



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

“DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE
FLOTACION DE ARENAS DE PLAYA CON
CONTENIDOS DE ZIRCON CROMITA E ILMENITA,
CONSIDERANDO EL POTENCIAL “Z”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA

P R E S E N T A N :

CHIU VERGARA ABDIEL GUSTAVO
GARCIA ALMONTE FELIX ALBERTO



MEXICO, D. F.

1986



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA

FACULTAD DE INGENIERIA

Dirección
60-I-176

Señores CHIU VERGARA ABDIEL GUSTAVO Y
GARCIA ALMONTE FELIX ALBERTO.
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección, propuso el Profr. Ing.- Víctor Manuel López Aburto, para que lo desarrollen como tesis - para su Examen Profesional de la carrera de INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA.

"DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE FLOTACION DE ARENAS DE PLAYA CON CONTENIDOS DE ZIRCON CROMITA E ILMENITA, CONSIDERANDO EL POTENCIAL "Z"

- I GEOLOGIA GENERAL.
 - II SISTEMA DE MINADO.
 - III FENOMENOS DE SUPERFICIE.
 - IV DISEÑO DE EXPERIMENTOS.
 - V ESTUDIO DE MERCADO.
- BIBLIOGRAFIA.

Ruego a ustedes se sirvan tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberán prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Coordinación de la Administración - Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., Agosto 26 de 1985.
EL DIRECTOR

Dr. Octavio A. Rascón Chávez

OARCH'MRV!gtg

I N D I C E

Pag.

RESUMEN	i
INTRODUCCION	ii

Definición de Objetivos

- a.- Determinación de la Influencia del Potencial Z en la Flotación de Zircón, Cromita e Ilmenita.
- b.- Determinación de los Colectores más adecuados para la Flotación.
- c.- Perspectivas de Viabilidad Económica.

Capítulo I.

GEOLOGIA GENERAL	1
1.1.- Localización	1
1.2.- Vías de acceso	1
1.3.- Clima	2
1.4.- Ocurrencia del Depósito y Características Mineralógicas	2
1.5.- Génesis	3
1.6.- Muestreo y Reservas	5

Capítulo II.

SISTEMA DE MINADO PROPUESTO	10
2.1.- Infraestructura	10
2.2.- Alternativas de Minado Propuesto	11
2.3.- Sistema de Minado Hidráulico con Dragas	11
2.4.- Sistema Cargador Frontal Camión	15
2.5.- Sistema con Bandas Transportadoras	18
2.6.- Conclusiones y Recomendaciones	19

Capítulo III.

FENOMENOS ELECTRICOS DE SUPERFICIE	21
3.1.- Antecedentes Históricos	21

3.2.- Doble Capa Eléctrica	22
3.3.- Teoría del Potencial Z	33

Capítulo IV.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS	38
4.1.- Análisis Granulométrico	38
4.2.- Análisis por Microscopía Óptica de Polarización	41
4.3.- Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido	52
4.4.- Análisis por Espectroscopía de Absorción Atómica ...	56
4.5.- Métodos por Vía Húmeda para Determinación de Zr, Cr y Ti	59
4.6.- Determinación Experimental del Potencial Z	64
4.7.- Diseño de Pruebas de Flotación	70
4.8.- Discusión de Resultados Metalúrgicos	87

Capítulo V.

ESTUDIO DE MERCADO	89
5.1.- Usos	89
5.2.- Consumo y Demanda	92
5.3.- Cotizaciones	107
5.4.- Perspectivas de Mercado	108

Conclusiones Generales y Recomendaciones	111
--	-----

Bibliografía

RESUMEN

Desde el punto de vista técnico se hace un análisis del método de explotación más adecuado para este tipo de yacimiento. El método que se propone es el de Dragado Hidráulico con dragas de succión.

Dada la importancia que revisten estos minerales en la industria nacional se realiza un breve sondeo de las condiciones de mercado para el zircón, cromita e ilmenita.

El objetivo de este estudio se dirige fundamentalmente a la optimización de los parámetros de flotación, para la obtención de concentrados de zircón, cromo y titanio, provenientes de arenas de playa.

Considerando los componentes minerales de las arenas, así como las características físicas de las mismas, se decidió dividir la investigación en dos etapas: una primera etapa dirigida a la obtención de un concentrado bulk y depresión de óxidos de hierro; la segunda, con el propósito de obtener concentrados individuales de Zr, Cr y Ti.

En la primera etapa de flotación se hizo énfasis en colectores del tipo sulfonatos y ácidos grasos, por ser los que presentan mejor ángulo de contacto en óxidos y silicatos; entre estos se utilizaron los siguientes: aeropromotor 825, petróleo ligero, ácido oleico y oleato de sodio. Para la depresión de óxidos de hierro se seleccionó al almidón como depresor.

Utilizando los reactivos mencionados y del balance metalúrgico se observó que las mejores pruebas de flotación resultaron ser la FD - 10 y la FD - 17, cuyas leyes y recuperaciones son respectivamente: 10 % de Cr, 9.80 % de Ti y 52.93 % de Zr y recuperaciones de: 48.64 % de Cr, 47.62 % de Ti y 66.80 % de Zr; 5.8 % de Cr, 16.0 % de Ti y 54.0 % de Zr y recuperaciones de 48.49 % de Cr, 50.55 % de Ti y 66.63 % de Zr.

Cabe de destacar que los resultados de esta primera etapa no llegaron a satisfacer los objetivos esperados.

La segunda etapa experimental no fue posible llevarse a cabo por la dificultad encontrada en la depresión de los óxidos de hierro.

Este trabajo intenta cuantificar la influencia y alcance del potencial zeta en la flotación de zircón, cromita e ilmenita; como una forma de optimizar el uso de reactivos en el proceso.

INTRODUCCION

En el golfo de México, específicamente en las playas de los estados de Tabasco y Campeche, se han localizado yacimientos de zircón, cromita y ilmenita asociados con magnetita, sílice y feldspatos, los cuales constituyen depósitos minerales de interés para su explotación económica.

La cuantificación de las reservas de estos depósitos fue realizada por Laboratorios Nacionales de Fomento Industrial (LANFI), a través de un muestreo en una extensión de 90 Km. que reportó leyes de laboratorio de zircón (ZrO_2): 67.2 % , cromita (Cr_2O_3) : 68.0 % , ilmenita (TiO_2) : 52.7% ; y un monto total de zircón de 39,533 T, cromita 49,212 T, e ilmenita 106,988 T.

Tomando en cuenta el potencial económico de estos yacimientos así como la necesidad de estos elementos en la industria siderúrgica y su gran perspectiva a corto y mediano plazo; el estudio del método de concentración por flotación y la consideración del potencial Z para la optimización del método, son los objetivos centrales de este trabajo.

Por las características mineralógicas de estos depósitos fue necesario dividir el estudio de la flotación en dos fases: la primera dirigida a la depresión de los óxidos de hierro y la segunda a la flotación selectiva de zircón, cromita e ilmenita.

Capítulo I.

GEOLOGIA GENERAL.

1.1.- Localización.

El mineral objeto de la investigación, se ubica en la costa del Estado de Tabasco, en donde se han detectado minerales de cromo (cromita: FeCr_2O_4); zircón (zircón: ZrSiO_4); ilmenita (FeTiO_3) y hierro en forma de magnetita (Fe_3O_4). El área de estudio se extiende a lo largo del litoral comprendido entre los $18^\circ 14' 00''$ a $18^\circ 26' 11''$ de latitud norte y los $93^\circ 08' 39''$ a $92^\circ 18' 56''$ de longitud al oeste del meridiano de Greenwich; desde la berma de Chiltepec en Tabasco hasta Punta Emiliano Zapata en el estado de Campeche. La distancia entre estos dos puntos es de aproximadamente 90 Km.

1.2.- Vías de acceso.

A estas playas se puede llegar por la autopista que parte de la ciudad de México, pasa por Puebla y continua con rumbo al estado de Veracruz, hasta llegar al poblado de Acayucan, en donde por la carretera federal N°180, se llega a la ciudad de Cárdenas en el estado de Tabasco, de donde es posible llegar a Chiltepec y a la barra del mismo nombre por la desviación que conduce a los poblados de Comacalco y paraíso. Regresando a Cárdenas y continuando por la carretera federal N°180 se llega a la población de Frontera en el mismo estado de Tabasco. En Frontera se puede abordar lancha que bajando por el río Grijalva a 9 Km se llega al mar, localizándose Punta Buey y Boquerón en la margen izquierda y derecha de la desembocadura del río respectivamente.

Para llegar a las playas, La Uvita y Emiliano Zapata, es preciso regresar a Frontera y tomar la carretera N°180 en donde a -- 14 Km más adelante, con rumbo a Ciudad Del Carmen se localiza la desviación a 50 m que baja a la playa La Uvita; siguiendo en la misma dirección y a 14 Km se encuentra la población de Nuevo Progreso, de donde parte el camino de 5 Km que conduce a Emiliano Zapata.

A 9 Km después se encuentra la pesquería Emiliano Zapata. En el mapa de la Figura N°1 se ilustra la localización de los lugares muestreados.

1.3.- Clima.

El clima en la zona de estudio es tropical húmedo. La ubicación en zona costera y la latitud del área de interés, posee altas temperaturas. Las medias anuales están arriba de los 25°C y son -- bastante uniformes como las que registran las estaciones de Villa Hermosa y Frontera; ésta última más cercana a la costa y con temperatura media anual menor a 1.6°C. La precipitación media pluvial - por año es de 1500 mm en el área específica de estudio, aumentándose hasta 5000 mm en las colinas del sur, con un doble máximo en el verano, observándose un tope en el mes de junio, seguido del máximo absoluto en el mes de septiembre. Después de la época de lluvias, la precipitación disminuye en abril. En la mayor parte de Tabasco la estación seca es relativa. Las precipitaciones menores se registran en los meses de marzo y abril (aprox. 30 y 40 mm) y -- más de 100 mm en las colinas del sur⁽¹⁾.

1.4.- Ocurrencia del depósito y características mineralógicas.

El depósito en estudio es del tipo de placer en arenas. Está formado por granos de tamaños irregulares que van desde 0.06 a 2mm, con variada composición mineralógica. La composición mineralógica y química de las arenas varía extensamente y depende más del número - y litología del área, que del clima ambiente, agente depositador o concentrador. En general, las arenas están constituidas por una mezcla de cuarzo, feldespatos y fragmentos de rocas⁽²⁾. Las especies - minerales y fórmula química se detallan a continuación:

Elemento	-----	Fórmula
Cromita	-----	FeCr_2O_3
Zircón	-----	ZrO_2SiO_2

Elemento	-----	Fórmula
Ilmenita	-----	FeOTiO_2
Magnetita	-----	Fe_3O_4
Granate	-----	$\text{FeMgAl}(\text{SiO}_4)_3$
Piroxenos	-----	$\text{Ca}(\text{AlOH})(\text{AlFe})(\text{SiO}_3)_2$
Cuarzo	-----	SiO_2
Espinel	-----	$(\text{Mg,Fe})(\text{Al,Cr,Fe})_2\text{O}_4$
Horblenda	-----	$\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg,Fe..})_4(\text{Al,Fe..})(\text{Si,Al})\text{U}_{11})_2$
		$(\text{UH})_2$
Hematita	-----	Fe_2O_3
Baddeleyita	-----	ZrU_2

1.5.- Génesis.

El origen primario de la ilmenita, zircón y cromita es producto de la actividad ígnea, fenómeno extensivo a la naturaleza primaria de las arenas. Una gran gama de depósitos de cromita deben su origen a la concentración magmática en rocas ultrabásicas⁽³⁾ (dunitas, peridotitas y serpentinas) donde guardan relación paragenética con minerales de platino⁽⁴⁾.

Las espinelas cromíferas constituyen la principal mena del cromo; éstas pueden encontrarse asociadas con aluminio (alumocromita) y magnesio (magnocromita)⁽⁵⁾.

Así también se localizan yacimientos de ilmenita producto de la concentración magmáticas en rocas eruptivas, (gabro, diaclasas, piroxenitas) y muchas más asociadas a la magnetita, como en rocas alcalinas. La ilmenita se encuentra también en mayor proporción en pegmatitas (sienitas) en paragénesis con feldespato, biotita e ilmenita - rutilo. En procesos hidrotermales (leucoxeno) y metasomático, en rocas ultramáficas en las cuales se han encontrado en combinación con sodio y fierro, formando cristales de acmita. Yacimientos de ilmenita de origen magmático son comunmente encontrados en tobas sílicas, con hidroxido de sodio, asociadas a plagioclasas, sanidina y magnetita.

Otros minerales de importancia económica y genética en el depósito tales como: zircón, feldespato y cuarzo, se derivan en su gran mayoría de la actividad ígnea. El zircón se presenta en cloritas, esquistos, gneiss, sienitas y granitos, así como en areniscas ferruginosas y pegmatitas, cuya descomposición constituye su principal origen, antes de ser explotados en placeres costeros. Es susceptible de encontrarse en rocas ígneas basálticas, en las cuales es mineral secundario. No existe en estado libre, encontrándose en menas poco abundantes como zircón y baddeleyita.

Respecto a los feldespatos, en su mayoría se originan de procesos magmáticos (procesos metamórficos o durante la consolidación o enfriamiento del magma)⁽⁶⁾. La formación proveniente de otros ambientes es escasa.

En general las rocas ígneas representan la fuente de más del 60 % de los feldespatos; de igual manera el cuarzo proviene de rocas plutónicas principalmente del granito; roca fuente de todo el cuarzo detrítico, está presente en casi todas las arenas y es el principal constituyente de todas las areniscas. Las rocas expuestas se supone sufrieron meteorización y posteriormente fueron transportadas por medios fluviales hacia el lugar del depósito.

Por los antecedentes geológicos, se infiere que los ríos Grijalva y Mezcalapa son portadores de la mayor cantidad de sedimentos del golfo de México⁽⁷⁾. Los ríos mencionados recorren una gran superficie que abarca parte de la república de Guatemala, los estados de Chiapas, Tabasco y parte del estado de Campeche. La concentración por la acción de las olas acumulan los materiales a lo largo de la costa⁽³⁾, clasificando los de mayor tamaño y peso en concentraciones locales, y dispersando los más ligeros y finos a lo largo de la costa. Estos fenómenos de concentración residual y mecánica dieron origen a los placeres de arenas negras. Consecuentemente las mareas, el oleaje y las corrientes marinas, se encargan de su distribución a lo largo de toda la costa del litoral.

La dirección del frente del oleaje presenta alguna variación durante el ciclo anual de noviembre a febrero, en que la dirección de las olas puede considerarse perpendicular a la playa y los siguientes ocho meses, se desvía hacia el oeste. Las aguas marinas que llegan al golfo de México provenientes del mar Caribe, entran a través del canal de Yucatán en donde la corriente se ensancha y se bifurca a medida que penetra en el golfo de México, originando una contracorriente que varía según la época climatológica del año. La mínima contracorriente es en primavera y se incrementa en verano obteniéndose el máximo en otoño, hasta empezar a disminuir levemente en invierno. La Fig. N°2 ilustra el sistema de corrientes marinas que hacen posible la concentración de minerales en las áreas mencionadas.

1.6.- Muestreo y Reservas.

Según estudio realizado por Laboratorios Nacionales de Fomento Industrial (LANFI), el muestreo se llevó a cabo durante un año, excepto los meses de septiembre y octubre cuando no es recomendable visitar las playas debido a las altas mareas y precipitaciones pluviales que se presentan. Se determinó tomar tres muestras transversales a la playa; una en la zona que limita la alta y la baja marea; otra en la duna o berma (aprox. a 10 m de la primera) y la tercera en donde comienza la vegetación comúnmente manglar o coccol, procurando que las tres muestras estuvieran en línea recta perpendicular a la orilla de la playa.

De cada una de las tres playas que constituyen el área en estudio; Chiltepec, Boquerón y Punta Emiliano Zapata, se muestrearon 5 Km en total espaciados cada 250 m.

De las playas Punta Buey y La Uvita, se muestrearon 4 Km cada una. En total, la longitud efectiva muestreada fue de 23 Km, lo que representa 90 Km de muestreo. El ancho promedio muestreado fue de 30 Km y la profundidad de 1 m.

También se tomaron muestras submarinas, hecho que aumentó el promedio mensual de muestras a más de 200.

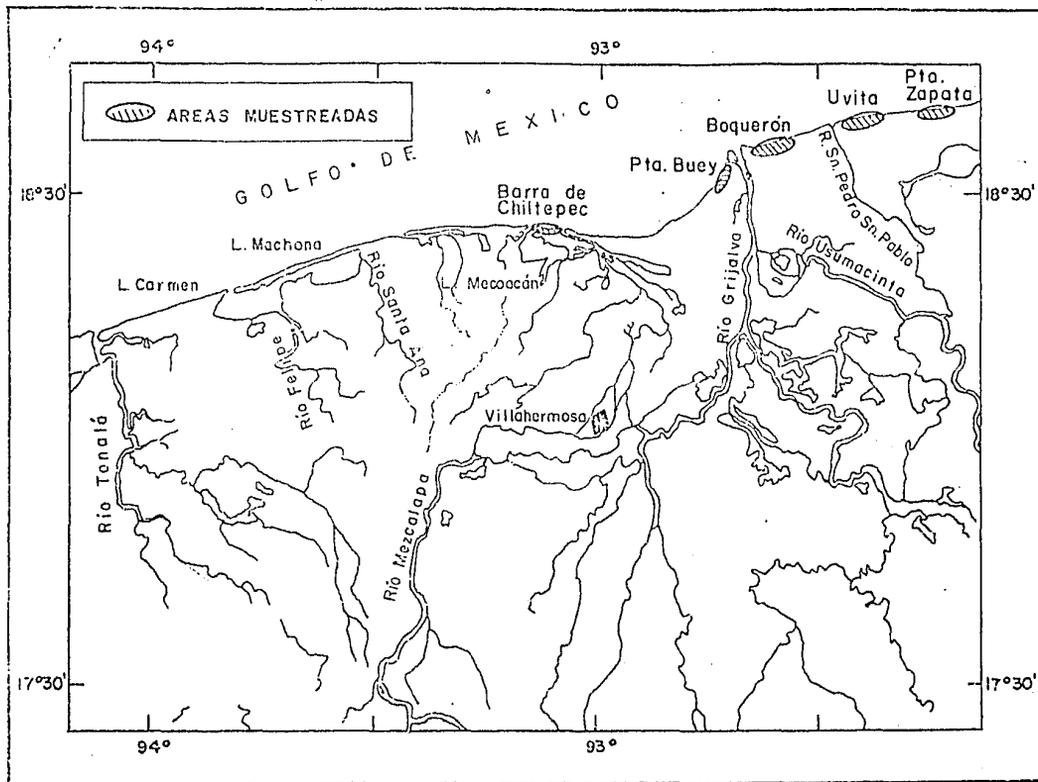


Fig. N° 1.- Localización de los Lugares Muestreados.

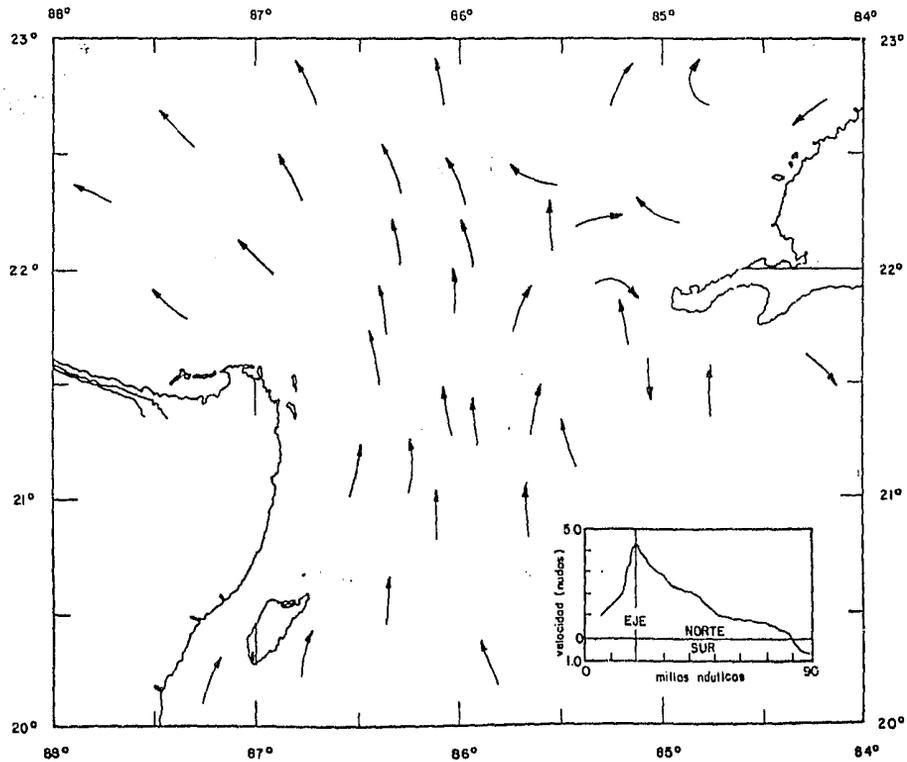


FIG. No. 2 SISTEMA DE CORRIENTES MARINAS EN EL GOLFO DE MEXICO

El método de muestreo más adecuado resultó ser el que se practicó con tubos P.V.C. de 4.5 cm de diámetro interno y 5 cm externo, introduciéndose este 1m en la arena, por golpes aplicados en la parte superior, interponiendo una tabla; este sistema es favorable ya que es rápido, económico y permite obtener un testigo de columna sin interrupción.

La cuadrícula se realizó transversalmente a la orilla de la playa, tomando muestras de tres en tres, una de cada zona. En la Fig. N°3 se ilustra el sistema de muestreo y en la tabla N°1 se observan los valores muestreados, realizados por LANFI.

