

24 /

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



## MEJORAS EN LOS PROCESOS DE FILTRACION DE AZUFRE EXPLOTADO EN JALTIPAN, VER.

### TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE;  
INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA  
P R E S E N T A

MIGUEL ANGEL DE LA GARZA SANDOVAL

MEXICO, D. F.

1985



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## C O N T E N I D O

RESUMEN	i
INTRODUCCION	1
1.- ASPECTOS GENERALES.	4
1.1.- Localización y vías de comunicación.	4
1.2.- Aspectos climáticos.	5
1.3.- Fisiografía.	6
1.4.- Aspectos socio-económicos de la región.	7
2.- GEOLOGIA GENERAL.	10
2.1.- Forma y tipo de yacimiento.	10
2.2.- Origen del azufre.	13
2.3.- Petrografía del domo de Jaltipan.	16
2.4.- Reservas y Geología económica.	20
3.- EXPLOTACION DEL YACIMIENTO.	25
3.1.- Método Frasch.	25
3.1.1.- Descripción del proceso.	25
3.1.2.- Aplicación en el campo.	28
3.2.- Servicios.	31
4.- TRATAMIENTO DEL AZUFRE	37
4.1.- Propiedades Físico-químicas del azufre.	37
4.2.- Descripción del proceso de filtración.	41
5.- ANALISIS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AZUFRE FILTRADO.	50
5.1.- Teoría de la filtración.	50
5.1.1.- Bases teóricas.	50
5.1.2.- Aplicación práctica.	55
5.2.- Reactivos.	59
5.2.1.- Acido Sulfúrico.	59
5.2.2.- Consumo real y teórico de ácido.	64
5.2.3.- Otros reactivos.	66
5.3.- Aspectos técnicos y económicos.	67
5.3.1.- Aspectos técnicos.	67
5.3.2.- Aspectos económicos.	68

6.-	EL AZUFRE EN EL MERCADO NACIONAL E INTERNACIONAL.	70
6.1.-	El papel del azufre dentro de la industria.	70
6.2.-	Mercado nacional.	72
6.2.1.-	Oferta.	72
	6.2.1.1.- Producción nacional de azufre.	72
	6.2.1.2.- Productores nacionales de azufre.	76
	6.2.1.3.- Proyección de la oferta.	78
6.2.2.-	Demanda.	81
	6.2.2.1.- Demanda nacional de azufre.	81
	6.2.2.2.- Consumidores nacionales de azufre.	81
	6.2.2.3.- Proyección de la demanda.	83
6.2.3.-	Importaciones.	84
	6.2.3.1.- Valor y volumen de las importaciones mexicanas de azufre.	84
6.2.4.-	Exportaciones.	85
	6.2.4.1.- Valor y volumen de las exportaciones mexicanas de azufre.	85
6.3.-	Mercado internacional del azufre.	86
6.3.1.-	Oferta-Demanda mundial.	86
6.3.2.-	Futuro de la Oferta-Demanda mundial.	88
7.-	CONCLUSIONES.	91
8.-	BIBLIOGRAFIA.	95

## R E S U M E N

El objetivo del presente trabajo es analizar y proponer mejoras al proceso de filtración de azufre que se realiza en la unidad Jaltipan de la Compañía Azufrera Panamericana, S. A.

La unidad Jaltipan se encuentra localizada en el sur del Estado de Veracruz en la denominada Cuenca Salina del Istmo, está ubicada a dos kilómetros de la población de Jaltipan de Morelos.

Esta unidad es accesible en toda época del año y cuenta con todas las vías de comunicación.

El clima que impera en el área es el tropical lluvioso, clima característico de la región costera del Golfo de México. Sobre la fisiografía de la región se puede decir que es una planicie costera con lomeríos de escasa altura.

La Cuenca Salina del Istmo es un depósito eusporítico marino con orígenes estimados en el período Triásico-Jurásico. Es un yacimiento sedimentario intrusionado por grandes masas de sal que dan origen a los Domo salinos, estructuras en forma domica características de este tipo de yacimientos marinos.

La Génesis del azufre nativo, que está asociada a este tipo de depósitos minerales, se desarrolla mediante un proceso químico de oxidoreducción efectuado bajo condiciones especiales de presión y temperatura.

El domo de Jaltipan cuenta actualmente con reservas probadas de azufre que ascienden a 22,531,883 toneladas métricas.

La Compañía Azufrera Panamericana que tiene bajo su control estas reservas, ha explotado el yacimiento a lo largo de 28 años y se estima que se ha extraído el 56% del total del azufre existente cuando se inició la explotación del depósito.

Para la extracción del azufre del subsuelo se aplica el método Frasch, es un método especial de minado que opera aprovechando las propiedades físico-químicas del azufre y las características geológico-estructurales del yacimiento mineral.

Para la comercialización del mineral es necesario tratar el azufre para eliminar las impurezas que lo contaminan. Actualmente, Azufrera Panamericana, utiliza el proceso de filtración a presión, para llevar a cabo este proceso el mineral se acondiciona y se prepara con ácido sulfúrico para finalmente filtrarlo a presión.

Para la obtención de azufre con menor índice de contaminación es necesario un estricto control del proceso de filtración. Ahora bien hablar de un estricto control del proceso de filtración no implica que sólo se analice el proceso de tratamiento del azufre. Es necesario extender el análisis a otras áreas que están directamente involucradas en los resultados obtenidos en la filtración. Una adecuada coordinación entre todas las áreas por las que atraviesa el azufre desde su prospección hasta su comercialización redituaría resultados favorables; como una mejor programación del proceso y una optimización en el consumo de reactivos.

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

En México el método Frasch para extracción de azufre tuvo su origen en el año de 1954. La compañía petrolera del Aguila explorando en busca de hidrocarburos descubrió en el municipio de Jaltipan de Morelos un yacimiento de azufre nativo, con ello se dio paso para que poco tiempo después la compañía estadounidense Panamerican Sulphur Company se instalara en el área y diera inicio la explotación del yacimiento.

Posteriormente se descubrieron más yacimientos de azufre, convirtiéndose de esta manera a la cuenca salina del istmo en una de las productoras de azufre de mayor importancia en el mundo.

El método Frasch, método especial de explotación de minerales, se aplica para extraer del subsuelo el azufre en estado líquido. Se aprovechan las características geológico-estructurales que presenta el yacimiento y el bajo punto de fusión que posee el azufre.

La cuenca salina del istmo, localizada en el sureste de la República Mexicana, es un depósito evaporítico de sal, en este tipo de yacimientos se forman los domos salinos, estructuras geológicas que están asociadas directamente con la formación del azufre.

A partir de 1956 México se encuentra, a nivel mundial, entre los mayores productores y exportadores de azufre. Actualmente la explotación de este mineral está controlada por el Gobierno mexicano y la comercialización del producto es una importante fuente de divisas para el país.

Después de la mexicanización de las empresas del ramo, año de 1972, las reservas y la explotación del azufre la comparten tres grandes empresas: Azufrera Panamericana S. A., Compañía Exploradora del Istmo y Petróleos Mexicanos, ésta última empresa obtiene el azufre en sus plantas petroquímicas.

México cuenta con grandes reservas de azufre, 81.2 millones de toneladas métricas, que asegura un buen futuro para las empresas que producen el mineral.

Existen varios proyectos que pretenden incrementar la producción y exportación del azufre, entre estos proyectos se encuentra el plan de Petróleos Mexicanos de instalar 21 plantas petroquímicas con recuperación de azufre.

La demanda del mineral a nivel nacional y mundial se incrementó a partir del descubrimiento del proceso de fabricación de fertilizantes fosfatados que son elaborados con ácido sulfúrico, principal derivado del azufre.

El uso del azufre en la industria es indispensable, además, día con día se utiliza en la elaboración de nuevos productos o en nuevos procesos químicos.

Actualmente crece la demanda por el azufre libre de contaminación puesto que facilita los procesos en los que se utiliza evitando pasos intermedios de filtración o refinación del mineral antes de ser utilizado. En México se produce azufre con 0.08% de contaminación mediante procesos de filtración a presión.

Actualmente el azufre es indispensable en casi todas las ramas de la industria, su consumo y producción se incrementó con el descubrimiento de los fertilizantes fosfatados y la aplicación del ácido sulfúrico en un gran número de procesos químicos y de manufactura.

México ocupa el séptimo lugar mundial en producción de azufre y el quinto lugar en exportación de este producto.

En México existen varios proyectos de expansión de la industria azufre ra con lo cual se mantendrá el ritmo de producción. El Gobierno Federal en un futuro pretende disminuir las exportaciones e incrementar la industria química nacional.

Las conclusiones sobre este trabajo se presentan en el capítulo siete y se enfocan principalmente al área de filtración y tratamiento del azufre.

## 1.- Aspectos Generales.

### 1.1.- Localización y vías de comunicación.

La Unidad Jaltipan de la Compañía Azufrera Panamericana S.A., se encuentra ubicada a dos kilómetros de distancia de la población de Jaltipan de Morelos, en el Sur del Estado de Veracruz.

Desde el punto de vista geográfico se encuentra aproximadamente a los 17° 55' de latitud Norte y 94° 10' de longitud al Oeste de Greenwich.

La Unidad Jaltipan es accesible en toda época del año, se cuenta con el paso de la carretera federal Veracruz-Coatzacoalcos, vía completamente asfaltada, pero que no se puede considerar como de primera clase, debido al estado físico en que se encuentra y a la escasa atención que se le proporciona en lo que respecta a su mantenimiento.

Actualmente se cuenta con el recién inaugurado aeropuerto de Cantifacas, localizado entre las poblaciones de Minatitlán y de Coatzacoalcos. Este aeropuerto es de rango internacional y se encuentra a 25 kilómetros de distancia de la población de Jaltipan de Morelos.

Ferrocarriles Nacionales de México cuenta con una estación en esta población veracruzana. Existen varias corridas diarias; el Ferrocarril Meridano, el Transístmico y varias corridas de carga. Actualmente se

trata de poner en operación el sistema multimodal de carga, que es una acción coordinada entre los muelles de los puertos de Coatzacoalcos y de Salina Cruz y el Ferrocarril Transístmico.

En las figuras 1.1 y 1.2 se observa la localización de la zona a nivel nacional y regional respectivamente.

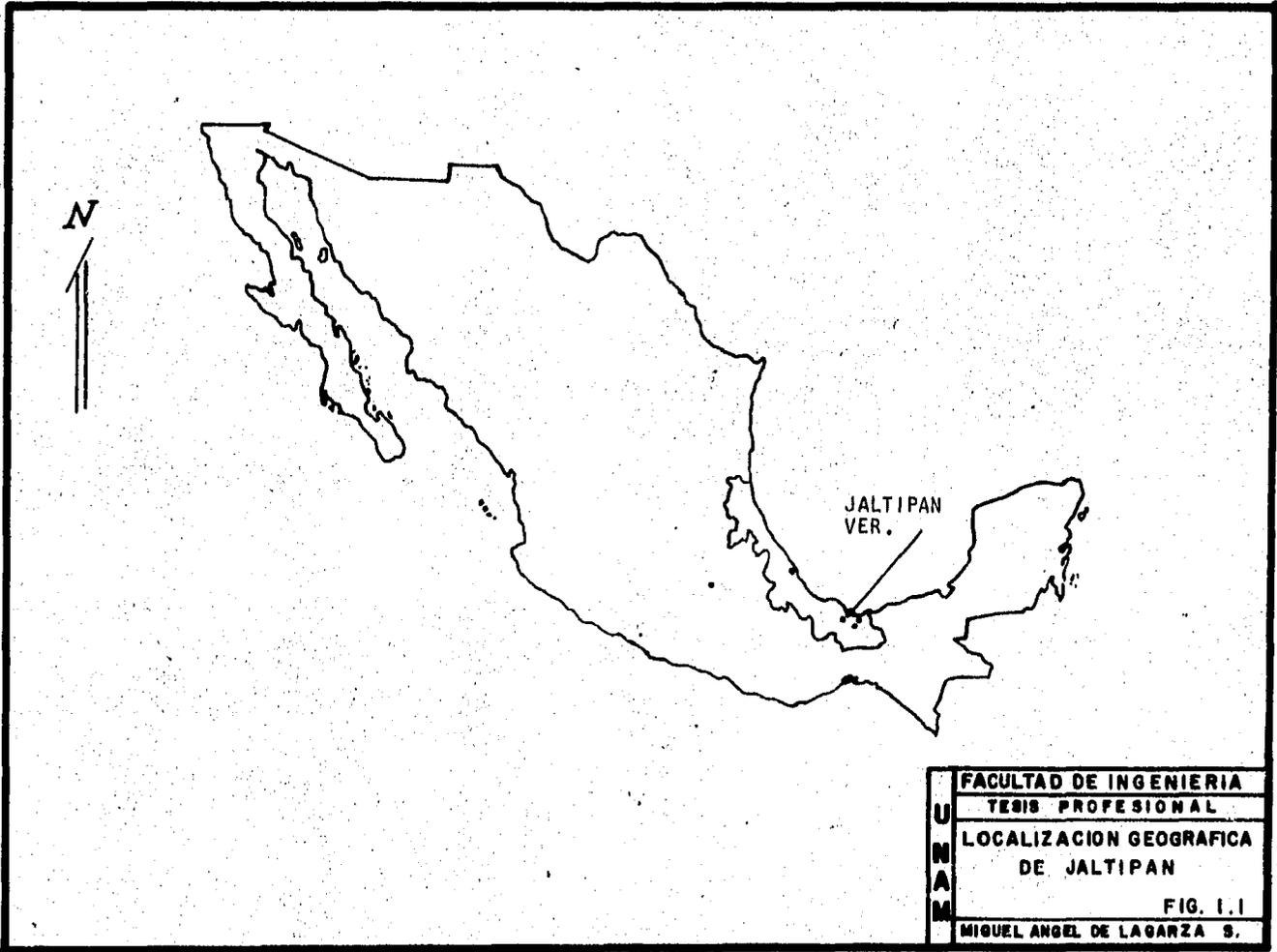
Dentro de la Unidad Jaltipan, para el transporte de equipo y personal, existe una red de caminos de terracería que comunica las áreas de trabajo con las instalaciones, el movimiento a través de esta red es por medio de camiones, camionetas y automóviles. El 80% de estos caminos es transitable en toda época del año, el 20% que resta no es accesible en temporada de lluvias.

#### 1.2.- Aspectos Climáticos.

Esta región costera del Golfo de México posee un clima tropical lluvioso con un exponente térmico medio anual superior a los 18° C.

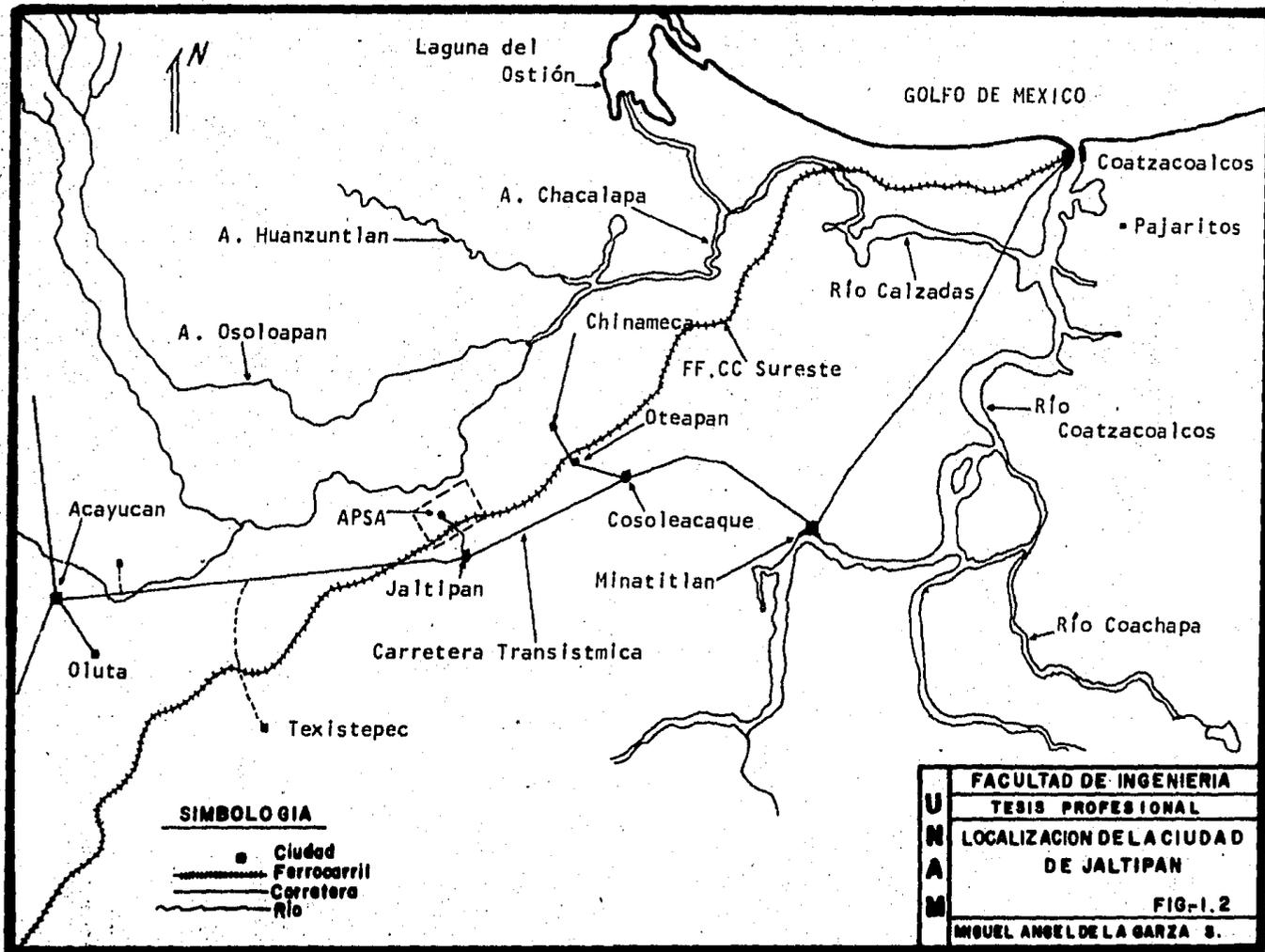
La precipitación pluvial anual es superior a los 750 milímetros. Las lluvias se presentan a lo largo de casi todo el año, intensificándose en el período que abarcan los meses de junio a octubre; en el bimestre abril-mayo la precipitación pluvial es mínima.

La vegetación de la zona es de bosques o selvas tropicales que tienen caracteres cercanos a los del bosque ecuatorial, sin alcanzar la



U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA
	TESIS PROFESIONAL
	LOCALIZACION GEOGRAFICA DE JALTIPAN
	FIG. 1.1

MIGUEL ANGEL DE LAGARZA S.



magnitud y esplendor comunes en áreas como el Amazonas y el Congo, situadas en Sudamérica y Africa Central respectivamente.

La flora la conforman ejemplares típicos como: Manglar, Caoba, Cedro rojo, Ramón, Palmera, Amate, Chicozapote, Primavera, Roble y otras especies de clima tropical.

La fauna es típica del trópico, en donde destacan especies como: Tlacuache, Iguana, Venado, Armadillo y diferentes tipos de reptiles. Existe en la región, una gran variedad de aves entre las que se cuentan algunas de clase migratoria.

En los ríos y arroyos se puede encontrar Camarón, Langostino, Mojarra, Robalo, Tortuga, etc., que conforman la fauna acuática de la zona.

### 1.3.- Fisiografía.

El Domo de Jaltipan se encuentra localizado dentro de la unidad tectónica denominada Cuenca Salina del Istmo que tiene una superficie aproximada de 25,000 Km<sup>2</sup>.

Los límites de esta cuenca se han definido de la siguiente manera: al Norte se limita por el Golfo de México, al Sur por la Sierra Madre Oriental y zona metamórfica del Istmo, al Este por la plataforma de Yucatán y al Oeste por el macizo de San Andrés.

La Orografía de la región es limitada y no existen formas topográficas de importancia. Esta área se puede describir como una planicie con una serie de lomeríos de escasa altura.

La Hidrografía de la zona está compuesta por un conjunto de ríos y arroyos de diferentes magnitudes y caudales. Entre los de mayor importancia están el Río Coatzacoalcos, el Río Calzadas y los arroyos Chacalapa, Osoloapan, Tepezulapan, Huazuntlan y el San Pedro Soteapan.

Todas las corrientes pertenecen a la red hidrográfica del Río Coatzacoalcos; este último y la cuenca del Río Papaloapan son los límites hidrográficos de la región.

#### 1.4.- Aspectos Socio-económicos de la región.

Esta región es totalmente diferente a las demás regiones del país, está conformada fundamentalmente por la vertiente exterior de la Sierra Madre Oriental y la Sierra de Oaxaca. Es una planicie que se extiende hasta llegar al mar, Golfo de México, existiendo pequeños sistemas montañosos que no modifican en gran medida la forma de esta superficie.

Esta zona comprende el Sur de Veracruz, parte de Oaxaca y el Estado de Tabasco.

Es una región clasificada como área de gran concentración humana, teniendo por lo consiguiente una alta densidad de población. Las ciuda-

des más importantes son el Puerto de Coatzacoalcos y la ciudad de Minatitlán siguiendo por orden de importancia: Acayucan, San Andrés Tuxtla, Santiago Tuxtla, Cosoleacaque, Jaltipan, Chinameca, Texistepec y otros poblados de menor importancia.

Las planicies de este sector del Sureste de México son pródigas en pastos, que resultan excelentes para desarrollar una buena ganadería. Pese a ello, sólo se observan algunas áreas que son aprovechadas para desarrollar ganado bovino y porcino. Se encuentran grandes granjas de aves de corral, pero al igual que la ganadería, esta región no produce lo que debiera producir.

La agricultura que se desarrolla es de temporal sin aprovechar los ríos para una agricultura de riego y de tipo intensivo. Se cultiva principalmente Maíz, Plátano, Arroz, Caña, Café, Tabaco, Cacao, Coco, Piña y Limón.

La pesca que se realiza es de manutención; actualmente se ha promovido esta actividad con el fin de aprovechar al máximo posible los recursos pesqueros.

En la rama industrial es una de las zonas con mayor auge en el país, debido al desarrollo que Petróleos Mexicanos ha realizado en base a las grandes reservas de hidrocarburos que se localizan en el Sureste de México. El Puerto de Coatzacoalcos, puerto de altura, es el centro de esta

importante zona industrial.

Existen grandes complejos petroquímicos como: Cosoleacaque, Pajaritos, Minatitlán, Cangrejera y próximamente la Laguna del Ostión. Es la primera zona productora de petróleo y de azufre en el país.

Destacan otras industrias, principalmente químicas, que utilizan los subproductos del petróleo, algunas de ellas de gran importancia como Fertilizantes Mexicanos, Fenoquimia, Tereftalatos Mexicanos, Celanese, Cloro de Tehuantepec, etc.

Además del petróleo y sus derivados, existen industrias alimenticias y otras que procesan la madera y el caucho. Se explotan minerales no-metálicos y se pueden encontrar distribuidos en la región varios ingenios y algunas fábricas de papel.

Localmente, en el Municipio de Jaltipan, además de Azufrera Panamericana, existen industrias de toda clase, destacando Electrometalurgia S.A., Materias Primas Monterrey y Minsa CONASUPO. Estas empresas son fuente de empleo y proporcionan un gran beneficio social.

Respecto a la seguridad social y servicios médicos, la zona cuenta con lo necesario, sin embargo la salubridad de la zona no cubre los requisitos indispensables para una vida social adecuada. La insalubridad ha sido provocada por falta de planeación y por el crecimiento sin control de la población, todo ello debido al desarrollo industrial de la región.

## 2.- Geología General.

La cuenca salina del Istmo de Tehuantepec se encuentra en el sureste de la República Mexicana, en la planicie costera del Golfo de México, ocupando la porción noroccidental del Estado de Tabasco y la parte Sur del Estado de Veracruz. La cuenca cubre la porción Norte del Istmo de Tehuantepec entre los paralelos 17° y 18° 30 minutos latitud Norte.

Se ha estimado que la cuenca cubre una superficie aproximada de 20,000 Km<sup>2</sup>, con un eje Norte-Sur de 90 Km y un eje Este-Oeste de 300 Km.

### 2.1.- Forma y tipo de yacimiento.

La región de la cuenca salina del Istmo, figura 2.1., es un ejemplo típico de depósito evaporítico marino. A estos depósitos se les conoce comúnmente como evaporitas y son de origen marino o continental, siendo de mayor importancia los primeros debido a su extensión y espesor, factores determinantes en la selección de un depósito para su explotación.

La mecánica formativa de las evaporitas marinas se inicia cuando grandes masas de agua de mar quedan aisladas y observan una evaporación constante.

