

DIRECTORIO DE PROFESORES DEL CURSO : PERFORACION  
DE POZOS DE AGUA .

---

ING. JORGE ENRIQUE ALVARADO ORTUÑO  
Subdirector de Geohidrología y Zonas Aridas  
Dirección de Geohidrología  
S.A.R.H.  
P. de la Reforma 69-19°  
México 6, D.F.  
Tel. 591.09.48

ING. EDUARDO BARNETCHE GONZALEZ  
Presidente  
Perforaciones Especializadas, S.A.  
Culiacán 123 Despacho 1308  
México 11, D.F.  
Tel. 584.30.95

ING. ANDRES BENTON CUELLAR  
Jefe de Superintendentes  
Desarrollo de Recursos Naturales  
Sección Perforaciones  
Grupo ICA  
Minería 145 Entrada I 1°Piso  
Col. Escandón  
Tel. 516.04.60 Ext. 382 ó 166

ING. JOSE ERNESTO BIESTRO MEDINILLA  
Subdirector General  
Construcción de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado  
S.A.H.O.P.  
P. de la Reforma 77-10°  
México, D.F.  
Tel. 546.95.20 Ext. 183

ING. JOSE MARIA BOLIVAR DEL VALLE  
Gerente  
Construcciones Horizonte, S.A.  
Galeana III  
México 22, D.F.  
Tel. 573.79.00



ING. ROBISEL CHIÑAS LALO  
Director General  
Ingeniería y Geotecnia, S.A.  
Tajín 147  
Col. Narvarte  
México 12, D.F.  
Tel. 519.23.26

ING. RUBEN CHAVEZ GUILLEN  
Jefe del Departamento de Hidrología  
Subterránea  
S. R. H.  
Abraham González 3-4°  
México 6, D.F.  
Tel.: 546.66.36

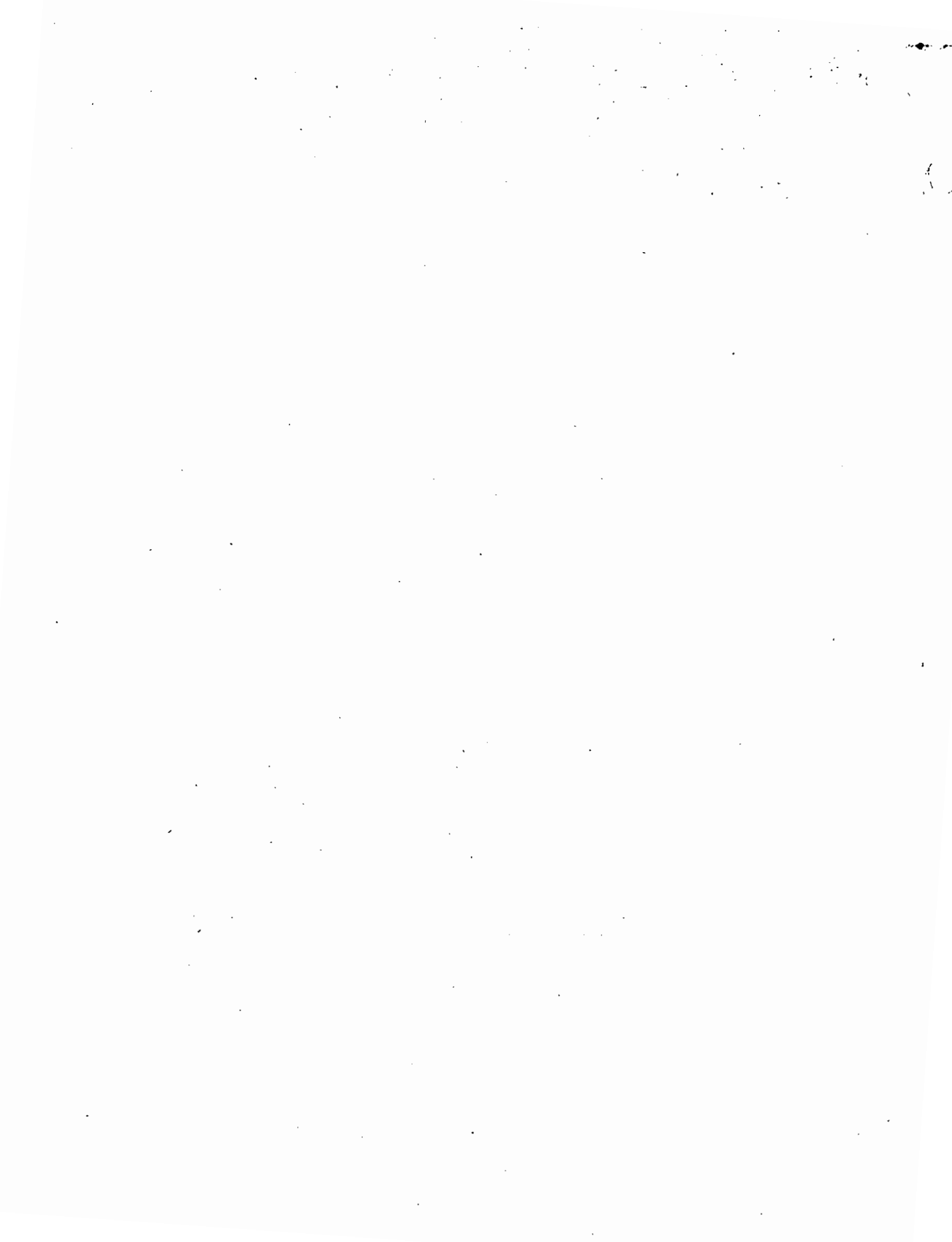
ING. GUILLERMO DE ALBA  
Jacuzzi Universal  
Monterrey, N.L.  
Tel.: 33.29.40

ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
Subjefe del Departamento de Exploración  
Dirección de Geohidrología y Zonas Áridas  
S. A. R. H.  
Abraham González 3 Mezanine  
México 6, D.F.  
Tel.: 535.09.76

ING. HEINZ LESSER JONES  
Director  
Dirección de Geohidrología y Zonas Áridas  
S. R. H.  
P. de la Reforma 69  
México 6, D.F.  
Tel.: 591.08.37

ING. LUIS LARA TRUJILLO  
Superintendente General Interino  
Nuevas Técnicas  
Gerencia de Exploración  
P. E. M. E. X.  
Marina Nat. 329 Edif. A-6°  
México 17, D.F.  
Tel. 531.63.08

ING. JORGE ANTONIO TRUJILLO CANDELARIA  
Jefe del Departamento de Exploración  
Dirección de Geohidrología y Zonas Áridas  
S.A.R.H.  
Abrahan González 3-Mezanine  
México 6, D. F.  
Tel. : 535.09.76



## PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

Fecha	Duración	Tema	Profesor
Marzo 6	17 a 19:30 h	1. LOCALIZACION	
		1.1 Geología y Geohidrología	Ing. Robisel Chiñas Laió
		1.2 Geofísica	
" 7	19:30 a 21 h	1.3 Formaciones acuíferas	Ing. Jorge Antonio Trujillo
	17 a 18:30 h	Aluviones	Candelaria.
		Basaltos	
		Calizas	
		Otros	
		1.4 Prospección Geohidrológica	
		1.5 Fotointerpretación	
" 7	18:30 a 19:30 h	1.6 Trazadores	Ing. Juan Manuel Lesser Illades
	19:30 a 21 h	1.7 Registros Eléctricos	
		2. TECNICAS DE PERFORACION	
" 8	17 a 18 h	2.1 Perforabilidad de las rocas	Sr. Cordero
	18 a 19 h	2.2 Percusión simple	Ing. José Luis Sánchez Lazcano
		2.3 Pescas	
	19 a 21 h	2.4 Percusión neumática	Ing. Andrés Bentón Cuellar
		2.5 Perforación	
		Aire	
		Aire y espumantes	
		10. DIVERSOS	
" 9	17 a 18:30 h	10.1 Flujo a través de medios porosos	Sr. Jay H. Lehr
	18:30 a 21:30 h	10.2 Diversos aspectos de la perforación	Ing. José Luis Sánchez Lazcano
" 10	17 a 19 h	2.6 Sistema rotatorio	Ing. Ernesto Reguera Roa.
		Circulación directa	
		Lodos de perforación	
		Pescas	
	19 a 20 h	Circulación inversa	Ing. Héctor Silva Gutiérrez

PERFORACION DE POZOS PARA AGUA (2)