Fecha	B. CHILTEPEC			PUNTA RUEY			ROQUEKON			LA UVITA			PURITA E. ZAPATA		
	Cromita	Zircón	Ilmenita	Cromita	Zircón	Ilmenita	Cromita	Zircón	Ilmenita	Cromita	Zircón	Ilmenita	Cromita	Zircón	Ilmenita
x/80	1,117.8	4,024.1	4,272.5	1,138.5	5,517.6	5,310.1	4,300.3	3,147.2	8,886.7	4,294.8	727.1	8,269.4	-	-	-
x11/80	671.5	2,118.1	3,581.8	1,187.8	1,994.1	2,635.7	3,897.0	1,863.0	1,179.0	2,210.4	5,581.3	10,867.8	2,514.2	4,181.7	6,311.8
I/81	458.6	2,276.1	3,316.9	2,080.8	1,574.9	3,190.6	7,691.3	3,942.0	7,310.9	3,559.9	5,378.5	7,360.5	1,530.4	2,556.4	5,685.7
II/81	850.7	575.5	2,068.3	1,254.8	2,750.6	3,589.9	3,144.4	2,857.8	3,615.5	2,465.2	909.1	6,723.9	1,596.0	1,159.2	6,081.6
III/81							2,034.9	4,215.2	7,763.4	1,222.0	2,678.4	3,967.4	529.9	629.3	3,576.9
IV/81	1,598.9	406.1	2,994.8	930.6	126.4	3,274.0	2,764.5	2,390.2	4,268.9	2,640.4	687.7	3,353.5	1,601.5	1,722.0	5,122.9
V/81	2,201.8	383.6	3,519.5	1,492.9	274.4	2,793.4	3,372.0	1,129.6	7,890.5	2,111.4	803.2	5,075.6	2,341.9	644.6	4,781.7
VI/81	1,654.6	295.0	2,765.0	1,671.6	444.4	3,326.4	2,793.2	747.6	1,923.6	2,925.6	607.0	2,847.1	1,646.4	114.8	3,378.4
VII/81	566.8	471.8	2,529.5	1,301.0	909.0	3,361.0	3,466.3	1,836.6	6,685.6	2,199.2	822.5	5,721.6	1,498.7	736.9	3,469.3
VIII/81	1,359.4	681.9	2,059.0	1,301.0	505.1	3,484.5	3,129.3	667.6	6,528.5	3,707.8	1,049.9	5,394.4	2,650.5	1,398.1	4,693.9
Prom. deca mens.	1,106.7	1,304.0	3,012.0	1,383.2	1,566.0	3,426.2	3,629.8	2,279.5	6,105.5	2,689.7	1,927.0	5,939.1	1,767.7	1,520.1	4,788.0
Sub. Total.	5,933.4	6,520.2	5,060.2	5,532.9	6,264.2	3,704.7	18,149.0	11,397.3	30,527.6	10,758.6	7,711.4	23,756.6	8,838.5	7,640.6	23,940.0

Totales: Cromita Zircón Ilmenita

49,212.5 39,533.7 106,988.6

Tabla N° 1 : Muestreo (Ton / Km - Lineal) *

* : Muestreo realizado por Laboratorios Nacionales de Fomento Industrial (LANFI).

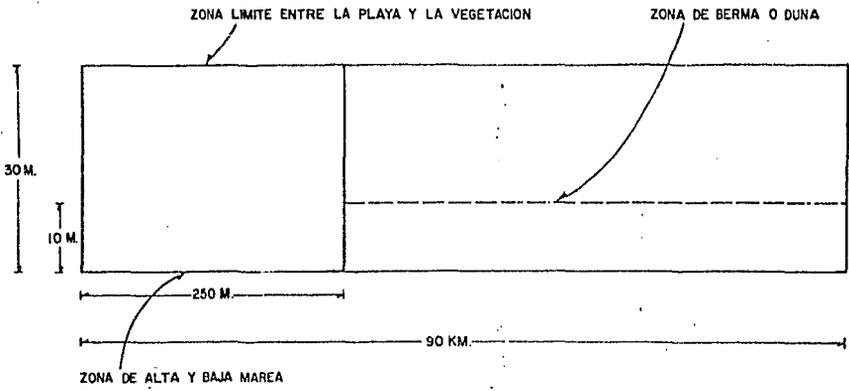


FIG. No. 3 CUADRICULA DE MUESTREO PARA UNA PLAYA

Capítulo II.

SISTEMA DE MINADO PROPUESTO-

2.1.- Infraestructura.

Las obras de infraestructura son necesarias en la explotación de un yacimiento, porque permiten un aprovechamiento óptimo de -- los recursos naturales y humanos, incrementan la eficiencia de la productividad y propician el mejoramiento de las condiciones en -- que se desenvuelve la población, elevando su nivel de vida.

Carreteras:

El estado de Tabasco, cuenta con una red de carreteras que cubre un total de 3083 Km de los cuales 1905 Km están pavimentados, 1399 Km revestidos y 279 Km son de terracerías; además de las brechas existentes y los caminos construidos por PEMEX. De la capital parten troncales que comunican con los municipios del Estado.

La carretera que parte de Cárdenas a Villahermosa y se dirige a Frontera con rumbo a Ciudad del Carmen con dirección occidente-oriental, emite caminos de terracería que llegan a los lugares -- muestrados. Todo el Estado está comunicado por sistemas fluviales que se han ido demeritando por la construcción de carreteras.

De igual forma el puerto de cabotaje que se ubica en Frontera ha caído en desuso por la expansión de las carreteras.

Energía Eléctrica:

La red de electrificación que alimenta el estado de Tabasco -- proviene del sistema oriental del que forma parte la presa de --- Netzahualcóyotl en Mal Paso estado de Chiapas; que alimenta a casi todo el Estado y permite que un 93 % de las localidades cuenten con fluido eléctrico. En Frontera, sitio cercano a las zonas muestradas se dispone de tendido eléctrico de la C.F.E.

Agua Potable:

El abastecimiento de las localidades del Estado, es proporcionado en un 87 % y 12 % por pozos y ríos respectivamente. Se almacena en tanques elevados y la distribución se hace por tuberías.

2.2.- Alternativas de minado propuesto.

La selección del método de explotación para un yacimiento determinado no es una empresa fácil, debido a los múltiples factores que determinan la elección más óptima. La selección del método más adecuado deberá considerar la naturaleza y características físicas del depósito, el monto de las reservas y sus leyes; y complementarse además con factores políticos, sociales y económicos.

Considerando criterios de orden técnico, se proponen como posibles alternativas de minado los siguientes métodos:

- Minado hidráulico con dragas.
- Sistema cargador frontal-camión.
- Sistema de bandas transportadoras.

2.3.- Minado hidráulico con dragas.

Este sistema consiste en preparar un canal de acceso al área de explotación, donde estarán dispuestas las dragas flotando.

El dragado se lleva a cabo por el efecto que realiza el cortador de la draga, elemento que está dotado de ágaves u hojas de acero cuya sección frontal se conforma de navajas con dientes adheridos a sus extremos, para la ejecución del corte. Véase Fig.Nº4.

El efecto del cortador se produce mediante un giro del cortador cuya dirección de acción es transversal al avance de la draga, tal giro permite hacer incidir los dientes sobre el material, el cual será succionado por la bomba principal de la draga, a través de la tubería de succión de la draga cuyo diámetro generalmente es mayor que el de la tubería de descarga, con la cual se conduce la pulpa hasta la zona de beneficio.⁽⁸⁾

El minado hidráulico con dragas requiere de equipo auxiliar -- (tractores, remolcadores y lanchas); así como de energía eléctrica indispensable para dar potencia a los sistemas eléctricos e hidráulicos de las dragas. La Fig.Nº5 ilustra las partes de éstas.

El procedimiento de explotación de un yacimiento por este método puede realizarse describiendo la zona de minado por lagos de explotación de dimensiones específicas, los cuales se irán explotando en lapsos determinados y orden sucesivo, en función del potencial del yacimiento.

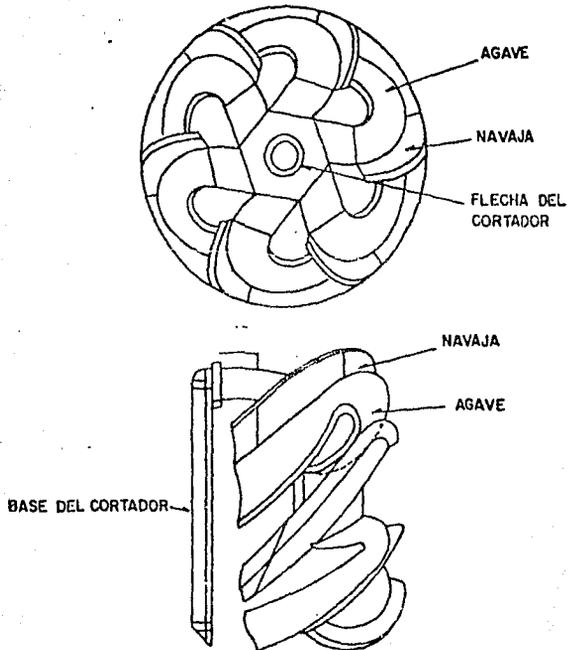


FIG. No. 4 CORTADOR Y SUS PARTES

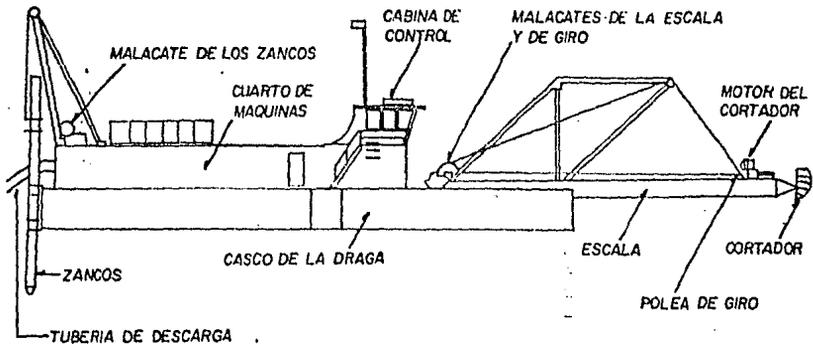


FIG. No.5 PARTES DE UNA DRAGA

En diversas operaciones de dragado, el beneficio del mineral se realiza en dos circuitos de flotación. Una flotación primaria en planta flotante y otra flotación secundaria en planta de tierra a la que llegan los concentrados a través de tuberías de descarga. La decisión de ubicar la planta de concentración metalúrgica cerca de la operación de minado obedece esencialmente a la optimización de los recursos.

Ventajas del método.

- Bajo costo de operación y mantenimiento.
- Alta productividad por hombre / turno.
- Disponibilidad inmediata del material.
- Alto grado de eficiencia bajo el nivel del mar comparado con otros sistemas.
- Eliminación de transporte convencional con camiones y/o bandas.
- Preparación de la zona de minado relativamente sencilla.

Desventajas del método.

- Alto costo de inversión inicial en equipo de dragas.
- Necesidad de energía eléctrica.
- Alto costo de mantenimiento en donde existe material competente.
- Reduce el tiempo efectivo de trabajo debido al estricto mantenimiento.
- A mayor profundidad decrece la capacidad del sistema.
- Poca experiencia en el manejo de este equipo en México.

Este método ha sido aplicado exitosamente en operaciones de minado sobre placeres de arena de playa, Así también encuentra aplicación en otros empleos marinos, canales de ríos anchos y profundos, excavación de canales, trabajos en mar abierto. De acuerdo a la experiencia en ingeniería minera se ha inducido que las capas de mineral pesado o competente dificultan la succión de las dragas⁽⁹⁾.

2.4.- Sistema cargador frontal-camión.

Los cargadores son equipo de excavación, carga y acarreo y por tal razón es más conveniente en algunos casos que la pala mecánica, pues con ésta es necesario el uso de camiones para el acarreo de material aunque sea para distancias cortas.

La movilidad de un cargador es importante en operaciones versátiles como las que se llevan a cabo en bancos de arena; por lo cual el uso de cargadores da soluciones modernas a un problema de acarreo y carga de materiales, con la finalidad de reducir los costos y elevar la producción.

Este sistema consiste en atacar el horizonte mediante pallas montadas sobre tractor cargador; o mediante ataque con cargador frontal.

El material removido puede depositarse en sitios específicos, en donde se cargará a los camiones. El arreglo de la pila de material puede realizarse con cargador frontal o con bulldozer.

Para una operación particular la selección del tipo de cargador, depende del tipo de material, las distancias medias de acarreo, la movilidad requerida en la obra y del tamaño de la operación.

Los parámetros de explotación en este tipo de operaciones son⁽¹⁰⁾

- tamaño de operación.
- tipos de terreno.
- sistema de transporte.
- distancia de acarreo.
- profundidad del corte.
- condiciones climatológicas.
- velocidad de producción de las unidades de acarreo.
- caminos y carreteras.

En explotaciones de arenas, en donde el terreno es suelto y el acarreo es corto, una operación flexible es necesaria, por lo que los cargadores frontales combinados con camiones proporcionan este requerimiento. Los cargadores pueden cargarse y transportar el material a su destino, es decir a la pila. Se utilizan en obras extensas para llenar grandes unidades de acarreo; así como en cante- ras chicas de baja producción, trabajos de contrato, remoción de encape donde la extracción es suave y amontonamientos.

Ventajas y desventajas que proporcionan los equipos de ataque, a- acarreo y transporte con cargador frontal.

Ventajas:

- manuables.
- accesibles.
- gran movilidad.
- versátil en el cargado, independientemente del cargado hacia arriba o hacia abajo.

Desventajas;

- alto costo unitario de operación.
- baja disponibilidad.
- vida corta (tres a cuatro años).

Camiones:

La selección del tamaño de un camión se determina por el tipo y tamaño del cargador, pero mayormente por la densidad del tráfico que se requiere para el tonelaje planeado; además debe considerarse la pendiente del camino.

Ventajas:

- muy populares.
- flexibilidad ^{de} maniobrabilidad.
- de fácil combinación con otros tipos de cargado, especialmente los de ciclos.

Desventajas:

- relativamente costosos al correr. Especialmente en áreas de alto costo de labor.
- no es adecuado para largas distancias.
- se incrementa la flotilla como se incrementa la distancia de acarreo y los costos pueden dispararse intensamente.
- el incremento de la producción puede indicar el uso de camiones grandes, para reducir el congestionamiento del tráfico.
- depende de combustible líquido, así como de alto consumo.
- el ciclo de tiempo debe ser riguroso con el propósito de optimizar su rendimiento.

Ventajas del Sistema:

- alta flexibilidad.
- bajo costo inicial.
- facilidad de traslado de un yacimiento a otro.
- adecuación de la producción a bajos y altos volúmenes.

Desventajas del Sistema:

- alto costo de operación.
- inflexibilidad en la utilización de la energía.

-limitada a corta distancia de acarreo.

Para el caso de yacimientos que están ubicados en líneas de costa; donde las excavaciones se realizan bajo el nivel del mar, los cambios de la presión hidrostática de la playa ocasionan la inmersión del agua a las áreas de trabajo de explotación, imposibilitando la operación de los equipos antes mencionados.

Deberá considerarse el tipo de suelo ya que los equipos podrán atascarse durante la explotación⁽⁸⁾.

2.5.- Sistema con bandas transportadoras.

Generalidades.

Este sistema se utiliza a menudo en operaciones en las que se manejan y transportan grandes cantidades de materiales en flujo continuo, tales como tierra, arenas, gravas trituradas, minerales, cemento, concreto etc.

La distancia de acarreo que puede cubrir una banda es variable ya que pueden ser desde distancias cortas hasta considerables, en algunos casos la distancia a la cual se transporta el material llega a ser de varias millas. En estos casos el sistema deberá consistir de un número de escalones diferentes, puesto que existe un límite de longitud máximo de la banda.

Las bandas pueden operar en diversos terrenos, siempre y cuando las pendientes y velocidades de acarreo se ajusten a las especificadas para el material transportado.

Este sistema es esencialmente el mismo del inciso 2.4 con la variante de que se transportaría el material a través de bandas transportadoras. A continuación se mencionan las ventajas y desventajas de acarrear material con este sistema.

Ventajas:

- Bajo costo de acarreo comparado con el camión.
- Puede utilizar combustible o energía eléctrica.
- Aplicable a operaciones que producen grandes tonelajes de mineral.
- Puede complementarse con otro sistema para llevar el producto a su destino.

Desventajas:

- Alto costo de instalación.
- La acción de la interperie y de animales salvajes podrían marginar la operación.
- Depende en gran parte de la densidad del material.
- El material suelto presenta dificultad para ser transportado mediante bandas.
- Menos flexible que el acarreo con camiones.

La distancia entre la zona de explotación y el presunto sitio de ubicación de la planta de beneficio, para este estudio particular nos lleva a desechar este sistema por las grandes distancias de acarreo del material.

2.6.- Conclusiones y Recomendaciones.

En este estudio se ha hecho una elección del método más adecuado, sobre la base de las consideraciones técnicas de las ventajas y desventajas de las alternativas propuestas, así como de las características particulares del yacimiento en estudio.

No se realizaron estimaciones de costos de producción o costos unitarios por tonelada de acarreo, ya que tales estimaciones serán objeto de un análisis riguroso de una evaluación técnico económica de las alternativas consideradas, las cuales al ser analizadas comparativamente arrojarán el sistema de explotación más apropiado para una operación.

En base a los comentarios anteriores y tomando en cuenta criterios estrictamente técnicos, se sugiere que el método de explotación más adecuado para el minado de estos yacimientos es el minado hidráulico con dragas de succión.

Capítulo III.

FENOMENOS ELECTRICOS DE SUPERFICIE.

3.1.- Antecedentes Históricos.

El potencial zeta constituye una herramienta útil para interpretar los mecanismos de adsorción de un surfactante en la superficie mineral; dentro del tratamiento de concentración de minerales, específicamente al utilizar el método por flotación, puede alcanzarse la optimización de este si se conocen las características interfaciales, que ocurren en el proceso. La cuantificación del potencial zeta, nos facilita detallar el conocimiento del mecanismo de reacción superficial en los sistemas minerales; por lo que es necesario conocer los fenómenos de la doble capa eléctrica, cuyos primeros estudios se remontan al siglo pasado con Helmholtz (1879) y Perrin (1904) quienes realizaron el primer modelo de distribución de exceso de carga (capa de carga- capa de contracarga)⁽¹⁾. A este modelo siguió el de Young (1910) y Chapman (1913) y posteriormente la modificación de este modelo de la doble capa eléctrica por Stern (1924)⁽¹²⁾. Para las mediciones del potencial zeta es indispensable una celda microelectroforética, así como el dominio de los fenómenos del movimiento osmótico; estudios relacionados, fueron realizados por Smoluchowski (1921)⁽¹³⁾ y Withe (1937). Sucesivamente se han presentado diferentes investigaciones relacionadas con otros parámetros de la flotación y el potencial zeta; como los de Laskowki y Pitcheun del ángulo de contacto en función del potencial zeta (1969)⁽¹¹⁾ y los relativos a los efectos de diferentes electrolitos sobre el potencial zeta (1949).

En México son casi inexistentes las investigaciones del análisis de minerales relacionados con el potencial zeta. En contraposición con países desarrollados donde es una herramienta comunmente utilizada.

3.2.- Doble capa eléctrica.

Para definir la doble capa eléctrica, es preciso introducir algunos conceptos sobre fenómenos debidos a los efectos electrocinéticos, tales como el potencial electroquímico, ionización, adsorción y disolución iones; es decir el total de los fenómenos de flujo interfacial y los asociados a la redistribución de carga.

El potencial electroquímico para un ión dado en solución está definido como la energía necesaria para transportar una carga desde el infinito a ese punto.

Spongamos que un medio material, por ejemplo una fase α ; la energía que desplaza la carga a través del medio, depende de las interacciones entre el medio α y la carga de la partícula,⁽¹¹⁾ esta energía se le conoce como potencial electroquímico.

El potencial electroquímico está definido por:

$$\bar{\mu}^{\alpha} = \mu_c^{\alpha} + Z_c e \phi^{\alpha} \quad \text{----- (1).}$$

donde:

μ_c^{α} = potencial químico y denota las interacciones no electrostáticas de la carga de la partícula en el medio.

$Z_c e$ = la carga llevada por la partícula.

Z_c = estado de oxidación.

e = unidad de carga electroquímica (1.6×10^{-19} C).

ϕ^{α} = potencial interno.

ϕ^{α} es una constante dentro de la fase α y es el trabajo realizado en transportar una carga al pasar de la interfase α /vacío.

entonces;

$$\phi^{\alpha} = \psi^{\alpha} + \chi^{\alpha} \quad \text{----- (2).}$$

donde:

ψ^{α} = potencial externo.

χ^{α} = potencial de superficie.

si sustituimos la ecuación 2 en 1, el potencial electroquímico resulta:

$$\bar{\mu}_c^\alpha = \mu_c^\alpha + z_c e (\psi^\alpha + \chi^\alpha) \quad \text{----- (3)}$$

donde:

ψ^α : potencial externo que denota el trabajo realizado para atraer una carga del infinito a un punto fuera de la interfase.
 χ^α : trabajo requerido para cruzar la capa del dipolo y es potencial de superficie.

IONIZACION.

Las sustancias adquieren un valor de carga eléctrica en la superficie al hacer contacto con un medio polar. La ionización, adsorción y disolución de iones son mecanismos que intervienen en el cargado de esta superficie; por ejemplo cuando una fase sólida está en movimiento tangencial relativo a una solución acuosa, resulta importante el efecto que desempeña la superficie cargada sobre la distribución de los iones más cercanos a la superficie que están en el medio polar. Los iones de carga contraria son atraídos a la superficie y los de carga iguales son repelidos. El fenómeno de ionización está fuertemente ligado al pH de la solución. El pH al cual la carga neta en la solución es cero se le conoce como punto iso-eléctrico.