El aislamiento se debe a la presencia de barreras que evitan el libre paso de agua de mar y conducen a la formación de lagunas costeras,

**SIMBOLOGIA**



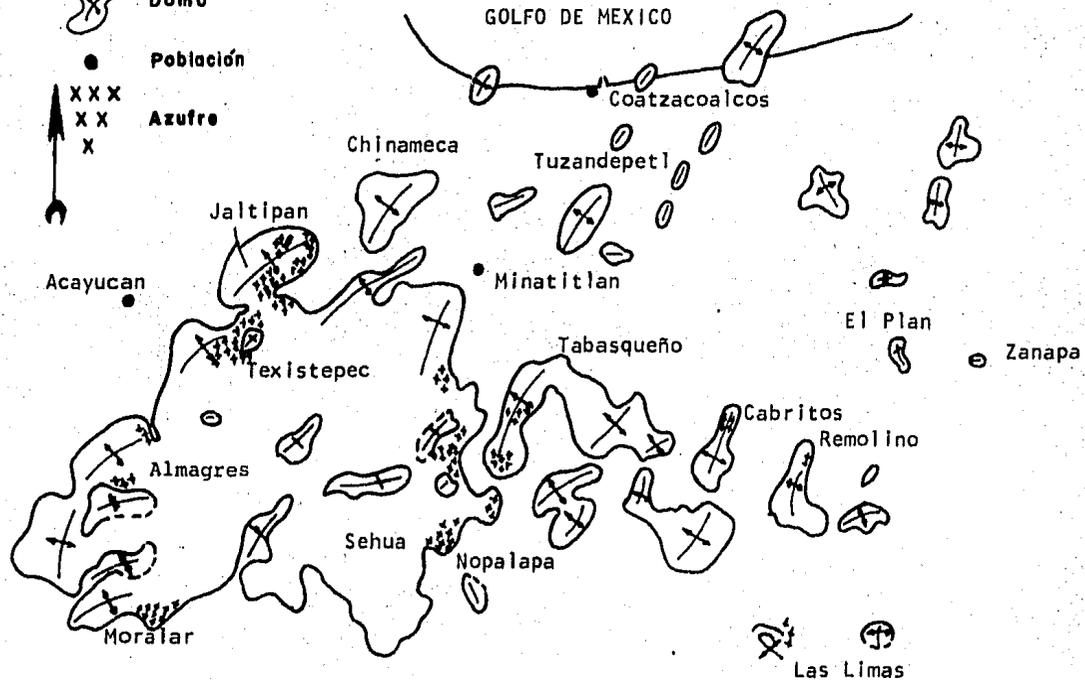
Domo



Población



Azufre



Depósitos de Azufre

	FACULTAD DE INGENIERIA
U	TESIS PROFESIONAL
N	CROQUIS DE LA CUENCA
A	SALINA DEL ISTMO 2.1
M	MIGUEL ANGEL DE LA GARZA S.

figura 2.2., las barreras tienen su origen en levantamientos de la corteza terrestre, procesos volcánicos o a la formación de grandes arrecifes de coral. Ahora bien, el agua confinada se evaporó rápidamente debido al clima desértico que supuestamente imperó en el área. Como se mencionó, la barrera impide el libre paso del agua de mar al interior de la laguna por lo que es mayor la cantidad de agua que se evapora a la que el mar aporta a la laguna.

Estas dos acciones simultáneas provocan una saturación de sales en el agua confinada y como consecuencia inmediata la precipitación de estas sales en el lecho de la laguna.

La separación de la sal del agua de mar es, principalmente, función de la solubilidad. Por lo tanto se depositan primero aquellas sales menos solubles como Dolomitas y Calizas, posteriormente precipitan el Yeso y la Anhídrita seguidas por la sal común. Las sales de Magnesio y de Potasio son las más solubles por lo que se precipitan al final.

La temperatura y el tiempo son factores que influyen en la precipitación y depósito de la sal. La solubilidad es alterada directamente por la temperatura del agua de mar; a su vez la duración del proceso es importante, puesto que el tiempo de exposición del agua a la evaporación determina la cantidad de sal depositada.

La región salina del istmo es una cuenca sedimentaria intrusionada por grandes masas de sal de formas irregulares que han ascendido para

formar domos salinos. La sal ascendió debido a la diferencia de densidad existente entre la sal y los sedimentos suprayacentes.

El espesor de la sal aún no se ha determinado pese a que existen perforaciones de más de 3,000 metros de profundidad. Supuestamente, puesto que no se ha logrado atravesar el espesor salino, la formación de la cuenca salina se inició con un depósito de capas rojas y lechos pérmicos, posteriormente se formó la laguna costera debido a la presencia de una barrera que estuvo localizada al Este de la cuenca, sobre el Golfo de México. La laguna costera tenía como límites al Sur y Sureste la Sierra de Chiapas, al Oeste la Sierra de Oaxaca y al Noroeste el Macizo de San Andrés.

En esta etapa de formación, la cuenca recibe una invasión de aguas marinas y es cuando se deposita la mayor parte de la sal.

Posteriormente, la barrera desaparece y se inicia el depósito de los sedimentos suprayacentes al espesor salino.

Ha sido aceptado <sup>(1)</sup> darle a la sal una edad Triásica-Jurásica sin poder comprobarse la edad exacta. Los sedimentos marinos existentes en la cuenca varían, en edad, desde el Triásico-Jurásico hasta el Cuaternario. Los sedimentos consisten principalmente en Lutitas, Areniscas, Conglomerados, Arcillas, Arenas y Cenizas volcánicas.

(1) Leovigildo Cepeda Dávila/Apuntes de yacimientos minerales. Facultad de Ingeniería/1975/U.N.A.M.

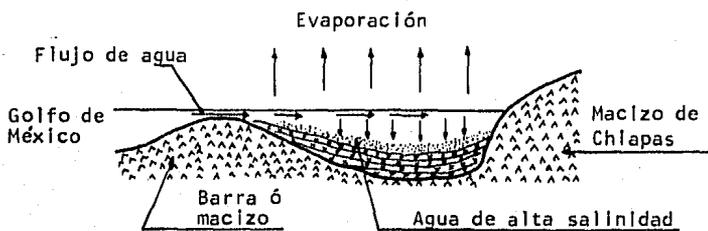
La existencia de los domos salinos se atribuye principalmente a lo siguiente: En el Terciario inferior dentro de la Revolución Laramide, con los movimientos del macizo de Chiapas y Oaxaca se produjo el plegamiento de los sedimentos del Triásico-Jurásico dando origen a las fallas y plegamientos de la Cuenca Salina del Istmo.

Debido a movimientos en las sierras limítrofes de la cuenca se produjo el plegamiento y fallamiento de la misma. Estos movimientos provocaron el desplazamiento de la sal hacia los anticlinales y a través de las fallas transversales la sal se desplaza y asciende debido al menor peso específico que posee en relación con los sedimentos que la encajonan. A las estructuras que se forman mediante este proceso se les denomina "Domos" por tener forma de cúpula. Figura 2.3.

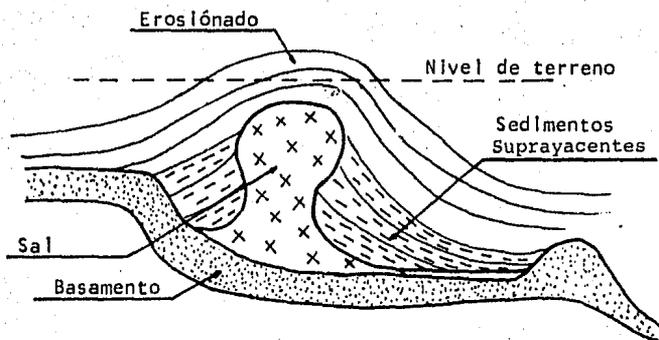
## 2.2.- Origen del Azufre.

El azufre de la región de la Cuenca Salina del Istmo está asociado directamente a estructuras dómicas.

La presencia del casquete rocoso que cubre a los domos de sal es explicada por la Teoría de Taylor de finales del siglo pasado, (la más aceptada) que en resumen concluye que este casquete se formó por acumulaciones de residuos insolubles y el desarrollo de reacciones químicas.



2.2.- Mecánica formativa de los depósitos evaporíticos.



2.3.- Diagrama esquemático de la formación de un Domo Salino.

FUENTE.- LEOVIGILDO CEPEDA DAVILA/  
Apuntes de yac. minerales/  
1975/U.N.A.M.

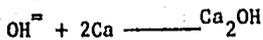
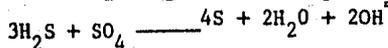
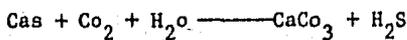
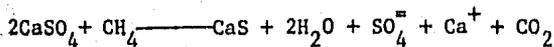
<b>U N A M</b>	FACULTAD DE INGENIERIA
	TESIS PROFESIONAL
	DEPOSITO EVAPORITICO FIG.2.2
	FORMACION DE UN DOMO SALINO FIG. 2.3
	MIGUEL ANGEL DE LA GARZA S.

Se ha demostrado, (2) en laboratorio, que la acumulación de residuos de Anhidrita contenida en la sal fue la que motivó la formación del casquete rocoso.

Cuando el domo de sal estaba en etapa de formación, la masa salina fue ascendiendo y al atravesar los sedimentos suprayacentes hizo contacto con acuíferos que disolvieron la sal. La Anhidrita en forma de cris-tales quedó como residuo que posteriormente fue compactado y recristaliza-do para formar el casquete de Anhidrita, que al ser hidratado dio origen al Yeso.

El Yeso, la Calcita y el Azufre se han formado por la alteración de la Anhidrita. En laboratorio se ha demostrado que la Anhidrita se reduce en presencia de hidrocarburos, dando origen a la formación de Caliza y de Azufre elemental.

La teoría de la reducción de la Anhidrita es valedera al comprobarse la presencia de hidrocarburos en la cuenca salina del istmo. Las siguientes reacciones químicas son las que se desarrollan para dar origen al Azufre:



(2) R. Taylor/Brimstone, The Stone that Burns/Williams Haynes/New York/1942.

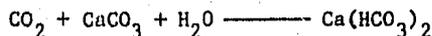
Primeramente la Anhidrita reacciona con los hidrocarburos formándose Sulfuro de Calcio, Dióxido de Carbono, agua y dos iones (Sulfato y Calcio). Posteriormente el Sulfuro de Calcio reacciona con el Dióxido de Carbono y con el agua para formar Carbonato de Calcio, más Acido Sulfhídrico. Finalmente el Acido Sulfúrico reacciona con el ion Sulfato para originar Azufre elemental, agua y iones Hidroxilo, que al combinarse con el ion Calcio forma Hidróxido de Calcio.

Los experimentos, para la obtención de Azufre elemental, con hidrocarburos más pesados que el Metano ( $\text{CH}_4$ ) han dado resultados positivos, respaldando la Teoría de Taylor, puesto que los Hidrocarburos existentes en la Cuenca Salina del Istmo son más pesados que el Metano.

Las reacciones químicas que dan origen al Azufre se desarrollan a temperaturas mayores a los  $600^\circ \text{C}$ , cosa que no pudo suceder en los sedimentos, debido a que en este tipo de yacimientos no se desarrollan temperaturas de este rango.

Por lo tanto se ha demostrado <sup>(3)</sup> que algunas bacterias anaerobias queman hidrocarburos como fuente de energía utilizando Azufre en lugar de Oxígeno como captador de Hidrógeno. De esta reacción se obtiene Acido Sulfhídrico, el Acido reacciona lentamente con el ion Sulfato produciendo Azufre elemental más agua. El azufre mezclado en el agua saturada con ácido Sulfuroso, se precipita como Azufre cristalino.

El  $\text{CO}_2$  otro producto de la reacción química, redissuelve a la Calcita produciendo cavernas en la formación, o sea:



(3) R. Taylor/Brimstone, The Stone that Burns/Williams Haynes/New York/1942.

Los casquetes calcáreos estériles, sin Azufre, se deben posiblemente a que el Acido Sulfhídrico escapó y en ocasiones reaccionó con Hierro formando Marcasita y Piritita.

En la zona del Istmo de Tehuantepec se han encontrado casquetes calcáreos con espesores hasta de 400 metros y equivalente neto de Azufre de más de 30 metros. La profundidad a la que se localizan estos casquetes, en la zona del Istmo, varía desde la superficie hasta más de 3000 metros.

### 2.3.- Petrografía del Domo de Jaltipan.

En forma general se puede decir que el Domo de Jaltipan es una estructura muy regular. Las rocas del casquete se extienden en forma de manto sobre la superficie de la sal, siguiendo los contornos de la misma. En los flancos, este casquete sufre algunos cortes abruptos y tiende a tener una pendiente más suave.

El espesor promedio del casquete es de aproximadamente 100 metros en los flancos y de 120 metros en el centro del domo.

El casquete es regular en el centro de la estructura pero irregular en sus flancos, en donde se adelgaza, se interdigita o se engrosa anormalmente.

El manto de sulfatos que descansa sobre la sal subyace a otro manto de casquete calcáreo que es el que contiene el Azufre.

Las rocas sedimentarias suprayacentes al casquete rocoso son principalmente lutita gris, lutita negra y arcilla.

La columna litológica del Domo de Jaltipan no es homogénea en toda la estructura, existen variantes de acuerdo a cada área específica del domo.

En la parte Norte, Este y Suroeste del domo la columna litológica tiene la siguiente secuencia:

Lutita  
 Caliza con Azufre  
 Anhidrita y/o Yeso  
 Sal

Existen otras áreas, como la del centro del Domo, en donde se encuentra la siguiente columna litológica: (4)

Lutita negra  
 Caliza arcillosa  
 Caliza estéril  
 Caliza con Azufre  
 Yeso

(4) La columna litológica continua en la página siguiente.

Caliza con Azufre  
Yeso y/o Anhidrita  
Sal.

Como se puede observar, en esta área existe una intercalación de Yeso y de Caliza además de contarse con un espesor de caliza estéril. Esto debe de tomarse en cuenta cuando se efectúe la explotación del área.

Otra columna que se puede encontrar en la zona Norte del Domo, es:

Lutita, arenas y gravas  
Caliza estéril y/o arena de Calcita  
Caliza con Azufre  
Yeso y/o Anhidrita  
Sal.

A continuación se describen cada una de las unidades rocosas presentes en el domo de Jaltípan.

La Sal es de color negro o gris, con brillo vítreo, presenta trazas de Carnalita y delgadas bandas de Anhidrita granular poco consolidada. El espesor de esta formación no se ha determinado porque nunca se ha atravesado en su totalidad.

Predomina más el Yeso que la Anhidrita. El Yeso varía, en color, de blanco a gris marmolado y se encuentra intensamente fracturado en algunas áreas del domo.

Estas fracturas se encuentran rellenas con Lutita negra. En ocasiones el Yeso presenta inclusiones de Azufre o de Caliza con Azufre.

La Anhidrita es compacta, de color gris claro a gris oscuro. En el contacto con la sal presenta manchas rojas debido al Oxido de Hierro.

Dentro de esta formación se encuentran además del Yeso y de la Anhidrita algunos minerales como la Selenita y el Alabastro.

La Caliza es de color gris claro y oscuro, en ocasiones de color negro. Se encuentra fracturada, algunas de estas fracturas están rellenas con Calcita.

En algunas áreas del Domo la Caliza es arcillosa y se alterna, dentro de la columna litológica, con lutita negra calcárea muy compacta.

Cuando la Caliza ha estado expuesta a interperismo o a alteración subacuosa, da lugar a una roca denominada arena de Calcita. Esta arena no es otra cosa que fragmentos de Caliza, parcialmente redondeados, de tamaño fino y medio, diseminados en una matriz arcillo-calcárea de color café oscuro. En ocasiones esta arena presenta cristales de Azufre y por lo general siempre está acompañada de hidrocarburos.

En algunas áreas existe una Caliza fracturada de color café a gris, porosa y las fracturas están rellenas de Azufre. Otro tipo de Caliza presente es la denominada Caliza bandeada, es una roca que presenta una alternancia más o menos ordenada de capas delgadas de Caliza, Calcita y Azufre, además con impregnaciones de hidrocarburos.

El Azufre como se indicó, generalmente se presenta en las fracturas, o bien, diseminado en la caliza.

La Lutita puede ser de color gris o de color negro. La lutita gris es plástica, suave, fosilífera y algo fracturada, en cambio, la lutita negra es más compacta y en ocasiones presenta caracteres calcáreos.

La Arcilla se ha alterado debido al interperismo, dando lugar a una arcilla amarilla o café, poco consolidada y en partes arenosa.

#### 2.4.- Reservas y Geología económica.

El Domo de Jaltipan cuenta actualmente <sup>(5)</sup> con reservas probadas de Azufre que ascienden a 22,532,883 toneladas métricas, las cuales se encuentran distribuidas sobre el área asignada a la Compañía Azufrera Panamericana S. A.

El yacimiento de Jaltipan ha sido explotado ininterrumpidamente a lo largo de 28 años, al iniciarse la explotación del depósito en 1954, Las reservas probadas de Azufre sumaban 51,483,709 toneladas métricas.

(5) Diciembre de 1982.

Se han extraído, hasta diciembre de 1982, 28,951,826 toneladas que representan el 56% de las reservas totales probadas del yacimiento.

Se han dividido las reservas de Azufre por lotes mineros, figura 2.4 y cuadro 2.1, de esta manera se facilita su localización y se observa mejor el estado actual del yacimiento.

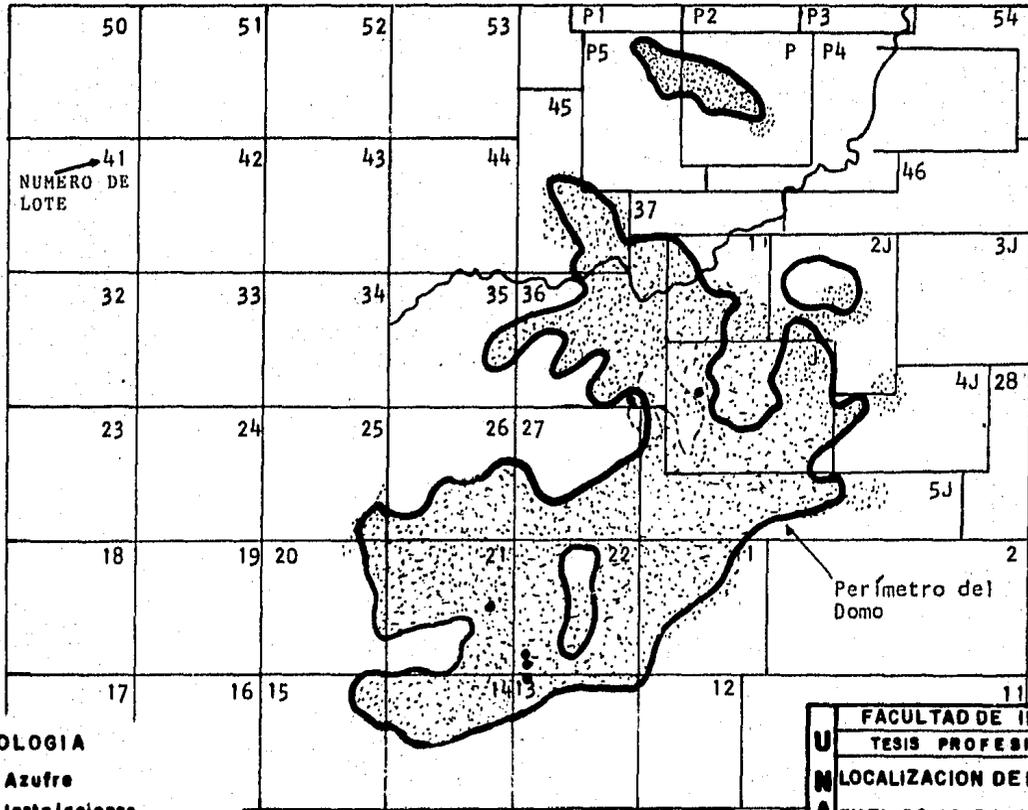
Refiriéndose al cuadro 2.1., se observa que existen lotes que han sido agotados en su totalidad, como los lotes 20 y 26, y que incluso han producido más Azufre del que originalmente se había estimado que tenían.

Otros lotes como el J, IJ, 4J, 27 y 37 rebasan el 70% de agotamiento. También se puede observar que hay lotes que rebasan el 50% de agotamiento.

El lote 21 se puede considerar agotado pues sólo queda por extraer 8% de sus reservas probadas. En cambio lotes como el 1, 13, 14, 15, 22 y 45 han producido solamente el 25%.

Así como hay lotes que están agotados totalmente, hay otros como el P, 5P y 35 que no han producido una sola tonelada, por no ser aún explotados.

Los lotes se han agrupado en cinco grandes áreas, las cuales se conforman de la siguiente manera:



41  
NUMERO DE  
LOTE

Perímetro del  
Domo

- SIMBOLOGIA**
-  Azufre
  -  Instalaciones
  -  Límite del domo

**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**U** TESIS PROFESIONAL  
**N** LOCALIZACION DE RESERVAS  
**A** EN EL DOMO DE JALTIPAN  
**M** FIG. 2. 4  
MIGUEL ANGEL DE LA GARZA - S.

Cuadro 2.1.- Reservas de Azufre en el Domo de Jaltipan, distribución por lotes y volumen total.

LOTE	RESERVAS PROBADAS	RESERVAS PROBABLES	PRODUCCION 28/12/82	RESERVAS 28/12/82
J	2,586,382	11,804	1,930,003	656,379
1J	2,274,370	135,604	1,782,045	492,325
2J	669,041	-	442,536	226,505
4J	172,492	-	131,368	41,124
5J	2,021,115	-	1,362,497	658,618
P	1,091,823	-	-	1,091,823
5P	395,852	-	-	395,852
1	3,796,439	-	978,702	2,817,737
13	1,662,758	-	401,525	1,261,233
14	4,881,870	-	1,341,464	3,540,406
15	293,944	-	85,724	208,220
20	343,999	-	428,083	84,084 (-)
21	6,956,366	-	6,450,182	506,184
22	10,550,676	-	3,230,863	7,319,813
25	508,519	-	309,884	198,635
26	3,438,923	-	3,611,306	172,383 (-)
27	2,081,430	-	1,512,629	568,801
35	117,163	-	-	117,163
36	3,856,063	-	2,545,182	1,310,881
37	2,849,920	33,901	2,239,682	610,238
45	934,564	79,524	168,151	766,413
TOTAL	51,483,709	260,833	28,951,826	22,531,883

- Notas - La producción de los lotes está calculada en base a los pozos agotados, 28 de Diciembre de 1982.  
 - (-) significa sobreproducción.  
 - Los pozos que actualmente operan tienen una producción acumulada de 171,091 toneladas, 28-12-82.

Fuente - Azufrera Panamericana S. A.

Area # 1.- Lotes 13, 14, 15, 20, 21, 22, 25, 26 y 27.

Area # 2.- Lotes 1, J, 4J, 5J, parte sur del 37, parte del 22 y parte sur del 1J.

Area # 3.- Lotes 35, 36, 45, parte norte del 1J y parte norte del 37.

Area # 4.- Lote 2J.

Area # 5.- Lotes P y 5P.

La agrupación de lotes en áreas obedece a características geológico-estructurales y a factores que han surgido de la aplicación del método Frasch en el yacimiento.

La Compañía Azufrera Panamericana inició la explotación del yacimiento en el año de 1954. En el área # 1, que es la que tuvo la mayor cantidad de reservas probadas, se inició la explotación. Dicha área, que hasta la fecha sigue operando, ha producido 17,371,660 toneladas, que representan el 60% del total del Azufre extraído por la Compañía en este yacimiento.

Es una área relativamente agotada, que se está explotando de nuevo y que proporciona aproximadamente el 15% de la producción actual de Azufrera Panamericana.

El área # 2, localizada al centro, este y noreste del domo, fue la segunda etapa de explotación del yacimiento. En el año de 1982 se extrajo Azufre de los lotes 1, 22, J, 4J y 5J; esta área produce aproximada-

mente el 17% de la producción diaria de Azufre.

El área # 3 se encuentra localizada al Norte del domo y en ella se encuentran importantes instalaciones de la empresa; Planta de Fuerza, Talleres, Almacenes, Laboratorios, debido a esto se considera agotada aunque tiene todavía más de 2.5 millones de toneladas de Azufre sin extraer.

Respecto al área # 4, se ha explotado en un 66% y ha producido - - 442,536 toneladas de Azufre (1% de la producción total). Actualmente se ha iniciado una nueva etapa de explotación que permita extraer el Azufre remanente del área.

El área # 5 no ha sido explotada, existe un proyecto para que esta área entre en operación y se recupere la mayor parte del millón y medio de toneladas de Azufre que existen.

De las reservas probadas que quedan en el yacimiento, es posible que se recupere el 50%, esto se debe a que existen factores económicos y técnicos que dificultan su extracción.

Entre los factores que más afectan la extracción del Azufre del subsuelo se encuentran: la capacidad de las plantas de fuerza y de calentadores, la profundidad a la que se encuentra el Azufre, las características geológicas del área, la ubicación de las reservas dentro de los lotes mineros y algunos otros factores de menor importancia; clima, arrendamiento de predios, caminos, etc.

En el yacimiento de Jaltipan se ha considerado una recuperación promedio del 50% de las reservas probadas, esto se ha tomado en base a la experiencia y los resultados adquiridos a lo largo de 28 años de operación.

### 3.- Explotación del Yacimiento.

#### 3.1.- Método Frasch.

Herman Frasch, en el año de 1894, realizó estudios que permitieron extraer el Azufre nativo contenido en una formación rocosa (Caliza) localizada en el subsuelo.

Aprovechando el bajo punto de fusión que posee el Azufre, Frasch observó que mediante la inyección de agua sobrecalentada a la formación rocosa el Azufre fundía y se podía bombear, ya en estado líquido, a la superficie con la ayuda de aire comprimido.

Estos son los principios básicos en los que se fundamenta el método de minado "Frasch", el cual permite recuperar el Azufre nativo contenido en los casquetes rocosos de los domos salinos. Este método es el que se utiliza actualmente en las azufreras que operan en la región salina del Istmo.

#### 3.1.1.- Descripción del proceso.

El método Frasch consiste, primeramente, en la perforación e instalación de pozos por los que se extrae el Azufre. Estas perforaciones son similares a las que se realizan para extracción de agua.

La proyección y localización de los pozos dentro del área de interés depende de varios factores como: agotamiento del área, distancia

entre pozos, profundidad de perforación, Azufre neto, reservas, espesor de las formaciones, características geológicas del área, capacidad de las instalaciones, secuencia de minado, etc.

