



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

“ANTEPROYECTO DE UNA PLANTA DE
REMOCION DE SILICE DE LA SALMUERA
GEOTERMICA DE CERRO PRIETO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A

FRANCISCO JAVIER DIAZ NUÑEZ

DIRECTOR DE TESIS:

I.Q. ALVARO LEO RAMIREZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

"ANTEPROYECTO DE UNA PLANTA DE REMOCION DE SILICE
DE LA SALMUERA GEOTERMICA DE CERRO PRIETO"

I N D I C E

CAPITULO 1	INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 2	ASPECTOS SOBRE GEOTERMIA, Y CERRO PRIETO.....	6
2.1	Concepto de Energia Geotérmica.....	6
2.2	Clasificación de la corteza terrestre desde el punto de vista geotérmico.....	6
2.3	Distribución y valor potencial de áreas y campos.....	8
2.4	Modelo del campo hipotermal ideal.....	8
2.5	Cerro Prieto.....	9
2.6	Caracterización y origen de la salmuera geotérmica de Cerro Prieto.....	12
CAPITULO 3	QUIMICA DE LA SILICE.....	17
3.1	Solubilidad de la sílice.....	17
3.2	Polimerización de la sílice disuelta.....	24

CAPITULO 4	ANTECEDENTES DE REMOCION DE SILICE.....	28
4.1	En otros campos geotérmicos.....	28
4.1.1	Salton Sea, California.....	28
4.1.2	Ahuachapán, El Salvador.....	31
4.1.3	Wairakei y Broadlands, Nueva Zelanda.....	32
4.1.4	Otake, Japon.....	33
4.2	En Cerro Prieto, sin uso de coagulantes...	34
4.3	Selección del coagulante adecuado para la remoción de sílice en la salmuera de Cerro Prieto.....	34
4.4	Descripción del proceso seleccionado para Cerro Prieto.....	37
CAPITULO 5	PRUEBAS DE LABORATORIO.....	39
5.1	Estudio de la cinética de polimerización en el agua separada del pozo M-101, "Prue- bas de Botella".....	39
5.1.1	Objetivos.....	39
5.1.2	Procedimiento.....	39
5.1.3	Presentación de los resultados.....	42

5.1.4 Interpretación de los resultados.....	43
5.1.5 Conclusiones.....	51
5.2 Estudio de la sedimentación de la sílice contenida en el agua separada del pozo M-101, "Pruebas de Columna".....	51
5.2.1 Descripción de la experimentación realizada.....	51
5.2.2 Cálculo de la velocidad de flujo en el derrame a partir de datos de la- boratorio. Consideraciones teóricas...	53
5.2.3 Teoría de la sedimentación discreta...	68
5.2.4 Concepto de tanque de sedimentación ideal.....	72
5.2.5 Cálculo de la velocidad de flujo en el derrame. Modelo matemático.....	80
5.2.6 Conclusiones.....	81
CAPITULO 6 PRUEBAS EN PLANTA PILOTO.....	88
6.1 Descripción del proceso.....	88
6.2 Descripción y capacidad del equipo.....	91
6.2.1 Separador atmosférico.....	92

6.2.2	Tanque de asentamiento.....	92
6.2.3	Tanque para preparar lechada.....	93
6.2.4	Bombas de alimentación.....	94
6.2.5	Sedimentador-clarificador.....	94
6.2.6	Bomba de lodos.....	96
6.3	Control operativo.....	96
6.3.1	Frecuencia de las lecturas.....	99
6.3.2	Procedimientos utilizados para la medición de las variables.....	99
6.4	Presentación y comentarios de los resultados de la operación de la planta piloto.....	101
6.4.1	Prueba # 1, figura 33.....	103
6.4.2	Prueba # 2, figura 34.....	105
6.4.3	Prueba # 3, figura 35.....	107
6.4.4	Prueba # 4.....	107
6.4.5	Prueba # 5, figura 36.....	109
6.4.6	Prueba # 6, figura 37.....	111
6.4.7	Prueba # 7, figura 38.....	111

6.4.8	Prueba # 8, figura 39.....	114
6.4.9	Prueba # 9, figura 40.....	114
6.4.10	Prueba # 10, figura 41.....	117
6.4.11	Prueba # 11, figura 42.....	117
6.4.12	Prueba # 12, figura 43.....	120

CAPITULO 7 PARAMETROS BASICOS PARA EL DISEÑO DE LA PLANTA COMERCIAL.....123

7.1	Parámetros de diseño.....	123
7.2	Capacidad y arreglo general de la planta.....	124
7.3	Arreglo y dimensionamiento de equipos.....	126
7.3.1	Localización de la planta.....	126
7.3.2	Diagrama de flujo.....	126
7.3.3	Dimensiones del clarificador.....	129
7.3.4	Dimensiones tanque polimerizador.....	130
7.3.5	Separador atmosférico.....	132

CAPITULO 8 CONCLUSIONES.....133

APENDICE A	FORMAS CRISTALINAS, ACUOSAS Y AMORFAS DE LA SILICE.....	136
APENDICE B	METODO DEL MOLIBDATO.....	138
APENDICE C	TURBIDIMETRIA.....	142
APENDICE D	REGISTRO DE DATOS DE LAS PRUEBAS EN PLANTA PILOTO.....	148
	BIBLIOGRAFIA.....	153

CAPITULO I

INTRODUCCION

A partir del mes de abril de 1977, se inicio la operacion de la primera etapa de la Central Hidrotermoeléctrica de Cerro Prieto Una. Esta primera etapa con capacidad de 98 000 kw. (Unidades 1 y 2, 37.5 MW cada una) cubre nuevas necesidades para la generación económica de electricidad desde entonces. Mexico realiza grandes esfuerzos en el desarrollo y aprovechamiento eficiente de una fuente alternativa de energía, la energía geotérmica.

En abril de 1977, se dio en operación una segunda etapa de Cerro Prieto Una, la que adicionó 10 MW (Unidades 3 y 4, 37.5 MW cada una) para 1987 se construyó con una capacidad instalada de 100 MW, ya que adicionalmente a las Unidades 1, 2, 3 y 4 ya mencionadas, se construyó e inició la operación de una planta de evaporación instantánea, la cual suministra vapor de agua saturado a una quinta unidad que genera 10 MW.

Estas cinco unidades (instaladas en una sola casa de máquinas) y el área que ocupan los pozos que las alimentan de vapor de geotermia Cerro Prieto Una, en vista del éxito obtenido, se realizaron estudios para evaluar la factibilidad de empleo de otras áreas, siempre que existiera el incremento de las instalaciones geotérmicas en Cerro Prieto con la entrada en operación en los años 1986 y 87, de la Central Hidrotermoeléctrica Cerro Prieto Dos (Unidades 1 y 2, 110 MW cada una) y de la Central Geotermoeléctrica Cerro Prieto Tres (Unidades 1 y 2, 110 MW cada una) la capacidad instalada actual en el Campo Geotérmico alcanza 620 MW.

El aprovechamiento de energías por las tres plantas del Centro de Generación de Energía Cerro Prieto representará el 60% del país en el campo actual de aprovechamiento de las acciones de energía de combustión, según estadísticas de información publicada por E.L.E. para Cerro Prieto III.

El Centro General de Electricidad iniciará en 1979 la explotación de las puzos para sustituir el vapor a la central Central Generadora de Cerro Prieto II, la que consista de dos unidades de 55 Mw cada una, con la intención de dotarle esta de 100 Mw. Las unidades entrarán a operación en 1979 y 1981; adicionalmente existen 110 Mw de capacidad puzos por lo que el potencial del campo es 190 Mw.

El aprovechamiento de los recursos naturales para la producción de energía eléctrica, petróleo, aluminio, el nitrógeno y disposición de estos recursos deben de ser sujetos a criterios aceptables, la forma de disponer de los recursos líquidos (calentamiento geotérmico), y las aplicaciones pertinentes, son determinadas por una variedad de factores, como son: los conocimientos actuales de los recursos, el uso de las tierras adyacentes, regulaciones ambientales y el diseño general de la planta. Independientemente de estos y otros factores, para el uso de la energía, se puede usar una o la combinación de las siguientes prácticas comunes:

- a) - Explotación de los recursos naturales
- b) - Desarrollo de nuevas tecnologías
para la explotación de los recursos
- c) - Desarrollo de nuevas tecnologías

01 - Unidad de Tratamiento de Agua Potable

Estación de Bombeo, Estación de Filtro

02 - Estación de Bombeo y Estación de Filtro

En el campo de estudio de Campo Prieto, actualmente (noviembre de 1968), se desarrolla en una laguna de evaporación con superficie de 14.750,00 m² por/n de agua evaporada proveniente de aproximadamente 70 hectáreas productoras del vapor que abastece a las tres Centrales existentes así como 1750 ton/n producto del condensado del vapor, una vez que éste acciona las 7 turbinas. La cantidad total de agua de desecho es variable y depende entre otras factores del comportamiento termodinámico del vaporamiento de los gases siempre sometidos de la manera en que se operen los sistemas de evaporación y conducción de vapor, las propias pérdidas y las condiciones ambientales. La producción promedio para 1968 de agua de desecho es de 5107 ton/n y será de ese orden para los próximos años sin considerar los planes de expansión mencionados. El sistema de evaporación existente deberá disponer únicamente de 1968 ton/n de capacidad anual, por lo que existe un excedente que se evadirá en aguas superficiales localizadas al Sur de Campo Prieto, el volumen del cuerpo receptor será de 1100 hectáreas, de las cuales las consecuencias que son presentes en el agua superficial a niveles que están acordes con las normas establecidas por la Secretaría de Higiene Urbana y Ecología, pero ha llegado a su límite diluyente. La entrada en operación de las obras para Campo Prieto Cuatro tendrá 6000 toneladas de incremento en la cantidad de agua de desecho que la Central de 1800 ton/n, la cual en definitiva depende de ser instalada o permanentemente reemplazada, ya que sus propias turbinas que

actualmente se realizan para evitar labores asociados a la
de construir nuevas represas, problemas de contaminación
y de salud pública. Asimismo que en estas represas se
convierten como el agua potable.

La vida del valmiente se consigue usualmente
geotérmica, es de poca potencia eléctrica y conser-
vación para su vida debe ser cuidadosa, mediante la reinyección
de la salmuera de manera controlada del yacimiento en produc-
ción, se conserva una parte tanto del agua como de la energía
calorífica, así mismo los beneficios que resultan de utilizar
las aguas geotérmicas.

La Comisión Federal de Electricidad, el Instituto de
Investigaciones Eléctricas han realizado estudios en el Campo
Geotérmico de Cerro Prieto, a fin de sustentar las posibles
tecnologías que presenta la reinyección de la salmuera una
de las principales dificultades, es que la salmuera debido a
evaporaciones y enfriamientos, ya sean naturales o inducidos,
presenta una sobresaturación, principalmente en lo que
respecta a su contenido de sílice; se encuentra que el
contenido promedio de sílice en la salmuera es de 100 ppm para
reinyección de la aproximadamente 1000 ppm a 100°C y 1
atm., mientras que a estas condiciones, la solubilidad de
la sílice es un alrededor de 400 ppm, de tal manera que es
necesario eliminar la sílice en exceso, para evitar problemas
de incrustaciones en el caso de reinyección y el que se
necesite sílice en las inyecciones, reducir el yacimiento
reduciendo así su permeabilidad y por ende la velocidad de
reinyección de la salmuera.

El objetivo principal de este trabajo, es la
experimentación en laboratorio y a escala piloto, de un
proceso de eliminación de la sílice que sobresatura la

Estimaciones geotérmicas de campo, resulta de tal manera que permite reconstruir a partir de los resultados experimentales, se delimitaron los parámetros básicos de diseño de la planta industrial de producción de vapor.

C A P I T U L O 2

ASPECTOS SOBRE GEOTERMIA, Y CERRO PRIETO

2.1.- Concepto de Energía Geotérmica

El término Energía Geotérmica se usa en forma restringida para designar a toda aquella energía obtenida a partir de las calorías que emite naturalmente la corteza terrestre en condiciones geológicas favorables a pocas kilovatios de profundidad con respecto a la superficie terrestre.

2.2.- Clasificación de la corteza terrestre desde el punto de vista geotérmico

Es conveniente clasificar la corteza terrestre en "terrazas" o zonas clasificadas de acuerdo a la tierra en dos grupos generales. Los cuales son zonas de terreno y zonas de agua. Las zonas de terreno, presentan gradientes de temperatura que van de 10 a 40 °C por kilómetro de profundidad. De las zonas terrestres existen tres clases, áreas geotérmicas y áreas hidrotermales. Las áreas geotérmicas tienen un gradiente de temperatura de 10 a 20 °C por kilómetro de profundidad en el caso de las áreas hidrotermales el gradiente de temperatura es mucho mayor que el de las zonas geotérmicas, llegando a ser incluso del orden de grados centígrados por centímetros de profundidad.

En la introducción a este estudio se habla de países

2.3.- Distribución y valor potencial de áreas y campos

Los campos hipertermales están en sus comienzos, tanto en su explotación económica como en el nivel de gran actividad tecnológica alcanzada. Gracias a los conceptos desarrollados durante los últimos años, los tipos de campos hipertermales pueden clasificarse de acuerdo al tipo de fluido en comparación con las condiciones al cual se puede utilizar para una amplia variedad de aplicaciones, principalmente la generación de electricidad a partir de los campos geotérmicos en alta temperatura, aunque no carece de valor cuando se utiliza para la calefacción de edificios, producción de energía a plantas industriales y en la agricultura, teniendo como ejemplo importante de su valor, el caso de Islandia, donde el 70 % de su población disfruta de calefacción a partir de la energía geotérmica gracias a campos geotérmicos¹⁰. En la tabla 11 se presenta la distribución y el valor potencial de áreas y campos¹⁰.

2.4.- Modelo del campo hipertermales ideal

La estructura de los campos geotérmicos y los mecanismos de transferencia de calor desde las profundidades hacia los niveles superiores, no queda con claridad definida, ya que la parte subterránea de los campos es convenientemente invisible y para la mayoría de las aplicaciones de energía térmica, el conocimiento restringido a la extensión de los campos, explotación y explotación de los campos, este modelo debe ser consistente con el comportamiento del campo y debe ser capaz de describir los procesos subterráneos que podrían causar los cambios durante un campo hipertermales. Actualmente se

Grupo de las especies nuevas.

19. Una especie nueva.

20. Un grupo de especies.

21. Un grupo de especies nuevas, con una especie nueva y una especie nueva, con una especie nueva y una especie nueva.


22. Una especie nueva, con una especie nueva, con una especie nueva y una especie nueva, con una especie nueva y una especie nueva.

23. Una especie nueva, con una especie nueva, con una especie nueva y una especie nueva, con una especie nueva y una especie nueva.

La descripción de las anteriores de las especies de este grupo que cubren de ser la primera especie de los grupos bipartitos. En la figura 1 se muestra un ejemplo probable de los constituyentes de un grupo bipartito subclásico.

2.5. - Cerro Prieto

El grupo bipartito nuevo de Cerro Prieto, se encuentra en el centro de México, localizado en el Valle de Mexicali a unos 30 kilómetros al sur de Tijuana del mismo nombre, en la figura 2 se muestra la localización. Las principales vías de acceso. La climatología reportada para la zona en los años de 1964 a 1967, indica que la temperatura varía desde - 5 °C en el invierno, hasta 47 °C en el verano, se precipitan pluvias desde la zona de la zona

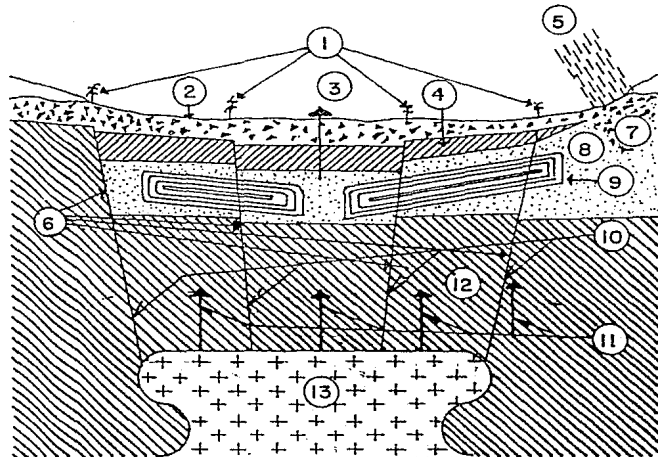
ORDEN APROXIMADO DE LA FRECUENCIA DE OCURRENCIA	AREAS Y CAMPOS	VALOR ECONOMICO	OBSERVACIONES
Lo más común 	Areas no termales	Sin valor presente	Quizás explotable dentro de muchos años.
	Areas semitermales	Sin valor presente	Quizás explotable dentro de una década.
	Areas hipertermales	Sin valor presente	Quizás explotable muy pronto.
	Campos semitermales ¹	Valiosos	} Actualmente explotados
	Campos hipertermales ² húmedos	Más valiosos	
Campos hipertermales ³ secos	Los más valiosos		
Lo más raro			

EJEMPLOS: 1.- Islandia; 2.- Otake Japón, Wairakei, Nueva Zelandia, Cerro Prieto México;
3.- Geysers Cal. E.U.A., Larderello Italia.

TABLA I.- DISTRIBUCION Y VALORES POTENCIALES DE AREAS Y CAMPOS

Fig. 1

MODELO ESTILIZADO DE UN CAMPO HIPERTERMAL.



- ① Manifestaciones superficiales
- ② Suelo
- ③ Pozo
- ④ Tapa de roca
- ⑤ Lluvia
- ⑥ Fallas
- ⑦ Área de recarga

- ⑧ Acuífero
- ⑨ Corrientes de convección
- ⑩ Gases y vapores magmáticos
- ⑪ Flujo conductivo de calor
- ⑫ Lecho de roca
- ⑬ Intrusión magmática

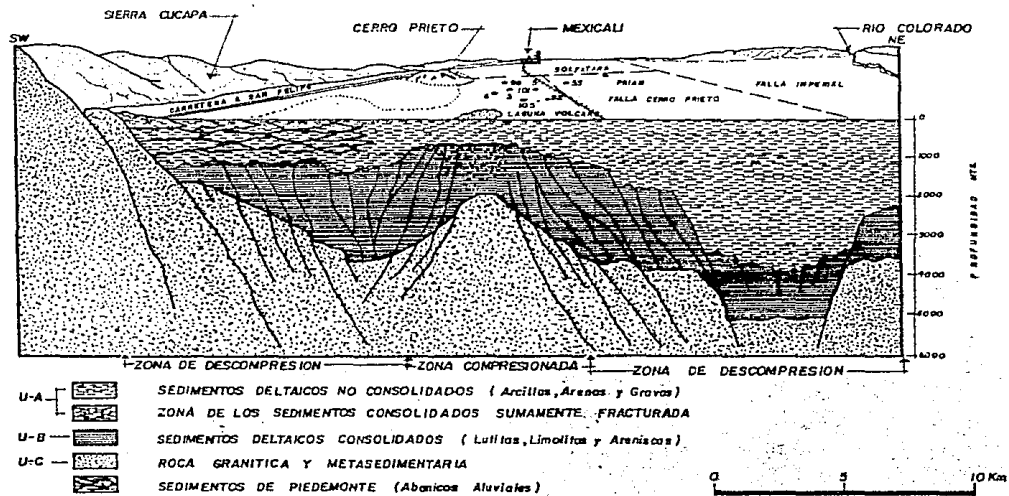


Fig. 3

CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

CORTE GEOLOGICO SUDOESTE-NORESTE

AREA	C P I (32 POZOS)		C P II (30 POZOS)		C P III (24 POZOS)		* PROMEDIO TOTAL	
	[Yac.]	[Atmsf.]	[Yac.]	[Atmsf.]	[Yac.]	[Atmsf.]	[Yac.]	[Atmsf.]
	STD	12 958	21 478	17 130	31 370	13 511	25 186	14 568
Cl	7 213	11 950	9 495	17 407	7 597	13 837	9 116	14 380
Na	3 916	6 479	5 088	9 322	3 988	7 439	4 345	7 739
K	904	1 523	1 352	2 490	1 112	2 088	1 118	2 018
SiO ₂	603	931	678	1 117	618	984	633	1 011
Ca	184	300	225	412	165	306	193	341
HCO ₃	52.6	84.3	26.4	47.2	32.5	58.9	37.9	64.3
B	9.5	15.6	12.5	21.9	16.7	31.2	12.6	22.2
Li	10.0	16.6	12.5	22.9	10.8	20.0	11.1	19.7
SO ₄	9.0	13.8	2.0	3.7	2.4	4.2	4.7	7.6

TABLA 2 PRINCIPALES COMPONENTES QUIMICOS EN EL AGUA DEL YACIMIENTO Y EN EL AGUA SEPARADA A PRESION ATMOSFERICA (EN ppm).

* TOMANDO EN CUENTA EL NUMERO RELATIVO DE POZOS.

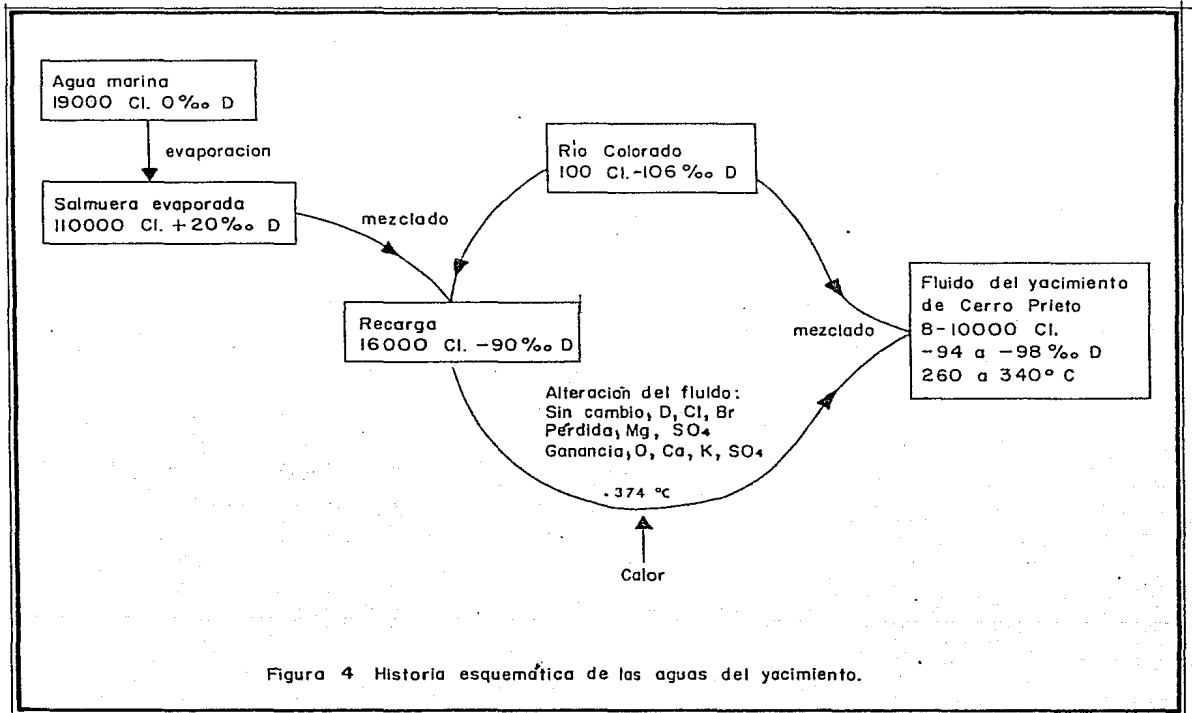


Figura 4 Historia esquemática de las aguas del yacimiento.

CAPITULO 3

QUIMICA DE LA SILICE

3.1.- Solubilidad de la silice

El término silice se usa para todo una designación común y comprensible para "Dióxido de Silicio" en todos sus estados de agregación, con sus diversas formas cristalinas o amorfizadas. El término esencial, se aplica para designar a un grupo de átomos que forman un silicio.

La silice en los suelos es propiamente denominada de la palabra "terrestre", constituyen el segundo por cantidad de agua, ya sea pura o combinada con otros elementos en los minerales.

No existe evidencia de que la silice sea "soluble" hasta en un grado apreciable en cualquier caso líquido, excepto del agua. Sin embargo, la solubilidad depende del pH del agua que se le da a "solubilizarse": la disolución de la silice involucra una reacción química de hidrólisis en un proceso no reversible.



Esto no es tan sencillo como se ve la silice en agua, donde la molécula de agua existe intacta en solución. Tal y como se presenta en la reacción química.

Las soluciones saturadas de Si(OH)_4 se forman cuando la silice es disuelta en agua a altas temperaturas.

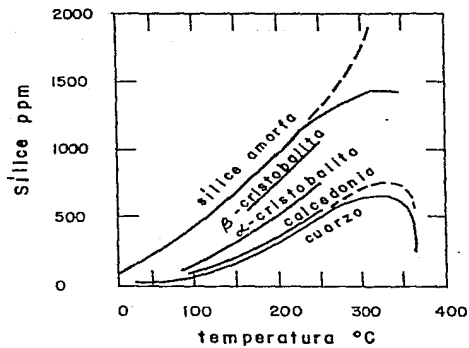
solución de HCl, se agregan en forma de solución. En la reacción
ocurre un enlace simple al átomo de silicio.



Las silicatos, especialmente los ácidos silícicos son
de gran importancia industrial, porque se tiene a raíz de
su polimerización una conservación a través de amorfización.
El carácter polimerización es el resultado de enlaces covalentes
que se forman entre átomos de silicio para formar un
polímero de la misma composición en el átomo de silicio,
el elemento Si(OH)_4 , se forma para formar un polímero que
tiene finalmente la composición $(\text{SiO}_2)_n$. Los átomos de silicio
señalados se unen al átomo de silicio para formar un polímero.

Los átomos de silicio se unen a través de enlaces covalentes
compartiendo en cuanto a electrones. La forma cristalina
más común es el cuarzo, principal constituyente de la arena
común. Sin embargo, esta estructura cristalina es la más común
y en el laboratorio se pueden producir otras formas. Una
nueva clasificación de las diversas especies de cuarzo, la
clasificación de Frankford²², la cual se presenta en el
apéndice B.

Otra de las dificultades con las diversas formas de la
silice es resolver en la figura 4¹², viendo que, en realidad
que la silice amorfa es una mezcla que se convierte a todas las
temperaturas. Los datos reportados en la figura van de
aproximadamente 1000 a 1500 grados de temperatura amorfa y un
aproximadamente 400. En condiciones extremas con un pH ácido de
4, la silice amorfa se une al átomo de silicio para formar
moléculas sencillas, dando la especie silícica de la silice
neutral. El número de átomos de silicio, Si(OH)_4 , en esta
condición de todas las especies de la silice se incrementa a

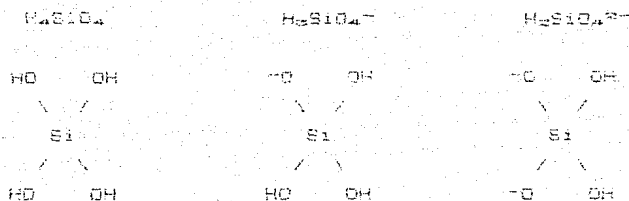


Solubilidad de varias fases de sílice

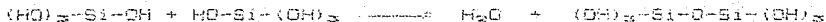
Figura No. 5

de hidroxilos y otros grupos funcionales de la especie de silice de donde se derivaron. Los aniones $H_2SiO_4^{2-}$ y $H_3SiO_4^-$ son los que se muestran en la figura 3¹.

