



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“CONCENTRACIÓN DE ILMENITA Y ZIRCON A PARTIR DE
ARENAS DE PLAYA”.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA
P R E S E N T A :
SANDRA ALVARADO PALACIOS



MÉXICO, D. F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Rosa Magda Unda Rodríguez.
Vocal: Antonio Huerta Cerdan
Secretario: Faustino Juárez Sánchez
1er. Suplente: Ciro Eliseo Márquez Herrera.
2do. Suplente: Rosa Elva Rivera Santillán

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Procesamiento de Minerales


Facultad de Química, UNAM.

Edificio D Planta Baja, Ciudad Universitaria.

ASESOR DEL TEMA: **M. en C. Faustino Juárez Sánchez**



SUSTENTANTE: **Sandra Alvarado Palacios**



INDICE

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
Objetivo	2
Hipótesis	2
CAPITULO II: ANTECEDENTES	3
Zona de estudio	3
Antecedentes del titanio y circón	9
Mineral de Ilmenita	11
Zircón	14
Métodos de análisis de Ti y Zr	16
Existencia y consumo de Titanio en México	17
Metodos de separación y concentración del titanio y zircon	19
Gravimetricos	19
Magnéticos	21
Electrostáticos	23
FLOTACIÓN EN COLUMNA Y CELDA	25
FLOTACIÓN POR ESPUMA EN CELDA	25
FLOTACIÓN POR COLUMNA	26
Definición de la relación de flujo	30
El agua de rocío como limpiadora del concentrado	31
Función del aire	32
Estudio de la zona de recuperación	32
Zona de limpia	34
Instrumentación de la columna	34
Clasificación de reactivos de flotación	35
Colectores cationicos	36
Colectores aniónicos	36
Reactivos modificadores o reguladores	36
Espumantes	37
CAPITULO III: DESARROLLO EXPERIMENTAL	39
Equipo	39
Procedimientos	43
Análisis Granulométrico	43
Mesa Wilfley	44
Separación Magnética en humedo	45
Elutriación	45
Flotación en celda	46
Fluorescencia de Rayos X	49
Aerociclón	50
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
RESULTADOS	52
Separación Manética	55
Mesa Wilfley	55

Elutriador	56
Densidad	57
Flotación en celda	58
Flotación en Columna	59
Fluorescencia de Rayos X	60
Aerociclón	62
Análisis de resultados y conclusiones	64
Separación Magnética	65
Elutriador	65
Densidad	65
Flotación en celda	65
Flotación en Columna	66
Aerociclón	66
CONCLUSIONES	67
BIBLIOGRAFIA	68
ANEXO 1	70
ANEXO 2	72

Dedicatorias.

EN MEMORIA DE MIS PADRES , ABUELA Y HERMANA:

**Andrés Alvarado Patiño.
María del Carmen Palacios Báez.
Eva Patiño Sánchez.
Martha Alvarado Palacios.**

Qué aunque no estén presentes los llevo en mi corazón.

A MIS HERMANOS :

Gabriela, Andrés y Mauricio porque siempre estemos unidos y muy en especial a ti (yoyo) por el sacrificio que hiciste por mi y ayudarme a terminar lo que mi papá no pudo concluir (ahora vas tu).

A LA FAMILIA PALACIOS

A MIS TIOS Susana y Pedro por el cariño incondicional que me brindaron.
Luisa y Roman gracias por hacerme sentir querida.

A MIS PRIMOS: Martín, Juan ,Susana y Miriam por las muestras de amor fraternal.

A MIS SOBRINOS: Jennifer, Brenda, Marcos, Anthony, Cristian y Andrés quienes con su inocencia me muestran que la vida es bella, nunca pierdan esa alegría.

A MIS AMIGOS DE PRIMER SEMESTRE : Magdalena, Rosalba , Jeanine , David y Toño gracias por su amistad y por tener dentro eso que los hace tan especiales.

A MIS AMIGOS DE LA CARRERA: Liz, Luz, Nacho, Eddie, George , Isra, Agus, Baudelio, Ventura, Vicente, Pablo, Vick, Manuel, Chong, Claudia, Jaz y Vero quienes a pesar de los percances que se pudieran presentar en la escuela , con la espontaneidad y ocurrencia que los caracterizaba me hicieron disfrutar mi vida de estudiante.

Agradecimientos.

A IA UNAM : Por ser mi alma mater y mi fuente de inspiración para ser trascendente.

A LA FACULTAD DE QUIMICA : Por ser mi segundo hogar durante mi estancia estudiantil.

A MI ASESOR DE TESIS: M en C Faustino Juárez Sánchez por el apoyo y por darme la oportunidad de desarrollar un tema diferente.

A LOS QUIMICOS : Patricia Girón García y Rufino Lozano Santacruz.

AI LABORATORISTA : Don Gabriel Por las facilidades otorgadas en el laboratorio, así como del tiempo compartido durante el desarrollo experimental.

A LA FAMILIA MELENDEZ AGUIRRE : Por abrirme las puertas de su casa y el apoyo brindado durante el desarrollo escrito en este trabajo así como de su apoyo incondicional.

A LOS BIBLIOTECARIOS: Por su entrega y atención que tiene para cada uno de nosotros sin distinción , así como de la compañía durante mis horas de estudio.

A MI PADRE : Andrés Alvarado Patiño (Q. E. P. D) Por los valores de lealtad , sencillez y honestidad que me trasmitiste.

A MI ABUELA : Eva Patiño Sánchez (Q. E. P. D) Por ser mi segunda madre y darme ese cariño tan desinteresado que no te correspondía, así como del coraje para salir adelante en la vida.

A MI HERMANO: Mauricio Alvarado Palacios por ser una especie de ángel terrenal, por no dejarme sola , por tus consejos que me ayudan a sobreponerme en situaciones difíciles, porque a pesar de tener un carácter tan distinto al mío eres asertivo en tu actitud conmigo, siendo comprensible, paciente y no exigente, eres quien mejor me conoce y sobre todo crees en mi, por esa chispa y humor ácido tan tuyo que quita el sabor amargo a lo desagradable que se pueda presentar es la mejor medicina que tienes, nunca la pierdas, soy afortunada en ser tu hermana gracias yoyo.

A LA GENTE QUE CREE EN MI : Y a la que no también por ser de cierta forma un impulso involuntario.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de los recursos naturales, es importante en un país en vías de desarrollo como el nuestro, sin embargo; cuando se carece tanto de la tecnología adecuada y de los conocimientos necesarios que permiten la transformación de dicho recurso natural se van descartando las posibilidades de producir, materias primas minerales que llegan a ser útiles desde un punto de vista económico productivo.

México a pesar de contar con una extensa zona de playa en los dos océanos , y de presentar una concentración natural de los minerales contenidos en las arenas; actualmente existe poca información acerca de su explotación , en contraste se tiene el saqueo ilegal de la arena de playa por extranjeros , lo cual resulta alarmante , ya que se pierde la oportunidad de aprovechar los recursos que el propio país genera trayendo como consecuencia un estancamiento en los procesos que permiten explotar este material.

Este trabajo propone un proceso sencillo pero con buenos grados de beneficio de mineral de ilmenita FeTiO_3 en dos zonas, una en las costas de Oaxaca y otra en la paleoplaya de Chiapas.

Los procesos que se desarrollaron, son una aplicación directa de los conocimientos adquiridos en el área de metalurgia extractiva de la carrera de ingeniero químico metalúrgico en la facultad de química de la UNAM. Los procesos empleados fueron de preparación del mineral mediante molienda y cribado, de beneficio por flotación en celda y en columna , así como la implementación de un aerociclón.

Al aplicar dichos procesos a la concentración de arenas de playa, se tiene como propósito mejorarlos mediante consideraciones geoquímicas e incluso implementar un proceso no realizado antes en la carrera resulta novedoso, ya que de acuerdo a los resultados que se obtengan, puede usarse e inclusive innovarse para llevar acabo futuras pruebas de concentración.

Objetivos

Aplicar de los procesos de separación y concentración de minerales a materiales geológicos de baja ley mineral.

Desarrollar un proceso de concentración de ilmenita y circón a partir de arenas de una playa actual y una paleoplaya.

Hipótesis.

Los procesos de separación y concentración de los óxidos tales como el SiO_2 y el Zr_2O_3 resultan complicados, principalmente el de Zr_2O_3 , teniendo un costo elevado su procesamiento, Sin embargo, cuando este mineral se encuentra asociado a otro de interés económico y demanda comercial considerable, resulta atractivo el procesamiento de ambos.

Al tenerse un depósito natural en arenas de playa de Oaxaca y de Chiapas se plantea una técnica de recuperación de ilmenita y zircón mediante procesos de flotación tanto de celda como de columna, haciendo hincapié por la segunda, debido a que el mineral presenta varios componentes y con densidades muy semejantes entre sí, por lo que al aplicar un proceso de flotación en columna, se aprovecha también el efecto de la elutración haciendo más fácil la separación de este tipo de minerales.

CAPITULO II: ANTECEDENTES.

Zona de estudio

CHIAPAS

El principal afloramiento rocoso en el estado de Chiapas es de origen sedimentario con 64%, el suelo ocupa 18.5%, las rocas ígneas intrusivas 14.6%, las ígneas extrusivas con 2.15% y las rocas metamórficas con 0.22% de la superficie estatal; las rocas más antiguas son de aproximadamente 375 millones de años, correspondiendo a la Era del Paleozoico, cubren 16.09% del estado y son del tipo ígnea intrusiva, sedimentarias y metamórficas; se localizan en una franja con dirección noroeste-sureste paralela a la línea de costa.

La Era del Mesozoico abarca la mayor parte de la entidad, entre sus Periodos el Jurásico (180 millones de años) es el menos extenso, con 0.16%, es del tipo sedimentario y se ubica al noroeste del estado; el Triásico-Jurásico (200 millones de años) cubre 2.69% del territorio chiapaneco, de origen sedimentario, están alineadas de noroeste-sureste siguiendo una línea paralela a la costa y, el Cretácico (135 millones de años) el más extenso con 42.49%; sus rocas son sedimentarias y se encuentran principalmente del centro hacia el norte y del oeste al este, intercalándose con rocas del Terciario y Cuaternario; dichos periodos pertenecen a la Era del Cenozoico (63 millones de años), el primero de ellos está representado por rocas sedimentarias e ígneas extrusivas con una cobertura de 20.03%, se localizan en la parte central y norte de la entidad con dirección noroeste-sureste; el segundo ocupa una superficie de 18.54%, sus afloramientos son generalmente suelos y rocas ígneas extrusivas, diseminadas por toda la entidad, sin embargo las unidades litológicas más representativas se sitúan en el oriente y en una franja paralela a la línea costera (Fig. 1).

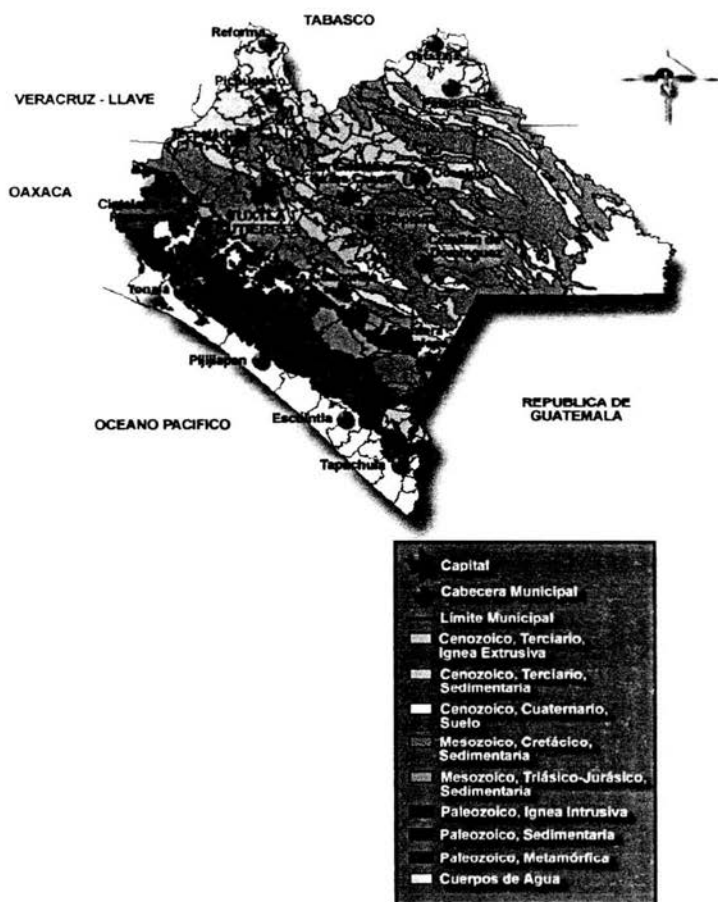


Fig. 1. Mapa Geológico del Estado de Chiapas. INEGI 2003

OAXACA

Las rocas del *Precámbrico* son las más antiguas, datan de aproximadamente 600 millones de años, se ubican al sur de la entidad con una dirección oeste-sureste, son principalmente **metamórficas** y cubren 25.5% de la superficie estatal; las rocas del *Paleozoico* (375 millones de años) abarcan 11.6%, son de origen metamórfico e **ígneas intrusivas**.

Las unidades cartográficas más grandes están en la porción norte y oriental, colindando con el estado de Chiapas; el Periodo de la Era del *Mesozoico* con mayor cobertura es el Cretácico (135 millones de años) con 14.3%, representado por rocas de tipo **sedimentario** y metamórfico, dispersos en todo el estado, concentrados sobre todo en la zona media hacia el norte; otras unidades litológicas abarcan 7.3% pertenecen a la Era del Mesozoico, se localizan al sur, centro y noroeste de la entidad. Las rocas del Triásico-Jurásico (200 millones de años) se sitúan al norte y noreste, son sedimentarias y cubren 3.9%, en el Periodo Jurásico (180 millones de años) las rocas son generalmente sedimentarias, su cubrimiento estatal es de 0.9%, sus principales afloramientos están localizados al occidente, cerca del límite con el estado de Guerrero, otra unidad se encuentra en el extremo opuesto de la entidad, colindando con la parte sur del estado de Veracruz-Llave.

El Periodo Terciario, cubre 25.0% del territorio estatal, compuesto por rocas **ígneas extrusivas** y sedimentarias, datan aproximadamente de 63 millones de años, se distribuyen en la parte central y norte del estado, algunas unidades litológicas colindan con los estados de Puebla y Guerrero, otras unidades ubicadas al norte colindan con el estado de Veracruz-Llave; los suelos del Cuaternario (3 millones de años aproximadamente), se ubican al sur, sureste paralelamente con la línea de costa; otras unidades importantes se localizan al centro de la entidad y al norte limitando con el estado de Veracruz-Llave (Fig. 2) (INEGI, 2003).