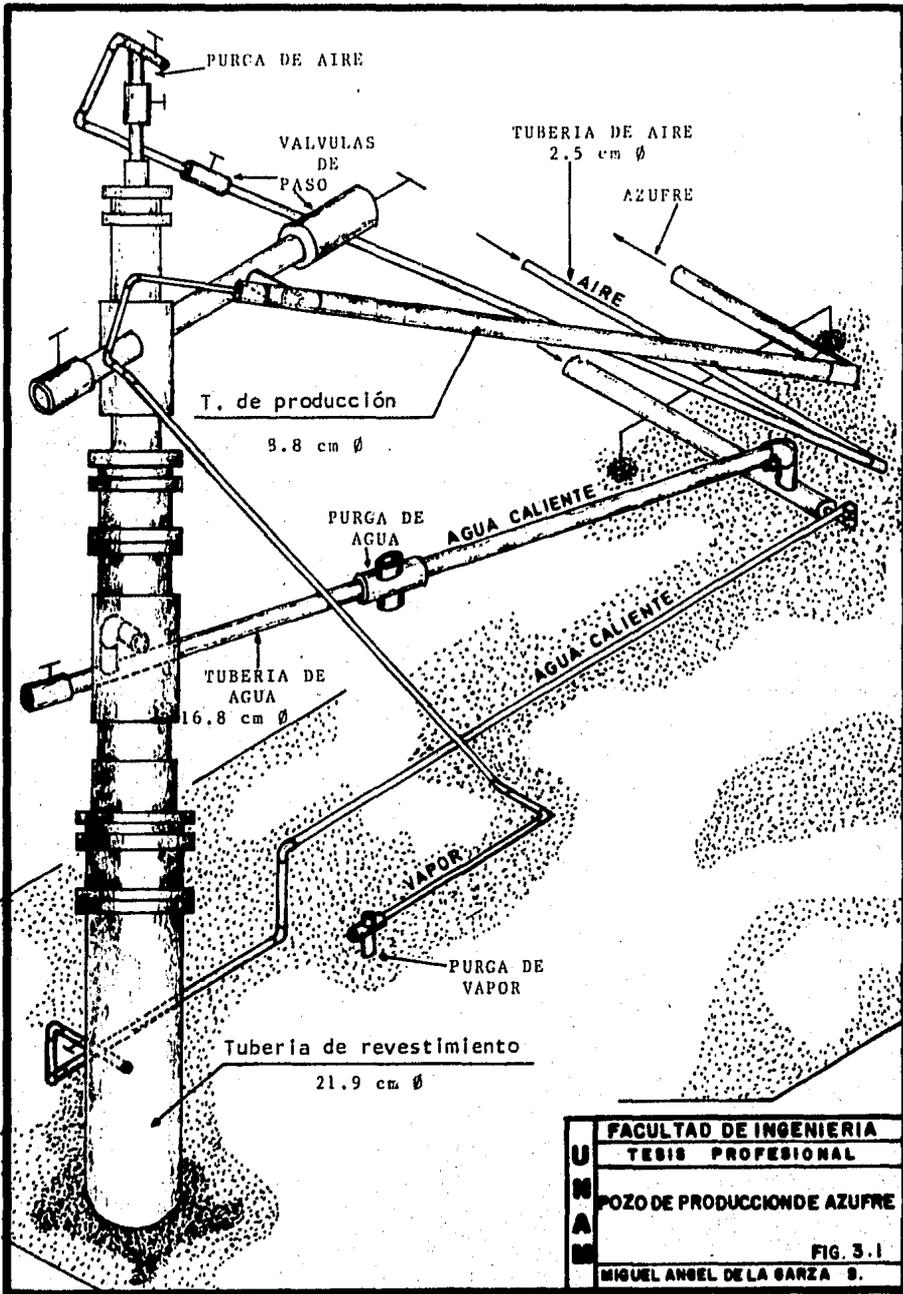
Los pozos de extracción, figura 3.1., están equipados con cuatro tuberías concéntricas y accesorios (válvulas, manómetros, etc.) que regulan y miden el paso de los fluidos por las tuberías.

La tubería de mayor diámetro, 21.9 cm  $\emptyset$ , conocida como tubería de revestimiento, es utilizada como protección de las otras tuberías a la vez que funciona como ademe, evitando el derrumbe de las paredes del pozo.

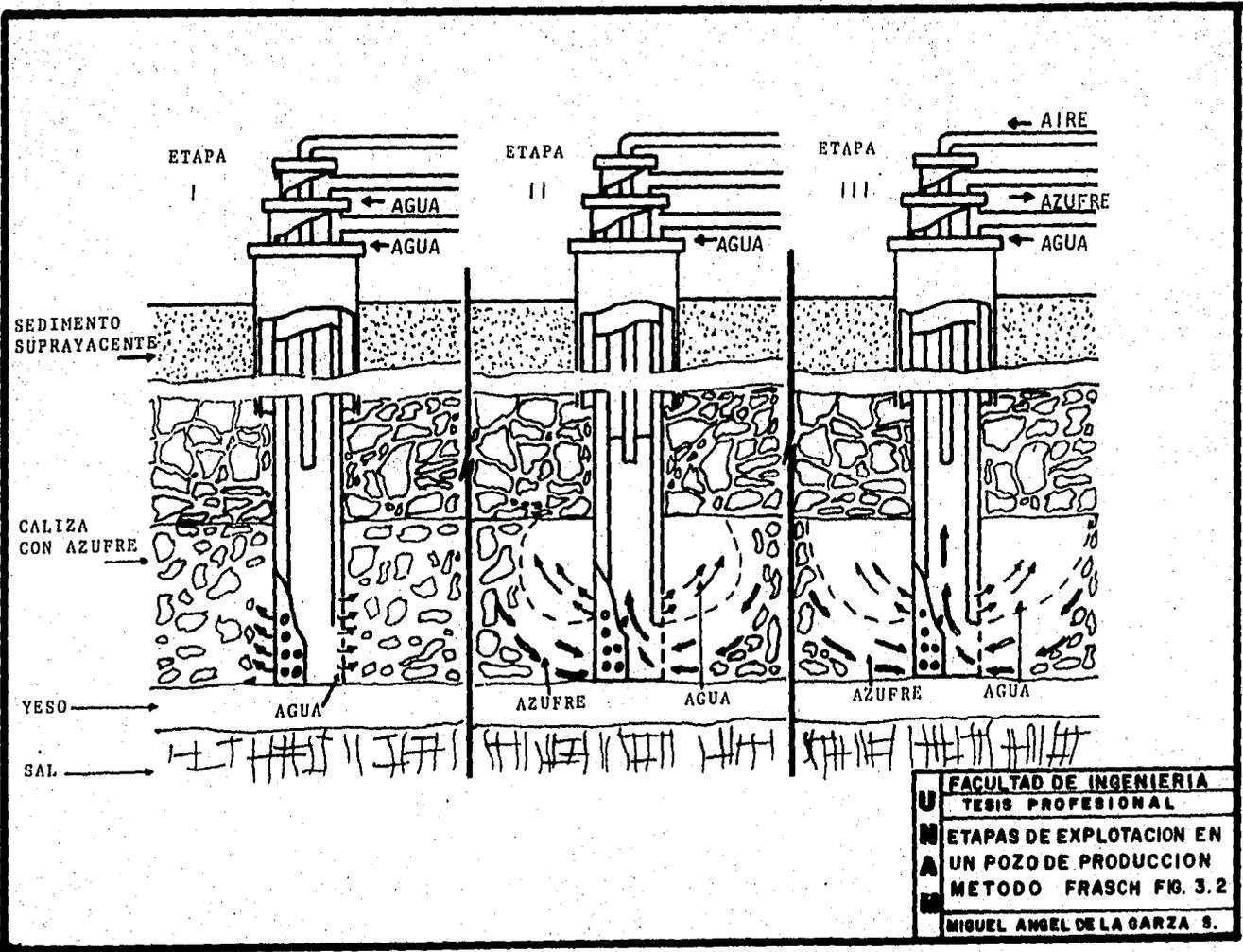
La segunda tubería, 16.8 cm  $\emptyset$ , se utiliza para inyectar el agua sobrecalentada en la formación de Caliza. La tercera tubería, 8.8 cm  $\emptyset$ , tiene la función de conducir el Azufre hasta la superficie, finalmente, la tubería de menor diámetro, 2.5 cm  $\emptyset$ , sirve para inyectar el aire comprimido lo cual permite extraer el Azufre al exterior.

El método Frasch para su operación consta de tres principales etapas, figura 3.2., que a continuación se describen:

Una vez equipado e instalado el pozo productor de Azufre se inicia la primera etapa del método que consiste en inyectar agua sobrecalentada a la formación de Caliza, la temperatura del agua sobrecalentada debe ser mayor a la del punto de fusión del Azufre (mayor a 120 °C). Esta operación se efectúa utilizando la tubería de inyección. En caso de que la



U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA
	TESIS PROFESIONAL
	POZO DE PRODUCCION DE AZUFRE
	FIG. 3.1
	MIGUEL ANGEL DE LA GARZA 8.



<b>U N A M</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
	<b>TESIS PROFESIONAL</b>
	<b>ETAPAS DE EXPLOTACION EN UN POZO DE PRODUCCION METODO FRASCH FIG. 3.2</b>
	<b>MIGUEL ANGEL DE LA GARZA S.</b>

formación no permita que el agua fluya, debido al espesor pequeño de Caliza arcillosa, se procede a utilizar para la inyección la tubería de ademe o la de producción. Esta primera etapa tiene el fin de calentar la formación de Caliza y de fundir el Azufre.

En la segunda etapa el Azufre, que se encuentra en estado líquido, y debido a que posee una densidad mayor que la del agua se acumula en el fondo del pozo, introduciéndose por la parte inferior de la tubería de producción.

Finalmente, la tercera etapa consiste en extraer el Azufre líquido a la superficie, para ello se emplea el aire comprimido. Para que el Azufre fluya a la superficie la presión del aire inyectado debe ser mayor a la presión que existe en el interior del pozo. Esta última presión menor a  $4 \text{ Kg/cm}^2$ , es producida por el Azufre que se encuentra en estado líquido.

La explotación del yacimiento se realiza efectuándose un barrido de la cima o parte alta del depósito hacia los flancos.

Con el fin de evitar presiones indeseables, producidas por el agua, en la formación, ésta se debe drenar tratando de extraer del subsuelo el mismo volumen de agua que se inyecta y a la menor temperatura posible para aprovechar al máximo el poder calorífico del agua.

Este drene se realiza con el empleo de pozos equipados para este fin, el bombeo del agua se hace con aire comprimido o utilizando bombas

de pozo profundo. Estos pozos normalmente se localizan flanco abajo del frente de explotación.

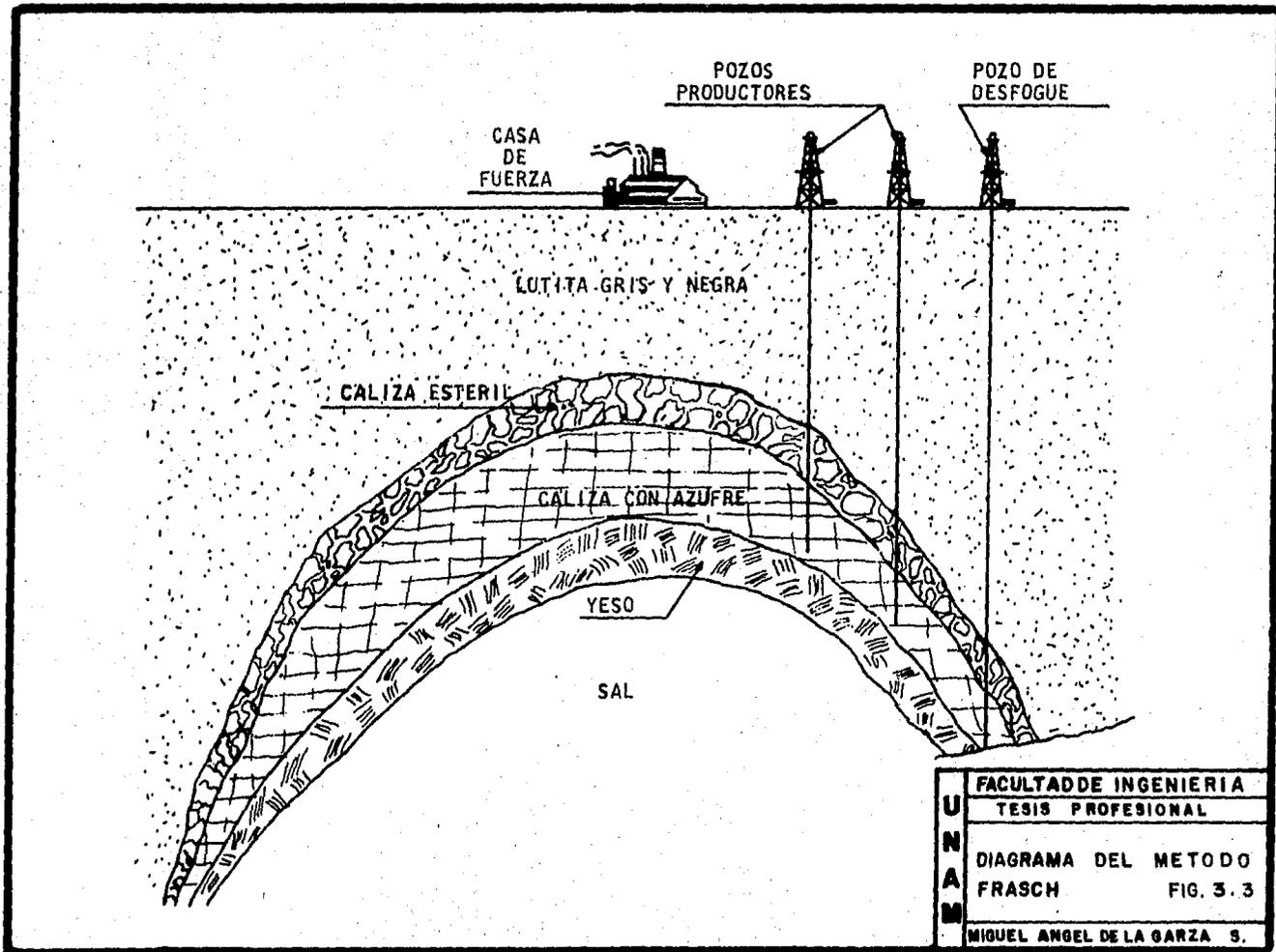
El Azufre se extrae mediante el concurso simultáneo de varios pozos tanto de producción como de drene, dependiendo su número de la capacidad de la planta de fuerza, que es la que produce el aire, agua caliente y vapor.

En la figura 3.3. se observa el concurso de varios pozos de producción combinados con pozos de drene ó de desfogue.

### 3.1.2.- Aplicación en el campo.

Azufrera Panamericana S. A. es una de las compañías más antiguas en el mundo utilizando el método Frasch. Actualmente, en la Unidad Jaltipan, lo aplica en tres áreas las cuales se distinguen por su localización en el campo y por sus características geológico-estructurales.

Para el control de la operación de los pozos y el registro de la producción de Azufre se tienen instaladas Estaciones de Control dentro de cada área de producción. Estas instalaciones sirven de enlace entre los pozos productores y de drene con la planta de fuerza. El control de cada pozo, así como la dosificación de los elementos necesarios (agua caliente, vapor, aire) se efectúa mediante un sistema de válvulas, manómetros, medidores, etc.



Actualmente se opera con cuatro estaciones de control distribuidas en las tres áreas de explotación.

El área # 1, conformada por los lotes 20, 21, 25 y 26, se maneja mediante la estación # 14 que tiene una capacidad para controlar 10 pozos productores.

Los lotes 2J y 4J conforman el área conocida como "El Mangal"; esta área está controlada por la estación # 10 con capacidad para 14 pozos.

Los lotes 1 y 22 pertenecen a la última área, que es controlada por dos estaciones, la # 11 con capacidad para 10 pozos y la estación # 15 con capacidad para 16 pozos.

Actualmente, en la Unidad Jaltipan, se tiene operando un promedio de 30 pozos productores diariamente, procurándose tener igual número de pozos de drene en operación.

La producción diaria de la Unidad Jaltipan varía entre 1,500 y 2,000 toneladas de Azufre, teniéndose un ritmo de extracción de siete toneladas por hora, por pozo.

Para lograr esto es necesario inyectar diariamente, en promedio,  $22,711 \text{ m}^3$  de agua sobrecalentada a una temperatura de  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ , siendo el promedio por pozo de  $757 \text{ m}^3$ . Obteniéndose por lo consiguiente un promedio de  $15 \text{ m}^3$  de agua inyectada por tonelada de Azufre producida.

Los pozos de producción y de drene se equipan e instalan de igual manera en las tres áreas de explotación, variando sólo la profundidad.

Actualmente para los pozos de producción se utilizan cuatro tuberías instaladas concéntricamente y que tienen los siguientes diámetros:

- 1.- Tubería de ademe: 21.9 cm de  $\emptyset$ .
- 2.- Tubería de inyección de agua: 16.8 cm de  $\emptyset$ .
- 3.- Tubería de producción: 8.8 cm de  $\emptyset$ .
- 4.- Tubería de inyección de aire: 2.5 cm de  $\emptyset$ .

La longitud de cada tubería varía de acuerdo a la profundidad del pozo y a los espesores de las formaciones.

En el caso de un pozo de drene, existen dos tipos. Si el pozo se proyecta para operar con bomba de pozo profundo se equipa con las siguientes tuberías:

- 1.- Tubería de ademe: 33.9 cm de  $\emptyset$ .
- 2.- Tubería de ademe: 21.9 cm de  $\emptyset$ .
- 3.- Tubería de drene: 16.8 cm de  $\emptyset$ .

Se observa que existen dos tuberías de ademe, de diferentes diámetros, éstas se unen mediante una conexión para formar una sola tubería.

Para pozos de drene operando en base a la inyección de aire comprimido se utilizan las siguientes tuberías:

- 1.- Tubería de ademe: 21.9 cm de  $\emptyset$ .
- 2.- Tubería de drene: 16.8 cm de  $\emptyset$ .
- 3.- Tubería de aire: 2.5 cm de  $\emptyset$ .

Al igual que en los pozos de producción la profundidad y el espesor de las formaciones son las que determinan la longitud de las tuberías. El Azufre producido por los pozos es conducido mediante tuberías hasta las Estaciones de Control en donde se almacena por un período (un día como máximo). Posteriormente, el Azufre se bombea a la planta de filtros para su tratamiento y almacenamiento final.

### 3.2.- Servicios.

Los servicios de mina son proporcionados por dos plantas de operación continua: la planta de fuerza que inició su operación en 1954 y la planta de calentadores que se instaló en el año de 1969 con el propósito de ampliar la capacidad en el suministro de servicios al campo.

La planta de fuerza fue instalada para los siguientes fines:

- 1.- Producir agua sobrecalentada a 160 °C de temperatura, con capacidad máxima de 30,282 metros cúbicos diarios.
- 2.- Producir aire comprimido a una presión de 42 Kg/cm<sup>2</sup>.

- 3.- Producir energía eléctrica a 2,400 volts y capacidad de 3,000 Kilowats-hora.
- 4.- Producir 400 toneladas por hora de vapor a una presión de  $8.5 \text{ Kg/cm}^2$ .
- 5.- Producir agua de servicio y potable, a una presión de  $10 \text{ Kg/cm}^2$ .

Para cumplir con su cometido la planta de fuerza cuenta con el siguiente equipo:

- 1.- Ocho calderas acuotubulares conectadas en batería con capacidad de 43 toneladas de vapor saturado por hora cada una, el vapor sale a una presión de  $9 \text{ Kg/cm}^2$ .
- 2.- Cinco calentadores de agua, con capacidad de 6,245,250 litros de agua sobrecalentada a  $162 \text{ }^\circ\text{C}$  por día cada uno. El contacto directo es el método de calentar el agua.
- 3.- Cinco compresores reciprocantes con capacidad de 14.15 metros cúbicos por minuto de aire libre.  
Dos compresores de dos etapas conectadas en serie, con capacidad conjunta de 14.15 metros cúbicos por minuto.  
Cuatro compresores con capacidad cada uno de 19.42 metros cúbicos por minuto.
- 4.- Tres turbogeneradores de 1,250 Kwa cada uno, con salida de 2,400 volts.

- 5.- Un turbogenerador de emergencia de 125 Kwa, salida de 450 volts.
- 6.- Ocho suavizadores de agua con capacidad de 189.26 metros cúbicos por minuto.
- 7.- Ocho economizadores de calor y 32 filtros con capacidad de 870 litros por minuto.
- 8.- Bombas con capacidad variable, así como transformadores, tanques, etc. que completan el equipo de la planta de fuerza.

El proceso que se efectúa, en la planta de fuerza, para la producción de servicios es simple y se puede describir de la siguiente manera: El agua utilizada en el sistema se obtiene del Río Chacalapa, ubicado al Norte de las instalaciones de la compañía. El agua es bombeada a la presa de almacenamiento con capacidad de 324,750,000 litros y localizada en un costado de la planta de fuerza.

De la presa se bombea el líquido a los economizadores en donde se eleva la temperatura del agua a 55 °C; una vez precalentada, se envía a los suavizadores en donde es tratada para disminuir su dureza, este tratamiento es a base de Cal y de Carbonato de Sodio.

En los suavizadores el agua aumenta su temperatura a 105 °C, lo cual se logra aprovechando el vapor de escape producido en las calderas.

Una vez que se ha eliminado la dureza y turbidez del agua se inicia la siguiente etapa que consiste en clarificar el líquido para posteriormente enviarlo a los calentadores o a las calderas, según sea el caso.

Los turbogeneradores son accionados por el vapor que se produce en las calderas.

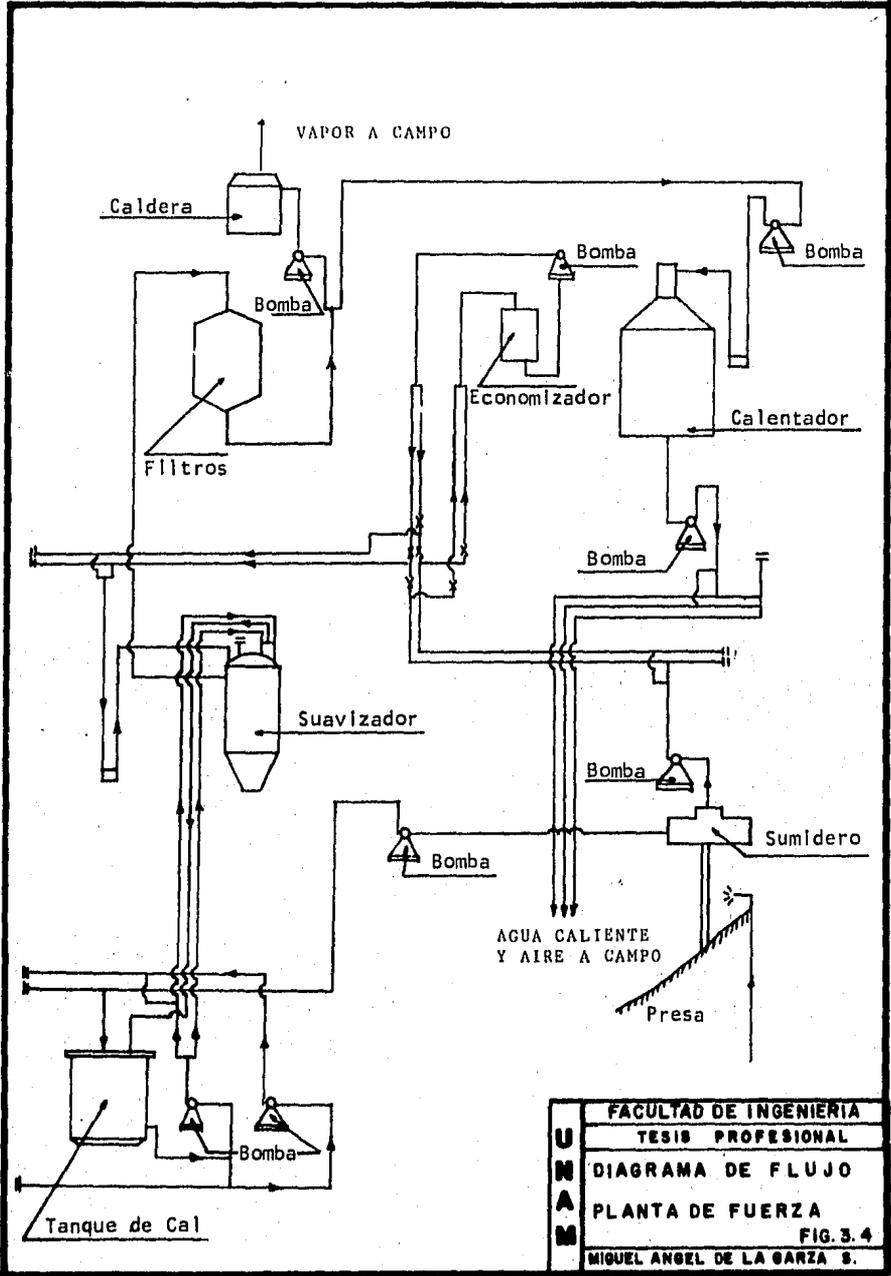
El diagrama de flujo de la planta de fuerza se observa en la figura 3.4.

La planta de calentadores, inició operaciones en el año de 1969, tiene el objetivo de calentar agua a una temperatura de 164 °C y de comprimir aire a una presión de 42 kg/cm<sup>2</sup>.

Para el calentamiento del agua la planta cuenta con ocho calentadores con capacidad de 1,892,500 litros por día cada uno. La producción conjunta es de 15,140,000 litros por día.

El agua antes de entrar a los calentadores es tratada en frío con Zeolita Sódica. Este tratamiento consiste en hacer pasar el agua a través de depósitos que tienen silicatos de Aluminio y Sodio. Estos silicatos tienen la propiedad de absorber el Calcio y Magnesio del agua, debido a que sus bases son permutables.

Debido a esto el Sodio de la Zeolita pasa a la solución en forma de Carbonato, Sulfato o Cloruro, el Calcio y el Magnesio serán absorbi-



<b>UNAM</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
	<b>TESIS PROFESIONAL</b>
	<b>DIAGRAMA DE FLUJO</b>
	<b>PLANTA DE FUERZA</b>
	<b>FIG. 3.4</b>
	<b>MIGUEL ANGEL DE LA GARZA S.</b>

dos por la Zeolita.

Cuando la Zeolita se vuelve inerte se regenera mediante un lavado con salmuera (NaCl) para restituir el Sodio.

Para comprimir el aire la planta cuenta con seis compresores que producen 83 metros cúbicos de aire por minuto a una presión de  $42 \text{ Kg/cm}^2$ . El diagrama de flujo de la planta de calentadores se observa en la figura 3.5.