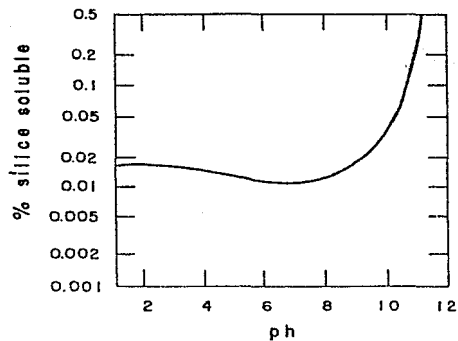
Los grupos de hidroxilos pertenecientes a especies diferentes pueden ser, en principio, muy bien diferenciados por sus propiedades químicas, como por ejemplo, los siloxilos de tipo $H_2SiO_4^{2-}$ que se hidroxilan más fácilmente que los de tipo $H_3SiO_4^-$ o siloxilos monofuncionales de los cuales están formados los silatos.



De acuerdo con Garman²², la polimerización de la silice monofuncional para formar partículas de dimensiones micelulares, se lleva a cabo por el enlaceamiento de tetraedros silíceos de $Si(OH)_4$ mediante enlaces silíceos $(Si-O-Si)_n$.

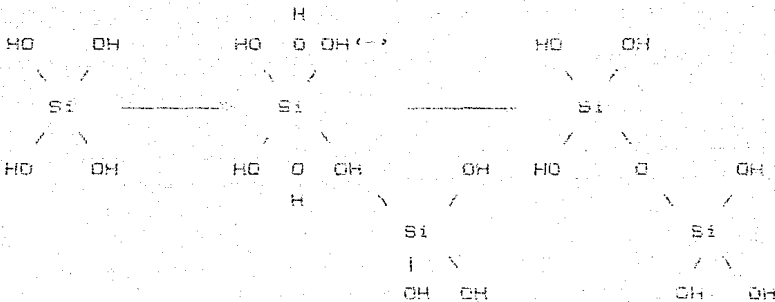
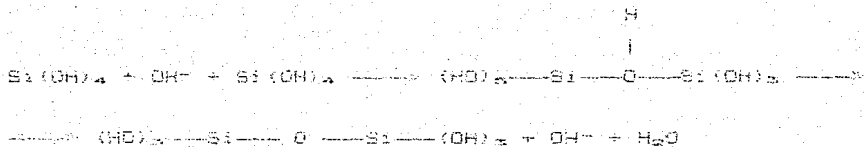


Por analogía con la polimerización de $Si(OH)_4$, la que se sabe que ocurre, Iler²³ sugiere que la polimerización del acetato monofuncional involucra un incremento sustancial en el número de coordinación del silicio de 4 a 6:



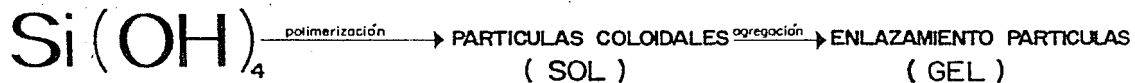
Solubilidad de la sílice en agua (25 °C)

Figura No. 6



Los pasos involucrados en la polimerización de la sílice monomérica hasta llegar a la condensación o agregación de las unidades de dimensión molecular pueden verse por tipo de productos en la figura 7.

Una característica de la química de la sílice, es el hecho de que cuando la solución se vuelve sobresaturada con respecto a la sílice amorfa, se da origen a la formación de partículas de óxido de silicio en lugar de agua. Al estar sobresaturado se disminuye considerablemente esta forma de suspensión coloidal, lo cual puede ser visto fácilmente observando una suspensión coloidal amorfa²².



SOL DILUIDO $\xrightarrow{\text{agregación}}$ GEL DEBIL o PRECIPITADO

SOL CONCENTRADO $\xrightarrow{\text{agregación}}$ GEL FUERTE y FIRME

GEL HUMEDO $\xrightarrow{\text{secado}}$ GEL ENCOGIDO
(Superficie cubierta con grupos silanol)

FIGURA 7.- Esquema del mecanismo de polimerización hasta la precipitación o agregación

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..

C A P I T U L O 4

ANTECEDENTES DE REMOCION DE SILICE

4.1.- En otros campos geotérmicos

4.1.1.- Salton Sea, California

Robert H. Van Note y colaboradores²¹, utilizaron una planta piloto cuya parte medular fue un clarificador por contacto de lodos, con el fin de abatir la sobresaturación de silice y metales pesados presentes en la salmuera de desecho del Campo Geotérmico de Salton Sea California, y obtener así un fluido no incrustante adecuado para reinyectarse; los lodos se recirculaban a la zona de reacción para proveer núcleos sobre los cuales precipitaban los sólidos contenidos en la alimentación, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de reacción y concentración de sólidos. El efluente del reactor-clarificador contenía 293 ppm de silice con un total de 228 448 ppm de sólidos disueltos, de los cuales la gran mayoría la constituyen cloruros de sodio, potasio y calcio; el intervalo de temperatura fue de 82 a 92°C, el pH = 5.6. Los resultados que obtuvieron en las pruebas de planta piloto son:

- a).- No se requieren productos químicos en el tratamiento de salmueras de desecho del pozo Naqmanax 1 de Salton Sea.
- b).- Velocidad ascendente de flujo en el reactor clarificador igual a 72 GPM/pie².

- c).- Tiempo de reacción, 17 minutos.
- d).- Calidad del efluente a los criterios de diseño, sílice = 172 ppm; turbidez = 15 NTU (equivalente a 44 partes por millón de sólidos suspendidos).
- e).- Concentración de sólidos en zona de reacción, 2.5 %.
- f).- Producción de lodos, 1.7 lb/día por cada GPM.
- g).- Concentración de los lodos obtenidos = 4.5 % en peso.

Se hace notar que las 172 ppm de sílice que se reportan, corresponden a un efluente saturado y estable.

R. Quong y colaboradores²⁵, realizaron pruebas de laboratorio, para determinar el efecto que tienen los coagulantes orgánicos e inorgánicos, sobre el proceso de sedimentación de los sólidos suspendidos (principalmente sílice amorfa) en la salmuera del pozo geotérmico Magnamax 1 de Miland California (Salton Sea). La salmuera presenta una concentración inicial de 500 ppm de sílice y una temperatura de 90°C; sílice amorfa precipita en forma continua de la salmuera, hasta que se alcanza una concentración de equilibrio de aproximadamente 200 ppm en 2 o 3 horas, por lo que se hace evidente para propósitos de reinyección, que es necesario eliminar las especies que sobresaturan la salmuera, ya que de otra manera precipitarían en las formaciones rocosas disminuyendo o impidiendo la reinyección.

Se probaron diferentes coagulantes disponibles comercialmente, los cuales se utilizaron solos o combinados y a diferentes temperaturas y pH. Los principales resultados que

obtuvieron son:

- a).- En salmueras normales (pH = 5.5; temperatura = 85°C), con o sin aditivos químicos, la agitación ayuda significativamente en la coagulación y floculación de los sólidos en la salmuera.
- b).- La concentración de sílice declina rápidamente a los niveles de saturación cuando se eleva el pH de la salmuera a 5.9, el floculo sedimenta bien, pero el sobrenadante se enturbia con hidróxido de fierro despues de la precipitación de la sílice.
- c).- La concentración de la sílice se reduce rápidamente abajo de la saturación, al mezclarla con 1 al 2 % en peso de lodos.
- d).- Los coagulantes inorgánicos son ligeramente benéficos, 100 ppm de sulfato férrico es el mas efectivo, al combinarse el uso de coagulantes inorgánicos con contacto de lodos se encuentra una mejoría significativa en la velocidad de sedimentación y en claridad del sobrenadante.
- e).- Los polimeros catiónicos son algo benéficos, también con éstos mejora su efectividad si se combinan con contacto de lodos, se utilizaron dosis de 5 a 10 ppm.
- f).- Los polimeros aniónicos en combinación con el contacto de lodos, resultaron ser altamente efectivos, el floculo asienta rápidamente y se logró que la turbidez en el sobrenadante fuera tan baja como 3 NTU, la dosis que se utilizo fue de 5 ppm.

En base a estos resultados (polimeros aniónicos + con-

tacto de lodos), experimentaron en un clarificador de tipo cama de lodos a nivel planta piloto con flujo ascendente, un tanque de mezclado rápido precedía al clarificador, con el flujo que utilizaron en las pruebas (10 gal/min), el tiempo de residencia en el tanque de mezclado fue de 5 minutos y en el clarificador de 100 minutos, la velocidad de flujo ascendente fue de 0.38 GPM/pie². El efluente de mejor calidad que obtuvieron contenía 44 ppm (15 NTU's) de sólidos suspendidos con la sílice reducida a la saturación. Para lograr lo anterior, las condiciones fueron: contacto íntimo en el tanque de mezclado rápido del influente (10 GPM) con los lodos (16 GPM); se agregaron en el tanque de mezclado rápido, 3 ppm del auxiliar de coagulación aniónico M-590 (una poliácridamida hidrolizada); cama de lodos completamente desarrollada (grosor 24", 6-10 % de sólidos); una velocidad de flujo ascendente de cuando más 0.4 GPM/pie².

4.1.2.- Ahuachapán, El Salvador

En el Campo Geotérmico de Ahuachapán en El Salvador, Gustavo Cuellar¹², experimentó con un sistema para la disposición de la salmuera geotérmica del pozo Ahuachapán 1, la salmuera separada contiene 650 ppm de sílice y su temperatura promedio es de 95°C, en este sistema la salmuera pasa por un tanque de retención, una canaleta de 1.5 km y de ahí a una quebrada. El sistema tiene por objeto lograr la deposición de la sílice en un sitio de fácil limpieza (tanque de retención) y evitar que esta lo haga aguas abajo (canal); en la canaleta que originalmente conducía la salmuera del pozo Ahuachapán 1, se observaban incrustaciones con un espesor de 6 a 8 cm. En las condiciones experimentales se tiene que: con un flujo de 75 l/s, tiempo de retención en el tanque 45

minutos y duración de las pruebas de tres meses. Los resultados indican una pérdida de 25 ppm de sílice total en el tanque, una disminución de 220 ppm en la sílice monomérica y una depositación total en el tanque de aproximadamente 15 toneladas de sílice; además, se encontró que después de la retención del agua, el espesor de los depósitos de sílice en la canaleta se redujeron a 2 mm. En base a estos resultados se proyecta la construcción de un canal de 70 km de largo para conducir la salmuera al mar, esto con el fin de evitar la contaminación de áreas agrícolas y de aguas superficiales. Cuellar también reporta que se reinyecta salmuera a una temperatura de 150°C con resultados satisfactorios y menciona que se pretende reinyectar salmuera a temperaturas menores a los 100°C; lo cual, a las condiciones a las que se obtiene la salmuera después de la retención en el tanque, se considera que no tendrá éxito, debido a la gran cantidad de sílice coloidal presente en la salmuera. Nota: a la fecha de presentación de este trabajo, se descarga al Océano Pacífico el agua de desecho de la Central Geotérmica de Ahuachapán, por medio de un canal de 86 km de longitud¹¹.

4.1.3.- Wairakei y Broadlands, Nueva Zelanda

Las aguas de desecho de los Campos Geotérmicos de Wairakei y Broadlands en Nueva Zelanda, contienen cantidades apreciables de sílice (500 a 1000 g/ton) y arsénico (3 a 5 g/ton), con el fin de lograr su remoción. Rothbaum y Anderton²⁰ trabajaron en una planta piloto. El agua de descarga (temperatura = 90°C), fué primeramente "añejada" para permitir la polimerización de la sílice, como siguiente paso se agregó cal apagada, provocando con esto la precipitación de un gel floculento de silicato de calcio, el cual se separó

fácilmente en tanques de sedimentación. Investigaciones hechas por los autores muestran que la remoción de la sílice de aguas termales frescas requiere mayor cantidad de cal, que la necesaria para lograrlo en aguas que han sido "añejadas" por algunas horas y después recalentadas. Reportan que el tiempo requerido para el añejamiento de la salmuera de los pozos muestreados varía entre media y dos horas, además de que, el periodo de añejamiento está inversamente relacionado a la cantidad total de sílice inicial. Según los resultados obtenidos en la planta piloto, para producir un efuente estable en lo que a sílice se refiere, se necesitan agregar 700 g de cal por tonelada de salmuera, a un agua con cerca de 1000 g de sílice por tonelada de salmuera (pozo # 22 Broadlands; tiempo de añejamiento 1/2 hora).

4.1.4.- Otake, Japón

T. Yanagase y colaboradores²⁴, utilizaron en la Planta Geotermal de Otake Japón un tanque de retención con una serie de deflectores, para controlar los depósitos de sílice en las tuberías conductoras de agua caliente; se encontró que una hora de retención antes de descargar la salmuera a las tuberías, es suficiente para reducir la formación de depósitos. Este periodo permite el cambio del estado monomérico al amorfo que es sedimentable, de esta manera la sílice se deposita sobre la superficie de concreto de los tanques de retención. La salmuera de Otake contiene 1000 ppm de sólidos disueltos, de los cuales 350 ppm corresponden a sílice.

4.2.- En Cerro Prieto, sin uso de coagulantes

Fortunato Garibaldi¹⁸, efectuó pruebas de eliminación de sílice de la salmuera geotérmica de Cerro Prieto, utilizando un reactor-clarificador, sin la adición de productos químicos. Los resultados de las pruebas no fueron del todo satisfactorios porque en el mejor de los casos la descarga del clarificador contenía 170 ppm de sílice suspendida, con las condiciones de operación siguientes:

- a).- Tiempo de retención en el clarificador, 3.73 horas
- b).- Velocidad de flujo ascendente, 0.45 GPM/pie²
- c).- Cantidad de sílice total en la alimentación, 890 ppm
- d).- Temperatura de alimentación, 88°C
- e).- Temperatura de descarga, 78°C

4.3.- Selección del coagulante adecuado para la remoción de sílice en la salmuera de Cerro Prieto

Roberto Hurtado y colaboradores¹⁹, experimentaron a nivel laboratorio, para evaluar el efecto de agregar a la salmuera de Cerro Prieto, diversos floculantes comerciales. Los productos (de uso común en el tratamiento de aguas), fueron proporcionados por los fabricantes, a quienes se les informó del interés que se tenía para sedimentar la sílice de la salmuera geotérmica de Cerro Prieto. En vista de la gran

cantidad de productos disponibles. Se hizo una evaluación cualitativa de su poder floculante (preselección); una vez que se realizó lo anterior, se procedió a hacerla en forma cuantitativa. con los productos más prometedores en las pruebas de preselección, el procedimiento experimental fue el siguiente:

- a). - Se tomó una muestra de un litro de salmuera separada a la presión atmosférica y temperatura aproximada de 100°C, en un recipiente de plástico, el cual se colocó en un baño de temperatura (92 ± 2 °C).
- b). - Se dejó que la salmuera seque durante un periodo de 25 minutos para permitir la polimerización de la sílice disuelta, hasta alcanzar a formar partículas de tamaño coloidal.
- c). - Se agregó una dosis determinada de floculante y se agitó durante un periodo de 30 segundos al final del cual se homogenizó la solución.
- d). - Se permitió que la sílice sedimentara por un lapso de 20 minutos.
- e). - Finalmente se tomó una alícuota de la solución, en una zona cercana a la superficie, y se determinó el contenido de sólidos en suspensión, pH, temperatura y la sílice en solución.

En la siguiente tabla se muestra en forma comparativa el poder floculante de los productos que se evaluaron:

TABLA 3 Comparación del poder floculante de algunos compuestos comerciales, en función de las dosificaciones adicionadas.

FLOCULANTE	DOSIS (ppm)							
	2	5	10	20	40	60	80	100
	Sólidos Suspendedos (ppm)							
Cyanamid # 330	238	68	8	16	96	334	396	456
Nalco # 7144	484	360	202	60	48	52	64	66
Nalco # 7134	486	332	166	162	42	16	24	72
Betz # 1180	428	396	258	76	18	12	4	10
Betz (alúmina)	536	560	490	498	398	148	24	28
Cal (CaO)	496	442	358	252	186	58	46	46
Betz # 1285	452	406	286	194	178	140	128	122
Betz # 1115-L	344	330	318	472	312	300	240	330

Los resultados obtenidos indican que el producto Cyanamid # 330, es el que más fácilmente sedimenta la sílice, con una dosis de 10 ppm, se logró un nivel de sólidos suspendidos de 8 ppm. Los otros productos que funcionaron satisfactoriamente fueron el Betz # 1180 y el Nalco # 7134, sólo que con dosis bastante más elevadas. Desde el punto de vista económico es más atractivo usar Cal como floculante, puesto que su costo es de 40 a 50 veces menor; de la tabla anterior, se ve que 2 ppm de Cyanamid producen 68 ppm de sólidos suspendidos, mientras que el mismo nivel de sólidos se alcanza con 60 ppm de Cal (CaO), lo cual implica un costo tres veces menor. En vista de lo anterior, se recomienda continuar las pruebas de remoción de sílice con cal.

4.4.- Descripción del proceso seleccionado para Cerro Prieto

En base a los antecedentes mencionados, se estableció que el proceso de remoción de sílice para la salmuera geotérmica de Cerro Prieto, debería involucrar las siguientes etapas:

- 1.- Expansión y presión acústica de la salmuera descargada por la Planta de Evaporación Instantánea.
- 2.- Aferramiento de la salmuera en un tanque o canal de solimización cerrado, para permitir que la sílice monomérica condense hásta formar partículas de tamaño coloidal.
- 3.- Dosificación de flocculantes con mezclado rápido, para favorecer la coagulación (aglomeración) y precipitación de las partículas coloidales.
- 4.- Sedimentación de la sílice, para obtener una salmuera caliente clarificada con un nivel mínimo de sílice en suspensión.

La figura B muestra el diagrama de bloques del proceso.

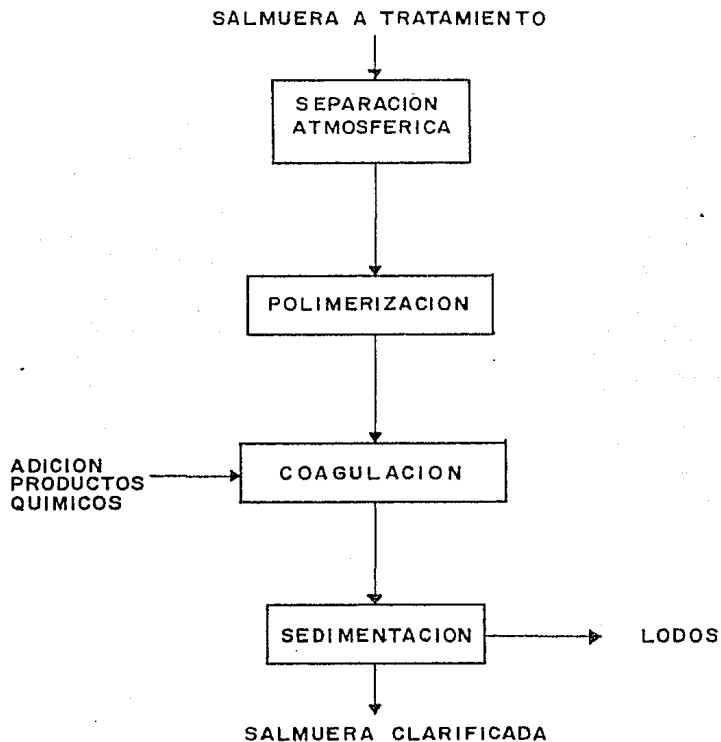


FIG. 8 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE REMOCION DE SILICE DE LA SALMUERA DE CERRO PRIETO SELECCIONADO PARA SU ESTUDIO.

CAPITULO S

PRUEBAS DE LABORATORIO

5.1.- Estudio de la cinética de polimerización en el agua separada del pozo M-101, " Pruebas de Botella"

5.1.1.- Objetivos

El proceso de remoción de la sílice que sobrecarga la salmuera geotérmica de Cerro Prieto, contempla una etapa en la cual se permite que la sílice monomérica en solución se acerque a su valor de equilibrio previamente a la adición del floculante (cal). El propósito de estas pruebas es el de determinar el valor de este periodo, al cual se le denomina "tiempo de añejamiento". El curso de la polimerización fue seguido mediante la determinación de la sílice monomérica, utilizando para ello el método del molibdato.

5.1.2.- Procedimiento

Se colocó a "Baño María" dentro de un recipiente de polietileno, un litro de salmuera obtenida del muestreador de arena (detalle # 17 en la figura 7), se tomaron alícuotas de 5 ml las cuales se vertieron en botellas previamente preparadas, que contenían 100 ml de agua destilada y desmineralizada; esto tenía como objeto detener la reacción de polimerización por un efecto de dilución. Las alícuotas se

baseado en la longitud de onda roja, durante los intervalos de muestreo variables, de aproximadamente dos minutos al inicio de la prueba y posteriormente conforme transcurre el proceso de polimerización. A la pipeta con que se tomaba la muestra se le cubría la punta con un pedazo de papel filtro sostenido con una liga, el propósito de este "adhesiveto" es evitar el paso de partículas o floculos de sílice amorfa y de esta manera determinar en el análisis, sólo sílice no polimerizada.

Durante el transcurso de las pruebas, se tomaron lecturas de temperatura y potencial hidrogeno de las muestras, las medidas de temperatura se hicieron con un termómetro digital electrónico (intervalo, 0 a 100°C), y las de pH con un medidor también digital. El medidor de pH se calibró previamente a cada prueba, en un intervalo de 7 a 10 unidades utilizando soluciones buffer.

Una vez terminada la prueba, se trasladaban las muestras al laboratorio, donde se mezclaban con la solución reactiva de ácido molibdato, según procedimiento y formulación de Hier (ver apéndice B). Después de ser mezclada la muestra con el ácido molibdato, se esperaba dos y medio minutos para permitir que se desarrollara el color amarillo característico del ácido silicomolibdato; una vez hecho esto se midió la absorbancia a 400 nm de longitud de onda utilizando un espectrofotómetro marca Bausch & Lomb (Spectronic 21). El espectrofotómetro se calibró a cero, con un blanco preparado con la solución de ácido molibdato y en lugar de la muestra agua destilada y desmineralizada; además, se utilizaron soluciones patrón de 10, 20, 30, 40 y 50 ppm de SiO₂ para construir la curva de calibración del espectrofotómetro. La calibración del aparato se repitió para cada prueba en particular.

La silice total fue determinada a partir de una muestra de 5 ml. tomada al inicio de las pruebas con una pipeta volumétrica la cual, convenientemente no tenía filtro en la punta. Los 5 ml. de salmuera se agregaron a 5 ml. de agua. En contenidos en una botella de polietileno la botella cerrada se sustragó durante 30 minutos en salmuera a 90°C. Esto con el fin de lograr la depositación de la silice. Posteriormente se agregaron 100 ml. de agua destilada y decalcificada y 5 ml. de ácido clorhídrico. En resultado esto las muestras se ensayaron por el procedimiento usual (método del molibdato). Es importante hacer notar, que al substituir el proceso de digestión de la silice en agua caliente, por el hecho de dejar que se llevara a cabo la digestión a temperatura ambiente durante 24 horas, los resultados igualmente satisfactorios, por lo que se eliminó la necesidad de calentar las muestras para pruebas subsiguientes.

5.1.3.- Presentación de los resultados

La concentración en ppm de silice monomérica en las muestras fue determinada a partir de los datos de absorbancia, por medio de la siguiente ecuación, en donde se consideran los efectos de dilución:

$$\text{ppm DE SILICE MONOMERICA EN LA SALMUERA} = (A/m) \times 21$$

donde: A = absorbancia de la muestra

m = pendiente de la curva de calibración

21 = factor de dilución

Para la silice total, la ecuación es:

$$\text{ppm DE SILICE TOTAL EN LA SALMUERA} = (A/m) \times 23$$

Donde A y m tienen el significado anterior, siendo D el nuevo factor de dilución.

En la figura 10, se presenta la curva de calibración del espectrofotómetro Spectronic 21. En las tablas 3 y 4 se muestran las condiciones y los resultados de las pruebas con 0, 10, 20 y 50 ppm de CaO, y en la figura 11 se presentan en forma gráfica.

5.1.4.- Interpretación de los resultados

En la representación gráfica de los resultados se visualiza lo siguiente: "al finalizar la prueba, entre mayor sea la cantidad de cal agregada, la cantidad de silice monomérica que permanece en solución será mayor". Con respecto a esto, Rocha²⁷ dice que "de acuerdo a la teoría general de la polimerización, las partículas más pequeñas se depolimerizan y agregan a las partículas de diámetro mayor, ya que estas tienen un mayor número de sitios activos. De igual forma el monómero se adhiere preferentemente a una partícula grande que a una pequeña. El ion hidroxilo cataliza la reacción de polimerización, por lo que si la cantidad de cal que se agrega es excesivamente grande, la formación de partículas es en un tiempo muy corto y alcanzan grandes tamaños, por lo que sedimentan fácilmente. La silice que resulta de la redisolución de las partículas pequeñas que no alcanzan a sedimentar, no encuentran partículas sobre las

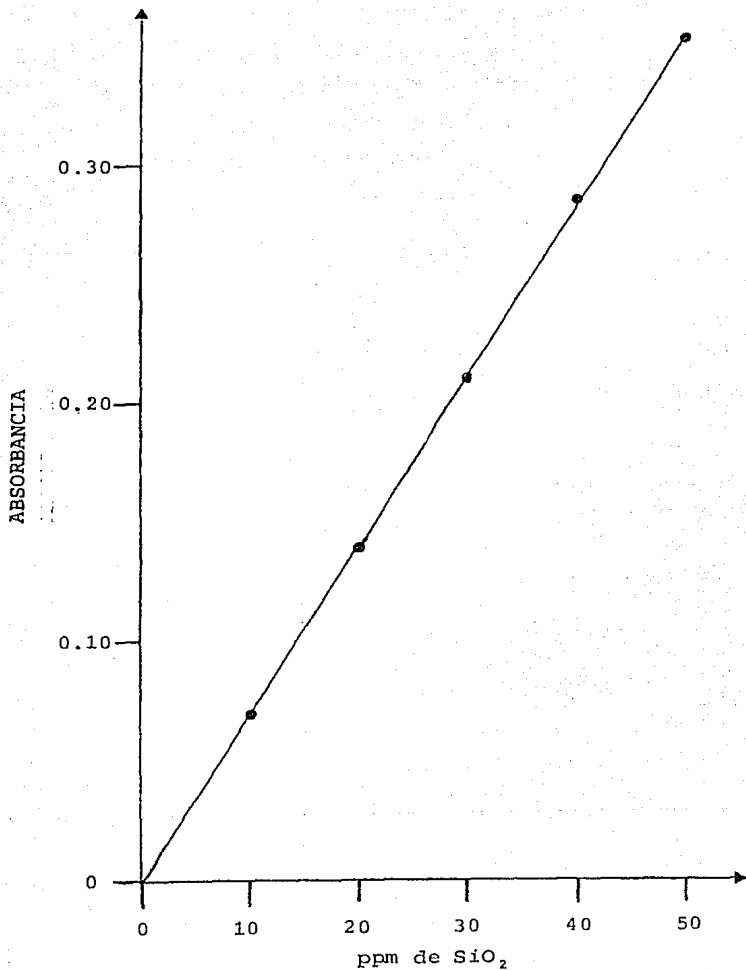


Figura 10. Curva típica de calibración para sílice del espectrofotómetro Spectronic 21.

Tabla 5: Presentación tabular de las condiciones en las pruebas cinéticas de polimerización del ácido monosilícico en el agua separada del pozo M-101.

	Prueba # 1	Prueba # 2	Prueba # 3	Prueba # 4
Fecha	18/III/82	24/III/82	22/III/82	23/III/82
Dosis de Cal como CaO (ppm)	0	10	25	50
Temperatura inicial de la muestra (°C)	90.4	90	90	90
Temperatura mínima de la muestra (°C)	90.4	90	90	90
Temperatura promedio de la muestra (°C)	91.1	90.8	91.2	90.5
pH inicial	7.00	7.70	7.98	8.03
pH final	7.33	7.65	7.82	8.11
Sílice total (ppm)	1152	1149	1150	1151
Absorbancia del patrón de:				
10 ppm SiO ₂	0.07*	0.07*	0.068*	0.07*
20 ppm SiO ₂	0.14*	0.14*	0.14*	0.141*
30 ppm SiO ₂	0.21*	0.21*	0.21*	0.211*
40 ppm SiO ₂	0.285	0.286	0.288	0.28
50 ppm SiO ₂	0.351	0.352	0.347	----

* Valores utilizados para calcular "m".