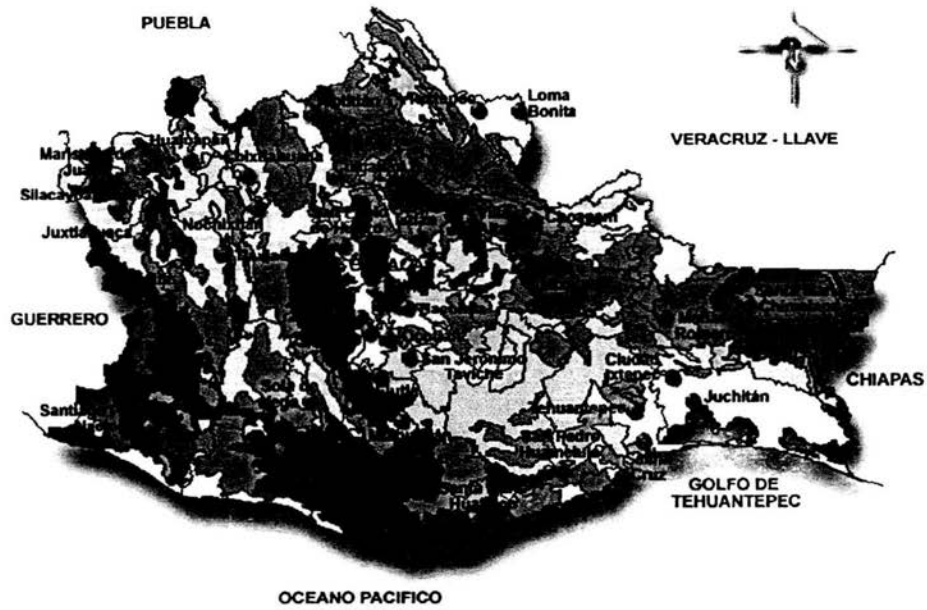
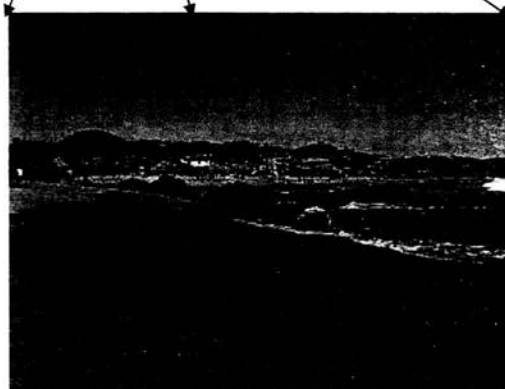
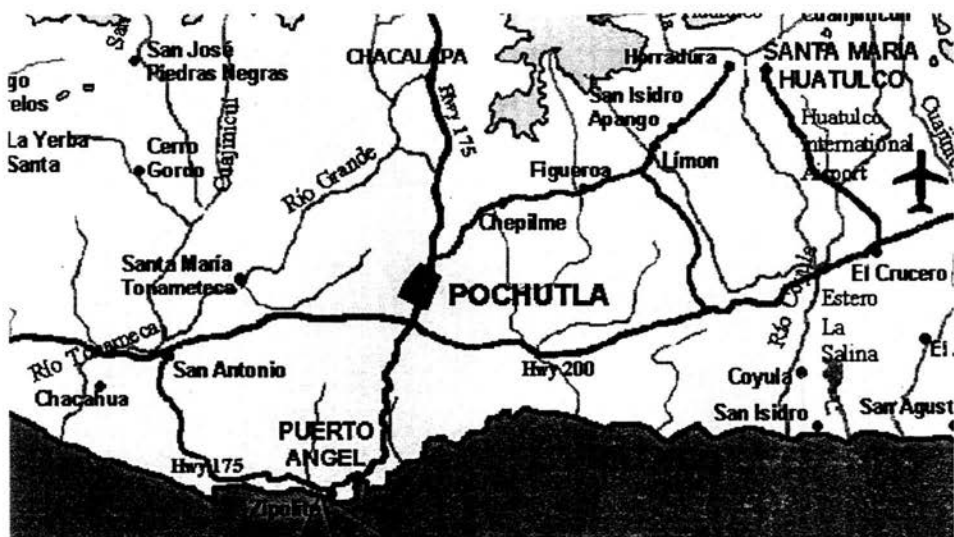


Fig. 2. Mapa Geológico del Estado de Oaxaca. INEGI 2003

PLAYA DE OAXACA.

Ubicación



Playa de Chiapas

El área de estudio se ubica en el litoral del Estado de Chiapas, entre los 15°55' y 14°33' de latitud norte y entre los 93°49' y 92°14' de longitud oeste. En gran parte de este litoral se presentan cordones litorales y albuferas, formadas principalmente por crecimiento de manglares, el cual al cubrir terrenos emergidos produce avances sobre el mar (Tamayo, 1970). El litoral representa la porción oriental del límite meridional de la Planicie Costera Ístmica Chiapaneca. Esta planicie tiene una dirección **NNWSSE**, una pendiente suave y una amplitud promedio de 25 Km. Está limitada hacia el **ENE** por la Vertiente Pacífica de la Sierra Madre de Chiapas o Sierra de Soconusco. La continua emersión del bloque inclinado que forma la Sierra Madre de Chiapas ha dado lugar a una amplia exposición de rocas intrusivas ácidas del Paleozoico principalmente, así como algunos afloramientos de rocas pertenecientes al Complejo Metamórfico del Paleozoico. En el extremo SE de la Vertiente Pacífica de la Sierra de Soconusco afloran rocas volcánicas intermedias que constituyen al Volcán Tacana y cuya altura es de 4,117 m, la cual contrasta notablemente con los 1,500 m de altura media de la Sierra.

El clima en la región es tropical lluvioso. La temperatura en todos los meses es mayor de 18°C y la temporada de lluvias es en el verano, con precipitaciones mensuales superior a los 750 mm.

De acuerdo con los datos de la estación mareográfica más cercana al área de estudio, la de Salina Cruz, Oax., la marea es mixta semidiurna, y entre el nivel de pleamar media y el de bajamar media la amplitud es de 1.094 m (Instituto de Geofísica, 1978).

Las corrientes superficiales tienen en el área de estudio una dirección **SE-NW** a lo largo del año, con velocidades variables entre 0. 1 y 0. 3 nudos.

El oleaje generado a 25° de latitud sur incide perpendicularmente, con un rumbo **SW-NE**, y la mayor altura de olas que ocurren con una frecuencia de 3% o mayor al menos durante dos cuartas partes del año, es de 2.4 a 3.6 m.

Los vientos que llegan a las costas del Pacífico de México se presentan con una frecuencia de 0 a 15 % con una fuerza 4 de la Escala de Beaufort en los meses de enero y julio.

Según Strakhov (1967) la zona costera dentro de la cual se incluye el área de estudio, es una región de intenso intemperismo químico.

Antecedentes del titanio y circón.

El titanio a pesar de no ser un elemento común en México para la industria nacional existe principalmente en los Estados de Oaxaca, Tamaulipas, Chiapas, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Morelos, Nuevo León, Sonora, Zacatecas y Baja California. No se han realizado un estudio detallado de sus yacimientos puesto que se ha concentrado en un solo lugar que es el de Pluma Hidalgo en Oaxaca en donde se han tenido evaluaciones importantes del yacimiento.

Solo dos minerales titaníferos son explotables por contenerlo en suficiente concentración estos son la Ilmenita que es una combinación de Fe-TiO_3 y el mineral Rutilo (TiO_2), pero este último al estar asociado con varias materias primas minerales complica su beneficio

El Ti puede determinarse por métodos gravimétricos, colorimétricos, volumétricos, polarográficos, cromatográficos, amperométricos, rayos X, absorción atómica, espectrográficos, electrolíticos, coulombimétrico y potenciométricos.

Propiedades Físicas y Químicas del Titanio

El Titanio (Ti) forma parte de los elementos de transición ocupando un puesto en el grupo IV dentro del cuarto período de la Tabla periódica, es el noveno elemento en la corteza terrestre, en su estado elemental tiene una forma empaquetada, es decir, hexagonal y su tamaño de celda es $a = 2.45 \text{ \AA}$. Y $c = 4.69 \text{ \AA}$., a 885°C cambia a bcc. (Ramírez, 1983). Los principales datos fisicoquímicos se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1. Datos fisicoquímicos del titanio.

Configuración electrónica basal	$1s^2, 2s^2, 2p^6, 3d^{10}, 4s^2$
numero atómico	22
peso atómico	47.90
Valencia	2, 3 y 4
densidad	$4.507g/cm^3$
punto de fusión	$1609^{\circ}C$
punto ebullición	$3535^{\circ}C$
calor de fusión	5000 cal/mol
calor de sublimación	111.720 cal/ mol a $25^{\circ}C$
Calor específico 0-500°C	0.1386 cal /g / °C
Entropía $25^{\circ}C = 7.24$ cal/ g/ °C	
Coefficiente de expansión térmica	$8.5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}C$, lineal $25^{\circ}C$
conductividad térmica a $25^{\circ}C$	0.41 cal/ seg. /cm ² /°C
Resistividad eléctrica a $25^{\circ}C$	47.8 microohm-cm
Emisividad	0.43

Es ampliamente usado en la industria de construcción de barcos, aviones, autos y maquinaria siendo además pionero en la construcción de impulsores y motores, así como de artefactos espaciales en la industria aeroespacial buena parte de tales usos se debe a su alta resistencia a la corrosión en la Tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas del Ti, las propiedades y características de la ilmenita como fuente de titanio se muestran en la Tabla 3.

TABLA 2. Propiedades mecánicas Alta pureza

Dureza	80-100 Vickers
resistencia a la tensión	30.000-40.000
elongación	40-60%
reducción de área	70-90 %
modulo elástico	15.500.000 psi
resistencia al impacto	100-200 ft-lb
resistencia al esfuerzo constante	82.000
módulo de rigidez 6.600.000 y módulo de ruptura	79.000

MINERAL DE ILMENITA

TABLA 3. Ilmenita

Generalidades	Fórmula química <i>Composición (%)</i> Sistema cristalino	FeTiO ₃ Fe 36,8 %, Ti 31,6 %, O 31,6 %. <i>Contiene a menudo Mg y Mn</i> Trigonal
Propiedades físicas	Color Raya Brillo Clivaje Densidad (g/cm ³) Dureza (Mohs)	Negro de hierro. Opaco Negra a rojo castaño Metálico a submetálico No presenta 4,05 a 4,7 5 a 6
Propiedades ópticas	Color (muestra monomineral) <i>Birreflectancia / pleocroísmo</i> Anisotropía (nícoles cruzados) <i>Reflexiones internas</i> % de reflectancia (en aire) <i>Texturas</i> Diagnóstico <i>Otras observaciones</i>	En aire: café claro a oscuro con tintes grises. En aceite: café de menor intensidad, varía con la orientación. El color varía en presencia de otros minerales <i>Clara. Café rosáceo claro en secciones transversales, café muy oscuro en secciones longitudinales.</i> Fuerte. Los colores varían entre gris verdoso y gris castaño <i>Son raras; cuando se presentan son de color café oscuro</i> 17,0 a 21,1 <i>Son típicas las maclas de presión laminares. A menudo aparece como láminas de exsolución en magnetita. Los agregados granulares son comunes</i> Se reconoce por su baja reflectancia, color gris castaño (más café que la magnetita) y fuerte anisotropía. Las maclas polisintéticas son comunes. <i>Puede ser usada como un geotermómetro imperfecto</i>
Otros	Minerales asociados <i>Ocurrencias</i> Usos	Hematita, magnetita, rutilo, pirita, pirrotita, cromita, pentlandita <i>Especialmente en ambientes magmáticos (intrusivos y extrusivos), pegmatitas y otros depósitos de veta. Es rara en depósitos hidrotermales</i> Es la mayor fuente de titanio, empleado en pinturas y materiales estructurales reforzados

A continuación se muestran en las figuras 3, 4, 5, 6, 7 y 8 petrografías de la Ilmenita

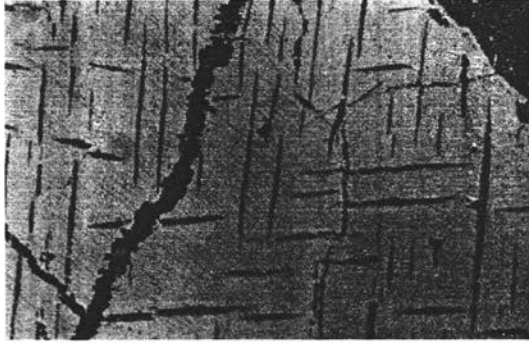


Figura 3.- Exsoluciones de ilmenita y ulvoespínela en magnetita.



Figura 4.- Exsolución de magnetita y ulvoespínela entre dos granos adyacentes de ilmenita, Estados Unidos.

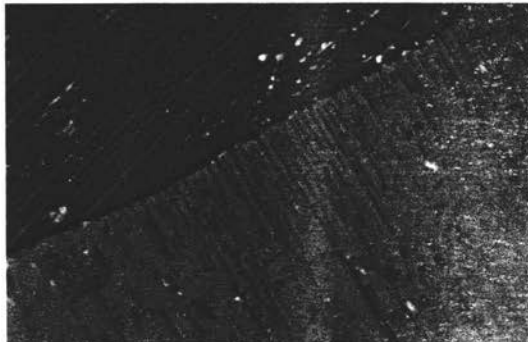


Figura 5.- Vista de la sección anterior con polarizado y nicoles cruzados.

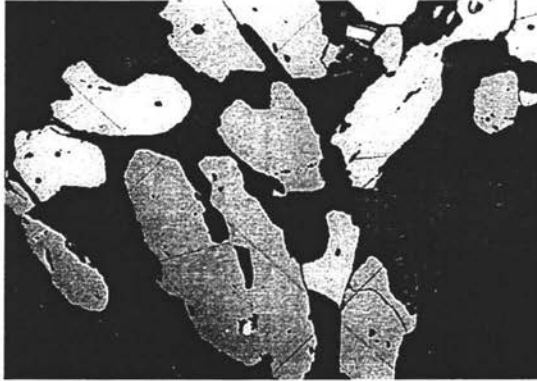


Figura 6.- Ilmenita, Escocia. Rocas intermedias no mineralizadas.



Figura 7.- Ilmenita, magnetita, minerales de óxido de titanio y maghaemita, Gran Bretaña.
Magnetita e ilmenita en basaltos y doleritas.



Figura 8.- Ilmenita, magnetita, minerales de óxido de titanio y hematita, Gran Bretaña. Rocas intermedias no mineralizadas.

Zircon

La referencia del zirconio fue propuesta por el químico Klaproth en 1789 cuando analizaba las piedras preciosas como el jargon, encontró que contenía una tierra a la cual no pudo identificar y posteriormente la denominó zircon verde.

Más tarde fue confirmado el descubrimiento de Klaproth por varios químicos, pero uno llamado Vauquelin en 1797 quien investigó la nueva tierra la denominó zirconia, quien dio detalles acerca de la preparación de éste y de alguna de sus propiedades además de sus compuestos.

En 1824 Berzelius tuvo éxito en aislar una forma impura del metal, pero, a pesar de muchos intentos no pudo lograr obtener el metal dúctil, hasta 100 años después en 1925 Van Arkel y De Boer desarrollaron una técnica la cual hasta la fecha fue el único método satisfactorio para la producción del metal dúctil.