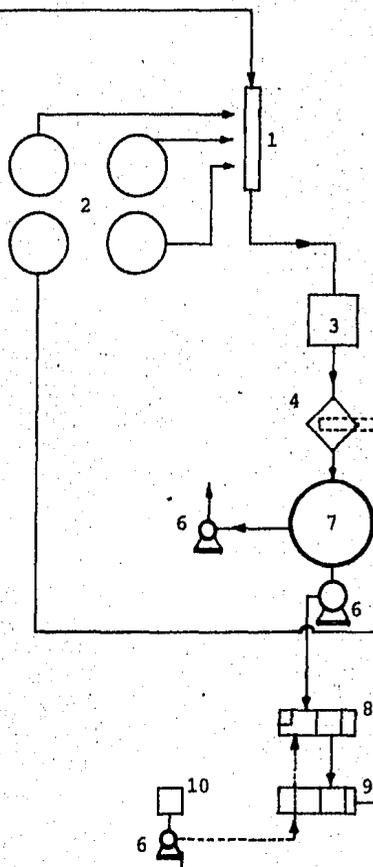
Otra cuestión es el transporte del mineral. El movimiento del Azufre dentro de las áreas de explotación y en la planta de filtros se realiza por medio de tuberías, ya que el mineral se encuentra en estado líquido.

El acarreo del Azufre, para su venta, se efectúa mediante transporte terrestre. Se emplean para esta operación carros tanque (pipas) para el Azufre en estado líquido y góndolas de ferrocarril para el Azufre a granel; la capacidad conjunta de acarreo es de 6,000 toneladas de Azufre diariamente.

La localización de la planta cerca del paso del ferrocarril ha facilitado la operación de transporte y venta del mineral. Desde la estación de ferrocarril "Jaltipan" se puede enviar el producto a cualquier sitio de la República Mexicana.

Para la exportación del producto la Compañía cuenta con una ter-

Bomba  
Presa



3.5.- Diagrama de flujo de la Planta de Calentadores.

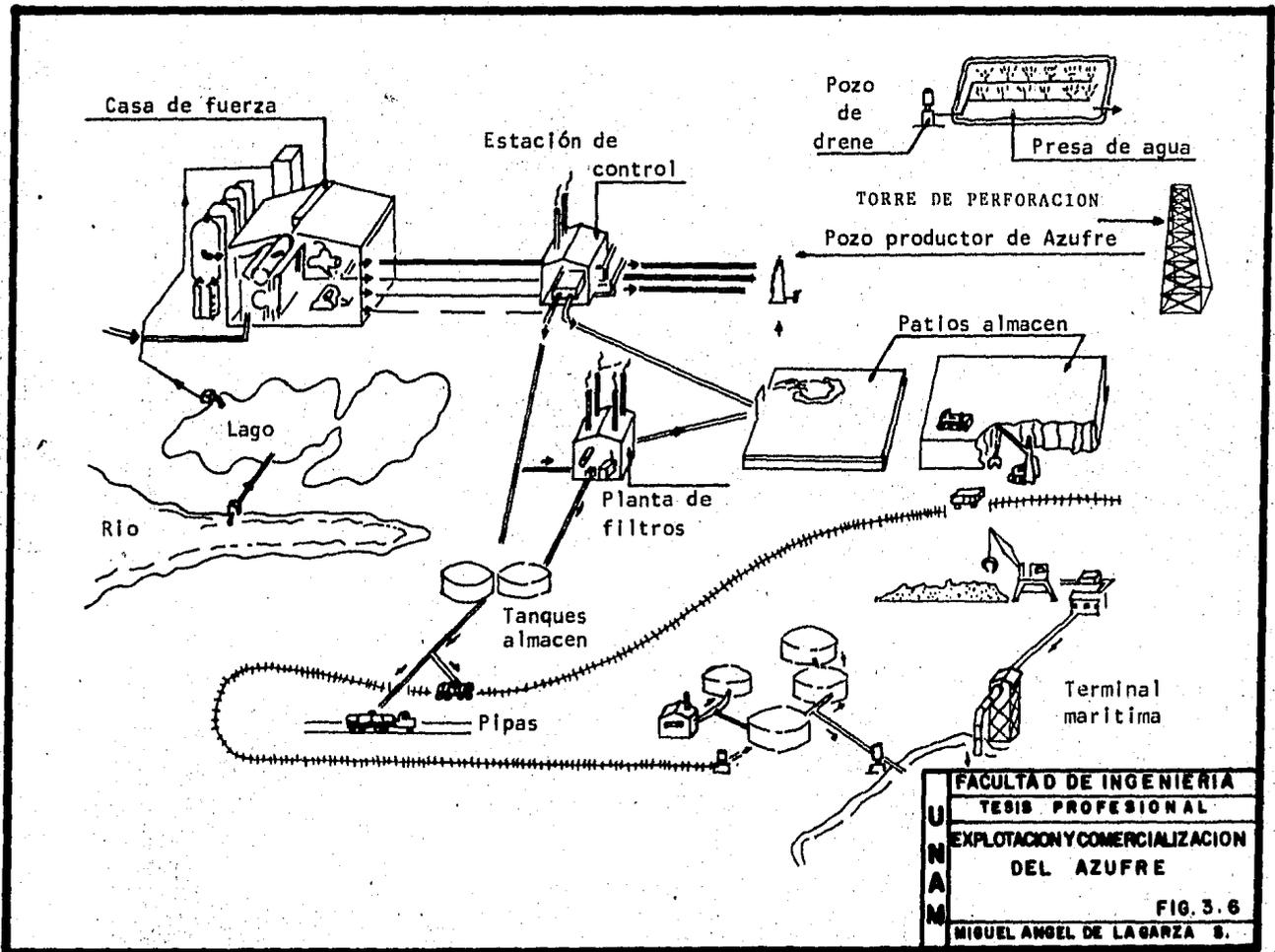
- 1.- Canal de mezclas.
- 2.- Tanques de reactivos.
- 3.- Clarificador.
- 4.- Filtros.
- 5.- Tanque de retrolavado.
- 6.- Bomba.
- 7.- Tanque de agua clara.
- 8.- Suavizador primario.
- 9.- Suavizador secundario.
- 10.- Tanque de Salmuera.
- 11.- Economizadores.
- 12.- Compresores.
- 13.- Desaeradores.
- 14.- Calentadores.

agua caliente  
al campo

FACULTAD DE INGENIERIA
TESIS PROFESIONAL
DIAGRAMA DE FLUJO DE CALENTADORES FIG. 3.5
MIGUEL ANGEL DE LA GARZA S.

minal marítima, en la zona franca del Puerto de Coatzacoalcos, con capacidad para almacenar Azufre en sus dos estados físicos. La capacidad de esta terminal es de 60,000 toneladas de Azufre sólido y de - - 62,000 toneladas de Azufre líquido.

La exportación del producto se realiza por medio de barcos. La Compañía cuenta con todas las instalaciones requeridas para la comercialización del producto. La figura 3.6., es un esquema que nos describe en forma gráfica la explotación y comercialización del Azufre.



UNAM	FACULTAD DE INGENIERIA
	TESIS PROFESIONAL
	EXPLOTACION Y COMERCIALIZACION DEL AZUFRE
	FIG. 3.6
	MIGUEL ANGEL DE LA GARZA S.

#### 4. Tratamiento del Azufre.

##### 4.1.- Propiedades Físico-químicas del Azufre.

A continuación se resumen las propiedades físico-químicas más importantes que posee el Azufre. Algunas de ellas nos proporcionarán ayuda para comprender el proceso de filtración. Otras propiedades nos muestran cualidades que se ignoran sobre este elemento.

El Azufre se encuentra en la naturaleza en estado sólido, es de color amarillo brillante, variando su color de amarillo oscuro a verde, gris y rojo. La variación se debe a la presencia de impurezas que normalmente acompañan al Azufre nativo.

Posee un lustre resinoso (de transparente a traslúcido) y cristaliza en los sistema ortorrómbico dipiramidal, rómbico, monoclinico y es frecuente encontrarlo sin cristalizar (amorfo).

Otra propiedad del Azufre es que no conduce la electricidad y es un pobre conductor del calor.

El Azufre cuando se encuentra en su forma elemental es altamente corrosivo, esta propiedad aumenta cuando se encuentra humedo. (El Aluminio es el metal que mayor resiste la acción corrosiva del Azufre).

Es insoluble en agua y ácidos, pero muy soluble en Bisulfuro de Carbono y varios líquidos orgánicos. Esta propiedad aumenta con el incre-

mento de la temperatura.

La densidad del Azufre es de 2.07 gramos por  $\text{cm}^3$  y disminuye ligeramente por la presencia de hidrocarburos.

La densidad volumétrica del Azufre cuando se encuentra en estado sólido varía entre 1,280 kgs y 1,360 kgs. por metro cúbico.

A continuación se mencionan algunas propiedades y datos sobre el Azufre que es necesario conocer. Algunos de ellos servirán para entender el proceso de filtración y otros serán útiles para conocer al Azufre:

Numero atómico.-	16
Peso atómico.-	32.006
Dureza.-	1.5-2.5 (escala de Moh's)
Temp. de fusión.-	118.9 °C
Temp. de ebullición.-	444.60 °C
Temp. de solidificación.-	114.15 °C
Fractura.-	Concoidal
Clivaje.-	Imperfecto
Raya.-	Blanco.

La viscosidad del Azufre varía de acuerdo con la temperatura:

Temp. °C	Viscosidad kgs./cm/seg.
115.6	0.1190
132.2	0.0893
143.3	0.0744
154.4	0.0595
158.9	0.1190

La temperatura normal para el manejo del Azufre fundido es entre 120 °C y 155 °C, en este rango de temperatura la viscosidad es menor y por consiguiente el manejo del Azufre se facilita.

#### Ignición del Azufre:

Temp. de ignición de las nubes de polvo de S <sub>2</sub> .-	190 °C
Energía de chispa mínima.-	15. milijoules.
Concentración explosiva mínima.-	35 g/m <sup>3</sup>
Presión explosiva mínima.-	2.8 Atm.
Elevación media de presión.-	48 Atm/seg.
Elevación máxima de presión.-	133 Atm/seg.
Por ciento de Oxígeno límite para prevenir ignición por chispa eléctrica.-	11%

El polvo de Azufre, como la mayor parte de los materiales poco conductores de la corriente eléctrica, rápidamente adquiere una carga eléctrica estática en la atmósfera húmeda.

Para fundir el Azufre es necesario aplicar 11.9 calorías por cada gramo de Azufre. Esta constante es conocida como calor de fusión. Ahora bien, en la práctica se requieren aproximadamente 36.1 Cal/g para convertir el Azufre sólido seco en Azufre líquido. Esta propiedad es independiente de la temperatura de fusión del Azufre (120 °C).

Conductividad térmica:

Temp. °C	Conduc. Térmica Cal/cm <sup>3</sup> /seg/°C/cm
115	0.0031
127	0.0032
138	0.0032
149	0.0033
155	0.0033

Densidad del Azufre:

Azufre puro líquido

Temp. °C	g/cm <sup>3</sup>
121.1	1.8037
135.0	1.7912
148.9	1.7795

Azufre contaminado líquido:

Porcentaje de carbón	temperatura °C	g/cm <sup>3</sup>
0.25	135.0	1.7864
0.50	135.0	1.7817
0.25	148.9	1.7750
0.50	148.9	1.7705

Azufre puro sólido:

Monoclínico	1.96 g/cm <sup>3</sup>
Rómbico	2.07 g/cm <sup>3</sup>
Amorfo	1.92 g/cm <sup>3</sup>

Combustión del Azufre:

Aire y  $\text{SO}_2$

Condiciones.-  $0^\circ\text{C}$  y 760 mm de Hg.

$\text{SO}_2$  por kg de Azufre quemado.- 699.0 lts.

Aire por kg de Azufre.- 3329.0 lts.

#### 4.2.- Descripción del proceso de filtración.

La Planta de Filtración de Azufre, de la Unidad Jaltipan de Azufre-  
ra Panamericana, se encuentra localizada al SW del lote 22, ocupando sus  
instalaciones una área aproximada de  $8,000\text{ m}^2$ .

Esta planta entró en operación tiempo después, diez años, de que  
arrancó la Unidad Jaltipan en 1954; tiene como finalidad captar el Azu-  
fre proveniente de las áreas de explotación, tratarlo, filtrarlo y pos-  
teriormente almacenarlo.

La conducción del Azufre hasta el centro de filtrado es mediante tu-  
berías, que comunican las estaciones de control ubicadas en cada área de  
explotación y la planta de filtros. El tratamiento que se le proporciona  
al Azufre es una filtración a presión que permite eliminar las impurezas  
que porta el Azufre líquido proveniente del campo.

El proceso de filtrado consiste fundamentalmente en cuatro etapas y  
se basa en la teoría de filtración de fluidos, que se describe con más  
detalle en el capítulo siguiente. En resumen esta teoría sigue los prin

cipios básicos de la separación de un sólido de un líquido, complementándose con conceptos de mecánica de fluidos.

El Azufre extraído del subsuelo contiene impurezas que lo contaminan y que deterioran su valor comercial. Entre estas impurezas, principalmente hidrocarburos, el carbón es el que se presenta en mayor porcentaje. En el Municipio de Jaltipan el porcentaje promedio de carbón en el Azufre es de 0.24178%. Dentro de este Municipio existen áreas que producen Azufre con un 0.4000% de impurezas, las cuales son consideradas como áreas con alta contaminación de hidrocarburos; otras áreas que producen Azufre con un mínimo de contaminación son denominadas como bajas en contaminación y son las que proporcionan el Azufre de más alta calidad.

En el mercado nacional e internacional el valor del Azufre es de acuerdo a su pureza, estando clasificado por calidades que dependen del grado de contaminación del Azufre.

En la planta de filtrado de la Unidad Jaltipan se obtienen tres calidades de Azufre:

Calidad "A" con 0.18% de carbón  
Calidad "B" con 0.08% de carbón  
Calidad "C" con 0.05% de carbón.

Se produce una cuarta calidad con 0.25% de carbón que se ha dejado de obtener debido a la falta de aceptación que tiene este producto en el mercado.

Esta calidad de Azufre es una mezcla del Azufre extraído en las diferentes áreas y que no recibe ningún tratamiento.

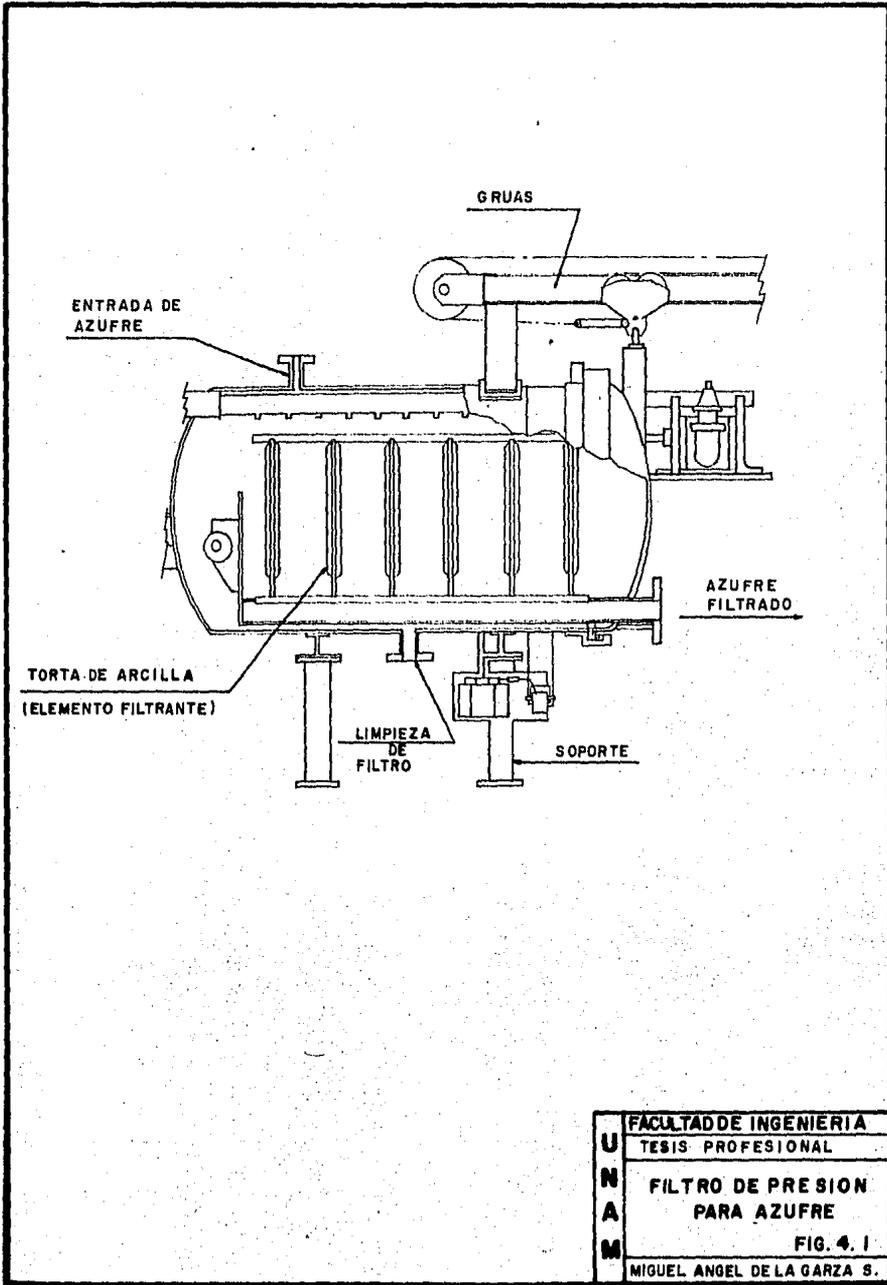
La calidad de Azufre más cotizada en el mercado es la Tipo "C". Pero a su vez es la de mayor costo de producción debido a la cantidad de reactivos y materiales que se deben utilizar para obtenerla. Actualmente la Planta de Filtros produce normalmente las calidades "A" y "B", la calidad "C" se obtiene cuando el azufre crudo (azufre directo del campo) presenta un bajo porcentaje de contaminación.

El proceso de filtración, como se mencionó, consta de cuatro etapas que comprenden un ciclo, el tiempo en el que se efectúa este ciclo, lo determina la calidad de azufre que se desea obtener, a más alta calidad se tiene un ciclo más prolongado.

Las etapas que conforman el ciclo son:

- 1.- Acondicionamiento del equipo.
- 2.- Acondicionamiento del azufre.
- 3.- Filtración a presión.
- 4.- Limpieza.

La primera etapa del ciclo consiste en acondicionar el equipo mecánico que filtrará el azufre. Los filtros de presión, Fig. 4.1., son cuerpos cilíndricos de 3.6576 metros de longitud y 1.8288 metros de diámetro. En el interior de los filtros se encuentran los elementos fil-



<b>U N A M</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
	<b>TESIS PROFESIONAL</b>
	<b>FILTRO DE PRESION PARA AZUFRE</b>
	<b>FIG. 4. 1</b>
<b>MIGUEL ANGEL DE LA GARZA S.</b>	

trantes comunmente llamados mallas. Estas mallas se encuentran distribuidas a lo largo del filtro en posición vertical, cada filtro de presión contiene 23 elementos filtrantes. Los elementos son de forma rectangular, compuestos por una armazon de Hierro y cubiertas con malla de acero. Están conectados a una tubería en común, la cual extrae el azufre del filtro.

Para que el filtro quede en condiciones de operar se reparan todas las mallas que se encuentran dañadas por la acción de los reactivos y del azufre mismo. Se reparan o sustituyen por nuevas, la armazón difícilmente se estropea.

Además del acondicionamiento del filtro se reparan bombas, tanques, tuberías, accesorios e instrumentos de medición y control.

Esta primera etapa incluye la preparación y adición de la torta auxiliar de filtración; esta torta es una capa de arcilla de espesor uniforme que se adhiere a las mallas de acero y es el medio en el cual se retienen las impurezas que acarrea el azufre al pasar por los filtros.

La preparación de la torta se efectúa en tanques-almacén predestinados para esta operación; se mezcla azufre crudo con arcilla, la proporción depende del espesor de arcilla que se desee tener adherida a la malla. En esta operación el azufre líquido funciona como medio de transporte al conducir la arcilla hasta los filtros.

A la mezcla preparada en los tanques se le denomina Pretorta, la cual se bombea a los filtros y se recircula a su lugar de origen, la arcilla quedará adherida a las mallas formando una capa con un espesor uniforme que se llama Torta Auxiliar de Filtración.

Terminada esta operación se puede decir que se cumplió con la primera etapa del ciclo de filtración.

La preparación del Azufre para ser filtrado es la parte fundamental de la segunda etapa del ciclo de filtración. El Azufre se acondiciona para ser bombeado a los filtros de presión.

El acondicionamiento consiste en hacer reaccionar al Azufre crudo con Acido Sulfúrico de tal manera que los hidrocarburos presentes en el Azufre se aglomeren y precipiten quedando en suspensión, lo cual hará que queden retenidos en las mallas filtrantes.

La cantidad de reactivo ( $H_2SO_4$ ) utilizada depende de la calidad de azufre que se desee obtener, en términos generales en la planta de filtros se utilizan las siguientes cantidades:

Calidad "A"	5.453 litros $H_2SO_4$ /Ton	Azufre
Calidad "B"	13.630 litros $H_2SO_4$ /Ton	Azufre
Calidad "C"	19.080 litros $h_2SO_4$ /Ton	Azufre

Como se observó cuando se trata de obtener una alta calidad de

azufre es necesario utilizar una mayor cantidad de reactivo. Por esta razón, al tratar de obtener azufre más puro se elevan los costos de producción puesto que se emplean más reactivos y el equipo y elementos filtrantes se deterioran con mayor rapidez debido a la acción corrosiva del Acido Sulfúrico.

La estancia del Azufre en los tanques reactores es muy variable, no existiendo una regla que controle esta función. Generalmente, el tiempo promedio de reacción es de 20-40 minutos.

La siguiente etapa es la operación de filtrado; el azufre se bombea de los tanques reactores a los filtros a una presión de  $4 \text{ Kg/cm}^2$ , recibiendo una filtración primaria. El Azufre fluirá a los tanques de paso, en estos tanques se adiciona Cal con la finalidad de controlar el pH del líquido. Posteriormente, se le aplica una filtración secundaria para finalmente ser bombeado a su lugar de almacenamiento.

El Azufre queda almacenado en dos estados físicos: como sólido en los patios almacén y como líquido en los tanques almacén.

La cuarta etapa del ciclo de filtración comprende la limpieza de los filtros y de los elementos filtrantes. Esta operación consta de dos pasos: primero se vacían los filtros bombeando el Azufre remanente a los tanques almacén, para ello se emplea aire comprimido con el fin de dejar a los filtros completamente libres de Azufre. El segundo paso es la limpieza. Se elimina la torta auxiliar de filtración que contiene

las impurezas que son producto de la filtración.

Utilizando maderos se raspan y golpean los elementos filtrantes desprendiendo la torta e impurezas que son reunidas y enviadas a su respectivo almacén. Estudios de laboratorio han determinado que este material de desperdicio contiene un 60% de azufre.

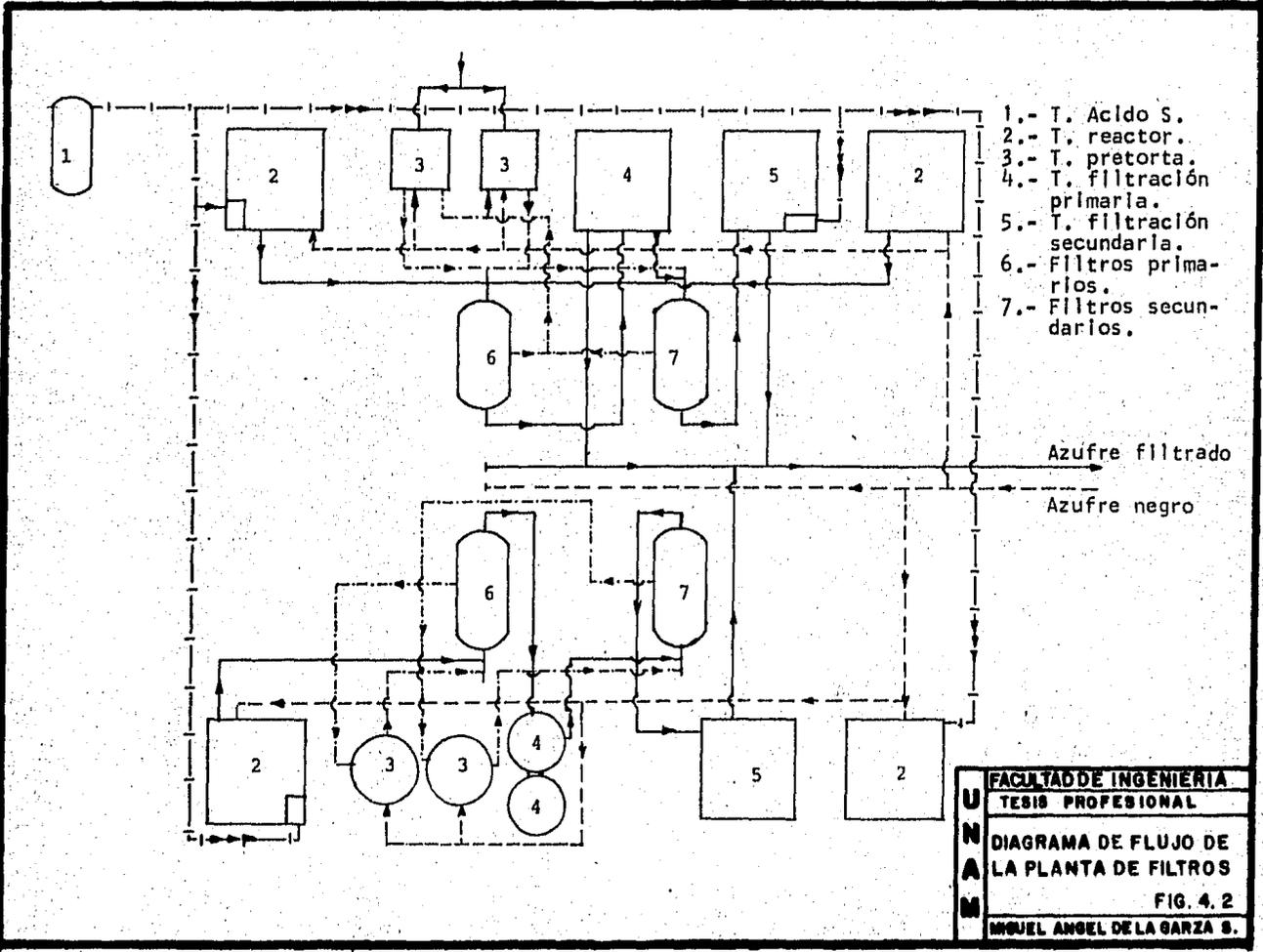
Posterior a la limpieza se lavan los elementos filtrantes con agua y aire a presión, se revisa el filtro y finalmente se arma. Con esta última acción se da por terminado el ciclo de filtrado.

