectores aniónicos hay siempre competencia entre sus iones efectivos y los iones OH⁻ presentes en el agua.

Para los colectores catiónicos hay competencia con los iones H⁺. O sea que el valor del pH condiciona grandemente la efectividad de un reactivo colector.

En la adsorción de los colectores el potencial electrocinético juega un papel importante.

La fijación de los colectores a la superficie del mineral se explica por la teoría del potencial electrocinético. Los cationes son adsorbidos por las superficies de carga negativa, y los aniones son adsorbidos por la superficie de carga positiva.

2.2.7. FORMACION DE ESPUMAS

Sistema burbuja-mineral

Para que las partículas minerales a concentrar puedan ser separadas de la pulpa que las contiene, es necesario después de haberlas preparado superficialmente por adición de reactivos colectores y de agentes de acondicionamiento, ponerlas en contacto con burbujas de aire estabilizadas a las cuales se van a adherir para luego ser llevadas a la superficie.

2.2.8. CALIDAD DE LAS ESPUMAS DE FLOTACION

Las espumas de flotación deben satisfacer algunos requisitos:

- a- Las espumas deben estar mineralizadas, es decir llevar un máximo peso de partículas sólidas; el grado de mineralización es directamente proporcional al tenor de la pulpa y del porcentaje del constituyente a flotar.
- b- Las espumas deben tener un tiempo de duración suficientemente largo de tal manera que permanezcan en la superficie y alcancen a ser retiradas mecánicamente.
- c- La cantidad de reactivos a emplear debe ser baja, no solamente por la economía del proceso, sino para permitir la refluotación ulterior de los concentrados flotados.

2.2.9. PRACTICA DE LA FLOTACION

Preparación de la pulpa

GRANULOMETRIA

Se ha comprobado que cuando se flota un mineral puro, el rendimiento de la flotación varía en función de la dimensión de las partículas y que sobretodo cuando hay una granulometría heterogénea, son las partículas gruesas y las muy finas las que menos flotan. Las partículas gruesas flotan difícilmente por razones mecánicas, la adhesión partícula mineral-burbuja de aire no es suficientemente fuerte para resistir a las aceleraciones debidas a la agitación intensa en la máquina, lo mismo que las partículas muy finas flotan mal pues no logran adherirse a las burbujas de aire, ya que la masa no es suficiente para poder romper la película del líquido que envuelve la burbuja de aire.

Se admite generalmente que las dimensiones más favorables para la flotación están comprendidas entre 10 y 100 micrones. (Ver Tabla 1 y Gráfica1).

DILUCION DE LA PULPA

La dilución de la pulpa varía entre quince y cuarenta por ciento de sólidos. El empleo de pulpas poco diluidas permite economía de agua y de reactivos (humectantes y reguladores de pH), y los aumentos en la recuperación y la capacidad de tratamiento en las máquinas. En cambio la cantidad de sólidos especialmente ganga en la espuma es muy elevada y los concentrados son menos ricos en solución diluida. Se puede concluir que es mejor emplear en las flotaciones de limpieza una pulpa más diluida que en la primera flotación.

ACONDICIONAMIENTO

La acción de reactivos de flotación no es siempre instantánea y exige a menudo un cierto tiempo antes de ser efectiva y completa. Esta duración se llama tiempo de acondicionamiento y varía según la naturaleza de los reactivos y los minerales a concentrar.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Trituradora de mandíbulas
Molino de disco
Cuarteador
Celda Denver Sub. A para quinientos gramos
Celda de flotación a escala piloto para 50 kilogramos
Bandejas esmaltadas 10
Bandejas metálicas 6
Balde plásticos

REACTIVOS

Hidróxido de sodio
Silicato de sodio
Acido oléico
Aceite de pino

3.1.1. PROCESAMIENTO

3.1.1.1. *Preparación de la muestra.*- Se tomó una muestra de 50 kilogramos de roca fosfórica proveniente del área

Ventaquemada-Turmequé en el Departamento de Boyacá, correspondiente a la trinchera N° 6 del nivel fosfático principal en la formación Plaeners del Sinclinal de Piranchón, (ver Figura 1) y se sometió a cuarteo para luego pasarla por molino de discos en porciones de un kilogramo de tal manera que un 95% del mineral molido pasara la malla 30 pues es a este tamaño de partícula donde el apatito se libera en mayor proporción de acuerdo a la curva granulométrica; después se sometió a una homogeneización adicional, y de allí se tomaron muestras para análisis químico y caracterización mineralógica.

En el proceso previo a la flotación es necesario eliminar las partículas finas, normalmente las que pasan la malla 150, pues al ser la interacción entre el fosfato y el reactivo colector (ácido graso) un fenómeno de superficie, el consumo de reactivos será mucho mayor, aumentándose los costos de proceso. Para ello se somete a agitación el mineral en la misma celda a un porcentaje de sólidos al 30% en agua y a un pH de 11, ajustado con soda; después de dos minutos se decanta y se retira el sobrenadante que está enriquecido de partículas finas.

3.2. CARACTERIZACION QUIMICA Y MINERALOGICA

3.2.1. ASPECTOS GENERALES

Composición química: P_2O_5 : 18.86%, CaO: 26.64%, SiO_2 : 49.20%.

MINERALES PRINCIPALES:

Contiene el apatito en forma de carbonato de fluorapatito, la sílice o cuarzo en forma microcristalina, y la calcita. Igualmente trazas de óxido de hierro, glauconita y materia orgánica en algunas de las muestras.