El desarrollo de la producción de zirconio dúctil es debido principalmente a Kroll, quien trabajó en los laboratorios de U. S. BUREAU de MINAS, desarrolló un método de manufactura el cual se expandió a plena escala de producción comercial (Ramírez, 1983).

OCURRENCIA

El zirconio es distribuido por todas partes en la naturaleza, es poco abundante ocupando el lugar número 8 en abundancia en la corteza terrestre. El zirconio de la corteza terrestre contiene aproximadamente 0.028% se encuentra en rocas cristalinas (especialmente en roca granular) en cloritas y esquistos, en gneiss y como capas en minerales de hierro. Se ha encontrado además en pegmatitas areniscas, arenas ferruginosas (que contienen fierro) y en cantidades pequeñas en algunos otros minerales.

El mineral más abundante que contiene el zirconio es un ortosilicato, el cual tiene la siguiente fórmula $4(\text{SiZrO}_4)$ la forma de los cristales tetragonal con una densidad de 4.6 a 4.8 y dureza en la escala de Mohs de 7.5, el zircon contenido en el mineral varía de 61 a 66.8% comparado con 67.2% contenido teórico del silicato normal (Ramírez, 1983). En

las arenas de playa el zircón se encuentra asociado con ilmenita, rutilo y monzonita de donde el zircón es obtenido como escoria de la recuperación del mineral de titanio, el segundo mineral de zircón más importante es la baddeleyita con fórmula ZrO_2 el cual es la forma nativa del óxido de zirconio (el cristal tiene una densidad de 5.4 a 6.02 y una dureza en la escala de Mohs de 6.5).

Los depósitos se encuentran en Brasil (Fig. 9) en un altiplano montañoso, principalmente compuesto por fenolitos (Ramírez, 1983). En la Tabla 4 se muestran las propiedades químicas y físicas.

TABLA 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL ZIRCONIO

Símbolo y fórmula	Zr
Número atómico	40
Configuración electrónica	$1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^{10}, 4s^2, 4p^6, 4d^2, 5s^2$
Color	blanco grisáceo
Peso Atómico	91.22
Peso específico (a 20° C)	6.5
Volumen Atómico (cm ³ /átomo-gr.)	14.06
Punto de fusión	1830 ° C
Punto de ebullición	5000 ° C
Calor específico (cal/ gr.)	0.067
Calor de fusión (kcal/kg)	-----
Calor de sublimación (kcal/kg)	-----
Dilatación lineal (Coefx10 ⁵ a 25°)	5.2
Conductividad térmica(cal/cm ² /cm/seg a 25 ° C)	0.04
Resistividad eléctrica (micohomios-cm)	45
Electronegatividad (escala de Pauling)	1.4
Potencial de la 1ª ionización	6.835
2ª	12.916
3ª	24.00
4ª	33.8
Potencial de electrodo(M / M ⁴⁺ ; en V)	- 1.43
Radio metálico (en Å°)	1.589
Radio iónico M ⁴⁺ (en Å°)	0.74
Calor de atomización (Kcal / mol : A 25 ° según NBS de USA)	125
Estados de oxidación	+2,+3,+4

Cotton (1999).

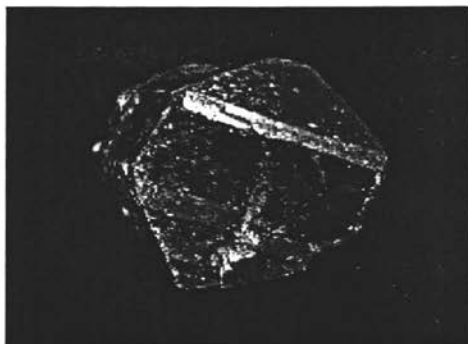


Figura 9.- Cristal de circón de Brasil.

Métodos de Análisis de Ti y Zr.

En años pasados al igual que los elementos presentes en los minerales, el titanio se había determinado utilizando sólo métodos gravimétricos comunes, pero conforme se han desarrollado métodos más precisos las técnicas analíticas progresan, aunado al desarrollo de aparatos más sofisticados han permitido una amplia utilización de métodos automáticos que permiten la detección de trazas mínimas del elemento a determinar, existentes en compuestos minerales con gran ahorro de esfuerzo y aumento en la precisión y reproducibilidad.

FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Los espectros de rayos X característicos se excitan cuando se irradia un espécimen con un haz de radiación X de longitud de onda suficientemente corta. El método de fluorescencia requiere de tubos de rayos X de alta intensidad, detectores muy sensibles y sistemas ópticos de rayos X adecuados. La intensidad es importante, pues afecta al tiempo que se necesitará para medir el espectro. Se tiene que acumular un cierto número de cuantos en el detector para que el error estadístico de la medición se reduzca lo suficiente. La sensibilidad del análisis, esto es, la concentración detectable más baja de un determinado elemento en el espécimen, dependerá de la relación pico-radiación de fondo para las líneas espectrales (Willard, 1975).

Al realizarse la fluorescencia de rayos X el espécimen situado en el portamuestras se irradia con un haz de rayos X primarios sin filtrar, lo que causa que el elemento presente emita sus líneas fluorescentes características. Una porción del haz fluorescente dispersado es colimada por una rendija de entrada al goniómetro y dirigida a una superficie plana del cristal analizador. Las líneas de radiación, reflejadas pasan a través de un colimador auxiliar (rendija de salida) hacia el detector, donde la energía de los cuantos de rayos x se convierten en impulsos eléctricos o conteos (Willard, 1975).

EXISTENCIA Y CONSUMO DEL TITANIO EN MÉXICO

El titanio no es un elemento común en México para la industria nacional. Aunque se ha determinado su existencia, principalmente en los estados de Oaxaca, Tamaulipas, Chihuahua, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Morelos, Nuevo León, Sonora, Zacatecas, Baja California y México, no se ha realizado un estudio detallado de sus yacimientos, pues sólo en el estado de Oaxaca, en la localidad de pluma Hidalgo se han efectuado estudios serios tendientes a la evaluación de un importante yacimiento que existe en el lugar.

Por eso entre otras razones, en nuestro país no se producen minerales de titanio. Es necesario que la industria lo requiera en cantidad suficiente para que sea más económico explotarlo aquí, sin tener que recurrir a la importación como hasta ahora.

Las estadísticas mencionan el año de 1939 como base para observar los movimientos de importación que desde entonces se han efectuado, ya que por esa época se inicia su utilización en la industria. En México la ilmenita se usa básicamente a la obtención del bióxido, en tanto el rutilo es empleado en la fabricación de electrodos de soldadura, para la obtención de titanio metálico, y en menor escala para la cerámica, fibra de vidrio y productos químicos. El bióxido obtenido se emplea como materia prima en industrias del tipo de pigmentos, pinturas, hules y lacas (Acosta, 1982).

A partir de la escoria titanífera (65% de TiO_2). La Compañía de Pigmentos y Productos Químicos S.A., elabora bióxido de titanio, y ella misma elabora el 100% de las importaciones de escoria. Pero como tampoco produce suficiente bióxido, el resto debe importarse, y en el periodo de 1964-69 se compraron 280 000 Kg. en promedio anual que con erogaciones de \$1 500 000 (pesos). Las compras al exterior de minerales y concentrados de titanio se han incrementado de 12 000 000 Kg. en 1964 hasta 22 000 000 Kg. en 1968 y se pagaron por ellas \$7 600 000 y \$ 12 700 000 respectivamente todos ellos proceden de la compañía Québec Iron and Titanium Corp de Canadá que es de las mejores productoras del mundo. También a nivel mundial, la producción de titanio se ha mantenido estable, sin presentar incrementos notables.

MÉTODOS DE SEPARACIÓN Y CONCENTRACIÓN DEL TITANIO Y EL ZIRCON.

Gravimétricos

ELUTRIACION

Es un proceso de clasificación de partículas por medio de una corriente de fluido ascendente generalmente agua o aire, el proceso es el inverso de la sedimentación por gravedad.

Todos los elutriadores consisten en uno o más columnas de separación de profundidad, las partículas de alimentación introducidas dentro de las columnas de clasificación se separan en dos fracciones de acuerdo a sus velocidades terminales (Fig. 10), la elutriación se lleva a cabo hasta que no hay signos visibles que tenga lugar una clasificación adicional o hasta que la proporción en el cambio de los pesos de los productos es despreciable.

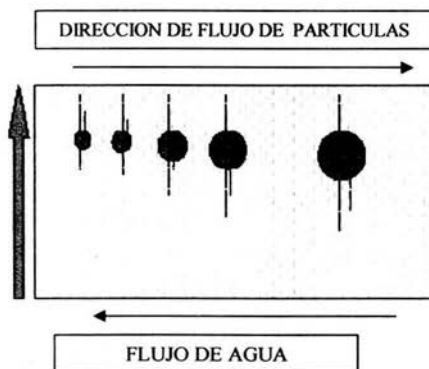


Fig. 10. Las partículas del mineral se mueven en dirección opuesta al flujo de agua que entra al elutriador.

El material de alimentación se lava en el primer tazón, donde se retienen las partículas más gruesas todas las partículas menores del tamaño determinado por la velocidad del agua en la columna de separación correspondiente es solo la mitad de la primera, de modo que las partículas más finas se quedan en el tazón mientras que el derrame pasa por sifón, hacia el siguiente tazón y así sucesivamente.

- El proceso es prolongado, pero no requiere atención.
- La velocidad del fluido no es constante a través de la columna de separación siendo un mínimo en las paredes de la columna y un máximo en el centro.

MESA WILFLEY

La mesa Wilfley es utilizada como método de concentración aplicable a aquellas menas en las que se tiene una diferencia notable en la gravedad específica de los minerales que la constituyen. La mesa Wilfley es una mesa de sacudimientos que esta constituida por un tablero plano de forma rectangular que puede estar montada sobre soportes ó guías que permite que efectúe un movimiento alternativo en su propio plano en posición paralela al lado más largo.

El movimiento se efectúa por medio del cabezal de la mesa que determina que la inversión de movimientos sea más rápido al final de la carrera de ida que al final que la de vuelta. Este movimiento reciproco tiene una aceleración asimétrica cuyo efecto neto es el de causar un transporte intermitente de las partículas sobre la mesa (Wills 1980).

Las variables que intervienen en la concentración por mesa Wilfley (Fig. 11) son:

- a) Efecto de flujo
- b) Efecto de la pendiente o ángulo de inclinación de la mesa.
- c) Efecto de la velocidad de pulsación
- d) Efecto de los rifles
- e) Efecto del tamaño y densidad de las partículas.

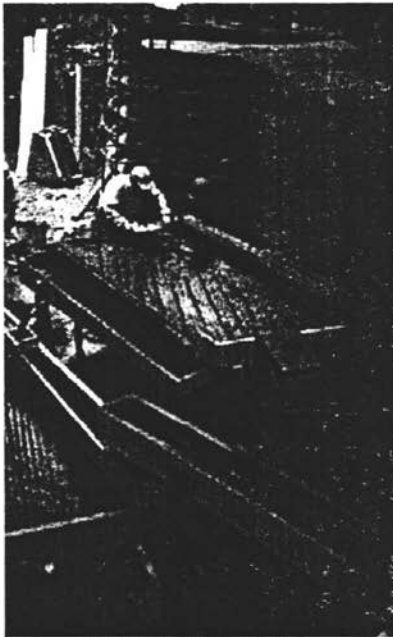


Figura 11. Mesa Wilfley.

Magnéticos

SEPARACIÓN MAGNETICA

Es la técnica para separar materiales magnéticos de los no magnéticos. Para lograr la separación, algunos de los materiales deben ser magnéticos, ya sean fuerte ó débilmente. Para lograrlo se utiliza la fuerza para producir la diferencia de movimiento en la mezcla de sólidos pasando a través del campo magnético.

La potencia del campo magnético es expresada en densidad de flujo por unidad de área ó sección normal a la dirección del flujo. Cada tipo de separadores magnéticos se basa en diferentes tipos de modelos de campo, el cual es referido al uso del separador, la potencia que se usa es alta, media y baja. El campo producido por el magneto puede

tener una variación de intensidad. La partícula permeable en este campo variante se mueve hacia el punto de más alta intensidad.

Los separadores magnéticos son comúnmente hechos por el uso de susceptibilidad de los minerales aún con pequeñas variaciones en su grado magnético. Los minerales con susceptibilidad abajo de 0.4 son fáciles de separar de los minerales no magnéticos y con un poco más de dificultad la separación puede ser hecha sobre materiales de susceptibilidad de 0.2 (Wills 1980).

SEPARADOR MAGNÉTICO

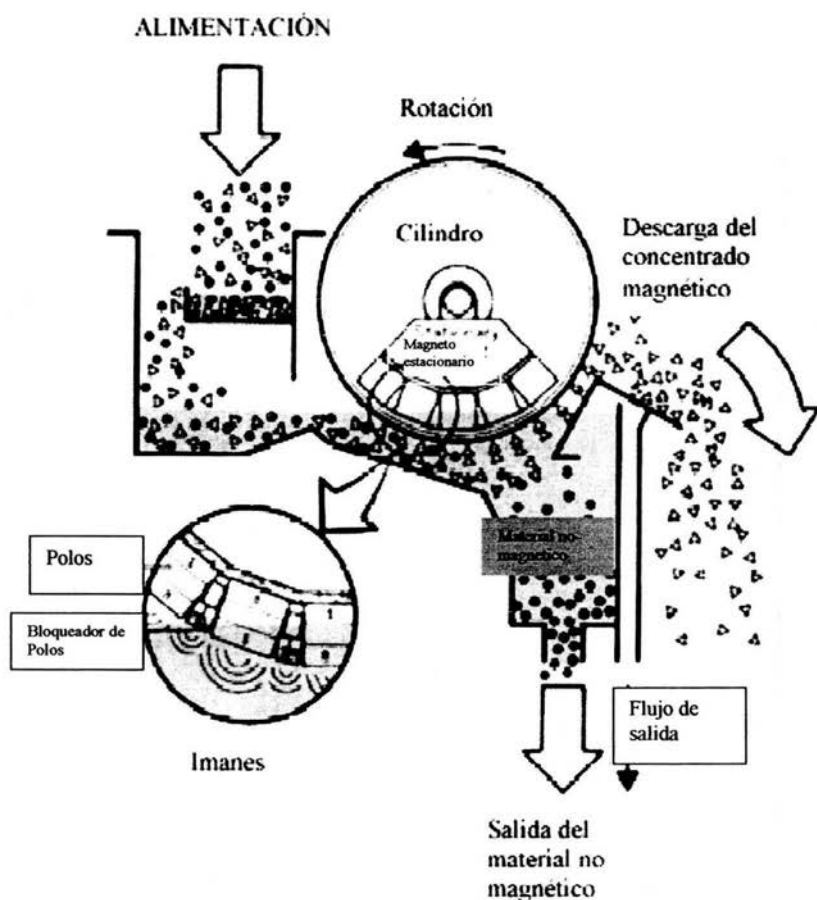


Figura 12. Separador magnético giratorio.