El diagrama de flujo del proceso de filtración se puede consultar en la figura 4.2.

La planta de filtros, para una operación más eficiente se encuentra dividida en dos áreas independientes, que en determinado momento pueden funcionar conjuntamente.

En el área # 1 se cuenta con seis filtros de presión, cuatro que efectúan la filtración primaria y los dos restantes realizan la filtración secundaria. Para la preparación de la pretorta se tienen dos tanques que surten la mezcla indistintamente a los seis filtros instalados en el área.

Existen dos tanques reactores en donde se recibe el azufre crudo y se inicia la adición del Acido Sulfúrico. Otros dos tanques instala-



- 1.- T. Acido S.
- 2.- T. reactor.
- 3.- T. pretorta.
- 4.- T. filtración primaria.
- 5.- T. filtración secundaria.
- 6.- Filtros primarios.
- 7.- Filtros secundarios.

Azufre filtrado  
 Azufre negro

<b>U N A M</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
	<b>TESIS PROFESIONAL</b>
	<b>DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE FILTROS</b>
	<b>FIG. 4. 2</b>
<b>MOJEL ANSEL DE LA GARZA S.</b>	

dos en el área sirven como almacenes de paso correspondiendo uno para la filtración primaria y el otro para la filtración secundaria.

Para que el azufre circule a través del sistema se cuenta con bombas verticales instaladas en la parte superior de cada tanque del área.

El área # 2 cuenta con seis filtros de presión, dos tanques reactores, dos tanques de protorta y dos tanques de almacenamiento. La operación de esta área y del equipo es similar a la del área # 1, varía solamente en lo que respecta a la distribución de la pretorta para cada filtración, primaria y secundaria.

Ambas áreas de trabajo cuentan con su almacén independiente de arcilla y de cal. La reparación y mantenimiento del equipo la proporciona el taller que depende de la planta de filtros.

Los servicios necesarios para el proceso de filtración: agua, energía eléctrica, aire comprimido y vapor son proporcionados por la Planta de Fuerza de la Unidad Jaltipan.

El ácido consumido en el proceso es producido en la planta de Acido Sulfúrico # 1, que se encuentra instalada en un costado de la planta de filtros. Esta planta de ácido tiene una capacidad teórica de 15 toneladas métricas por día (nueve toneladas métricas por día, en operación).

El ácido se almacena en cuatro tanques de diferentes capacidades.

El diagrama de flujo de la planta de ácido # 1 se observa en la figura 4.3.

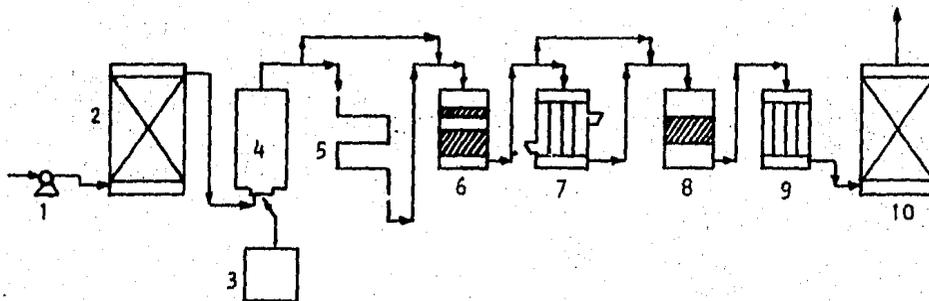
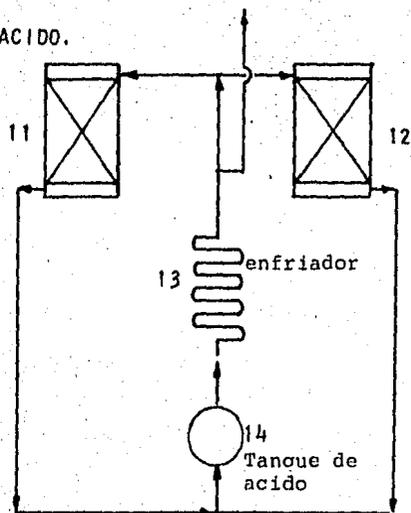


DIAGRAMA DE FLUJO DE ACIDO.



- 1.- Soplador.
- 2.- Torre de secado.
- 3.- Tanque de azufre.
- 4.- Quemador de azufre.
- 5.- Enfriador.
- 6.- Convertidor primario.
- 7.- Intercambiador de calor.
- 8.- Convertidor secundario.
- 9.- Enfriador de  $SO_2$ .
- 10.- Torre de absorción.
- 11.- Torre de secado.
- 12.- Torre de absorción.

<b>U N A M</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
	<b>TESIS PROFESIONAL</b>
	<b>DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE ACIDO SULF.</b>
	<b>FIG. 4.3</b>
<b>MIGUEL ANGEL DE LA GARZA S.</b>	

## 5.- Análisis para mejorar la calidad del azufre filtrado.

### 5.1.- Teoría de la filtración.

Toda operación metalúrgica o química como molienda, trituración, flotación, cianuración, filtración, centrifugación, electrodeposición, etc., tiene bases teóricas y científicas que son, a final de cuentas, las que rigen dichas operaciones.

En este caso la filtración está regida por bases teóricas que tienen sus principios en la mecánica de fluidos y en la química. El fluido es un líquido caliente, viscoso, que fluye a través de un medio compuesto por diferentes materiales y que además reacciona químicamente a lo largo de todo el proceso.

#### 5.1.1.- Bases teóricas.

Se llama filtración a la operación que tiene por objeto separar los sólidos de una suspensión haciéndola pasar por un medio poroso que retiene dichos sólidos. En este caso el medio mencionado está constituido por pequeños tubos capilares.

El flujo del fluido, al atravesar el medio es viscoso y laminar, siguiendo por consiguiente la Ley de Poiseville, representada por la siguiente expresión:

$$P = 32 \mu L / g_c D^2$$

Donde:

$P$  = caída de presión.

$\eta$  = viscosidad.

$v$  = velocidad lineal del líquido.

$g$  = constante dimensional.

$L$  = longitud de los capilares.

$D$  = diámetro de los capilares.

Partiendo de esta ecuación se puede llegar a otras expresiones de aplicación práctica, que se tratarán en el punto 5.1.2.

El medio filtrante lo constituye la misma capa de sólidos retenidos; la malla o filtro que retiene la torta es sólo una armazón.

La malla presenta una resistencia que depende de la suspensión por filtrar, es decir que para cada caso será distinta la resistencia aunque se emplee la misma malla.

Ahora bien tenemos que:

$$Q = vS \quad (1)$$

Donde:

$Q$  = gasto volumétrico.

$v$  = velocidad.

$S$  = sección.

A su vez:

$$Q = dV/dt \quad (2)$$

y

$$S = \pi D^2/4 \quad (3)$$

Igualando la ecuación (1) con la ecuación (2) y despejando la velocidad obtendremos:

$$vS = dV/dt$$

$$v = dV/Sdt \quad (4)$$

Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (4) obtendremos que la velocidad es igual a:

$$v = dV/(\pi D^2/4)dt \quad (5)$$

Despejando la velocidad en la ecuación de Poiseville e igualándola con la ecuación (5) se tendrá:

$$v = P_g D^2 / 32 \eta L$$

$$dV/(\pi D^2/4)dt = P_g D^2 / 32 \eta L$$

Y reordenando esta última expresión:

$$dV/dt = \pi D^4 g_c P / 128 \eta L \quad (6)$$

La expresión (6) es la que determina el flujo de un fluido a través de un capilar ( $dV_c/dt$ ). Ahora bien si tenemos "K" capilares por unidad de área, se tiene que siendo "A" el área total:

$$dV/dt = KAdV_c/dt$$

$$dV/dt = KA\pi D_c^4 P/128 \mu L$$

Por lo que el flujo en toda el área será:

$$dV/Adt = K\pi D_c^4 P/128 \mu L \quad (7)$$

En esta última expresión "P" es el potencial que hace fluir al líquido, " $K\pi D_c^4/128$ " es una conductancia y su inversa la resistencia a la cual llamaremos "r"; por lo tanto la expresión (7) se simplifica a:

$$dV/Adt = P/r \mu L \quad (8)$$

La expresión (8) determina el flujo a través del medio filtrante, ahora bien, la malla que es la que retiene al medio filtrante, tiene una expresión análoga a (8), o sea, que el flujo a través de la malla será directamente proporcional al valor de "P" e inversamente proporcional a la resistencia específica de la malla " $\rho$ " por lo tanto:

$$dV/Adt = P/\mu \rho \quad (9)$$

De lo anterior se puede observar a continuación que la caída de presión total, en el proceso de filtración, es igual a la suma de caídas de presión en la malla y en el medio filtrante (torta); por lo tanto utilizando las expresiones (8) y (9) tendremos:

$$P_1 + P_2 = P_T$$

Por lo tanto:

$$P_t = r\gamma L dV/Adt + \gamma \rho dV/Adt$$

$$P_t = (r\gamma L + \gamma \rho) dV/Adt \quad (10)$$

En la figura 5.1., se puede observar que la caída de presión total en la filtración es igual a la suma de las caídas de presión parciales, en la torta y en la malla respectivamente.

Si tomamos en cuenta que "V" es el volumen de sólidos depositados por unidad de volumen (v'), y el volumen de la torta es "AL" se tiene:

$$AL = v'V$$

De donde:

$$L = v'V/A \quad (11)$$

Sustituyendo en la ecuación (10) la expresión (11) obtendremos:

$$P_t = \gamma (rv'V/A + \rho) (dV/Adt) \quad (12)$$

La ecuación (12) ha quedado en función de la presión y del flujo. Si se toman presiones manométricas, se separan variables y se integra considerando el flujo constante tendremos:

$$\begin{aligned}
 APdt &= \mu (rv'V/A + \rho) dV \\
 dV &= APdt / \mu (rv'V/A + \rho) \\
 \int dV &= \left[ AP / \mu (rv'V/A + \rho) \right] \int dt \\
 V &= APt / \mu (rv'V/A + \rho) \quad (13)
 \end{aligned}$$

Ahora bien integrando a presión constante:

$$\begin{aligned}
 Pdt &= \mu (rv'V/A + \rho) dV/A \\
 Pdt &= \mu rv'VdV/A^2 + \mu \rho dV/A \\
 \int Pdt &= \left[ \mu rv'/A^2 \right] \int VdV + \left[ \mu \rho/A \right] \int dV \\
 Pt &= \mu rv'V^2/2A^2 + \mu \rho V/A \quad (14)
 \end{aligned}$$

Por medio de las ecuaciones (13) y (14) se puede valorar el cambio de cualquier variable que interviene en el proceso de filtración. Sin embargo, para fines prácticos es mejor trabajar con la presión constante.

#### 5.1.2.- Aplicación Práctica.

Prácticamente es más fácil trabajar a presión constante, puesto que el valor de la resistencia "r" es constante para cada torta y crece proporcionalmente a la cantidad de sólidos depositados por unidad de área filtrante. Estas tortas se llaman incompresibles, aunque este tipo en realidad no existe.

La mayoría de los sólidos al ser retenidos por la malla van haciéndose más compactos, tendiendo a obstruir los capilares, las partículas más alejadas del lado de la suspensión soportan una presión ejercida por el fluido; este efecto se corrige suponiendo que "r" es una función de la forma:

$$r = \alpha p^s \quad (15)$$

Donde " $\alpha$ " es una constante que depende del tamaño de las partículas que forman la torta y "s" es el coeficiente de compresibilidad que puede valer desde cero para tortas incompresibles hasta uno para tortas compresibles.

Los límites de "s" entre cero y uno solamente son hipotéticos, pues oscilan entre 0.1 a 0.85 por lo que se entiende que sólo existen tortas relativamente compresibles. La ecuación (15) da resultados apreciables a presiones moderadas, menos de 4 Kg/cm<sup>2</sup>.

Para la resistencia de la malla existe otra ecuación similar a la (15):

$$\rho = \rho' p^m \quad (16)$$

El valor de " $\rho'$ " depende de la malla y "m" es el coeficiente de obstrucción.

La utilidad práctica de la ecuación (14) se observa si factorizamos y arreglamos dicha expresión de tal manera que:

$$(Pt)/(V/\Delta) = (\gamma_{rv}'/2)(V/\Delta) + \gamma_{\rho}/P$$

$$t/(V/\Delta) = (\gamma_{rv}'/2P)(V/\Delta) + \gamma_{\rho}/P \quad (17)$$

La expresión (17) representa la ecuación de una línea recta. Si tomamos el valor de " $t/(V/\Delta)$ " como ordenada y el valor de " $V/\Delta$ " como abscisa se tiene una línea recta cuya pendiente es " $\gamma_{rv}'/2P$ " y su ordenada al origen es " $\gamma_{\rho}/P$ ".

Por medio de esta ecuación y su representación gráfica se puede valorar el cambio de cualquier variable, excepto la presión que hace variar a " $r$ ". Para conocer esta variación pueden hacerse varias pruebas a distintas presiones obteniéndose igual número de rectas, con diferentes pendientes y ordenadas al origen, figura 5.2.

Conocidos los valores de las pendientes y de las ordenadas en el origen es posible determinar los valores de " $r$ " y de " $\rho$ ", de la siguiente manera:

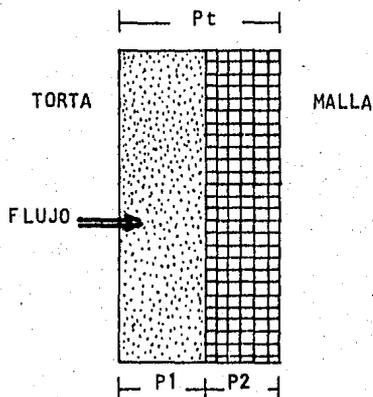
Sea el valor de las pendientes " $a$ " y " $b$ " el valor de las ordenadas en el origen, se tiene entonces que:

$$a = \gamma_{rv}'/2P \quad (18)$$

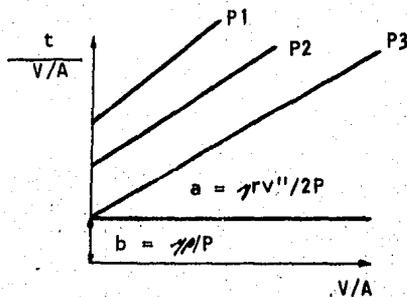
$$b = \gamma_{\rho}/P \quad (19)$$

Despejando de la ecuación (18) a " $r$ ", se tiene:

$$r = a2P/\gamma_{v}' \quad (20)$$



5.1.- LA PRESION TOTAL EN LA UNIDAD FILTRANTE ES LA SUMA DE LAS PRESIONES PARCIALES DE LA MALLA Y DE LA TORTA.



5.2.- VALOR DE LAS VARIABLES CUANDO SE TRABAJA A DIFERENTES PRESIONES.

<b>U N A M</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
	<b>TESIS PROFESIONAL</b>
	<b>FIG. 5.1 Y 5.2</b>
	<b>NIGUEL ANGELO DE LA GARZA S.</b>

Ahora bien, por otro lado, de las ecuaciones (15) y (16) sabemos que:

$$r = \alpha P^s$$

y

$$p = p' P^m$$

Si se toman logaritmos decimales ( $\log_{10}$ ) resultan ecuaciones de líneas rectas en la forma siguiente:

$$\log. r = \log. \alpha + s \log. P$$

y

$$\log. p = \log. p' + m \log. P$$

Los valores de las pendientes son "s" y "m" y las ordenadas en el origen " $\log. \alpha$ " y " $\log. p'$ ".

Las rectas se obtienen graficando en el eje de las abscisas los logaritmos de las presiones, y en el eje de las ordenadas los logaritmos de "r", y en otra gráfica similar los de "p".

Una vez trazadas las rectas se determinan fácilmente los valores de "s", "m", " $\alpha$ " y " $p'$ " como se observa en las figuras 5.3 y 5.4.

Teóricamente el proceso de filtración es óptimo si se controlan todas las variables que intervienen.

Figura 5.3.- Determinación de las variables "s" y " $\alpha$ ".

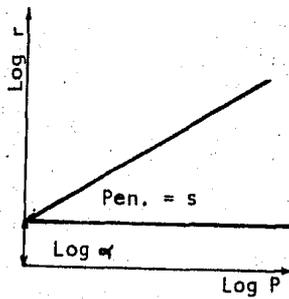
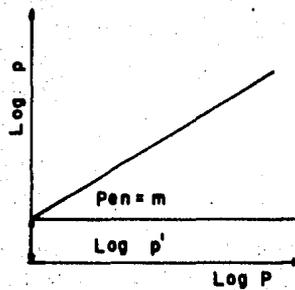


Figura 5.4.- Determinación de las variables " $\rho$ " y "m".



U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA
	TESIS PROFESIONAL
	DETERMINACION DE VALORES DE LAS VARIABLES
	FIG. 5.3 Y 5.4
MIGUEL ANGEL DE LA GARZA S.	

La presión en el proceso puede actuar de dos formas: en las tortas poco compresibles el aumento de presión origina un aumento en el flujo de filtrado; en el caso de tortas muy compresibles el aumento de presión dá lugar a que dichas tortas se vayan haciendo más compactas, disminuyendo por lo tanto, la velocidad de filtración.

La viscosidad de la solución por filtrar influye notablemente en la filtración, pues ésta se hace más difícil cuando la viscosidad aumenta. Sabiendo que la viscosidad es función de la temperatura (a mayor temperatura menor viscosidad), es conveniente realizar la filtración en caliente.

## 5.2.- Reactivos.

### 5.2.1.- Acido Sulfúrico.

Dentro del proceso de filtración el reactivo utilizado es el Acido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), el cual reacciona con los hidrocarburos que se encuentran mezclados en el Azufre que proviene del subsuelo. En este momento la materia prima, el Azufre, se comporta como medio de transporte de los hidrocarburos.

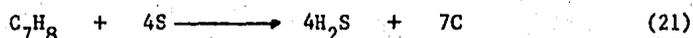
La mezcla de hidrocarburos, que químicamente se puede representar por la fórmula  $C_7H_8$ , reacciona con el Acido Sulfúrico formando Carbón elemental más Dióxido de Azufre y vapor de agua.

El Carbón queda en suspensión y al pasar por el área filtrante que dará retenido en forma de sólido para eliminarse posteriormente. El Dióxi-

do de Azufre y el vapor de agua abandonan el proceso en forma de gas.

No todos los hidrocarburos se eliminan en el proceso, y al final del mismo se hacen presentes afectando la calidad del Azufre filtrado.

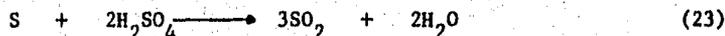
En el proceso de filtración se efectúan cuatro reacciones químicas básicas. La primera reacción se origina desde el momento en que el Azufre cambia de estado sólido a estado líquido, el Azufre fundido reacciona con los hidrocarburos formando Acido Sulfhídrico y Carbón elemental. Esta reacción se desarrolla a una velocidad muy lenta y se puede representar por la ecuación siguiente:



La segunda reacción se desarrolla dentro de los tanques reactores, al adicionar el ácido sulfúrico al azufre. Realmente son dos las reacciones las que se efectúan; una, la que origina el ácido sulfúrico con los hidrocarburos y, la otra, la desarrollada por el mismo ácido pero con el azufre. Por lo tanto:



y



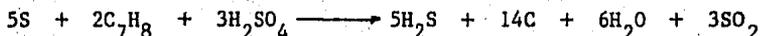
La cuarta y última reacción es producto de las tres primeras reacciones del proceso. El ácido sulfhídrico producido en las reacciones (21) y (22) se combina con el Dioxido de Azufre obtenido en la reacción (23) produciendo Azufre elemental más agua. Esta reacción se puede representar de la

siguiente manera:

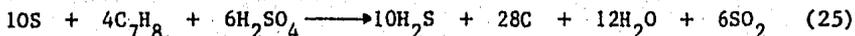


Para efectos de cálculo se considera que las cuatro reacciones se efectúan a la misma velocidad, a reserva de que esto no sea totalmente cierto. Esto se hace con el fin de representar todas las reacciones químicas del proceso en una sola que nos permita cuantificar la cantidad de Acido Sulfúrico utilizada en la filtración.

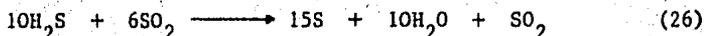
Por lo tanto, sumando las ecuaciones (21), (22) y (23) se obtiene:



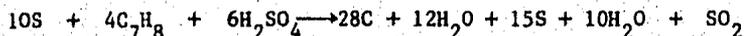
Multiplicando esta última expresión por dos, con el fin de facilitar el balance estequiométrico, se obtiene:



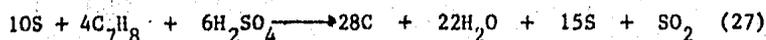
El Acido Sulfhídrico y el Dióxido de Azufre obtenidos en el segundo término de la ecuación (25) reaccionan de acuerdo a lo establecido por la expresión (24), de tal manera que:



Sustituyendo la ecuación (26) en la ecuación (25) se obtendrá:



Arreglando:



Esta última ecuación se tomará como base para el cálculo del Acido Sulfúrico necesario en el proceso.

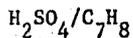
Los pesos moleculares (P.M.) de los compuestos y elementos que intervienen en la reacción de la ecuación (27), son:

<u>Nombre</u>	<u>Fórmula</u>	<u>P.M.</u>	<u>Moléculas</u>	<u>P.T.</u>
Agua	H <sub>2</sub> O	18	22	396
Hidrocarburos	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92	4	368
Acido Sulf.	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98	6	588
Carbón	C	12	28	336
Azufre	S	32	25	800
Diox. Azufre	SO <sub>2</sub>	64	1	64

(P.T.) significa peso total de las moléculas.

De la tabla anterior se observa que seis moléculas de Acido Sulfúrico reaccionan con cuatro moléculas de hidrocarburos para obtener 28 moléculas de Carbón elemental.

Por lo tanto, utilizando las moléculas y los pesos totales:



$$588/368 = 1.6 \text{ Kg de H}_2\text{SO}_4 \text{ por Kg de C}_7\text{H}_8$$

y



$$588/336 = 1.75 \text{ Kg de H}_2\text{SO}_4 \text{ por Kg de C.}$$

La relación en peso entre el Acido Sulfúrico y el Carbón mezclado en el Azufre es de 1.75 : 1.0, considerando que la reacción se realiza en un 100%.

Se tiene una relación directamente proporcional entre la cantidad de hidrocarburo presente y el ácido utilizado como reactivo. Dicha relación la podemos representar por medio de la siguiente expresión:

$$Y = KX \quad (28)$$

Donde:

Y = Cantidad de Acido Sulfúrico.

X = Cantidad de hidrocarburos.

K = Constante (1.75).

La cantidad de Acido Sulfúrico en la reacción y en el proceso se podrá determinar conociendo la cantidad de hidrocarburo que se desee eliminar.

Si se denomina "Z" a la cantidad de hidrocarburo que contiene la mezcla de Azufre e hidrocarburos que viene del campo, y llamamos "J" a la cantidad de hidrocarburos que se pretende tener como máximo en el Azufre filtrado, entonces "Z - J" es la cantidad de hidrocarburo que se deberá eliminar.

Por lo tanto:

$$Y = K(Z - J)$$

Donde:

$$X = Z - J$$

Se conoce la densidad del Acido Sulfúrico por lo que se cuantifica el reactivo en unidades de volumen. Esto facilita las cosas pues el Acido se presenta físicamente en estado líquido.

Si representamos en un eje cartesiano la relación ácido-hidrocarburo, figura 5.5., se puede observar que a mayor contaminación con hidrocarburos será necesario utilizar mayor cantidad de ácido.

La expresión graficada es:

$$Y = K(Z - J)(1/d) \quad (29)$$

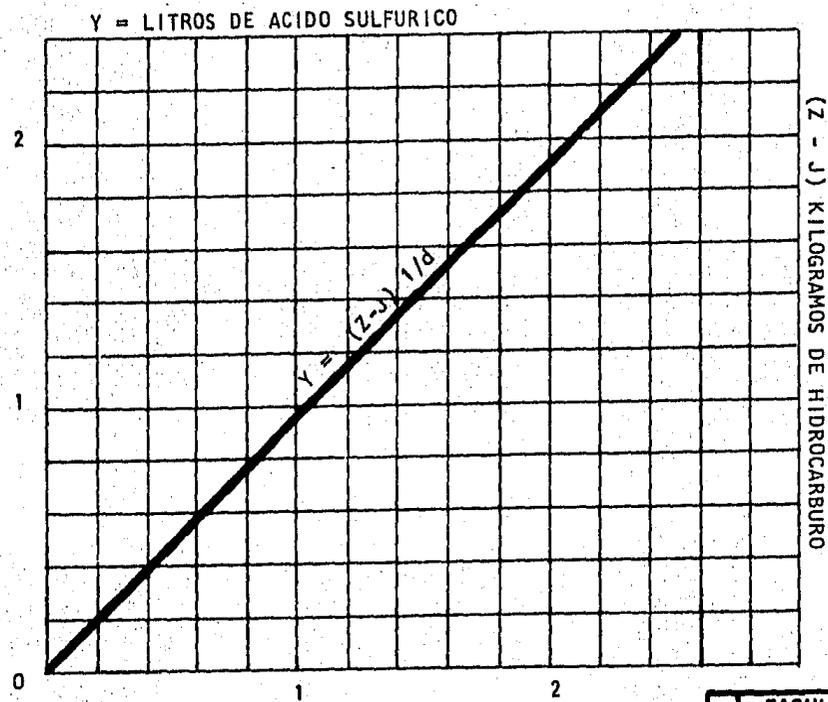
Donde:

d = Densidad del Acido Sulfúrico.