ELEMENTOS MENORES Y TRAZAS

Se realizaron análisis espectrográficos para las muestras tomadas en las trincheras. Los resultados obtenidos son similares a los de las rocas fosfóricas de la Forma-

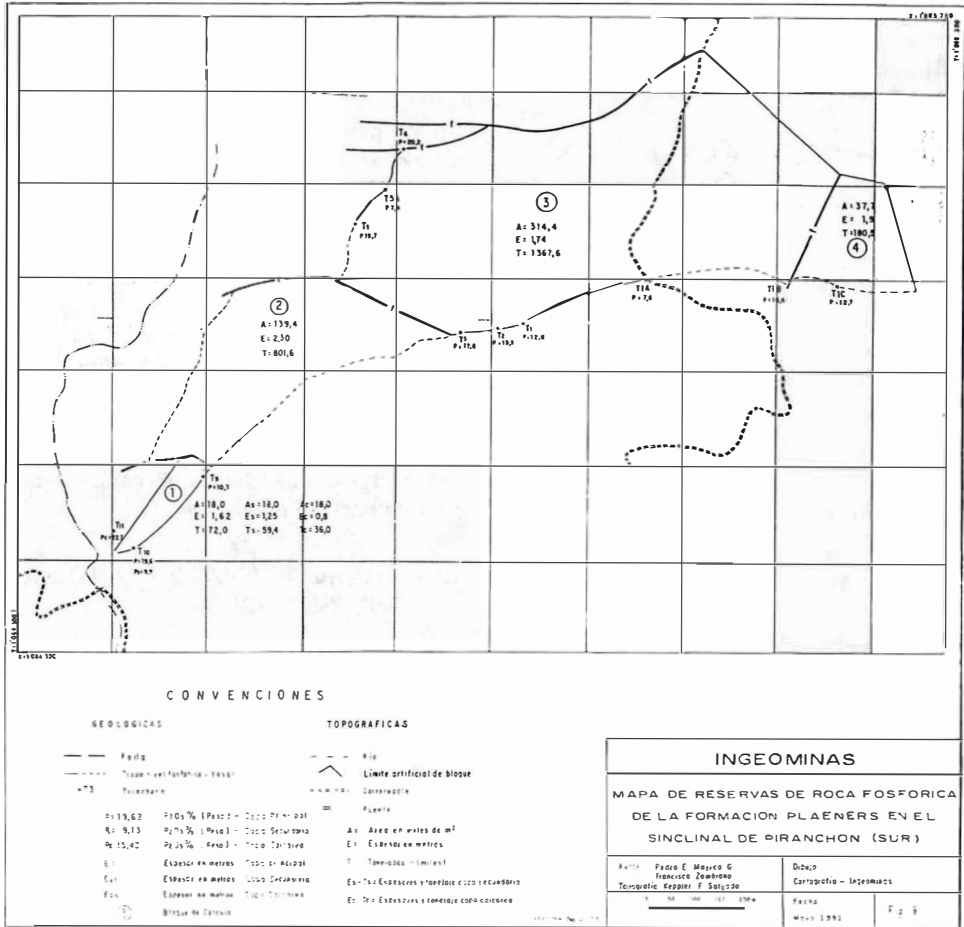


FIGURA 1: MAPA DE RESERVAS DE ROCA FOSFORICA DE LA FORMACION PLAENERS EN EL SINCLINAL DE PIRANCHON (SUR).

TABLA 1: ANALISIS DE ELEMENTOS METALICOS DE LA MUESTRA DE MINERAL FOSFORICO POR ESPECTROSCOPIA DE EMISION

DETERMINACION			
Hierro	Fe	%	0.5
Magnesio	Mg	%	0.2
Calcio	Ca	%	G.20
Titanio	Ti	%	0.03
Manganeso	Mn	ppm	150
Plata	Ag	"	N
Arsénico	As	"	N
Oro	Au	"	N
Boro	B	"	L 10
Bario	Ba	"	300
Berilio	Be	"	3
Bismuto	Bi	"	N
Cadmio	Cd	"	20
Cobalto	Co	"	N
Cromo	Cr	"	150
Cobre	Cu	"	50
Galio	Ga	"	N
Lantano	La	"	300
Molibdeno	Mo	"	L5
Niobio	Nb	"	N
Níquel	Ni	"	20
Plomo	Pb	"	10
Paladio	Pd	"	N
Platino	Pt	"	N
Antimonio	Sb	"	N
Escandio	Sc	"	L5
Estaño	Sn	"	N
Estroncio	Sr	"	1500
Vanadio	V	"	70
Tungsteno	W	"	N
Ytrio	Y	"	G200
Zirconio	Zr	"	150
Zinc	Zn	"	L200

SIMBOLOS: % = gramos del elemento por cien gramos de muestra- ppm miligramos del elemento por kilo de muestra- G mayor que el indicado a continuación de la G- N Elemento no detectado en el límite de detección- L Elemento detectado por debajo del límite de detección o del valor indicado a continuación de la L- H Elemento no determinado por encontrarse interferida su longitud de onda.

ción Plaeners en otras regiones en el departamento de Boyacá y en especial a las del yacimiento de la Conejera (Pesca), Tabla 2. La forma como los elementos menores y traza están combinados en las rocas analizadas, no está perfectamente definida, aunque por su origen y composición con las fosforitas de la formación "Fosforia" en USA, pueden adelantarse los siguientes planteamientos:

El Hierro (FeO), se encuentra en contenidos bajos, alrededor del 0.3%, lo cual sugiere que hubo poco aporte de material de naturaleza ígnea y máfica; el magnesio está también alrededor del 0.3%.

El estroncio por lo general está asociado al apatito y se presenta en cantidades superiores a las normales para este elemento.

El bario y el manganeso se encuentran como inclusiones demasiado pequeñas para ser detectadas por difracción de rayos X. (ZAMBRANO F. MOJICA P. informe 2135).

Los elementos como níquel, cromo y cobre, generalmente están asociados a la materia orgánica y se hallan en contenidos bajos debido probablemente a la meteorización.

3.3. ACONDICIONAMIENTO Y FLOTACION

Dado que el ácido graso (ácido oléico) interactúa tanto con el material silíceo (cuarzo) como con el fosfato, se requiere que el material silíceo se recubra con silicato de sodio para evitar que interactúe con el ácido oléico. Esta operación se realiza en la misma celda después de ser deslamado el material a 70% de sólidos. Luego se acondiciona con ácido oléico durante tres minutos y se flota ajustándose el pH a 9.0 agregándose también aceite de pino como espumante en el orden de 0.18 kilos por tonelada de mineral tratado.