Electrostáticos

SEPARACION ELECTROSTATICA (AEROCICLON)

La separación electrostática se aplica como proceso de concentración sólo a un pequeño número de minerales; sin embargo, cuando es aplicable con frecuencia se le combina con los dispositivos de separación por gravedad y de separación magnética para separar los minerales no sulfurados entre sí.

La separación electrostática tiene su aplicación más importante en el procesamiento de las arenas de playa y depósitos aluviales que contienen minerales de titanio, en las plantas procesadoras de las arenas de playa, donde la concentración inicial por separación gravimétrica separa la sílice, seguida de un proceso de secado, se utiliza la separación electrostática para separar el rutilo y el circón (Errol, 1990).

Existen dos tipos básicos de separador electrostático, que pueden describirse como separadores electro-dinámicos y electro-estáticos, a los primeros se les llama separadores de alta tensión; y donde su alimentación es acarreada por el rotor y las partículas que se cargan en dicha alimentación aceptan una carga por bombardeo de iones. Las partículas conductoras entregan su carga al rotor conectado a tierra y son lanzadas por la fuerza centrífuga; luego pasan a estar bajo la influencia del campo electrostático del electrodo no ionizante y son atraídas desde la superficie del rotor.

Las partículas no conductoras no son capaces de disipar su carga rápidamente hacia el rotor, y en consecuencia son retenidas en la superficie del rotor, y a medida que el rotor carga se va perdiendo lentamente y las partículas se desprenden del rotor. El tamaño de una partícula influye en su acción en el separador, ya que la carga que lleva en la superficie una partícula gruesa es menor en relación con su masa que la de una partícula fina. En consecuencia, una partícula gruesa es lanzada con mayor facilidad de la superficie del rotor, mientras que las partículas finas tenderán a incorporarse de preferencia a la fracción no conductora.

Los separadores de alta tensión trabajan en un intervalo grande de tamaño de partículas, tratándose de arenas de playa, es posible trabajar en un intervalo de 50-100 μm , aunque es más común y deseable operar en tamaños más pequeños (Errol, 1990).

Hay disponibles un número de variables de operación para optimizar el rendimiento del separador, la estrategia de separación consiste frecuentemente en incrementar la rapidez de alimentación hasta que la calidad del producto alcanza el nivel mínimo aceptable. Los demás ajustes de operación se determinan en general mediante pruebas, hechas en una unidad a escala piloto en la unidad de producción.

En cuanto a los separadores electroestáticos del tipo electro-estático se fabrican de dos tipos, uno del tipo de rotor y otro del tipo de placas.

En los separadores electro-estáticos, las partículas finas son las más afectadas por las fuerzas débiles que intervienen, y en consecuencia, el producto conductor contiene partículas conductoras más finas, como estos separadores actúan sobre las partículas conductoras, en particular se usan principalmente en la limpieza de pequeñas cantidades de rutilo e ilmenita, y de concentrados de circón. Con la separación electrostática es posible separar partículas no conductoras con diferentes propiedades eléctricas.

El tamaño de las partículas que se alimentan a los separadores electrostáticos no puede controlarse con facilidad. Tratándose de minerales de arenas de playa, la alimentación se acepta tal como está porque el material tiene ya una clasificación natural.

Para lograr una separación, todas las superficies de la partículas deben de estar libres de humedad, las partículas de arenas de playa están recubiertas a menudo con materiales orgánicos, y si no se remueve dicho recubrimiento, se tiene dificultades para lograr la separación, se aplican diversas técnicas de limpieza, desde el simple lavado (que abarcan el lavado por rozamiento) hasta el lavado cáustico, también cuando hay lamas presentes, deben separarse antes de del secado previo a la separación electrostática (Errol, 1990).

Los mecanismos de separación electrostática que deben considerarse son: la carga de partículas, la separación que ocurre en una superficie puesta a tierra y la separación causada por la trayectoria de las partículas.

FLOTACIÓN EN COLUMNA Y CELDA

FLOTACIÓN POR ESPUMA EN CELDA

El proceso de flotación en espuma es un método fisicoquímico que consiste en la concentración de minerales finamente molidos que comprende el tratamiento químico de una pulpa de mineral que se desea flotar, esto se logra a través de los promotores o colectores, que son los reactivos que imparten a los minerales una superficie repelente al agua o que produce una partícula hidrofóbica que se adhiere a la burbujas de aire. Estas burbujas de aire llevan consigo los minerales seleccionados a la superficie de la pulpa y forman una espuma estabilizada que es recogida mientras los otros minerales permanecen en la pulpa.

El proceso de flotación puede aplicarse a cualquier mezcla de partículas que se hallen esencialmente libres una de la otra y que sean lo suficientemente pequeñas para ser elevadas por burbujas de gas ascendentes (Rabone, 1975).

La flotación por celda abarca las siguientes etapas.

- 1) Moler el mineral a un tamaño lo suficientemente fino para separar los minerales valiosos uno de otro, así como los minerales de la ganga.
- 2) Formar condiciones favorables para la adherencia de los minerales deseados a las burbujas de aire.
- 3) Formar una corriente ascendente de burbujas de aire en la pulpa del mineral
- 4) Crear una espuma cargada de mineral en la superficie de la pulpa.
- 5) Extraer la espuma cargada del mineral.

Hay cuatro tipos de variables que nos conciernen, la primera categoría de ellas son las variables de distribución, estas son las que causan fluctuaciones y distribuciones en el sistema. Tales variables incluyen la fluctuación de la composición mineralógica, grado de alimentación y tamaño de distribución, frecuentemente, estas variables son extremadamente difíciles de cuantificar aunque impactan directamente al control de variables.

El segundo grupo son las variables de control, estas cuantifican por separado la eficiencia de la columna, esto es, grado del producto, recuperación y tonelaje alimentado. La tercera lista de variables es la referente a la medición de variables, estas definen los parámetros individuales del sistema las cuales describen el circuito de flotación en columna, estas incluyen flujos volumétricos de alimentación, colas, agua de lavado, nivel de pulpa y la razón Q_T / Q_F , Tabla 5.

Tabla 5. VARIABLES DEL PROCESO DE FLOTACIÓN

PRINCIPALES VARIABLES	MEDICION DE VARIABLES
% de ley colas y agua	Flujos volumétricos (alimentación de rocío)
% de recuperación	Densidad de pulpa
% de sólidos de alimentación	Razón Q_T/Q_F
Tonelaje alimentado de sólidos	Adición de reactivos y surfactantes
Nivel de pulpa	pH
Tamaño de burbuja	Aeración
Longitud de la columna	
Razón Q_T/Q_F	

FLOTACIÓN POR COLUMNA

Gran parte de las sustancias que la humanidad utiliza en su vida diaria, se encuentran mezcladas con otras de forma natural, el hombre las separa para utilizarlas en una forma pura ó para someterlas a transformaciones posteriores. En la metalurgia, el objetivo inicial consiste en obtener un metal puro a partir de los minerales. Los minerales en la mayoría de los casos no se encuentran en estado libre sino que están asociados a varias impurezas conocidas como ganga.

Debido a una continua explotación de los recursos minerales y a un relativo empobrecimiento de los minerales factibles de explotar, provoca buscar nuevas formas de concentración que se adapten a las características del mineral utilizando el proceso de flotación.

La flotación con espuma consiste fundamentalmente en hacer pasar corriente a una celda con sólidos minerales en suspensión mediante la agitación y adición adecuada de reactivos, produce que los sólidos de interés se adhieran a las burbujas y por la gran diferencia de densidad de las burbujas con respecto a la suspensión denominada en el lenguaje metalúrgico pulpa, hace flotar al mineral que después es separado mecánicamente o por simple derrame cuando el proceso se realiza de manera continua. La columna de flotación con espuma es uno de los procesos de separación más activamente estudiado y desarrollado.

El mecanismo operante de la columna de flotación, es el principio de contacto a contra corriente entre la pulpa del mineral (descendente) y la burbuja de aire (ascendente), sin agitación mecánica y un enriquecimiento de concentrado por un lavado con rocío de agua en la parte superior de la columna. Consecuentemente, la columna ofrece varias ventajas mecánicas y operacionales incluyendo simplificación de construcción, ausencia de partes sólidas móviles, bajo consumo de energía eléctrica, alta recuperación y altos grados respecto a las celdas convencionales. A pesar de estos beneficios aparentes, la aplicación de la columna de flotación ha sido extremadamente lenta en los últimos años.

La celda de flotación en columna fue inventada por los canadienses Pierre Boutin y R. J Tremblay, en la década de los sesentas. La flotación en columna se efectúa en un cilindro alto en el cual se alimenta con una pulpa de mineral debidamente acondicionada con una altura que varía de $\frac{1}{4}$ a un $\frac{1}{3}$ de la parte superior de la celda.

La pulpa en su descenso se encuentra con una corriente opuesta de burbujas de aire y un flujo descendente de agua (agua de lavado). El concentrado se recoge en la parte superior de la columna mediante un rebosadero, mientras que las colas se descargan en el fondo. El aire se suministra cerca del fondo de la celda con un aspersor. El aspersor puede fabricarse de varios materiales y configuraciones, todos están diseñados para producir pequeñas burbujas de aire. El agua de lavado se alimenta a través de un rociado situado de 10-20 cm, debajo de la parte superior de la celda.

Un método a escala para la flotación en columna como el descrito por G. S Dobbey y J. A Finch (1985) proveen un sistema que no indica directamente el tamaño de la columna requerida, sino que más bien indica la recuperación de un mineral para un tamaño de

columna con condiciones específicas de flujo. Desde el punto de vista de un operador tres consideraciones básicas parecen ser relevantes para alcanzar altas recuperaciones: tiempo de residencia de la partícula del mineral, relación altura/diámetro y constante de flotación.

El tiempo de residencia es un factor significativo en la recuperación del mineral, la constante de flotación está influenciada por varios factores tales como: tamaño de burbujas de gas, tamaño de partícula y comportamiento particular del propio mineral, las variables que se aplican al modelo de la flotación por columna realizado por Dobbey y Finch con el objeto de observar la influencia en la recuperación del mineral.

Una vez definida la geometría y las dimensiones de la celda de flotación en columna, con base a la recuperación requerida, se establece una estrategia de operación definiendo cuáles serán las condiciones y mecanismos de operación con el objeto de controlar adecuadamente las interacciones de las variables dentro del proceso.

Ameluxen, propone una estrategia de operación y la subdivide en:

- a) Balance de masa y volumen en la columna de flotación
 - Relación de flujo negativo.
 - Relación de flujo positivo.
- b) Rociado de agua de lavado
- c) Función de aire
- d) Estudio de la zona de recuperación
- e) Instrumentación de la columna

a) Balance de masa y volumen:

Para desarrollar el balance, se deberá considerar dos tipos de relación de flujo: negativo y positivo.

Se tiene una relación flujo negativo, cuando el flujo de alimentación es siempre más grande que el flujo de las colas, creando un volumen excesivo que tendrá que ser derramado junto con el concentrado.

Debido a que las operaciones de relación de flujo negativo requieren que el agua alimentada sea arrastrada con el concentrado, se obtiene un concentrado con baja ley, esto es generalmente notable en las operaciones en donde los materiales de la ganga van en el agua en forma de lamas ó jales, por lo que no hay justificación para manejar columnas con relación de flujo negativo.

Sin embargo, algunos operadores afirman que la recuperación aumenta forzando al concentrado a descargar en el derrame reduciendo la salida del mineral en las colas. Como podemos ver el simple medio de transporte de concentrado a la parte superior de la columna se efectúa con ayuda del aire en forma de burbuja. Una relación de flujo negativo, ciertamente no paga la cantidad de contaminación cuantificada por la cantidad de material estéril que pueda salir de la columna vía derrame del concentrado.

Para la relación de flujo positivo el flujo de las colas es mayor que el flujo de alimentación tanto como:

$$Q_T / Q_F = \text{relación} > 0 \quad (1)$$

En donde Q_T es el flujo volumétrico de las colas, y Q_F es el flujo volumétrico a la alimentación.

La singularidad de éste caso es que menos del 1% de agua alimentada llega con un producto concentrado, significa que virtualmente, toda el agua del concentrado viene del agua de rocío.

Sí se supone que toda el agua de alimentación en la pulpa que acompaña al concentrado es despreciable, entonces el agua de rocío requerida para formar la pulpa de concentrado es:

$$Q_{WC} = 4 \% C * L / S \quad (2)$$

Donde Q_{WC} = es el flujo volumétrico del agua de rocío reportado en el concentrado y C es el concentrado y puesto que se requiere de algo de agua de rocío par formar la relación de flujo positivo, tenemos:

$$Q_{WT} = Q_F * Q_T / Q_F - 1 \quad (3)$$

Donde Q_{WT} es el flujo volumétrico del agua de rocío reportado en colas.

El requerimiento del agua total de rocío será:

$$Q_{SW} = 4 * C L / S + Q_F (Q_T / Q_F - 1) \quad (4)$$

Donde Q_{SW} es el flujo volumétrico de agua en el rocío, L / S es la relación en peso de líquido a sólido.

b) Agua de rocío.- El agua de rocío en la parte superior de la columna tiene cuatro funciones principales en la flotación.

- 1) Definir la relación Q_T / Q_F .
- 2) Mantener el nivel de la pulpa.
- 3) Limpiar el concentrado.
- 4) Lubricar el concentrado.

DEFINICIÓN DE LA RELACION DE FLUJO

Esta parte es necesaria para asegurar la forma de operación de la columna que sea en verdad del tipo positivo. Cualquiera que sea la relación, el rociado de agua puede ser la diferencia. Esto es deseable para mantener una relación de flujo entre 1 y 1.1 para evitar la adición excesiva de agua en el circuito de la columna.

Agua de rocío como medio para mantener el nivel de pulpa. El agua de rocío mantiene el nivel de pulpa por la percepción de cualquier fluctuación neutralizándola con las variaciones del flujo.

Esto satisface la siguiente ecuación:

$$Q_F + Q_{WS} = Q_T + Q_C \quad (5)$$

Donde Q_C es el flujo volumétrico al concentrado.

EL AGUA DE ROCIO COMO LIMPIADORA DEL CONCENTRADO

La dirección de flujo contraria a la elevación a la columna, provoca que el agua de rocío sea eficiente en la limpieza del concentrado, ya que el inicio de la elevación de la burbuja existe un arrastre de partículas con valores y con ganga, la acción de limpieza toma lugar unos pocos centímetros arriba y debajo de la interfase pulpa-espuma.

AGUA DE ROCIO COMO LUBRICANTE DEL CONCENTRADO

En la flotación de minerales, generalmente ha sido aceptada la práctica del control de la alimentación ó de la densidad de pulpa en colas, esto es; % de sólidos en peso, como un factor importante que afecta a la recuperación y a la ley, no obstante ha sido raro dar importancia alguna a la densidad de la pulpa del concentrado, ya que generalmente es un producto sobre el cual el control físico no puede ser ejecutado a parte del control de la ley.