Tabla 6. Presentación tabular de los datos obtenidos en las pruebas de cinética de polimerización del ácido monosilícico en el agua separada del pozo M-101.

Prueba # 1				Prueba # 2				Prueba # 3				Prueba # 4			
A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
11	1.25	0.163	489	45	1.5	0.133	400	32	1.7	0.189	559	1	1.33	0.155	462
12	3.5	0.167	501*	46	4	0.128	386	33	3.5	0.134	396	2	3.27	0.148	441
13	5.75	0.125	375	47	6	0.127	383	34	5.25	0.132	390	3	5	0.140	417
14	8.67	0.123	369	48	8	0.125	376	35	8.33	0.128	378	4	8	0.139	414
15	10.58	0.123	369	49	10	0.123	369	36	10	0.126	372	5	9.92	0.138	411
16	15.5	0.122	366	50	15	0.122	367	37	15.8	0.125	370	6	15.25	0.138	411
17	20	0.123	369	51	20	0.120	362	38	20	0.124	367	7	20	0.138	411
18	30	0.122	366	52	30	0.119	358	39	30	0.123	364	8	30	0.138	411
19	40	0.121	363	53	40	0.118	354	40	40	0.122	361	9	40	0.138	411
20	60	0.114	342	54	60	0.116	350	41	60	0.122	361	10	60	0.135	402
44	4	0.126	380												

* Se observaron flóculos en la probeta.

NOTA: A = # de Muestra

B = Tiempo al que fué tomada la muestra (minutos)

C = Absorbancia a 400 nm

D = Concentración de SiO₂ monomérica (ppm)

REPRESENTACION GRAFICA DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE CINETICA DE POLIMERIZACION DEL ACIDO MONOSILICICO, EN LA SALMUERA DEL POZO M-101

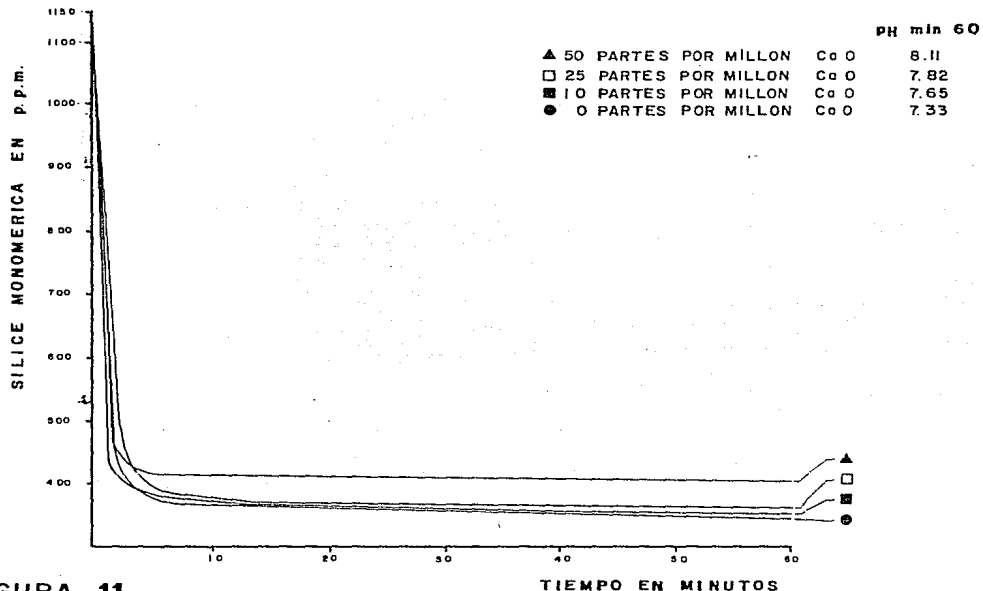


FIGURA 11

TIEMPO EN MINUTOS

tales condiciones, por lo que la velocidad de polimerización se reduce y el tiempo necesario para llegar al equilibrio se incrementa".

Este efecto podría tener otra explicación; la solubilidad de la sílice aparentemente se incrementa a un pH alto, debido a la formación del ion silicato en adición al monómero que está en equilibrio con la fase sólida. Como el ion silicato es instantáneamente convertido al monómero en solución ácida, tanto el monómero como el ion silicato se incluyen en la determinación de "sílice soluble" por el método del coloidal.

El efecto del pH sobre la solubilización de la sílice amorfa a temperaturas que van desde 0 a 200°C, fue medido por Cole¹⁷, y el resultado de su trabajo se muestra en la Figura 12. En dicha figura se agrega a manera de comparación, la curva que resulta al graficar los datos experimentales de la salmuera del peso 2701, correspondientes al último punto de cada una de las cuatro pruebas siempre igual a 60 minutos. Todas las curvas tienen la misma tendencia; la solubilidad permanece casi constante hasta cierto pH, a partir de ahí comienza a incrementarse. Como se ve en esta figura, a valores relativamente altos con respecto a la salmuera de Cerro Prieto, lo anterior puede explicarse en base a que este método se puede usar en el caso de la salmuera y en forma por supuesto un sistema químico hasta cierto punto complicado como la salmuera de Cerro Prieto, donde el hecho de que durante el curso de los experimentos los sustratos desprendan gases tales como CO₂ y H₂S, obliga a manejar la información que se el pH con cautela, siendo válida ciertamente pero solo como indicadora de una tendencia.

Es conveniente señalar que la validez de la interpretación

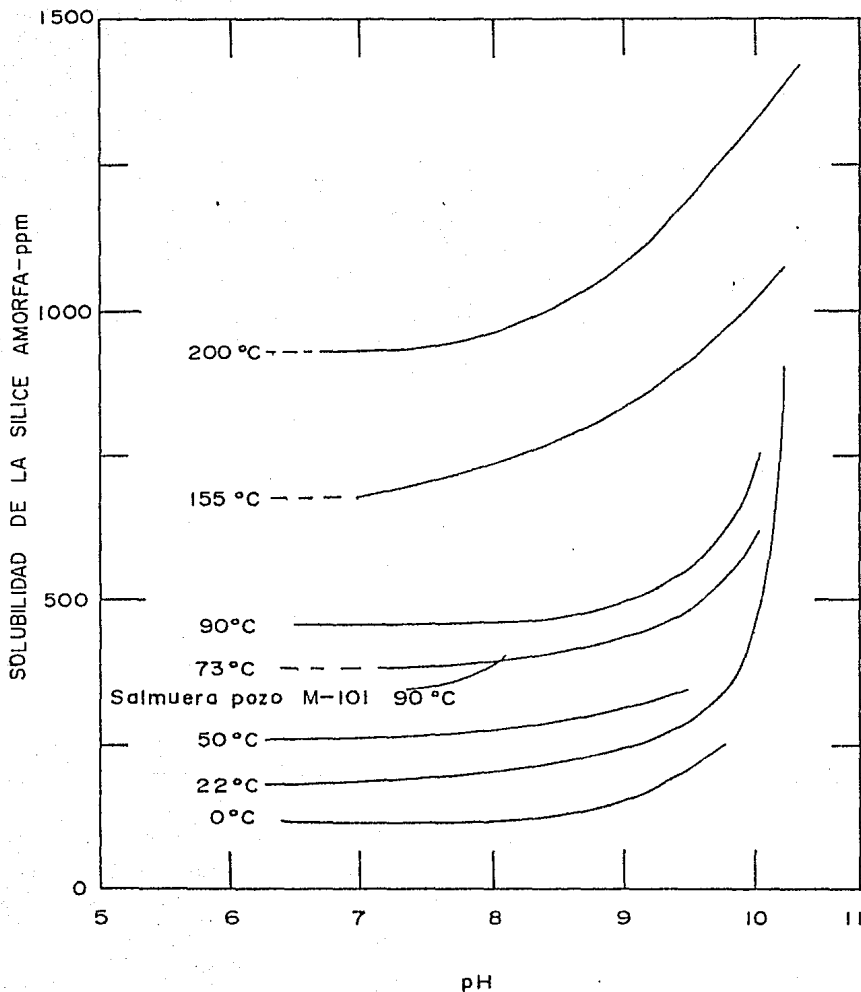


Figura 12. Solubilidad de la sílice amorfa vs. pH a diferentes temperaturas.

Varían de estos resultados depende en gran parte de las condiciones experimentales que se usen a cada una de estas temperaturas, ya que la solubilidad de la sílice cambia en relación dependiente de la misma. Fournier y Touret¹⁸ han establecido esta dependencia y los datos obtenidos se expresan en la siguiente ecuación:

$$\log C = (-731/T) + 4.52$$

Donde: C = concentración de sílice en ppm

T = temperatura en °K

De acuerdo a esta ecuación se obtiene lo siguiente:

TEMPERATURA °C	CONCENTRACION SiO ₂ ppm
85	310
90	321
95	342

En esta pequeña tabla se aprecia lo significativo que es la variación de la temperatura en la solubilidad de la sílice. Se ve claramente que si no controlamos, tendremos en este caso el efecto del pH. Se tuvo oportunidad de constatar experimentalmente este hecho, al realizar la prueba correspondiente a 10 ppm de CaO en dos ocasiones, a temperaturas de 85 y 90°C, aunque debe decirse que esta se hizo debido a una circunstancia fortuita; el día que se realizó la primera prueba con 10 ppm de CaO, existían grandes fríos, lo que provocó que la muestra obtenida en el laboratorio de arena tuviera una temperatura inicial menor que la de las otras pruebas de la serie (0, 25 y 50 ppm de CaO); al pri

Final de la prueba = 85.4. (La muestra extraída de la muestra
nada, a través de un tubo de vidrio, de la muestra realizada a
una tasa de 100 ppm de sílice, con la 100 ppm a 200 ppm)

5.1.5.- Conclusiones

Los procesos de coagulación demuestran que en las condiciones
operativas de la planta, el agua tratada con el H₂O₂, la
coagulación de sílice amnésica a sílice coloidal es rápida por
aproximadamente.

El aumento de la concentración al final del
experimento debido a la coagulación de sílice es debido
desde el punto de vista práctico. Durante este proceso se
que la coagulación de sílice ha sido superior del líquido. La
pequeña cantidad de sílice coloidal remanente en la muestra
probablemente se reducirá, al menos en parte.

Para el diseño del tanque de almacenamiento, bastará
dimensionarlo considerando un tiempo de retención de 10
minutos, para lograr la conversión total de la sílice
amnésica a coloidal.

5.2.- Estudio de la sedimentación de la sílice contenida en en el agua separada del pozo M-101, "Pruebas de Columna"

5.2.1.- Descripción de la experimentación realizada

El estudio de la sedimentación de la sílice se llevó a

como en las columnas de los sólidos suspendidos al tiempo como muestra el gráfico con los cilindros de vidrio, con un diámetro interior de 1.5 pulgadas; y una longitud de 25 pulgadas, se colocó en el tubo de vidrio de la columna, estando la primera toma en el fondo de la columna; el cuerpo de la columna estaba en contacto íntimo con una resistencia eléctrica, la cual tuvo como objeto mantener constante la temperatura de la columna durante la prueba de sedimentación o prueba de estabilidad, las corrientes se conectaron a la columna. Se vió los fillos de vidrio y la rotación de agitador accionado por un motor eléctrico para dispersar la sal (las esquemas de la columna se muestran en la figura 15).

El estudio consistió en determinar la concentración de sólidos suspendidos en sustrato tomada en determinados intervalos de tiempo o a cierta altura de la columna, la determinación de la concentración de sólidos suspendidos con aquí en altura 4.5.5 se hizo en términos de turbidez para detallar sobre turbididad en el apartado C)

Se realizaron pruebas con diferencias de sal de 10, 20, 10, 25 y 50 ppm de CaCl₂ con o sin tiempo de asentamiento, la columna se llenaba con salmuera estéril en el conductador de arena idónea B 15 en la figura 7; en cada prueba la cantidad de salmuera vacuado en la columna totalizaba 10 litros aproximadamente; el nivel inicial de salmuera en el tubo de vidrio debido a la parte superior de la columna, se invertían entre 2 y 3 minutos en llenar la columna, posteriormente se permitía que la salmuera se asentara durante 15 minutos cuando la prueba se repetía o si no era el caso se había tiempo de asentamiento; después se agregaba la dosis de sal y se agitaba la salmuera durante 3 minutos. Al término de este periodo se procedía a llenar la celda del turbidímetro

Los H₂O al aproximarse a las celdas de la columna, volti-
nicamente, el punto de ebullición, figura 11 y se determinan en
certíder. Posteriormente, los diferentes componentes en los
intervalos señalados en la figura 12 y E (en las figuras 13)
se está la representación gráfica de las curvas T y de
responderse, en la tabla 7 se presentan los datos obser-
vados al separar a diferentes alturas en cada intervalo de
tiempo. Durante las pruebas se midió la temperatura y el pH.

5.2.2.- Cálculo de la velocidad de flujo en el derrame a partir de datos de laboratorio. Considera- ciones teóricas

La relación entre la concentración de s.a. total y la
turbidez (NTU) se logra cuando las partículas que absorben
la luz presentan un solo tamaño o una gran semejanza de
tamaño²². Para la interpretación de los resultados, es
difícil establecer una correlación definitiva entre los H₂O
registrados y el contenido de s.a. en las muestras, ya que
para lograr toda la determinación de turbidez, s.a. total y
s.a. suspendida (s.a. + S.O. total + S.O. suspendida) debe
ser simultánea, y a la vez, con que se realicen las
muestras y determinaciones de laboratorio la alta cantidad
de sedimentación que presenta este sistema, por lo que los
resultados no obtenidos no se consideran muy confiables; un
modelo gravimétrico se usará más probablemente. Debido a
lo anterior, el carácter de series pruebas debería ser
estrictamente cualitativo, es, al variar la cantidad de
cal y el tiempo de calentamiento se indica a sí mismo la
cantidad de la muestra en lo que respecta a s.a. total,
como base que conforme aumentan los s.a. aumentar los H₂O
T₁₀ valores para de la de carácter cualitativo al análisis.

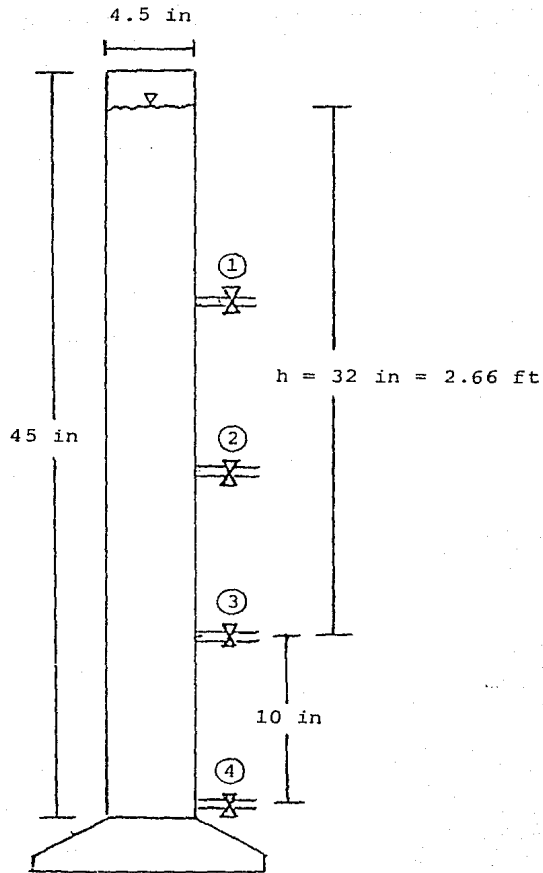


Figura 13. Detalle de la columna de sedimentación utilizada.

Tabla 7 Datos pruebas de columna para 0 minutos de añejamiento

Tiempo (minutos)	0 ppm CaO		10 ppm CaO		25 ppm CaO		50 ppm CaO	
	Temperatura NTU's :		Temperatura NTU's		Temperatura NTU's		Temperatura NTU's	
2	83.0	155	78.8	38	83.5	49	81.4	57
5	83.0	113	78.8	27	83.5	32	81.4	33
8	83.0	33	78.8	20	83.6	8	81.4	16
10	83.0	12	78.9	9	83.7	2.5	81.6	8
15	82.9	8	79.4	3.5	83.9	0.9	82.0	2.6
20	83.4	6.3	79.5	3.3	84.1	0.9	82.3	1.1
25	83.7	4.5	79.9	2.3	84.2	0.9	82.4	0.9
30	84.5	3.7	80.3	2.5	84.3	0.8	83.0	0.9
40	85.4	2.9	81.3	1.7	85.4	0.8	83.0	0.8
50	86.0	2.2	82.2	1.65	85.4	0.8	83.9	0.6
60	86.3	1.9	82.6	1.0	88.6	0.6	84.0	0.6
		pH = 7.75 24/marzo/82 $\bar{T} = 84 \text{ } ^\circ\text{C}$	pH = 7.89 25/marzo/82 $\bar{T} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$		pH = 8.19 26/marzo/82 $\bar{T} = 84.6 \text{ } ^\circ\text{C}$		pH = 8.28 29/marzo/82 $\bar{T} = 82.4 \text{ } ^\circ\text{C}$	

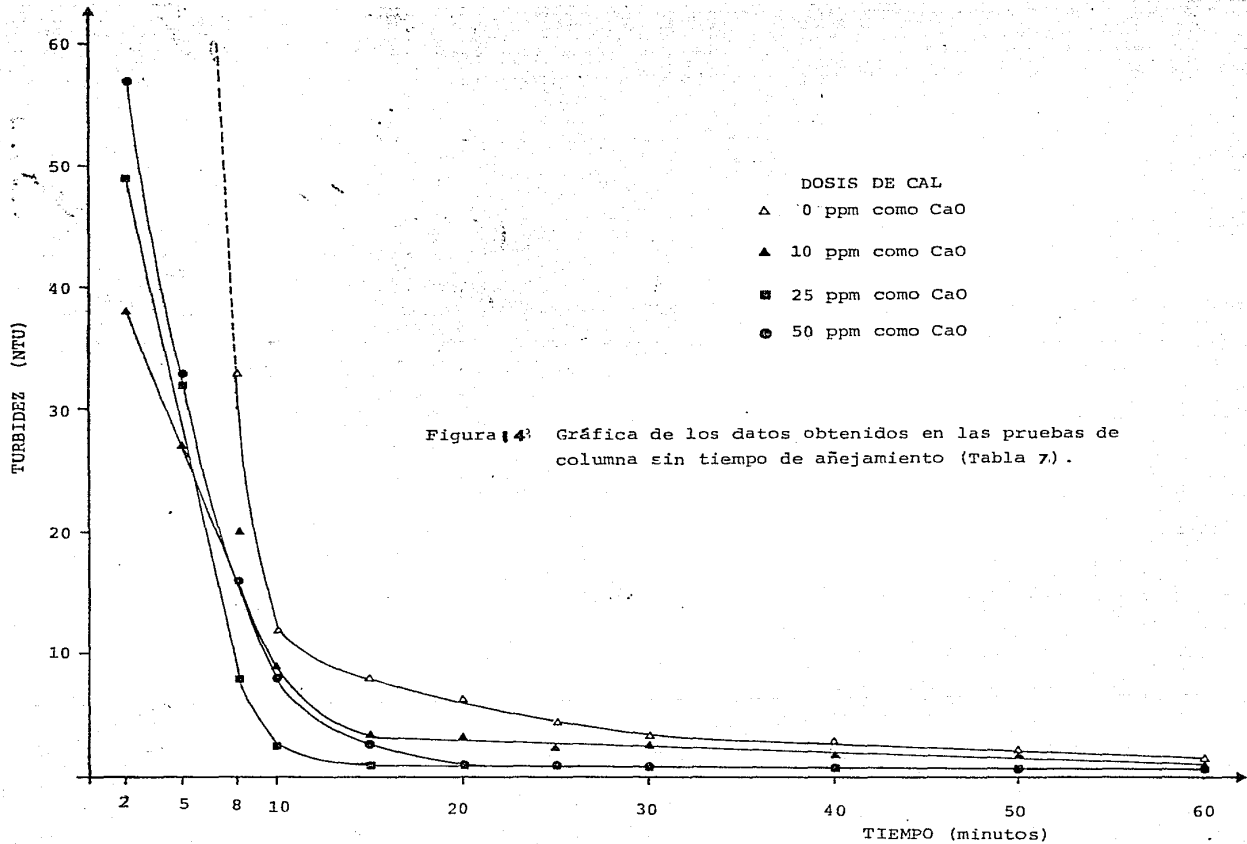


Tabla 8 Datos pruebas de columna para 15 minutos de añejamiento

Tiempo (minutos)	10 ppm CaO Temperatura NTU's		25 ppm CaO Temperatura NTU's		50 ppm CaO Temperatura NTU's	
3	78.7	40	79.0	56	79.9	35
5	78.9	30	79.6	45	81.2	26
8	79.0	10	79.8	18	81.8	13
10	79.4	6.5	79.7	6.3	81.1	10.8
15	79.6	2.0	80.0	5.6	82.6	4.2
20	80.1	1.7	80.1	1.2	83.9	2.8
25	80.5	1.8	80.5	1.3	83.7	1.7
30	80.6	1.8	80.8	1.3	84.1	1.3
40	81.4	1.6	81.1	1.3	82.6	1.0
50	82.0	1.4	81.9	1.3	82.3	0.7
60	82.7	1.2	82.7	1.3	82	0.5
	pH = 7.96 31/marzo/82 \bar{T} = 80.3 °C		pH = 8.33 1/abril/82 \bar{T} = 80.5 °C		pH = 8.46 2/abril/82 \bar{T} = 82.3 °C	

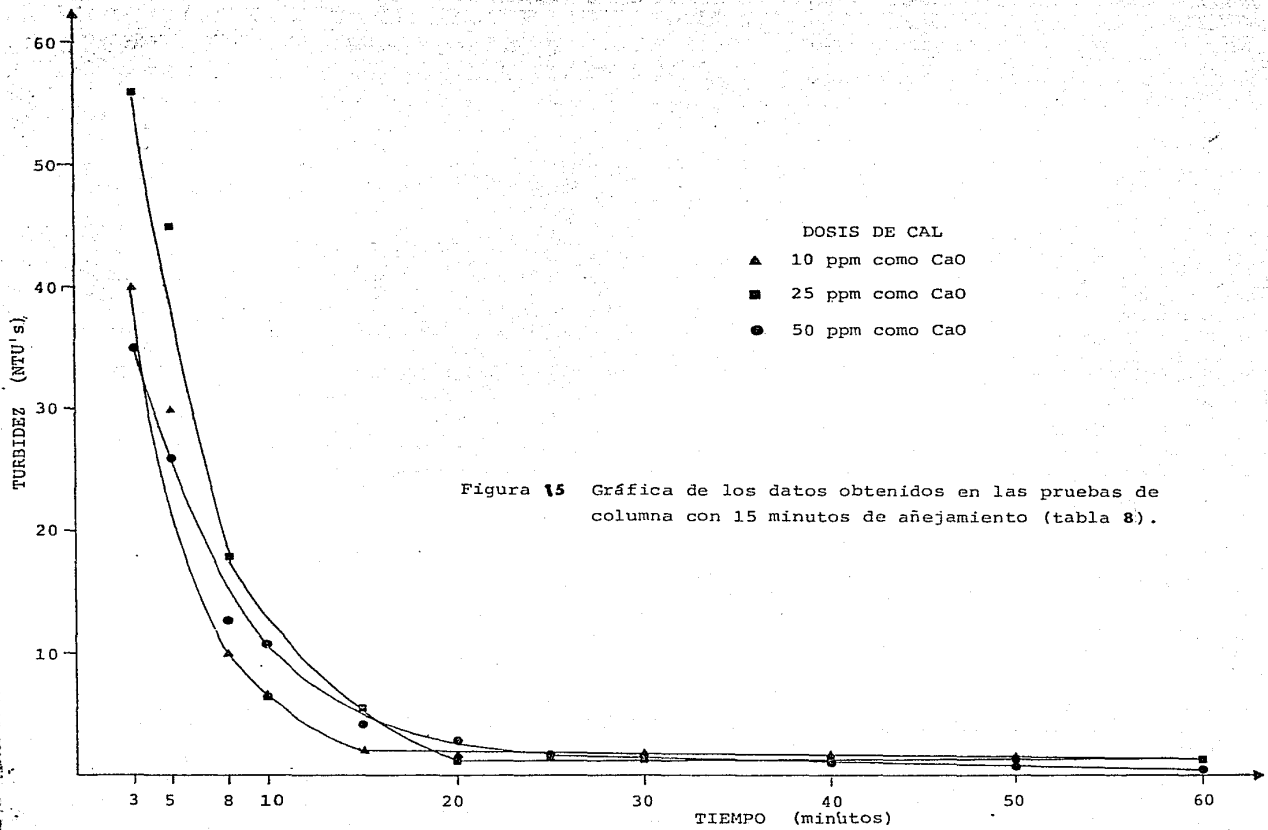


Tabla 9 Prueba de columna con toma de muestra a diferentes alturas para tratamiento de datos como sedimentación flocculante.

Tiempo (minutos)	h_3	Tiempo (minutos)	h_2	Tiempo (minutos)	h_1
5	44	6	50	7	44
10	11.7	11	11.5	12	11.5
15	3.9	16	2.9	17	2.8
20	1.3	21	1.2	22	1.3
30	1.1	31	1.1	32	1.1
40	1.1	41	1.2	42	1.0
50	1.1	51	1.1	52	1.3
60	1.1	61	1.1	62	1.1

Nota: h_1 = 12 pulgadas; h_2 = 22 pulgadas; h_3 = 32 pulgadas;
 Turbidez inicial = 56 NTU's; C_o = 1150 ppm de SiO_2 ;
 \bar{T} = 92 °C; dosis de CaO = 25 ppm; Tiempo de añejamiento = 15 minutos; Concentración de equilibrio = 361 ppm (dato tomado de las pruebas de botella).

Se suspende una columna líquida entre otros y las partes por
ción de sílice suspendida. De acuerdo en la descripción
microscópica experimental de que los flocculos formados en
silo, debido de la colisión presenten el mismo tamaño / además
en la sustentación reduce su que la sílice que habilita
la muestra de muestra de sílice coloidal / resulta de un
mecanismo de aglomeración flocculante²³.

Existen en la literatura métodos para la obtención de
la velocidad de flujo en el descenso a partir de los datos
obtenidos en pruebas de columnas^{3, 4, 24, 26, 29, 34}.

Según diversos autores, se reconocen tres tipos de
sedimentación dependiente de la naturaleza de los sólidos en
suspensión:

1.- Sedimentación discreta. Las partículas que
sedimentan conservan su individualidad, por lo tanto no se
agregan a otras partículas. En tal caso sus propiedades
físicas (tamaño, forma, gravedad específica) no cambian
durante el proceso. La sedimentación de la arena es un
ejemplo típico. Para el estudio de la sedimentación discreta
se requiere una columna con una llave de apertura variable¹⁴
y además un cronómetro^{14, 21}.

El procedimiento general es el siguiente: Al iniciar el
experimento se abre la llave y se toma una muestra
inicial (t=0), se detiene la agitación y se muestra a
intervalos sucesivos. Al graficar la fracción de partículas
remanentes contra la velocidad de asentamiento (m/t) produce
una curva similar a la figura 17.