TABLA 2: GRANULOMETRIA VIA SECA POR TAMICES DE LA SERIES U. S. STANDARD

TAMIZ	ABERTURA	PESO		PORCENTAJE	
		(g)		(%)	
Nº	TAMIZ (um)	Retenido	Acumulado	Retenido	Acumulado
10	2000	0.0	0.0	0.00	0.00
18	1000	2.3	2.3	1.14	1.14
35	500	23.4	25.7	11.58	12.72
60	250	59.9	85.6	29.65	42.37
100	150	32.7	118.3	16.19	58.56
140	106	23.3	141.6	11.53	70.09
200	75	17.6	159.2	8.71	78.80
325	45	22.9	182.1	11.34	90.14
Fondo	---	19.9	202.0	9.86	100.00
Total		202.0		100.00	

En esta tabla se muestra el grado de triturabilidad del mineral tal como se utilizó en los ensayos, el cual fue sometido a rompimiento manual, luego se pasó a trituradora de mandíbula y finalmente se pasó por molino de disco. En estas condiciones se encuentra que el 78% del mineral se distribuye entre el tamiz número 10 y el número 200.

Finalmente se diluye la pulpa convenientemente con agua y se abre la válvula de aire produciéndose la espumación; en esta forma al retirarse mecánicamente las espumas ricas en fosfato se obtienen los concentrados que posteriormente van a ser tratados con agua y flotados para aumentar así el grado de fósforo en el concentrado final. (ver diagrama de flujo, Figura 2).

En el trabajo experimental se estudiaron las siguientes variables que tienen que ver con la eficiencia del proceso (aumento en la concentración del fósforo y en el porcentaje de recuperación).

- 1- Tamaño de partícula. (Tabla 3).
- 2- Tiempo de agitación. (Tabla 4).
- 3- pH (Tabla 5).
- 4- Concentración de silicato de sodio. (Tabla 6).
- 5- Concentración del ácido oléico. (Tabla 7).
- 6- pH de la flotación. (Tabla 8).
- 7- Influencia del espumante, aceite de pino. (Tabla 9).

3.3.1. TAMAÑO DE PARTICULA

De acuerdo con la teoría de la flotación no se debe utilizar mineral demasiado grueso, pues las partículas por razones de la

gravedad, presentan una fuerza superior a la fuerza que existe en el sistema partícula-burbuja de aire y reactivo colector lo cual hace que no floten.

Se establece de acuerdo con la granulometría resultante en un proceso de molienda que el 81.8% del fósforo se distribuye entre los tamices 40 y 170.

También se comprobó mediante un ensayo previo que al no deslamar el mineral, el aumento de grado en el concentrado es mínimo, lo que hace pensar que un excesivo material fino del cual están constituidas las lamas, produce un mayor consumo del reactivo colector lo cual hace ineficiente el proceso desde el punto de vista económico.

De acuerdo con lo anterior se seleccionó, para todos los ensayos un tamaño de partícula comprendido entre las mallas 30 y 150.

3.3.2. SECADO DE LAS FRACCIONES

Después del proceso de flotación las muestras se sometieron a decantación por un tiempo de dos horas, luego se retiró el sobrenadante y se procedió a secarlas en estufa a 60 grados centígrados, por un

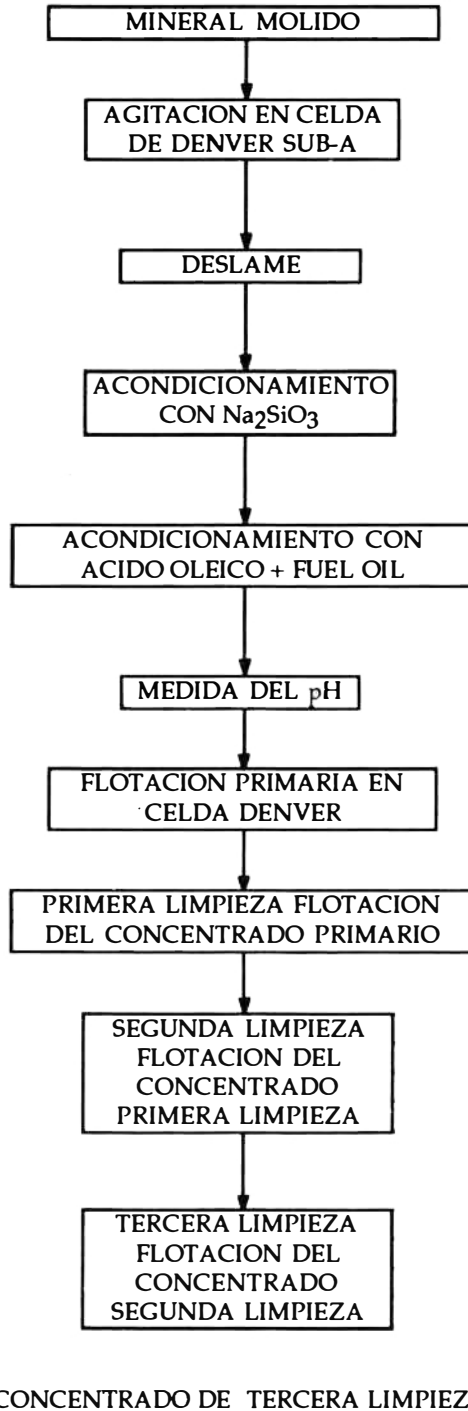


FIGURA 2: DIAGRAMA DE FLUJO TIPICO PARA FLOTACION DE ROCA FOSFORICA CON ACIDO GRASO

GRAFICA 1:

ANALISIS GRANULOMETRICO

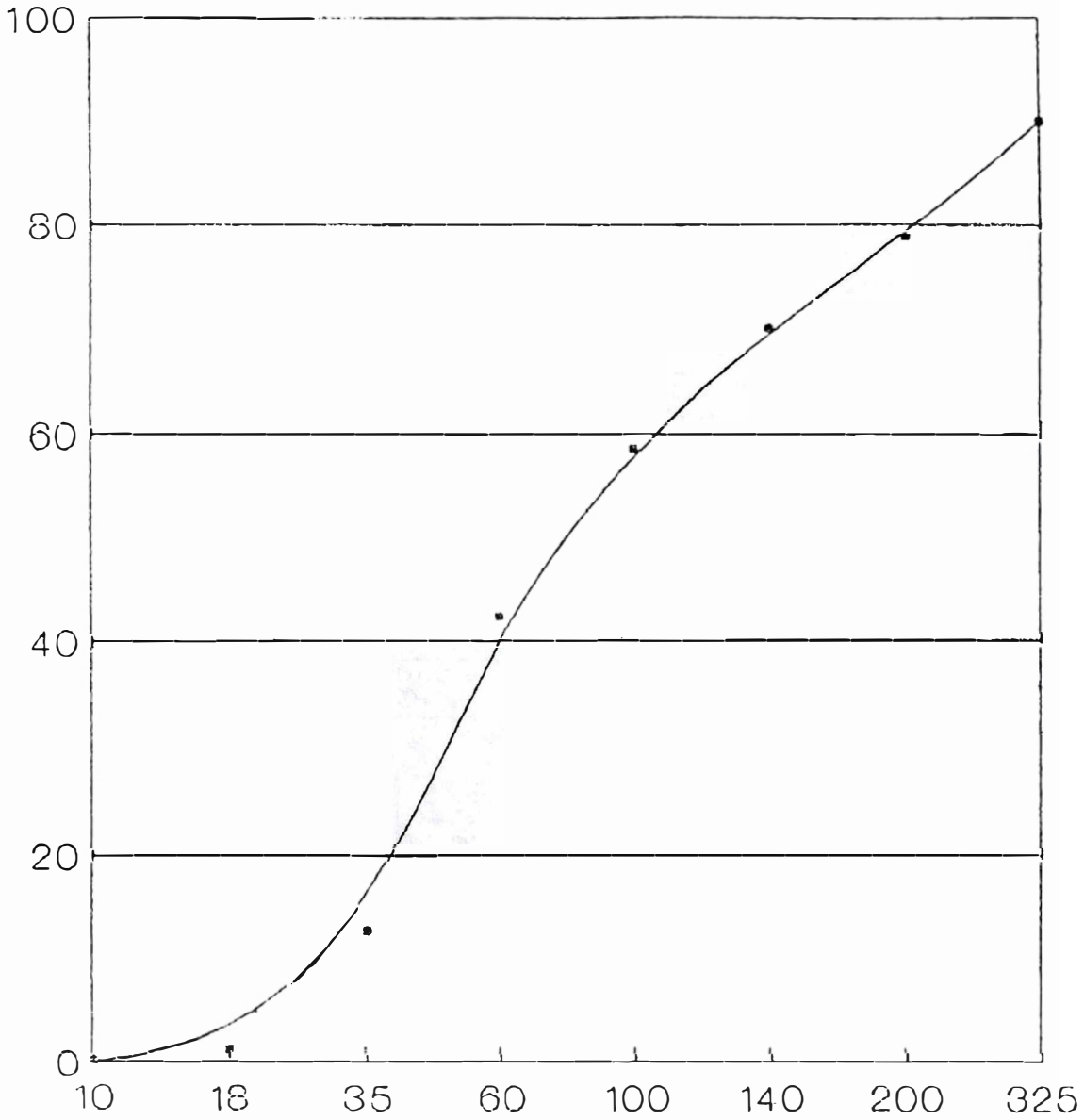


DIAGRAMA DEL ANALISIS GRANULOMETRICO DE TAMAÑO DE TAMIZ CONTRA EL PORCENTAJE ACUMULADO EN CADA MALLA.

TABLA 3: DISTRIBUCION DEL FOSFORO DE ACUERDO AL TAMAÑO DE PARTICULA

TAMIZ Nº	ABERTURA TAMIZ (µm)	P ₂ O ₅ (%)	PESO FRACCION (g)	P ₂ O ₅ (g)
14	1.40	17.0	1.0	0.17
20	0.85	18.8	3.5	0.66
40	0.425	20.1	18.8	3.62
60	0.250	21.0	25.0	5.25
120	0.125	18.0	23.0	4.14
170	0.090	19.0	10.6	2.01
230	0.063	17.2	7.5	1.29
Fondo	-----	15.0	11.4	1.71

tiempo de 12 horas. Una vez el material seco se homogeneizó, se pesó y se tomó muestra para análisis químico de fósforo.

Pensando que a escala industrial el proceso de secado es costoso ya que se debe realizar en horno rotatorio utilizando combustibles cuyo precio es relativamente alto, se sugiere el uso de ácido sulfúrico para acidular el concentrado húmedo después de quitarle el exceso de agua por decantación, tanto al concentrado como a la fracción de lodos cuyo contenido de fósforo también es apreciable (alrededor del 17.0% en P₂O₅).

Al realizar la acidulación se presenta un secado espontáneo en un tiempo de doce horas a la vez que se realiza una transformación del fósforo a fósforo soluble y resultando por consiguiente un producto de buena efectividad agronómica (Figura 3).

Utilizando 178 gramos por tonelada de mineral tratado de aceite de pino, se obtiene la mejor recuperación de fósforo en un valor de 73.54% y un contenido del 32.13% de fósforo en el concentrado.

3.4. ENSAYO A ESCALA PILOTO

Utilizando los mejores valores de las variables obtenidas a escala de laboratorio, se realizaron ensayos en la celda de 50 kilogramos de capacidad, fabricada con el propósito de comprobar en este trabajo, la validez del estudio a escala industrial.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios por cuanto se pudo comprobar la repetibilidad a escala industrial de los datos alcanzados a escala de laboratorio.

Las condiciones experimentales fueron las siguientes:

Silicato de sodio:	500 gr/ton.
pH del deslame	9.0
Tiempo del deslame	5 minutos
Aceite de pino	178 gr/ton.
Acido oléico	1250 gr/ton.
pH de la flotación	9.0

Se puede ver en la Tabla 10 que se necesitan 2.12 toneladas de mineral para obtener una tonelada de concentrado, teniendo en cuenta que la muestra cruda tiene 18.8% y el concentrado tiene 30.8%.