#### 5.2.2.- Consumo real y teórico de ácido.

El Azufre recibido en la planta de filtración proviene de las diferentes áreas de producción; el Azufre contaminado se bombea de las estaciones de control localizadas en el campo.

El grado de contaminación del Azufre varía en cada área de producción. Un análisis del contenido de Carbón de acuerdo al área de extracción se resume en el cuadro 5.1.; hay cuatro estaciones de control y el porcentaje de Carbón se determinó en el laboratorio de la empresa. Se consideró el tonelaje de Azufre bombeado por cada estación de control y finalmente se obtuvo un porcentaje general y un porcentaje por área de producción.



<b>U N A M</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>
	<b>TESIS PROFESIONAL</b>
	<b>RELACION ACIDO HIDROCARBURO</b>
	<b>FIG. 5.5</b>
<b>MANUEL ANGEL DE LA GARZA S.</b>	

Cuadro 5.1.- Porcentaje de Carbón en las diferentes áreas de producción y porcentaje general.

Estación de Control			I D E M			I D E M			I D E M		
C. C. # 10			E. C. # 11			E. C. # 14			E. C. # 15*		
%C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	Tons.	Con.	%C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	Tons.	Con.	%C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	Tons.	Con.	%C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	Tons.	Con.
0.193	115	.221	0.189	260	.491	0.255	437	1.11	-	-	-
0.202	148	.298	0.221	316	.698	0.232	411	0.95	-	-	-
0.179	184	.329	0.229	377	.863	0.395	467	1.84	-	-	-
0.245	227	.556	0.191	318	.607	0.348	295	1.02	-	-	-
0.271	271	.734	0.159	466	.740	0.315	415	1.30	-	-	-
0.273	215	.586	0.296	578	1.71	0.334	288	0.96	-	-	-
0.232	272	.631	0.221	362	.800	0.263	277	0.72	-	-	-
0.304	191	.580	0.213	304	.647	0.313	313	0.97	0.112	-	-
0.283	193	.546	0.213	398	.847	0.206	316	0.65	0.102	408	.416
-	1816	4.480	-	3379	7.400	-	3219	9.56	-	408	.416
0.247%			0.019%			0.297%			0.102%		

General: Tons.- 8822  
0.2478%

\* Los análisis posteriores oscilan en un 0.10 +/- 0.01% C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>.

Nota.- Los datos para el análisis se obtuvieron durante el tercer trimestre de 1982.

F.C.= Estación de Control.

Se observa que el porcentaje promedio general de Carbón en el Azufre tiene un valor de 0.25%. La estación de control número 15 resultó ser la que bombea Azufre menos contaminado, siendo la estación número 14 la que produce el Azufre con mayor porcentaje de Carbón.

En el proceso se obtiene Azufre de tres diferentes calidades, determinándose la calidad por el porcentaje de Carbón presente.

Estas calidades son:

Calidad "A".- Azufre con 0.18% de Carbón.

Calidad "B".- Azufre con 0.08% de Carbón.

Calidad "C".- Azufre con 0.05% de Carbón.

El consumo de Acido Sulfúrico para obtener cada calidad de Azufre se puede valorar teóricamente utilizando la expresión (29).

El cuadro 5.2., resume el consumo de ácido por calidad de Azufre, considerando el Azufre crudo con 0.25% de Carbón.

Actualmente en la planta de filtros, el consumo real de Acido Sulfúrico por cada calidad de Azufre obtenida es:

Calidad "A".- 5.453 lts. por ton. de Azufre.

Calidad "B".- 13.63 lts. por ton. de Azufre.

Calidad "C".- 19.08 lts. por ton. de Azufre.

Cuadro 5.2. Consumo de ácido por calidad de Azufre.

(1)		(2)		(3)	(4)
Azufre crudo $C_7H_8$		Azufre filtrado $C_7H_8$		(Z-J) X	Y .9543X <sup>(6)</sup>
%	Kg/Ton	%	Kg/Ton	Kg.	lt/Ton.
0.40	4.0	0.25	2.5	1.5	1.4315
0.40	4.0	0.18	1.8	2.2	2.0995
0.40	4.0	0.08	0.8	3.2	3.0538
0.40	4.0	0.05	0.5	3.5	3.3401
0.35	3.5	0.25	2.5	1.0	0.9543
0.35	3.5	0.18	1.8	1.7	1.6223
0.35	3.5	0.08	0.8	2.7	2.5766
0.35	3.5	0.05	0.5	3.0	2.8629
0.30	3.0	0.25	2.5	0.5	0.4772
0.30	3.0	0.18	1.8	1.2	1.1452
0.30	3.0	0.08	0.8	2.2	2.0995
0.30	3.0	0.05	0.5	2.5	2.3858
0.25	2.5	0.18	1.8	0.7	0.6680
0.25	2.5	0.08	0.8	1.7	1.6223
0.25	2.5	0.05	0.5	2.0	1.9086
0.24	2.4	0.18	1.8	0.6	0.5726
0.24	2.4	0.08	0.8	1.6	1.5269
0.24	2.4	0.05	0.5	1.9	1.8132
0.20	2.0	0.18	1.8	0.2	0.1909
0.20	2.0	0.08	0.8	1.2	1.1452
0.20	2.0	0.05	0.5	1.5	1.4315
0.15	1.5	0.08	0.8	0.7	0.6680
0.15	1.5	0.05	0.5	1.0	0.9543
0.10	1.0	0.08	0.8	0.2	0.1909
0.10	1.0	0.05	0.5	0.5	0.4772

El Azufre tiene como máximo 0.395% de hidrocarburos y como mínimo

0.10%.

- (1) Azufre crudo, porcentaje de contaminación del Azufre antes de ser filtrado, expresado en porciento y en Kg por Tonelada de Azufre.
- (2) Azufre filtrado, porcentaje de contaminación del Azufre después de filtrarse, expresado en porciento y en Kg por Tonelada de Azufre.
- (3) Porcentaje de contaminación eliminado mediante la filtración, expresado en Kg/Tonelada de Azufre.
- (4) Litros de Acido Sulfúrico necesarios para eliminar la contaminación (Z-J) expresado en litros por Tonelada de Azufre.
- (6) Nota.- Este valor se obtiene de la fórmula # 29.

El consumo real de Acido Sulfúrico sobrepasa en gran medida a lo calculado teóricamente. Se puede observar, en la figura 5.6., que existe una diferencia enorme entre el consumo real y el consumo teórico del Acido Sulfúrico, esto se debe principalmente a que el control del consumo de ácido es visual y además no se cuenta con los aparatos de medición apropiados.

### 5.2.3.- Otros reactivos.

En el proceso de filtración además del Acido Sulfúrico se emplea arcilla y cal para efectuar la operación.

La arcilla que se aplica tiene la función de formar la pretorta. El lugar de adición de este reactivo es en los tanques de pretorta, en los cuales se combina la arcilla con el Azufre crudo formando una mezcla que, posteriormente, al ser bombeada a los filtros, formará la torta sobre las mallas filtrantes.

La arcilla se aplica según la calidad de Azufre que se desee obtener. La cantidad de arcilla aplicada es función del grado de contaminación y es la siguiente:

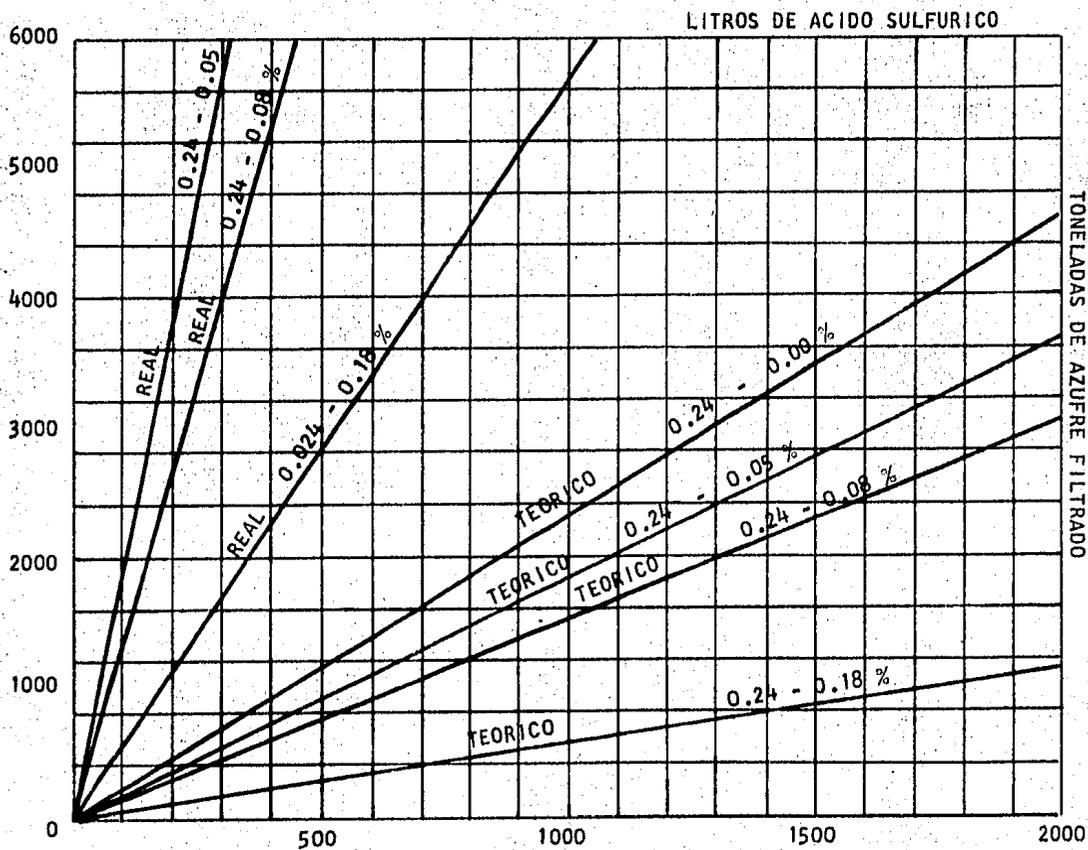
Calidad "A".- 0.3% de arcilla.

Calidad "B".- 0.4% de arcilla.

Calidad "C".- 0.4% de arcilla.

Estos porcentajes son en relación al peso del Azufre contenido en los tanques de pretorta.

FIGURA 5.6.- CONSUMO REAL Y TEORICO DE H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



Actualmente se están utilizando, indistintamente, tres tipos de arcilla:

- 1.- Dicalite (7 micras).
- 2.- Calite (7 micras).
- 3.- Tonsil (4 micras).

El tonsil se utiliza en menor grado que los otros dos tipos de arcilla, debido a que forma una torta muy impermeable.

La Cal se aplica para regular el pH del fluido y neutraliza el Acido Sulfúrico que queda remanente al final del proceso.

Este reactivo se aplica antes de que el Azufre pase por los filtros secundarios; actualmente se utiliza 0.18% de Cal del peso del Azufre filtrado.

### 5.3.- Aspectos técnicos y económicos.

#### 5.3.1.- Aspectos técnicos.

Existen aspectos técnicos en el proceso de filtración que influyen directamente en la calidad del Azufre obtenido al final del proceso.

Principalmente afecta la procedencia del Azufre, pues el grado de contaminación varía de acuerdo al área de explotación, ello implica modificar la cantidad de reactivos aplicados en la filtración.

La limpieza de los filtros es otro factor de gran importancia, varía de acuerdo a la calidad de Azufre que se desee obtener, y más que afectar la calidad repercute en el tonelaje de Azufre filtrado, pues a mayor frecuencia de limpieza menor tonelaje de azufre que se filtra. La limpieza es manual y se realiza con la siguiente frecuencia en un día de operación: cuando se desea obtener Azufre calidad "A" se limpian los filtros cada ocho horas, para calidad "B" esta operación se realiza cada tres horas, finalmente para calidad "C" la limpieza es cada dos horas.

Otros aspectos son la adición de reactivos en el proceso, esta operación se realiza con sistemas anticuados y el control es visual, esto no permite cuantificar eficazmente los reactivos y repercute directamente en el proceso.

Por último, más que aspecto técnico se trata del factor humano, el personal de la planta no tiene una producción homogénea a lo largo de los tres turnos de labor, por lo que la filtración no es constante en las 24 horas de operación de la planta.

### 5.3.2.- Aspectos económicos.

Además del costo de los reactivos, en el proceso de filtración, se puede incluir como costo directo de operación la mano de obra y el costo de los servicios necesarios en la planta.

Ahora bien, realmente estos costos no varían en gran forma al obtener las diferentes calidades de Azufre, por ejemplo el Acido Sulfúrico que es el reactivo más caro que se utiliza, se obtiene de la planta de Acido Sulfúrico con capacidad para 15 toneladas métricas diarias, instalada exclusivamente para este fin.

En donde se ve afectado el costo de operación es en los elementos filtrantes, el desgaste de las mallas es directamente proporcional a la cantidad de ácido utilizada.

Cuando se pretende obtener calidad "A" y "B" el ácido aplicado desgasta las mallas filtrantes de tal manera que se requiere sustituirlas cada seis meses. Pero cuando la calidad pretendida es la "C" el desgaste es mucho mayor y obliga el cambio de estas unidades cada 15 días. Se observa por lo consiguiente que sí existe un incremento considerable en el costo de operación.

Esta desventaja, costo por mallas, al tratar de obtener Azufre con menor grado de contaminación se trata de contrarrestar combinando mallas nuevas con mallas usadas de la manera siguiente: los filtros primarios, que filtran una mezcla de Azufre con mayor contenido de Acido Sulfúrico, son equipados con mallas usadas. Las mallas nuevas se utilizan en la filtración secundaria que se realiza con un fluido menos ácido. Las mallas más dañadas y que se deshechan se encuentran en los filtros primarios. Este sistema permite darle mayor vida a los elementos filtrantes.

## 6.- EL AZUFRE EN EL MERCADO NACIONAL E INTERNACIONAL.

### 6.1.- El papel del azufre dentro de la Industria.

El desarrollo económico de todo país está fincado, principalmente, en una economía mixta que permite desarrollar una industria capaz de satisfacer los requerimientos internos y de competir en el mercado mun dia.

Por lo tanto, para ello, es necesario que un país desarrollado o en vías de desarrollo cuente con recursos naturales y financieros que diversifiquen su industria. Se debe de poseer una elevada producción de acero, cemento, minerales industriales y preciosos. Así como también contar con una fuerte industria pesada, una moderna infraestructura permanente y un avanzado desarrollo tecnológico en áreas como: la petroquímica, electrónica, alimentación, comunicaciones, etc.

Otro indicador del desarrollo económico en las naciones industrializadas es el bienestar social, el alto ingreso per capita y la elevada cultura que poseen sus habitantes.

Las grandes potencias mundiales poseen la mayoría de las características antes mencionadas, quizás, como en el caso de Japón, no poseen recursos naturales que proporcionen la materia prima necesaria, pero a cambio tienen el suficiente poder económico para adquirir los insumos necesarios en el mercado mundial.

Todo país que pretende abandonar el subdesarrollo debe olvidarse de la agricultura de temporal y del monocultivo para dar paso a la agricultura intensiva y diversa, apoyada por los fertilizantes, todo esto con el fin primordial de proporcionar un óptimo modo de vida a la población.

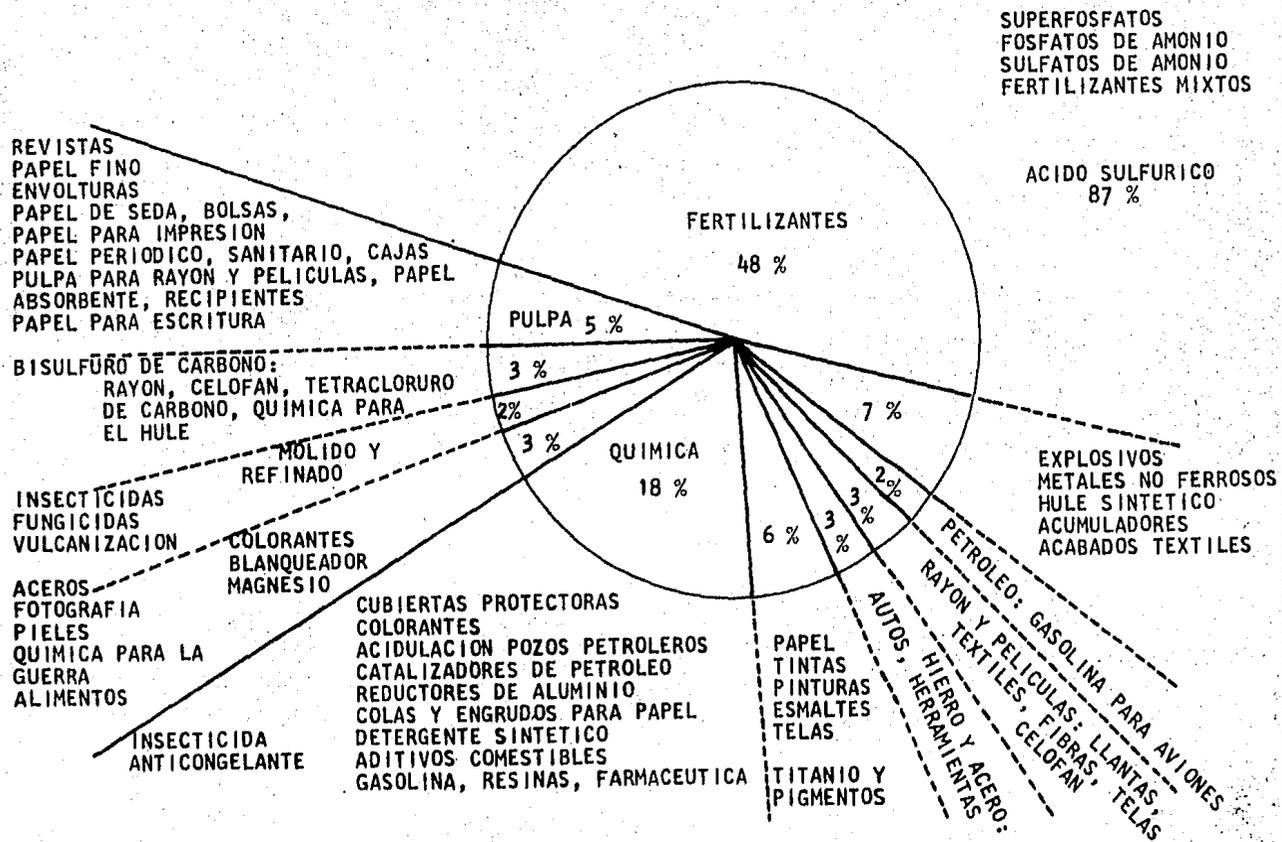
A través de la historia el uso del azufre y de sus principales derivados está ligado al desarrollo económico-social de las naciones.

Sólo basta señalar que potencias mundiales como Estados Unidos de Norteamérica, Japón, Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, Alemania Federal, etc., son líderes mundiales en producción industrial y a su vez son los principales consumidores de azufre en todas sus formas.

Un ejemplo de la estrecha relación entre este metaloide y la industria, es el ácido sulfúrico, principal subproducto del azufre que es utilizado para la producción intensiva de fertilizantes. Debido a esto, la demanda de ácido sulfúrico y de roca fosfórica se ha incrementado en gran medida en las últimas décadas y consecuentemente se han desarrollado un sinnúmero de industrias que giran y se mantienen gracias a la necesidad de los fertilizantes fosfatados.

Por otro lado el azufre es indispensable en casi todas las ramas de la industria, Figura 6.1., ya sea como materia prima o como material complementario en los procesos. Este metaloide está presente

FIGURA 6.1.- USOS DEL AZUFRE.



FUENTE - ENGINEERING AND MINING JOURNAL, MAYO 1968.

en la producción de tintes, caucho, insecticidas, fertilizantes, plásticos, papel, metales, etc. Cuadro 6.1.

Actualmente es difícil mencionar algún alimento que no contenga en su composición una mínima cantidad de azufre.

Además del uso industrial que se le dá a este material se puede decir que la historia de la humanidad es paralela a la historia del azufre, pues además de su utilidad el metaloide tiene apartado un lugar dentro de la mitología antigua.

## 6.2.- Mercado nacional.

### 6.2.1.- Oferta.

#### 6.2.1.1.- Producción nacional de azufre.

El azufre en la República Mexicana se obtiene principalmente de tres formas:

- 1.- De Damos Salinos, localizados en el Istmo de Tehuantepec.  
(Azufre Frasch).
- 2.- De Gases Amargos que Petróleos Mexicanos endulza en sus complejos petroquímicos.
- 3.- De Gases de Cola generados en procesos metalúrgicos.



México cuenta con grandes reservas de azufre, aproximadamente 81.2 millones de toneladas métricas, Cuadro 6.2., localizadas en el sureste de la República Mexicana.

Comparando las reservas mexicanas con el total de reservas mundiales de azufre, Cuadro 6.3., se observa que México ocupa un lugar preponderante en el escalafón mundial.

Respecto a la producción nacional del mineral se puede decir que el azufre producido en conjunto, por los diferentes métodos, sitúan a México como el quinto productor mundial.

Actualmente la producción nacional de azufre se encuentra bajo el control de empresas de participación estatal mayoritaria, Cuadro 6.4., este control estatal sobre el mineral se inició en el año de 1972 destacando principalmente dos empresas: Azufrera Panamericana S. A., que controla el 53% del total de reservas nacionales y la Compañía Exploradora del Istmo que tiene bajo control el 29% de las reservas; ambas compañías operan dentro de la Cuenca Salina del Istmo.

La producción histórica del azufre, Cuadro 6.5., ha tenido un comportamiento variable; en el período 1969-1972 se observa una tendencia decreciente en la producción debido a la caída de los precios en el mercado mundial del azufre, propiciado por la competencia de países como Canadá, Polonia y Francia que ofrecen el producto a menor precio.

Cuadro 6.2.- Reservas probadas de azufre y control de su explotación.

Control de su explotación	Millones de toneladas	%
Control del estado	81.2	100
Azufrera Panamericana	42.8	53
Cía. Exploradora del Istmo	23.5	29
Comisión de Fomento Minero	8.6	10
Reservas Nacionales	6.3	8
Control de Capital Privado Nacional	0.0	0
Capital Extranjero	0.0	0
TOTAL	81.2	100

Fuente - Azufrera Panamericana S.A.  
Febrero de 1981.

La minería en México/Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial/S.P.P./1981, México, D.F.

Cuadro 6.3.- Reservas mundiales de azufre.

País	Reservas (Miles de toneladas)
Alemania Occidental	30,000
Canadá	250,000
Cercano Oriente	400,000
España	30,000
Estados Unidos	175,000
Francia	30,000
Italia	15,000
Japón	10,000
México	90,000
Resto del mundo	735,000
T o t a l	1,765,000

Nota - Las reservas de azufre de los países socialistas no se incluyen en el cuadro, datos no disponibles.

Fuente - Mineral Comodity Summaries, Bureau of mines U.S.A. 1980.  
La Minería en México, Secretaría de Programación y Presupuesto/1981, México, D.F.

Cuadro 6.4.- Control de la explotación del azufre durante el período  
1971 - 1979.  
(Porcentual).

AÑO	PARTICIPACION ESTATAL	CAPITAL PRIVADO	OTROS
1971	98.0	-	2.0
1972	99.2	-	0.8
1973	100.0	-	-
1974	100.0	-	-
1975	100.0	-	-
1976	100.0	-	-
1977	100.0	-	-
1978	100.0	-	-
1979	100.0	-	-

Fuente - Secretaría de Programación y Presupuesto  
Enero de 1981.

La Minería en México/Secretaría de Patrimonio y Fomento  
Industrial/S.P.P./1981, México D.F.

Cuadro 6.5.- Producción Nacional de Azufre 1969 - 1982.  
(Toneladas).

AÑO	APSA	CEDI	PEMEX	CAV	NMA	TOTAL
1969	1,286,943	107,402	57,909	237,022	26,845	1,716,121
1970	1,175,679	120,596	60,301	-	24,255	1,380,831
1971	807,539	283,358	64,532	-	23,024	1,178,453
1972	533,759	326,966	62,033	-	21,432	944,190
1973	1,154,041	390,271	63,932	-	-	1,608,244
1974	1,476,254	781,224	64,255	-	-	2,321,733
1975	1,228,255	845,638	90,484	-	-	2,164,377
1976	1,325,526	728,001	96,155	-	-	2,149,682
1977	1,106,112	617,039	145,965	-	-	1,869,116
1978	1,064,886	584,775	168,019	-	-	1,817,680
1979	1,186,300	598,934	249,377	-	-	2,034,611
1980	1,699,955	n.d.	402,388	-	-	2,102,343
1981	958,097	693,509	425,513	-	-	2,186,619
1982	654,311	752,445	425,513 *	-	-	1,941,769
TOTAL	15,657,657	6,830,158	2,376,376	237,022	95,556	25,415,769

\* Estimada.

APSA - Azufrera Panamericana S. A.  
 CEDI - Cía. Exploradora del Istmo.  
 PEMEX - Petróleos Mexicanos.  
 CAV - Cía. de Azufre de Veracruz.  
 NMA - Nacional Minera de Azufre.

Fuente - Azufrera Panamericana S.A.  
 Dirección General de Minas,  
 SEPAFIN,  
 Marzo de 1982.  
 La Materia Prima/Fertilizantes  
 Mexicanos S.A./1981 México D.F.

El año de 1972 se caracteriza por registrar la más baja producción nacional de azufre en la década de los 70's. Influyó en este registro la mexicanización de las empresas productoras del mineral.

A partir del año de 1973 se recupera la producción con sus acostumbrados altibajos; el año de mayor bonanza en la década pasada es 1974, año en que coinciden las altas producciones de las compañías azufreras del sureste.

Durante el período 1969-1982, el promedio de azufre producido es de 1.800,000 toneladas métricas anuales. Este promedio se ha mantenido debido a que Petróleos Mexicanos incrementa su producción de azufre año con año. A la inversa del incremento que mantiene Petróleos Mexicanos, las compañías productoras de Azufre Frasch han disminuido su producción a partir del año de 1980.

El valor de la producción nacional de azufre, en el período 1970-1979 se resume en el Cuadro 6.6.