Este fenómeno más el movimiento térmico y la formación de la doble capa eléctrica, determinan la distribución de iones, resultando un equilibrio de iones contrarios sobre los iones iguales, distribuidos en el medio polar. Así la teoría de la doble capa eléctrica influye sobre la distribución de iones y la magnitud del potencial eléctrico que ocurre en la superficie cargada. El potencial de distribución a través de la interfase se establece por las solubilidades que disponen los iones y cationes en la diferentes fases.

ADSORCION.

La adsorción por un sólido es la captación de moléculas de la fase gaseosa o de una solución por la superficie de un sólido. Sucede cuando la superficie se carga con iones opuestos. La superficie en contacto con el medio acuoso frecuentemente estáⁿ negativamente más que positivamente; es precisamente por este hecho que los cationes están más hidratados que los aniones y tienden a permanecer en el medio acuoso, mientras que los aniones poseen la gran tendencia de ser adsorvidos. La adsorción puede ser física o química, la primera se efectua bajo condiciones adecuadas de experimentación y en ella operan fuerzas de atracción física o de Vander Waals entre el adsorvato gaseoso y el adsorbente sólido; la segunda sucede al formarse la superficie; en esta operan fuerzas químicas⁽¹⁴⁾, al incrementarse la solubilidad del mineral y la duración de su contacto con el agua, aumenta el valor de la adsorción de los iones que determinan el potencial, en este caso puede tener considerable valor la adsorción física. La adsorción de intercambio iónico se determina principalmente por las fuerzas electrostáticas, la concentración y dimensión de los iones. La adsorción de los iones en silicatos y óxidos puede ser descrita con la ecuación de Freunlich⁽³⁷⁾ que determinan al potencial.

$$\tau = Kc^{1/n} \quad \text{----- (4).}$$

$$\tau = a + b \log c$$

donde:

τ = adsorción de iones en mol-cm⁻².

c = concentración de iones en la solución en mol/l.

n = magnitud de la constante igual a 5-10.

K, a, b: constantes.

La magnitud del potencial en función de las concentraciones iónicas, está dado por la siguiente ecuación:

$$\psi_+ = K T / v e \ln C_+ / C_+^0 \quad \text{-----} \quad (5).$$

$$\psi_- = -K T / v e \ln C_- / C_-^0 \quad \text{-----} \quad (6).$$

donde: K es la constante de Boltzmann's.

T = temperatura absoluta en °K.

v = estado de oxidación.

e = carga eléctrica del electrón (1.6×10^{-19} Coulomb).

C_+ y C_-^0 = concentraciones al punto cero de carga.

DISOLUCION DE IONES.

Cuando una fase sólida está inmersa en una fase líquida se origina una transferencia de iones de la fase sólida a la fase líquida; la cual provocaría un exceso de cargas positivas en el líquido y negativa en el sólido. La disolución ocurre por el trabajo químico ($\psi^s - \psi^l$), que es proporcionado por el trabajo electrostático que desplaza un catión donde la carga positiva es mayor ($nF(\psi^l - \psi^s)$). La transferencia de iones se detendrá al alcanzarse un equilibrio termodinámico entre los trabajos químico y electrostático, este equilibrio puede expresarse matemáticamente así: ⁽¹⁵⁾

$$(\psi^s - \psi^l) = nF(\psi^l - \psi^s) \quad \text{-----} \quad (7).$$

donde:

n = estado de oxidación.

F = constante de Faraday (9.65×10^4 Coulomb/mol).

$(\psi^s - \psi^l)$ = trabajo químico.

$(\psi^l - \psi^s)$ = diferencia de potenciales electrostáticos entre las fases, producto de la transferencia de iones,

($\Delta\psi$).

A presión y temperatura constante el potencial químico (χ_q^1) es equivalente a :

$$\chi_q^1 = \chi_q^0 + RT \ln a \quad \text{----- (8).}$$

sustituyendo 8 en 7 se obtiene la conocida ecuación de Nerst:

$$\chi_q^0 + RT \ln a = nF (\psi^1 - \psi^s) \quad \text{----- (9).}$$

diferenciando ambos miembros de esta ecuación se obtiene:

$$d(\chi_q^0 + RT \ln a) = d [nF (\psi^1 - \psi^s)] \quad \text{----- (10).}$$

entonces:

$$RT d(\ln a) = nF d(\Delta\psi) \quad \text{----- (11).}$$

$$d(\Delta\psi) = RT / nF d(\ln a_{c_+}^1) \quad \text{----- (12).}$$

donde:

R = constante universal de los gases (8.314 Joul/mol-g).

T = temperatura absoluta en °K.

a = actividad del catión en la solución.

El trabajo inicial es igual a cero.

Una vez conocidos los conceptos anteriores se tiene la posibilidad de definir el concepto de la doble capa eléctrica.

La transferencia de iones de la fase líquida a la fase sólida da lugar a la formación de la doble capa eléctrica, conformada por el exceso de carga en la superficie de la fase sólida y las cargas de signo contrario que se extienden en la solución. La adición de un electrolito puede mantener la transferencia de cationes de la solución al sólido, pudiendo darse el caso de existir una concentración crítica de los iones determinadores del potencial superficial, ⁽¹¹⁾ en este caso no existirá exceso de cationes en la superficie del sólido con lo cual desaparecerá la doble capa eléctrica. Esta situación bajo la cual una medida de densidad de carga superficial da una carga neta cero se le conoce como punto de carga cero (PZC).

Para una mejor interpretación de la doble capa eléctrica en la Fig. N°6 se ilustra el modelo modificado de Stern, apoyado en Helmholtz y Gouy Chapman.

Stern propone en su modelo que la porción de la doble capa eléctrica-- que se extiende en la solución, esté constituida por una capa compacta localizada después de la superficie sólida y una capa difusa subsiguiente -- que se extiende hasta el infinito, donde el ordenamiento de los iones no-- existe.

El potencial se comporta en forma lineal en la capa compacta o plano de Stern, cuyo espesor es aproximadamente igual al radio medio de los iones hidratados que la componen y decrece logarítmicamente en la capa difusa de Gouy-Chapman, hasta un valor cero en la solución; su espesor está en función de la concentración iónica de la solución y es susceptible de desaparecer con una alta concentración iónica.

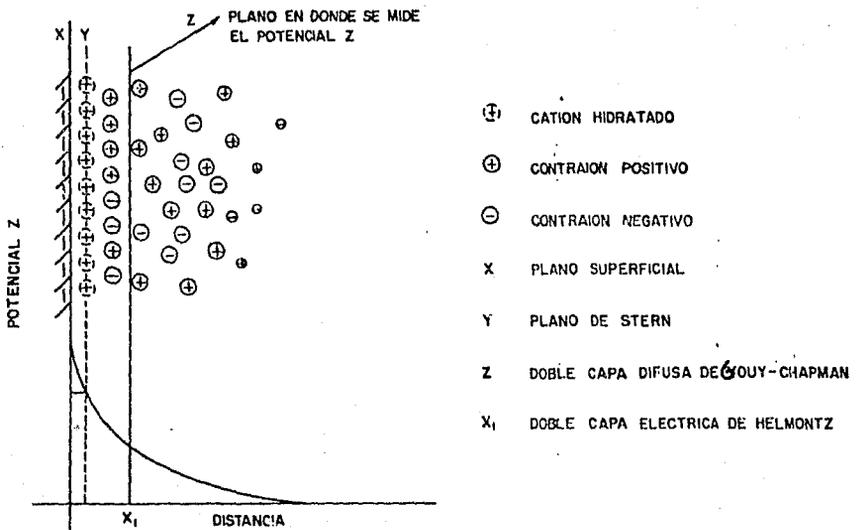


FIG. No. 6 DOBLE CAPA ELECTRICA DEL MODELO MODIFICADO DE STERN

El potencial dentro de la capa difusa es evaluado con la ecuación de Poissons,⁽¹⁵⁾ que relaciona la densidad de carga y el potencial¹¹:

$$d^2\psi / dx^2 = - 4 \pi \rho / D \quad \text{----- (13).}$$

donde:

ψ = potencial eléctrico.

ρ = densidad de carga volumétrica del medio.

D = constante dieléctrica del medio.

La ley de distribución exponencial de Boltzmann's⁽¹⁶⁾ se aplica para conocer la concentración de iones positivos y negativos dentro de la capa difusa⁽⁴⁰⁾.

$$n_+ = n_0 \exp. [- Ze \psi / RT] \quad \text{----- (14).}$$

$$n_- = n_0 \exp. [+ Ze \psi / RT] \quad \text{----- (15).}$$

donde:

n_+, n_- : número de iones negativos y positivos respectivamente por unidad de volumen.

n_0 : concentración de cada especie iónica en el seno de la solución.

Z : estado de oxidación.

e : carga del electrón.

$Ze \psi$: energía potencial.

ψ : potencial que depende de la densidad de carga de la superficie.

R : constante universal de los gases.

T : temperatura absoluta en °K.

El espesor de la capa difusa en función de la concentración se da en base a la ecuación de Gouy-Chapman⁽¹³⁾.

$$1/K = \left[\frac{RTD}{K T n^2 F^2 C} \right]^{1/2} \text{----- (16).}$$

donde:

K : constante de Boltzmann's ($K = e z e \psi / RT$)⁽⁴ⁿ⁾

C : concentración iónica en iones por cc.

1/K: espesor en cm.

T : temperatura absoluta °K.

F : constante de Faraday (g-mol de iones).

Por convención el potencial interno de la solución electrolítica es $\phi = 0$ ⁽¹¹⁾.

La razón entre la velocidad V y el potencial se define en(39).

El movimiento de una fase respecto a la otra bajo la aplicación de un potencial E, se explica matemáticamente así⁽¹³⁾: (ver esquema de caída de potencial a través de la doble capa).

$$E \rho dx = n \left(\frac{dV}{dx} \right)_{x+dx} - n \left(\frac{dV}{dx} \right)_x \text{----- (17).}$$

de otra forma:

$$E \rho = n \left(\frac{dV^2}{dx^2} \right) \text{----- (18).}$$

Según la ecuación de Poisson que relaciona la densidad de carga en función del potencial, para una dirección particular se obtiene:

$$d^2 \psi / dx^2 = - 4 \pi \rho / D \quad \text{-----} \quad (19).$$

despejando la densidad (ρ).

$$\rho = - (D / 4 \pi) d^2 \psi / dx^2 \quad \text{-----} \quad (20).$$

sustituyendo 20 en 18 :

$$d^2 V / dx^2 = - DE / 4 \pi n \cdot d^2 \psi / dx^2 \quad \text{-----} \quad (21).$$

integrando:

$$\int d^2 V / dx^2 \cdot dx = \int d / dx (dV / dx) dx \quad \text{-----} \quad (22).$$

$$= \int d (dV / dx) \\ = dV / dx \quad \text{-----} \quad (22').$$

$$dV / dx \Big|_x^a = - DE / 4 \pi n \cdot \left[d\psi / dx \right]_x^a \quad \text{-----} \quad (23).$$

con límites desde $x = x$ hasta $x = a$.

donde : $a =$ radio del capilar.

para $x = a$

$$dV / dx = 0$$

$$d\psi / dx = 0$$

entonces 23 se convierte a:

$$dV / dx = DE / 4\pi n \cdot d\psi / dx \text{ ----- (24).}$$

integrando desde $x = 0$ hasta $x = a$
se tiene:

$$\int dV / dx \cdot dx = DE / 4\pi n \cdot d\psi / dx \cdot dx \text{ ----- (25).}$$

$$\left[V \right]_0^a = DE / 4\pi n \left[\psi \right]_0^a \text{ ----- (26).}$$

Las restricciones para la ecuación 21 son:

$$\psi = \mathcal{V}$$

$$V = 0$$

$$x = a$$

$$\psi = 0$$

$$V = V$$

Finalmente se tiene :

$$V = ED\mathcal{V} / 4\pi n_0 \text{ ----- (27).}$$

despejando el potencial :

$$\mathcal{V} = \frac{4\pi n}{D} (V/E) \text{ ----- (28).}$$

D y n : son constantes.

V : velocidad electroforética (micras- seg^{-1}).

D : constante dieléctrica del medio (84.33).

E : potencial aplicado (volts/cm).

ρ : densidad de carga volumétrica del medio.

n : viscosidad del líquido (poises).

x : plano de corte.

\mathcal{Z} : potencial Z en mV.

3.3.- Teoría del potencial zeta.

Como se ha visto anteriormente el potencial z (\mathcal{Z}) está determinado por la concentración de iones en la solución. Para su cálculo se disponen de cuatro tipos básicos de efectos electrocinéticos; aunque hay que señalar que de la experiencia se ha observado que su valor absoluto no se conoce, excepto en el punto de carga -cero, que para el caso de la flotación de minerales es el punto -óptimo al cual el colector presenta su mejor adsorción a la partícula mineral, lo que posibilita optimizar cantidades, concentraciones de un colector en el proceso de flotación. Los efectos electrocinéticos son: flujo de potencial, electrofóresis, electroosmosis y potencial de sedimentación.

De estos efectos dos son de importancia en la concentración -de minerales, ellos son: flujo de potencial y electrofóresis.

Flujo de potencial.

El flujo de potencial está relacionado con la magnitud del potencial eléctrico inducido y generado por un flujo de líquido dentro de un capilar.

Electrofóresis.

La electrofóresis contempla la movilidad de una partícula coloidal cargada y suspendida en un electrolito al que es aplicado un gradiente de potencial.

La ecuación que define la movilidad electroforética está dada por:

$$m.e. = x / t \quad (10) \quad \text{-----} \quad (29).$$

donde :

t : tiempo en ms.

x : distancia entre electrodos. (μm).

10: factor de conversión.

Para el caso de la electrofóresis y la determinación del potencial zeta, es indispensable considerar las siguientes variables:

- tamaño de partícula y superficie.
- iluminación.
- medio.
- concentración de iones.
- constante dieléctrica.

Electro-osmosis.

Denota el movimiento de un líquido en un capilar o en un sistema de capilares bajo la aplicación de un potencial.

Potencial de sedimentación.

Determina la magnitud del potencial desarrollado bajo la influencia de la gravedad.

La cantidad de carga superficial en la fase sólida es función de los iones que se encuentran en la fase líquida; si se aplica una diferencia de potencial en una de las fases, sucederá que una de ellas se moverá con respecto a la otra hacia el polo opuesto - que se encuentra en su capa eléctrica; este es el potencial eléctrico de cizalla cuya magnitud se aproxima al potencial en el plano de Stern, cuando la concentración iónica es alta. De esta manera se puede medir el potencial zeta (ζ), conociendo la velocidad con que se mueve una fase respecto a la otra. Con la ayuda de un zetámetro y observando el efecto endosmótico en una celda electroforética, se puede determinar el potencial zeta, tal como se lleva a cabo en el laboratorio. La velocidad del líquido estará en función del potencial zeta calculado entre el líquido adyacente a la pared del capilar y el centro de la fase líquida (Fig. N°7).

Retomando la ecuación de Poisson (13), se tiene que para el fenómeno electroforético el potencial zeta se determina con la siguiente ecuación según Smoluchowski (1903)⁽¹¹⁾.

$$\zeta = 4\pi l / D E (\eta v) \text{ ----- (30).}$$

donde:

- E : potencial aplicado o flujo de potencial (volts/cm).
- v : velocidad electroforética de un coloide (micras-s⁻¹).
- l : distancia entre electrodos (μ m).
- n : viscosidad del líquido (poices).
- D : constante dieléctrica del medio (84.33).

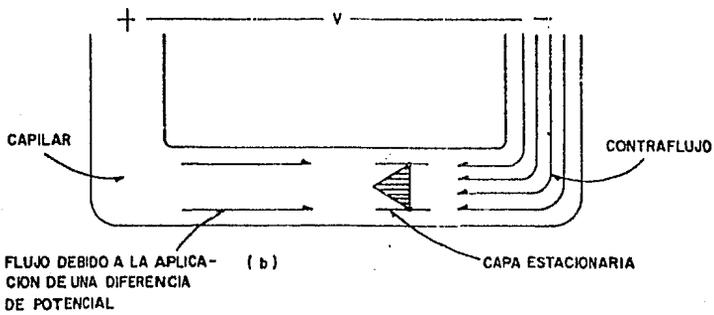
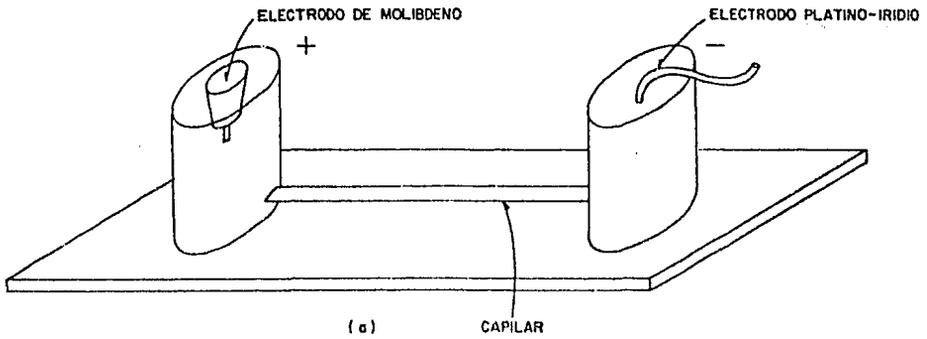


FIG. No. 7 EN (a): EL MODELO DE UNA CELDA ELECTROFORETICA.
 EN (b): EL ESQUEMA DEL FLUJO Y CONTRA FLUJO
 ORIGINADO EN EL CAPILAR POR LA
 APLICACION DE UN VOLTAJE.

Para el efecto del flujo de potencial, se tiene:

$$\mathcal{S} = E / P (\lambda/D)n$$

donde:

λ = conductividad.

P = presión aplicada al líquido.

D = constante dieléctrica del medio.

n = viscosidad.

\mathcal{S} = el potencial se da en mV.

Así considerando los criterios expuestos anteriormente, el potencial zeta corresponde al límite entre la solución que se adhiere a la superficie de la pared y la solución que puede moverse respecto de la pared o de la partícula. Este límite es el plano de corte - que separa la parte fija de la parte móvil de la doble capa eléctrica y se define como la diferencia de potencial que existe en el punto límite de la doble capa eléctrica o de Helmholtz con respecto a la solución⁽¹²⁾.

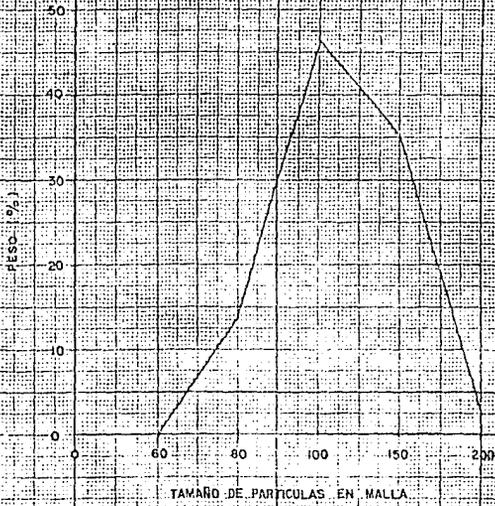
Capítulo IV.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS.

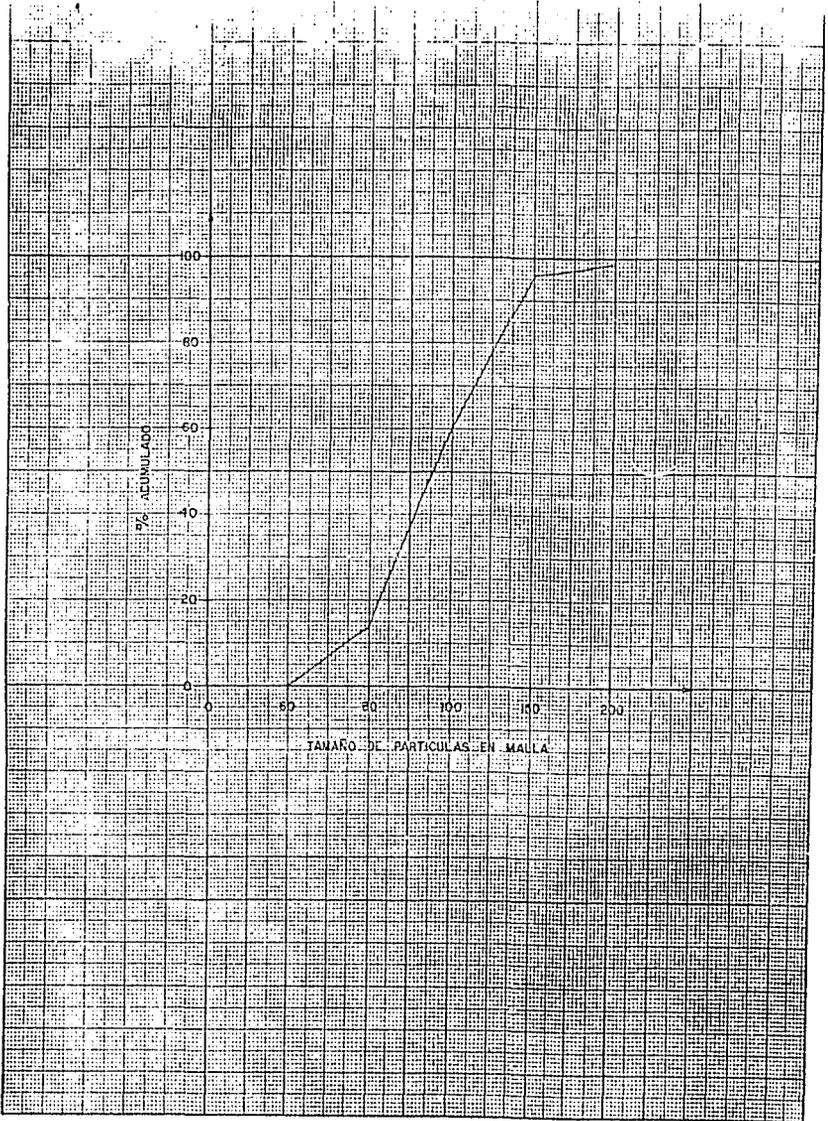
4.1.- Análisis Granulométrico.