En la flotación por columna es evidente que el concentrado requiere agua y aire en el derrame, aunque sugiere que el concentrado en una columna de espuma viajará a través de la pared, zona donde existe agua suficiente para darle la fluidez. Esta figura nos da una idea de la cantidad requerida de agua por el concentrado, conociendo el tonelaje y la ley. Así:

$$C = \text{Rec} * F * f / c \quad (6)$$

Donde f / c es la relación de % de alimentación a concentrado.

Sustituyendo la ecuación 6 en la 4, el agua de rocío tendrá que regularse en tanto se descarga.

$$Q_{ws} = (4 * \text{Rec} * F * f / c * L / S) + Q / F (Q_T / Q_F - 1) \quad (7)$$

Teniendo en cuenta que la relación es valida sólo en la parte superior de la columna.

Coffin y Cienski reportan que el aumento de agua de lavado está asociado con un aumento en la recuperación y que esta deberá estar siempre en suficiente cantidad según las ecuaciones anteriores, al excederse en la cantidad de agua causa una ligera disminución en el grado, puesto que el agua es estrictamente controlada por la adición de aire y un ligero exceso de aire puede cambiar el funcionamiento de la columna hacia la disminución de la curva de ley-recuperación.

FUNCION DEL AIRE

El aire adicionado en el fondo de la columna a través de los espesores fluye hacia arriba chocando con el mineral en un flujo descendente de la pulpa; dado que ocurren colisiones burbuja de aire- partícula, la burbuja se carga con partículas flotables. Se han observado que la velocidad de las burbujas en un rango de 6-15 m /min., mientras que la velocidad de la pulpa oscila de 0.3 a 1 m / min.

Los aspersores son piezas fundamentales en la producción de las burbujas, sus deficiencias son disminuidas con la adición de espumantes. El requerimiento básico de un espesor es producir una burbuja pequeña capaz de lograr una fracción volumétrica dentro de la columna (holdup).

El volumen de aire burbujeadado introducido en el fondo de la columna puede aumentar hasta en un 250% mientras baja, en tanto que el flujo sólo aumenta un 36%. La fracción volumétrica del aire en la columna es directamente proporcional al flujo volumétrico de aire en el aspesor e inversamente proporcional al flujo de la burbuja.

ESTUDIO DE LA ZONA DE RECUPERACIÓN

El tamaño de la columna está en función del tiempo de residencia del material tratado exactamente como en las celdas convencionales. Esto ha sido una teoría aceptada, dado que la pulpa viaja hacia abajo, el encuentro de las burbujas de aire dentro de la columna en la que las partículas del mineral son atrapadas y llevadas a la zona de limpia. El % de recuperación está en función de varias variables, una de ellas es el tiempo de residencia.

Dobby y Finch definen que por propósitos de estudio la columna consiste en dos zonas: la zona de colección, donde ocurre la recuperación de la partícula y la zona de limpieza donde se genera una cama de burbujas a contra flujo con el agua de lavado. Las condiciones de mezclado de la zona de colección han sido caracterizadas usando los resultados de experimentos realizados con tasadores en las columnas de la planta Mines Gaspé. Los mismos experimentos demostraron la casi suspensión de entrada de la ganga en la zona de limpieza.

Las velocidades típicas superficiales (flujo/área de sección transversal de la columna son: gas, 1.0-3.0 cm/s; pulpa en la zona de recuperación, 0.5-0.20 cm/s (hacia abajo) y agua de lavado en la zona de limpieza, 0.15-0.5 cm/s (hacia abajo).

ZONA DE COLECCIÓN

Una partícula de mineral es colectada por una burbuja de aire por colisión seguido de un enlace debido a la naturaleza hidrofóbica de la superficie del mineral, ó debido a la introducción de la partícula dentro de la capa límite y levantada por la burbuja. El proceso de colección en una columna puede ser estudiado considerando una burbuja de aire elevándose a través de un flujo a contracorriente de pulpa.

La recuperación está determinada por tres factores: la constante de recuperación, el tiempo de residencia de las partículas en la zona de colección y las condiciones de mezclado en la zona de colección.

En un extremo del área de mezclado donde el flujo es alimentado, el tiempo de residencia de todos los elementos del fluido es el mismo. Consecuentemente, existe un gradiente de concentración del mineral flotable a lo largo del eje axial. En el otro extremo se tiene un reactor de mezclado, donde la concentración es la misma a través del reactor.

Las operaciones para la burbuja en la columna se efectúan con un flujo relativamente bajo y con tamaños de burbuja pequeños, siendo éstos localizados en la zona de recuperación de la columna de flotación.

ZONA DE LIMPIA

Las condiciones de flujo en la zona de limpia no son aún bien entendidas; ellas son dependientes de factores tales como la velocidad del gas la relación Q_T / Q_F , % de sólidos y el flujo de agua de lavado reportado en concentrado y colas.

El tiempo de residencia de las burbujas en la columna industrial es largo comparado con la agitación mecánica (mayores a 10 segundos). Consecuentemente en muchas aplicaciones (especialmente en limpia) las burbujas pueden llegar a cubrir con partículas colectoras apenas arriba del fondo de la zona de limpia. Por lo tanto existe la posibilidad de que una fracción de sólidos colectados sean reciclados en la zona de limpia a la zona de recuperación.

INSTRUMENTACIÓN EN LA COLUMNA

Ciertamente los mecanismos de operación se facilitan cuando al sistema se le controlan por algunos instrumentos. La instrumentación instalada en la máquina de flotación en columna es directamente proporcional al grado de control deseado, sistemas superfluos y capital disponible.

En la construcción de una columna, un 80% de los costos puede provenir por una adecuada instrumentación, si bien la columna de flotación ofrece distintas ventajas para mejorar la recuperación y la eficiencia de los circuitos de flotación, la noción de que la celda de flotación opera virtualmente por ella misma después de haber arrancado, es infundada debido a que como ya se mencionó existen fluctuaciones que impiden operar en condiciones estables.

Las variables de proceso tales como el nivel de pulpa, velocidad del gas en el volumen de la columna, tamaño de burbuja, flujo de aire, relación Q_T / Q_F , etc. Deberán ser medidos y monitoreados constante y correctamente con el objeto de lograr un máximo y eficiente funcionamiento. En si, perturbaciones debidas a los cambios en la composición metalúrgica, distribución de tamaño, grado de oxidación del mineral, pH del agua y

dureza del agua deben ser considerados para asegurar un efectivo funcionamiento metalúrgico.

La automatización de una columna de flotación se realiza definiendo la interacción de los parámetros del proceso y los circuitos de control. El paso inicial en el análisis de cualquier problema de control en la flotación es la identificación en las variables importantes las cuales describen el sistema (Dobby 1985; Amelunxen, 1984).

CLASIFICACION DE REACTIVOS DE FLOTACIÓN

Generalmente los reactivos suelen clasificarse en tres grupos.

Reactivos colectores

Reactivos modificadores (reguladores)

Reactivos que producen espuma (espumantes)

Reactivos colectores:

Son las sustancias usadas en flotación para transformar los minerales seleccionados en repelentes al agua, el cual logran al absorber los iones y moléculas sobre la superficie del mineral, bajo estas condiciones, el nivel de energía del mineral hidratado en la superficie se reduce.

Las características de casi todos los colectores es que son una molécula asimétrica compleja en la estructura y que consiste de dos partes que difieren en propiedades, uno polar y otro no polar.

La adsorción de estos colectores en la superficie del mineral, la parte no polar está orientada hacia la fase acuosa, en tanto que la polar se orienta a la fase mineral, esta orientación es la que hace realmente al mineral repelente al agua.

CLASIFICACION DE COLECTORES

Cuando un colector se disocia en un anión y un catión, el ión que provoca la acción repelente al agua se le considera como el ión activo mientras que el otro ión es el no

activo, la estructura repelente del agua siempre incluye al radical hidrocarburo y la presencia de esta asegura que el mineral sea repelente al agua, sin embargo; los hidrocarburos son incapaces de adherirse directamente y por si mismo a la superficie del mineral. Así pues la estructura iónica repelente incluye un segundo grupo de átomos para formar una ligadura entre el hidrocarburo y la superficie mineral este grupo de unión es llamado grupo solidofilo.

Los colectores se clasifican de acuerdo a su disociación iónica, actividad catiónica y aniónica en relación a la superficie del mineral y a la estructura del grupo solidofilo.

COLECTORES CATIONICOS

Estos reactivos son compuestos orgánicos ionizables, en los cuales el ión que transporta los grupos reactivos se llama catión. Un ejemplo de éstos colectores son las aminas las cuales son derivadas del amoniaco.

COLECTORES ANIÓNICOS

Estos reactivos generalmente se clasifican en base a la actividad de sus grupos funcionales, los cuales determinan su capacidad para atacar las partículas minerales. Los colectores de éste tipo más usuales son los xantatos y se emplean principalmente en la flotación de los sulfuros metálicos.

REACTIVOS MODIFICADORES O REGULADORES

Los modificadores se definen como reactivos utilizados en la flotación para controlar la acción del colector sobre el mineral, a fin de reducir ó aumentar el efecto repelente al agua sobre la superficie del mineral. Los reguladores efectúan una acción colectora más selectiva con respecto a los minerales. Asegurando una separación razonable de un mineral de otro en la flotación. Cuando un regulador (modificador) se adiciona a la pulpa el colector es capaz de hacer solamente repelente al agua a ciertos minerales sin provocar defectos perceptibles en otros minerales.

Los agentes modificadores se clasifican como:

- 1.- Depresores
- 2.- Activadores
- 3.- Modificadores de pH

Depresores:

Un depresor es un agente que inhibe ó que provoca la adsorción de un colector sobre un mineral. La depresión consiste en evitar que una película colectora se forme sobre las partículas minerales que no deseen flotar.

Activadores:

Son reactivos que provocan y asisten la adsorción de un colector. La activación consiste principalmente en revestir al mineral valioso, es decir; formar una película exterior con la finalidad de que la partícula pueda ser flotada formando una capa colectora que a la vez sea capaz de adherirse por sí sola a una burbuja y de ésta manera separándose así de los minerales de la roca que forman la ganga .

Modificadores de pH:

Es un reactivo que cambia la concentración de iones hidrógeno de la pulpa, con el objeto de incrementar ó disminuir la adsorción del colector al nivel deseado.

REACTIVOS QUE PRODUCEN ESPUMA (ESPUMANTES)

Los agentes espumantes son sustancias activadoras de superficies las cuales al concentrarse entran a la interfase aire-agua, ayudan a mantener las burbujas de aire dispersas evitando la coalescencia de las mismas. Los agentes espumantes incrementan la estabilidad de la espuma de flotación al disminuir la energía libre de superficie de la burbuja.

PROCESOS DEL ESPUMADO

Después del acondicionamiento la pulpa es pasada a la máquina de flotación, entonces se introduce aire en la pulpa junto con un reactivo espumante cuya función es hacer que la corriente entrante de aire se desbarate formando burbujas pequeñas y las partículas que son repelentes al agua se adhieren a las burbujas en cuanto hacen contacto con ellas. Las burbujas cargadas son las partículas minerales de la pulpa en donde se colectan, forman una espuma que continuamente se derrama o bien es rastrillada descargándose sobre un vertedero de la celda. Los minerales que componen la ganga tienen poca ó ninguna tendencia para pegarse a las burbujas por lo que salen de la máquina de flotación como colas.

EFFECTO DE LA ESPUMA

Una vez que la superficie del mineral es repelente al agua debido a la estabilidad de adherencia de la partícula a las burbujas todo depende de la eficiencia del espumante. Los espumantes son sustancias orgánicas heteroplanares activadores de superficie las cuales son adsorbidas en la interfase aire-agua.

Los líquidos puros de estructura heteropolar polar ó no polar como son el agua, queroseno, o alcohol no producen espumas estables cuando se les agita con aire, puesto que las burbujas producidas de ésta manera se rompen fácilmente (Rabone, 1975).

CAPITULO III: DESARROLLO EXPERIMENTAL.

MATERIAL Y EQUIPO

Flotación en Celda

Material:

Primera prueba

- Aerofroth 315
- Na_2CO_3
- Xantato
- HCl dil.

Segunda prueba

- Aeropromotor 825
- Aeropromotor 765
- Na_2CO_3
- HCl dil.
- CuSO_4
- Aceite de pino
- Ácido tánico

Equipo de flotación:

- Denver = Celda-Flot 3300rpm
Gould Century Motor
- Potenciómetro

Separación Magnética

Material:

- Muestra de arena Oaxaca.

Equipo:

- ERIEZ EQ MAGNETICOS
Amperes 3.5CA Entrada
Amperes 3.5 CD Salida
Serie N 2642
Modelo 12 ft
Volts E 15 CA
S 15 CD
- Imán (en forma manual)

Mesa Wilfley**Material:**

- Muestras de arena de Chiapas y Oaxaca.

Equipo:

- M.W 13
Denver Sevia
Serie N E5
Century
Clase 2510 Tipo 06
- Tacómetro para medir velocidad
- Balanza Granataria
- Estufa
- Charolas de Plástico.
- Equipo de filtración (Matraz Kitasato)

Para cambio de ángulo

- Flexometro
- Hilo
- Escuadra.
- Nivel.

FLOTACIÓN POR COLUMNA

Aeropromotor 825

Aeropromotor 765

Potenciómetro

Na_2CO_3

HCl

Sulfato de Cobre

Aceite de Pino

Ácido Tánico

AEROCICLÓN

Equipo:

Diseño del Aerociclón

Material:

Deprimido en colas en flotación por Columna de ambas arenas.

ELUTREADOR

Equipo de Elutreador

Charolas

Flujómetro Wallase Tieman (20-100)

Material:

Arena retenida en malla 120 de ambas muestras 100g

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Equipo:

Cribas (70, 100, 140,250 y 325)

Sacudidor de Criba vibratoria.

Máquina RO-TAP

Material:

Arena de Chiapas y Oaxaca

ELIMINACIÓN DE SILICATO Y FOSFATO

Equipo:

Parrilla eléctrica

Campana de extracción

Estufa Felisa Modelo 292 Serie 025

Material:

Vaso de precipitado 250mL y 100 mL

HNO₃

HCl (1:1) y (50:50)

HF (1:1) y (7:7)

Agua destilada

PULVERIZACIÓN

Equipo:

Mc Cool pulverizer 6 ½ diseño B RMP 1740-1450

Voltios 220/ 440

Amperes 50 ciclos 8.6/4.3

60 ciclos 9.8/4.9

FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Equipo:

Aparato de Fluorescencia de Rayos X SIEMENS SRS 3000 Y TUBO DE Rh con ventana de Be de 125 µm.

Material:

Muestras del concentrado de la flotación por Columna de las arenas

PROCEDIMIENTOS

Muestreo:

La toma de las muestras se llevó a cabo en los sitios de estudio de acuerdo al principio de toma de muestra compuesta, con objeto de tener una muestra representativa del lugar, para lo cual se realizó el trazo de transectos con distancias de muestreo de 20 m para el caso del sitio de Arteaga, Chiapas y de 10 m para el de Zepolite, Oaxaca., a una profundidad de 60 cm este muestreo se justifica de acuerdo a el análisis de variograma (anexo 2).