2.- Sedimentación flocculante. La aglomeración de las

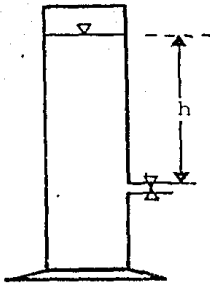


Figura 16 Aparato para el estudio de la sedimentación de partículas discretas

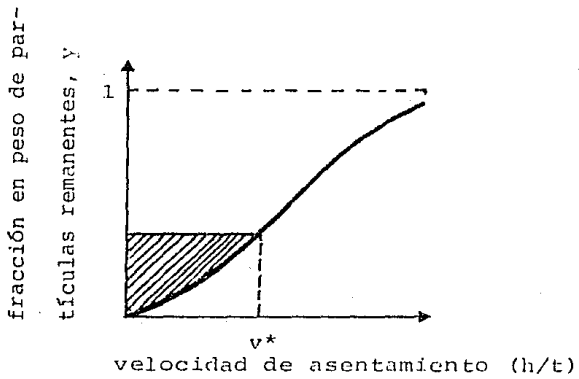


Figura 17 Perfil de la sedimentación discreta

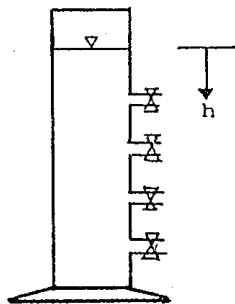


Figura 18 Aparato para pruebas de sedimentación floculante

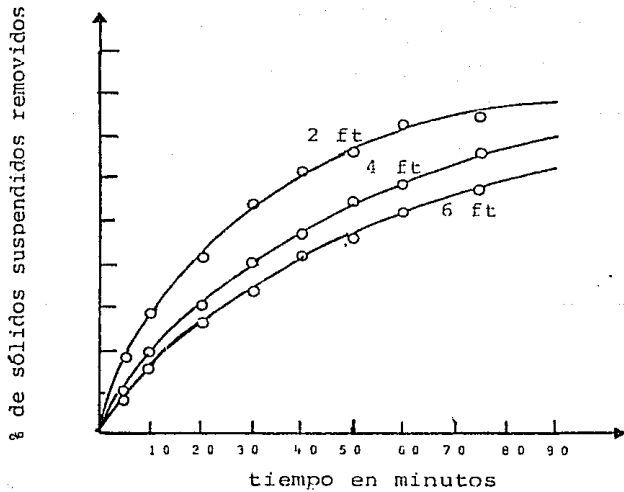
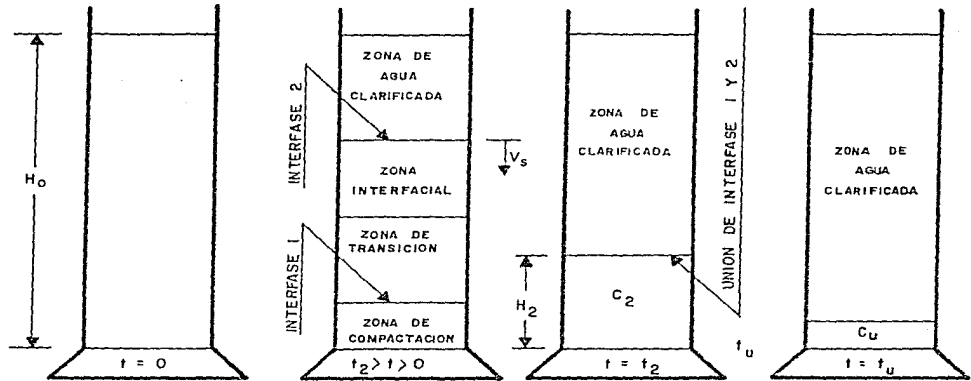


Figura 19 Sólidos suspendidos removidos vs tiempo para partículas floculantes

FIGURA 20 SEDIMENTACION ZONAL



CONCENTRACION DE LODOS
UNIFORME, C_0

COMIENZO DE LA
COMPACTACION

FIN DE LA
COMPACTACION

PROCESO DE CLARIFICACION

PROCESO DE ESPESAMIENTO

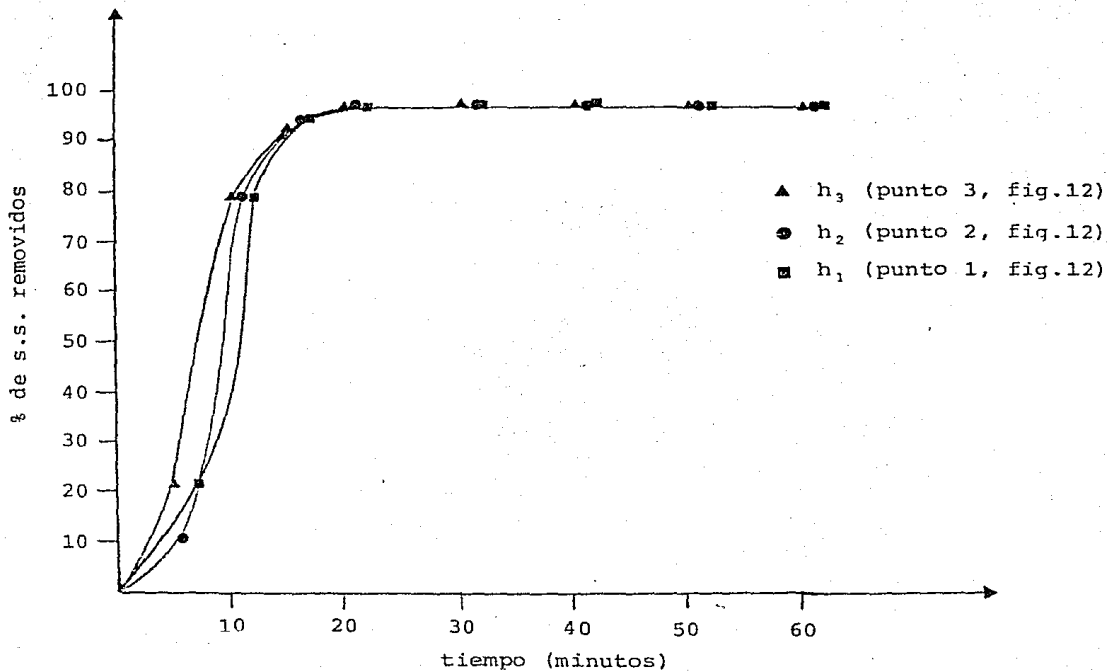
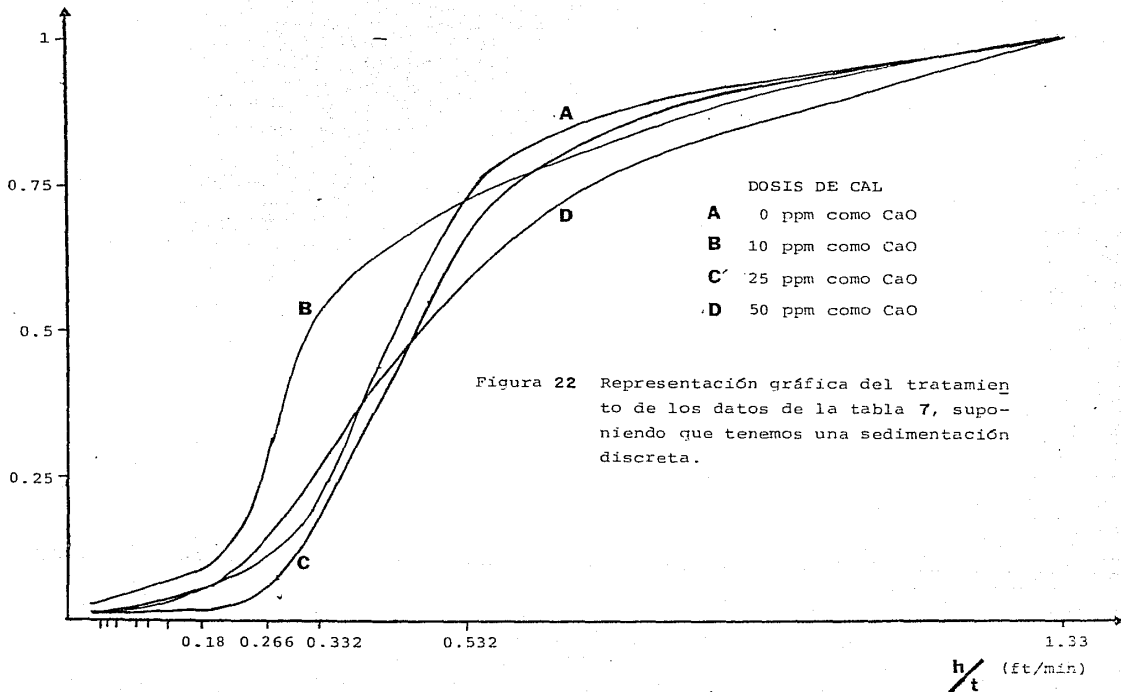


Figura 21 Representación gráfica del tratamiento de los datos de la tabla 9, suponiendo que tenemos una sedimentación flocculante.

$\frac{NTU(t)}{NTU(i)}$



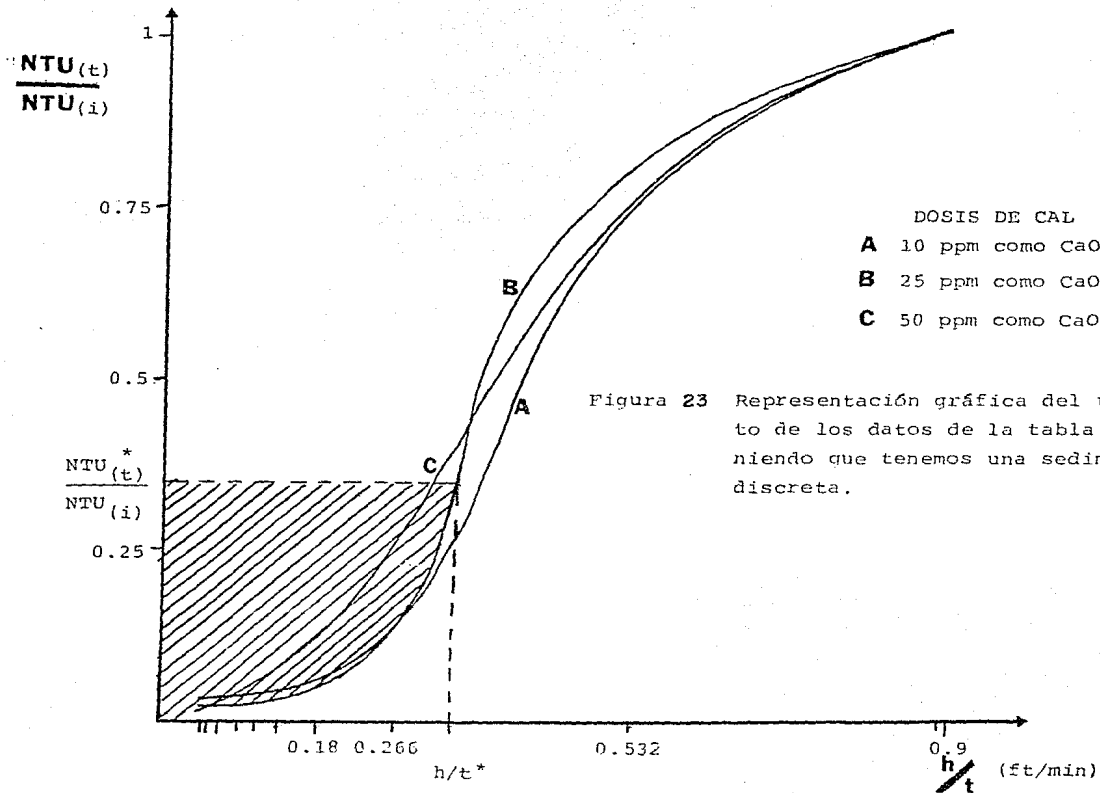


Figura 23 Representación gráfica del tratamiento de los datos de la tabla 8, suponiendo que tenemos una sedimentación discreta.

5.2.3.- Teoría de la sedimentación discreta

La sedimentación discreta, o sea la sedimentación de las partículas discretas en la ley de sedimentación está sujeta a la suposición de que las partículas, son esferas y son rígidas, es decir, siendo una partícula pesada, ésta se mueve hacia las fibras que la rodean por el efecto de la fuerza de atracción que ejerce sobre ella, por las fuerzas de cohesión que actúan entre las partículas por la fuerza friccional del fluido. Cuando una partícula se mueve, la partícula adquiere una velocidad de sedimentación constante. Hay tres velocidades, respecto de la partícula o velocidad de sedimentación de la partícula (a), resultante de las fuerzas de atracción: F_a , F_f , F_g , F_g es el peso efectivo de la partícula cuando está en la ley, un balance efectuado de las fuerzas:

Considerando la partícula en reposo, en la ley que la igual de velocidad de sedimentación, tenemos que F_g es el peso efectivo de la partícula cuando está en la ley, un balance efectuado de las fuerzas:

$$F_a = (\rho_p - \rho_f) g V \dots \dots \dots a$$

F_a es la fuerza de atracción ejercida que depende de la velocidad de sedimentación.

$$F_f = C_d A (\rho_f V^2 / 2) \dots \dots \dots b$$

- condes: ρ_p = densidad de la partícula
- ρ_f = densidad del fluido
- g = aceleración de la gravedad
- v = velocidad de la partícula, $1 \text{ cm}^2/\text{seg}$ de d
- d = diámetro de la partícula esférica

Una condición de equilibrio

se alcanza cuando las fuerzas que actúan sobre la partícula se equilibran, es decir, cuando la fuerza de gravedad es igual a la fuerza de arrastre.

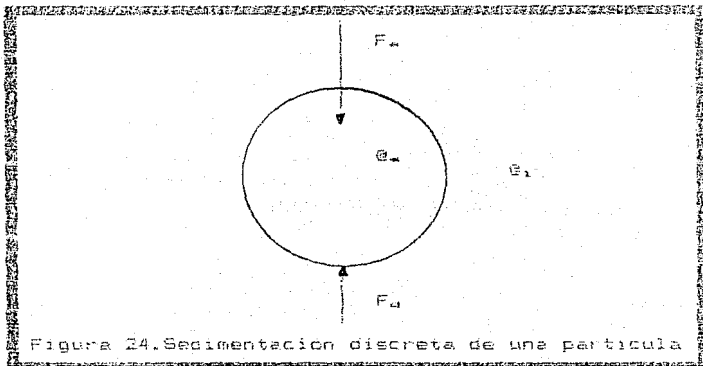


Figura 24. Sedimentación discreta de una partícula

Para la condición que define la velocidad terminal:

$$F_g - F_d = 0 \dots\dots\dots c$$

por lo que igualando los segundos miembros de las ecuaciones (a) y (c) se tiene:

$$(\rho_s - \rho_f) g v = C_d A (\rho_f V^2 / 2) \dots d$$

donde V = velocidad de asentamiento = V_s

Substituyendo en ecuación (d) V_s de la ecuación (b) y resolviendo para la velocidad terminal V_s , se tiene:

$$V_{cs} = 114.72 (g/\text{cm}^3) (S_{cs} - 0.1) (d_{cs})^{0.71} \quad (1)$$

La ecuación 1 se reduce para la ley de Newton de las partículas.

Para partículas grandes el coeficiente de arrastre en su relación con el número de Reynolds ($N_{Re} = dV_{cs}/\mu$).

N_{Re}	C_d
$N_{Re} < 0.1$	$24/N_{Re}$
$0.1 < N_{Re} < 1000$	$18.5/(N_{Re})^{0.72}$
$N_{Re} > 1000$	0.44

Como la sedimentación es un proceso de resaca, el propósito de conocer todas partículas que se deposita, las partículas son vertidas sobre un plano que se mueve con una velocidad crítica, pueden penetrar solamente a la parte superior y disminuir su propiedad de resaca y pueden experimentar una sedimentación en un plano que se mueve lo cual se conoce al coeficiente de resaca N_{Re} de la ecuación 1, quedando:

$$V_{cs} = (S_{cs} - 0.1) (18\mu) (gd)^{0.71} \quad (2) \text{ (Ley de Stokes)}$$

De la ecuación 2 se obtienen varias expresiones, algunas con respecto a la sedimentación de las partículas en la sedimentación de arena y limo.

Para el caso de limo y arena es un hecho afortunado la alta dependencia a la cual se refiere a la sedimentación, lo anterior se denominará a continuación, S_c en consideración con las S_1 , g y d , la velocidad de

de velocidad de sedimentación de las partículas de 10⁻⁵ a 10⁻⁶ m, se observó un comportamiento de sedimentación con la ley de Stokes, lo que indica que la viscosidad dinámica del líquido es la misma que la del agua, lo que permite aplicar la ecuación de sedimentación de Stokes:

$$\text{a } 25^{\circ}\text{C}, \mu = 9.14 \times 10^{-3} \text{ Kg}_{\text{f}}\text{-s/m}^2$$

$$\text{a } 95^{\circ}\text{C}, \mu = 3.05 \times 10^{-3} \text{ Kg}_{\text{f}}\text{-s/m}^2$$

Entonces:

$$V_{25^{\circ}\text{C}} = K/9.14 \times 10^{-3}$$

$$V_{95^{\circ}\text{C}} = K/3.05 \times 10^{-3}$$

$$V_{95^{\circ}\text{C}}/V_{25^{\circ}\text{C}} = \frac{9.14 \times 10^{-3}}{3.05 \times 10^{-3}} \approx 3$$

Como se ve la velocidad de sedimentación de tres veces mayor a 95°C que a 25°C, lo que en el aspecto práctico significa que la caída de temperatura en el sistema de reacción, deberá ser la mínima posible, la ecuación 2 también se aplicó para visualizar la influencia de la coagulación y de la floculación en el comportamiento de aguas limpias, la velocidad de la partícula es función del diámetro y la densidad de la partícula y de la viscosidad y densidad del líquido. En esta caso tiene el carácter de la densidad de la partícula puesto que cualquier sustancia la agrega con las partículas presentes para formar partículas mayores. En general la densidad de las partículas agregadas aumenta conforme se incrementa el diámetro puesto debido a la inclusión de agua en el floculo. El desarrollo de la densidad es extraordinariamente importante como se indica la ecuación 2, así por ejemplo un incremento de la densidad de 1 a 1.09,

significa salir de una zona de flujo y entrar a una zona de flujo de menor velocidad. En el caso de un flujo de agua que fluye hacia abajo en un tubo (Fig. 12.1), las partículas se van depositando en el fondo del tubo a medida que el agua se mueve hacia abajo. La velocidad de sedimentación es directamente proporcional al radio de la partícula y al gradiente de velocidad. La velocidad de sedimentación es directamente proporcional al radio de la partícula y al gradiente de velocidad.

5.2.4.- Concepto de tanque de sedimentación ideal

Este concepto desarrollado por Hazen y Lamp, es la base para el diseño de las instalaciones utilizadas en el diseño de los tanques de sedimentación. El modelo utilizado para un tanque de sedimentación consiste de cuatro zonas, véase las Fig. 15 y 16.

1.- Zona de entrada. Aquí el agua se mueve hacia abajo. En el fondo de esta zona se encuentra la línea vertical del tanque, las partículas se depositan uniformemente distribuidas a lo largo de la sección transversal del tanque.

2.- Zona de sedimentación. Las partículas se depositan en el fondo de la instalación una vez que están en el fondo de esta zona. Las partículas se depositan en el fondo de la instalación.

3.- Zona de salida. El agua se colecta aquí antes de ser enviada al siguiente tanque.

4.- Zona de lodos. Esta zona se diseña para la recolección de los lodos.

En la figura 15 se indican las velocidades de sedimentación.

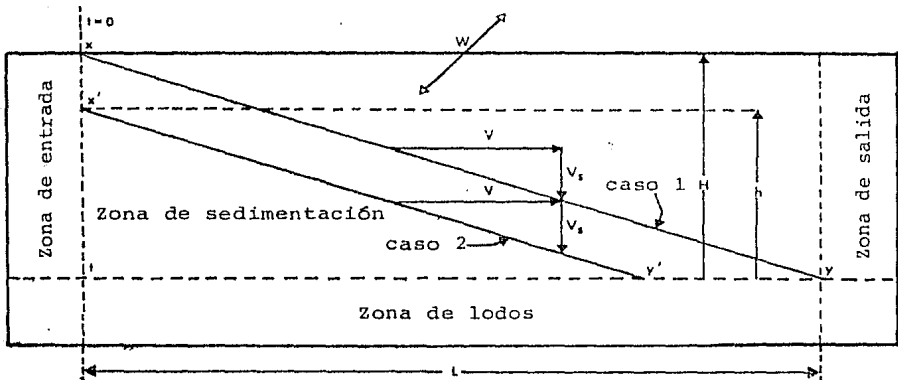


Figura 25 Modelo de un tanque de sedimentación con partículas de sedimentación discreta. (casos 1 y 2)

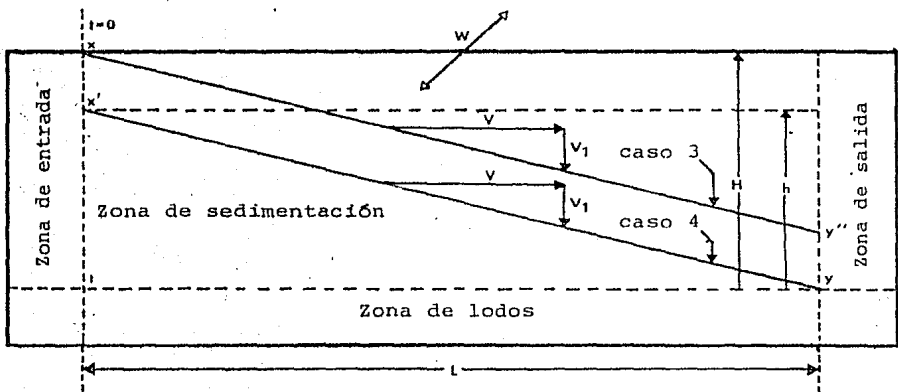


Figura 26 Modelo de un tanque de sedimentación con partículas de sedimentación discreta. (casos 3 y 4)

una partícula que se mueve a lo largo del eje horizontal en la dirección x . La distancia de la línea de $x = y = 0$ hacia $x = L$ (ver "Sección 1.1") denota x y como los puntos finales de esta partícula se relacionan de sedimentación en el resultado tipo de la zona de sedimentación vertical, Vector 1 y Vector 2 .

Vector 1 = Velocidad de flujo transversal V

$$V = Q/A' = Q/WH \dots\dots\dots 3$$

Donde: Q = Débito pie³/s

A' = área vertical transversal de la zona de sedimentación vertical de $A' = WH$, pie² (ver figura 23)

W = ancho de la zona de sedimentación, pie

H = profundidad de la zona de sedimentación, pie

Vector 2 = Velocidad de sedimentación individual, se denota por el vector V_u o el V_i en las figuras 23 y 24 respectivamente.

Para la sedimentación discreta, la velocidad de sedimentación es constante para cualquier trayectoria específica de sedimentación, o sea que V_u y V_i no varían a lo largo de una trayectoria específica. Pero se sabe que las partículas discretas no son portulacas por sus trayectorias, de tal manera que sedimentan con una velocidad uniforme que es función del diámetro de la partícula.

Para la sedimentación flocculante la situación es diferente. La figura 25 ilustra una trayectoria típica de sedimentación flocculante. El diámetro efectivo de la partícula de flocculencia aumenta al acercarse a las partículas

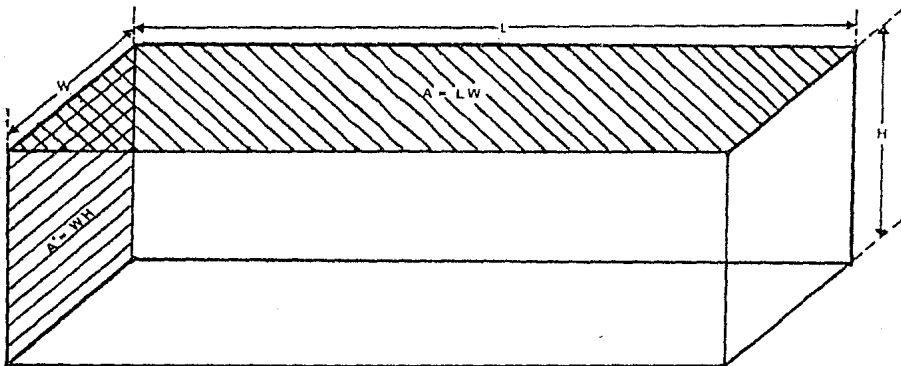


Figura 27 Geometría de la zona de sedimentación

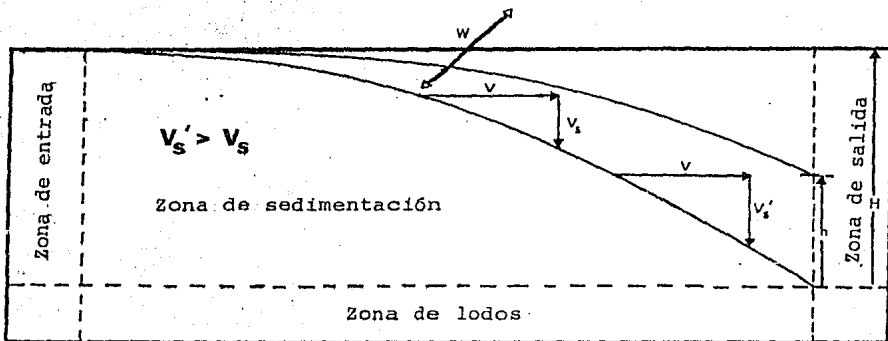


Figura 28 Modelo de un tanque de sedimentación con partículas de sedimentación floculante.

resulta: para $\alpha > 0$, tanto la velocidad de sedimentación V_s como la velocidad de sedimentación efectiva V_{se} que las partículas de sedimentación en un tubo se comparan con las velocidades de sedimentación efectiva.

Consideremos los siguientes casos con referencia a las figuras 25 y 26, suponiendo en cada caso una partícula de alguna muestra de la suspensión, una vez que toda el fondo de la zona de sedimentación.

Caso 1 (figura 25). Una partícula la cual al tiempo $t = 0$ se localiza en el punto x y posee una velocidad de sedimentación V_s con la correspondiente distancia d_s . Esta partícula es removida ya que toda el fondo de la zona de sedimentación en y (ver figura 25).

Caso 2 (figura 25). Una partícula que a $t = 0$ se localiza en x , dentro la misma línea vertical que x pero debajo de ella, y posee una velocidad de sedimentación V_s lo que produce que V_{se} . Esta partícula también es removida ya que toda el fondo de la zona de sedimentación a t (ver figura 25). Si la velocidad de sedimentación es tan grande que V_s , la partícula toda el fondo de la zona de sedimentación a t (ver figura 25). La figura 26 muestra el caso de partículas con un diámetro d_p en el cual las cuales están en movimiento de sedimentación V_s (ver figura 26). Estas partículas (26) muestran sedimentación en la figura. Las simplificaciones para evitar la sedimentación de partículas en el diagrama; como se puede ver en el diagrama con las partículas que poseen una velocidad de sedimentación V_s .

Caso 3 (figura 26). Una partícula que a $t = 0$ se localiza en x y posee una velocidad V_s (ver figura 26).

Una partícula de sedimentación que se mueva en el fondo del reactor de sedimentación (línea 1) se moverá sólo por debajo trayectoria de sedimentación (1').

Caso 4 (figura 26). Una partícula que sedimente de sedimentación V_1 (línea 1) al escapar al X_1 (línea 1'). Esta partícula se mueve de trayectoria de sedimentación (1').

Con respecto a la velocidad de sedimentación se tiene lo siguiente:

De la ecuación 4 $Q = VA' = VWH$ 4

Los triángulos semejantes en la figura 26 se tiene:

$$V = V_u (L/H) \quad \dots\dots\dots 5$$

Substituyendo 5 en 4, simplificando se tiene que:

$$Q = V_u LW = V_u A \quad \dots\dots\dots 6$$

donde $A = LW =$ sección transversal horizontal de la zona de sedimentación, (ver figura 27).

De la ecuación 6

$$V_u = Q/LW = Q/A \quad \dots\dots\dots 7$$

De la ecuación 7 se ve que la eficiencia de sedimentación es una función del área transversal horizontal, más que de la profundidad. Así en principio se debería utilizar tanques de sedimentación de gran área superficial y baja profundidad. Las únicas razones para utilizar una profundidad razonable son:

1.- Trácese la distribución del campo en el interior de las placas y adensarse en el eje central de ellas.