El análisis granulométrico tiene el objeto de observar como se encuentran distribuidas las partículas minerales contenidas en las arenas detríticas. Para ello se efectúa un tamizado sobre las mallas 60,80,100,150 y 200. Utilizando 500g de muestra y un tiempo de 20 minutos, previamente cuarteadas, con lo que se obtuvieron -- los siguientes resultados.

Tamaño de malla	Peso(g)	Peso(%)	+ (%) Acumulado
+ 60	0.00	0.00	0.00
- 60 + 80	0.73	0.15	0.15
- 80 + 100	67.87	13.57	13.72
-100 + 150	235.66	47.13	60.85
-150 + 200	179.02	35.80	96.65
- 200	16.72	3.34	100.00
Totales	500.00	100.00	



GRÁFICA DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO



4.2.- Análisis por microscopía óptica de polarización.

Un análisis integral para la identificación de minerales a través de diferentes métodos, ya sean volumétricos, gravimétricos o -- por métodos espectroscópicos se complementan con métodos preliminares utilizados para la identificación microscópica de minerales. Los análisis con el microscopio estereográfico pueden proporcionar un sondeo macroscópico de las características físicas de minerales como son: color, lustre, brillo, fractura, color de rayadura y marca entre otras. Los análisis con el microscopio estereográfico proporcionan además una idea sobre la homogeneidad de la muestra, y facilitan la selección de partículas, con el objeto de moler la muestra para su estudio en el microscopio petrográfico de polarización.

Los análisis anteriores se complementan con los realizados con la técnica de microscopía óptica de polarización. Ambos métodos ayudan a conocer la historia petrogenética de las rocas, ya que ilustran sobre la composición mineralógica y la textura de la roca, fundamentales en el entendimiento de su génesis.⁽¹⁷⁾

El método de inmersión fundamenta su práctica en el hecho de sumergir un cristal en un líquido ideal, el cual debe reunir características especiales tales como: incoloro, poco tóxico y químicamente inerte. Su volatilidad y dispersión deben ser muy bajas, ángulo de contacto grande con el vidrio, para evitar que resbalen rápidamente sobre el porta objeto las partículas; además su influencia por la temperatura debe ser mínima, evitando así que el ángulo de refracción sea débil.

De los minerales del presente estudio, solamente el zircón y la magnetita, fueron minerales susceptibles de identificarse al microscopio de luz polarizada, ya que los otros elementos de interés es decir: ilmenita y cromita son minerales opacos, característica que sugiere la técnica de microscopía de luz reflejada.

A continuación se detallan las propiedades ópticas más investigadas a los minerales.

Propiedades ópticas de los minerales:

Una clasificación óptica de los minerales según su sistema -- cristalográfico los reúne en tres grandes grupos⁽¹⁷⁾.

-isótropos (los amorfos y la mayoría de los minerales del sistema -- cúbico).

-uniáxicos (los del sistema tetragonal y hexagonal; más fáciles de diferenciar y menos abundantes que los biáxicos).

-biáxicos (los del sistema rómbico, monoclinico y triclinico).

Esta clasificación no contradice al punto de vista que considera la velocidad con que la luz se transmite a través de un cristal para su clasificación en dos grandes grupos⁽¹⁸⁾:

-isotrópicos.

-anisotrópicos.

En los cristales isotrópicos la velocidad de la luz se propaga con igual magnitud en todas direcciones. Contrariamente en los -- cristales anisotrópicos, la velocidad de la luz varía según la dirección de propagación. A excepción de los cristales que pertenecen al sistema isométrico, todos los cristales son anisotrópicos. En medios anisótropos el ángulo que forman las direcciones de vibración y la dirección del rayo puede ser diferente de 90 grados. De la literatura se ha observado y comprobado con la experiencia -- que los cristales isotrópicos, vistos al microscopio con nicoles -- cruzados aparecen siempre extinguidos, esto se debe a la incapacidad de alterar la dirección de polarización de estos materiales.

Las propiedades de mayor importancia manejadas en microscopía óptica se enumeran a continuación:

-índice de refracción (método de la línea de Becke).

-figura de interferencia.

-birrefringencia.

-signo óptico.

- pleocroísmo.
- ángulo de extinción.

INDICE DE REFRACCION.

El índice de refracción(n) de una substancia particular puede definirse como:

$$n = c / c_m$$

donde: c y c_m simbolizan la velocidad de la luz en el vacío y en la substancia respectivamente.

El peso específico muy elevado y el índice de refracción también elevado, son propiedades físicas relacionadas.

El índice de refracción facilita la identificación de los minerales. Puede también proporcionar una idea aproximada sobre la identificación del mineral.

La determinación del índice de refracción se hace utilizando el método de inmersión de la línea de Becke. El cual se describe a continuación. La determinación experimental de este índice, para el zircón se expone más adelante.

Método de la línea de Becke.

El método consiste en que al estar inmersa una partícula en un líquido de índice de refracción conocido y observarse al microscopio, se notará una línea o aureola brillante, ésta línea está siempre más cercana al material que posee el índice de mayor refracción. Por lo que siempre se desplaza, cuando se mueve el microscopio por encima de la posición de enfoque hacia el medio que tiene el índice de mayor refracción. Esta línea que representa una concentración de luz como efecto de la reflexión o refracción, se le conoce como línea de Becke⁽¹⁹⁾.

La línea de Becke se atribuye a dos principios:

- Refracción de la luz en los bordes de la partícula.
- La reflexión total en los bordes de la partícula o ambas.

En el presente trabajo se determinó el índice de refracción del zircón, al desaparecer la línea de Becke.

Para partículas de ilmenita la línea de Becke no se observa debido a que es un mineral opaco.

Las determinaciones del índice de refracción hechos a las partículas y comparados con los líquidos se aproximaron hasta alcanzar el valor ya conocido en la literatura para el zircón. A continuación se detallan las sucesivas determinaciones:

De las tablas Hytenbogaardt⁽²ⁿ⁾ se presentan las siguientes características ópticas del zircón.

ZIRCON.

Fórmula química $ZrSiO_4$

Sistema cristalino Tetragonal

Color Descolorido a pálido en secciones delgada. (gris, blanco).

Forma Cristales prismáticos cortos. Series detriticas presentan variedad de formas desde redondeadas a euhédricas.

Exfoliación Ausente.

Birrefringencia Muy fuerte $E - W = 0.060$ a $.0062$
Intensa birefringencia y fuerte relieve son características en lámina delgada.

Angulo de extinciónParalelo.

Indice de refracción $n_z = 1.82$

Caracter óptico(+). Uniáxico.

Figura de interferencia.....Uniaxial. Puede ser difícil de obtener sobre cantidades de cristales de tamaño pequeño.

FracturaEl zircón se diferencia de la apatita por su birrefringencia fuerte y alto relieve.

Propiedades ópticas ensayadas al zircón.

Se observaron cristales amarillos presentando extinción paralela.

Indice de refracción del zircón	Indice de refracción del aceite
= 1.82	= 1.675 (la línea entra al cristal)
= "	= 1.685 "
= "	= 1.767 "
= "	= 1.785 "
= "	= 1.795 "
= "	= 1.780 "
= "	= 1.800 "

* : Para este valor del índice de refracción del líquido, la línea de Becke no se apreciaba, observándose una aureola casi violeta, semijimperceptible.

FIGURA DE INTERFERENCIA.

Al iluminarse un mineral con luz blanca y apreciarse entre nicols, cruzados aparece un color de interferencia. Estos colores son el resultado de la desigual transmisión de la luz en el cristal, de los distintos componentes de la luz. La existencia de colores de interferencia y las posiciones de extinción asociadas, cuando se gira la platina es una comprobación de anisotropía de los cristales.

La figura de interferencia se forma por rayos que se propagan a lo largo de diferentes direcciones dentro del cristal que se está observando. Al iluminarse un mineral la luz vibra en un solo plano, al salir del polarizador y chocar con la cara inferior del mineral se refracta en dos direcciones con planos de vibración perpendiculares entre sí, que se resuelven en un plano único, así que salen vibrando en un solo plano, pero conservando la diferencia de fase inicial debido a características específicas del mineral como su espesor, posición e índices ⁽¹⁸⁾.

Así los rayos ordinarios y extraordinarios cuando emergen del analizador están en situación de interferencia. Por ejemplo si observamos ciertos minerales como la calcita transparente en la dirección de su eje principal o eje óptico, la doble refracción no se notará; observándose anisotropía en cualquier otra dirección que es precisamente cuando la luz se refracta en dos direcciones perpendiculares, vibrando un haz normalmente al eje óptico (rayo ordinario) y el otro en un plano paralelo al mismo eje (rayo extraordinario). La diferencia de fases entre los rayos ordinarios y extraordinarios, después de su salida del cristal es proporcional al ángulo entre su trayectoria común y el eje óptico.

Cuando el microscopio trabaja como ortoscopio tenemos líneas de alta birrefringencia que se denominan isocromas o líneas de igual color. El microscopio de luz polarizada se ilustra en la Fig. N°8.

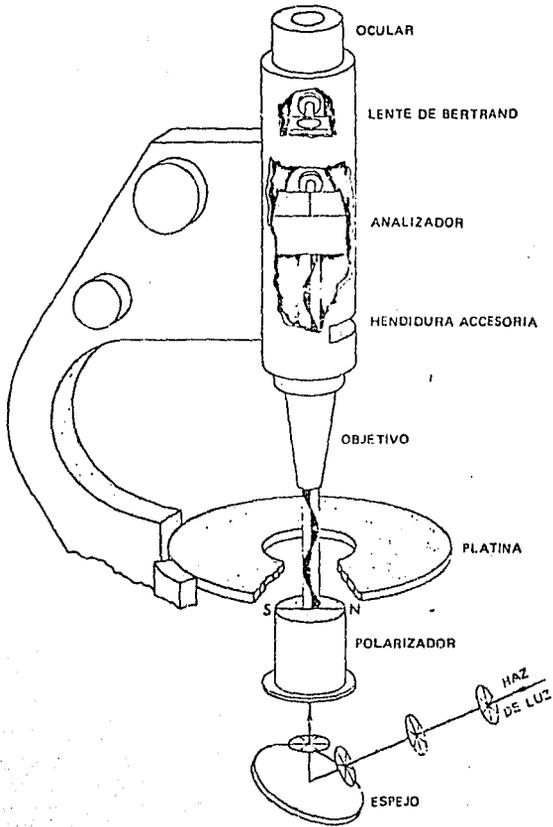


Fig. N°8.- Diagrama esquemático de la disposición de las partes más importantes de un microscopio polarizante.

En los cristales uniaxiales, la figura de interferencia consiste en dos barras negras que se cruzan formando una cruz gamada. Esta cruz es concéntrica con una serie de círculos de tal manera, que si la luz que se ha empleado para iluminar el cristal es monocromática, representan alternativas de oscuridad para dicha luz. A estos círculos que unen iguales colores de interferencia, se les llaman curvas isocromáticas o isocromas. El origen de las isocromas circulares se comprende fácilmente si se considera que una figura de interferencia se forma enfocando todos los rayos que se desplazan a lo largo de conos de igual retardo sobre el cristal. Una figura de interferencia puede interpretarse como una visualización de la intersección de estos conos con la superficie plana del cristal. La apariencia de una figura de interferencia uniaxial depende de la posición del grano con respecto al eje óptico.

-Perpendicular.

-Formando un cuadrado oblicuo paralelo al plano de la platina.

Determinación del signo óptico.

Para la determinación del signo óptico de un cristal uniaxial, se emplea la siguiente regla :

- 1.- Si la línea que une los cuadrantes donde hay sustracción, es perpendicular a la dirección N de la placa accesoria, formando un signo positivo imaginario, el cristal es de signo positivo.
- 2.- Si esta línea es paralela, el cristal es de signo óptico negativo (Véase Fig. N°9).

El signo óptico puede determinarse localizando los cuadrantes en los cuales se da la sustracción después de la inserción de un accesorio, cuya dirección N sea conocida. Para determinar el signo óptico de las figuras de interferencia no centrada, se requiere determinar si el rayo extraordinario es superior al rayo ordinario o viceversa.

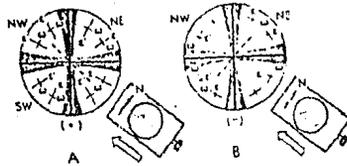


Fig. N°9.- Relación angular de las direcciones N del compensador y las vibraciones N y n (respectivamente representadas como líneas largas y cortas) de los rayos que emergen dentro de los cuatro cuadrantes en los cuales la cruz uniaxial divide la figura de interferencia. Los cuadrantes están marcados con las direcciones de la brújula que aquí se emplean para referirse a ellos. En (A) el cristal es positivo ($N = \epsilon'$, $n = \omega$); en (B) es negativo ($N = \omega$; $n = \epsilon'$).

Pleocroismo.

Una placa de cristal que gira un haz de luz polarizada, transmite diferentes colores según si la dirección del rayo extraordinario u ordinario es paralela a la dirección privilegiada del polarizador. Este cambio de color al girar el haz de luz polarizada se denomina pleocroismo.

Ángulo de extinción.

El ángulo entre las direcciones privilegiadas de una placa cristalina y cualquier propiedad cristalográfica presente en la placa, se denomina su ángulo de extinción. (Véase N° 10).

Las direcciones cristalográficas lineales pueden ser las líneas de intersección de una serie de planos de exfoliación con la placa cristalina, llamadas líneas de exfoliación.

En los cristales uniáxicos, sólo se observan dos tipos de extinción :

- Paralela.
- Simétrica.

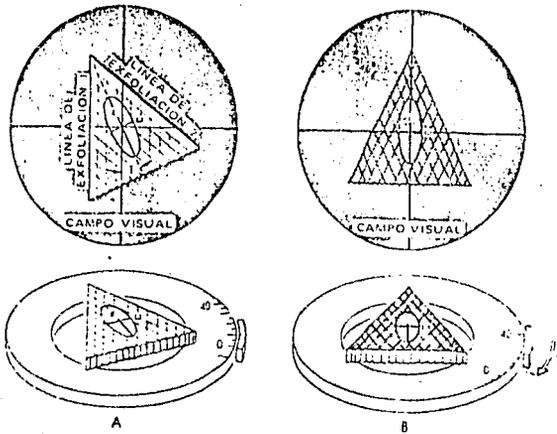


Fig. N° 10.- Medida del ángulo de extinción. (A) La platina se ha girado hasta que la dirección cristalográfica, línea de exfoliación 1 en este caso, queda paralela a la dirección privilegiada del polarizador, es decir, al hilo N-S del retículo. (B) Giro de la platina hasta un ángulo T necesario para que el grano quedara extinguido. El ángulo T es la diferencia entre las lecturas en (A) y (B):

4.3.- Análisis por microscopía electrónica de barrido.

Al interactuar los electrones con la materia, ocurren fenómenos electrónicos, entre los que se encuentran los de emisión de espectros de radiación electromagnética, entre los cuales se emite el espectro característico de rayos X. Los análisis de estos espectros se realizan entre otros métodos, con un detector de energía dispersiva dentro de la cámara de un microscopio electrónico de barrido.

Este método consiste en enfocar un haz de electrones, sobre un área muy reducida de la muestra cuya determinación ya sea cualitativa o semicuantitativa, alcanza partículas con diámetros de pocos micrómetros; con diámetros mínimos - analizables a 1 A° . Posteriormente se barre la superficie de la muestra, moviendo el haz y detectando en cada zona una intensidad promedio. Este análisis se conoce también como microsonda electrónica (Véase Fig. N°11).

Dado el complejo y vastísimo campo de la microscopía electrónica, a continuación se hace un esbozo general y descriptivo, de los fenómenos electrónicos, así como del uso del método de la microsonda electrónica dentro del análisis de minerales y su importancia en los procesos de concentración.

La técnica es de alta eficiencia, posibilitando gran cantidad de información en tiempos relativamente cortos.

La muestra es susceptible de ser analizada de manera puntual, por lo que requiere una preparación en capa conductora.

Al enfocar un haz de electrones sobre la muestra se produce una excitación de los átomos contenidos en ésta; la excitación por bombardeo con electrones es la utilizada en análisis de microsonda electrónica.

La excitación por bombardeo con electrón incidente provoca una vacancia de electrón en la capa K (Véase Fig. N° 12) (21).

Los fenómenos de emisión del espectro característico se explican en términos del modelo de la estructura atómica de Rutherford, según el cual los electrones circulan alrededor del núcleo del átomo, el cual se dispone en capas concéntricas (K, L, M, N, etc.), simulando un sistema planetario en miniatura, - donde la más interna de las capas corresponde a la capa K; el número máximo de electrones contenidos en una capa es variable y puede sucederse respectivamente en 2, 8, 18, etc.

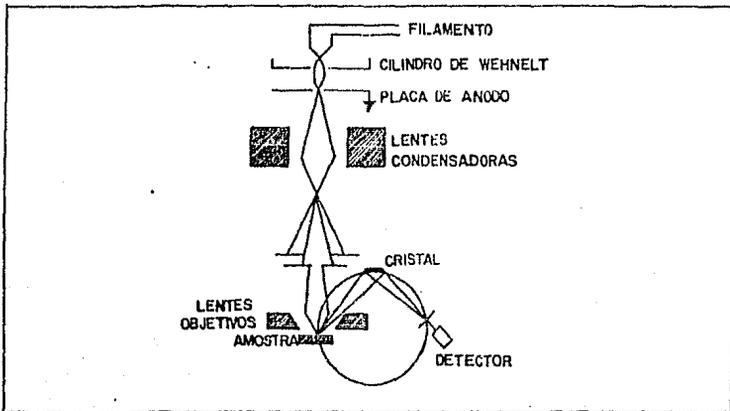


FIG. No. 11

DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UNA MICROSONDA ELECTRONICA

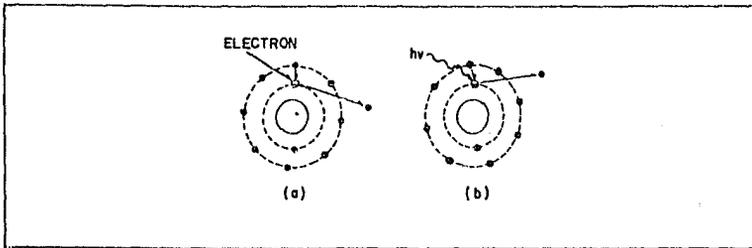


FIG. No. 12 METODOS DISTINTOS DE GENERACION DE RAYOS X.

EN (a) LA EXITACION RESULTA DEL BOMBARDEAMIENTO
POR ELECTRONES.

EN (b) LA ABSORCION FOTOELECTRICA RESPONDE AL
PROCESO.

La energía dispersada para lograr la emisión, es una función de la posición de las capas en la estructura, esta energía es mayor para el espectro de K (capa que está más próxima al núcleo), menor para L y aún menor para M. La emisión de electrones secundarios depende de la densidad y topografía del sólido⁽²²⁾. Tales líneas de emisión resultan de la transición entre electrones situados en niveles energéticos distintos dentro de la estructura atómica del elemento. La transición llega a suscitarse si la energía con que cuentan los electrones incidentes provocan la expulsión de otros electrones dispuestos más internamente, - si esto ocurre a su vez se presenta una vacancia en la capa K. El restablecimiento de las vacancias se debe a la migración de electrones de capas situadas más externamente.

A una transición acompaña una emisión de cuantos de energía, cuya radiación es equivalente a la diferencia de potencial existente entre los estados de ionización; la energía del fotón emitido presenta un valor de longitud de onda característico para cada elemento, dados los niveles estables de energía que ocupan los electrones en el interior del átomo.

Esta técnica exige de una minuciosa preparación de la muestra, como ya se había mencionado por su alta sensibilidad, ya que los vacíos así como otras anomalías, tal como las irregularidades en la topografía de la muestra se traducen en apreciaciones incorrectas del análisis.

A continuación se detallan las leyes reportadas del análisis con microsonda electrónica, realizada en el Laboratorio de La Comisión de Fomento Minero, Unidad Tecamachalco.

Elemento	Composición	%
Espínela	(Al, Cr, Fe)	15.25
Cromita	(Cr, Fe, Al, Mg)	13.55
Ilmenita	(Ti, Fe)	38.98
Hematita	(Fe ₂ O ₃)	11.86
Magnetita	(Fe ₃ O ₄)	6.78
Horblenda	(Si, Al, K, Ca, Fe)	5.08
Esfena(Joaquinita)	(Si, Ca, Ti)	3.39
Baddeleyita	(ZrO ₂)	3.39
Cuarzo	(SiO ₂)	1.72

4.4.- Análisis por espectroscopía de absorción atómica.

Las bases de la espectroscopía atómica, se fundamentan en las ideas revolucionarias de Max Planck (1900) sobre la emisión discontinua de la energía radiante en forma de cuantos, ⁽²⁴⁾ posteriormente ampliadas por Einstein y su teoría del efecto fotoeléctrico (1905) y mas tarde por Bohr para interpretar el espectro atómico del hidrógeno.

La espectroscopía es una extensa rama de las ciencias fisicoquímicas que se ocupa del estudio de los espectros. Este estudio, sumamente amplio comprende múltiples métodos encaminados a la obtención de espectros, su cuantificación y aplicación químicas de tipo analítico, hasta la interpretación teórica más profunda de la estructura molecular de la materia. Se conocen tres técnicas de espectroscopía atómica : emisión atómica, absorción atómica y fluorescencia atómica; cuya comprensión y aplicación requieren del conocimiento de la estructura del átomo, así como de los procesos atómicos involucrados en cada técnica. ⁽²³⁾

El átomo está circundado de electrones. Cada elemento consiste de un número específico de protones asociados al núcleo atómico, en estructura orbital única.

Los electrones ocupan posiciones orbitales ordenadas. El nivel más bajo de energía se conoce como nivel básico. Los sistemas microscópicos; átomos o moléculas sólo existen en ciertos estados llamados niveles de energía. Las transiciones entre dos estados de distinta energía, es decir, entre dos niveles de energía E_1 y E_2 propician la emisión o absorción de radiación. Los niveles de energía se relacionan íntimamente con la estructura interna del sistema; lo cual constituye el objetivo final de la espectroscopía.