Primero se realizó el análisis de cabezas de cada una de las arenas, posteriormente se realizó el análisis granulométrico correspondiente y se realizaron las siguientes pruebas de separación y concentración

- Separaciones Gravimétricas (Mesa Winfley y Elutreador)
- Separación Magnética
- Separación Electrostática (Aerociclón)
- Flotación en celda y columna

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

Para llevar a cabo este análisis, se seleccionaron las mallas de acuerdo a la progresión geométrica $\sqrt{2}$ finalmente:

CONDICIONES DE OPERACIÓN :

Cantidad de muestra = 100 gr de cada arena.

Mallas consideradas = 70,120,140,250 y 325.

Tiempo de tamizado = 15 minutos.

MESA WILFLEY.

Se realizó una separación mediante mesa Wilfley, por lo que se realizaron varias pruebas usando este equipo, con el fin de realizar un proceso de limpieza y preconcentración del mineral de interés de las muestras de arena.

Se trabajó a diferentes ángulos de inclinación, flujos de agua y se hicieron reconocimientos al microscopio para determinar cualitativamente el avance en la limpieza del mineral. El procedimiento se ilustra en el diagrama de la Fig. 13.

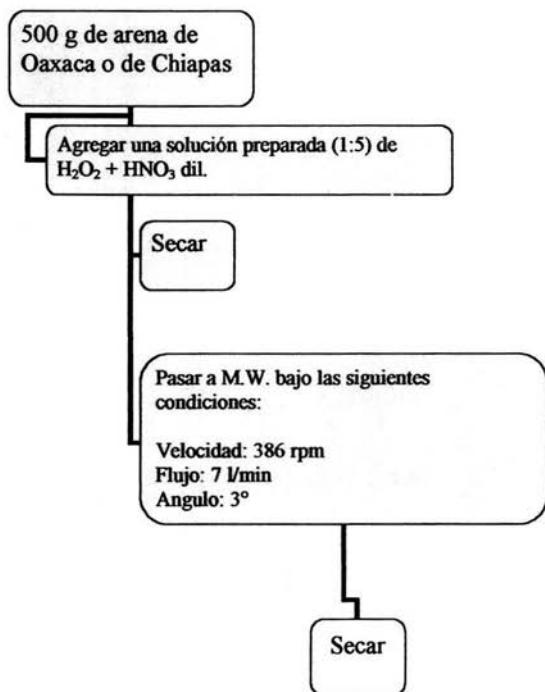


Fig. 13.- El proceso se ilustra en el presente diagrama para ambas arenas (Oaxaca y Chiapas).

La arena restante se usó más adelante para realizar la prueba de elutriación.

Después se procede a realizar en ambas arenas la misma prueba de Mesa Wilfley a ángulos de 1° , 2° , 3° y 4° a una velocidad de 300 RPM, $\phi = 0.378$ l/min y con una cantidad de 100 gr para cada arena.

Para concluir las pruebas con Mesa Wilfley se realizó una prueba con un ángulo de inclinación de 3° con ambas arenas, bajo las mismas condiciones de operación.

La arena de Chiapas, fue deslamada usando las mallas de 325 y 400 utilizando finalmente la arena retenida en la malla 325; y en el caso de la arena de Oaxaca se le agregó HCl para eliminar CO_3^{2-} de la arena.

SEPARACIÓN MAGNÉTICA EN HUMEDO

En esta prueba se separaron las partículas magnéticas de las no magnéticas contenidas en las arenas por medio de un separador electromagnético giratorio de tambor al 60% de la potencia (Amperes E 3.5CA, S 3.5 CD y Volts E 15 CA, S 15 CD).

Se cargo un 1Kg. de arena de Oaxaca en el separador magnético, de forma complementaria se hizo a una separación magnética manual.

ELUTRIACIÓN.

Considerando que la arena ya había sido trabajada anteriormente en Mesa Wilfley y que los componentes de la arena de playa presentan densidades semejantes, se hicieron algunas pruebas de elutriación para tratar de aprovechar la geometría de las partículas y tratar de separar algunos componentes.

PROCEDIMIENTOS:

De dicha muestra (500g) se pesaron 100g y se cribaron a malla 140 y 120, la elutriación se realizó con la arena retenida en esta última malla.

CONDICIONES DE OPERACIÓN:

Muestra	Flujo (gal/min)	Carga (g)
Arena de Oaxaca	8	65.8
Arena de Chiapas	8	64.7
Arena de Oaxaca	20	66.6
Arena de Chiapas	20	64.3

Se hizo la separación hasta que no se nota el paso de partícula de un tubo a otro en la parte superior del mismo, terminada la separación, se recuperan las fracciones separadas en cada tubo, se pesan y observan al microscopio.

FLOTACION EN CELDA

CONDICIONES DE OPERACIÓN:

Muestra: arena de playa de Oaxaca
Cantidad de arena: 100 g
Velocidad de operación: 1700 RPM
pH : 9

ACONDICIONAMIENTO

Función	Reactivo	Cantidad Agregada	Tiempo de operación
Colector	Aerofrot 315	1 ml	10 min
Regulador	Na ₂ CO ₃	0.05 g	3 min
Depresor	Xantato	1 ml	3 min
Activador	Aceite de pino	0.05 ml	1 min

En la búsqueda bibliográfica se encontró un documento (Ramírez, 1983) en donde se realizaba un estudio de flotación de zircón y se optó por seguir la secuencia de flotación así como de los reactivos.

CONDICIONES DE OPERACIÓN

Muestra: Arena de playa de Oaxaca

Cantidad de arena: 2000g

Velocidad de operación: 1200 RPM

pH :9

ACONDICIONAMIENTO

Función	Reactivo	Cantidad Agregada	Tiempo De operación
Colector	Aeropromotorres 825y765	0.5 g	10 min
Regulador	Na ₂ CO ₃ y HCl (1:1)	0.05 ml	1 min
Depresor	Ac. Tánico	0.5 gr	3 min
Activador	CuSO ₄	0.5 gr	3 min
Espumante	Aceite de pino	0.05 ml	1 min

CONDICIONES DE OPERACIÓN:

Haciendo un previo deslame con la muestra.

Muestra: Arena de playa de Chiapas

Cantidad de arena : 1185 g

Velocidad de operación: 2000 RPM

pH : 9

ACONDICIONAMIENTO

Función	Reactivo	Cantidad Agregada	Tiempo De operación
Colector	Aeropromotorres 825y765	0.5 g	10 min
Regulador	Na ₂ CO ₃ y HCl (1:1)	0.05 ml	1 min
Depresor	Ac. Tánico	0.5 gr	3 min
Activador	CuSO ₄	0.5 gr	3 min
Espumante	Aceite de pino	0.05 ml	1 min

A partir de los resultados obtenidos bajo las nuevas condiciones de trabajo, se decide llevarse acabo en flotación por columna.

FLOTACION EN COLUMNA

Mecanismo

- Acondicionar la columna con los reactivos .
- Agregar arena.
- Aplicar el suministro de aire como velocidad de operación.

CONDICIONES DE OPERACIÓN

Muestra: Arena de playa de Oaxaca.

Cantidad de arena: 100 g

Velocidad de operación : 5.3 l / min

pH : 9

ACONDICIONAMIENTO :

Función	Reactivo	Cantidad Agregada	Tiempo De operación
Colector	Aeropromotorres 825y765	0.5 g	10 min
Regulador	Na ₂ CO ₃ y HCl (1: 1)	0.05 ml	1 min
Depresor	Ac. Tánico	0.5 gr	3 min
Activador	CuSO ₄	0.5 gr	3 min
Espumante	Aceite de pino	0.05 ml	1 min

Muestra : Arena de playa de Chiapas previamente deslamada

Cantidad de arena : 215 g

Velocidad de operación : 5.3 L / min

PH : 9

ACONDICIONAMIENTO :

Función	Reactivo	Cantidad Agregada	Tiempo De operación
Colector	Aeropromotorres 825y765	0.5 g	10 min
Regulador	Na ₂ CO ₃ y HCl (1: 1)	0.05 ml	1 min
Depresor	Ac. Tánico	0.5 gr	3 min
Activador	CuSO ₄	0.5 gr	3 min
Espumante	Aceite de pino	0.05 ml	1 min

Se vario la cantidad de reactivos agregados para cada flotación, sin embargo , esto solo fue aplicable para la arena de Oaxaca. Para flotar la paleoplaya de Chiapas se trabajo con una sola relación de reactivos.

En cada prueba de flotación se obtienen en promedio de 3.5 g a 4.0 g de concentrado.

*un minuto en cada ajuste de pH.

Tabla 7. Muestra para análisis de mineral.

ARENA	TIPO DE FLOTACIÓN	CANTIDAD (g), (mL)
Chiapas	Celda	0
	Columna	0.5
Oaxaca	Celda	0.5
	Columna	0.3 , 0.5

FLUORESCENCIA DE RAYOS X.

Se pesan 5 gr de la muestra y se mezclan con un fundente de LiBrO_4 , al momento que se funde la muestra es una mezcla de fundentes donde todos los elementos se oxidan y es por eso que se determina en oxidos , la muestra se funde y se comprime para hacer la pastilla que se introduce al equipo donde un filamento de Cr produce la FRX .

Los elementos mayores fueron medidas en muestra fundida con el programa **RUIZF1.QAN**, las en muestra prensada en el programa **TRAZA02.QAN**. La perdida por calcinación (PXC) se midió calentando 1g. De muestra a 1000°C durante 1h. Todos los

polvos usados en la preparación de las muestras fueron previamente secadas a 110°C durante la noche.

AEROCICLÓN.

Para separar el Zr de la Ilmenita, se utilizó un aerociclón, el cual, se construyó de forma sencilla con una manguera de poliducto corrugado y se arreglo de tal forma que formara un espiral, utilizando como soporte un tubo de PVC y manteniendo este mismo en forma vertical, en la parte superior, el extremo de la manguera se introducía en un tubo de acrílico, el cuál atraparía las partículas que se adhieren a la pared por electrostática al suministrarse el aire, en el extremo que se tenía en la parte inferior del tubo se conecto al suministro de aire , al final para recibir la arena restante se tenía una charola. Fig. 14.

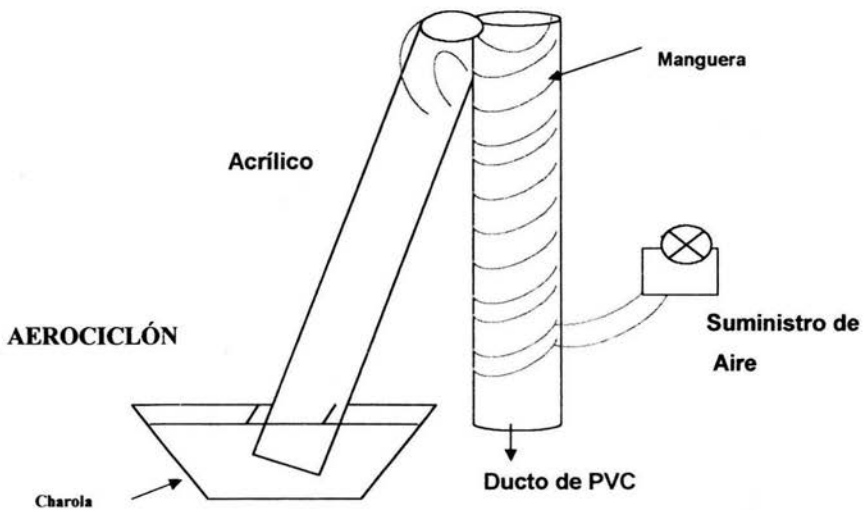


Fig. 14 Replica de aerociclón

CONDICIONES DE OPERACIÓN

Muestra	Carga Alimentada (g)
Arena de Oaxaca	278.4
Arena de Chiapas	492

Aire suministrado : 5.3 l / min

Las arenas fueron cargadas por separado en el aerociclón, después se abrió el suministro de aire, cuyo flujo hacia que las partículas de acuerdo a sus propiedades electromagnéticas se fueron adhiriendo al tubo de acrílico o que simplemente viajaran y se recolectaran en la charola.

Al no tenerse una buena distribución de arena al aplicar velocidades diferentes a la trabajada en flotación por columna ,se decide usar la misma velocidad en dicha prueba para el aerociclón permitiendo de esta forma una distribución homogénea de la arena durante la prueba.

Sólo para conocer la cantidad de CO_2 y de SiO_2 se hallaban presentes en la arena se realizó una digestión con HF , y se evaporó a sequedad, el tiempo total de evaporación fue de 5 horas a una temperatura de entre 100° y 120° C.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSION.

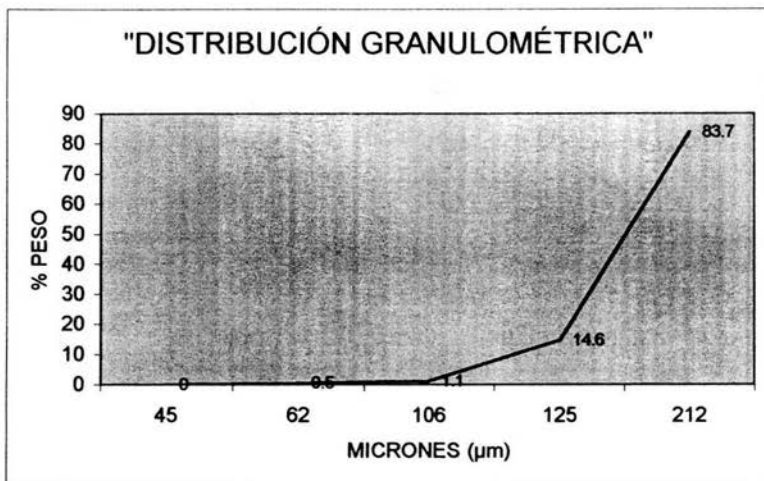
RESULTADOS

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

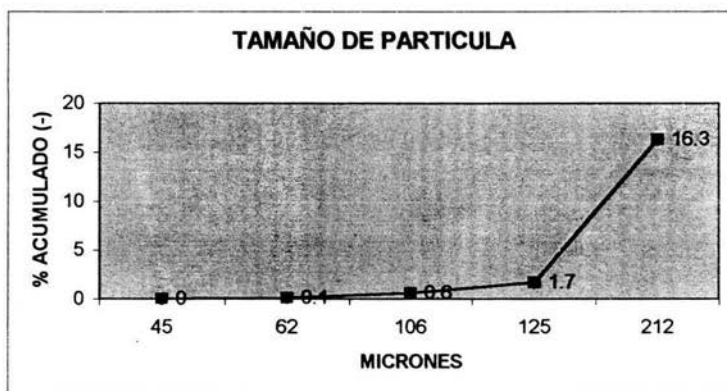
Utilizando finalmente las mallas 70, 120, 140, 250 y 325. Los resultados se muestran a continuación en las tablas 5 y 6, así como la representación esquemática de los mismos en las gráficas 1 y 2.