Fecha	Duración	Tema	Profesor
Marzo 10	20 a 21 h	5. TRATAMIENTO, DESARROLLO Y REHABILITACION 5.1 Limpieza 5.2 Sifoneo 5.3 Tratamiento con aire	Ing. José María Bolívar del Valle
" 13	17 a 19 h	4. TERMINACION 4.1 Lavado inicial 4.2 Colocación de ademes 4.3 Colocación de filtros 4.4 Verticalidad 4.5 Tapones de fondo 4.6 Canastas 4.7 Centraores y otros aditamentos 4.8 Cementaciones	Ing. Ernesto Biestro Medinilla
	19 a 21 h	3. DISEÑO 3.1 Finalidad del Pozo 3.2 Filtro de grava 3.3 Ademes	Ing. José María Bolívar del Valle
" 14	17 a 19 h	5.4 Pistoneo 5.5 Hielo seco y nitrógeno 5.6 Tratamiento con ácidos	Ing. Juan José Rocha Rangel
	19 a 20 h	6. AFOROS 6.1 Equipos de aforo	Ing. José San Vicente Ruy
	20 a 21 h	6.2 Interpretación 6.3 Eficiencia	Ing. José María Bolívar del Valle

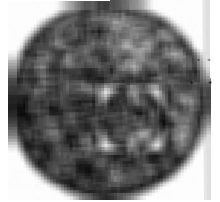
PERFORACION DE POZOS PARA AGUA (3)

Fecha	Duración	Tema	Profesor
Marzo 15	17 a 18:30 h	7. DISEÑO Y SELECCION DE EQUIPOS DE BOMBEO	
	18:30 a 19:30 h 19:30 a 21 h	7.1 Tipos de bombas Centrífuga Turbina vertical Sumergible 7.2 Tipos de motores 7.3 Cabezales 7.4 Subestaciones 7.5 Arancadores	Ing. Jorge Magaña  Ing. Roberto Franyutti García Ing. Antonio García Dávila
" 16	17 a 19 h	8. EVALUACION 8.1 Pruebas de bombeo 8.2 Transmisibilidad 8.3 Almacenamiento 8.4 Cuantificación	Ing. Rubén Chávez Guillén
	19 a 21 h	8.5 Explotación 8.6 Recarga de acuíferos 8.7 Interface e intrusión salina	Ing. Ignacio Saíñz Ortíz
" 17	17 a 19 h	9. CONTROL Y OPERACION DE LOS APROVECHAMIENTOS	
" 17	17 a 19 h	9.1 Sistemas de control 9.2 Formas de control 9.3 Banco Nacional de información geohidrológica	Ing. Jorge Alvarado Ortuño
	19 a 21 h	10. DIVERSOS 10.3 Sistema Con Cor	Ing. Heinz Lesser Jones





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

TEMA : H I D R O G E O L O G I A .

PROF. ING. JORGE ANTONIO TRUJILLO CANDELARIA.

Marzo, 1978.



# PROSPECCION GEOHIDROLOGICA

Por: Ing. Jorge Antonio Trujillo Candelaria

## I. - EL CICLO HIDROLOGICO.

El agua subterránea explotable es un recurso renovable que proviene de la lluvia.

Como es sabido, el agua de lluvia que se precipita sobre los continentes, tiene tres caminos por seguir: 1) evaporarse para formar las nubes; 2) escurrirse por la superficie del suelo formando arroyos y ríos que finalmente vierten sus aguas al mar; 3) infiltrarse en el subsuelo para formar acuíferos. (Fig. 1)

De acuerdo con Garrels y Mackenzie (1971), del 100% del agua que se evapora, para incorporarse a la atmósfera en forma de nubes, el 86% proviene del mar y el 14% restante, de los continentes (Fig. 2) del 86% que se evapora en los océanos el 78% se precipita en el mismo mar y el 8% en los continentes.

El 14% de la evaporación que se efectúa en los continentes se precipita sobre ellos mismos haciendo un total de 22% con los 8% del mar; de este 22% se evapora el 14% escurre hacia el mar en forma de corrientes superficiales el 7% y solamente el 1% restante se infiltra en el subsuelo y en forma de agua subterránea circula hacia el mar.

En esta etapa del Ciclo es donde nos interesa encontrar el agua.

## II) DEFINICIONES.

Porosidad. - Poro significa intersticio, hueco. La porosidad de una roca es la relación del volumen de sus huecos con su volumen total (Fig. 3).

Permeabilidad. - La palabra permeable significa penetrable, un cuerpo es permeable si se deja atravesar por los fluidos o las radiaciones.

Para el caso que nos ocupa, la permeabilidad de las rocas es la propiedad de dejarse atravesar por el agua.

La permeabilidad en las rocas puede ser primaria cuando se forma al mismo tiempo que la roca, como los huecos que quedan en un depósito de grava al irse acumulando, o secundaria como en una roca compacta que por algún movimiento de la corteza terrestre se fractura y se adquiera.