Para el análisis por absorción atómica, se alinea un haz de longitud de onda conocida con la flama que se encuentra a una temperatura de 3500 °C y en la que se dispone eventualmente del elemento que se investiga. La radiación continua es producida por una fuente luminosa o lámpara cilíndrica de cátodo.

La proporción de radiación absorbida por la muestra se analiza en un espectrómetro en función de la longitud de onda o de la frecuencia.

La capacidad de un átomo para absorber varias longitudes de onda específicas de radiación se utiliza en espectrofotometría de absorción atómica.

El átomo absorbe la luz produciendo un estado de excitación que se conoce como absorción atómica.

Para la medición de la cantidad de radiación absorbida, una determinación cuantitativa de la cantidad del elemento presente puede hacerse.

El uso de fuentes de radiación del elemento que se va a determinar y una selección cuidadosa de longitud de onda, permite la determinación cuantitativa específica de elementos individuales en presencia de otros. La solución de la muestra es llevada a la flama a través de un capilar, donde la radiación se alinea hacia la flama celda, en la dirección del haz de luz. Muchos átomos se quedan en el estado básico de energía, donde son capaces de absorber luz de longitudes de onda de la fuente. La luz es lanzada sobre la flama celda que contiene los átomos en estado básico de energía; la intensidad de radiación inicial I_0 decrece por la cantidad de átomos concentrados en la celda; la luz luego entra al detector donde la intensidad I reducida es medida. La cantidad de luz absorbida proporcional es determinada por comparación con la intensidad inicial I_0 .

Varios términos se utilizan para definir la cantidad de radiación absorbida por el elemento que se investiga. La transmitancia es definida como el promedio de la intensidad final por la intensidad inicial:

$T = I / I_0$: Indicación de la fracción de la luz inicial que pasa a través de la celda y decae en el detector.

$\% A = 100 - \% T$: Porcentaje de absorción. Complemento en % de transmisión que define el porcentaje de luz inicial que es absorbida en la flama.

$\% I = 100 \times I / I_0$: Porcentaje de transmisión. (Transmitancia expresada en %).

$A = \log (I_0 / I)$: Absorbancia (cantidad matemática).

Ley de Beer = $A = abc$: Absorbancia. El término más conveniente para caracterizar la absorción de luz en absorción espectrofotométrica.

A : Absorbancia.

a : Coeficiente de absorción. Constante característica de las especies.

b : Longitud de la ruta de luz intersectada por la flama celda.

c : Concentración de las especies en la celda de absorción.

Esta última relación expresa que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de las especies.

Preparación de la muestra para lecturas por absorción atómica.

La cuantificación de una muestra mineral o concentrado por el método de absorción atómica presenta algunas ventajas entre las cuales la más significativa es el tiempo que se ahorra al realizar los ensayos, debido a la rapidez con que se hacen las lecturas por la naturaleza del mismo método. Sin embargo es importante señalar que es la preparación de la muestra, la parte del proceso que más dificultades presenta, llegando a convertirse en ocasiones en un problema tan difícil de resolver, que lleva semanas de rigurosa investigación en el laboratorio, para su preparación.

Esto sucede a veces cuando se trata de poner en solución materiales refractarios a los cuales los ataques normales con ácido clorhídrico, ácido nítrico, -- agua regia, etc. no logran solubilizar la muestra como sucedió con las arenas del presente estudio, por lo que se practicaron otras alternativas, tales como la fusión en mufla y horno infructuosamente. Finalmente la preparación adecuada de la muestra se logró por fusión en crisol de níquel, con mechero Fischer, agregando como fundente peróxido de sodio y sosa; y por otro método con peróxido y carbonato de potasio.

A continuación se describe la secuencia del ensayo:

Se molieron aprox. 5 g de mineral en mortero de ágata, se pesaron 0.25 g en balanza analítica y se fundió en crisol de níquel, utilizando mechero Fischer de altas temperaturas, alimentado con aire comprimido; se añadió 1.5 g de peróxido de sodio y carbonato de potasio respectivamente, como fundentes; una vez fundida la muestra se solubilizó con ácido clorhídrico diluido en proporción de dos a uno; finalmente se filtró en caliente y se aforó a 500 ml, quedando preparada la muestra para su cuantificación por absorción atómica.

De los elementos ensayados por absorción atómica, sólo el titanio y el cromo fueron susceptibles de cuantificarse por ésta -- técnica. El zircón no fue posible valorarlo por este método, se supone que interferencias de otros elementos impidieron el ensaye.

Los métodos de valoración del Zr, Cr y Ti, por vía húmeda se exponen a continuación.

4.5.- Métodos por vía húmeda para la determinación de Zr, Cr y Ti.

Determinación de Zircón (método ácido mandélico).

Procedimiento:

Se pesan aprox. 0.5 g de muestra a -100 mallas y se pasa a un crisol de níquel; como fundente se usa peróxido de sodio (8 a 10 g), también se puede usar como fundente carbonato de sodio.

La masa fundida se pasa con todo y crisol a un vaso de 500 ml - 100 ml de agua y 20 ml de ácido clorhídrico concentrado y se coloca - en la parrilla hasta que esté transparente la solución. Se precipita la solución con hidróxido de amonio y se filtra en papel 40 wattmann, lavándose perfectamente con agua caliente.

El precipitado es redisoluto con ácido sulfúrico al 5 % en ca -- liente, sobre el mismo vaso en el cual se hizo la precipitación y se agregan 15 ml más de ácido sulfúrico, llevándose a humos blancos, cubriendo el vaso con vidrio de reloj, permitiendo el reflujo por 30 -- minutos. Posteriormente se adicionan 250 ml de agua caliente.

La solución es filtrada en el filtro original y se lava el fil -- trado cinco veces. El filtrado retenido es la sílice (SiO_2), la -- cual es quemada y calcinada en un crisol de platino a 910°C .

El residuo es evaporado con 1 ml de ácido sulfúrico y 40 gotas de ácido fluorhídrico, para sacar la sílice pura. El residuo se fun -- de con bisulfato de potasio o sodio y la solución se reincorpora.

La solución obtenida se precipita con hidróxido de amonio y se -- filtra en papel 40 wattmann. El precipitado es tratado con un mñimo de agua en un vaso de 250 ml (no más de 50 ml).

A continuación se lava y se baja el precipitado al vaso que contiene los 50 ml de agua, con una solución de ácido clorhídrico en proporción de 1: 2. Con una solución al 16 % de ácido mandélico se hace la precipitación del zirconio, agregándole 50 ml. Posteriormente se coloca en una parrilla a 85 °C durante 20 minutos.

El precipitado es filtrado en papel 40 wattmann y se lava cinco veces con una solución que contiene: una solución al 5 % de ácido -- mandélico y una solución de ácido clorhídrico al 2 %.

El precipitado es colocado con todo y papel en un crisol de platino; se quema el papel y enseguida se calcina a 1000 °C durante una hora. El calcinado será el zirconio como ZrO_2 .

$$\% ZrO_2 = \frac{\text{Peso calcinado} \times \text{Aforo} / \text{Alicuota} \times 100}{\text{Peso de la muestra}}$$

Determinación de Cromo (Método Iodométrico).

Se pesa 1 g de peróxido de sodio y se funde en crisol de níquel o de hierro. La masa fundida se coloca en un vaso de precipitado de 600 ml, con 100 ó 150 ml de agua y se lleva a la parrilla hasta que se disuelva la fusión. El exceso de peróxido de sodio se descompone hirviendo la solución, después se filtra en papel 40 ó 41 wattmann; los lavados se hacen con agua caliente y el filtrado se acidula con ácido clorhídrico concentrado, hasta color paja. Acidulada la solución se titula con tiosulfato de sodio 0.1 N, usando almidón como indicador (2 ml por cada 100 de solución) y 1 g de yoduro de potasio.

La solución cambiará de un color azul oscuro a un color verde o incoloro, esto es dependiendo del Cr_2O_3 que se tenga en la solución.

El indicador almidón, se prepara disolviendo 1 g del mismo en 100 ml de agua destilada. Se hierve hasta que quede incolora la solución, se enfría y se usa.

$$\% Cr_2O_3 = \frac{V \times N \times \text{Meo.} \times \text{Aforo} / \text{Alicuota} \times 100}{\text{Peso de la muestra}}$$

Determinación de Titanio.

Se pesa 0.5 g de mineral y se funde en crisol de níquel o de hierro, utilizando oxilita como fundente. Se pasa a un vaso de precipitado de 500 ml y se disuelve con 20 ml de ácido clorhídrico concentrado en 40 ml. La solución se filtra con papel 41 wattmann y se precipita con amoníaco. Se filtra con papel 41 wattmann y se disuelve con ácido clorhídrico en proporción de 1: 1; posteriormente se reduce con granallas de aluminio, hasta tornar a un color incoloro o color violeta tenue. Finalmente se titula en caliente con solución de azul de metileno hasta un color azul claro.

$$\% \text{ Ti} = \frac{V \times N \times \text{Meq} \times \text{Aforo}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100$$

Procedimiento para medir el potencial zeta.

- 1.- Una vez calibrado el zetámetro; cerciorarse de que el tablero de mediciones (voltímetro, amperímetro y cronómetro) del aparato esté en cero y esperar 15 minutos, para que el zetámetro alcance su estado óptimo de trabajo.
- 2.- Seleccionar las variables de trabajo: voltaje deseado, voltaje para lámpara(la lámpara estará en su mejor posición cuando - se observen las bandas bien intensas), factor de corriente d_i recta del reostato, ángulo de inclinación de la lámpara(generalmente es de 55°). Colocar en la posición de a las doce la perilla de Ajuste de Balance del Voltímetro(evitar voltajes grandes que causen mucha intensidad de corriente, ya que estos producen burbujas, coloraciones o precipitados; no debe -- producirse electrólisis en ninguna circunstancia.
- 3.- Limpiar la base de vidrio que soporta la celda de acrílico, -- que contiene el capilar que albergará la solución por investigar.
- 4.- Vertir la solución en el capilar, previamente diluida a condiciones de pulpa(3 a 1). Inclinar la celda de acrílico para evitar burbujas al colocar el electrodo de molibdeno (Véase Fig. N°7a).
- 5.- Observar por el ocular que la línea ox-ox, (marcada en la base de vidrio) esté superpuesta sobre el patrón de difracción, en la segunda línea después de la banda posterior del capilar. La banda posterior corresponde a la primera de las dos bandas localizada en la parte de arriba, que es la de interés para rastrear los coloides. De la pared del capilar al centro de - este se encuentra la línea estacionaria en donde se mide el - potencial zeta, ésta distancia es aproximadamente 14.7 % el - diámetro del capilar (Véase Fig. N°7b).

- 6.- Hacer las mediciones de acuerdo al objetivo utilizado (éste está marcado en la base de vidrio) y rastrear los coloides en la zona inmediata.
- 7.- Al hacer las mediciones, primero se pone la arena en solución, se vierte en la celda y se le mide el potencial zeta - sin adicionar reactivos, a continuación se van agregando los reactivos en proporción a las cantidades utilizadas en la -- flotación. Al adicionar cada reactivo se mide el potencial para cuantificar su variación respectiva.

4.6.- Determinación Experimental del Potencial Zeta.

En base a las mejores pruebas de flotación, se seleccionó la prueba de flotación F - ZIC - DM₁ por ser ésta la que dió los mejores resultados. Los reactivos y la dosificación utilizada en esta prueba pueden consultarse en la tabla N°-3.

El procedimiento para efectuar las mediciones fué el siguiente:

- 1.- En mortero de ágata se molió la arena a un tamaño que hiciera - posible, que las partículas permanecieran en suspensión.
- 2.- Se prepararon soluciones con los reactivos en concentraciones - de 5×10^{-2} g / l; a continuación se tomaron alícuotas de éstas, de 10 ml y se diluyeron a 1000 ml, la concentración final fué de -- 5×10^{-4} g / l. Para el combustible se preparó una solución de -- 0.1 ml / l, se disolvió y se tomó una alícuota de 1 ml para diluir a 1 l y concentración de 10^{-4} ml / l. Debido a la dificultad de me- dir cantidades ínfimas se decidió utilizar la mayor dosificación de reactivos usada en la prueba de flotación; proporcionando éstas, a- la cantidad de arena empleada en la medición del potencial zeta. A continuación se detallan los reactivos y las cantidades usadas en - la flotación y la determinación del potencial zeta.

<u>Reactivo</u>	<u>Dosificación</u> en flotación (200g-arena) (1) (2) (3)	<u>Dosificación</u> en Pot. zeta (10^{-5} g arena/ml)	<u>Conc. de</u> la Sol. (g/l)	<u>ml.añadido</u> de la Sol. del react.
Ac.Oleico	0.1 0.2 0.4 (g)	2.5×10^{-7} 5.0×10^{-7} 1.0×10^{-6}	5.0×10^{-4}	0.5,1,2
Aceite				
Comb.	0.17 (ml)	4.25×10^{-7}	5.0×10^{-4} (ml / l)	.85
Alcohol				
alifático.	0.01 ml	2.5×10^{-8}	5.0×10^{-4}	.05
Na ₂ SiO ₃	0.18 g	4.5×10^{-7}	"	.90
H ₂ SO ₄	0.50 ml	1.25×10^{-6}	"	2.50
NaOH	0.50 g	1.25×10^{-6}	"	2.50
Almidón	0.05 g	1.12×10^{-7}	"	.23

3.- Se pesaron 10 muestras de arenas de 0.5 g y se pasaron a matraces de 100 ml; se aforaron, se dispersó la arena y se tomaron alícuotas de 10 ml de cada una de las dispersiones; se diluyeron con agua en matraces aforados de 50 ml, se les adicionó la cantidad necesaria de reactivos y se aforaron. Al final se tuvo una solución -- con una concentración de arena de $10^{-2} \text{ g / l} = 5 \times 10^{-4} \text{ g / 50 ml}$.

4.- En la determinación del potencial se consideró el orden de adición de los reactivos utilizados en la flotación (Véase tabla N°3).Las mediciones y los reactivos agregados a las dispersiones se ilustran a continuación.

Medición N°	Mineral (arena)	Regulador de pH	Depresor	Agente Aux.	Colect.	Espum.
1	*					
2	*	*				
3	*	*	*			
4	*	*	*	*		
5	*	*	*	*		
6	*	*	*	*	1	
7	*	*	*	*	1	*
8	*	*	*	*	2	*
9	*	*	*	*	2	*
10	*	*	*	*	3	*
11	*	*	*	*	3	*

Observaciones:

* : indica el reactivo empleado.(Urden de adición del reactivo).

1 : concentración del colector (0.1 ml).(Dos mediciones con estas

2 : concentración del colector(0.2 ml). concentraciones).

3 : concentración del colector(0.4 ml). " " " "

Las dispersiones se trataron individualmente al realizar las mediciones, de esta manera, una vez agregados los reactivos y las cantidades respectivas, se agitó la dispersión con el propósito de homogenizarla a grado óptimo. A continuación se colocó la dispersión en la celda electroforética; se instalaron los electrodos y se seleccionó el voltaje adecuado para realizar el rastreo de las partículas; determinándose el tiempo de trayectoria de 35 partículas aprox. para cada dispersión.

Condiciones de medición:

-Temperatura : 22 - 25 °C.

-Voltaje : 100 V.

-Lente

objetivo : 6X.

-Distancia

de

travesía : 160 m.

-Viscosidad

del

dispersante: 1 cpoise.

-Constante

dieléctrica: 84.33

Resultados de las mediciones.

A continuación se muestran los valores obtenidos del potencial Z , calculados con la ecuación de Helmholtz-Smoluchowski; los tiempos promedios para cada dispersión y los valores de movilidad electroforética obtenidos.

<u>Medición</u>	<u>Tiempo Promedio</u>		<u>Movilidad Electroforética</u>		<u>Pot. Zeta</u>	
Nº	(s)		m / s / V - cm		(mV)	
1	13.2	14.80	1.12	1.08	-15.0	-14.5
2	12.8	14.00	1.25	1.14	-16.8	-15.3
3	14.0	15.20	1.14	1.05	-15.3	-14.1
4	11.2	12.00	1.43	1.33	-18.9	-17.9
5	12.0	15.00	1.33	1.07	-17.9	-14.3
6	12.8	15.40	1.25	1.04	-16.8	-13.9
7	12.8	15.40	1.25	1.04	-16.8	-13.9
8	13.6	15.40	1.18	1.04	-15.8	-13.9
9	13.6	15.40	1.18	1.04	-15.8	-13.9
10	14.0	14.80	1.14	1.08	-15.3	-14.5
11	14.0	14.80	1.14	1.08	-15.3	-14.5
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)

Observaciones:

Las partículas rastreadas mostraron signo negativo, ya que se -- desplazaron hacia el ánodo.

(1) : Resultado del tiempo menor.

(2) : Resultado del tiempo mayor.

En su totalidad las partículas rastreadas se cronometraron en su trayectoria a través de 1 / 4 de la división impresa en los oculares, lo que evita perder de vista la partícula; al rastreadarse en una división frecuentemente se pierde vista la trayectoria.

Los tiempos de trayectoria de las partículas utilizadas para calcular el potencial zeta, fue el promedio de todos los tiempos registrados por las partículas.

Se aprecia en todas las dispersiones que los valores se agrupan alrededor de dos valores promedios, por lo que se calcularon dos potenciales zeta, hecho que no es sorprendente.

Análisis de los resultados.

- Los resultados de estas mediciones, son meramente cualitativos; factores diversos propician esto, de los cuales pueden mencionarse y na posible molienda inadecuada y consecuentemente que los componentes minerales hayan entrado en dispersión. Por el número de minerales de la muestra se esperaban cuatro tiempos diferentes de rastreo y sólo se obtuvieron dos.

- Inicialmente se proyectó determinar el potencial a cada especie mineral. Sin embargo las limitaciones en tiempo e instrumental de laboratorio obstaculizaron los proyectos originales.

- De acuerdo al orden de adición seguido en la flotación, se infiere que de existir cierta interacción entre los reactivos y los minerales rastreados, tales efectos son los siguientes:

1.-El silicato de sodio, el ácido sulfúrico y la sosa, aumentan el valor del potencial zeta, lo que indica que las partículas en suspensión son más estables, hecho que se atribuye a las propiedades dispersantes del silicato de sodio.

2.-El espumante no afectó el valor del potencial zeta y luego lo decrementó en concentraciones más baja.

3.-Las variaciones entre los valores bajos y los valores altos no fueron proporcionalmente las mismas, debido a que se observó una sola especie mineral, a pesar de los tiempos cercanos y el similar comportamiento de los minerales frente a los reactivos de flotación.

Conclusiones.

- No fue posible determinar el potencial a cada especie mineral en particular, en gran medida por la imposibilidad de tener los concentrados de zirconio, cromo y titanio a través del método de flotación diseñado.
- La dosificación óptima de reactivos para el proceso de flotación es difícil cuantificarla en base a los resultados obtenidos.
- Los reactivos empleados en la flotación de las arenas, excepto el espumante afectan el potencial zeta de los componentes minerales.

4.7.- Diseño de pruebas de flotación.

Los experimentos de flotación se diseñaron tomando en cuenta los minerales contenidos en las cabezas iniciales, los cuales se detallan a continuación :

Leyes de cabezas(Mesa Wilfley). %.

FeTiO_3	FeCr_2O_3	ZrO_2SiO_2	Fe_{Total}	SiO_2
15.17	12.41	15.30	33.98	15.20

Inicialmente se procedió a dividir el proceso de flotación en dos etapas :

- 1) Flotación bulk con espuma de los minerales de: ilmenita, cromita; zircón y depresión de óxidos de hierro.
- 2) Obtención por flotación selectiva de cada concentrado (ilmenita, cromita y zircón).

De una exhaustiva revisión bibliográfica se llegó a confeccionar la Tabla F-2; la cual se diseñó tomando en cuenta los trabajos existentes al respecto.

El criterio encontrado en la literatura sugiere que los colectores que proporcionan el mejor ángulo de contacto para la flotación de óxidos y silicatos, son los colectores aniónicos, ácidos grasos y sulfonatos; por lo que se hizo énfasis en la utilización de los mismos; de igual manera se consideraron los pH de trabajos anteriores, sin haberse encontrado un valor óptimo de éste.

Tomando en cuenta el objetivo de la primera fase se eligió un rango de pH, de neutro hasta altamente alcalino.

De la Tabla F-2, se corrieron veintidós pruebas, variando colectores, espumantes, agentes auxiliares, depresores, así como los parámetros: -pH.

-tiempo de acondicionamiento.

-tiempo de flotación.

Cantidad: 200 g de arenas.

Nº de Prueba	Colector	Espumante	Agente Auxiliar	Tiempo Acondici.	pH Flotación	Regulador	Tiempo Reemplia	Tiempo Flotación	RPM Flotación	Depresor	Referencias
* - ZIC DH ₁ ⁺	ác. oléico combusti- ble.	alcohol alifático	Na ₂ SiO ₃ ác. fos- fotung- ténico.	10 min.	7.5 - 10	H ₂ SO ₄ NaOH	1.5 min.	1.5-5 min.	900	almidón fuerte almidón hidrofí- lico.	25,26,27,28,29, 30,31,32,33,34.
F - ZIC DH ₂	aerop. 825 ác. graso petróleo ligero.	aerofroth 65	H ₂ SO ₄ NaOH CuSO ₄	10 min.	8.5 - 10	NaOH H ₂ SO ₄	1.5 min.	1.5-5 min	900	almidón caústico.	25,26,27,33,34, 35,36.
F - ZIC DH ₃	oleato de sodio.	aerofroth 65	NaOH H ₂ SO ₄ CuSO ₄	10 min.	8.0 - 10	NaOH	1.5 min.	1.5-5 min	900	humato de sodio.	26,29,32,34,37, 38.
F - ZIC DH ₄	sulfonato de sodio. tall oil.	aceite de pino.	ác. fos- fotung- ténico. H ₂ SO ₄ NaOH CuSO ₄	10 min.	8.0 - 9	H ₂ SO ₄ NaOH	1.5 min.	1.5-5 min.	900	dextrina.	25,26,31,32,35.