Tabla 8. Resultados análisis granulométrico ARENA DE OAXACA

MALLA	TYLER (mm) ABERTURA	μm	<i>in</i>	PESO	% PESO	% ACUMULADO (+)	% ACUMULADO (-)
+70	+0.212	212	0.0083	83.7	83.7	83.7	16.3
-70+120	-0.212+0.125	125	0.0049	14.6	14.6	98.3	1.7
-120+140	-0.125+0.106	106	0.0041	1.1	1.1	99.4	0.6
-140+250	-0.106+0.0625	62	0.0025	0.5	0.5	99.9	0.1
-250+325	-0.0625+0.045	45	0.0017	0	0	0	0



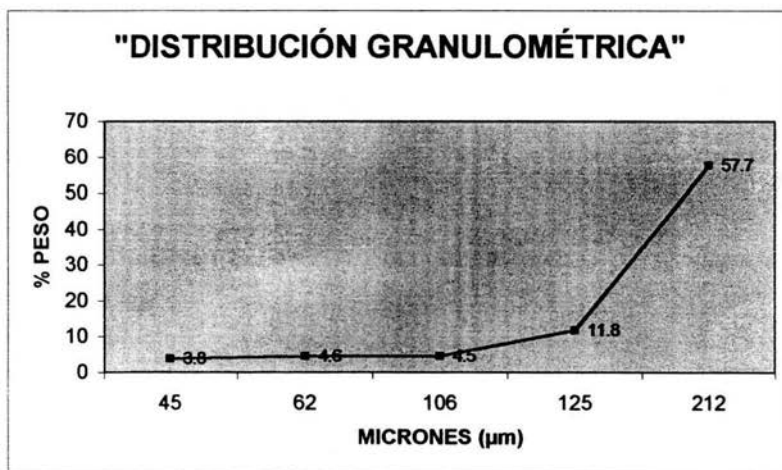
Gráf. 1 Resultados de la distribución granulométrica de la arena Oaxaca.



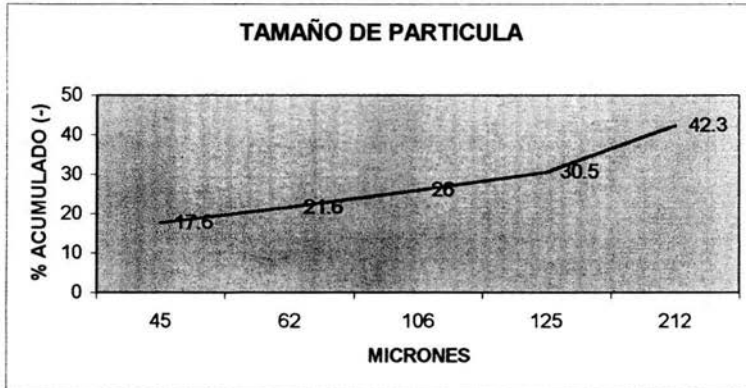
Gráf. 1.1 Resultados del tamaño de Partícula de la arena Oaxaca

Tabla 9. Resultados análisis granulométrico ARENA DE CHIAPAS

MALLA	TYLER (mm) ABERTURA	μm	<i>in</i>	PESO	% PESO	% ACUMULADO (+)	% ACUMULADO (-)
+70	+0.212	212	0.0083	57.7	57.7	57.7	42.3
-70+120	-0.212+0.125	125	0.0049	11.8	11.8	69.5	30.5
-120+140	-0.125+0.106	106	0.0041	4.5	4.5	74	26
-140+250	-0.106+0.0625	62	0.0025	4.6	4.6	78.6	21.6
-250+325	-0.0625+0.045	45	0.0017	3.8	3.8	82.4	17.6



Gráf. 2. Resultados de la distribución granulométrica de la arena de Chiapas.



Gráf. 2.1 Resultados del tamaño de Partícula de la arena de Chiapas

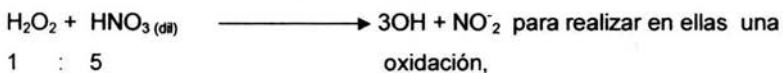
SEPARACION MAGNETICA

El separador magnético presentó baja eficiencia, por lo que la separación se realizó manualmente con toda la arena (aproximadamente 20 kg), obteniéndose 30 gr de mineral magnético.

MESA WILFLEY (M.W).

Al iniciar las pruebas se pasó toda la arena que se tenía de la playa de Oaxaca y Chiapas por la Mesa Wilfley con lo que se lograron buenos procesos de limpieza y una separación parcial.

Después, cada arena fue tratada con:



Para eliminar la materia orgánica.

Al observarse ambas arenas al microscopio, se obtuvo para la de Oaxaca poca cantidad de mineral negro, que anunciaba la presencia de hierro, en cuanto a la arena de Chiapas sólo se apreció mica.

Al probar con diferentes ángulos de inclinación, se presenció una distribución homogénea y conveniente a 3° de inclinación en ambas arenas, en comparación con los demás ángulos de inclinación probados, por lo que se elige para separar el mineral por mesa Wilfley.

A pesar de tenerse una buena distribución, la separación de mineral fue muy pobre; ya que al observarse al microscopio para la arena de Chiapas se obtuvo mica y una pequeña separación de mineral, en cuanto a la arena de Oaxaca mostró un leve separación de mineral junto con CO_3^{2-} y SiO_4^{2-} , por lo que se descarta la prueba de mesa Wilfley para separar arenas.

ELUTRIADOR

De la arena que se trató con $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HNO}_3(\text{dil})$ y que se limpió en Mesa Wilfley, se usó para la prueba de elutriador donde se toman 100g que se criban en malla de 140 y 120 tomando de esta última la arena retenida trabajándose a Φ de 50 y 20 donde:

Flujo Fijo 100%= 40 gal/min

TABLA 10. Resultados de elutriacion.

ARENA DE OAXACA		ARENA DE CHIAPAS	
$\Theta = 20$	$\Theta = 50$	$\theta = 20$	$\theta = 50$
T1 = 7.3 g	T1 = 5.0	T1 = 6.8	T1 = 4.8
T2=11 g	T2 = 11.6	T2 = 10.7	T2 = 10.8
T3 = 4.21 g	T3 = 4.7 g	T3 = 4.3	T3 = 4.4
T4 = 8.6 g	T4 = 6.6 g	T4 = 8.4	T4 = 6.2

$$\Sigma \theta_{20} \text{ Oax} = 31.11\text{g.} \quad \Sigma \theta_{20} \text{ Chia} = 30.2 \text{ g}$$

$$\Sigma \theta_{50} \text{ Oax} = 27.9\text{g} \quad \Sigma \theta_{50} \text{ Chia} = 26.2 \text{ g}$$

$$\text{Derrame} = \text{carga alimentada} - \Sigma \theta_{20} = 65.2\text{g} - 31.11\text{g} = 34.09 \text{ g}$$

$$\text{Derrame} = \text{carga alimentada} - \Sigma \theta_{50} = 66.6\text{g} - 27.9\text{g} = 38.7\text{g}$$

$$\text{Derrame} = \text{Carga alimentada} - \Sigma \theta_{20} = 64.7 \text{ g} - 30.2 \text{ g} = 34.9 \text{ g}$$

$$\text{Derrame} = \text{Carga alimentada} - \Sigma \theta_{50} = 64.3 \text{ g} - 26.2 \text{ g} = 38.1 \text{ g}$$

DENSIDAD

Para conocer la densidad de las arenas:

a) Arena de Chiapas

$$V1 = 1 \text{ mL} \quad \rho = m / V = 1\text{g} / 0.8 = 1.25 \text{ g/ mL}$$

$$V2 = 1.8 \text{ mL}$$

$$\text{Masa} = 1 \text{ g}$$

b) Arena de Oaxaca

$$V1 = 1 \text{ mL} \quad \rho = m / V = 1 \text{ g} / 0.6 = 1.667 \text{ g/ mL}$$

$$V2 = 1.6 \text{ mL}$$

$$\text{Masa} = 1 \text{ g}$$

$$* \text{ Densidad } \text{FeTiO}_3 = 4.7 \text{ g/cm}^3 \quad \text{Zr} = 4.68 \text{ g/cm}^3$$

FLOTACIÓN POR CELDA

La primera prueba de flotación se realizó en celda para después llevarla a cabo en columna y conocer a que pH convenía flotar, en este caso es a pH=6 (Arena de Oaxaca), ya que se presenta una cantidad considerable de mineral en la espuma se tuvo un ajuste de pH que finalmente fue de 9

Siguiendo paso a paso la técnica de flotación encontrada, respetando el tiempo entre la adición del reactivo y reactivo agregado, y tener una flotación satisfactoria se decide a llevar a cabo las flotaciones siguientes.

ARENA DE OAXACA

La flotación inicio a 650 rpm, variándose posteriormente hasta llegar a 1200 rpm, a esa velocidad se comienza a agotar el mineral flotable y que se transporta a través de las burbujas, al final, se logro flotar 4.1 g a partir de 2 Kg. de arena alimentada y teniéndose un deprimido en colas de 1780 g .

ARENA DE CHIAPAS

Seguido de un deslame previo, se procedió a flotar la arena, el cual se complico debido a que a pesar de usar diferentes velocidades (desde 650 rpm hasta 2000 rpm) la espuma era abundante, pero no satisfactoria, ya que no presentaba carga de mineral, por lo que se determinó repetir el experimento, triplicando la cantidad indicada en reactivos.

Se comprueba, que es conveniente triplicar los reactivos ya que después de acondicionar, y suministrar aire, de inmediato se forma espuma que transporta carga de mineral, finalmente, de 1185 g de arena alimentada se flotaron 3.7 g y se tuvieron 987g de deprimido en colas.

FLOTACIÓN POR COLUMNA

Después de haber Flotado en celda, se realiza la prueba en la Columna.

Donde:

ARENA DE PLAYA DE CHIAPAS

Cantidad de reactivos = 1.5 g y 1.5 mL. (Por triplicado)

Carga inicial = 300 g

Después del deslame = 215 g

Mineral que flotó = 4.8 g

Concentrado en colas = 210.2 g

ARENA DE PLAYA DE OAXACA

Cantidad en reactivos = 0.5g y 0.5 mL

Carga inicial = 100 g

Mineral que flotó = 7.8 g

Concentrado en colas = 92.2 g

Cantidad de reactivos = 0.3 g y 0.3 mL

Carga inicial = 100 g

Mineral que flotó = 3.6 g

Concentrado en colas = 96.4 g

*En el caso el espumante se agrega la décima parte de la cantidad base indicada .

SERIE DE PRUEBAS DE FLOTACION PARA ANALIZARSE EN FRX

ARENA DE OAXACA

TABLA 11. Flotaciones para la Arena de Oaxaca

Cantidad de Reactivos agregados en la Flotación (g y mL.)	concentrado obtenido en la Flotación (g)	Concentrado obtenido en la Flotación (g)	Concentrado obtenidos en la Flotación (g)	Concentrado Total obtenido (g)
0.3	3.6	3.8	4.2	11.6
0.5	6.8	7.3	7.7	21.8

ARENA DE CHIAPAS

Tabla 12. Flotaciones para la Arena de Chiapas

Cantidad de Reactivos agregados en la Flotación (g y mL.)	Concentrado obtenido en la Flotación (g)	Concentrado obtenido en la Flotación (g)	Concentrado obtenido en la Flotación (g)	Concentrado Total Obtenido (g)
1.5	3.9	4.1	3.4	11.4

En la Fig. 15 Se muestra el esquema de la columna de flotación empleada para este trabajo.

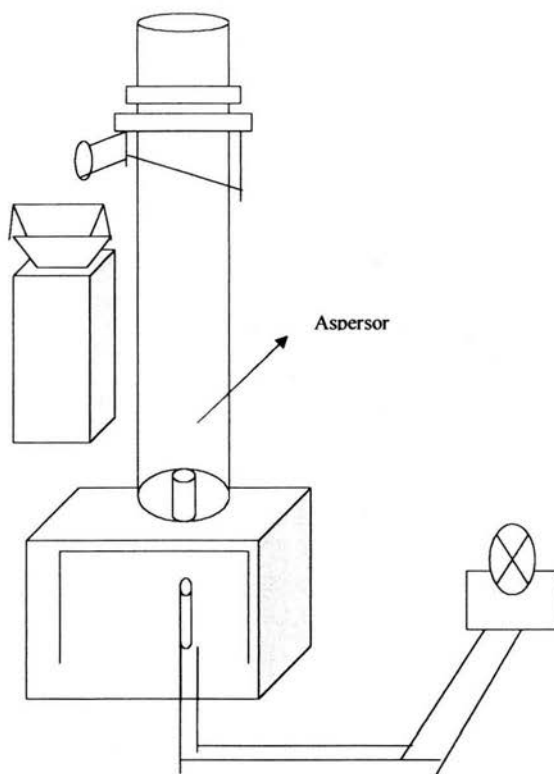


Fig. 15 Representación esquemática de Flotación por Columna.

FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Para poder conocer los elementos presentes en las muestras de arena, se analizaron por Fluorescencia de Rayos X las arenas sin ningún tratamiento previo y posteriormente los productos del proceso de flotación, los resultados se muestran en la Tabla 13 y 14.

Tabla 13. Análisis de elementos mayores

MUESTRAS	%SiO ₂	%TiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%MnO	%MgO	%CaO	%Na ₂ O	%K ₂ O	%P ₂ O ₅	PXC	SUMA
M1	64.9	0.652	15.9	3.51	0.053	1.49	2.33	2.96	2.63	0.201	5.27	99.90
M2	52.1	1.17	18.4	6.27	0.242	2.49	2.33	1.93	2.64	0.302	11.72	99.59
M3	65.9	0.338	11.3	1.77	<0.004	1.48	10.6	2.97	1.32	<0.004	4.17	99.85
M4	50.9	1.73	17.0	6.41	0.270	2.63	4.08	1.99	2.54	0.763	10.57	98.88
M5	26.1	1.70	5.30	7.76	0.188	5.69	32.1	0.697	1.77	0.394	17.83	99.53
M6	35.0	2.33	7.14	10.3	0.276	6.86	22.0	0.837	2.58	0.413	11.34	99.08

Tabla 14. Análisis de elementos traza ($\mu\text{g g}^{-1}$).

MUESTRAS	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
M1	57	506	981	11	137	7	43	18	6	5	56	149	<3	29
M2	87	392	1076	13	207	11	67	23	12	1	84	280	<3	80
M3	23	794	472	8	72	1	32	16	4	8	12	29	<3	18
M4	80	475	965	27	473	18	90	39	13	5	672	279	<3	85
M5	41	1356	290	23	154	9	200	108	15	23	77	138	<3	21
M6	60	915	442	36	228	12	241	166	13	29	82	167	6	23

M1 = Muestra de arena nativa de la playa de Chiapas

M2 = Concentrado de la arena de Chiapas (1.5 g y mL. Flotación por columna)

M3 = Muestra de la arena nativa de la playa de Oaxaca

M4 = Concentrado de la arena de Oaxaca (0.5 g y mL. Flotación por celda)

M5 = Concentrado de arena de Oaxaca (0.3g y mL. Flotación por columna)

M6 = Concentrado de la arena de Oaxaca (0.5 g y mL. Flotación por columna)

Los elementos mayores fueron medidos en muestra fundida con el programa RUIZF1.QAN, los traza en muestra prensada en el programa TRAZA.QAN. La pérdida por calcinación (PXC) se midió calentando 1 g de muestra a 1000°C durante una hora. Todos los polvos usados en la preparación de las muestras fueron previamente secados a 110°C durante la noche.