2.- Al suponerse que las placas en la actualidad se encuentran separadas de una distancia V_0 debe necesariamente haberse de dicho punto un campo de radiación de las partículas presentadas.

De la ecuación (1) se deduce que H es una del tipo $\frac{1}{r}$ y que V se eleva al tipo de la velocidad de escape.

Las dos premisas fundamentales en el campo en las placas son:

1.- Distribución uniforme de las partículas a lo largo de la sección transversal de entrada (por lo tanto a lo largo de la línea vertical AB).

2.- La suposición de que una partícula es considerada removida cuando alcanza el fondo de la zona de aceleración (línea horizontal BC).

Teniendo en mente estas premisas, se obtienen los siguientes resultados:

a) Todas las partículas con una velocidad de aceleración igual o más grande que V_0 son removidas.

b) Todas las partículas con una velocidad de aceleración menor que V_0 con una V_1 en la figura 1a) son removidas en una proporción $\frac{V_0 - V_1}{V_0}$ que la relación V_1/V_0 .

El líquido de suspensión de partículas sedimenta a una velocidad de las partículas V_1 y V_2 que son mayor y menor y menor parte del tiempo de sedimentación. Las partículas con velocidad V_1 que están en el momento t en la figura 10 se sedimentan con velocidad V_1 que tienen una profundidad x y en la figura 10a se sedimentan.

$$V_1/V_2 = h/H$$

Por ejemplo, si $h = 100$ pulgadas, y $H = 75$ pulgadas, entonces:

$$V_1/V_2 = 75/100 = 0.75$$

es decir, 75% de las partículas con una velocidad V_1 son removidas. Solo esas que están en el tiempo $t = x$ se encuentran en una altura x' a las 75 pulgadas. Las partículas removidas con una velocidad V_1 que son removidas a cualquier altura x y x' a $t = 0$, no son removidas.

La velocidad de flujo en el clarificador:

$$V_2 = Q/A = \text{pie}^3/\text{pie}^2\text{h} = \text{pie}/\text{h}$$

Se muestra como la velocidad de sedimentación V_1 de una partícula que sedimenta a través de una columna de clarificación igual a la profundidad efectiva del clarificador a paradas de retención. Este resultado se da a la ecuación del tiempo de retención:

t = tiempo de retención

t = volumen del tanque/Q = HA/Q

$$V = Q/A = LW$$

De la ecuación (6) deduce que h/t puede ser expresado en función de la velocidad de flujo V , donde $V_e = h/t$ es, por lo tanto, la velocidad de flujo en el drenaje. Entonces:

$$V_e = h/t = h/(hA/C) = Q/A \quad (\text{que es la ecuación 7})$$

La velocidad de drenaje V_e es el valor de la velocidad de flujo en el drenaje V .

$$V = V_e = Q/A = Q/WH$$

Es para lo cual las partículas predominantemente sedimentadas permanecen fijas.

5.2.5.-Cálculo de la velocidad de flujo en el drenaje. Modelo matemático.

Para el plano superior del drenaje se utilizará como ejemplo la curva B de la figura 13. De acuerdo con esto, para un valor h/t determinado en el pie de los drenajes, el cual se denominará h/t^* , se obtiene un valor de NTU_e^*/NTU , que corresponde a la fracción de partículas flotantes. Se sabe que la fracción $1 - (NTU_e^*/NTU)$ representa el resto que al h/t^* , ya para $h/t > h/t^*$, un sólido dado que tenga una velocidad de flujo en el drenaje igual a h/t^* se fracciona en partículas que serán retenidas y que arrojarán una velocidad media dependiente de la distribución de las mismas. En a sí mismo se obtiene la fracción de partículas retenidas $\epsilon(NTU_e^*/NTU)$, la fracción de partículas flotantes será $[(h/t)/(h/t^*)]^*$

$\frac{1}{2}(\text{NTU}_1/\text{NTU}_2)$, de los cuales los incrementos más altos se observaron en el punto $\frac{1}{2}(\text{NTU}_1/\text{NTU}_2) \rightarrow 0$. La curva obtenida se muestra en la figura 22, donde se observa que:

$$\frac{1}{2}(\text{NTU}_1/\text{NTU}_2)_{\text{total}} = 1 - \frac{\text{NTU}_2^*}{\text{NTU}_1} + \frac{1}{h/t^*} \int_0^{\frac{1}{2}(\text{NTU}_2^*/\text{NTU}_1)} \frac{1}{2}(\text{NTU}_1/\text{NTU}_2) d\left(\frac{1}{2}(\text{NTU}_1/\text{NTU}_2)\right)$$

La integral de la ecuación anterior se puede evaluar numéricamente, en la figura 22, la integración se realizó en el punto señalado por la ecuación de esta integral, lo que nos permite en los puntos 22 y 23 realizar el análisis de un modo más detallado respecto de ciertos experimentos.

5.2.6.-Conclusiones

Como se esperaba, para darle un mayor significado al análisis de la regeneración de las celdas de espuma, que es de tipo unidimensional, se realizó un estudio de suspensión, y con este fin se prepararon las curvas 22 y 23. La gráfica de las curvas mencionadas representa la relación de los valores experimentales obtenidos de los $\text{NTU}'s$ regenerados a un tiempo t^* dividido entre los $\text{NTU}'s$ regenerados en la primera muestra ($t = 0$), minutos, la abscisa h/t^* representa la velocidad de ascenso de la que se usó en el estudio de flujo en la celda (pie/min), donde h es la altura de la celda, que representa la regeneración en la columna de regeneración. En la figura 22, donde se muestra el análisis de ciertos

**TABLA 10. TRATAMIENTO DE DATOS DE SEDIMENTACION SEGUN SECCION 5.2.5.
RESUMEN DE LOS CALCULOS: 15 MINUTOS DE AÑEJAMIENTO.**

h / t *	10 ppm			25 ppm			50 ppm		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0.72 ft/min 0' 5.34 Gal/(min)(ft ²)	0.08	0.375	45.5	0.066	0.353	41.9	0.08	0.341	42.1
0.534 ft/min 0' 3.96 Gal/(min)(ft ²)	0.253	0.265	51.8	0.193	0.275	46.8	0.253	0.234	48.7
0.42 ft/min 0' 3.16 Gal/(min)(ft ²)	0.406	0.19	59.6	0.35	0.203	55.3	0.43	0.151	58.1
0.33 ft/min 0' 2.45 Gal/(min)(ft ²)	0.76	0.051	81.1	0.7	0.076	77.6	0.62	0.08	70.0
0.264 ft/min 0' 1.95 Gal/(min)(ft ²)	0.863	0.022	88.5	0.877	0.023	90.0	0.74	0.045	78.5
0.1347 ft/min 0' 1 Gal/(min)(ft ²)	0.956	D ESP.	95.6	0.97	D ESP.	97.0	0.924	0.006	93.0

NOTA: A = FRACCION DE PARTICULAS CON VELOCIDAD MAYOR QUE LA CRITICA
 B = VALOR DE LA INTEGRAL
 C = PORCENTAJE TOTAL DE REMOCION
 h/t* = VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO = VELOCIDAD DE FLUJO EN EL DERRAME

**TABLA II TRATAMIENTO DE DATOS DE SEDIMENTACION SEGUN SECCION 5.2.5.
RESUMEN DE LOS CALCULOS: 0 MINUTOS DE AÑEJAMIENTO.**

h/t *	0 ppm			10 ppm			25 ppm			50 ppm		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0.072 ff/min	0.133	0.354	48.7	0.183	0.267	45.0	0.166	0.40	56.6	0.243	0.301	54.4
0.534 ff/min	0.28	0.266	54.6	0.28	0.209	48.9	0.346	0.25	59.6	0.423	0.195	61.8
0.42 ff/min	0.553	0.136	68.9	0.37	0.167	53.7	0.62	0.123	74.3	0.58	0.122	70.2
0.33 ff/min	0.803	0.045	84.8	0.484	0.125	60.9	0.838	0.042	88.0	0.749	0.058	80.7
0.264 ff/min	0.895	0.017	91.2	0.743	0.047	79.0	0.946	0.01	95.6	0.863	0.025	88.8
0.1347 ff/min	0.962	0.002	96.4	0.933	0.003	93.6	0.987	DESP.	98.7	0.969	0.001	97.0

NOTA: A = FRACCION DE PARTICULAS CON VELOCIDAD MAYOR QUE LA CRITICA

B = VALOR DE LA INTEGRAL

C = PORCENTAJE TOTAL DE REMOCION

h/t^* = VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO = VELOCIDAD DE FLUJO EN EL DERRAME

El valor de los NTU's de este tipo de agua es de 100 NTU's. El agua de este tipo, al ser tratada con 100 NTU's de cloro, se reduce a 10 NTU's. El agua de este tipo, al ser tratada con 100 NTU's de cloro, se reduce a 10 NTU's. El agua de este tipo, al ser tratada con 100 NTU's de cloro, se reduce a 10 NTU's.

0 MINUTOS DE AREJAMIENTO	
0 ppm de CaO	111.0 ppm de SiO ₂
10 ppm de CaO	87.6 ppm de SiO ₂
20 ppm de CaO	15.5 ppm de SiO ₂
50 ppm de CaO	18.0 ppm de SiO ₂

15 MINUTOS DE AREJAMIENTO	
10 ppm de CaO	29.7 ppm de SiO ₂
25 ppm de CaO	20.7 ppm de SiO ₂
50 ppm de CaO	45.7 ppm de SiO ₂

Segun se ve en las tablas adjuntas, el agua de este tipo, al ser tratada con 100 NTU's de cloro, se reduce a 10 NTU's. El agua de este tipo, al ser tratada con 100 NTU's de cloro, se reduce a 10 NTU's. El agua de este tipo, al ser tratada con 100 NTU's de cloro, se reduce a 10 NTU's.

El agua de este tipo, al ser tratada con 100 NTU's de cloro, se reduce a 10 NTU's. El agua de este tipo, al ser tratada con 100 NTU's de cloro, se reduce a 10 NTU's. El agua de este tipo, al ser tratada con 100 NTU's de cloro, se reduce a 10 NTU's.

CAPITULO 6

PRUEBAS EN PLANTA PILOTO

6.1.- Descripción del proceso

Como se demostró en las pruebas de cinética de polimerización de la sílice (pruebas de botella), la conversión de la sílice monomérica a sílice coloidal es rápida; pero la remoción de la sílice coloidal de la salmuera por coagulación y asentamiento, sin agregar reactivos químicos, es lenta e incompleta, además de antieconómica a los valores industriales comunes de velocidad de flujo en el derrame (según las pruebas de columna). Por lo anterior, la tarea principal del tratamiento que se utilice para lograr que la salmuera sea adecuada para reinyección, es inducir una rápida coagulación e incrementar la velocidad de asentamiento. Como la salmuera de Cerro Prieto contiene una cantidad sustancial de calcio, se recomienda elevar el pH como una de las formas más sencillas para lograr una coagulación rápida.

La figura 29 presenta el arreglo y disposición de los equipos que conforman la planta piloto en la que se experimentó el proceso de remoción de sílice de la salmuera geotérmica de Cerro Prieto. Las letras y números entre paréntesis en la siguiente explicación se refieren a la figura mencionada.

La salmuera utilizada en las pruebas de planta piloto proviene del separador primario del pozo M-101 (detalle 3 en la figura 9), de ahí pasa a un separador secundario (no

EQUIPOS

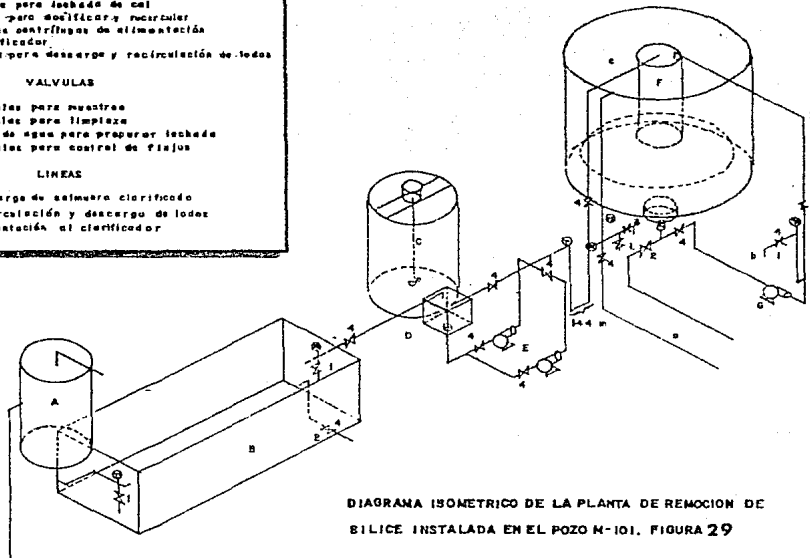
- A Separador atmosférico
- B Tanque de almacenamiento
- C Tanque para lavado de cal
- D Caja para soldadura recircular
- E Bomba centrífuga de alimentación
- F Clarificador
- G Bomba para descarga y recirculación de lodos

VALVULAS

- 1 válvulas para muestras
- 2 válvulas para limpieza
- 3 toma de agua para preparar lechada
- 4 válvulas para control de flujo

LINEAS

- a Descarga de salmuera clarificada
- b Recirculación y descarga de lodos
- c Alimentación al clarificador



**DIAGRAMA ISOMETRICO DE LA PLANTA DE REMOCION DE
BILICE INSTALADA EN EL POZO M-101, FIGURA 29**

ilustrado) el cual entrega la salmuera a 130 °C, posteriormente la salmuera se alimenta al separador atmosférico de la planta piloto (A), el añejamiento de la salmuera siguiente paso del tratamiento, se lleva a cabo en el tanque de añejamiento (B). Como se menciona en el capítulo 4, el añejamiento de la salmuera ha sido probado en Ahuachapan, Broadlands, Otake y Wairakei, los efectos prácticos encontrados son:

1.- El añejamiento decrece en gran parte la velocidad de formación de incrustaciones; las incrustaciones formadas son mucho más blandas y fáciles de remover que las producidas por salmueras no añejadas.

2.- El añejamiento de la salmuera tiene el efecto de aumentar el tamaño de la sílica coloidal.

Este último efecto es el que se busca principalmente en Cerro Prieto, ya que en general las partículas más grandes de sílice coagulan mejor. Una vez añejada, la salmuera pasa al cajón dosificador (D) en donde coagula al agregarse la lechada de cal proveniente del tanque de lechada (C) alimentada por medio de una bomba (no ilustrada); el proceso de coagulación es rápido y ocurre en segundos después de agregar el coagulante a la salmuera; por esta razón, se requiere mezclado intenso en el punto de aplicación del coagulante para asegurar la distribución uniforme del mismo y así exponer a las partículas de sílice coloidal existentes en la salmuera a la acción de la cal; el mezclado intenso se realiza en el interior de las bombas centrífugas de alimentación (E); la línea (c) conduce la salmuera al equipo principal de la planta piloto, el clarificador (F) en donde la mayor parte de la sílice es removida; la sílice coagulada deja el clarificador por la línea (b) en forma de un lodo

diluido, el cual consiste principalmente de salmuera, a pesar de esto, el lodo contiene la mayor parte de la sílice coagulada y representa solo una pequeña parte del flujo a través del clarificador. La salmuera clarificada sale del sistema por la línea (a), lista para reinyectarse o para un tratamiento posterior, dependiendo esto último del criterio de inyectabilidad.

6.2.- Descripción y capacidad del equipo

Para determinar la velocidad de flujo en el derrame (V.F.D.), tiempo de retención (T.R.) y tiempo de afojamiento (T.A.), que son algunos de los parámetros más importantes que se buscan, se debe conocer el valor numérico de las dimensiones de los equipos, ya que:

$$V.F.D. = \frac{\text{GASTO DE ALIMENTACION}}{\text{AREA DE SEDIMENTACION DEL CLARIFICADOR}}$$

$$V.F.D. = Q_a/A_a \quad [=] \text{ gal/min-pie}^2 \quad \dots\dots\dots 8$$

$$T.R. = \frac{\text{VOLUMEN DEL CLARIFICADOR}}{\text{GASTO DE ALIMENTACION}}$$

$$T.R. = V_c/Q_a \quad [=] \text{ pie}^3/(\text{pie}^3/\text{min}) \quad [=] \text{ min.} \dots\dots 9$$

$$T.A. = \frac{\text{VOLUMEN EFECTIVO DEL TANQUE DE AREJAMIENTO}}{\text{GASTO DE ALIMENTACION}}$$

$$T.A. = V_{T.A.}/Q_a \quad [=] \text{ min} \quad \dots\dots\dots 10$$

6.2.1.-Separador atmosférico

Es un tanque cilíndrico construido de acero al carbón, con un diámetro de 23.5 pulgadas y una altura de 45 pulgadas. Se alimenta salmuera a una presión aproximada de 22 psig, el separador la entrega a una temperatura de 100 °C aproximadamente. El vapor formado al expandirse la salmuera, se descarga a la atmósfera por la parte superior del separador y la salmuera pasa por gravedad al tanque de añejamiento.

6.2.2.- Tanque de añejamiento

Consiste de un tanque rectangular de placa de acero al carbón, con un espesor de 3/16 de pulgada. Las dimensiones del tanque son: altura (H), 32 pulgadas; longitud (L), 118 pulgadas; ancho (W), 42 pulgadas. La descarga del tanque de añejamiento se localiza a una altura (H') de 16 pulgadas, ver figura 30.

Para el cálculo del volumen efectivo del tanque de añejamiento ($V_{r.a.}$) se tiene:

$$V_{r.a.} = H'WL = (16 \times 42 \times 118) / 12^3 = 46.5 \text{ pies}^3 = 1.32 \text{ m}^3$$

Para evitar el corto circuito del flujo, el tanque de añejamiento está provisto de cinco mamparas deflectoras. El arreglo de las mamparas se muestra en la vista de planta del tanque incluida en la figura 30. La tapa del tanque es removible para facilitar la limpieza, está revestido con pintura anticorrosiva y aislado térmicamente con placas de

fibra de vidrio de 1.5 pulgadas de espesor.

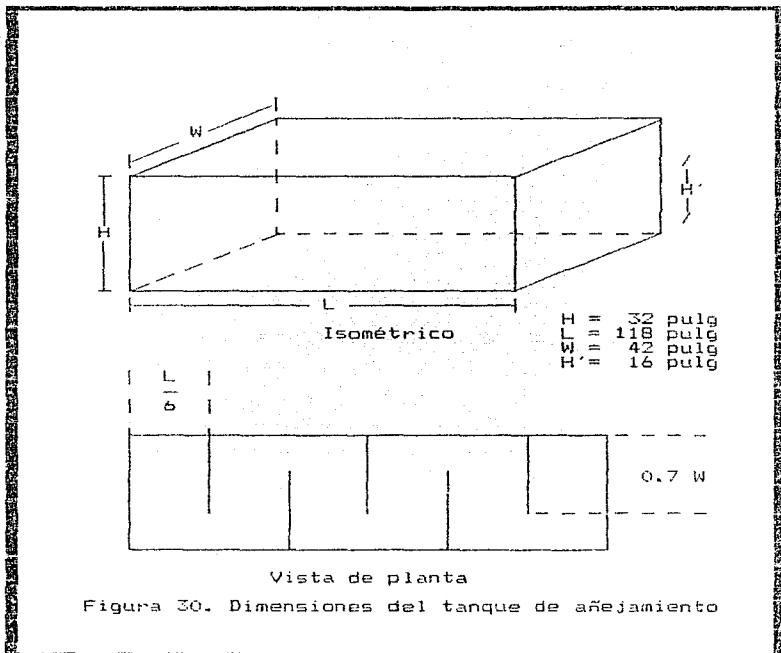


Figura 30. Dimensiones del tanque de añejamiento

6.2.3.- Tanque para preparar lechada

Para preparar la lechada de cal, se utilizó un tanque de polietileno de alta densidad, con un diametro de 35 pulgadas y altura de 49 pulgadas, siendo su volumen 773

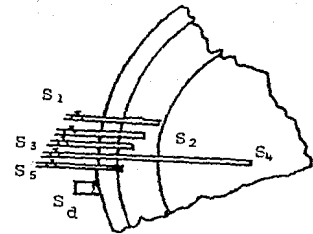
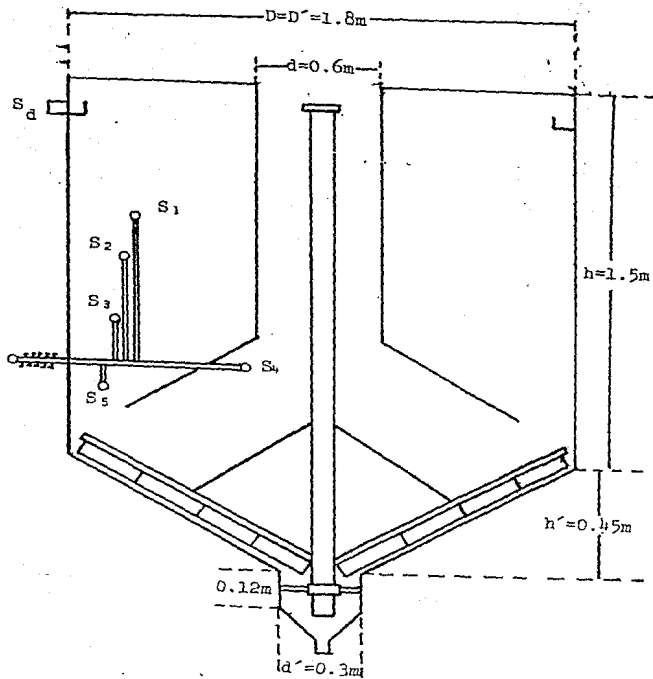
litros. El tanque está provisto de un agitador accionado por un motor de 173 r.p.m. y 1050 r.p.m. Para la dosificación de la cal se empleó inicialmente una bomba dosificadora con una capacidad máxima de 250 ml/min, pero debido a problemas con los empaques se substituyó con una bomba centrífuga de 0.25 H.P.

6.2.4.- Bombas de alimentación

Para alimentar la salmuera al clarificador, se cuenta con dos bombas centrífugas de 1750 r.p.m. y 1.25 H.P.. Las bombas se conectan en paralelo y sólo trabaja una a la vez, la otra se instala como respaldo.

6.2.5.- Sedimentador-clarificador

En la figura 31 se muestra una sección transversal del sedimentador, este es un tanque fabricado en acero al carbono y consta fundamentalmente de dos secciones; la superior que es cilíndrica y la inferior que tiene la forma de un cono trunco invertido. Si se consideran las dimensiones indicadas en la figura 31, y que para un cilindro $V_1 = \pi d^2 h/4$, y para un cono trunco $V_2 = \pi h'(D^2 + Dd' + d'^2)/12$; el volumen del clarificador es de $4.28 \text{ m}^3 = 151.2 \text{ pies}^3$. Para calcular la velocidad de flujo en el clarificador se requiere conocer el área efectiva de sedimentación (ecuación 8), esta es el área superficial del tanque, a la que se le resta el área del poro de alimentación. Referenciando a la figura 31a, el área de sedimentación es. $A_m = \pi(D^2 - d^2) = 2.26 \text{ m}^2 = 24.33 \text{ pies}^2$.



Detalle de la localización de los muestreadores (vista en planta)

Símbolo	Descripción
S_d	Descarga salmuera clarificada
S_1	Muestreador uno
S_2	Muestreador dos
S_3	Muestreador tres
S_4	Muestreador cuatro
S_5	Muestreador cinco

Figura 31. Sección transversal del sedimentador-clarificador



El clarificador está provisto de cinco auestroscopos para determinar sólidos y/o sólidos suspendidos en las diversas zonas que se indican en la figura 31. En la misma figura se detallan los raseros de barra del mecanismo de arrastre de lodos. El equipo se aisla con placas de fibra de vidrio de 1.5 pulgadas de espesor.

6.2.6.- Bomba de lodos

Es una bomba de desplazamiento positivo y flujo variable, accionada por un motor de 1 H.P. y 1725 r.p.m., con una capacidad de cero a veintidós galones por minuto.

6.3.- Control operativo

Para el debido control del proceso y para para obtener los parámetros básicos de diseño de la planta industrial, se debe conocer fundamentalmente lo siguiente:

PARAMETROCORRIENTE

GASTO.....	LECHADA DE CAL . DESCARGA DE SALMUERA . DESCARGA DE LODOS
SILICE TOTAL.....	DESCARGA DE SALMUERA . ENTRADA TANQUE AÑEJAMIENTO . SALIDA TANQUE AÑEJAMIENTO
SILICE MONOMERICA.....	DESCARGA DE SALMUERA . ENTRADA TANQUE AÑEJAMIENTO . SALIDA TANQUE AÑEJAMIENTO
PORCENTAJE SOLIDOS.....	EN LODOS
TURBIDEZ.....	DESCARGA DE SALMUERA . ENTRADA TANQUE AÑEJAMIENTO . SALIDA TANQUE AÑEJAMIENTO . MUESTREADOR S1,S2,S3,S4,S5
TEMPERATURA.....	ENT. TANQ. AÑEJ. (T1) . SAL. TANQ. AÑEJ. (T2) . DESC. SALMUERA (T3)
CONCENTRACION CaO.....	TANQUE DE LECHADA

En la figura 32 se detallan los puntos y parámetros de muestreo, durante la operación de la planta piloto.

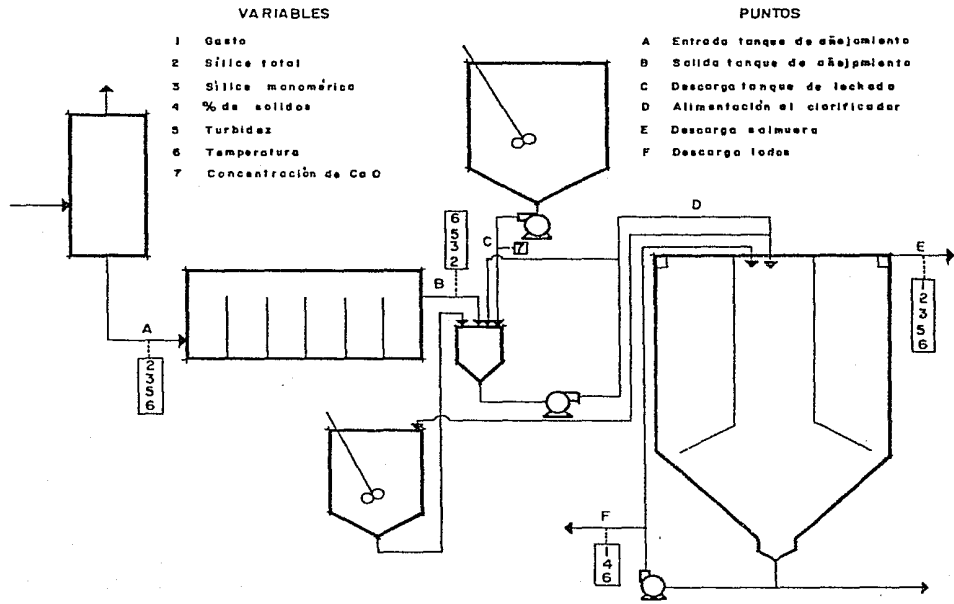


FIGURA 32

PUNTOS DE MUESTREO DURANTE LA OPERACION DE LA PLANTA PILOTO (CONTROL OPERATIVO).

6.3.1.- Frecuencia de las lecturas

La frecuencia de las lecturas vario durante la experimentación en la planta piloto, la variación se debió a que conforme se adquiría experiencia se encontró lo siguiente:

1.- Se ratifico como se suponía que algunos valores permanecían constantes (ejemplo Si_1 , Si_2 , silice monomérica).

2.- Las mediciones de turbidez en Si_1 , Si_2 , Si_3 y Si_4 desestabilizaban el proceso.

3.- Algunas mediciones consumían mucho tiempo en relación a la frecuencia de muestreo originalmente programada (por ejemplo silice total y monomérica).