## III) LAS ROCAS Y SU PERMEABILIDAD.

Al iniciarse el estudio de un lugar determinado lo primero que se debe conocer es su litología, ya que cada tipo de roca tiene una permeabilidad característica: esta propiedad limita las áreas de interés, pues la búsqueda se enfoca a las zonas donde se encuentren rocas consideradas favorables.

Para dar una idea aproximada de esta selección desde el punto de vista litológico, se presenta la siguiente tabla en la que se muestran algunos de los tipos de rocas más comunes en nuestro País. (Tabla I)

En la tabla aparecen tipos de rocas con características diferentes, sin embargo, son solo cuatro de estas, las que ofrecen posibilidades de permeabilidad para constituir acuíferos importantes, gravas, arenas, basaltos y calizas,

**Gravas y Arenas.** - Las gravas y arenas son sedimentos no consolidados constituídos por fragmentos de rocas arredondados por efecto del arrastre de los ríos que las transportan en grandes cantidades, depositándolas en su propio cauce o en cuencas lacustres y marinas.

La permeabilidad de estos depósitos es mayor cuando tengan mayor uniformidad en el tamaño de los fragmentos. Si hay una gran diversidad de tamaños, los más pequeños rellenan los espacios entre los grandes disminuyendo en forma notable su permeabilidad. (Fig. 3).

Por su origen y medios de depósitos, las gravas están íntimamente relacionadas con las arenas y las arcillas, por lo que es común encontrarlas intercaladas en capas o mezcladas.

Los mayores afloramientos de gravas y arenas en el Altiplano Mexicano y en el Noroeste del País, son sedimentos de edad terciaria (Las Cuencas Lacustres Terciarias del Altiplano Mexicano, Jorge A. Trujillo C. 1975), y en ellos se localizan los principales acuíferos en explotación en el País. (Fig. 4)

Las principales diferencias entre sedimentos terciarios y aluviales recientes son:

1º Es común encontrar a los sedimentos terciarios intercalados o cubiertos por materiales volcánicos, riolíticos, andesíticos y basálticos.

2º Los sedimentos terciarios por lo común están afectados por tectonismo en mayor o menor grado.

3º Por medio de análisis micropaleontológico, ha sido posible datar la edad de los sedimentos terciarios gracias a que es frecuente que estos contengan diatoméas fósiles.

4º El espesor de los sedimentos terciarios es en general, mayor que el de los aluviones recientes pues el País, debido a su geomorfología, se encuentra actualmente en una etapa de erosión activa.

Algunas recomendaciones para dar localizaciones sobre gravas y arenas son:

1º Deben buscarse lugares donde las gravas y arenas estén bien seleccionadas por tamaños, procurando evitar las zonas donde el contenido de arcilla sea grande.

2º Deben evitarse dar localizaciones en parteaguas o en mesetas cortadas por barrancas profundas.

3º Si se pretende perforar sobre riolitas o andesitas con el fin de atravesarlas para encontrar subyacentes gravas y arenas terciarias debe primero determinarse aunque sea en forma aproximada el espesor de cubierta, ya sea por métodos geológicos o geofísicos, pues podría resultar demasiado potente y ser incosteable su perforación.

Basalto. - Es una roca ígnea, volcánica, básica; se presenta en forma de derrames lávicos, brechas, aglomerados, conos cineríticos y de tezontle. Su gran permeabilidad se debe a los espacios huecos entre coladas superpuestas, a la existencia de fracturas originadas por enfriamientos, a las grietas originadas por la resistencia a la deformación plástica de las corrientes de lava solidificada y a las zonas de tezontle.

La presencia de horizontes de depósitos lacustres y suelos arcillosos poco permeables es frecuente en las potentes series de derrames lávicos, originado acuíferos colgados, generalmente de bajo potencial pero de gran importancia, debido a la escasez de otros tipos de acuíferos en esas zonas.

La porosidad y permeabilidad de las rocas volcánicas tiende a disminuir con el tiempo geológico, debido al sellamiento de los espacios huecos con los materiales arcillosos producto de la descomposición de las propias rocas.

Para dar localización sobre éste tipo de rocas donde la permeabilidad es generalmente grande, deben escogerse sitios bajos, respecto a la topografía regional, pues es común que el agua que se infiltra en ellos, se drene rápidamente.

**Calizas.** -Las calizas son rocas formadas principalmente por carbonato de calcio, originadas por procesos orgánicos y químicos en medios lacustres y marinos, las cuales han emergido a la superficie por medio de movimientos tectónicos.