AEROCICLÓN

Al comenzar con esta prueba se cargaron 100 g de arena de Oaxaca lo que salió, primero se recolectó teniendo ahora 61.2 g este a su vez es digerido con HCl y después

con HF para conocer el % de CO_3^{2-} y SiO_2 respectivamente en dicha arena lo anterior se muestra en la Tabla 15

Tabla 15 Eliminación y cuantificación de SiO_2 como SiF_4 .

Peso original de la muestra	Peso después de digerir con HCl	Peso después de Digerir con HF
61.2 g	51.8 g	28.8 g

Cálculos

% en CO_3^{2-}

$$61.2 \text{ g} - 51.8 \text{ g} = 9.4 \text{ g}$$

$$61.2 \text{ g} - 100 \%$$

$$9.4 \text{ g} - X$$

$$X = 15.36 \%$$

% en SiO_2

$$51.8 \text{ g} - 28.8 \text{ g} = 23 \text{ g}$$

$$51.8 \text{ g} - 100 \%$$

$$23 \text{ g} - X$$

$$X = 44.40 \%$$

De la flotación por Columna que se realizó para ambas arenas en donde se obtendrían los concentrados que se llevarían a Difracción de Rayos X (DRX) fueron usados los precipitados de las mismas para llevar acabo la prueba de aerociación

ARENA DE CHIAPAS

Cantidad de reactivos = 0.5 (mL, g)

Carga = 492 g

Tubo = 1.36g Zr recuperado

Charola (CFE) = 407.7 g

* CFE = Carga final electrostática

492 g ----100%

1.36 g X

X = 0.276% de Zr en la arena

ARENA DE OAXACA

Cantidad de reactivos = 0.5 (mL, g)

278.4 g -----100%

2.87 g -----X

Carga in = 278.4g

X = 1.0308% de Zr en la arena de Oaxaca

Tubo = 2.87g Zr recuperado

Charola (CFE) = 204.2 g

* CFE = Carga final electrostática

Tabla 16. Leyes obtenidas después del proceso de concentración.

MUESTRA	TiO ₂ (ton/ton de arena)	Zr (ton/ton de arena)
Chiapas	0.0117	0.00276
Oaxaca	0.0233	0.01038

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

ANÁLISIS GRANULOMETRICO

Gráficamente, se nota el comportamiento ascendente que presenta el tamaño y distribución de partícula, el cual es similar para las dos arenas (Oaxaca y Chiapas). La arena de Chiapas suele tener mejor distribución de partícula en comparación con la arena de Oaxaca, ya que es una arena más fina logra retener arena por debajo de 45 μm .

A pesar de esto, ambas arenas suelen tener un tamaño de partícula de 212 μm debido a que se retiene la mayor cantidad de arena en la malla 70 teniendo mínima retención de arena para las demás cribas.

Las cribas empleadas se seleccionaron debido a los trabajos previos realizados por Ramírez, 1983 y Castellanos, 2003, en donde se encuentra una mayor concentración de Ti y Zr a dichas mallas.

SEPARACIÓN MAGNETICA

Al obtenerse solo un bajo porcentaje de material magnético para la arena de Oaxaca, y en vista de que para la arena de Chiapas resulta ser poco magnética se decide no llevar a cabo este método de separación en las arenas, ya que se generan desperdicios de energía.

ELUTREADOR

Al no existir una variación entre la separación de partículas (finas y gruesas) a los diferentes velocidades de flujo trabajados, se descarta como posible método de separación.

DENSIDAD

Las diferencias de densidades entre las arenas suelen ser mínima (0.417g /mL) siendo la arena de Oaxaca la de mayor densidad, y en comparación con los minerales de interés a encontrarse en la muestra suele ser máxima.

FLOTACIÓN POR CELDA

Realizar flotación en celda fue un preámbulo que permitió conocer las condiciones de trabajo que se tomarían en cuenta para llevar a cabo flotación por columna dejando fuera a la velocidad a la que se trabajaría, ya que en flotación por columna debe calcularse el flujo de aire. Además de buscarse una velocidad adecuada para poder flotar.

FLOTACIÓN POR COLUMNA

Con respecto a la arena de Chiapas la flotación resulta complicada, debido a que para volverla hidrofóbica se deben triplicar la cantidad de reactivos agregados, provocando así no flotar a otra cantidad en cuanto a reactivos para poder compararla y que permitiera determinar que flotación era mejor.

Todo lo contrario sucede para la arena de Oaxaca ,ya que existe un comportamiento directamente proporcional al aumentar la cantidad de reactivos agregados mayor es la cantidad de mineral concentrado.

Al final logran obtenerse ambos minerales, y aunque en un principio siguiendo el documento encontrado se planeaba flotar circón se floto mineral de titanio (el circón se obtuvo por otro método).

AEROCICLON

Los constituyentes que llegan a presentarse en las arenas como es el caso de la arena de Oaxaca que contienen silicato y carbonato afectan en la recuperación de minerales; en este caso es una excepción, ya que al pasar las arenas en el aerociclón se tiene que para la arena de Oaxaca existe mayor porcentaje de circón en comparación con la arena de Chiapas, y aunque en la carga final se llegan a tener partículas de circón que al verse influenciadas por las cargas negativas presentes en las muestras de arena pierden su carga que permite su adherencia al tubo de acrílico, y pasa sólo a ser carga electrostática al terminar de pasar la arena cargada en el ciclón.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en los dos tipos de arena de playa trabajados, podemos confirmar por una parte la existencia de minerales titaníferos y la presencia de Zircon, por otra parte se confirmó la utilidad de la aplicación de los conocimientos básicos de metalurgia extractiva adquiridos durante la carrera, lo que me permitió implementar un proceso de Aerociclón.

Los minerales de baja susceptibilidad magnética y baja densidad requieren de procesos integrados de extracción siendo este uno de los objetivos de esta tesis, lo cual se cumplió positivamente. Finalmente se lograron obtener buenos resultados de concentración y reproducibilidad, comprobando con esto que las arenas son un recurso natural rico en minerales los cuales deben ser extraídos, siendo el beneficio de la ilmenita el que da un mejor resultado para la arena de Oaxaca.

Por último, se podría establecer el presente método como una alternativa para la extracción de estos minerales, con lo cual se generaría fuentes de empleo para los habitantes del lugar, quienes podrían explotar este recurso, ya que los métodos aquí trabajados son de muy bajo costo.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta Villegas Arnoldo. Obtención de concentrados de ilmenita y su control analítico a partir de arenas detríticas. Tesis de licenciatura, Fac. Química UNAM, 1982.

Amelunxen, R.L. The mechanics of operation of column flotation machines Gibraltar mines limited box 130, Mc Leese lake, B:C Canada, Vol IPO July 27 1984

L. Castellanos T.; S. Palacios-Mayorga; Ma. A. Arias-Herrerías; F. Juárez-Sánchez. LAS ARENAS DE TABASCO Y CAMPECHE, MEXICO: UN ESTUDIO SOBRE SU CONTENIDO DE Ti, Cr Y Zr. Comunicación Técnica, Instituto de Geofísica, UNAM. En prensa.

Cotton Albert. Química inorgánica avanzada. Editorial Limusa, México, D.F. Octava reimpresión, 1999.

Dobby G.S., Finch J.A. Flotation column scale-up and simulation. Paper Num 28 17th Canadian minerals processors conference July 3, Ottawa Canadá. 1985.

INEGI 2003

Juárez Sánchez F. Curso de espectroscopia de Absorción Atómica. Instituto de Geofísica, UNAM. Mayo 2001.

Kelly E. G. Introducción al proceso de minerales. University Auckland Versión Española Rafael García Díaz. Noriega editores 1ª edición 1990.

Macias Romo Consuelo. Metodología de Separación de Circones. Manual de Consulta para el Laboratorio de Molienda y Separación de minerales, Instituto de Geología, UNAM. 1998.

Rabone Philps. Concentración de minerales por flotación. Ed. Reverté, cuarta edición, México D.F. 1975.

Ramírez Vázquez Carlos. Concentración de circón a partir de arenas detríticas Tesis de licenciatura, Fac. Química UNAM, 1983.

Willard A. *Métodos instrumentales de análisis*. Editorial continental, México, 1975

Wills. Concentración y procesamiento de Minerales. Editorial Limusa, México D.F 1980.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

ANEXO 1

PRINCIPIO DE ARQUÍMIDES

PROBETA 1000 mL

Con una probeta de 1000 mL (Llena de agua), se sumerge a una tina de agua y suministrándose

aire con una manguera conectada al suministro de aire durante 1 minuto se mide la cantidad que queda en la probeta, al término de este quedando (cabe señalar que esta experiencia se realizó 5 veces para poder sacar un promedio y ser más exactos en determinar la cantidad de aire y se utiliza durante la flotación por columna

Dando como resultado:

1. 900 mL

donde

0.9 L/ min - 10 seg.

X - 60 seg.

X = 5.4 L/ min

2. 880 mL

donde

0.88 L/min - 10 seg

X - 60 seg

X = 5.28 L / min

3. 880 mL

Donde

0.88 L/min - 10 seg

X - 60 seg

X = 5.28 L / min

4. 870 mL

donde

0.87 L/min - 10 seg

X - 60 seg

X = 5.22 L / min

5. 840 mL

donde

0.84 L/min - 10 seg

X - 60 seg

X = 5.34 L / min

Promedio = 5.304 L / min



Cantidad de aire utilizada en la
flotación por columna

ANEXO II

Geoestadística.

La geoestadística nos proporciona herramientas de evaluación, ya que considera que cada valor de un parámetro medido en un punto en una región cualquiera, representa únicamente una muestra de una determinada variable aleatoria. Si n valores fueron muestreados, éstos representan entonces muestras de n variables aleatorias, cada una de las cuales tendrá asociada una función de distribución. La estadística clásica supone que todos los valores muestreados provienen de una sola función de distribución. Para nuestro caso, las variables aleatorias se encuentran distribuidas en el espacio, por lo que se definen como regionalizadas, y el espacio que éstas representan, se denomina regionalización.

El muestreo es determinante para valorar un mapa de cualquier tipo, la distancia promedio entre los puntos de muestreo conforma un criterio sólido de representación del fenómeno. El variograma permite ver qué tan idóneo es el muestreo.

El variograma $\Gamma(d)$ se define como la varianza de la diferencia de dos variables aleatorias regionalizadas:

$$\Gamma(d) = (1/2) E [Z(X_i) - Z(X_i + d)]^2 \dots \dots \dots (1)$$

donde d es el vector de la separación de las muestras, E la esperanza matemática, $Z(X_i)$ es el valor de la variable en la posición X_i y $Z(X_i + d)$ es el valor de la variable en la posición $X_i + d$. El variograma contiene toda la información estructural necesaria acerca de la variable regionalizada: tamaño de la zona de influencia alrededor de la muestra, naturaleza anisotrópica y grado de continuidad de la variable a través del espacio.

El crecimiento rápido del variograma cerca del origen, indica la disminución de la influencia de una muestra dada. Matemáticamente, la zona de influencia expresada en el plano, es un círculo cuyo radio es la distancia α , tal que a partir de esa distancia no existe correlación entre la muestra localizada en el centro del círculo y las muestras fuera del mismo.

Por otro lado, la anisotropía está expresada por diferencias en el comportamiento alrededor del origen del variograma para diferentes direcciones del muestreo. El comportamiento del variograma para esta zona del origen, está íntimamente ligado con la continuidad de la variable en estudio.

Propiedades del variograma

El variograma $\Gamma(d)$ es una función que cumple con la siguiente relación:

Es simétrica:	$\Gamma(d)=\Gamma(-d)$
Es una función no-negativa:	$\Gamma(d)\geq 0$
en el origen:	$\Gamma(0)=0$
y en el infinito:	$\Gamma(\infty)=\sigma^2$

Por otro lado, la función de covarianza entre dos variables $Z(Z_i)$ y $Z(X_i+d)$ está definida por la expresión:

$$\text{Cov}(d) = E [(Z(X_i) - m) (Z(X_i + d) - m)] \quad (2)$$

Donde $E []$ es el operador Esperanza Matemática; y $E [X(x)] = m$ es la media

para $d = 0$, esto implica que $Z(X_i) = Z(X_i+0)$
o simplemente

$$\text{cov} (0) = E [(Z(X_i))^2] = \sigma^2 \quad (3)$$

Esto es, la función de covarianza es idéntica al valor de la varianza.

La estabilidad estacionaria de la covarianza implica también estabilidad estacionaria de la covarianza y del variograma, esta propiedad se conoce como estacionariedad de segundo orden (Christakos, 1992). Sustituyendo (2) y (3) en (1):

$$\Gamma(d) = \text{cov} (0) - \text{cov} (d) \quad (4)$$

De la expresión anterior podemos inferir que la función variograma $\Gamma(d)$ debe incrementarse cuando d crece. A la distancia α , a partir de la cual $cov(d)$ resulta prácticamente igual a cero, se le denomina rango y representa el punto de transición entre el estado en el que existe correlación (variables dependientes), $|d| \leq \alpha$, y el estado en el que hay ausencia de correlación (variables independientes), esto es $|d| > \alpha$ (Clark, 1977).

A medida que d crece, la función de variograma resulta más o menos estable alrededor de un límite llamado meseta, quedando definida entonces como:

$$\Gamma(\infty) = cov(0) - cov(\infty) \quad (5)$$

$$\Gamma(\infty) = \sigma^2 - 0 = \sigma^2 \quad (6)$$

Aquellos variogramas caracterizados por un rango α y una meseta $cov(0) = \Gamma(\infty)$ se les conoce como modelos de transición, ya que permiten identificar las zonas de transición definidas anteriormente. La función de covarianza se da en términos de distancia entre muestras, y ha sido usada por ejemplo, en estudios globales y regionales de predicción de gravedad en grandes extensiones tales como la porción continental de Estados Unidos (Goad *et al.*, 1984).

Por otro lado, si se comparan las funciones variograma y covarianza, bajo la hipótesis de que son estacionarias, el variograma es igual a la varianza menos la covarianza (ecuación 5), por lo que la equivalencia es total, sin embargo, cuando una media aún desconocida no es estable, el variograma es independiente del valor local de dicha media, mientras que la covarianza requiere de un estimación de este parámetro estadístico, esto introduce un sesgo en el cálculo de la función de covarianza. Es en este sentido que el variograma es un control estadístico más conveniente que la covarianza para aquellas funciones que varían lentamente.

Para el caso de funciones no acotadas con varianza infinita, esto es: no estacionarias, la covarianza no está definida en el origen, de hecho, en la práctica, cuando la varianza es grande, la covarianza está mal definida cerca del origen. En cambio, el variograma tiene un mejor comportamiento para los mismos datos.