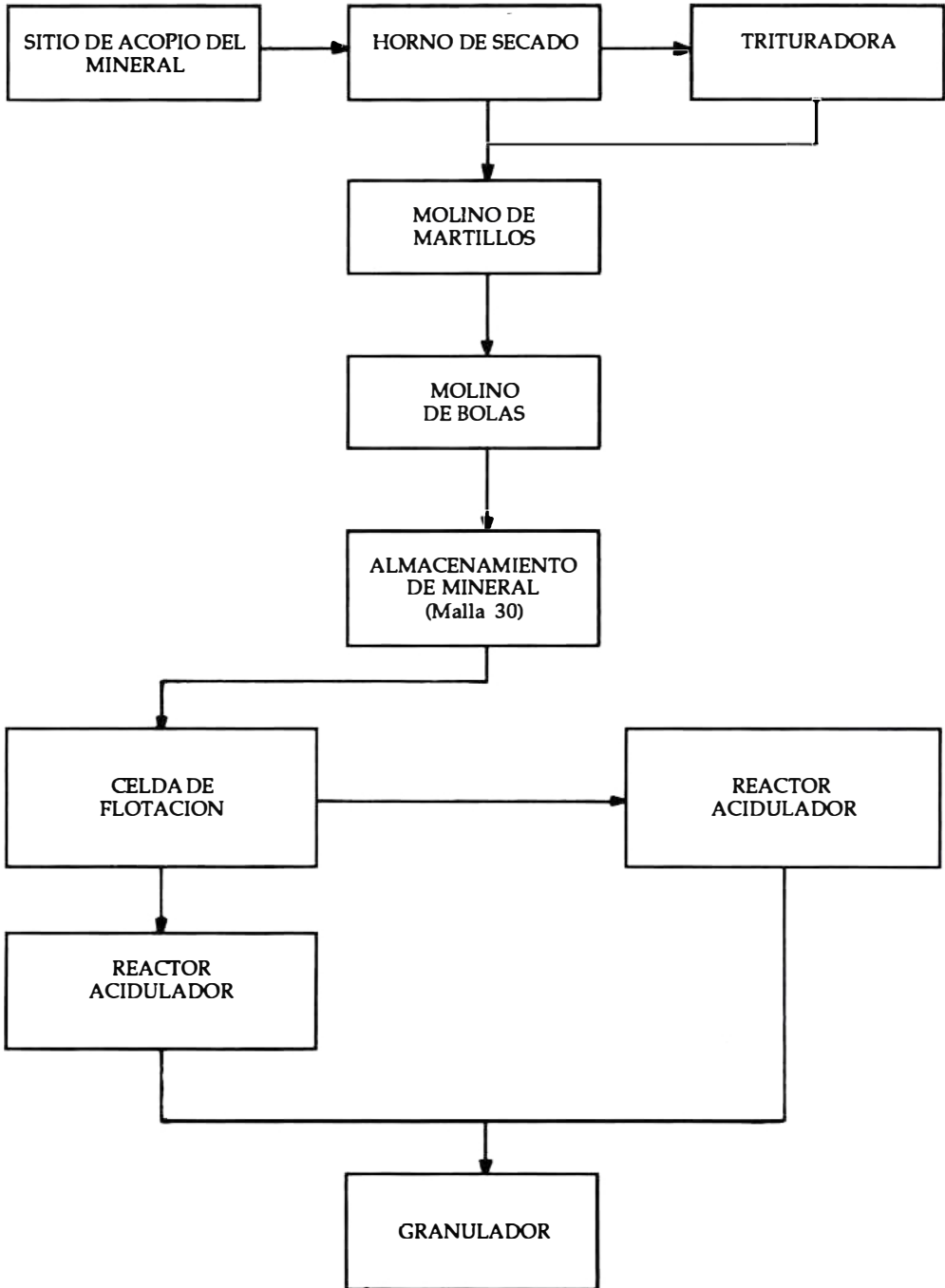


FIGURA 3: DIAGRAMA DE FLUJO DE MOLIENDA, CONCENTRACION Y ACIDULACION DE LA ROCA FOSFORICA

TABLA 4: VARIACION DEL TIEMPO DE DESLAME

ENSAYO N°	TIEMPO DE DESLAME	CONCETRANDO		COLAS		LAMAS		RECUPERACION (%)
		% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
27	3'	19.20	29.11	30.20	13.20	23.61	18.10	29.88
28	5'	49.20	32.61	29.60	10.40	15.11	17.20	85.79
29	7'	25.11	30.60	28.10	14.60	20.14	17.14	41.09

Con un tiempo de deslame de 5', se obtiene la mejor recuperación del fósforo con un valor de 85.79% y un contenido de fósforo de 32.61%.

TABLA 5: VARIACION DEL pH EN EL DESLAME

ENSAYO N°	DESLAME		CONCENTRADO		COLAS		LAMAS		RECUPERACION (%)
	g/ton	pH	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
23	0.0	5.95	45.00	31.82	22.32	5.03	21.08	12.06	76.57
24	450	7.50	46.00	30.90	19.54	12.69	21.22	17.20	76.01
25	900	9.00	52.10	30.91	22.60	20.10	17.88	11.14	84.44
26	3.600	10.90	44.00	33.00	26.92	18.14	19.86	10.11	77.64

Al variar el pH en el deslame se obtiene la mejor recuperación de fósforo a un pH de 9.0.

TABLA 6: VARIACION DEL SILICATO DE SODIO (DEPRESANTE)

ENSAYO N°	ACONDICIONAMIENTO g/ton	CONCENTRADO		COLAS		LAMAS		RECUPERACION (%)
		% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
12	0.00	43.00	32.20	23.76	14.21	19.54	17.01	74.04
13	500	48.60	30.13	18.24	8.10	16.60	18.04	78.30
14	1050	42.80	32.13	23.00	12.20	28.00	18.08	73.54
15	1500	22.40	33.04	47.46	7.60	19.26	16.56	39.58
16	2100	20.54	34.20	48.96	16.50	15.00	17.04	37.56

En el ensayo realizado con quinientos gramos por tonelada de silicato de sodio, se encontró la mejor recuperación del fósforo con un 78.30% y un grado de 30.13% de fósforo en el concentrado.