Tabla F - 2: Diseño de Pruebas de Flotación.

* : Flotación de zircón, ilmenita y cromita.

+ : Depresión de óxidos de hierro (magnetita).

Id. de Prueba	Colector	Espumante	Agente Auxiliar	Tiempo Condict.	pH Flotación	Reumador	Tiempo Re Limpia	Tiempo Flotación	RPM Flotación	Depresor	Referencias
F - 71C DM ₆	maltalina alcalina	5c. cresi tico.	petróleo H ₂ SO ₄ NaOH	10 min.	7.0	H ₂ SO ₄ NaOH	1.5 min.	1.5-5 min.	900	almidón hidrofí lico.	25,26,31,32 27,38.
F - 71C DM ₆	acetato de dodecila onio. dodecyl- pyridi- nium bromide.	aceite de pino. aerofroth 65	HCl NaOH	10 min.	7.5 - 10	NaOH	1.5 min.	1.5-5 min.	900	almidón fuerte.	29,29,32.
F - 71C DM ₇	jabón	aerofroth 64	NaOH H ₂ SO ₄	10 min.	7.0 - 9	NaOH	1.5 min.	1.5-5 min	900	almidón fuerte.	27,28,32.

Tabla 1 - 2: Diseño de Pruebas de Flotación (continuación).

La serie de pruebas de la primera fase de flotación se planearon de la siguiente manera:

Prueba N°	Colector	Modificadores	Espumante	pH
FD* - 1	Emulsión: flotapol y combustible, sulfonato de petróleo(Quipy- ronate 30).	ácido sulfúrico. hidróxido de sodio.	Hercomín A-0471	7.5-10
FD - 2	"	fluoruro de sodio. ácido sulfúrico. hidróxido de sodio.	"	7.8
FD - 3	"	hidróxido de sodio. ácido sulfúrico. fluoruro de sodio. silicato de sodio.	"	7.0
FD - 4	"	ácido sulfúrico. hidróxido de sodio. fluoruro de sodio.	"	9.5
FD - 5	"	hidróxido de sodio ácido sulfúrico.	Aerofroth 65	8.5
FD - 6	"	hidróxido de sodio. ácido sulfúrico. fluoruro de sodio.	Hercomín A-0471	Alta- mente alca- lino.
FD - 7	"	hidróxido de sodio. fluoruro de sodio. ácido sulfúrico.	Aerofroth 65	10.4

* : Flotación depresiva de Fe.

Nota: En la serie de pruebas de flotación el depresor utilizado fue almidón gelatinizado a excepción de la prueba FD - 6 en la que se utilizó dextrina.

Prueba N°	Colector	Modificadores	Espumante	pH
FD - 8	Emulsión: flotapol y combustible. sulfonato de petróleo (Qui- pyronate 30)	hidróxido de sodio. ácido sulfúrico. fluoruro de sodio.	Alcohol 65	Alcalino
FD - 9	"	"	"	8.7
FD - 10	aerop. 825 ácido graso petróleo líge ro.	hidróxido de sodio. ácido sulfúrico. sulfato de cobre.	Alcohol 65	8.3
FD - 11	"	"	"	7.3
FD - 12	"	"	"	Alcalino
FD - 13	"	"	"	8.0
FD - 14	oleato de sodio	hidróxido de sodio. ácido sulfúrico. sulfato de cobre.	Alcohol 65	8.0
FD - 15	"	"	"	8.3
FD - 16	"	"	"	8.5
FD - 17	"	"	"	9.0
FD - 18	"	"	"	9.5
FD - 19	"	"	"	8.5
FD - 20	"	"	"	9.3
FD - 21	"	hidróxido de sodio. ácido sulfúrico. sulfato de cobre.	"	10.0

Preparación de almidón en laboratorio. (método térmico)

Se hace una gelatina de hidróxido de sodio y agua.

En un vaso de precipitado vertir agua y luego adicionar almidón lentamente, do sificándolo a intervalos y posteriormente agregar poco a poco la sosa. El almidón se adiciona al 10 % en peso y se calienta a 95 °C durante 30 minutos. La sosa se agrega al 1 %, hasta formar una gelatina.

Para estas pruebas se utilizaron 31.5 mg de almidón por 200 g de arenas.

Método General Para La Preparación Del Almidón.

Gelatinización de almidón por adición de hidróxido de sodio.

Cuando un almidón es suspendido en una solución diluida de hidróxido de sodio, las micelas absorben una parte del álcali y la concentración de NaOH en solución, disminuye. Estudios de laboratorio mostraron, que para obtener la gelatinización - del almidón es necesario adicionar sosa cáustica en cantidad tal que parte sea absorbida por el almidón y parte quede en solución en una concentración de aproximadamente 0.75 %.

La cantidad de sosa a agregar se calcula por la siguiente fórmula:

$$C = \frac{(0.75)(B) + (1.6)(A)}{100} \dots\dots\dots (a)$$

Donde :

- C : Peso de sosa a adicionar en Kg.
- A : Peso de almidón base seca en Kg.*
- B : Peso de agua en Kg.
- 0.75 : Sosa libre mínima.

* : Para adicionar un Kg de almidón base seca, se requiere usar 1.225 Kg de almidón con 12 % de humedad.

A continuación indicamos las cantidades de sosa necesarias para gelatinizar - almidón de 1 a 5 partes por 100 de agua, de acuerdo a la fórmula (a) con 0.75 % - de sosa libre.

<u>Almidón Base Seca</u> (Kg)	<u>Aqua</u> (Kg)	<u>Sosa</u> (Kg)
1	100	0.766
2	100	0.782
3	100	0.798
4	100	0.814
5	100	0.830

Proceso De Gelatinización De Almidón Con Sosa.

- 1.- Coloque en el tanque de preparación la cantidad de agua necesaria para suspender el almidón a temperatura ambiente (el total de agua requerida para preparar la solución, menos el agua necesaria para la disolución de la sosa al \pm 10 %) e inicie la agitación utilizando un agitador mecánico.
- 2.- Agregue el almidón usando un dosificador para regular la alimentación de manera que no se formen pelotas de almidón.
- 3.- Cuando todo el almidón esté suspendido, añada la cantidad de sosa calculada, manteniendo la agitación hasta obtener la completa gelatinización del almidón.

Nota: La solución de sosa debe adicionarse lentamente a la suspensión del almidón, con agitación vigorosa.

Secuencia experimental.

Se pesaron 10 g de arena de playa en la balanza analítica, enseguida se sometió a una temperatura de 900 °C en mufla eléctrica, utilizando crisol de porcelana. El objetivo era determinar alguna posible calcinación de materia orgánica, después de que la muestra permaneciera por más de una hora en la mufla; anagar la mufla y dejar enfriar, para volver a pesar y ponderar alguna variación en el peso de la muestra; si así ocurriera, tal fenómeno indica la presencia de una película orgánica alojada en las partículas minerales, lo que a su vez se determina en un tratamiento pre-flotación para facilitar la acción de los colectores y activadores sobre las partículas respectivas a flotar.

La secuencia anterior no evidenció tal película orgánica, sin embargo en caso de existir, se recomienda lavar las partículas con oxalato de sodio para quitar la materia orgánica.

Preparación previa del mineral para la flotación.

Para mejorar la eficiencia del proceso de flotación se atriccióné a 70 % de sólidos, con un volumen reducido de agua (133 ml), a pH ácido, en un tiempo de 10 minutos y deslame durante 2 minutos a 20 % de sólidos, incrementando el volumen de agua a 800 ml.

Preparación del almidón (depresor).

Por considerarlo de importancia, a continuación se describe el procedimiento para la preparación del almidón y el cálculo de las cantidades requeridas.

Preparación del almidón hidrofílico (método con agitación mecánica a pH alcalino).

Hacer una gelatina con hidróxido de sodio y H₂O.

En cada prueba se mantienen constante algunas variables y se investiga otra en particular.

Las pruebas de flotación : F-ZIC- DM₅, F-ZIC- DM₆, F-ZIC- DM₇, (Véase Tabla F-2) no fue posible realizarlas debido a la dificultad de adquirir los colectores requeridos para las mismas, éstas - pruebas se recomiendan para estudios posteriores, mas aún, al verificar los experimentos llevados a cabo.

Las pruebas se ensayaron variando el tiempo de acondicionamiento entre 5 y 10 minutos debido a que de experiencias previas, se conoce que este parámetro juega un papel fundamental en la flotación de zircón, cromita e ilmenita. La densidad de pulpa fué de 3:1 (60 % de sólidos).

Los reactivos utilizados se adicionaron durante el tiempo de acondicionamiento; se agregaron variando el orden de adición para algunas pruebas. El orden de adición acostumbrado fué el siguiente:

- Depresor.
- Activador.
- Colector.
- Espumante.

El tiempo de flotación utilizado fué de 5 minutos.

Determinación de la película orgánica.

A menudo los minerales adquieren una película orgánica en su superficie, que dificulta la adsorción del colector a la partícula; este hecho hace necesario determinar la presencia de tal película orgánica. Por lo que fué pertinente practicar este experimento.

Lista de los reactivos utilizados en las pruebas de flotación.

Colectores:

Acido Oleico. Cyanamid de México,S.A .de C.V.
 color: oscuro a café.
 densidad: 1.0
 soluble en agua.

Aerop. 825 Cyanamid de México,S.A. de C.V.
 color: café caoba.
 densidad: 1.01-1.02
 soluble en agua.

Petróleo Ligero. PEMEX.
 densidad relativa:0.84
 presentación líquida.

Sulfonato de Petróleo Cyanamid de México,S.A. de C.V.
 color: café negrusco.
 densidad: 1.2
 soluble en agua a temperatura ambiente.

Oleato de Sodio Preparado en Laboratorio.
 mezcla de:
 NaOH
 ácido oleico.
 color: amarillo canario.

Depresores:

Dextrina 8032 Productos del Maiz, S.A.
 presentación: polvo
 color: amarillo claro.
 soluble en agua.

Depresores:

Almidón Hidrofílico Productos del Maiz,S.A.

presentación: polvo.

color: blanco.

soluble en agua.

Modificadores:

Acido Sulfúrico J.T.Baker,S.A. de C.V.

densidad: 1.84

concentración: 95 %

Sosa Cáustica J.T.Baker,S.A. de C.V.

color:blanco.

presentación:lentejas.

concentración: 1 N .

Sulfato de Cobre J.T.Baker,S.A. de C.V.

color: azul.

presentación: granular.

deshidratado.

Espumantes:

Hercomín A-0417 Química Hércules,S.A, de C.V.

presentación: líquida.

Aerofroth 65 Cyanamid de México, S.A de C.V.

color:blanco.

densidad: 1.0

presentación: líquida.

soluble en agua a 20 °C.

Equipo Utilizado en la Flotación.Máquina Denver de flotación.

Vel. Max. : 3300 RPM.

Celda de flotación.

Capacidad Max.: 1 l

Celda de deslame.

Agitador Mecánico.Bomba de Vacío (Welch).

RPM : 1425 / 1725

C.P.: 1 / 2

Hertz : 50 / 60

Monofásico.

Temperatura : 40 °C

Voltaje : 127 / 220

Amperaje : 7.3 / 3.6

Trabajo Continuo.

Estufa FELISA.

Temperatura : 120 °C Max.

Voltaje : 117

Potencia : 1400 W.

C.P.S. : 60

Mufla (Sin Marca).

Temperatura : 1200 °C.

Ro - Tap (Square D)

Voltaje : 120 / 240

Amperaje : 30

Cribas (Endecotts)

Mallas N°: 60,80,100,150,200.

Agitador de cilindro

RPM : 1725 / 1425

Monofásico.

Hertz : 50 / 60

Voltaje : 127

Temp. : 40 °C

Amperaje : 6.4

Muestreador(Tyler)Mechero Fischer

Alimentado con aire comprimido.

Indicador de pH

Potenciometro

Corning pH meter
125

Temp. Max. 100 °C

Balanza Analítica

marca Bosch.

Cap. Max. : 200 g

Balanza Analítica

marca Bosch.

Cap. Max. : 2000 g

Microscopio Electro-

nico de Barrido

marca JEOL 35

Equipo Utilizado en la Flotación.

Microscopio Estereográfico.

Me Opta PRAHA.

Microscopio de Luz Polarizada

Carl Zeiss

Zetámetro.

Zeta- meter Incorporated Inc. 1968.

Otro Instrumental.

Vasos de precipitado de : 50, 100, 200, 400, 600, 800 ml.

Vidrio de reloj.

Termómetro.

Pipetas.

Charolas.

Papel Filtro.

Embudos.

Cantidad: 200 g de arenas.												
N° de Prueba	Tiempo de atric.	Colector	Espum.	Depresor	Tiempo de acondic.	pH Flotación	Modific.	Regulador	Tiempo de Flotación	Tiempo de Reelimpia	% de sólidos	Orden de adic.
FD - 6	10 min. 70 % de sólidos	Emulsión: flotapoi (.26 g) combu. (.26 g) Y + sultona to de petróleo (.035 g)	Hercop min. (1 ml)	Dextrina An72 (.07 g)	10 min.	10.8	H ₂ SO ₄ (.4 ml) NaF (.11 g)	NaOH (.4 g)	4 min.	2 min.	40	Regulador. Depresor. Activador. Colector. Espumante.
FD - 7	10 min. 70 % de sólidos	Emulsión: flotapoi combu. Y quipyrate 30	Alco hol 65. (1 ml)	Almidón soluble. (.045 g)	5 min.	10.4	H ₂ SO ₄ (.4 ml) NaF (.11 g)	NaOH (.4 g)	4 min.	2 min.	40	Regulador. Depresor. Activador. Colector. Espumante.
FD - 10	10 min. 70 % de sólidos	Aerop. A25. (.17ml) áci. graso. (.15g) petróleo ligero. (.17 ml)	Alco hol 55. (1ml)	Almidón gelat. nizado. (.0715g)	10 min.	8.7	NaOH (.225g) H ₂ SO ₄ (.122ml) CuSO ₄ (.26g)	NaOH (.4g)	4 min.	2 min.	40	Regulador. Depresor. Activador. Colector. Espumante.

Tabla F - 3 : Reactivos y Cantidades Usadas.

* : Flotación depresiva de hierro.

Cantidad: 200 g de arenas.												
N° de Prueba	Tiempo de atric.	Colect.	Espum.	Depresor	Tiempo de acondic.	pH Flotación	Modific.	Regulador	Tiempo de Flotación	Tiempo de Reclimpia	% de sólidos	Orden de adición
FD-13	10 min. 70 % de sólidos.	aerop. #25 (.17ml) ác. grá so. (.15g) petról. ligero. (.17ml)	alcohol 65 (1 ml)	Almidón (.0315g)	7 min.	8.0	NaOH (.22g) H_2SO_4 (.12ml) $CuSO_4$ (.26g)	NaOH (.4 g)	2 min.	1 min.	40	Depresor. Activador. Colector. Espumante.
FD-15	10 min. 70 % de sólidos.	oleato de sodio. (.15g)	Alcohol #5 (1 ml)	Almidón gelati nizado #401 (.0315g)	10 min.	8.0	NaOH (.22g) H_2SO_4 (.12ml) $CuSO_4$ (.26g)	NaOH (.4g)	1 min.	3 min.	40	Depresor. Activador. Colector. Espumante.
FD-17	10 min. 70 % de sólidos.	oleato de sodio. (.19g)	alcohol 65 (1 ml)	Almidón soluble. (.045g)	10 min.	8.5	NaOH (.20g) H_2SO_4 (.10 ml) $CuSO_4$ (.22 g)	NaOH (.4 g)	2 min.	1 min.	40	Activador. Depresor. Colector. Espumante.

Tabla F - 3 : Reactivos y Cantidades Usadas (continuación).

Balance Metalúrgico: Fe, Cr, Ti, Zr
 Objetivo de la Prueba: depresión de óxidos de Fe
 Prueba de flotación N° FD-6

Producto	Peso(g)	Peso(%)	Leyes %				Contenido				Recuperación %			
			Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr
Ley de cabezas			25.7	7.04	11.6	36.74								
Conc.	82.20	41.1	26.0	14.0	7.0	42.0	1068.0	575.4	287.7	1726.2	34.77	49.34	33.47	50.60
Medios	97.63	48.88	34.0	10.6	9.8	29.90	1661.92	518.12	479.01	1461.51	54.07	44.43	55.74	42.84
Coñas	20.17	10.08	34.0	7.2	9.2	22.20	342.72	72.57	92.73	223.77	11.15	6.22	10.79	6.55
Total	200.00	100.00	31.33	10.60	8.66	31.36	3073.20	1166.0	859.45	3411.48	100.0	100.0	100.0	100.0

Balance Metalúrgico: Fe, Cr, Ti, Zr
 Objetivo de la Prueba: depresión de óxidos de Fe
 Prueba de flotación N° FD-7

Producto	Peso(g)	Peso(%)	Leyes %				Contenido				Recuperación %			
			Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr
Ley de cabezas			25.7	7.0	11.6	36.74								
Conc.	78.4	39.2	30.0	9.6	9.8	48.8	1176.3	376.4	384.2	1915.4	34.9	53.7	36.1	54.6
Medios	88.6	44.3	36.0	5.4	11.4	30.0	1594.8	239.2	505.0	1331.2	47.4	34.1	47.5	37.9
Colas	32.9	16.5	36.0	5.2	10.6	15.8	593.6	85.7	174.8	259.9	17.6	12.2	16.4	7.4
Total	200.0	100.0	34.0	6.7	10.6	31.5	3364.7	701.4	1064.0	3506.5	100.0	100.0	100.0	100.0

Balance Metalúrgico : Fe, Cr, Ti, Zr
 Objetivo de la Prueba: depresión de óxidos de Fe
 Prueba de flotación N° FD-10

Producto	Peso(g)	Peso(%)	Leyes %				Contenido				Recuperación %			
			Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr
Ley de cabezas			25.7	7.04	11.6	36.74								
Conc.	97.2	48.6	22.0	10.0	9.8	52.9	1069.6	486.2	476.5	2573.4	35.1	48.6	47.6	66.8
Medios	62.4	31.2	40.0	9.6	10.2	28.7	1247.2	299.3	318.0	896.1	40.9	29.9	31.8	23.2
Colas	40.4	20.2	36.0	10.6	10.2	18.9	727.2	214.1	206.0	383.1	23.9	21.4	20.6	9.9
Total	200.0	100.0	32.6	10.6	10.1	33.5	3044.0	999.6	1000.5	3852.7	100.0	100.0	100.0	100.0

Balance Metalúrgico: Fe, Cr, Ti, Zr
 Objetivo de la Prueba: depresión de óxidos de Fe
 Prueba de flotación N° FD-13

Producto	Peso(g)	Peso(%)	Leyes %				Contenido				Recuperación %			
			Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr
Ley de cabezas			25.7	7.0	11.6	36.7								
Conc.	70.0	35.0	20.0	6.0	12.6	52.7	700.0	210.0	441.0	1850.1	25.5	27.6	36.3	51.9
Medios	98.5	49.2	32.0	9.0	12.2	30.4	1576.0	443.2	600.8	1497.2	57.3	58.3	49.4	41.9
Colas	31.5	15.7	30.0	6.8	11.0	13.9	472.5	107.1	173.2	220.1	17.1	14.1	14.2	6.2
Total	200.0	100.0	27.3	7.3	11.9	32.4	2748.5	760.3	1215.1	3567.5	100.0	100.0	100.0	100.0

Balance Metalúrgico: Fe, Cr, Ti, Zr
 Objetivo de la Prueba: depresión de óxidos de Fe
 Prueba de flotación N° FD-15

Producto	Peso(g)	Peso(%)	Leyes %				Contenido				Recuperación %			
			Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr
Ley de cabezas			25.7	7.0	11.6	36.7								
Conc.	98.0	49.0	28.0	8.0	13.0	49.9	1372.0	392.0	637.0	2443.6	45.7	57.6	49.2	64.2
Medios	68.0	34.0	30.0	6.0	12.6	29.6	1020.0	204.0	428.4	1007.7	33.9	29.9	33.1	26.5
Colas	34.0	17.0	36.0	5.0	13.4	20.9	612.0	85.0	227.8	355.9	20.4	12.5	17.6	9.3
Total	200.0	100.0	31.3	6.3	13.0	33.5	3004.0	681.0	1293.2	3807.4	100.0	100.0	100.0	100.0

Balance Metalúrgico: Fe, Cr, Ti, Zr
 Objetivo de la Prueba: depresión de óxidos de Fe
 Prueba de flotación N°FD- 17

Producto	Peso(g)	Peso(%)	Leyes %				Contenido				Recuperación %			
			Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr	Fe	Cr	Ti	Zr
Ley de cabezas			25.7	7.0	11.6	36.7								
Conc.	92.5	46.0	36.0	5.8	16.0	54.0	1656.0	266.8	736.0	2484.0	46.6	48.5	50.7	66.6
Medios	64.0	32.0	32.0	6.0	12.8	26.0	1024.0	192.0	409.6	832.0	28.8	34.9	28.2	22.3
Colas	43.5	21.7	40.0	4.2	14.0	18.9	870.8	91.4	304.8	412.1	24.5	16.6	21.0	11.0
Total	200.0	100.0	36.0	5.3	14.3	32.9	3550.8	550.2	1450.4	3728.1	100.0	100.0	100.0	100.0

4.8.-

Discusión de Resultados Metalúrgicos.

A continuación se detallan las características de los experimentos y el comportamiento de los reactivos de los reactivos durante las pruebas de flotación.

- Del balance metalúrgico de las mejores pruebas de flotación y de las observaciones previas se aprecia que la prueba FD-17 presenta leyes sensiblemente superiores a las demás pruebas seleccionadas; sin embargo sus recuperaciones representan mayor porcentaje de los elementos de interés con respecto al paquete de pruebas más representativas (Véase tabla F-3 y Balances metalúrgicos).