6.3.2.- Procedimientos utilizados para la medición de las variables

<u>VARIABLE</u>	<u>PROCEDIMIENTO</u>
GASTO DE SALMUERA	CUBETEO, CON CRONOMETRO Y TANQUE DE 200 LITROS AFORADO A 50 Y 100 LITROS.
GASTO DE LODOS	CUBETEO, CON CRONOMETRO Y PROBETA DE 1000 ml.
GASTO DE LECHADA	CUBETEO, CRONOMETRO Y PROBETA DE 200 ml

SILICE MONOMERICA	VER SECCION 5.1.2
SILICE TOTAL	VER SECCION 5.1.2
TURBIDEZ	NEFELOMETRICO
CONCENTRACION CaD	a) DETERMINANDO CALCIO b) GRAVIMETRICO
% SOLIDOS EN LODOS	DESCRITO A CONTINUACION.....

Para determinar el porcentaje de solidos en los lodos, de la prueba I a la 4 se utilizó el siguiente procedimiento: se determinó la gravedad específica de los lodos, utilizando un picnómetro para tomar la muestra y para pesarla se contó con una balanza marca Dial-O-gram de la compañía OHAUS con capacidad máxima de 510 gramos y equipada con un sistema de Vernier que permite pesar hasta centésimas de gramo. A continuación se desglosan las consideraciones utilizadas hasta llegar a la ecuación II, en donde solo es necesario sustituir el peso del picnómetro con los lodos para obtener el porcentaje de solidos.

Se tiene que:

$$I.- \quad \% \text{ de sólidos} = \frac{\text{masa sílice}}{\text{masa SiO}_2 + \text{masa salmuera}} \times 100$$

y se cuenta con las siguientes relaciones...

$$II.- \quad \text{volumen efectivo del picnómetro} = 24.8 \text{ ml} =$$

(determinado experimentalmente)

= volumen de salmuera + volumen de sílice

III.- densidad de la sílice amorfa = 2.2 g/cm³

IV.- peso picnómetro + peso sílice + peso salmuera = A

V.- peso del picnómetro = 20.3 g = constante

Manipulando algebraicamente lo anterior queda la siguiente ecuación para el porcentaje de sólidos en los lodos:

$$\% \text{ de sólidos} = \frac{54.56 @_{\text{salmuera}} - 2.2 A + 44.66}{(@_{\text{salmuera}} - 2.2)(A - 20.3)} \times 100 \dots\dots 11$$

La anterior determinación se realizó en la planta piloto (pruebas 1 a 4); para las pruebas 5 a 13, se tomaron muestras de lodos y se determinaron gravimétricamente en el Laboratorio Químico del Instituto de Investigaciones Eléctricas en Cuernavaca.

6.4.- Presentación y comentarios de los resultados de la operación de la planta piloto.

Se realizaron 13 pruebas con un tiempo de operación total de 176.3 horas. En la tabla 13 se resumen los

LITERAL	DESCRIPCION
A	Fecha, (1952)
B	Hora de inicio de la alimentación al sistema
C	Duración total de la prueba, en horas
D	Duración del muestreo, en horas
E	Dosis promedio de cal, como CaO en ppm
F	Flujo promedio de salmuera clarificada, en ton/h
G	Flujo promedio de los lodos, en ton/h
H	Por ciento en peso promedio de sólidos en los lodos
I	Velocidad promedio de flujo en el derrame, gal/min-pie ²
J	Tiempo de residencia en el clarificador, en minutos
K	Tiempo promedio de añejamiento, en minutos
L	Temperatura de la salmuera clarificada
M	Sílice suspendida promedio en la descarga, en ppm

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
prueba 1	may 5 10 am	29	25	76	3.07	0.173	1.59	0.59	79	24.5	91	15.0	
prueba 2	may 11 9 am	37	34	29.0	3.21	0.181	1.41	0.61	76	23.0	91	22.0	
prueba 3	may 12 #	17	17	78	3.31	0.161	2.33	0.63	74	23.0	92	21.6	
prueba 4	jun 14 12 am	19	—	27	5.50	—	—	1.00	47	14.0	94	52.0	
prueba 5	nov 16 10 am	6.5	3.5	100	4.50	0.380	0.88	0.88	59	16.0	93	30.0	
prueba 6	nov 17 9 am	6	4	100	3.70	0.350	0.57	0.73	63	19.5	91	24.0	
prueba 7	nov 18 10 am	7	5	15	3.30	0.150	0.36	0.62	74	23.0	91	20.0	
prueba 8	nov 22 9 am	6	6	15	3.30	0.140	0.36	0.62	74	23.0	92	36.0	
prueba 9	nov 24 9 am	6	4	15	3.50	0.220	0.50	0.67	69	15.0	93	41.0	
prueba 10	nov 25 10 am	5	3	30	3.30	0.250	0.42	0.64	72	22.0	92	27.0	
prueba 11	dic 2 9 am	18	7.5	15 30	3.10	0.130	1.15	0.59	78	24.0	92	24.0 24.0	
prueba 12	dic 7 12 am	26	23.5	30 20 30	3.40	0.190	2.00	0.65	72	22.0	92	23.0 20.0 25.0	

TABLA 12.- RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN PLANTA PILOTO

* CONTINUO DE P.2

El tipo de sedimentos, los cuales son de tipo arcilloso y arenoso, con la presencia de granos de los cuales dependen y clasifican para cada una de las dos pruebas. Los comentarios no proceden en separarlos de cada prueba, se dan para referirse al criterio utilizado al escoger los parámetros que se emplean en el diseño preliminar de las equipos capítulo 7. El punto 9 son variables que constituyen el registro de los datos obtenidos para cada una de las pruebas de control, que en esta oportunidad se presentan gráficamente como se ve adelante.

6.4.1.- Prueba # 1, figura 33

Lo más relevante de esta prueba fue que al suspender la dosificación de cal de la hora 18 a la 22, se detectó un notable aumento en la turbidez del efluente; al reanudar la dosificación la turbidez disminuyó e los niveles bajaron. En las horas 4 y 5 la dosificación de cal alcanzó su punto mínimo, lo que se evidenció en la turbidez de la salmuera en las horas 6 y 7, que fue 6.1 y 5.8 NTU's respectivamente, contra un promedio general de 2.7 NTU's, sin contar en el promedio los NTU's a la hora 1 (inicio de la prueba) y los de las horas 18 a 22 (sin dosificación de cal).

Esta tendencia de aumento de la turbidez (horas 6 y 7), pudo también deberse a una suspensión de lodos extra, y por ello se eleva el costo de lodos en las horas 6, 7 y 8; como se observa en la figura 33, la turbidez tendió a bajar de la hora 8 a la 10. Turbidez mínima alcanzada 1.5 NTU's, hora 10, turbidez máxima 6.2 NTU's, hora 6. Temperatura a la entrada del caudal de sulfato de sodio 101 °C, a la salida 96 °C.

PRUEBA No. I

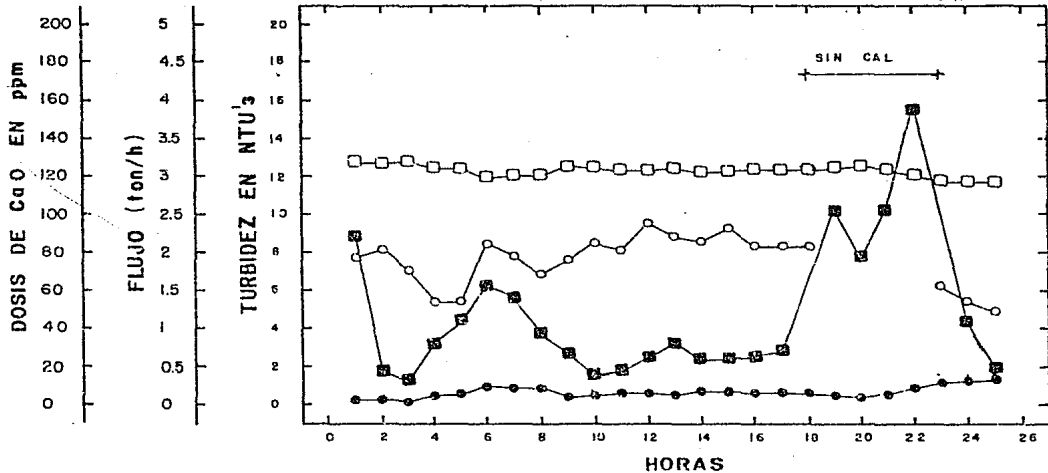


figura 33

5-6 DE MAYO, 1982

6.4.2.- Prueba # 2, figura 34

En esta prueba se tuvo especial cuidado en la colocación en el silo hotel a la entrada y salida del tanque de enfriamiento, así al fin de desarrollar la cantidad de salita que quedase en esta; los resultados indican que alrededor del 25% de la salita que entra, permanece en el tanque de enfriamiento, esto es, de cada 100 g de salita que contiene una libreta de coladera, se quedan aproximadamente 24 g en el tanque. Además se demostró que la salita que sobrepasa la salueta sale totalmente polimorfizada, hecho que era de esperarse, porque los 22 minutos de enfriamiento que se dan en este caso, equivalen a los 10 minutos requeridos para la polimerización según las condiciones de las pruebas de solubilidad (capítulo 3).

Tanto en esta prueba como en la 1 y 3, se realizaron con profusión muestras para determinar turbidez en S_1 , S_2 , S_3 , S_4 y S_5 , y como se pensó que esto pudiera interferir en el proceso de sedimentación, mediante las turbidencias provocadas al abrir las válvulas para purgar y tomar la muestra, se disminuyeron las determinaciones de turbidez en esos puntos a partir de la prueba 2. Probablemente debido a lo anteriormente explicado, se observa que el registro de turbidez de la salueta clarificada, con una de las más rápidas de la serie de pruebas, por hora 20, a la hora 25 se optó por desear el momento que ocurre al bastardo de toda, para observar qué efecto tendría en el proceso (ver prueba # 3). La turbidez máxima registrada fue 1.7 NTU's, a la hora 25; turbidez máxima fue 3 NTU's, hora 26; turbidez promedio fue 1.8 NTU's. Temperatura de entrada al tanque de enfriamiento 101 °C, en la salida 98 °C.

PRUEBA No. 2

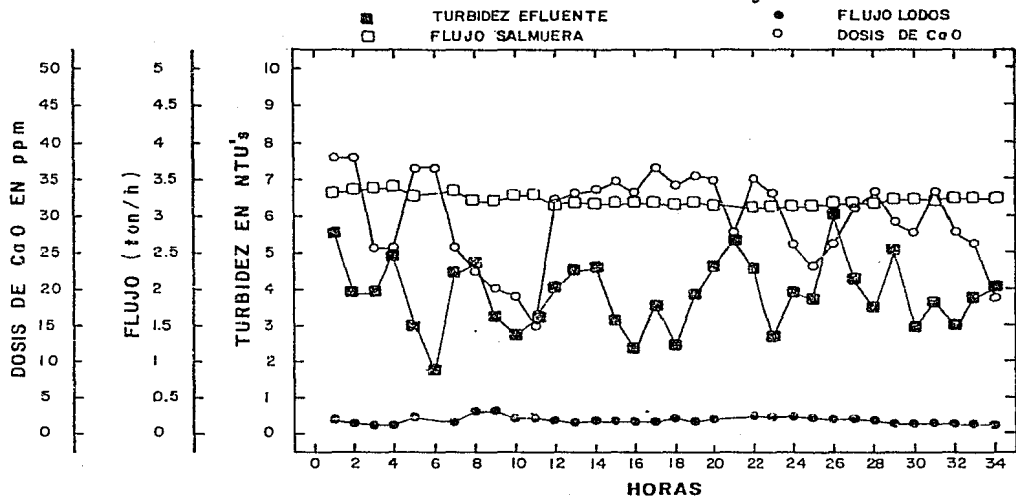


figura 34

11-12 DE MAYO, 1982

6.4.3.- Prueba # 3, figura 35

En esta prueba, la turbidez de la salmuera aumenta una tendencia a disminuir a partir de la hora 5, alcanzando un máximo de 10.1 NTU's a la hora 7, para ya bajar en la prueba 11, se mantuvo de arriba de todos en momentos de prueba, y una persona que se encontraba en la sala y que se estaba enterado de que los hechos se producían, al investigar el porqué de este aumento en la turbidez, se dio cuenta de que el mecanismo estaba apagado y lo hizo funcionar, detectándose una sensible disminución de la turbidez a lo siguiente adicional. A partir de la hora 11, se aumentan los gases de entrada y de salida, y se observa un aumento en la turbidez de la salmuera, siendo un promedio de 14.0 NTU's para las horas 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17), contra un promedio de 7 NTU's (horas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11), se concluye las horas 4 y 7 en base a lo que se explicó sobre el mecanismo de arrastre de lodos. Temperatura en la entrada del reactor polimerizado 30° C, a la salida 26° C. Turbidez máxima alcanzada 21.4 NTU's, hora 17; turbidez mínima 5.1 NTU's, hora 17 (incluyendo horas 4 y 7); turbidez promedio 8.5 NTU's (incluyendo horas 4 y 7).

6.4.4- Prueba # 4

El caudero durante la realización de esta prueba fue irregular, es por ello que no se presentará gráfica ni tablas de los datos, la irregularidad de la turbidez de la infusión se debió a que se presentaron problemas con la bomba dosificadora de lodos y con las bombas de alimentación. No obstante se tiene la siguiente información:

PRUEBA No. 3

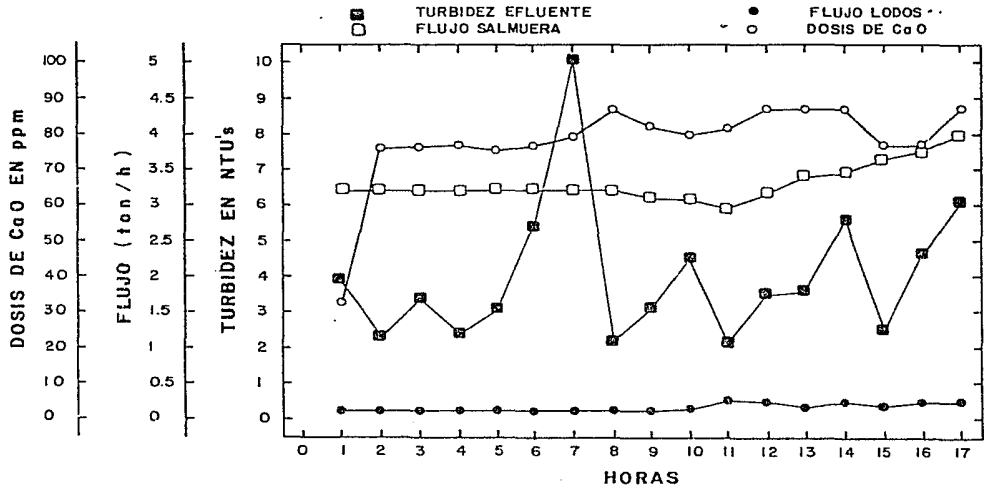


figura 35

12-13 DE MAYO, 1982

para una V.F.B. igual a 1 y concentración de cal en aproximadamente 10 ppm. Los HFO en la descarga fueron de 15 a 20; con V.F.B. igual a 1 y con cal, los HFO a 10. La descarga fue de 25 a 30. La temperatura de la muestra de salmuera aumentó con respecto a las pruebas 1, 2 y 3, como se esperaba debido al menor tiempo de residencia en el clarificador. No se registraron las temperaturas de la salmuera y salmuera del tanque de clarificación.

6.4.6.- Prueba # 5, figura 36

La cantidad de sílice suspendida promedio obtenida en esta prueba fue de 30 ppm. Este resultado del punto, considerado muy bueno con respecto a la V.F.B. requerida (0.25), pero la cantidad de cal agregada es muy grande (100 ppm); además fue la prueba en que se usaron la mayor cantidad de soda (0.12 ton/h). Por lo que respecto a la cantidad de cal utilizada, su cantidad sería hasta tres veces mayor que la necesaria y por lo tanto se costaría más hacer resultados similares a los obtenidos en otras pruebas. Por otra parte, aunque el objetivo principal del proceso es eliminar el mayor cantidad de sílice, se debe reducir la máxima concentración de salmuera en los lodos, porque facilitará un tratamiento posterior de los lodos (separación, filtrado a presión) en caso de ser necesario tanto para su disposición final o para su uso como subproducto. Temperaturas de entrada y salida del cambio polimerizado, 100 y 98 °C.

PRUEBA No. 5

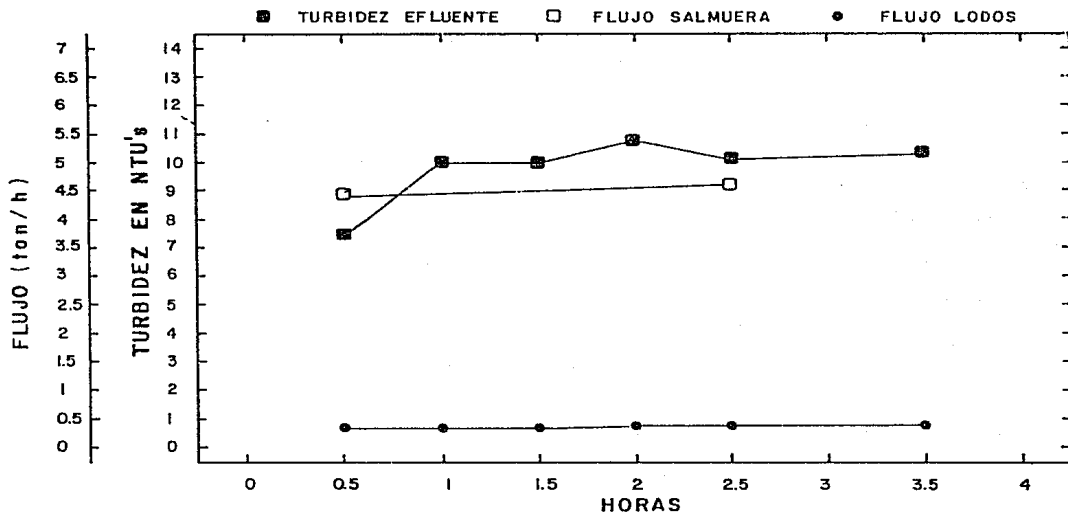


figura 36

6.4.6. - Prueba # 6, figura 37.

Seiscentos gramos de diferencia entre la operación de esta prueba y la anterior. La primera vez que esta prueba se inicia estando el calentador lleno con salmuera del día anterior; la segunda vez cuando el flujo de salmuera es de 3.7 ppm en la prueba 4 (V.F.D. a V.F.D.) donde 4.5 ppm en la prueba 5. La dosis de sal y la extracción de lodos son prácticamente iguales, por lo que la diferencia en la cantidad de sólidos suspendidos (SS) que en la prueba 4 y 5 en la 4), puede atribuirse a la diferencia en las salmueras de flujo en el sistema; recordando esta diferencia en reversa, según el tipo V.F.D. en un cantidad de sólidos suspendidos. Continuando con la comparación en las pruebas 4 y 5, en la prueba 4 con 100 ppm de CaO y una V.F.D. de 6.7T se tienen 74 ppm de sólidos suspendidos y en la prueba 5 con 29.6 ppm de CaO y una V.F.D. de 6.4T, los sólidos aumentados son 22.4; por lo que se infiere que una alta dosis de cal conduce a una alta salinidad de flujo en el sistema. Registro de temperatura a la entrada y salida del tanque de almacenamiento, 102 y 98 °C en promedio.

6.4.7. - Prueba # 7, figura 38.

El objetivo principal de esta prueba fue observar el comportamiento del sistema, al utilizar dosis de cal mucho más bajas que en las anteriores; la dosis de cal empleada se reflejó en la cantidad promedio de sólidos suspendidos (SS) que en el sistema, la cual fue 25 ppm. Al iniciar la prueba se tenía el tanque calentador lleno de salmuera; la calidad del efluente mejoró durante la primera parte de la prueba, lo

PRUEBA No. 6

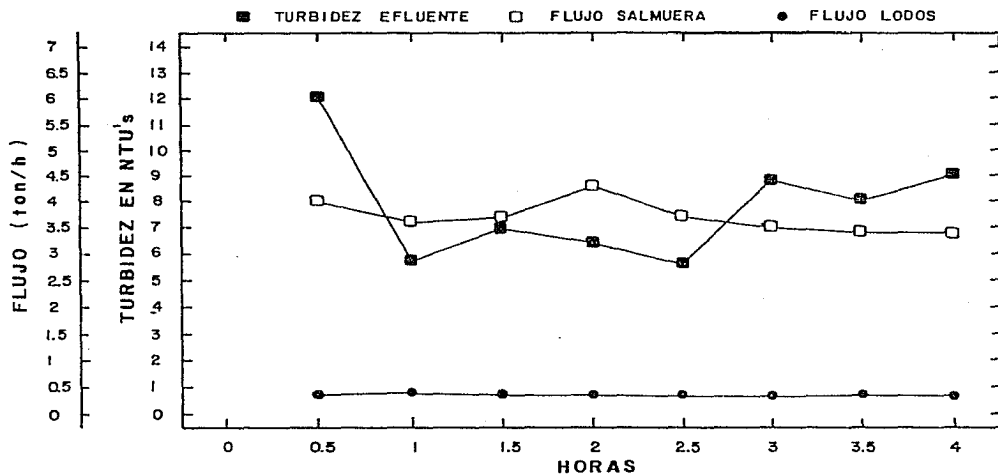


figura 37

PRUEBA No. 7

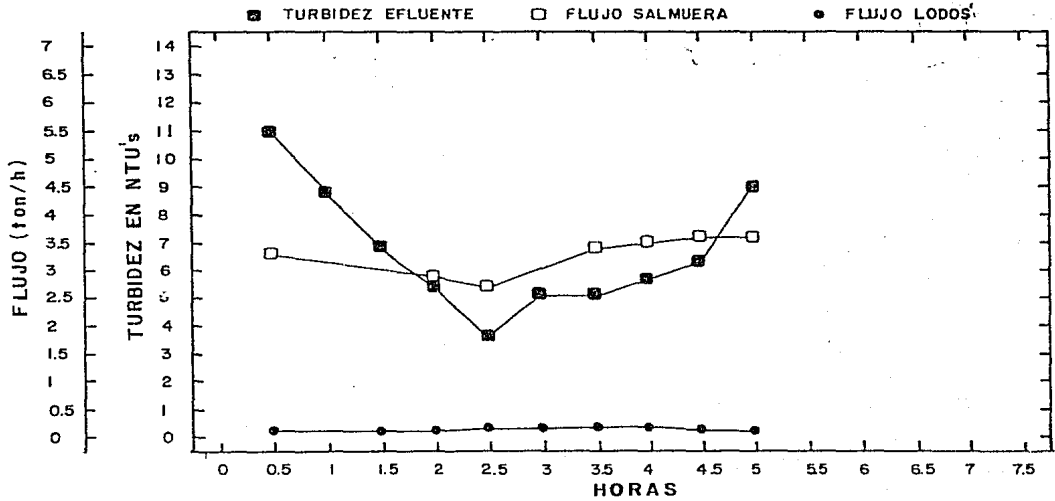


figura 38

que siguió al tiempo de la presencia de la cama de lodos del día anterior; durante la segunda mitad, la columna de la salmuera clarificada tuvo una temperatura aparentemente constante, quizás a que el grado de la dilución de lodos se incrementó en forma parietal. También presento en NTU el III promedio de las mediciones de temperatura para la entrada y salida del tanque polimerizador (verita 39) y 47 °C respectivamente.

6.4.8.- Prueba # 8, figura 39

Durante el desarrollo de la prueba se partió de base al trabajo de Robert H. Vanderhoff (ver sección 4.1), que parte de los lodos podrían ser recirculados, para obtener una gran concentración de partículas de sílice coloidal y que la única reacción con ellas, además de esperar que la recirculación de lodos proporcionara el beneficio adicional de incrementar el tamaño de las partículas, es cuando por ende el proceso de sedimentación. En esta prueba se procedió a mantener a los niveles de la prueba 7 la dosis de $CaCl_2$ y el flujo de alimentación; la diferencia básica consistió en que a partir de la hora 4, se inició la recirculación de lodos a razón de 2.5 l/min. En los resultados de esta prueba, no se notaron variaciones que pudiesen atribuirse a la recirculación de lodos. La temperatura de la salmuera a la entrada del polimerizador fue 100 °C y a la salida de 95 °C.

6.4.9.- Prueba # 9, figura 40

Durante el desarrollo de esta prueba se estuvieron drenando 20 l/min del tanque de sedimentación, para disminuir a

PRUEBA No. 8

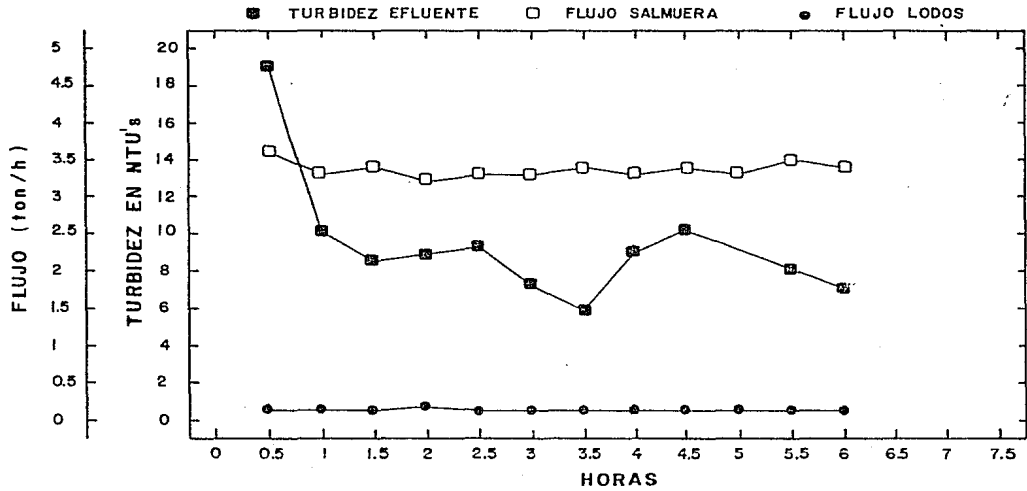


figura 39

PRUEBA No. 9

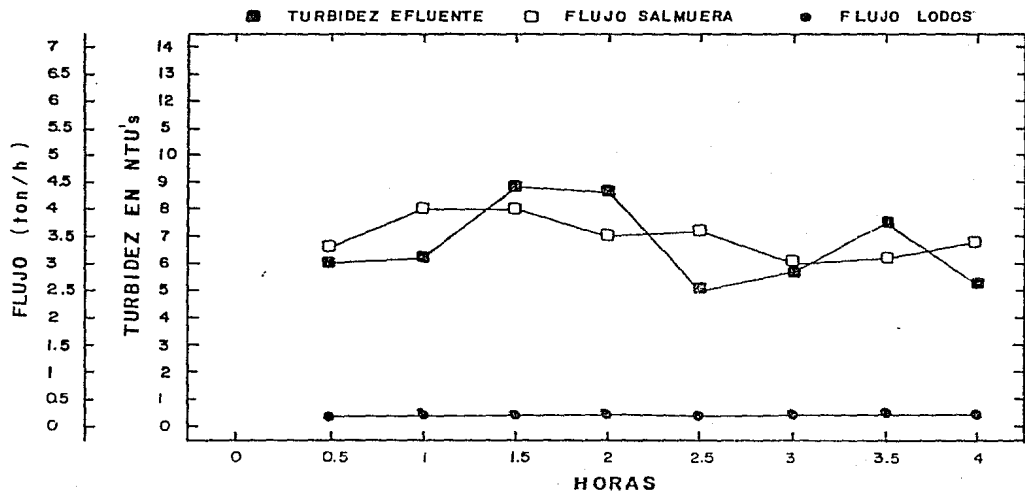


figura 40

En minutos, el tiempo de procesamiento de la muestra con respecto a la turbidez. La calidad de agua obtenida en la calidad de la muestra, así como la turbidez suspendida, promedio que se alcanzó en el laboratorio de la U. N. obtenidos en la prueba. El total se lleva a cabo en condiciones de prueba. Los 3 ppm que existen de diferencia es de una muestra como, simultáneamente a las diferentes velocidades de flujo en el canal. La muestra en el tubo de muestra y en el registro de turbidez, puede haberse debido a las pérdidas que se están produciendo al ser el agua más turbida. Turbidez promedio 3.5 NTU's, turbidez mínima 2.0 NTU's, máxima 3.5 NTU's. Procedo de muestra en la entrada del tanque de tratamiento 104 (L) en la unidad 103 (L).