TABLA 7. VARIACION DEL ACIDO OLEICO

ENSA- YO Nº	ACONDI- CIONA- MIENTO g/ton	CONCENTRADO		COLAS		LAMAS		RECU- PERA- CION (%)
		% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
8	500	6.8	30.15	64.76	10.10	19.48	6.85	10.96
9	750	5.6	31.20	60.84	8.01	16.08	16.97	9.34
10	1000	35.2	32.10	34.30	7.52	23.00	17.90	60.42
11	1250	48.0	33.40	22.90	6.71	20.20	18.60	85.73
12	1750	31.6	30.20	32.60	6.08	16.90	15.85	51.03
13	2000	54.8	27.15	18.60	6.10	17.20	18.78	79.56

El mejor valor en cuanto a recuperación del fósforo, corresponde al ensayo en el cual se utilizó una cantidad de 1250 gramos /ton de ácido oléico (reactivo colector).

TABLA 8: VARIACION DEL pH DE FLOTACION

ENSA- YO Nº	pH	CONCENTRADO		COLAS		LAMAS		RECUPERACION (%)
		% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
5	5.0	0.0	0.00	70.0	13.10	17.8	19.14	0.00
6	6.0	37.0	36.10	33.6	7.50	19.4	13.10	71.43
7	7.0	22.4	24.72	47.6	8.91	18.0	17.57	29.61
8	8.0	18.2	32.44	39.6	10.11	27.6	18.52	31.57
9	9.0	42.8	32.13	23.0	12.20	28.0	18.08	73.54
10	10.0	34.6	33.06	39.6	10.90	15.8	18.04	61.17
11	11.0	30.0	33.37	30.0	8.70	18.1	17.63	53.53

Al variar el pH de la flotación se encontró el mejor valor en cuanto a recuperación del fósforo a pH 9.0, con una recuperación de 73.54%.

TABLA 9: VARIACION DE LA CANTIDAD DE ESPUMANTE (ACEITE DE PINO)

ENSA- YO Nº	ESPU- MANTE ACEITE DE PINO g/ton	CONCENTRADO		COLAS		LAMAS		RECU- PERA- CION (%)
		% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	% peso	%P ₂ O ₅	
1	0.0	17.48	32.50	57.34	14.80	14.56	18.14	30.38
2	356	28.00	34.30	41.62	9.15	11.60	19.17	51.03
3	220	18.60	32.60	49.82	8.01	13.08	20.16	32.43
4	178	42.80	32.13	23.00	12.20	28.00	18.08	73.54

Utilizando una cantidad de 178 g. de aceite de pino por tonelada de mineral tratado, se obtiene la mejor recuperación de fósforo en un valor de 73.54% y un análisis en el concentrado del 32.13% en P₂O₅.

Los resultados obtenidos fueron:

pH del deslame: 9.0
Tiempo del deslame: 5 minutos.

TABLA 10: RECUPERACION DEL FOSFORO

Producto	%	P ₂ O ₅ %	Recuperación %
CABEZA	100	18.8	30
CONCENTRADO	47.25	30.8	77.4
COLAS	23.26	7.7	9.5
LAMAS	21.10	17.70	19.0

4. ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio granulométrico, entre las mallas 40 y 150 de la serie U.S Standard se encuentra un 70% de fósforo. Desde el punto de vista económico esto es importante, pues se establece que no hay necesidad de moler el mineral a un tamaño de partícula demasiado fino. Además es este rango de tamaño de partícula donde el proceso de flotación es más efectivo pues las partículas gruesas con un diámetro de un milímetro son muy pesadas y no suben a la espuma; de otra parte las partículas muy finas, aquellas que pasan la malla 150 consumen demasiado reactivo a causa del aumento de la superficie total de contacto (Gráfica 2).

De acuerdo con los resultados experimentales se encontró una recuperación del fósforo del 85% con un tenor del 32% en P₂O₅ en el concentrado; las condiciones óptimas del proceso de flotación son las siguientes:

Aceite de pino: 178 gramos por tonelada de mineral tratado.
pH: 9.0
Silicato de sodio: 500 gramos por tonelada de mineral tratado.
Acido oléico: 1250 gramos por tonelada de mineral tratado.

En cuanto al rendimiento o eficiencia del proceso, los resultados en cuanto a recuperación y grado de P₂O₅ en el concentrado son buenos, si se tiene en cuenta que los concentrados obtenidos por flotación en los Estados Unidos (Florida) y que son comercializados a escala mundial poseen 32% en fósforo.

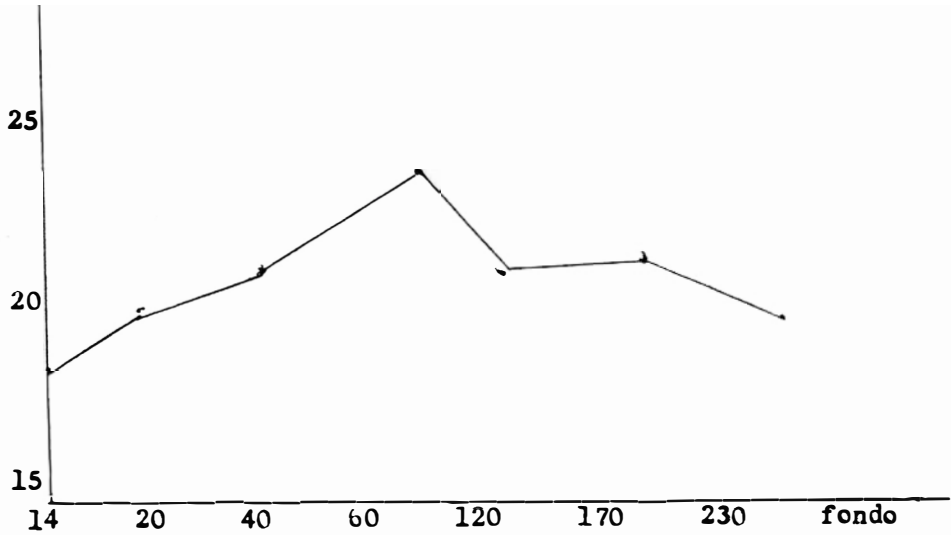
Se establece que a medida que aumenta el fósforo en las fracciones, aumenta también el fósforo soluble en citrato de amonio neutro en las fracciones (Gráfica 3), aspecto que es importante desde el punto de vista agronómico, pues a mayor fósforo soluble mayor efectividad agronómica.