Primeramente se observa que el valor de la producción de azufre, un promedio anual de 1.200,000 de pesos, sobrepasa al valor generado por la producción de los demás minerales no metálicos de importancia que se producen en el país.

En este renglón la fluorita y el coque siempre se han mantenido a la vanguardia del azufre. A partir de 1977, se registra otro mineral

Cuadro 6.6.- Valor de la producción de minerales no metálicos en el período 1970-1979.  
(Millones de pesos corrientes).

AÑO	AZUFRE	BARITA	COQUE	FLUORITA	FOSFORITA	SAL
1970	589.8	71.0	400.0	408.9	3.7	-
1971	454.2	72.1	495.0	733.3	4.7	-
1972	363.9	67.8	540.3	730.7	5.0	-
1973	619.8	56.3	595.4	736.9	5.7	-
1974	895.0	68.7	637.3	754.8	15.5	-
1975	1248.7	94.9	1179.7	887.0	22.6	-
1976	1805.5	93.5	1236.1	855.1	18.0	-
1977	2492.2	156.6	1377.0	1042.6	22.8	1453.8
1978	1805.1	172.8	1407.4	1544.7	173.2	1720.4
1979	2156.3	140.7	1463.0	1483.9	87.2	n.d.
1980	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Fuente - Secretaría de Programación y Presupuesto  
Enero de 1981.

La Minería en México/Secretaría de Patrimonio y Fomento  
Industrial/S.P.P./1981, México D.F.

no metálico, la sal; que desde su aparición en los registros, tiene una producción superior a 4'500,000 toneladas anuales.

Debido a la existencia de grandes reservas de sal posiblemente en las próximas décadas el azufre pase a ocupar un segundo término en lo que respecta al valor de la producción de los minerales no metálicos.

Ahora bien comparando el valor de la producción de azufre con el valor de la producción de los metales producidos en el país, <sup>(7)</sup> el azufre sólo es superado por cinco metales: Plata, Plomo, Zinc, Hierro y Cobre, lo que le otorga al azufre un sexto lugar a nivel nacional.

Otro aspecto del mercado nacional del azufre es el que se refiere a la producción del metaloide por Entidad Federativa y que se resume en el Cuadro 6.7.; el Estado de Veracruz ocupa el primer sitio seguido por Hidalgo, Tamaulipas, Guanajuato, Chiapas y el Distrito Federal.

La producción de azufre del Estado de Veracruz sobrepasa a lo producido conjuntamente por las demás Entidades, esta diferencia es, en promedio, arriba de 1.5 millones de toneladas métricas. Esta discrepancia se explica debido a que los Domo Salinos que contienen el azufre en forma nativa y que comprenden el 80% de las reservas nacionales, se localizan en el sur del Estado de Veracruz.

(7) Cuadro III.3, Valor de la producción minera metalúrgica./La Minería en México/Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial/S.P.P./1981, México D.F.

Cuadro 6.7.- Producción minera de azufre por entidad Federativa  
(miles de toneladas).

ESTADOS	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Chiapas	-	-	-	-	0.4	26.8	37.9	77.4	116.0	202.9	n.d.
D.F.	5.4	6.8	6.2	6.7	4.4	6.2	7.6	7.2	5.1	9.4	n.d.
Guanajuato	2.8	2.9	4.3	5.4	5.9	7.3	7.6	0.7	1.9	0.8	n.d.
Hidalgo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.2	n.d.
S.L.P.	24.2	23.0	21.4	-	-	-	-	-	-	-	n.d.
Tamaulipas	8.0	8.4	10.1	13.7	13.1	10.8	11.1	7.4	11.9	11.4	n.d.
Veracruz	1,340.3	1,137.1	902.0	1,582.2	2,298.2	2,113.0	2,085.0	1,763.3	1,682.0	1,799.4	n.d.

Fuente - Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.  
Enero de 1981.

La Minería en México/Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial/S.P.P./1981, México D.F.

A excepción del Estado de Veracruz todas las demás entidades producen el mineral mediante procesos petroquímicos. Los principales municipios productores de azufre, Cuadro 6.8., son por orden de importancia: Jaltipan de Morelos, Veracruz (azufre frash); Minatitlán, Veracruz; Reforma, Chiapas; Poza Rica, Veracruz; Ciudad Madero, Tamaulipas; Atzacapotzalco, Distrito Federal; Tula, Hidalgo y Salamanca, Guanajuato.

#### 6.2.1.2.- Productores nacionales de azufre.

Como consecuencia de la mexicanización de las empresas productoras de azufre, año de 1972, desaparecen del mercado nacional las empresas Azufre de Veracruz y Nacional Minera de Azufre.

A partir de este año sólo se registran producciones de tres empresas que son las que tienen bajo control la producción y las reservas nacionales de azufre: Azufrera Panamericana, S.A., Compañía Exploradora del Istmo y Petróleos Mexicanos.

La empresa Azufrera Panamericana S.A. es la de mayor importancia, inició operaciones en el año de 1954 y ha producido hasta el año de 1982 un total de 29 millones de toneladas métricas, aproximadamente un millón de toneladas por año.

Esta empresa se ha mantenido a lo largo de su existencia como líder en producción nacional de azufre, además es considerada mundialmente, como una de las empresas de mayor envergadura en la producción de Azufre Frasch.

Cuadro 6.8.- Producción de azufre por Municipios en el período  
1978-1979.  
(Toneladas)

Estado y Municipio	1978	1979
CHIAPAS		
Reforma	116,023	202,925
	116,023	202,925
DISTRITO FEDERAL		
Atzacapotzalco	5,110	9,432
	5,110	9,432
GUANAJUATO		
Salamanca	1,994	827
	1,994	827
HIDALGO		
Tula	-	1,293
	-	1,293
TAMAULIPAS		
Ciudad Madero	11,915	11,475
	11,915	11,475
VERACRUZ		
Jaltipan	1,682,643	1,799,483
Minatitlán	1,064,886	1,180,763
Poza Rica	584,775	592,393
	32,982	26,327
<b>T O T A L</b>	<b>1,817.685</b>	<b>2,025,435</b>

Fuente - Dirección General de Minas,  
SEPAFIN,  
Febrero de 1981.

Durante el período 1970-1982, Azufrera Panamericana S.A., ha producido más del 50% de la producción nacional, llegando incluso, como en los años de 1970 y 1980, a producir el 80% de la producción total.

Después de 1975 esta compañía ha disminuido su producción gradualmente, en la década de los 80's, a excepción del año de 1981 no ha logrado superar la producción de un millón de toneladas métricas. La más alta producción que ha registrado esta compañía es en 1974, año en que registró cerca de millón y medio de toneladas.

En esta empresa también se reflejó la mexicanización de las empresas del ramo, pues en el año de 1972, se registra la más baja producción de Azufrera Panamericana en las dos últimas décadas. Figura 6.2.

El segundo productor nacional de azufre es la Compañía Exploradora del Istmo, la que ha proporcionado constantemente a lo largo de su vida operacional un 30% de la producción total.

A lo largo de su existencia tiene un promedio de medio millón de toneladas métricas de azufre producidas anualmente y su más alta producción se registró en 1975 (800,99 T. M.).

A diferencia de Azufrera Panamericana S.A. que está constituida totalmente por capital mexicano, Compañía Exploradora del Istmo tiene solamente el 66% de capital nacional y el restante 33% pertenece a la Texas Gulf Company, compañía de origen estadounidense.

MILES DE  
TON. ↑

1400  
1300  
1200  
1100  
1000  
900  
800  
700  
600  
500  
400  
300  
200  
100  
0

54 56 58 60 62 64 66 68 70 72 74 76 78 80 82

PANAMERICAN Co.

814 055 TON/AÑO

AZUFRERA PANAMERICANA

1 112 744 TON/AÑO

PRODUCCION TOTAL:

1954-1982 = 29 006 698  
TONS.

1954-1966 = 11 396 782  
TONS.

1966-1982 = 17 803 916  
TONS.

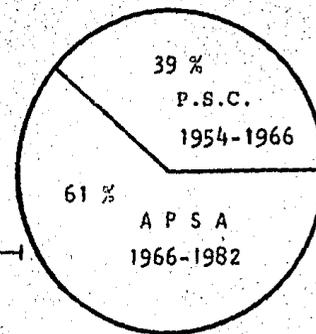


FIGURA 6.2.- PRODUCCION HISTORICA DE  
AZUFRE DE LA COMPANIA  
AZUFRERA PANAMERICANA S.A.

El control del Estado sobre ambas compañías azufreras se realiza por medio de Azufrera Panamericana S.A. debido a que el porcentaje mexicano de Exploradora del Istmo pertenece a Azufrera Panamericana.

La última empresa productora, Petróleos Mexicanos, en su producción observa una tendencia creciente a través del período 1969-1980 y se espera se mantenga este comportamiento en los próximos años.

Petróleos Mexicanos tiene instalada una capacidad de 477,730 toneladas métricas de azufre por año, en sus 21 plantas que procesan gases amargos. Cuadro 6.9. En este aspecto destaca el área de Cactus, Chiapas, en donde se encuentran localizadas 11 de las 21 plantas en operación.

La planta petroquímica de mayor capacidad es la que se encuentra operando en el área de Poza Rica, Veracruz, 46,200 T.P.A. y que inició operaciones en 1951.

La tendencia creciente de PEMEX en producción de azufre se debe a que cada año pone en operación una nueva planta petroquímica.

#### 6.2.1.3.- Proyección de la oferta.

La oferta, en el mercado nacional, se cubre con una capacidad instalada de 2.9 millones de toneladas métricas de azufre por año distribuidas de la siguiente manera:

Cuadro 6.9.- Plantas Petroquímicas en operación con recuperación de Azufre.

Localización	Planta	Capacidad nominal Toneladas por año	Fecha de arranque
Poza Rica, Ver	I	46,200	1951
Atzacapotzalco, D.F.	I	8,250	1959
Cd. Madero, Tamps.	I	9,900	1961
Salamanca	I	9,900	1968
Cd. Madero, Tamps.	II	20,000	1972
Salamanca, Gto.	II	28,000	1972
Salamanca, Gto.	III	28,000	1973
Cactus, Chis.	I	13,200	1974
Cactus, Chis.	II	13,200	1975
Cactus, Chis.	III	26,400	1976
Cactus, Chis.	IV	26,400	1977
Cactus, Chis.	V	26,400	1978
Cactus, Chis.	VI	26,400	1978
Tula, Hgo.	I	56,100	1978
Cactus, Chis.	VII	26,400	1979
Cactus, Chis.	VIII	26,400	1979
Cactus, Chis.	IX	26,400	1979
Cactus, Chis.	X	26,400	1979
Cactus, Chis.	XI	26,400	1979
Matápionchi, Ver.		4,600	1980
Totonaca, Ver.		3,680	1980

T O T A L

477,730

Fuente - Subgerencia de Planeación Petroquímica de PENEX  
Febrero de 1981.

La Materia Prima/Fertilizantes Mexicanos S.A./1981, México D.F.

Compañía	Toneladas métricas por año
Azufrera Panamericana S.A	1.650,000
Compañía Exploradora del Istmo	850,000
Petróleos Mexicanos	469,000
T o t a l	<u>2.969,000</u>

Con este tonelaje se satisface el mercado nacional, pues la demanda interna de azufre no sobrepasa el millón de toneladas métricas por año. El resto de la producción se destina a la exportación.

Actualmente, en las tres empresas productoras, existen proyectos de expansión, esto se debe a que se prevee un incremento en el consumo interno por parte de la industria química.

Azufrera Panamericana S.A. inició operaciones en la Planta de Coahuila (1980), ubicada en las riberas del Río Coatzacoalcos. Esta nueva planta está proyectada para producir 500,000 t.p.a. de azufre.

Además de esta nueva planta, Azufrera Panamericana tiene proyectado iniciar operaciones en el área de Potrerillos y en el área de Petapa ambas localizadas en el municipio de Jaltipan de Morelos.

Exploradora del Istmo pretende incrementar su producción en base a la explotación de nuevas áreas dentro del Domo de Texistepec.

Con estos nuevos proyectos las compañías azufreras pretenden alcanzar, en la década de los 80's, una producción conjunta de 2.3 millones de toneladas métricas de azufre por año.

Petróleos Mexicanos tiene proyectado, Cuadro 6.10, instalar 13 nuevas plantas petroquímicas, en donde se recuperará azufre mediante el endulzamiento de gases amargos.

Dichas unidades se localizan, en su mayoría, en el sureste mexicano. Se pretende que estas nuevas plantas tengan una capacidad individual de más de 100,000 toneladas métricas por año.

La capacidad conjunta de este nuevo proyecto de Petróleos Mexicanos será de 1.174,000 toneladas métricas por año y el período marcado para su ejecución es de 1981-1985.

Un nuevo productor, Compañía Mexicana de Cobre, S.A., ingresó al mercado nacional del azufre a partir de 1982. Esta empresa opera en el Municipio de Nacoziari, Sonora, explotando y beneficiando Mineral de Cobre.

En su proceso de beneficio estima que producirá gases de cola, con un tonelaje aproximado de 396,000 t.p.a. de dióxido de azufre ( $SO_2$ ) que equivalen a 225,000 toneladas métricas de azufre elemental.

Con el arranque de todos los nuevos proyectos de las empresas productoras de azufre, se espera que para fines de la década de los 80's,

Cuadro 6.10.- Proyectos en construcción y en estudio para instalar plantas productoras de azufre por PEMEX.

<u>Localización</u>	<u>Capacidad Toneladas por año</u>	<u>Fecha de arranque</u>
Minatitlán, Ver.	26,400	1981
Cadereyta, N.L.	26,050	1981
Salina Cruz, Oax.	26,050	1981
Cactus XI	26,400	n.d.
Tabasco I	118,800	1981
Tabasco II	118,800	1981
Cárdenas, Tab.	118,800	1982
Huimantla, Tab.	118,000	1982
Cd. PEMEX, Tab.	118,800	n.d.
Cd. PEMEX, Tab.	118,800	n.d.
Localización no determinada		
Idem	118,800	1985
Idem	118,800	1985
Idem	118,800	1985
<b>T o t a l</b>	<b>1,174,100</b>	

Fuente - PEMEX, Subgerencia de Planeación Petroquímica.  
Febrero de 1981.

La Materia Prima/Fertilizantes Mexicanos S.A./1981, México D.F.

la producción nacional sea de 4.098,000 toneladas métricas de azufre por año.

#### 6.2.2.- Demanda.

##### 6.2.2.1.- Demanda nacional de azufre.

La demanda nacional de azufre ha aumentado gradualmente en los últimos años; este incremento se debe a la expansión de la industria nacional de los fertilizantes.

Pese a esto la demanda interna del país, Cuadro 6.11., nos indica que el consumo nacional nunca ha sobrepasado el millón de toneladas métricas por año.

En el período 1969-1980 se observa que la demanda nacional ha variado de 373,000 toneladas por año, consumidas en 1969, a 937,000 toneladas, que se consumieron en 1980.

La demanda nacional de azufre se cubre con el 50% de la producción nacional del mineral, el excedente es destinado a la exportación.

##### 6.2.2.2.- Consumidores nacionales de azufre.

El consumo de azufre en la industria se incrementó al final del siglo pasado con el descubrimiento del proceso de producción de Soda Ash, en el cual se emplea como materia prima Sal y Acido Sulfúrico.

Cuadro 6.11.- Composición de la demanda histórica de azufre 1969-1980.  
(miles de toneladas).

Año	Producción	** Demanda Nac.	* %	Exportaciones	* %	Total
1969	1,716	373	22	1,165	68	1,538
1970	1,380	453	33	661	48	1,114
1971	1,178	525	45	682	57	1,207
1972	944	557	59	479	49	1,036
1973	1,608	722	45	842	52	1,564
1974	2,321	768	33	1,906	82	2,674
1975	2,164	751	35	1,367	63	2,118
1976	2,149	800	37	1,020	47	1,820
1977	1,869	877	47	1,014	54	1,891
1978	1,817	848	47	1,299	71	2,147
1979	2,037	900	40	1,363	60	2,263
1980	2,102	937	44	1,500	70	2,437
Total	21,290	8,551	39	13,303	62	21,814

\* La suma de los porcentajes no es 100, debido a los movimientos de inventarios.

\*\* Estimada en base a los coeficientes de consumo.

' Demanda total.

Fuente - Dirección General de Minas. SEPAFIN,  
Febrero de 1981.

La Materia Prima/Fertilizantes Mexicanos S.A./1981, México D.F.

La necesidad de obtener mejores cultivos y cosechas abundantes creó una intensa investigación en el campo de los fertilizantes dando como resultado la elaboración de fertilizantes fosfatados, los cuales son obtenidos en base a un tratamiento con ácido sulfúrico. En México el 61% de la demanda de azufre se destina a la fabricación de fertilizantes.

El 80% de la producción mundial de azufre se destina a elaborar ácido sulfúrico. Además, actualmente se han descubierto nuevos usos para este mineral tales como: la obtención de asfaltos azufrosos que tienen la característica de resistir la acción de los solventes; la manufactura de cauchos sintéticos con nuevas propiedades; la fabricación de concretos, morteros y agregados más resistentes para la construcción; impermeabilizantes con nuevas características; electrodos de alta duración para baterías; y el uso directo del azufre en el tratamiento de aguas de deshecho.

Debido a estos descubrimientos y a las nuevas aplicaciones del azufre se ha intensificado la demanda de este producto y por lo consiguiente se incrementó la producción del metaloide en todas sus formas.

A nivel nacional la producción de azufre se destina de la siguiente manera: en primer término 61% se exporta y el 39% restante se destina a cubrir la demanda interna.

Del consumo nacional (39%), Fertilizantes Mexicanos S.A. utiliza el 61%, otros productores de ácido sulfúrico absorben el 33% y finalmente el 6% restante es ocupado por otras industrias en la fabricación de papel,

caucho, hule, etc., ó en la industria química, ver Cuadro 6.11.

El gran porcentaje que absorbe FERTIMEX se deriva del hecho de que para producir una tonelada de ácido fosfórico se requiere una tonelada de azufre y para producir una tonelada de sulfato de amonio se requieren 250 kilogramos de azufre.

Los demás consumidores del metaloide son principalmente industrias químicas entre las que destacan: Industrias Químicas de México S. A., CYDSA, Industrias Resistol, Química Flour, Celanese Mexicana S.A., etc.

#### 6.2.2.3.- Proyección de la demanda nacional de azufre.

Como se observa en el Cuadro 6.12., el consumo nacional de azufre aumenta gradualmente año con año. Fertilizantes Mexicanos S.A. pretende elevar su producción de fertilizantes para lo cual ha proyectado una demanda de 1.440,000 toneladas de azufre por año, en el período de 1982-1990, ver Cuadro 6.13.

La demanda estimada, en este mismo período, por las demás empresas consumidoras es de 201,000 toneladas por año. Esto implica que la demanda total de azufre para el período 1982-1990 será de: 16,426 millones de toneladas, que aproximadamente son, en promedio 1.700,000 toneladas por año.

La figura 6.3., nos muestra el balance oferta-demanda de azufre para el período 1981-1990; se observa que el mercado nacional de azufre mantendrá la misma tónica del período precedente (1969-1980), las exportaciones

Cuadro 6.12.- Consumo nacional de azufre por destino industrial 1969-1980  
(miles de toneladas).

Año	FERTIMEX	%	Productores Acido Sul.	%	Otros usos	%	Total	%
1969	217	58	134	36	22	6	373	100
1970	280	61	146	32	27	6	453	100
1971	345	65	149	28	31	6	525	100
1972	377	68	147	26	33	6	557	100
1973	425	56	227	31	43	6	695	100
1974	506	66	216	28	46	6	768	100
1975	469	62	237	32	45	6	751	100
1976	460	58	292	36	48	6	800	100
1977	511	58	314	36	52	6	877	100
1978	524	62	274	32	50	6	848	100
1979	533	59	313	35	54	6	900	100
1980	521	55	366	39	50*	6	937	100
Total	5,168	61	2,815	33	501	6	8,484	100

\* Estimadas.

Fuente - Guía de los mercados de México.  
Febrero de 1981.

La Materia Prima/FERTIMEX/1981, México D.F.

Cuadro 6.13- Demanda estimada de azufre 1981-1990.  
(miles de toneladas).

AÑO	DEMANDA DE AZUFRE PARA LA FABRICACION DE ACIDO SULFURICO.				
	FERTIMEX	OTRAS EMPRESAS	SUBTOTAL	O.U.*	TOTAL
1981	879	201	1080	66	1146
1982	1216	201	1417	68	1485
1983	1440	201	1641	72	1713
1984	1440	201	1641	75	1716
1985	1440	201	1641	78	1719
1986	1440	201	1641	82	1723
1987	1440	201	1641	85	1726
1988	1440	201	1641	88	1729
1989	1440	201	1641	92	1733
1990	1440	201	1641	95	1736
TOTAL	13615	2010	15625	801	16426

\* Otros usos (estimados).

Fuente - FERTIMEX

La Materia Prima/FERTIMEX/1981, México D.F.

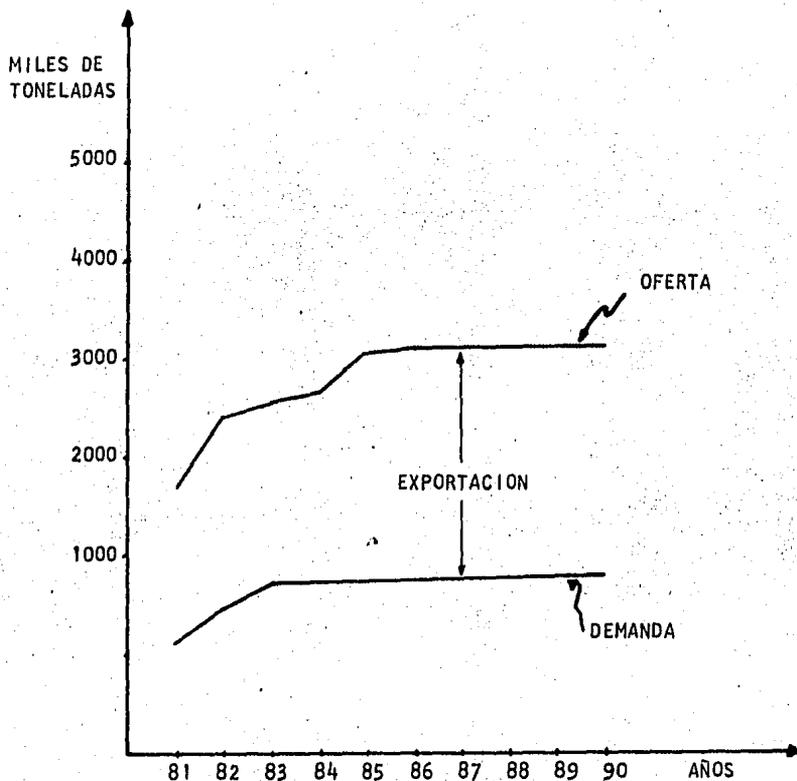


FIGURA 6.3.- BALANCE OFERTA-DEMANDA NACIONAL DE AZUFRE PARA PARA EL PERIODO 1981-90

Fuente - La Materia Prima/FERTIMEX/1981, México D.F.

de azufre sobrepasarán a la demanda nacional, se estima que se producirán 4,098,000 toneladas de azufre y la demanda sólo será de 1,700,000 toneladas, por lo que se exportarán anualmente 2.300,000 toneladas de azufre.

La gran diferencia que existe entre exportación y consumo interno se debe principalmente a que las empresas productoras de azufre se mantienen dentro de su ritmo de actividad, mientras que en la industria química, los proyectos de expansión son limitados. Solamente Fertilizantes Mexicanos S. A. proyecta un crecimiento en gran escala.

#### 6.2.3.- Importaciones.

##### 6.2.3.1.- Valor y volumen de las importaciones mexicanas de azufre.

No obstante que México es autosuficiente en azufre y que cubre holgadamente su demanda interna dejando un gran excedente para la exportación, se ve obligado, debido a que no se produce en el país, a importar azufre de Tipo Coloidal y azufre pulverizado.

Se importan menos de 700 toneladas métricas por año, incrementándose gradualmente esta cantidad a través de los años, Cuadro 6.14. El tonelaje promedio importado por México, en el período 1969-1980 es de 571 toneladas por año. El costo de la tonelada de azufre importado ha variado; en 1970 tenía un valor de 7,500 pesos, actualmente tiene un costo de 42,000 pesos. Esto nos indica que a nivel nacional el costo de la tonelada de azufre importado se ha incrementado en un 560%, en el mercado internacional.

Cuadro 6.14.- Valor y volumen de las importaciones de azufre en el período 1969-1980.

AÑO	Valor Millones de pesos corrientes	Volumen Toneladas.
1969	n.d.	250
1970	1.5	198
1971	1.7	686
1972	2.3	510
1973	2.6	623
1974	1.8	782
1975	1.7	422
1976	3.9	757
1977	7.8	697
1978	11.4	632
1979	29.1	695
1980 *	n.d.	695

\* Cifra estimada.

Fuente - Anuario estadístico de la minería mexicana.  
Febrero de 1981.  
Secretar-ía de Patrimonio y Fomento Industrial.

este incremento ha sido de 300%. La diferencia entre el incremento a nivel nacional con el incremento a nivel mundial se debe a que en la economía mexicana existe una inflación mayor a la que se registra en el mercado mundial.

#### 6.2.4.- Exportaciones mexicanas de azufre.

##### 6.2.4.1.- Valor y volumen de las exportaciones mexicanas de azufre.

México es el quinto exportador mundial de azufre, figura 6.4., superado solamente por Canadá, Polonia, Estados Unidos y Francia. México aporta el 7% del total de las exportaciones mundiales de azufre.

En el período 1970-1978 se exportó un promedio anual de 1.023.241 toneladas métricas de azufre.

A partir de 1974, Cuadro 6.15, las exportaciones del metaloide so brepasan el millón de toneladas métricas observándose una tendencia creciente. El valor de las exportaciones mexicanas de azufre representan el 9% del total de las exportaciones mineras de México.

Actualmente, y a partir de 1977, el valor de las exportaciones de azufre superan los mil millones de pesos corrientes. Representando un ingreso constante de divisas para el país.