- Utilizando la emulsión flotapol-combustible y sulfonato de petróleo no se obtuvieron resultados positivos, de igual manera el espumante Hercomin A-0471 no proporcionó espuma abundante y persistente. Con el mismo colector y pH de neutro hasta alcalino, los resultados fueron negativos en la primera fase de cinco pruebas (véase primera fase de las 21 pruebas de flotación, página 71-72).

- La misma emulsión no mostró tener alta selectividad por la ilmenita pero sí por la cromita. En este paquete de pruebas, es decir hasta la prueba número 9 no se obtuvieron resultados favorables, ya que no fue posible deprimir totalmente los óxidos de hierro, presumiéndose que fue el fluoruro de sodio el activador de éstos. A pH comprendido entre 7.5 y 10.5 se obtuvieron los mejores resultados de flotación (véase balances metalúrgicos de las pruebas más representativas, página 81-86).

- Con la mezcla de aeropromotor 825, ácido graso y petróleo ligero como colector y NaOH como regulador de pH, se observó que el zircon tiene buena flotabilidad (Véase Balance metalúrgico de la prueba N°10). Por otro lado la ilmenita y la cromita flotan con relativa aceptabilidad, flotando mejor este último mineral. Se encontró además que el rango de pH de flotación está entre 7.33 y 8.5, con resultados más favorables en un intervalo de pH de 8.0 a 8.5.

La depresión de óxidos de hierro se logra en cierto margen sin llegar a deprimirse en grado óptimo.

- De experiencias previas y de la literatura se visualizó, que el oleato de sodio prometía ser un colector apropiado para la flotación de los minerales en estudio, criterio que llevó a correr una cantidad mayor de pruebas con este colector (ocho pruebas). A pH de 9 el zircón posee flotabilidad relativa con oleato de sodio; - pero la depresión de óxidos de hierro no se logró como se pretendía (Véase balance metalúrgico de la prueba FD-17).

El tiempo de acondicionamiento es un parámetro fundamental en la flotación de minerales oxidados y silicatos. Los resultados -- variando este parámetro no mostraron influencia determinante en -- las pruebas de flotación.

- El oleato de sodio mostró ser un colector efectivo para la flotación de titanio; puesto que las leyes más altas las manifestó este elemento en la última serie de pruebas de la primera fase de flotación, es decir, de la prueba FD-14 hasta la FD-21 (Véase balance - metalúrgico de las pruebas FD-15 y FD-17).

- En general se concluye que los depresores utilizados para óxidos de hierro no cumplieron con los objetivos perseguidos; por lo que se sugiere en estudios posteriores hacer mayor énfasis en la búsqueda de un depresor adecuado para la flotación de cromo, titanio y zircón (Véase tabla F-2).

Capítulo V.

ESTUDIO DE MERCADO.

5.1.- Usos.

ILMENITA (FeOTiO_2).

Los minerales de ilmenita y rutilo de frecuente ocurrencia en las arenas de playas, constituyen la fuente más importante de titanio. Las aleaciones de titanio tienen entre sus mayores empleos la fabricación de aceros especiales y las tuberías de aeronaves. El bióxido de titanio es útil en la fabricación de ferrotitanio, elemento que funge como desoxidante al agregársele al acero, aumentando la resistencia de éste a la tensión. Por otro lado del TiO_2 se obtiene titanio metálico para la fabricación de cuprotitanio, útil en las aleaciones de bronce y otras a base de cobre. Este compuesto por ser químicamente inerte, no tóxico y por su elevado poder de recubrimiento es valioso para hacer opacos los esmaltes y como pigmento blanco. Las pinturas que poseen pigmentos de titanio no se agrietan ni se desconchan; entre los pigmentos de titanio más cotizados se conocen el que tiene 75 % de TiO_2 y 25 % de sulfato de bario. El bióxido de titanio tiene otras aplicaciones en sedas artificiales, esmalte de laca, caucho, cristales y algunos tipos de papeles de peso ligero.

La resistencia a la corrosión le permite al titanio, ser utilizado en muchas facetas de la ingeniería y la química. Su resistencia a los cloruros lo hace adecuado para equipo de trabajo manual, por ejemplo: agente colorante, cloruro férrico e hidrocarburos a base de cloruros. Así también el bronce aleado con Ti y Al adquiere (alta resistencia al efecto del agua del mar) propiedades similares a la del bronce al fósforo y al manganeso.

El titanio encuentra alto empleo en revestimientos de electrodos de soldadura y herramientas adecuadas para el corte.

Estímulos para la producción de aleaciones de titanio durante los últimos 30 años, provienen de la industria aeroespacial; el alto punto de fusión de éstas (1678°C) y los requerimientos críticos de alto esfuerzo y temperaturas elevadas de los materiales, las llevan a emplearse en las turbinas de gas. En la actualidad un motor moderno contiene un peso de 25 a 30 % de aleación de titanio.

Así el modernísimo bombardero F-15 McDonnell Douglas, lleva 7 mil Kg de aleación de éste elemento en la parte trasera del fuselaje. Las aleaciones de titanio juegan un mayor papel en abanicos de jet (by - pass). Se utiliza además en la zona de baja e intermedia presión del compresor de un motor moderno⁽⁵¹⁾; estructuras de vehículos especiales y tanques de almacenamiento de combustible de cohetes; en dispositivos para mecánica electrónica a base de aleación de Ti-Ni; en medicina ortopédica para implantes.

Accesorios de uso marino, como los tubos condensadores de titanio (enfriadores) y tubos condensadores de titanio para plantas de sodio, hacen del titanio un elemento de interés económico.⁽⁵²⁾

Zircón (ZrO_2SiO_2).

Este mineral es un silicato de zirconio que se presenta a menudo en cantidades pequeñas de hierro y asociado a otros minerales. En la mayoría de los casos el bióxido de hafnio (HfO_2) constituye la mayor fuente de obtención del zirconio metálico.

El bióxido de zircón (ZrO_2) cuyas características de baja conductividad térmica y bajo índice de dilatación, lo adecua para su uso en la fabricación de crisoles resistentes a los ácidos y temperaturas elevadas (punto de fusión de 3000 °C).

Así también el bióxido de zircón se utiliza con el cuarzo, en una proporción de 25 % para producir vasijas de laboratorio resistentes a los ácidos y altas temperaturas; en la fabricación de ladrillos y cementos refractarios, destinados a revestimientos de hornos de fundición de acero y en la producción de esmaltes blancos y pinturas bastante estables.

Las aleaciones metálicas de Zr-Mn (40 %) son útiles en las explosiones sin humo para señales luminosas en fotografías. La maleabilidad que posee el zirconio puro lo hace eficiente en la construcción de aparatos de aplicaciones científicas. Encuentra otros usos en la fabricación de bujías de motores de combustión interna y termoelementos en los picnómetros. Agregado en proporciones adecuadas al acero, cobre y latón incrementa la calidad de las aleaciones. Por lo que respecta a los desoxidantes, es el mejor en los procesos metalúrgicos de producción de acero. Su capacidad para formar compuestos con el nitrógeno, el zirconio purifica plenamente el acero de los nitruros.

Cromita (FeCr_2O_3).

La cromita es el mineral de mayor importancia económica para la producción de cromo y constituye la materia prima para la obtención del ferrocromo. Es de gran importancia en la industria siderúrgica, por su vasta aplicación en -- aleaciones de acero, por su dureza y tenacidad. Las piezas de acero cromadas resultan altamente resistentes a la corrosión.

En la elaboración de aceros especiales se emplea cromita de 48 % en rela -- ción de 1 a 2 % , lo que eleva su dureza, tenacidad y resistencia a la corro -- sión. El acero al cromo se emplea en la fabricación de cañones destinados a - funciones bélicas, chapas de blindajes, proyectiles y además para herramientas de corte en los talleres de maquinado. Otros usos del cromo tienen lugar en - el cromado de piezas y chapas, elementos de calefacción eléctrica, electrónica, refractarios, pigmentos, estampados y grandes tuberías de vapor.

En general los tres rubros que más emplean cromita son : metalurgia(56 %), refractarios(33 %) y química (11 %).

5.2.- Consumo y Demanda.

	<u>1979</u>	<u>1980</u>	<u>1981</u>	<u>1982</u>	<u>1983</u>	<u>1984</u>	<u>1985</u>
Albania	750	762	871	871	898	871	-
Brasil	340	303	327	276	276	281	-
Finlandia	656	566	631	610	510	891	506
India	309	319	285	339	422	440	-
Filipinas	356	496	439	322	267	272	-
Sur							
Africa	3,297	3,414	2,870	2,164	2,232	3,006	3,350
Turquía	454	373	423	409	512	608	-
URSS	2,300	2,903	2,903	2,939	2,939	2,994	-
Zimbabwe	542	553	536	432	432	454	-
Utros	423	406	249	245	293	703	-
Totales	10,768	10,105	9,584	8,605	8,781	10,520	3,856

Tabla N° 4: Producción Mundial de cromo (miles de Ton-métricas) (1).

Año	Metalúrgico	Refractarios	Química	Total
1977	524	189	194	907
1978	484	215	217	916
1979	702	175	220	1,097
1980	520	141	217	878
1981	456	134	216	706
1982	245	73	177	495
1983	58	65	172	295

Tabla Nº 5 : Consumo primario de cromo para diferentes sectores de la industria en los E.U.A. (miles de toneladas métricas).

Año	Volumen de importación en T.M.*	Valor de importaciones en miles de pesos*	Consumo nacional aparente en T.M.
1974	53,071.0	26,435.5	53,071.0
1975	49,299.0	34,294.6	49,299.0
1976	51,260.9	46,528.3	51,260.9
1977	49,167.0	100,122.0	49,167.0
1978	50,786.0	124,300.0	50,786.0
1979	55,085.0	101,692.9	55,085.0
1980	36,905.0	85,824.1	36,905.0
1981	47,612.0	128,162.0	47,612.0
1982	43,244.0	204,714.7	43,244.0
1983	32,867.0	405,901.4	32,867.0
1984	-----	-----	-----
1985	-----	-----	-----
1986	-----	-----	-----

Tabla N° 6 : Importación y consumo nacional aparente de cromita.

* : Anuario estadístico de la minería mexicana. Consejo de Recursos Naturales no Renovables 1974-1986.

Año	X	Y*	$x=X-\bar{X}$	$y=Y-\bar{Y}$	x^2	$x \cdot y$
1974	0	53.07	-4.5	+6141.4	20.25	-27,636.3
1975	1	49.29	-3.5	+2369.4	12.25	- 8,292.9
1976	2	51.26	-2.5	+4330.4	6.25	-10,826.0
1977	3	49.16	-1.5	+2237.4	2.25	- 3,356.1
1978	4	50.78	-0.5	+3856.4	0.25	- 1,928.2
1979	5	55.08	+0.5	+8155.2	0.25	+ 4,077.7
1980	6	36.90	+1.5	-10024.6	2.25	-15,036.9
1981	7	47.61	+2.5	+ 682.4	6.25	+ 1,706.0
1982	8	43.24	+3.5	-3685.6	12.25	-12,899.6
1983	9	32.86	+4.5	-14062.6	20.25	-63,281.7
1984	-	-----	---	-----	-----	-----
1985	-	-----	---	-----	-----	-----

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$$

$$\sum X = 45, \sum Y = 470$$

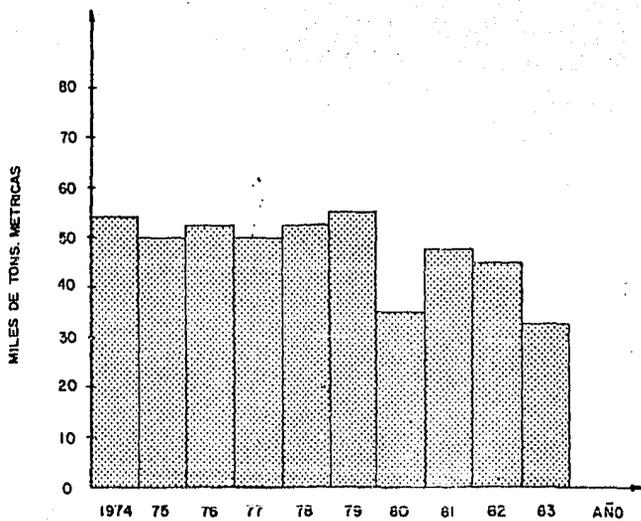
$$\bar{X} = 45, \bar{Y} = 4629.6$$

$$10 \quad \sum x = 0.0; \sum y = 0.0 \quad \sum x^2 = 82.5; \sum x \cdot y =$$

$$= 4.5 \quad -137,474.0$$

Tabla N°7: Secuencia de cálculo para el consumo nacional de cromita por mínimos cuadrados.

*: En miles de toneladas métricas.



GRAFICA DE CONSUMO NACIONAL DE CROMITA

Secuencia de cálculo para el consumo nacional de cromita por año, utilizando mínimos cuadrados.

$$\bar{x} = 4.5$$

$$\bar{y} = 46,929.6$$

$$\sum x = 0.00$$

$$\sum y = 0.00$$

$$\sum x^2 = 82.5$$

$$\sum x.y = 137,474.0$$

La ecuación de tendencia del consumo por mínimos cuadrados es de la forma:

$$Y = \bar{y} + \frac{\sum x.y}{\sum x^2} (x - \bar{x})$$

Sustituyendo los valores de la tabla, se tiene:

$$Y = 46,929.6 + \frac{(-137,474.0)}{82.5} (x - 4.5)$$

$$Y = 46,929.6 + (-1,666.35) (x - 4.5)$$

$$Y = 46,929.6 + 7,498.5 - 1,666.35 (x)$$

$$Y = 54,428.1 - 1,666.35 (x)$$

Para $x = 0$

$$Y = 54,428.1$$

Para $x = 9$

$$Y = 54,428.1 - 14,997.1$$

$$Y = 39,431.0$$

Como se requiere hacer una proyección para 10 años adelante es decir de 1986 a 1996, se tendrá :

Para $x = 22$ años

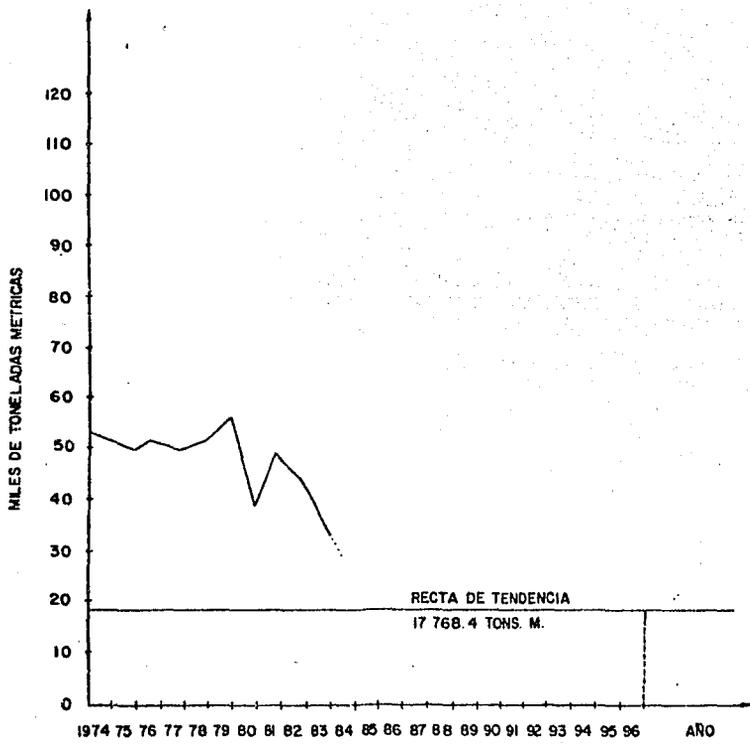
$$Y = 54,428.1 - 36,659.7$$

$$Y = 17,768.4$$

De aquí, que de mantenerse la tendencia, deberá esperarse un decremento del consumo de cromita para el año 1996.

RESUMEN

Año	x	Y
1974	0	54,428.1
1983	9	39,431.0
1996	22	17,768.4



GRAFICA DE LA RECTA DE TENDENCIA PARA EL CONSUMO NACIONAL DE CROMITA PARA EL AÑO DE 1966.

	1984	1985
Ilmenita	409,605	535,000
Escoria	209,839	302,000
Rutilo	158,461	155,000
Rutilo Sintético	22,043	30,000

Tabla N°8 : Importación de productos de titanio en los Estados Unidos de Norteamérica.
(En miles de toneladas).

Fuente : Engineering and Mining Journal, a Mc Graw Hill
Publication, Vol. 187 N°3 p.p. 53. U.S.A. 1986.

Año	Volumen* de Importaciones en T.M.	Valor de Importaciones miles de pesos	Consumo Nacional Aparente en T.M.	Cotizaciones ⁽¹⁾
1974	40,992.0	29,831.4	40,992.0	
1975	7,688.0	12,549.9	7,688.0	
1976	47,768.0	48,812.0	47,768.0	
1977	42,038.0	38,955.0	42,038.0	
1978	65,524.0	49,812.0	65,524.0	
1979	59,724.0	45,239.6	59,724.0	50.42
1980	63,587.0	39,142.0	63,587.0	55.00
1981	50,819.0	43,356.2	50,819.0	65.8-71.8
1982	41,994.0	74,252.3	41,994.0	70.0-75.0
1983	45,942.0	297,615.0	45,942.0	70.0-75.0
1984	-----	-----	-----	-----
1985	-----	-----	-----	-----

Tabla N°9 : Importación y Consumo Nacional
Aparente de Ilmenita.

* : Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, Consejo de Recursos minerales No Renovables, 1974 - 1983.

(1): Dlls / Ton. Larga L.A.B.

---: Sin registro estadístico

Año	X	Y ⁽¹⁾	x=X- \bar{X}	y=Y- \bar{Y}	x ²	x.y
1974	0	40.99	-4.5	-5,615.60	20.25	25,270.20
1975	1	7.68	-3.5	-38,919.60	12.25	136,218.60
1976	2	47.76	-2.5	1,160.40	6.25	2,901.00
1977	3	42.03	-1.5	-4,569.60	2.25	6,854.40
1978	4	65.52	-0.5	18,916.40	0.25	-9,458.20
1979	5	59.72	+0.5	13,116.40	0.25	6,558.20
1980	6	63.58	+1.5	16,979.40	2.25	25,461.60
1981	7	50.81	+2.5	4,211.40	6.25	10,528.50
1982	8	41.99	+3.5	-4,613.60	12.25	-16,147.60
1983	9	45.94	+4.5	-665.60	20.25	-2,995.20
1984	-	-----	----	-----	-----	-----
1985	-	-----	----	-----	-----	-----

$$X=45 \quad Y=466.07$$

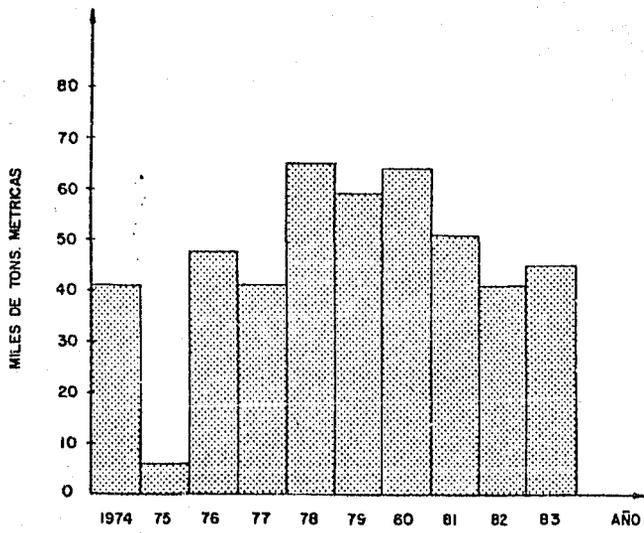
$$\bar{X}=45/10 \quad \bar{Y}=46,607.60$$

$$\bar{x}=4.5 \quad \sum x=0.00, \sum y=0.00 \quad \sum x^2=82.5, \sum x.y=179,389.50$$

Tabla N°10: Secuencia de Cálculo para el Consumo Nacional de Ilmenita.

(1) : miles de toneladas métricas.

Fuente: Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, Consejo de Recursos Minerales No Renovables, 1974 - 1983.



GRAFICA DE CONSUMO NACIONAL DE ILMENITA

Secuencia de cálculo para el consumo nacional de filmenita por año, utilizando mínimos cuadrados.

$$\bar{x} = \frac{\sum X}{n}$$

$$\bar{x} = 4.5$$

$$\bar{y} = 466076 / 10$$

$$\bar{y} = 46607.6$$

$$\sum x^2 = 82.5$$

$$\sum x.y = 179,389.5$$

La ecuación de tendencia del consumo por mínimos cuadrados es de la forma:

$$Y = \bar{y} + \frac{\sum x.y}{\sum x^2} (x)$$

Sustituyendo los valores de la tabla, se tiene :

$$Y = 46,607.6 + \frac{(179,389)}{82.5} (x - 4.5)$$

$$Y = 46,607.6 + (2,174.4) (x - 4.5)$$

$$Y = 46,607.6 + 2,174.4 (x) - 9,784.8$$

$$Y = 46,607.6 - 9,784.8 + 2,174.4 (x)$$

$$Y = 36,822.7 + 2,174.4 (x)$$

Para $x = 0$

$$Y = 36,822.7$$

Para $x = 9$

$$Y = 36,822.7 + 2,174.4 (9)$$

$$Y = 36,822.7 + 19,569.6$$

$$Y = 56,392.4$$

Para $x = 22$ años

$$Y = 36,822.7 + 2,174.4 (22)$$

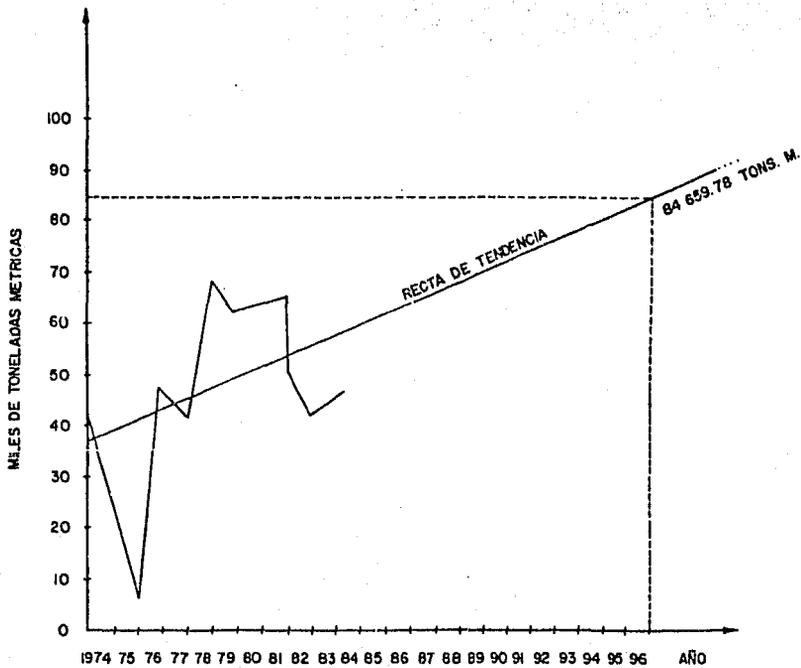
$$Y = 36,822.7 + 47,837.0$$

$$Y = 84,659.7$$

Por lo tanto de acuerdo con esta proyección para el año 1996 se tendrá un consumo nacional aparente de 84,659.7 toneladas de ilmenita.