Siendo la operación de secado tanto de los concentrados como de los lodos costosa debido al alto precio de los combustibles utilizados para tal efecto, se recomienda el proceso de acidulación mediante el uso de ácido sulfúrico produciéndose en esta forma un superfosfato, el cual es una mezcla de sulfato de calcio y fosfato monocálcico. Debido a la formación del sulfato de calcio se produce un secado espontáneo, a la vez que se obtiene el fosfato monocálcico que es altamente soluble y por consiguiente de una efectividad agronómica excelente (Figura 3).

De acuerdo con los ensayos que se realizaron para observar la variación del número de flotaciones de limpieza o de refinación del primer concentrado (gráficas 4 y 5) se establece que con la primera flotación se obtiene el mayor porcentaje de recuperación del fósforo y el menor grado de fósforo en el concentrado a la vez que a mayor número de operaciones de refinación, mayor es el grado del concentrado; es así que con la cuarta operación se obtuvo un concentrado del 43% en fósforo pero con una recuperación baja por lo cual se demuestra lo antieconómico que es

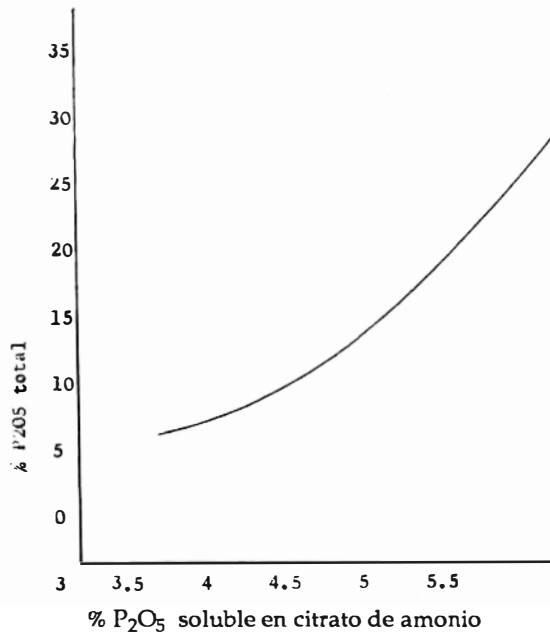
GRAFICA 2

CURVA DE PORCENTAJE DE P₂O₅ EN FUNCION DEL NUMERO DEL TAMIZ



GRAFICA 3

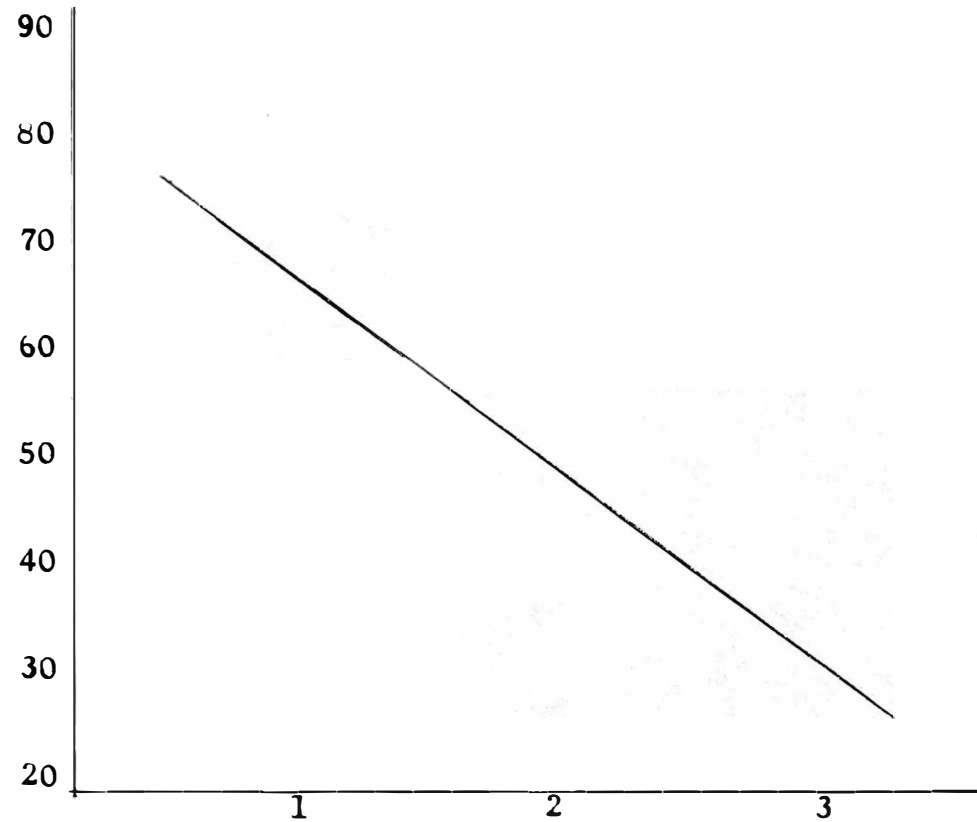
RELACION DE P₂O₅ TOTAL Y P₂O₅ SOLUBLE EN CITRATO DE AMONIO NEUTRO



Relación entre el P₂O₅ total y el fósforo asimilable determinado como fósforo soluble en citrato de amonio correspondiente a colas, lodos y a concentrados con grado de P₂O₅ total.