6.4.10.- Prueba # 10, figura 41

Para la dosis de sal y velocidad de flujo en el canal utilizado en esta prueba, los resultados se consideran bastante satisfactorios en cuanto a calidad suspendida en el agua clarificada se refiere con el incremento de la alta turbidez de fondo residual. Turbidez promedio alcanzada 3.5 NTU's, turbidez mínima registrada 2.9 NTU's, turbidez máxima 4.5 NTU's. Y la turbidez del agua de salida de la planta alcanza 3.5 NTU's en la salida.

6.4.11.- Prueba # 11, figura 42

En la grafica correspondiente a esta prueba, se aprecia claramente el efecto que sobre la turbidez (L) tiene la

PRUEBA No. 10

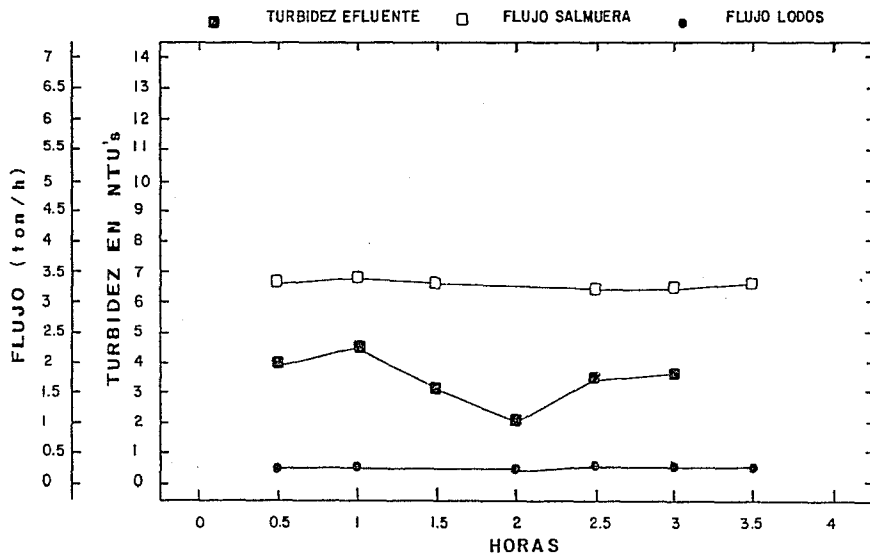


figura 41

PRUEBA No. 11

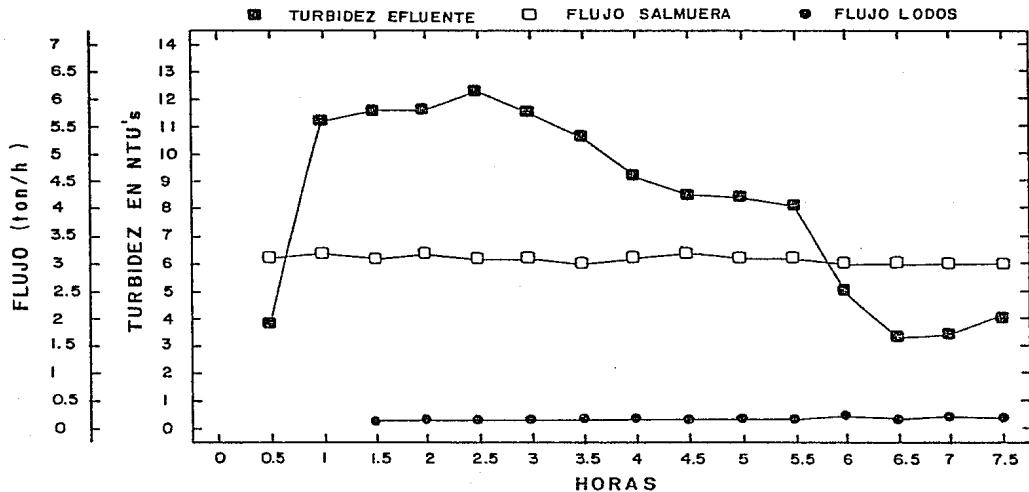


figura 42

modificación de la humedad de del. Comenzando al instante una diferencia de un centímetro en los niveles de líquidos. En la hora 0 a las 4:00 y a las 4:30 se agitaron las cps. de del. usando la siguiente procedia: 900 rpm's. con un abanico para los análisis de pH y a 3000 rpm's de pH para determinar a partir de la hora 0 de inicio el nivel de del. y el nivel de humedad de la muestra. Bajo a 300 rpm's equivalente a 10 cps. de del. En la segunda hora de prueba de abanico, la temperatura promedio del del. en la muestra 93 °C.

6.4.12.- Prueba # 12, figura 43

Se inició esta prueba con una modificación de 30 cps de del. y se trató durante los primeros 10.5 horas sin abanico. Después cuando la muestra alcanzó la máxima concentración de los alveos. Durante este primer periodo la calidad del alveos ligeramente disminuyó el nivel alcanzado en la segunda parte de la prueba el nivel de del. se pasó al comienzo las horas y determinar su concentración. Se encontró que se puede elevar con facilidad 1.5 X en caso de volutas sin abanico en forma negativa la calidad de la muestra alveosada. Posteriormente a partir de la hora 11 se disminuyó la cantidad de del. agregada. Esto se realizó en un decremento de la calidad de la muestra se puede argumentar que la modificación del nivel de turbidez fue debido a la saturación del líquido por la extracción de índices, pero una comparación con la prueba correspondiente a la prueba la muestra una línea.

De la hora 10.5 horas al final de la prueba, se muestra nuevamente la diferencia de del. logrando bajar la cantidad de la muestra y para que al caso pasar en otra copia de la

PRUEBA No. 12

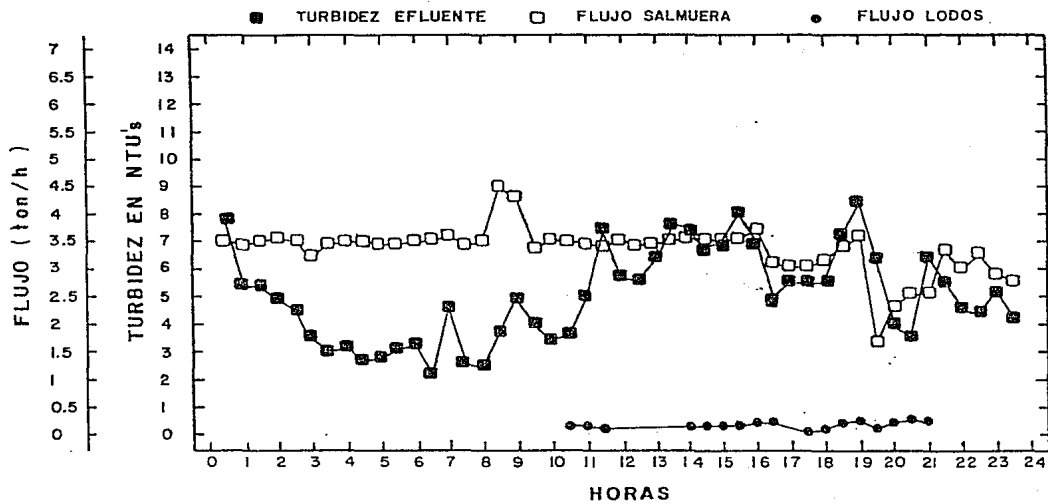


figura 43

modificación de la calidad, siendo como la transformación en el tipo de caldera alimentando al diferencial. Por consecuencia, cuando ocurre la desintegración en el tipo que se registra a partir de la regla IV, cuando refinar de lo que se refiere en el separador de la parte del tipo, siendo el cual era inusual de haberse una producción adecuada, debido a la inhomogeneidad del agua, haciendo como en el separador a los puntos que se verificaron de esta prueba. La experiencia hace saber, que la vida útil de un agua nueva es de varias años. La vida de operación del agua para regeneración, se reduce por que las bombas se encuentran en alta la que es obata para mantener calidad y cantidad de agua de la inyección. Durante esta prueba la temperatura del líquido al tanque de almacenamiento tuvo un promedio de 191 °C a la salida se registrando 20 °C.

C A P I T U L O 7

PARAMETROS BASICOS PARA EL DISEÑO DE LA PLANTA COMERCIAL

7.1.- Parámetros de diseño

Para establecer la velocidad de flujo en el derrame que se usará para calcular el tamaño del clarificador se promediará el valor de ese parámetro en las pruebas de planta piloto en que la dosificación de cal fue de 30 ppm ya que en esas se obtuvieron las mejores calidades en el efluente en lo que respecta a la cantidad de sólidos suspendidos excepción hecha de la prueba #1 donde se tuvo un resultado ligeramente mejor aunque con una cantidad de cal muy superior (76 ppm) y utilizando una V.F.D. menor que en las pruebas con 30 ppm:

# prueba	2	10	11b	12a	12c	promedio
V.F.D.	0.61	0.64	0.59	0.65	0.65	0.63
s.s.	22.6	27.0	24.0	23.0	25.6	24.4

Por lo que respecta al tiempo de añejamiento el promedio para las pruebas mencionadas es casi 23 minutos, sin embargo considerando los resultados de las pruebas de cinética de polimerización así como la pruebas piloto en donde con 14, 16 y 15 minutos de añejamiento se alcanzó también la polimerización completa (pruebas 4, 5 y 7), se propone que los tanques se dimensionen para obtener un tiempo de retención de 15 minutos. En cuanto al tiempo de residencia en el clarificador, aunque la teoría de la sedimentación

discreta predice que la eficiencia de la sedimentación es función del área de sedimentación más que de la profundidad, estando el tiempo de residencia en función directa de la mencionada profundidad cuando el área de sedimentación es fija (siendo esto último lo que se define precisamente al establecer la velocidad de flujo en el derrame y el gasto a manejar), para propósitos de escalamiento es conveniente y práctica común el guardar las proporciones geométricas, por lo que el tiempo de residencia en el clarificador será el promedio obtenido de las pruebas 2, 10, 11b, 12a y 12c, y que resulta ser 74 minutos. Con el objeto de diseñar el sistema de manejo y disposición de lodos se debe considerar que esa corriente tendrá una concentración de 2.5 % en peso de sólidos.

PARAMETROS BASICOS PARA EL DISEÑO DE LA PLANTA	
VELOCIDAD DE FLUJO EN EL DERRAME	0.63 gal/min-pie ²
DOSIS DE CAL	30 ppm
TIEMPO DE AÑEJAMIENTO	15 minutos
TIEMPO DE RES. CLARIFICADOR	74 minutos
CALIDAD DEL EFLUENTE	24 ppm
CONCENTRACION DE LODOS	2.5 % en peso

7.2.- Capacidad y arreglo general de la planta

Independientemente del valor de los demás parámetros de diseño, antes de definir un dimensionamiento preliminar de los equipos es imperativo el establecer la capacidad de la

planta, para ello se deben considerar una variedad de factores entre los que destacan los posibles arreglos para reinyección, en donde se debe contemplar la disponibilidad y la capacidad de aceptación del pozo inyector así como la distribución física de las instalaciones geotérmicas en Cerro Prieto; como ha sido mencionado, en un futuro próximo se construirá la primera etapa de Cerro Prieto IV y el agua separada que produzca supone en su totalidad un excedente por lo que es oportuno plantear un sistema de producción-reinyección que incluya la eliminación de la sílice que sobresatura la salmuera y en el que el sistema de separación sea adecuado a los propósitos de reinyección. El arreglo previsto para los pozos de Cerro Prieto IV es rectangular localizándose los pozos en los vértices separados 350 metros verticalmente y 400 horizontalmente, por lo que una planta de tratamiento capaz de manejar el gasto de agua separada de cuatro pozos localizada en el centro del cuadrilátero es una propuesta razonable, adicionalmente habrá que programar la construcción de otros dos elementos fundamentales para el proyecto de reinyección, en primera instancia el sistema de separación, el cual no sería convencional, proponiéndose un módulo de separación común a los cuatro pozos contra la práctica actual de un sistema de separación para cada pozo el que se localiza en su plataforma, por lo que respecta al otro elemento que resulta ser el pozo inyector, éste se localizaría también en la parte central del rectángulo, la terminación del pozo inyector deberá ser de tal manera que el intervalo de reinyección quede a una profundidad mayor que el de los pozos productores, esto de acuerdo a trabajos de ingeniería de yacimientos que garanticen una nula o mínima interferencia con el comportamiento productivo de los pozos, pudiéndose programar la operación del sistema de tal manera que eventualmente el pozo inyector actúe como productor. Se estima que el agua separada de los cuatro pozos productores

sería del orden de 360 ton/h siendo esta cantidad aceptable por un pozo reinyector a presiones de cabezal razonables según experiencias de reinyección previas en Cerro Prieto. Por lo anteriormente expuesto la capacidad que se propone para la planta de remoción de sílice es de 360 ton/h.

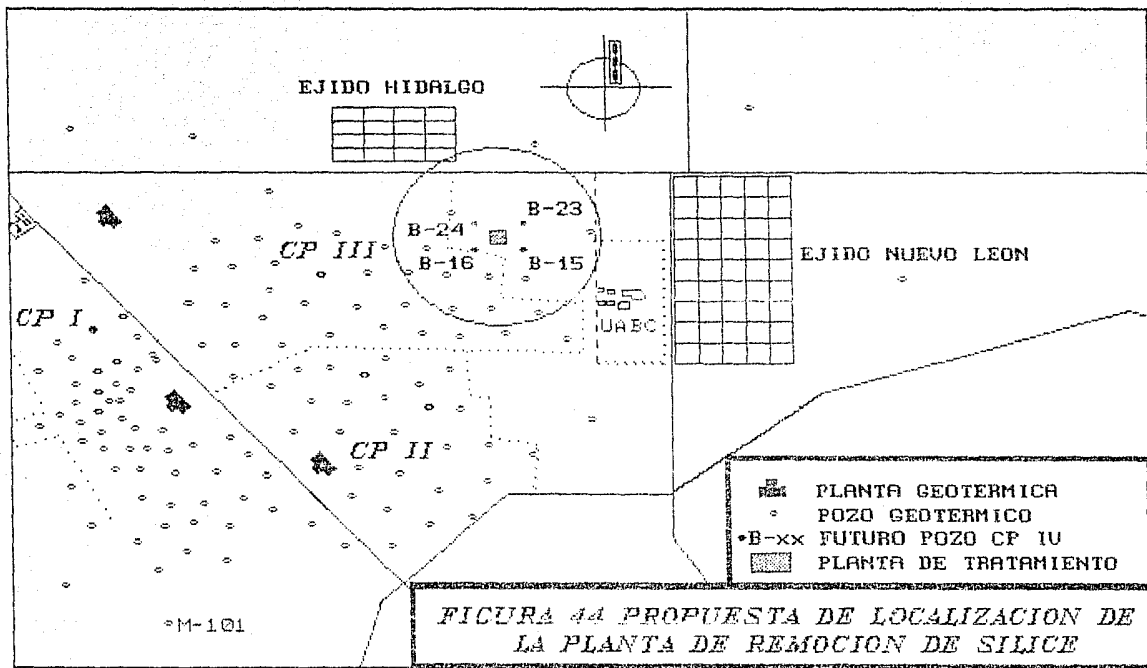
7.3.-Arreglo y dimensionamiento de equipos

7.3.1 Localización de la planta

En la figura 44 se presenta la localización propuesta para la planta de remoción de sílice, quedando situada en el área de Cerro Prieto IV en el centro del cuadrilátero que forman los futuros pozos B-15, B-16, B-24 y B-25.

7.3.2 Diagrama de flujo

Como se observa en el esquema de la figura 45 la mezcla se conduciría en flujo bifásico hasta el módulo de evaporación, de ahí descargaría a un separador atmosférico de donde pasaría directamente por gravedad al tanque de afeamiento; en la sección final de éste se agregaría la cal provyendo agitación, también por gravedad se alimenta al clarificador, la salmuera clarificada pasa a un tanque de almacenamiento de donde finalmente es bombeada al pozo reinyector. La conducción en flujo bifásico es empleada con éxito en otros campos geotérmicos, pero en Cerro Prieto sólo inicia a la fecha con los proyectos de conducción de la mezcla de los pozos M-198 y M-200, la experiencia que se



Obtenga, sobre todo en posiciones -problemas de incrustación, será determinante para el planteamiento aquí expuesto de conducción de la mezcla geotérmica a las inmediaciones de la planta de tratamiento.

7.3.3 Dimensiones del clarificador

El área de sedimentación A_s , se obtiene dividiendo el gasto a manejar entre la velocidad de flujo en el derrame V.F.D., la densidad de la salmuera es igual a 1.030 ton/m³, siendo el gasto volumétrico:

$$Q_v = (360 \text{ ton/h}) (0.971 \text{ m}^3/\text{ton}) (1 \text{ h}/60 \text{ min}) = 5.826 \text{ m}^3/\text{min}$$

la V.F.D. en unidades consistentes queda:

$$\begin{aligned} \text{V.F.D.} &= (0.63 \text{ gal}/\text{min}\text{-pie}^2) (3.28 \text{ pie})^2 (1 \text{ m}^3/1000 \text{ l}) \\ & (3.785 \text{ l}/\text{gal}) = 0.026 \text{ m}/\text{min} \end{aligned}$$

por lo que el área de sedimentación es:

$$A_s = (5.826 \text{ m}^3/\text{min}) / (0.026 \text{ m}/\text{min}) = 224.08 \text{ m}^2$$

para encontrar el diámetro del clarificador D , se aplica la fórmula presentada en la sección 5.2.5; $A_s = \pi (D^2 - d^2)$ considerando que en la construcción de clarificadores comerciales el diámetro del bazo de alimentación d , varía de 22 al 25 % de D , y estableciendo para el cálculo $d = 0.25D$ la ecuación a resolver queda:

$$224.08 \text{ m}^2 = 3.1416 (D^2 - 0.0625 D^2)$$

resolviendo, $D = 8.72 \text{ m}$ y $d = 2.18 \text{ m}$; es conveniente ajustar

las dimensiones del tanque de tal manera que los mecanismos y accesorios disponibles en el mercado sean fácilmente instalables y no demanden construcción especial. ajustando, el diámetro del clarificador sería 9.14 m (30 pies), el del pozo de alimentación 2.44 m (8 pies), para este último una profundidad de 1.52 m (5 pies) es adecuada.

Como se anota en la sección 6.2 el tiempo de retención es la relación entre el volumen del clarificador y el gasto de alimentación, $T.R. = V_c/Q_c$, para encontrar la profundidad del tanque se requiere conocer V_c , siendo:

$$V_c = T.R. * Q_c = 74 \text{ min} * 5.826 \text{ m}^3/\text{min} = 431.12 \text{ m}^3$$

para un cilindro $V_c = \pi d^2 h/4$, de donde:

$$h = 4V_c/\pi d^2 = (4*431.12)/(3.1416*9.14*9.14) = 6.57 \text{ m}$$

en la figura 46 se resumen las dimensiones del clarificador.

7.3.4.- Dimensiones del tanque polimerizador

Definido el tiempo de afejeamiento el que es igual a 15 minutos y utilizando el gasto volumétrico de 5.826 m³/min el volumen del tanque de afejeamiento, $V_{T.A.}$ es:

$$V_{T.A.} = T.A. * Q_c = 15 \text{ min} * 5.826 \text{ m}^3/\text{min} = 87.39 \text{ m}^3$$

El volumen del tanque de afejeamiento resulta de multiplicar la longitud (L) por la altura (H) y por el ancho (W), si se establecen las siguientes relaciones; $H = L/3$, $W = 2L/5$ las dimensiones del tanque son, $L = 8.69 \text{ m}$, $H = 2.90 \text{ m}$ y

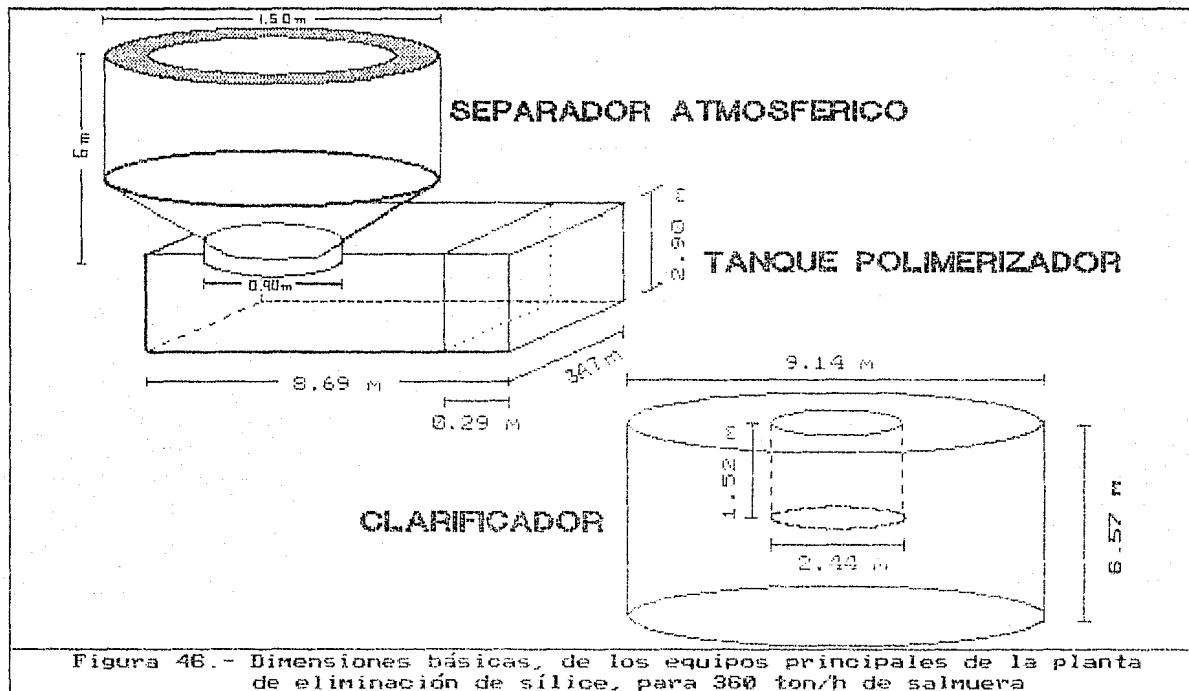


Figura 46.- Dimensiones básicas, de los equipos principales de la planta de eliminación de sílice, para 360 ton/h de salmuera

W = 0.17 m para la zona de succia considerando un tiempo de retención de 70 segundos y la mismas dimensiones de altura y ancho, la longitud resulta 0.27 m. En la zona de añejamiento se puede anticipar la necesidad de construir dos tanques a fin de dar mantenimiento a uno de ellos mientras el otro opera, lo anterior por ser un punto crítico en lo que a incrustaciones se refiere, independientemente de que la construcción de ambos deberá ser de tal manera que se faciliten las maniobras de limpieza.

7.3.5.- Separador atmosférico

El tipo de separador que se propone en este trabajo se ha experimentado muy recientemente en Cerro Prieto y tiene como objeto substituir en las operaciones donde sea posible a los silenciadores de los pozos, ya que estos al presentar un tiempo de residencia relativamente largo se incrustan rápidamente por lo que requieren mantenimiento frecuente. Las bases para el diseño son hasta el momento en gran parte empíricas; en comunicación personal con ingenieros de la Superintendencia de Diseño Mecánico de la Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, se propuso en forma preliminar las dimensiones señaladas en la figura 46, la construcción del separador es sumamente sencilla.

C A P I T U L O 8

CONCLUSIONES

Tanto las pruebas de laboratorio como la experimentación en planta piloto, demuestran que la eliminación en caliente de la sílice que sobrepasa la salmuera geotérmica de Cerro Prieto se logra con muy alta eficiencia considerando que el proceso involucra básicamente la coagulación de la sílice suspendida con cal y su posterior sedimentación, alcanzándose remociones superiores al 97 % .

La salmuera clarificada puede o no requerir un tratamiento adicional para reinyectarla, dependiendo del criterio de inyectabilidad, el cual es un concepto altamente específico y debe ser experimentado en campo, si en base a un trabajo posterior se determina que las 24 partes por millón de sílice suspendida que se pueden esperar en el efluente de una planta diseñada en base a los parámetros aquí propuestos, no dan a la salmuera prevista para reinyectarse la calidad necesaria, entonces se deberá considerar filtrar el efluente clarificado, si éste se pasa a través de un filtro de arena se le dará el toque final del tratamiento con la ventaja adicional de que la etapa de filtración servirá en su momento como una medida de seguridad contra una mala operación del equipo de coagulación-sedimentación.

No se debe dejar de considerar la sustitución, en la planta comercial, del tanque de asentamiento incluyendo la zona de mezclado con cal, por un clarificador-floculador el cual incluiría un pozo de alimentación agrandado hasta un tiempo de retención equivalente al necesario para el

aseguramiento de la salinera con lo cual la necesidad de mantenimiento disminuiría tanto en los tiempos de arreglo como en la eficiencia al desalinizar.

Aunque la evaluación económica del proceso no se contiene entre los objetivos de este trabajo, se quisiera hacer un comentario con respecto al respecto: independientemente de los beneficios que supone la reducción de los costos o simplemente el eliminar un problema económico al disponer adecuadamente de la salinera restante, el proceso aquí propuesto para la eliminación de la sílice difícilmente podrá ser superado por cualquier otra alternativa, ya todas las sabidas que la sedimentación es una operación básica y ampliamente utilizada en el tratamiento de aguas y es de las primeras opciones que se buscan por su sencillez y bajo costo relativo para la eliminación de sólidos, en la práctica industrial el parámetro de velocidad de flujo en el decanado es variable (0.2 a 2.0 gal/min-ft²) y las eficiencias máximas reportadas son del orden de 60 %, por lo que indiscutiblemente los niveles de remoción de sílice superiores al 97 % en la salinera geotérmica resultan muy atractivos al evaluar la bondad del proceso.

En virtud de que el manejo presente de la salinera geotérmica dentro del campo geotérmico involucra fundamentalmente su conducción y disposición por medios superficiales; esto es, drenes y Laguna de Evaporación, lo que provoca eventualmente el que la salinera alcance la temperatura ambiente y considerando las viables alternativas de reinyección en frío, las cuales ya se han ensayado prácticamente, se recomienda establecer y desarrollar un programa de pruebas basado en la metodología de realización e interpretación presentada en el capítulo 5, lo que seguramente permitirá obtener los parámetros básicos para el

diseño del sistema de reinyección en frío, con lo que se obtendrían las siguientes ventajas características de su fin particular: precipitar en forma controlada dentro de la Laguna de Evaporación la sílice excedente en un área mucho más pequeña que la actual en la que no se usa tratamiento químico, con lo que se facilitaría el desahucio de la Laguna pudiendo llegar a establecerse un sistema de bombeo a espesadores para acondicionar el lodo para su transporte a disposición final o para un uso industrial posterior, por su parte la salmuera clarificada se conduciría a los poros reinyectores o a la otra alternativa contemplada para su disposición que es la infiltración, en ambos casos se contaría con una salmuera no únicamente libre de sílice sino de materia orgánica tanto animal como vegetal, la cuál proliferara en la Laguna de Evaporación después de permanecer el agua geotérmica por meses dentro del vaso apareciendo plancton, algas y diversos insectos los que pueden en su caso ser un impedimento mecánico para la reinyección en frío o para la infiltración.

A P E N D I C E A

FORMAS CRISTALINAS, ACUOSAS Y AMORFAS DE LA SILICE.