Las perspectivas de México, en el mercado internacional del azufre, Cuadro 6.16., son de disminuir sus exportaciones a solamente un millón de

MILLONES DE  
TONELADAS

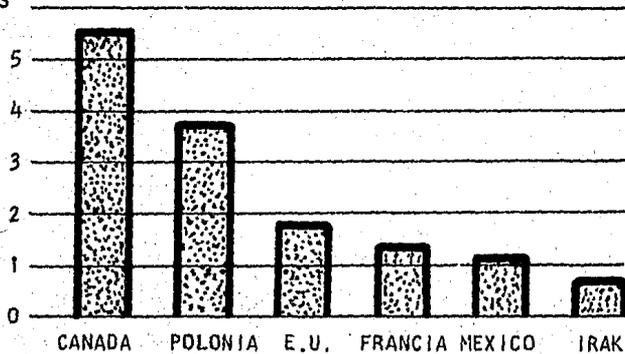


FIGURA 6.4.- EXPORTADORES MUNDIALES DE  
AZUFRE EN 1980.

FUENTE - INDUSTRIAL MINERALS ENERO 1981.

Cuadro 6.15.- Volumen y valor de las exportaciones mexicanas de azufre en el período 1970-1978.

AÑO	Toneladas	Millones de pesos corrientes
1970	661,978	204.9
1971	682,825	197.8
1972	479,407	136.1
1973	842,962	225.1
1974	1,906,031	532.8
1975	1,367,542	561.3
1976	1,020,297	750.0
1977	1,013,068	1,119.0
1978	1,235,065	1,472.0

Fuente - Secretaría de Programación y Presupuesto.  
Enero de 1981.

La Materia Prima/FERTIMEX/1981, México D.F.

Cuadro 6.16.- Tendencia de la oferta de azufre en 1981-1990.  
(miles de toneladas).

AÑO	Azufrera Panamericana *	PEMEX	Otros	Total
1981	1,920	469	350	2,739
1982	2,220	831	350	3,401
1983	2,240	977	350	3,567
1984	2,260	1,068	350	3,678
1985	2,280	1,448	350	4,078
1986	2,300	1,448	350	4,098
1987	2,300	1,448	350	4,098
1988	2,300	1,448	350	4,098
1989	2,300	1,448	350	4,098
1990	2,300	1,448	350	4,098
Total	22,420	12,033	3,500	37,953

\* Incluye la producción de la Cía. Exploradora del Istmo.

Fuente - Subgerencia de Planeación Petroquímica de PEMEX  
Julio de 1982.

La Materia Prima/FERTIMEX/1981, México D.F.

toneladas métricas por año. Con esta disminución se pretende exportar el 42% de la producción nacional puesto que actualmente este porcentaje es de 71%.

En el período 1985-1990 México pretende mantenerse entre los cinco primeros países exportadores de azufre en el mundo. En este mismo período se espera que Canadá ocupe el primer sitio como exportador de azufre seguido, respectivamente, por Polonia, Arabia Saudita, México, Estados Unidos y Francia. Como se observa México ocupará el cuarto sitio en el escalafón mundial de exportadores de azufre, asimismo Arabia Saudita desplazará de los primeros sitios a Francia, Estados Unidos y México.

México exporta azufre a diferentes latitudes del mundo, sus principales compradores son: Estados Unidos, Brasil, Yugoslavia, y varios países de Europa y Centroamérica. (8)

### 6.3.- Mercado internacional del azufre.

#### 6.3.1.- Oferta demanda mundial.

Los principales productores mundiales de azufre, Cuadro 6.17., son por orden de importancia: Estados Unidos, Unión Soviética, Canadá, Polonia, Japón, Francia y México. Los demás países que completan la lista producen menos azufre en comparación con los grandes productores del metaloide.

Estados Unidos y la Unión Soviética producen en conjunto más del 50% de la producción mundial de azufre, y a su vez estos dos países consumen

(8) La Minería en México/Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial/S.P.P./1981, México D.F.

Cuadro 6.17.- Principales países productores y consumidores de azufre en el mundo. Principales productores de Acido Sulfúrico y lugar que ocupan en el escalafón mundial.

Lugar	Productores de azufre	Consumidores de azufre	Productores de Acido S.
1.-	E. U.	E. U.	E.U.
2.-	U. R. S. S.	U. R. S. S.	U. R. S. S.
3.-	CANADA	JAPON	JAPON
4.-	POLONIA	FRANCIA	FRANCIA
5.-	JAPON	ALEMANIA F.	ALEMANIA F.
6.-	FRANCIA	CANADA	CANADA
7.-	MEXICO	ITALIA	REINO UNIDO
8.-	ALEMANIA F.	REINO UNIDO	SUDAFRICA
9.-	ESPAÑA	ESPAÑA	POLONIA
10.-	IRAK	SUDAFRICA	ITALIA
11.-	SUDAFRICA	INDIA	PAISES BAJOS
12.-	ITALIA	MEXICO	INDIA
13.-	FINLANDIA	BELGICA	MEXICO
14.-	SUECIA	BRASIL	BELGICA
15.-	IRAN	AUSTRALIA	AUSTRALIA
16.-	INDIA	MARRUECOS	BRASIL

Fuente - The British Sulphur Corporation.  
 Enero-Ferero, 1981.  
 Revista Bimestral.

el 80% de la producción.

En el Cuadro 6.18., se observa que a excepción de Arabia Saudita, Irak e Irán, todos los grandes productores rebasan anualmente los dos millones de toneladas de azufre. Canadá registra cada año aproximadamente el 12-15% de la producción total y es el primer exportador. México aporta un 4.0% de las exportaciones mundiales de azufre.

Si regresamos al Cuadro 6.18., se observa que los primeros productores de azufre son los primeros consumidores del producto con la excepción de Polonia y México que son países tercermundistas y que no tienen la capacidad de consumir su producción; México exporta el 50% de su producción interna.

La figura 6.5 nos muestra una comparación entre lo que sucedió y lo que posiblemente sucederá con la oferta mundial del azufre, durante el período de 1970 a 1990.

Se observa que tanto Estados Unidos, Canadá y el bloque socialista, compuesto principalmente por Polonia y la Unión Soviética, no tendrán una variación considerable en su producción. En cambio Europa Occidental disminuirá gradualmente su producción para dar paso a nuevos productores, particularmente a los países del Medio Oriente.

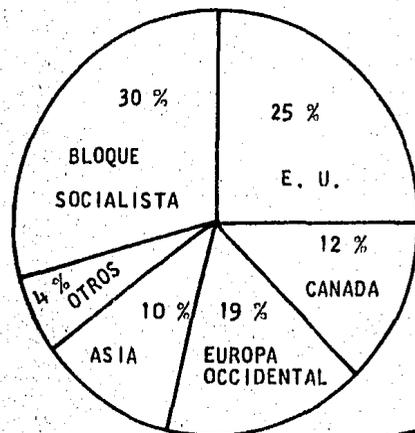
Posiblemente Canadá mantendrá su ritmo normal de producción en la década de los 80's con tendencia a una disminución para finales de la década.

	1980		1985		1990	
	Producción	Exportación	Producción	Exportación	Producción	Exportación
Francia	2.0	1.3	1.5	1.0	1.0	0.5
E. U.	11.0	2.0	14.0	1.0	17.0	1.0
Polonia	5.3	4.3	6.0	4.5	6.5	5.0
A. Saudita	0.3	-	1.3	1.0	2.0	2.0
Irak	0.7	0.6	0.8	0.5	0.8	0.5
Irán	0.3	0.2	0.5	0.3	0.5	0.3
México	2.1	1.5	2.4	1.0	2.6	1.0
Canadá	7.0	6.2	7.5	6.5	7.0	6.0

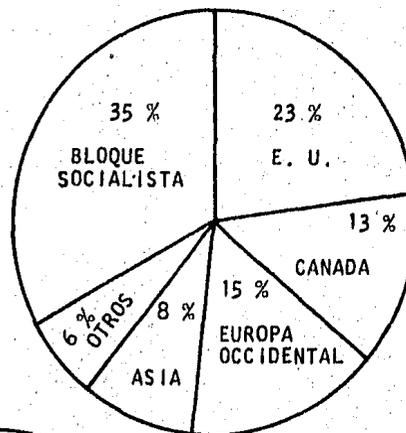
Cuadro 6.18.- Producción y exportación estimada mundial de azufre para el período 1980-1990.

Fuente - Industrial Minerals,  
Enero de 1981.  
Revista Mensual.

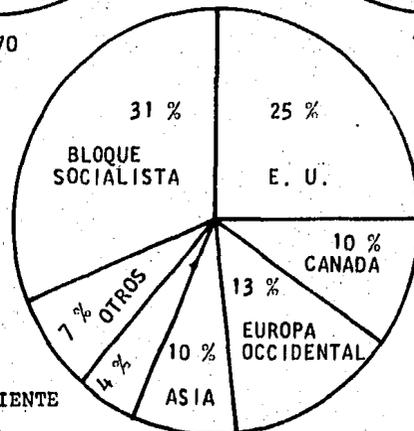
La Materia Prima./ FERTIMEX./ 1981, México D.F.



1970



1980



MEDIO ORIENTE

1990

FIGURA 6.5.- OFERTA MUNDIAL DE AZUFRE PARA EL 1970-1990.

FUENTE - CHEMICAL ENGINEERING JUNIO 1982.

En los últimos años el mercado mundial del azufre se vió alterado y sufrió una caída debido a diferentes conflictos socio-económicos surgidos en los países productores del metaloide; podemos mencionar algunos como la crisis social polaca y el conflicto armado entre Irán e Irak. A pesar de estos contratiempos se cubrió la demanda mundial de azufre puesto que Canadá, tercer productor mundial y primer exportador mundial, vendió parte de sus reservas almacenadas.

#### 6.3.2.- Futuro de la oferta - demanda internacional.

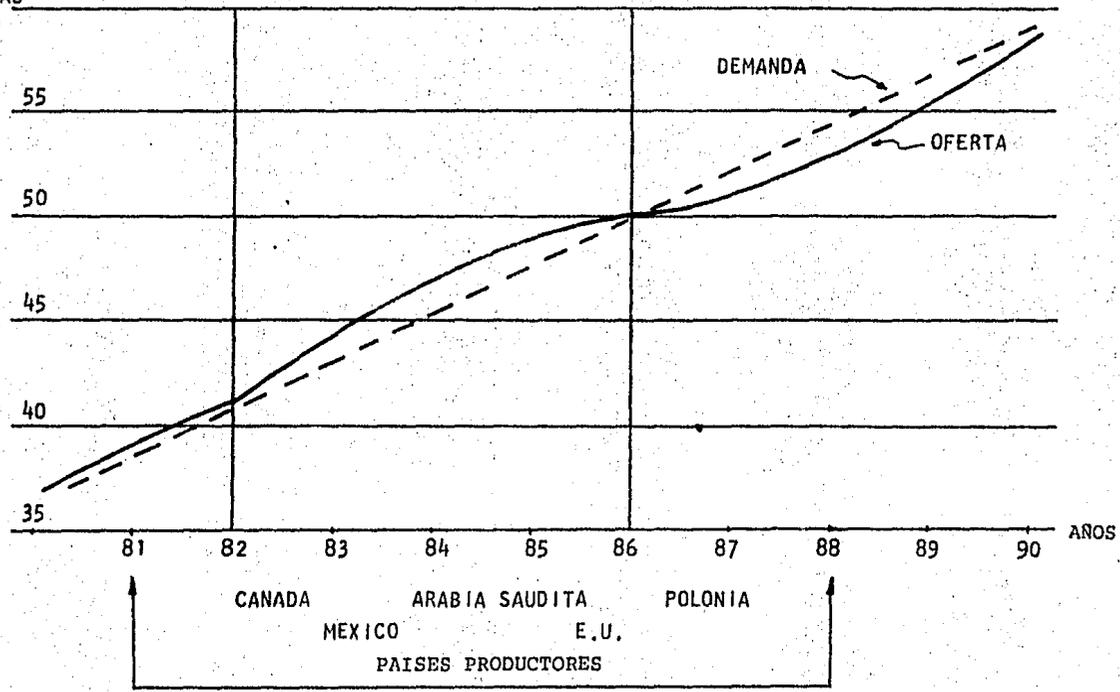
Para los próximos años se espera que el consumo y la producción de azufre aumenten año con año, figura 6.6. De tal manera que el mercado mundial del azufre movilice, en 1984, más de 40 millones de toneladas métricas.

A partir de 1986 la demanda posiblemente será poco mayor que la oferta, esto sucederá a consecuencia de que un mayor número de países tendrán capacidad para producir los derivados del azufre. La producción del metaloide no se incrementará en proporción a la demanda. Además es factible que las reservas mundiales de azufre e hidrocarburos se mantengan constantes.

Para finales de la década de los 90's se espera que se hayan rebasado los 55 millones de toneladas métricas, tanto en la demanda como en la oferta. Los grandes productores serán Canadá, Arabia Saudita, Polonia, México, Unión Soviética y Estados Unidos.

FIGURA 6.6.- BALANCE OFERTA-DEMANDA DE AZUFRE PARA EL PERIODO 1980-1990.

MILLONES DE TONELADAS POR AÑO



FUENTE - INDUSTRIAL MINERALS ENERO 1981.

Si seguimos un orden, Estados Unidos prevé elevar su producción actual y a su vez disminuir sus exportaciones a consecuencia de un mayor consumo interno. En cambio, Polonia incrementará su producción paulatinamente para alcanzar a fines de 1990 un tonelaje anual de 6.5 millones y por lo consiguiente aumentar sus exportaciones de azufre.

México pretenderá<sup>(9)</sup> elevar su producción pero intentando mantener sus exportaciones anuales de azufre en un millón de toneladas métricas. Canadá no alterará su ritmo de producción ni de exportación.

Los países árabes aumentarán año con año su producción y exportación, pero solamente Arabia Saudita rebasará el millón de toneladas métricas de azufre por año.

Ahora bien, un aspecto que influirá en el futuro balance oferta-demanda, es la producción de fertilizantes fosfatados. En las figuras 6.7 y 6.8 se observa que la demanda de azufre deberá de guardar una proporción respecto a la demanda de fertilizantes con el fin de mantener una producción ascendente de fertilizantes. Fabricar este tipo de productos acarrea como consecuencia directa la necesidad de aumentar la producción de los insumos indispensables en los procesos de elaboración, tal es el caso del ácido sulfúrico, principal derivado del azufre.

La necesidad del ácido sulfúrico y de los fertilizantes se debe de considerar prioritaria puesto que con ello se desarrollará e intensificará la industria alimenticia y el abasto de productos del campo con lo

(9) Robert Q. Phillips/Industrial Minerals/The Phosphate limiter/Revista Mensual/Enero 1981/E. U.

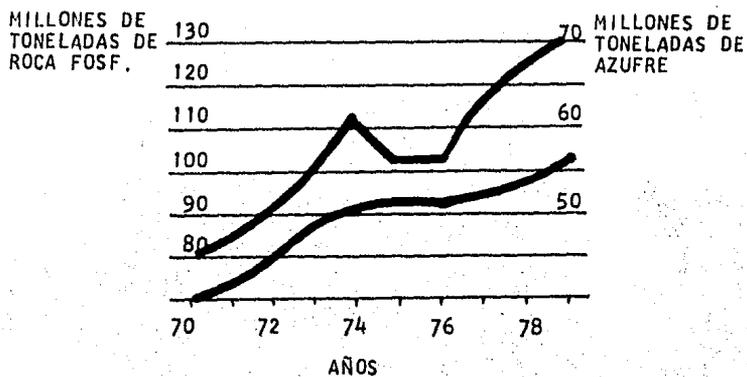
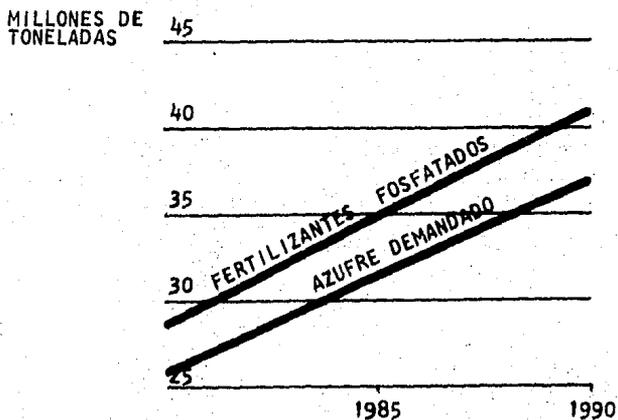


FIGURA 6.7.-CONSUMO MUNDIAL DE AZUFRE Y ROCA FOSFORICA.

FIGURA 6.8.-DEMANDA PROYECTADA DE AZUFRE EN BASE A LOS REQUERIMIENTOS PARA LA PRODUCCION DE FERTILIZANTES FOSFATADOS.



FUENTE - INDUSTRIAL MINERALS ENERO 1981.

cual se podrá dar solución, parcialmente, al problema de la alimentación de la población, no sólo en México, sino a nivel mundial.

Un ejemplo real y reflejo de estas necesidades es la importancia que se le ha dado en México; de tal forma que el Gobierno Federal ha creado y tiene bajo control, la industria de fertilizantes mediante la empresa Fertilizantes Mexicanos.

Otro aspecto que se debe considerar para el futuro balance oferta-demanda de azufre son: las cotizaciones internacionales que registrarán en los próximos años.

Si observamos la figura 6.9., se prevé que la demanda no podrá ser cubierta si se mantiene la cotización de la tonelada de azufre por debajo de 112 dólares americanos. Probablemente se tendrá que ofrecer este producto arriba de los 230 dólares americanos. Este incremento en el precio del azufre será necesario para contrarrestar los costos de producción que sufrirán un incremento de acuerdo a la inflación proyectada.

Todas estas proyecciones de oferta-demanda del azufre se han realizado, <sup>(10)</sup> en base a comportamientos anteriores, a la producción actual y a información proporcionada por empresas ligadas a esta industria.

(10) Robert Q. Phillips/Industrial Minerals/Enero 1981/E. U.

MILLONES DE  
TONELADAS

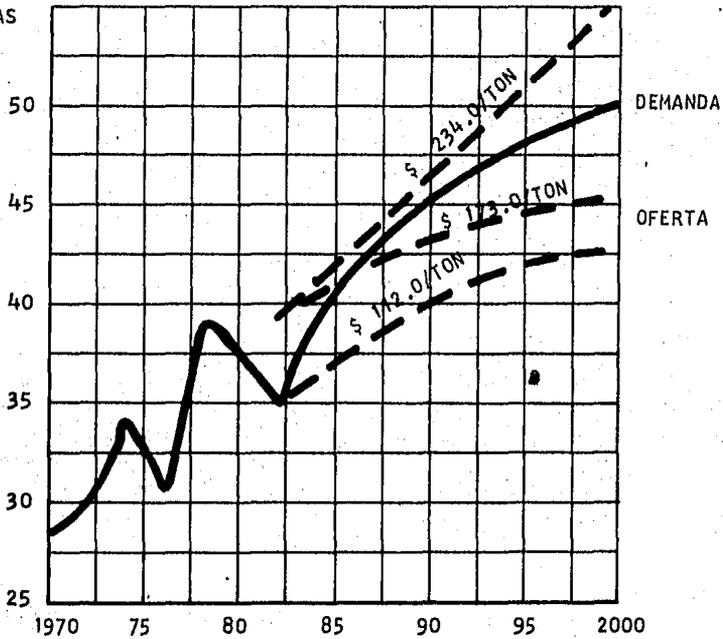


FIGURA 6.9.-BALANCE OFERTA - DEMANDA  
PERIODO 1970-2000 A  
DIFERENTES COTIZACIONES.

FUENTE - CHEMICAL ENGINEERING JUNIO 1982

## 7.- CONCLUSIONES.

Como se mencionó al principio del trabajo el objetivo de la presente tesis es analizar el proceso de filtración de azufre que se efectúa en la planta de filtros de la compañía Azufrera Panamericana S.A.

Se considera que el proceso de filtración es el adecuado para la eliminación de las impurezas que contaminan el azufre. El equipo que se encuentra instalado en la planta de filtros es antiguo pero con un adecuado mantenimiento puede operar eficazmente.

Para mejorar el proceso de filtración y sus resultados se concluye que se debe de tomar en cuenta lo siguiente:

Primeramente se debe de dar más importancia a la labor que realizan el departamento de geología y el laboratorio químico de la empresa, una acción coordinada y sistemática entre estos dos departamentos, el departamento de producción y la planta de filtros ayudaría a obtener buenos resultados en el proceso de filtración.

En el departamento de geología se tienen registros de todas las perforaciones realizadas en el domo de Jaltipan, por medio de esta estadística se puede llevar a cabo un estudio histórico-analítico para determinar las áreas ó lotes que contienen azufre contaminado con hidrocarburos.

Las nuevas perforaciones producen muestras que analizadas en el laboratorio químico darán el porcentaje real de contaminación del azu  
fre.

Esta información será de gran utilidad cuando se planee el nuevo frente de explotación y posteriormente cuando se envíe el azufre a la planta de filtros.

El consumo de reactivos es otro aspecto que se debe de tener en cuenta para que el proceso de filtración mejore.

Se observa que la dosificación de reactivos se realiza con aparatos rudimentarios y que el control del proceso es, en su mayoría, visual. Corrigiendo estos dos puntos se mejorará el desarrollo del proceso.

El ácido sulfúrico debe dosificarse de acuerdo al porcentaje de contaminación del azufre que se está filtrando y no de una manera ge  
neral.

Cuando se desee obtener azufre calidad "C" (0.08%C) se recomienda se seleccione la materia prima y se realice una filtración terciaria para eliminar la mayor cantidad de impurezas.

Es necesario implantar un programa de filtración y de mantenimiento; la programación de la filtración se debe de coordinar con el depar

tamiento de producción. El programa de mantenimiento debe ser preventivo y correctivo para evitar paros y demoras que interrumpen el proceso de filtración y afecta los resultados del mismo.

La producción de la planta de filtros debe de ser constante, para ello es necesario que el personal que labora tenga una productividad homogénea en los tres turnos de operación de la planta.

Finalmente sobre el capítulo sexto que trata del mercado nacional e internacional del azufre, como punto de vista personal, diré lo siguiente:

Considerando la crisis económica-social que padece el país, el Gobierno mexicano debería disminuir las exportaciones de materia prima y fomentar e incrementar la industria química nacional, con capital mexicano y con la participación conjunta de la iniciativa privada y el Gobierno Federal.

Transformar el azufre y exportar sus derivados que serían una mayor fuente de ingresos para el país que la que se obtiene al exportar el azufre en estado natural.

Lo anterior también es aplicable a todo tipo de mineral que se produce en territorio mexicano: Sal, Fluorita, Barita, etc.

Por otro lado debido a la situación actual del mundo y a la crisis económica que atraviesan la mayoría de los países, hay que tomar con reserva las proyecciones que se hacen sobre cualquier producto pues el mercado internacional es inestable y se maneja de acuerdo a los intereses de los países que lo controlan.

## 8.- BIBLIOGRAFIA.

- 1.- APUNTES DE YACIMIENTOS MINERALES./ Leovigildo Cepeda Dávila./ Facultad de Ingeniería, Departamento de Geología./ U.N.A.M./ 1975, México D.F./ México.
- 2.- BOLETIN MENSUAL DE INFORMACION ECONOMICA./ Volumen VI, Núm. 4./ Secretaría de Programación y Presupuesto./ Julio de 1982, México D.F.
- 3.- BRIMSTONE "THE STONE THAT BURNS./ Williams Haynes./ D. Van Nostrand Company, inc./ 1942, New York, N.Y./ U.S.A.
- 4.- CHEMICAL ENGINEERING HANDBOOK./ Robert H. Perry & Cecil H. Chilton./ Quinta edición, Mc Graw-Hill Inc./ 1973, New York, N.Y./ U.S.A.
- 5.- ENERGIA MEDIANTE VAPOR, AIRE O GAS./ W.H. Severns, H.E. Degler, J.C. Miles./ Edit. Reverté S.A./ 1975, Barcelona España./ España.
- 6.- ENGINEERING & MINING JOURNAL./ Revista mensual, Mc Graw-Hill Inc./ Mayo de 1968, New York, N.Y./ U.S.A.

- 7.- GENERALIDADES DE LOS DEPOSITOS DE AZUFRE DE LA CUENCA SALINA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC./ Rubén Pavón./ Azufre-  
ra Panamericana S.A./ 1967, Jaltipan Veracruz./ México.
- 8.- GEOGRAFIA ECONOMICA DE MEXICO./ Angel Bassols Batalla./  
Segunda Edición, Editorial Trillas./ 1972, México D.F./  
México.
- 9.- INFORME GEOLOGICO DEL DOMO DE JALTIPAN./ Ing. Gabriel  
Domínguez Portilla./ Azufrera Panamericana S.A./ 1973,  
Jaltipan Veracruz./ México.
- 10.- LA ECONOMIA MEXICANA EN GRAFICAS./ Secretaría de Progra  
mación y Presupuesto./ Julio de 1981, México D.F./  
México.
- 11.- LA MATERIA PRIMA./ Fertilizantes Mexicanos S.A./ 1981,  
México D.F./ México.
- 12.- LA MINERIA EN MEXICO./ Secretaría de Programación y  
Presupuesto./ Impresores Rexford S.A./ Febrero de 1981,  
México D.F./ México.
- 13.- ORIGEN DEL AZUFRE EN EL CASQUETE DE LOS DOMOS, CUENCA  
SALINA DEL ISTMO DE TEHUANTEPEC./ U. Hungsberg./ Boletín  
51 Consejo de Recursos Naturales no Renovables./ 1960,  
México D.F./ México.

- 14.- SULPHUR./ Statistical supplement./ Revista Bimestral,  
The British Sulphur Corporation./ Enero-Febrero de  
1981, Londres Inglaterra./ United Kingdom.
- 15.- SULPHUR - THE PHOSPATE LIMITER./ Robert Q. Phillips./  
Revista mensual, Industrial Minerals./ Enero de 1981,  
U.S.A./ U.S.A.
- 16.- SULPHUR SEESAW "THE UPS & DOWNS"./Anónimo./ Revista  
mensual, Chemical Engineering./ Junio de 1982, U.S.A./  
U.S.A.