GRAFICA 4

CURVA DE RECUPERACION EN FUNCION DEL NUMERO DE FLOTACIONES DE LIMPIEZA

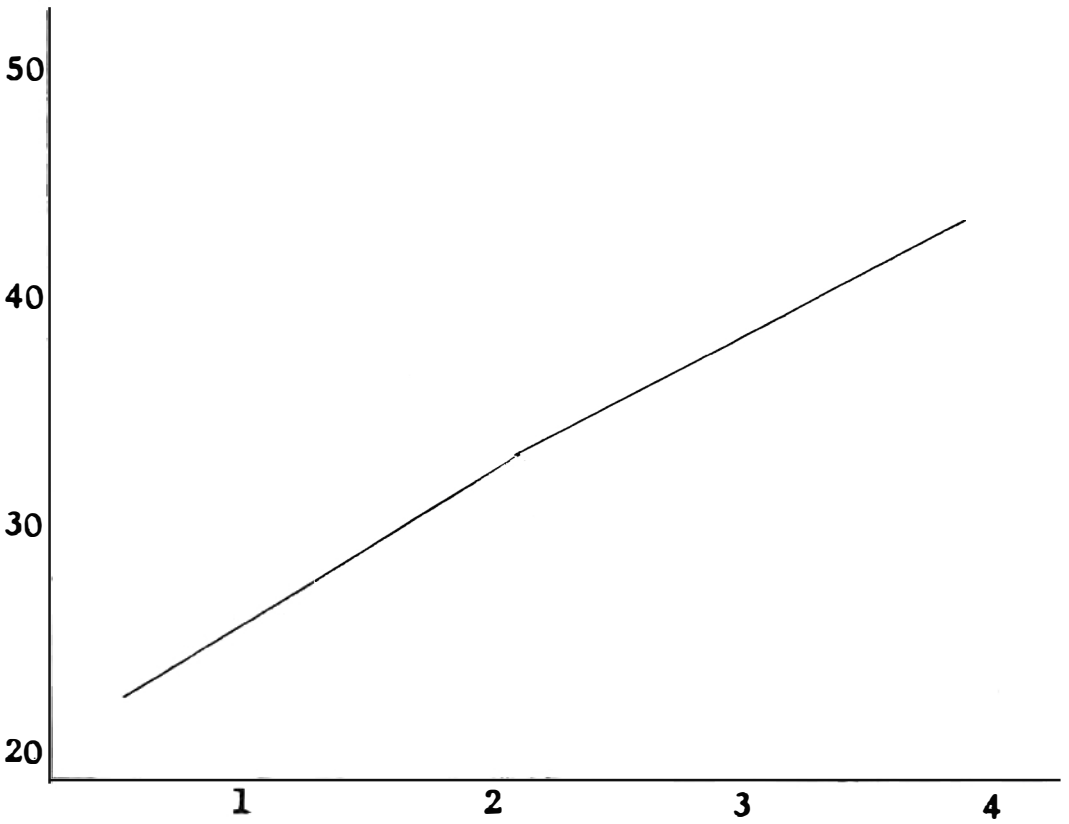


Número flotaciones de limpieza

—●— **% de recuperación**

GRAFICA 5

VARIACION DEL ENRIQUECIMIENTO DE P_2O_5 EN FUNCION DEL NUMERO DE FLOTACIONES DE LIMPIEZA



Número flotaciones de limpieza

—●— % de P_2O_5

realizar más de tres operaciones de limpieza.

Respecto a la rentabilidad del proceso se establece que, teniendo en cuenta el porcentaje de recuperación del 85% para obtener una tonelada de concentrado del 32%, se requieren 2.2 toneladas de mineral del 18% en fósforo cuyo costo de explotación, trituración y molienda está alrededor de \$18.000 a precios actuales y el precio de los reactivos de flotación para estas mismas 2.2 toneladas de mineral está alrededor de \$6000; entonces se tiene un costo total de \$24.000 por tonelada de concentrado del 32%. En la actualidad el

precio de una tonelada de roca fosfórica con el 20% en fósforo es de \$30.000, pero al ser este concentrado de 32% su valor aumenta proporcionalmente de acuerdo al contenido de fósforo por lo que se espera tenga un valor de \$45.000, lo que representa una rentabilidad del 80%, la cual se considera buena.

Finalmente se concluye que utilizando el proceso de beneficio por flotación de roca fosfórica, se pueden aprovechar los recursos que el país tiene de este mineral, en especial los localizados en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá donde la agricultura es intensiva.

5. BIBLIOGRAFIA

AMERICAN CYANAMID COMPANY, 1986. *Mining Chemicals. Hand-Book.* N.Y.

CHIEN, S.H., 1979.- *Dissolution of phosphate rocks in acid soils as influence by nitrogen and potasion fertilizers.* Soil science 127.

CORNEILLE E., MASSON, A., 1973.- *Cours de Mineralurgie et Preparation des minerais.* Editions Deroux. Liege.

HENDRICKS, S. B. HILL W.L. et al., 1931.- *Structural Characteristics of apatite - like substances and composition of phosphate rock and bone as determined from microscopical and X-ray diffraction examinations.* Industrial and Engineering Chemistry. Vol 23, Nº 12.

INTERNATIONAL FERTILIZER DEVELOPMENT CENTER, 1976.- *Technical Studies of Upgrading and Utilization of Pesca and Sardinata ores.* Preliminary draft of final report, U. S.A.

MARTINS, J., MARQUEZ, E., 1983.- *Characterization of Brazilian Phosphatic Rocks, Present and Future Perspectives.* Primera Conferencia Latinoamericana de Roca Fosfórica. Cochabamba.

MONTAÑA, G., 1989.- *Roca Fosfórica.* Bol. Colombia Minera, Ecominas, Bogotá.

MOJICA, P., 1987.- *Fosfatos.* Tomo II, Recursos Minerales de Colombia. Ingeominas, Pub. Geol. Esp. Nº 1. Bogotá.

SAINT, R., 1979.- *Stituation actuelle et possibilites generales de la valorisation des minerais phosphates a gangue carbonaté.* Seminaire sur la valorisation de roche phosphat. Universidad de Cagliari. Cagliari.

- STOWASSER, R., 1980. *Phosphate Rock*. Bureau of Mines Bulletin 671, Washington, D.C.
- TAGGART, A., 1945.- *Handbook of mineral dressing*. John Wiley and sons, Inc. N.Y.
- ZAMBRANO, F., MOJICA, P., 1991.- *Exploración de Roca fosfórica en los municipios de Nuevo Colón, Turmequé y Ventaquemada (Boyacá)*. Ingeominas, Bogotá.