SILICE CRISTALINA:

Especies de silice con estructura cristalina.

- a).- Macrocrystalina; cuarzo, tridimita, cristobalita.
- b).- Criptocrystalina; consiste de cristalitas fibrosas con poros submicroscopicos, nombre comun calcedonia.

SILICE AMORFA:

Formas de silice que poseen de estructura cristalina.

- a).- Gel de silice; silice amorfa dura, que contiene de 20 a 30 por ciento de agua, preparada comercialmente para usarse como reactivo quimico o como desecante.
- b).- Silice gelatinosa; aparece en solucion como floculos gelatinosos o como un gel continuo cuando se evapora una solucion de silice, al poner en reposo una solucion sobresaturada de silice o al acidificar una solucion ligeramente concentrada de silicato en medio basico.
- c).- Sol de silice o silice coloidal; silice dispersa en agua, presentando la silice particulas de dimensiones coloidales (10^{-7} a 10^{-6} mm).

d).- Opalo: sílice de los microorganismos, incluyendo diatomeas y radiolarios, generalmente con menos de 12 % de agua.

e).- Sílice vítreo: se prepara mediante el enfriamiento rápido de sílice fundida.

SILICE ACUOSA:

Especies de sílice en solución.

a).- Ácido ortosilícico: la forma principal de la sílice en soluciones saturadas con pH menor que 9, es el monómero H_4SiO_4 . Arriba de pH 9, el ácido ortosilícico se disocia.

b).- Sílice disuelta o colorimétrica; es la sílice en solución verdadera (H_4SiO_4), que reacciona con el molibdato de amonio dentro de los dos minutos siguientes al mezclado de las soluciones.

c).- Sílice polimerizada; ácidos silícicos que contienen dos (disilícicos), tres (trisilícicos) o más átomos de silicio por molécula (incluyendo suspensiones coloidales). A temperatura ambiente los ácidos silícicos lineales reaccionan con el molibdato de amonio en 3 minutos, pero los ácidos cíclicos requieren de algunas horas. Los polímeros de alto orden no reaccionan. En soluciones no saturadas, los ácidos polisilícicos sepolimerizan al monómero.

d).- Sílice total; todas las especies de sílice en solución pueden ser determinadas colorimétricamente, si previamente se convierte la sílice polimerizada al monómero, mediante el tratamiento con NaOH.

METODO DEL MOLIBDATO

B.1.- ANTECEDENTES:

La velocidad global de polimerización del ácido monosilícico, puede ser medida observando la velocidad de desaparición del monómero.

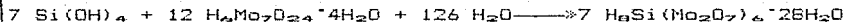
Se sabe desde hace más de 50 años que la sílice reacciona con el ácido molibdico para dar un compuesto amarillo cuya concentración puede ser determinada espectrofotométricamente. Sin embargo, no fué sino hasta 25 años después del descubrimiento original, que se supo el que sólo la "sílice soluble", y no la sílice coloidal, reacciona con el molibdato. Durante estos 25 años, persistió una controversia en la literatura química y geológica con respecto a la naturaleza exacta de la sílice en solución, debido parcialmente a la diferencia existente entre los resultados obtenidos en los análisis de sílice total efectuados por el método del molibdato, y los efectuados gravimétricamente. La sílice en solución fué clasificada en "sílice coloidal" y en "sílice soluble", esta última se refiere a las formas de la sílice que reaccionan con el ácido molibdico y que generalmente se iguala a la sílice monomérica.

En 1950 Heitz, Franke y Schuchard, reportaron que los ácidos polisilícicos de bajo peso molecular, también reaccionan con el ácido molibdico, pero a una velocidad más

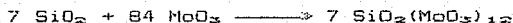
baja que el monomérico. Ellos encontraron que a 10°C, el ácido silícico monomérico reacciona completamente en 25 segundos, el mismo reacciona completamente en 10 minutos y los polímeros más grandes reaccionan aun más lentamente.

La reacción del ácido molibdico con la sílice monomérica Si(OH)_4 , para dar el ácido silicamolibdico amarillo, es indispensable en las investigaciones del comportamiento de la sílice soluble y la coloidal.

Es obvio que solamente la sílice monomérica Si(OH)_4 , y no los polímeros por lo tanto, puede reaccionar directamente con el heptamolibdato de amonio acidificado, para formar el ácido silicamolibdico amarillo, ya que esta molécula contiene solo un átomo de silicio:



o en forma equivalente:



Como el peso molecular del molibdato de amonio es 1235.9, 1 gramo de SiO_2 consume 35.3 gramos de molibdato de amonio. Los ácidos polisilícicos despolimerizan tan lentamente, que es posible determinar el monómero en presencia de polímeros, por medio de espectrofotometría.

Aunque esta reacción fue descubierta en 1875 por Jolles y Neurath, y usada por muchos años, fue solo hasta el año de 1932 en que Strickland demostró que la variación en el coeficiente de extinción bajo ciertas condiciones era debido

La presencia de sus formas de ácido molibdato silfú y beta, las cuales reaccionan con la urida para dar un color silicomolibdato azul. Para las pruebas necesarias de control se extiende y viene de acuerdo al formato. La urida beta se obtiene a pH más bajo y se obtiene en el estado "monilico", pero a menos que las condiciones sean dadas, cambia con el tiempo a la forma silfú, la cual es más estable pero más estable, la forma beta es la urida que se utiliza para determinar ácido molibdato en presencia de silimeros, porque se forma al instante y su color es más intenso.

B.2.- METODO DEL SILICOMOLIBDATO BETA:

Para las determinaciones tanto de silice monomérica como de silice total que se reportan en el presente trabajo, se utilizó el procedimiento recomendado por Hierro, el cual, que para muchos propósitos, es posible hacer una solución reactiva de ácido molibdato diluido, que se estocque por una semana, así, para determinar silice, sólo es necesario agregar la muestra a la solución de ácido molibdato. Los reactivos necesarios se preparan de la siguiente manera:

REACTIVO A. - Se agregan 41 ml de H_2SO_4 al 95.5 % a 500 ml de agua y se diluye a un litro. Esto es, se trata una solución 1.5 N de H_2SO_4 .

REACTIVO B. - Se disuelven 100 g de $(NH_4)_2MoO_4 \cdot 4H_2O$ (peso molecular 1238.9) en 500 ml de agua, se agregan 47 ml de solución concentrada de NH_4OH (dens. 1.52), y se diluye a un litro (densidad 1.52 g/l y 1.18 N del ion NH_4^+).

REACTIVO C: A 100 ml de agua se agregan 20 ml de solución A y 10 ml de solución B. Se agita con vigor. Con la que las concentraciones quedan: $[\text{H}^+] = 10^{-2}$ M, $[\text{OH}^-] = 10^{-12}$ M, $[\text{H}_2\text{O}] = 55.5$ M en solución con un pH de 12 aproximadamente.

Procedimiento: A 40 ml de la solución C, se agregan 10 ml de la muestra a determinar, se mide la conductividad a una longitud de onda de 400 nm; esta medida debe hacerse a los 2.5 minutos, para dar tiempo a que el equilibrio reaccione completamente. Es importante la calibración con estándares, con lo que deberá hacerse cuidadosamente.

A P E N D I C E C

TURBIDIMETRIA

C. 1. - DEFINICION DE TURBIDEZ:

En la publicacion Standard Methods, de la American Public Health Association, se establece que: "se debe entender claramente, que la turbidez es una expresion de la propiedad optica de una muestra, que provoca el que la luz sea desviada y absorbida, en lugar de ser transmitida en linea recta. La turbidez es causada por la presencia de materia suspendida, tal como arcilla, cieno, materia orgánica, algas, ferrocianuro, bacterias y carbonato de sodio.

C. 2. - UNIDADES PARA LA MEDICION DE LA TURBIDEZ:

A través del tiempo han existido muchos cambios, en lo que concierne a la unidad para expresar la turbidez; uno de los primeros intentos fue el de Whipple y Jackson en 1906, ellos formularon una solución de 1000 ppm de tierra diatomacea, deliberando a partir de ella los turbidímetros empleados en aquellos días. A uno de los primeros turbidímetros se le llamó diafanómetro, consistía de un tubo de vidrio el cual tenía en el fondo una cruz, el líquido se agregaba lentamente y se observaba por la parte superior el momento en que la cruz se desvanecía, en este punto cesaba de agregarse el líquido y se leía el nivel de turbidez en una escala graduada en la parte exterior del tubo.

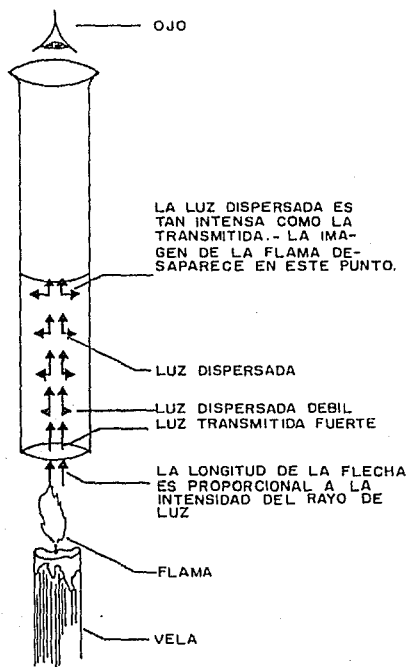
El turbidímetro de vidrio, controlado por vapor, por Jackson, según la figura de una sola luz blanca en luz, pone el principio de interferencia en el medio y para medir el grado de turbidez en un tubo con un grado de turbidez que a una profundidad dada de la muestra, corresponden una lectura en JIU (Jackson Turbidity Units). La escala calibrada del tubo relaciona las unidades JIU, con la turbidez que presenta un líquido determinado de cierta suspensión (de aquí siendo apropiadas las soluciones de virus a partir de tierra distantes).

C.3. - LIMITACIONES DEL TURBIDÍMETRO DE JACKSON; ADVENIMIENTO DE DE LA NEFELOMETRÍA:

Existen dos limitaciones principales en el uso del turbidímetro de Jackson, la primera es que las partículas muy finas de materia suspendida no son medidas por este turbidímetro; la segunda es que es incapaz de medir partículas negras, tal como la turbidez del carbon.

Durante muchos años el turbidímetro de Jackson fue el único instrumento patron para la medida de la turbidez, y las unidades de calibración de este instrumento (turbidity units, TU) fueron las unidades estándar de medida y expresión de la turbidez.

En la decima tercera edición de Standard Methods, publicada en 1971, fue introducido el método instrumental nefelométrico (dispersión de la luz) para la medición de la turbidez, a la vez con una descripción del turbidímetro para laboratorio modelo 2100-A, fabricado por la compañía Hoch. Esto marca un avance hacia métodos de medición más precisos.



TURBIDIMETRO DE JACKSON

FIGURA C1

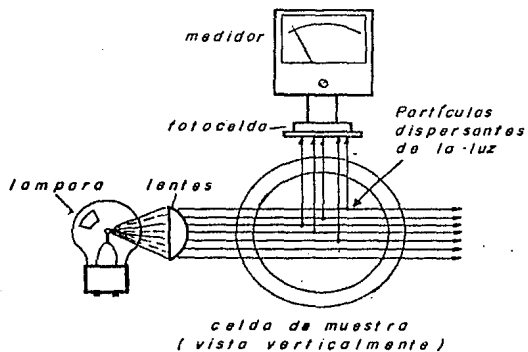
En el sistema con la turbidez en sí misma, el haz de un haz más hacia adelante en turbidimetría, se presenta en término Unidad Refractométrica de Turbidez (Nephelometric Turbidity Unit: NTU), como la expresión estándar para la turbidez. Esto es, se relaciona a la unidad de medida de turbidez del NTU, el principio instrumental nefelométrico, a partir del cual se deriva la unidad.

C.4.- NEFELOMETRIA:

La nefelometría, describe un principio óptico instrumental mediante el cual, la turbidez de una muestra es determinada midiendo la cantidad de luz incidente, que es desviada a un ángulo dado (usualmente 90°), por las partículas suspendidas en la solución de prueba (Figura C.2).

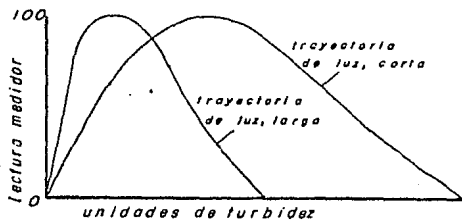
Aunque el método clásico para la medición de la turbidez (turbidímetro de Jackson), es su aplicación en algunas aplicaciones, el método fotoeléctrico supera las limitaciones inherentes al uso humano. De los instrumentos fotoeléctricos usados en la actualidad, el nefelómetro difiere de la que acepta aceptación debido a su precisión, sensibilidad y a su aplicación sobre un amplio intervalo de turbidez. Las características más importantes de los nefelómetros son:

- 1).- Pueden ser muy sensibles para medir bajas turbidez.
- 2).- Señal directa a turbidímetro.
- 3).- Respuesta directa: la señal de incremento constante se incrementa la turbidez (Figura C.3).



nefelómetro

figura C 2



respuesta del nefelómetro *figura C 3*

- 4).- El importe de los dividendos que se reparten a los accionistas de una sociedad anónima, puede ser libre a discreción de la junta de directores.
- 5).- El importe de los dividendos que se reparten a los accionistas, puede ser libre a discreción de la junta de directores.
- 6).- El importe de los dividendos que se reparten a los accionistas, depende del estado financiero de la sociedad.

A N E X O D

REGISTRO DE DATOS DE LAS PRUEBAS EN PLANTA PILOTO

REGISTRO DE FLUJOS Y CALIDAD. PRUEBA # 1

Hora	Turbidez efluente (NTU's)	Flujo efluente (ton/h)	Flujo lodos (ton/h)	% sólidos en lodos	Dosis de cal (ppm)
1	8.8	.171	0.069	0.88	77
1.7	1.7	.171	0.069	0.88	77
2.4	1.9	.195	0.045	2.41	77
3.1	1.0	.107	0.135	1.75	77
3.8	1.0	.085	0.145	1.0	77
4.5	1.1	.015	0.235	1.25	77
5.2	1.1	.015	0.235	1.25	77
5.9	1.1	.134	0.106	1.97	77
6.6	1.1	.110	0.130	2.04	77
7.3	1.1	.078	0.162	1.71	77
8.0	1.1	.082	0.158	1.43	77
8.7	1.1	.108	0.132	2.22	77
9.4	1.1	.050	0.190	1.78	77
10.1	1.1	.085	0.177	2.22	77
10.8	1.1	.072	0.150	1.60	77
11.5	1.1	.072	0.158	1.70	77
12.2	1.1	.085	0.155	1.60	77
12.9	10.2	.113	0.127	1.1	77
13.6	7.6	.140	0.100	1.1	77
14.3	10.6	.090	0.150	0.98	77
15.0	15.0	.015	0.225	1.1	77
15.7	4.3	.940	0.300	1.01	77
16.4	1.8	.927	0.313	1.67	77
17.1	1.8	.913	0.327	1.67	77
17.8	sin dosificación de cal				

REGISTRO DE FLUJOS Y CALIDAD. PRUEBA # 2

Hora	Turbidez efluente (NTU's)	Flujo efluente (ton/h)	Flujo lodos (ton/h)	% sólidos en lodos	Dosis de cal (ppm)
1	5.5	.11	0.189	1.54	77
1.7	5.5	.124	0.144	1.54	77
2.4	5.5	.124	0.124	1.41	77
3.1	5.5	.129	0.113	2.18	77
3.8	5.5	.127	0.228	1.1	77
4.5	5.5	.11	1.1	1.6	77
5.2	4.4	.135	0.155	1.46	77
5.9	4.7	.14	0.110	0.8	77
6.6	4.7	.13	0.110	0.8	77
7.3	4.7	.13	0.110	0.8	77
8.0	4.7	.13	0.110	0.8	77
8.7	4.7	.13	0.110	0.8	77
9.4	4.7	.13	0.110	0.8	77
10.1	4.7	.13	0.110	0.8	77
10.8	4.7	.13	0.110	0.8	77
11.5	4.7	.13	0.110	0.8	77
12.2	4.7	.13	0.110	0.8	77
12.9	4.7	.13	0.110	0.8	77
13.6	4.7	.13	0.110	0.8	77
14.3	4.7	.13	0.110	0.8	77
15.0	4.7	.13	0.110	0.8	77
15.7	4.7	.13	0.110	0.8	77
16.4	4.7	.13	0.110	0.8	77
17.1	4.7	.13	0.110	0.8	77
17.8	4.7	.13	0.110	0.8	77

REGISTRO DE FLUJOS Y CALIDAD. Prueba # 6

Hora	Turbidez efluente (NTU/s)	Flujo efluente (ton/h)	Flujo lodos (ton/h)	% sólidos en lodos
0.5	12.1	4.0	0.36	---
1.0	5.7	4.6	0.40	---
1.5	7.0	4.7	0.36	0.375
2.0	6.4	4.0	0.36	---
2.5	6.6	4.7	0.36	0.778
3.0	6.6	4.4	0.36	---
4.0	9.0	4.4	0.36	0.545

REGISTRO DE FLUJOS Y CALIDAD. Prueba # 7

Hora	Turbidez efluente (NTU/s)	Flujo efluente (ton/h)	Flujo lodos (ton/h)	% sólidos en lodos
0.5	11.0	3.3	0.12	---
1.0	8.8	---	---	---
1.5	6.8	---	0.11	0.889
2.0	4.4	2.9	0.12	---
2.5	6.6	2.7	0.17	1.060
3.0	1.1	---	0.16	---
3.5	1.1	4.4	0.19	0.825
4.0	7.7	5.0	0.26	---
4.5	3.0	6.6	0.14	0.964
5.0	3.0	6.6	0.12	---

REGISTRO DE FLUJOS DE CALIDAD. PRUEBA # 8

Hora	Turbidez efluente (NTU/s)	Flujo efluente (ton/h)	Flujo lodos (ton/h)	% sólidos en lodos
0.5	19.0	6.6	0.14	---
1.0	10.1	6.6	0.14	---
1.5	6.6	4.4	0.14	---
2.0	6.6	4.4	0.14	---
2.5	6.6	4.4	0.14	---
3.0	6.6	4.4	0.14	---
3.5	6.6	4.4	0.14	1.10
4.0	6.6	4.4	0.14	---
4.5	10.1	4.4	0.14	0.61
5.0	10.1	4.4	0.14	---
5.5	6.6	4.4	0.14	0.99
6.0	6.6	4.4	0.14	---

REGISTRO DE FLUJOS Y CALIDAD. PRUEBA # 9

Hora	Turbidez efluente (NTU/s)	Flujo efluente (ton/h)	Flujo lodos (ton/h)	% sólidos en lodos
0.0	0.0	0.0	0.0	0.70
0.1	0.0	0.0	0.0	0.74
0.2	0.0	0.0	0.0	0.80
0.3	0.0	0.0	0.0	0.84
0.4	0.0	0.0	0.0	0.88
0.5	0.0	0.0	0.0	0.92

REGISTRO DE FLUJOS Y CALIDAD. PRUEBA # 10

Hora	Turbidez efluente (NTU/s)	Flujo efluente (ton/h)	Flujo lodos (ton/h)	% sólidos en lodos
0.0	0.0	0.0	0.24	0.45
0.1	0.0	0.0	0.26	0.49
0.2	0.0	0.0	0.28	0.53
0.3	0.0	0.0	0.30	0.57
0.4	0.0	0.0	0.32	0.61
0.5	0.0	0.0	0.34	0.65

REGISTRO DE FLUJOS Y CALIDAD. PRUEBA # 11

Hora	Turbidez efluente (NTU/s)	Flujo efluente (ton/h)	Flujo lodos (ton/h)	% sólidos en lodos
0.0	0.0	0.1	---	---
0.1	0.0	0.1	---	---
0.2	0.0	0.1	0.10	1.030
0.3	0.0	0.1	0.10	1.030
0.4	0.0	0.1	0.10	1.030
0.5	0.0	0.1	0.10	1.030
0.6	0.0	0.1	0.10	1.030
0.7	0.0	0.1	0.10	1.030
0.8	0.0	0.1	0.10	1.030
0.9	0.0	0.1	0.10	1.030
1.0	0.0	0.1	0.10	1.030
1.1	0.0	0.1	0.10	1.030
1.2	0.0	0.1	0.10	1.030
1.3	0.0	0.1	0.10	1.030
1.4	0.0	0.1	0.10	1.030
1.5	0.0	0.1	0.10	1.030
1.6	0.0	0.1	0.10	1.030
1.7	0.0	0.1	0.10	1.030
1.8	0.0	0.1	0.10	1.030
1.9	0.0	0.1	0.10	1.030
2.0	0.0	0.1	0.10	1.030
2.1	0.0	0.1	0.10	1.030
2.2	0.0	0.1	0.10	1.030
2.3	0.0	0.1	0.10	1.030
2.4	0.0	0.1	0.10	1.030
2.5	0.0	0.1	0.10	1.030
2.6	0.0	0.1	0.10	1.030
2.7	0.0	0.1	0.10	1.030
2.8	0.0	0.1	0.10	1.030
2.9	0.0	0.1	0.10	1.030
3.0	0.0	0.1	0.10	1.030
3.1	0.0	0.1	0.10	1.030
3.2	0.0	0.1	0.10	1.030
3.3	0.0	0.1	0.10	1.030
3.4	0.0	0.1	0.10	1.030
3.5	0.0	0.1	0.10	1.030
3.6	0.0	0.1	0.10	1.030
3.7	0.0	0.1	0.10	1.030
3.8	0.0	0.1	0.10	1.030
3.9	0.0	0.1	0.10	1.030
4.0	0.0	0.1	0.10	1.030
4.1	0.0	0.1	0.10	1.030
4.2	0.0	0.1	0.10	1.030
4.3	0.0	0.1	0.10	1.030
4.4	0.0	0.1	0.10	1.030
4.5	0.0	0.1	0.10	1.030
4.6	0.0	0.1	0.10	1.030
4.7	0.0	0.1	0.10	1.030
4.8	0.0	0.1	0.10	1.030
4.9	0.0	0.1	0.10	1.030
5.0	0.0	0.1	0.10	1.030

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

- 1.- Alexander G.S.
The polymerisation of monosilicic acids.
Am. Chem. Soc., J., 76, 2094-2098
E.U.A., 1954
- 2.- Alexander G.S.
The reaction of low molecular weight silicic acids
with malvodic acid.
J. Phys. Chem., 59, 2655-2657
E.U.A., 1955
- 3.- American Society of Civil Engineers
Water treatment plant design; capítulo 6.
Ed. American Water Works Association, Inc.
New York, E.U.A.
- 4.- Camp T.R.
Sedimentation and the design of settling tanks.
American Society of Civil Engineers, Paper 2285
E.U.A., 1945
- 5.- Caroon F.C.
Constitution of colloidal silica.
Trans. Faraday Soc., 36, 954-973
E.U.A., 1940
- 6.- C.F.E. Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto
Análisis químico de pozos integrados, 1987
Registro del Departamento de Geología
S.G. México, 1987

- 7.- C.F.E. Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto.
Planta Geotérmica de Cerro Prieto
Folleto de divulgación.
E.C., México, 1982
- 8.- C.F.E. Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto
Procesos de excedentes de agua geotérmica de desecho
Informe CEE/E/10/PEAS-01/88
E.C., México, 1988
- 9.- C.F.E. Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto
Reporte de producción.
Superintendencia de Mantenimiento y Operación de Pozos
E.C., México, 1982
- 10.- Christopher H. and Anstead H.
Geothermal Energy
Ed. John Wiley and Sons
New York, E.U.A., 1976
- 11.- Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa
Central Geotérmica de Amuzchapan
Folleto de divulgación
San Salvador, El Salvador, 1981
- 12.- Cuellar G.
Comportamiento de la sílice en aguas geotérmicas de desecho
Proceedings of the second United Nations Symposium on
the development and use of geothermal resources.
San Francisco, Cal., E.U.A., 1975
- 13.- Fournier R.O. and Ross J.J.
The solubility of amorphous silica in water at high

- temperature and high pressures.
U.S. Geological Survey
Menlo Park, Cal., U.S.A.
- 14.- Fournier R.O.
Silica in Thermal waters: Laboratory and field investigations.
Proc. Int. Symp. on Hydrogeochemistry and Biogeochemistry,
Tokyo, Japan, 1970
- 15.- Garibaldi F.
Reporte del reactor-clarificador para el tratamiento de salmuera.
Comisión Ejecutiva de Obras Pùblicas
S.C., Mexico, 1966
- 16.- Goto K.
Effect of the pH on polymerization of silicic acid.
J. Phys. Chem., 60, 1007-1008
U.S.A., 1956
- 17.- Goto K.
Solubility of amorphous silica versus pH at different temperatures.
Journal of Chemical Society, 74
Japan, 1955
- 18.- Gudmundsson J.S.
Low temperature geothermal use in Iceland
Geothermics, 2
England
- 19.- Hurtado R., Garibaldi F., Cortez C.

Tratamiento de efluentes para reafirmación y pruebas
de reafirmación sin tratamiento.

Actas del segundo simposio sobre el Campo Geotérmico
de Cerro Prieto

S.C., México., 1979

20.- Iler R.K.

The colloidal chemistry of silica and silicates

Dornell University Press

Ithaca, N.Y., U.S.A., 1976

21.- Kitahara S.

The polymerization of silicic acid obtained by the
hydrothermal treatment with quartz and the solubility
of amorphous silica.

Rev. Phys. Chem., 30, 131-137

Japan, 1960

22.- Krauskopf K.E.

Dissolution and precipitation of silica at low
temperatures.

Geochim. Cosmochim. Acta, 19, 1-26

U.S.A., 1956

23.- Marsh III A.R., Klein C. and Vermeulen T.

Polymerization kinetics and equilibria of silicic acid
in aqueous systems.

Lawrence Berkeley Laboratory

University of California, U.S.A., 1975

24.- Hatzel and Eddy Inc.

Wastewater Engineering, collection, treatment, disposal

Capitulo 8. Physical unit operations

Ed. Mc. Graw Hill Book Company

U.S.A.

- 25.- Quong R. et al
Processing of geothermal brine effluents for injection
Geothermal Resources Council Transactions, 2
U.S.A., 1978
- 26.- Nassim P. S.
Introduction to wastewater treatment processes
Capítulo 3. Sedimentation
Ed. Academic Press
U.S.A., 1977
- 27.- Rocha L. E.
Estudio de la cinética de polimerización de la sílice
en salmuera geotérmica de Cerro Prieto.
Tesis de maestría en química inorgánica
Universidad de Guanajuato, México, 1982
- 28.- Rothbaum H.P. and Anderson S.H.
Removal of silica and arsenic from geothermal discharge
waters by precipitation of useful silicates.
Proceedings of the second United Nations symposium on
development and use of geothermal resources.
San Francisco, Calif. U.S.A., 1975
- 29.- Schroeder E.D.
Water and wastewater treatment
Capítulo 3. Solids removal
Ed. Mc. Graw Hill
U.S.A., 1977
- 30.- Truesdell A.H. et al
The origin of the Cerro Prieto geothermal brine

U.S. Geological Survey
San Francisco, Calif., U.S.A.

31.- Van Note R.H. et al.
A cost effective treatment system for the stabilization
of spent geothermal brines.
Geothermal Resources Council Transaction, 2
U.S.A., sept 1975

32.- Vanow R.G.
Understanding nephelometric instrumentation
Tech Chemical Company. Folieto
U.S.A., 1981

33.- Wang D., Yaw A., Tiao L.
Kinetics of silica polymerization
Lawrence Berkeley Laboratory
University of California, U.S.A., May 1980

34.- Wesley W.E.
Industrial water pollution control
Ed. Mc Graw Hill Book Company
N.Y., U.S.A.

35.- White B.E. et al
Silica in hot spring waters
Georgia Geomochia Acta, 10, 27-29
U.S.A., 1956

36.- Yanagase T. et al
The properties of scales and methods to prevent them
Geothermics, special issue 2, 2
U.S.A., 1970