RESUMEN

Año	x	Y
1974	0	36,822.7
1996	22	84,659.7



GRAFICA DE LA RECTA DE TENDENCIA PARA EL CONSUMO DE LA
ILMENITA PARA EL AÑO 1966.

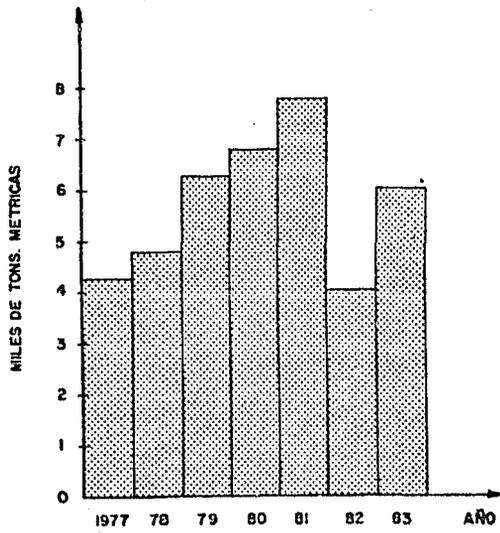
Año	Volumen de Importaciones en T.M.	Valor de Importaciones miles de pesos	Consumo Nacional Aparente en T.M.	(1) Cotizaciones DlIs x Ton. corta.
1976	-----	-----	-----	
1977	4,203.00	18,638.00	4,203.00	
1978	4,720.00	21,749.00	4,720.00	
1979	6,285.60	20,805.50	6,285.60	
1980	6,880.00	27,492.50	6,880.00	160.00
1981	7,773.10	41,053.00	7,773.10	165.00
1982	4,173.20	45,662.50	4,173.20	165.00
1983	6,113.60	175,732.50	6,113.60	165.00
1984	-----	-----	-----	
1985	-----	-----	-----	

Tabla N°11: Importación y Consumo Nacional Aparente de Zircón.

(1) : Engineering and Mining Journal, a Mc Graw Hill Publication.

Fuente : Instituto Mexicano de Comercio Exterior.

----- : Sin registro estadístico.



GRAFICA DE CONSUMO NACIONAL DE ZIRCON

Año	X	Y ⁽¹⁾	x=X- \bar{X}	y=Y- \bar{Y}	x ²	x.y
1977	0	4,203.0	-3	-1,532.5	9	+4,597.5
1978	1	4,720.0	-2	-1,015.5	4	+2,031.0
1979	2	6,285.6	-1	+ 550.1	1	- 550.1
1980	3	6,880.0	0	+1,144.5	0	0.0
1981	4	7,773.1	1	+2,037.6	1	+2,037.6
1982	5	4,173.2	2	-1,562.3	4	-3,124.6
1983	6	6,103.6	3	+ 378.1	9	+1,134.3

$$X=21, Y=40,148 \quad x=0, y=0 \quad x^2=28, x.y=6,125.7$$

$$\bar{X}=\frac{21}{7}, \bar{Y}=5,735.5$$

$$\bar{X}=3$$

Tabla N°12: Secuencia de Cálculo para el Consumo Nacional de Zircón.

(1): Toneladas métricas.

Secuencia de cálculo para el consumo nacional de zircón por año utilizando mínimos cuadrados.

$$\bar{x} = 3$$

$$\bar{y} = 5,735.5$$

$$\sum x = 0.00$$

$$\sum y = 0.00$$

$$\sum x^2 = 28$$

$$\sum x.y = 6,125.7$$

La ecuación de tendencia del consumo por mínimos cuadrados es de la forma:

$$Y = \bar{y} + \frac{\sum x.y}{\sum x^2} (x - \bar{x})$$

Sustituyendo los valores de la tabla, se tiene:

$$Y = 5,735.5 + \frac{6,125.7}{28} (x - 3)$$

$$Y = 5,735.5 - 656.3 + 218.7 (x)$$

$$Y = 5,079.1 + 218.7 (x)$$

Para $x = 0$

$$Y = 5,079.1$$

Para $x = 6$

$$Y = 5,079.1 + 1,312.6$$

$$Y = 6,391.8$$

Para $x = 19$

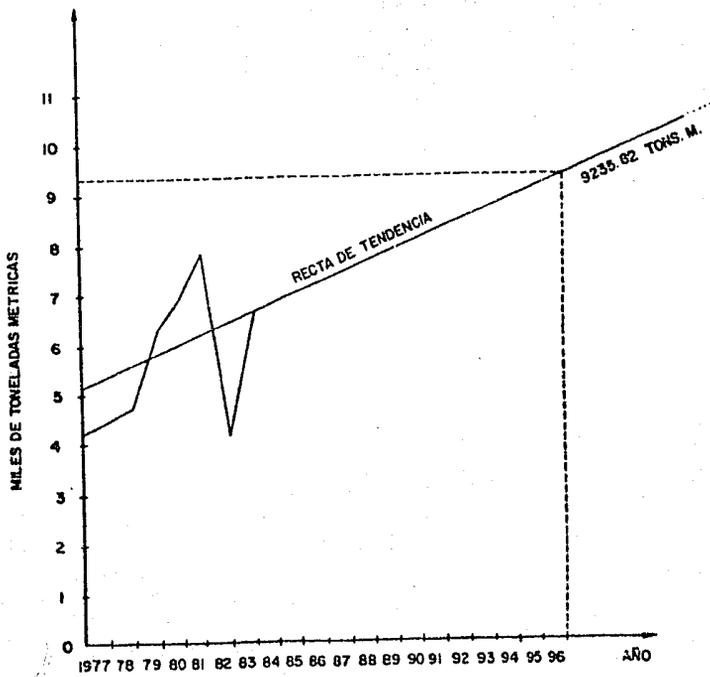
$$Y = 5,079.1 + 4,156.6$$

$$Y = 9,235.8$$

Por lo tanto de acuerdo con esta proyección para el año 1996 se tendrá un consumo nacional aparente de 9,235.8 toneladas de zircón, con lo cual se observa un ligero incremento en el consumo.

REUSMEN

Año	x	Y
1977	0	5,079.1
1983	6	6,391.8
1996	19	9,235.8



GRÁFICA DE TENDENCIA PARA EL CONSUMO NACIONAL DE ZIRCON
 PARA EL AÑO 1996.

5.3.- Cotizaciones.

Año	Zircón ¹ DlIs x Ton. corta.	Cromita ² DlIs x lb.	Ilmenita ³ DlIs x Ton.
1979		3.26	50.42
1980	160.00	3.89	55.00
1981	165.00	4.17	65.80-71.80
1982	165.00	3.75	70.00-75.00
1983	165.00	3.75	70.00-75.00
1984	165.00	3.75	3.80-4.45*
1985	165.00	3.75	3.80-4.45*
1986	165.00	3.75	3.50-4.00*

Tabla N°13 : Cotizaciones de Zircón, Cromita e Ilmenita de 1979 a 1986.

1 : Ton. corta de concentrado bulk con 65 % de ZrO_2 .

2 : L.A.B; punto de embarque por libra de cromo electrolítico de 99.80 %. A 1986 la cotización de cromo fundido al vacío es de 4.62 dólares por libra.

3 : DlIs por Ton. larga L.A.B.; punto de embarque. La cotización de rutilo de 96 % a 1986 es de 450-480 dólares por libra.

* : Cotización en dólares por libra.

5.4.- Perspectivas de Mercado.

Ilmenita.

El futuro del titanio en el mercado ha tomado rumbos atractivos dada las nuevas aplicaciones que se le ha encontrado en la década de los ochentas, lo que su mado a su empleo tradicional ha venido a incrementar su demanda.

Tanto en la década de los setenta como en la presente su precio se ha mantenido con pocas variaciones, no obstante muestra una sensible tendencia al alza. In duciéndose que tal tendencia es producto de su fuerte demanda como componente en la industria de pigmentos y en la fabricación de metales; por otro lado se pre- ve gran demanda en la aviación comercial y en empleos militares del espacio así como en otros usos ya mencionados. Esto por lo que respecta al ámbito interna- cional, respecto a la situación nacional hay escasez de este mineral y los que - se conocen no son suficientes para cubrir la demanda interna.

De las proyecciones realizadas anteriormente en este capítulo, se estima que para 1996 los consumos de ilmenita se incrementarán.

En general 1985 significó un gran año de demanda para el titanio y para 1986 se vislumbra una fuerte demanda.⁽⁴²⁾

Zircón.

El zircón es un mineral que mantiene estable su precio en el mercado, como - se aprecia en la tabla de cotizaciones. Sin embargo hasta que intervino en la generación de energía eléctrica como combustible base en plantas nucleares se - ha vuelto susceptible en el mercado. Por cierto su futuro económico está en la industria nuclear. En 1984 experimentó una baja repentina de 5 % en su pro- ducción y embarque en los Estados Unidos de Norte América, uno de los mayores - consumidores, debido a la baja producción de energía nuclear.

Por ser un mineral con múltiples aplicaciones en la fabricación de equipos - resistentes a la corrosión para la industria química, requerimientos militares (navegación nuclear), en pequeños volúmenes para la electrónica y como aditi- vo en aleaciones; posee una atractiva demanda en el mercado internacional. De igual manera sus empleos en usos no nucleares han doblado su consumo a partir - de 1983 de 200 mil libras a 400 mil.

A futuro se prevee una anticipada y fuerte demanda por aspectos militares.

En México por no disponerse de yacimientos de zircón el consumo se ha incrementado hasta la fecha y sus proyecciones indican que su demanda será mayor.

Cromita.

A pesar de las caídas que este mineral sufrió en 1982 y 1983 por la recesión del acero y el bajo consumo de cromo como resultado, se mantiene en la actualidad con muchas perspectivas.

Las tres grandes industrias (metalúrgica, refractaria y química) que utilizan este elemento han incrementado la demanda de este mineral, lo que ocasionó un boom de los precios del cromo en 1984. Grandes niveles de producción y consumo se mantuvieron durante 1985. En los Estados Unidos de Norte América se recuperó el consumo de cromo luego de sus anteriores bajas, particularmente en la industria metalúrgica. Tanto Estados Unidos como Japón aumentaron en 10 % el precio del cromo entre 1983 y 1984, en este último año el metal experimentó una fuerte demanda. El ferrocromo muestra una sensible demanda, después de la caída de 8 % del precio en 1984. Su consumo decreció en los Estados Unidos de 3,878 toneladas métricas en 1984 a 3,585 toneladas en 1985.

Tecnologías nuevas como las implementadas en Suecia para la producción de ferrocromo (Horno de arco de plasma) han venido a expandir el uso del cromo en la fabricación de aceros especiales utilizados en automóviles; sin embargo la producción directa de acero en plantas carbotérmicas han reducido su consumo. De igual manera nuevos procesos de producción de acero inoxidable de alta resistencia al agua de mar, puestos en marcha en Japón requieren de apreciables cantidades de cromo.⁽⁴²⁾

La extensión de los usos del acero a sistema integrales exhaustivos (Mole exhaust system) y la emisión de normas de riesgos de comunicación en los Estados Unidos y Europa promueven la demanda de cromo, por la necesidad en éstas, de productos a base de este elemento.

La estable situación del cromo en 1985 se prevee para 1986.

Las proyecciones del consumo de cromo a futuro para México, muestran una disminución. Aunque por no existir yacimientos de este mineral en el país su explotación se vuelve atractiva.

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES.

- El objetivo de este estudio está más enfocado al aspecto metalúrgico que al minero, sin embargo se considera el dragado hidráulico por succión, como uno de los métodos de explotación más atractivo, por la naturaleza física del lugar y su bajo costo de producción.

- Del análisis comparativo de todas las pruebas de flotación, se observó que el tiempo de acondicionamiento fue un parámetro importante pero no determinante en la flotación; posiblemente el colector, pH y tiempo de flotación, así como el orden de adición de los reactivos representan los parámetros de mayor importancia en la búsqueda de un proceso óptimo para la flotación de cromo, titanio y zircón. Aunque no se incluye en esta investigación el ángulo de contacto y la variación en la cantidad de reactivos adicionados se recomienda hacer énfasis en estos factores en subsecuentes estudios.

- Originalmente el diseño de los experimentos estaba dirigido hacia la obtención de concentrados de Cr, Ti y Zr. Esto no fue posible debido a las dificultades encontradas en la depresión de los óxidos de hierro; lo que limitó este trabajo a la primera fase de flotación.

- La influencia del potencial Z, no fue determinante en la selección del colector en la flotación de los minerales ya mencionados; debido a la imposibilidad de medir el potencial zeta a cada especie investigada. No obstante se sugiere la profundización en el estudio del potencial zeta y su gran aplicación en la flotación de minerales; ya que es una herramienta valiosa que disminuye los costos de producción, en un proceso de concentración y beneficio de minerales por este método; específicamente en la determinación y cuantificación de reactivos, como también en la optimización de otros parámetros que intervienen en la flotación.

- Debido al gran potencial económico que representan estos recursos y las perspectivas a futuro del cromo, titanio y zircón, se recomienda proseguir en estudios más extensos de la flotación de estos minerales.

- La dificultad en implementar un proceso de concentración por flotación en una sola fase, sugiere el beneficio de estos yacimientos por medios gravimétricos en combinación con métodos magnéticos y electromagnéticos.

Bibliografía.

- 1.-CASTELLANOS, T. Lisandro. "La Costa de Cromo en los estados de Tabasco y Campeche, México." (artículo inédito). Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, U.N.A.M. México. (1981).
- 2.-PETTYOHM, J.E. Sedimentary Rocks. The Johns Hopkins University, Baltimore. U.S.A. (1949.)
- 3.-BATEMAN, M.A. Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. (1978).
- 4.-BETEJTIN, A. Curso de Mineralogía. Editorial MIR. Moscú. (1977.)
- 5.-GILCHRIST, D.J. Extraction Metallurgy. University of New Castle Upon-Tyne. England. (1967).
- 6.-DER PLAS, Van. L. Developments in Sedimentology. Vol.6, The Identification of Detrital Feldspars. Geology and Mineralogy Department. Agricultural State University. Wageningen, The Netherlands. (1966).
- 7.-GUTIE, E.M. Et. Al. Malpica, C.M.V. Martinez, R.J. Geomorfología y Sedimentos Recientes del Sistema Lagunar Atasta-Pom. Campeche, México. Vol 9 (1). p.p. 89. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. U.N.A.M. (1982).
- 8.-HERNANDEZ, S. Jorge. Análisis de la Operación de Dragado, Yac. Sto Domingo, B.C.S. Tesis Profesional. U.N.A.M. México, D.F. (1983).
- 9.-CUMMINS, B. Arthur. and Given, A. Ivan (Editors). Mining Engineers Handbook. Society of Mining Engineers of A.I.M.E. New York, N.Y. (1973).

- 10.-BURTON, K.A." Equipment Selection for Surface Mining". Bechtel Corporation, San Francisco.,California. U.S.A. Sin fecha de edición.
- 11.-LEJA,J. Surface Chemistry of Froth Flotation. Plenum Press,Editors. New York, N.Y. U.S.A.(1982).
- 12.-SHAW,Duncan.J.Introduction to Colloid and Surface Chemistry. Department of Chemistry Liverpool Politecnic. Liverpool, England.(1970).
- 13.-MADRIGAL, Diaz.J.F. Memorias del Segundo Encuentro Sobre Concentración de Minerales . San Luis Potosí. México. agosto de(1984).
- 14.-----Enciclopedia Tecnológica Química. Tomo I. P.P.14. U.T.E.H.A. México.(1963).
- 15.-BRUYN, P.L., and Agar,G.E. Froth Flotation 50 th Aniversary. "Surface Chemistry of Flotation"(D.W.Fuerstenau; Editors). P.P. 91,American of Mining, Metallurgical and Petroleum Society Engineers, Inc. New York, N.Y. U.S.A.(1962).
- 16.-ADAMSON, W.Arthur. Physical Chemistry. Academic Press, Inc. New York, N.Y. U.S.A.(1973).
- 17.-HEINRICH,Wm. E. Identificación Microscópica de los Minerales. URMO, S.A. de Ediciones. España.
- 18.-KERR,F.Paul Optical Mineralogy. Third Edition. Mc Graw Hill Book. Co. Inc. Columbia University. New York,N.Y. U.S.A.(1965).
- 19.-BLOSS, F. Donald. Cristalografía Óptica. 3a. ed. (Editorial Omega). Barcelona. España.(1982).

- 20.-WYTEBBOGAARDT, W. Wyten. Identification of Ore Minerals. Tables for Microscopic. Elsevier Scientific Publ. Amsterdam. (1971).
- 21.----- "Técnicas Experimentales Aplicada a la Física de Materiales". Departamento de Física. Universidad de Panamá. (1984).
- 22.----- Formación de Imágenes en el Microscopio Electrónico. Cuaderno del Instituto de Materiales N° 3 . P.P. 17. Instituto de Ingeniería, U.N.A.M. México. (1985).
- 23.-Morcillo, Rubio. J., Orza, Segade. M.J. Espectroscopía Estructural y Espectros Atómicos. Editorial Athambra, S. A. Barcelona. España. (1972)
- 24.-BARNETT, L. El Universo y el Dr. Einstein. Fondo de Cultura Económica, Breviarios. México, D.F. (1985).
- 25.-COLOMBO, F.A. and Frommer. Flotation. A. M. Gaudin Memorial Volume. (J.M. C. Fuerstenau, Editor). P.P. 1285. Vol. 2. "Cationic Flotation of Masabi Rouge Oxidized Taconite". American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. New York, N. Y. U.S.A. (1976).
- 26.-BARKSDALE, Jelks. Titanium, Its Occurrences Chemistry and Technology. 2^{ED} (Ronald Press). New York, N.Y. U.S.A. (1966)
- 27.-GLEMBOLSKII, V.A. Flotation. Academy of Sciences. U.S.S.R. Moscú. (1963).
- 28.-SUTHERLAND, K.L. Principles of Flotation. Australian Institute of Mining and Metallurgy. (1955).

- 29.-FUERSTENAU, W. D. "Adsorption of Flotation Reagents at Mineral Surfaces". Department of Materials Science and Mineral Engineering. University of California. Berkeley, C. A. U.S.A.
- 30.------ "Notas Sobre Tratamientos de Minerales N°26". Manual de La Cyanamid. Cyanamid Internacional, New Jersey. E.U.A.
- 31.-VILLEGAS, Acosta. Arnoldo. Obtención de Concentrados de Ilmenita y su Control Analítico a partir de Arenas Detríticas. Tesis Profesional. Fac. Química. U.N.A.M. México, D.F.(1982)
- 32.-FUERSTENAU, W.D. " The Flotation of Oxide and Silicate Minerals with Physisorbing Collectors". Department of Materials Science and Mineral Engineering. University of California, Berkeley. U.S.A.
- 33.-RAMIREZ, V. C. Concentración del Zircón a partir de Arenas Detríticas. Tesis Profesional. Fac. Química. U.N.A.M. México, D.F. 1983.
- 34.-PHILLIP, Rabone. Concentración de Minerales por Flotación. Comisión de Fomento Minero. (4^{ta} edición). México, D.F.(1975).
- 35.------ "Non Ferrous Metal" Vol. 11, N°1. U.S.S.R.(1983).
- 36.------ Reactivos para Concentración de Minerales en la Fase de Flotación. Laboratorio de Flotación. Depto. de Técnicas de Ventas. México, D.F.
- 37.-DUDENKOV, V.S., Shubov, L.Y. Fundamentos de La Teoría y la Práctica de Empleo de Reactivos de Flotación. Editorial MIR. U.R.S.S.(1980)
- 38.-CARRANZA, Z. Esequiel. J. Concentración de Cromita, Zircón e Ilmenita por Métodos Físicos y Fisicoquímicos a Partir de Arenas de Playa. Tesis Profesional. Fac. Química. U.N.A.M. México, D.F.(1983)

39.-DAVIES, Y. T. y Rideal, E.K. Interfacial Phenomena. Academic Press. P.P. 108, U.S.A.(1963)

40.JORAL, Marfa. Teresa. Fisicoquímica de Superficies y Sistemas Dispersos. Ediciones URM0. Bilbao. España.(1973).

41.----- " Engineering and Mining Journal". A Mc. Graw Hill Publication. Vol. 186. N° 3. P.P. 73 - 76. New York, N.Y. U.S.A.(1985)

42.----- " Engineering and Mining Journal" A Mc. Graw Hill Publication. Vol. 187. N°3. P.P. 53. New York, N.Y. U.S.A.(1986)