Estas rocas tal como surgen a la superficie, por lo común presentan baja permeabilidad que puede ser primaria como la causada por la porosidad entre los fragmentos fósiles en las zonas arrecifales o en los planos de estratificación entre dos capas superpuestas o secundaria, como la que se presenta por fracturamiento y principalmente por la disolución de la roca por el agua de lluvia.

El agua de lluvia a su paso por la atmósfera se carga de ácido carbónico, el cual ataca fuertemente a las rocas calcáreas, disolviéndolas. Al caer sobre ellas, si encuentra alguna zona fracturada, así sea poco permeable inicia su infiltración y ataque ensanchando las grietas y produciendo conductos y cavernas, lo cual incrementa grandemente su permeabilidad.

Debido a la plasticidad de este tipo de rocas, es común que al verse afectados por movimientos tectónicos no se fallen y fracturen tan fácilmente sino que primero se pliegue, formando antilinales y sinclinales.

Para dar localizaciones sobre este tipo de rocas, se deben localizar:

a). - Zonas donde las calizas estén lo más pura que sea posible, o sea que su contenido de arcilla sea mínimo, pues mientras más contenga será menos soluble.

b). - Las zonas donde se observan gran cantidad de cavernas y conductos de disolución son favorables.

c). - Las zonas arrecifales, frecuentemente ofrecen buena permeabilidad.

d). - Que no hayan capas de lutitas intercaladas en gran proporción.

e). - El fracturamiento, por lo general es mayor en los lomos de los anticlinales y en los fondos de los sinclinales resultando sitios buenos para la perforación de pozos, sin embargo, los lomos anticlinales hay ocasiones en que son de difícil acceso y los sinclinales es

frecuente que estén cubiertos por gruesos depósitos de formaciones impermeables, por lo que muchas de las perforaciones se dan en los flancos de estas estructuras.

f). - Siendo la permeabilidad, entre estratos la más importante, es conveniente dar localizaciones de tal manera que corten el mayor número de estratos posible, siendo más favorables las zonas que han sido afectadas por tectonismo. Por lo que es recomendable situarlas en formaciones medianamente plegadas.

g). - Existen formaciones calcáreas que en un determinado lugar se presentan permeables y producen eficientemente y en distancia más o menos cortas se encuentran impermeables e improductivas. Uno de los principales motivos de este comportamiento son los cambios laterales en su composición, como por ejemplo, un aumento de su contenido en arcilla, lo que provoca una disminución en su solubilidad.

Otras Rocas. - Los demás tipos de rocas no deben desecharse totalmente, pues hay varios lugares donde algunas de ellas están produciendo en forma eficaz.

Sin embargo, deben considerarse con posibilidades, mucho menores pues su permeabilidad dependerá de zonas de fracturamiento, las cuales no siempre son fáciles de detectar a profundidad.

Hay ocasiones en que no se tiene otra alternativa y es necesario dar localizaciones para perforación sobre este tipo de rocas, en cuyo caso deben buscarse zonas afectadas por fallas y fracturas, tratando de cortarlas en forma y a la profundidad más conveniente. De ser posible se recomienda efectuar exploraciones directas con pozos de pequeño diámetro, con equipo de muestreo de núcleos.

#### IV METODOS DE EXPLORACION. -

Los métodos de exploración se dividen en directos e indirectos. - Los métodos directos más comunes consisten en observaciones de campo y perforaciones; los indirectos en métodos geofísicos.

Métodos Directos. - En la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, los métodos directos de exploración más utilizados son:

Observaciones de campo. - En éstas se aplican lo que se ha tratado de exponer en los párrafos anteriores. Para lo cual nos auxiliamos con planos geológicos, topográficos, climatológicos, fotografías aéreas y equipo de campo, esencialmente brújula, altímetro y martillo.

- Perforaciones Exploratorias. - Consisten en perforaciones en diámetro de 3 a 4 1/2", con brocas de diamante o de roles, con o sin muestreo de núcleos. En estas perforaciones se obtienen los siguientes datos:

- a). - Columna litológica.
- b). - Nivel estático.
- c). - Calidad del agua.
- d). - Una idea sobre las posibilidades de producción de acuerdo con las pérdidas de fluidos de perforación, sifoneo, extracciones con émbolo, inyección de agua, etc.

Además se puede obtener el registro eléctrico del pozo.

Métodos indirectos. - La característica principal de estos métodos es que las mediciones de ciertos parámetros físicos (resistividad, elasticidad, etc.) se realizan desde la superficie del terreno, y en base a éstos es posible inferir ciertas condiciones del subsuelo. Dentro de esta clasificación se encuentran los métodos geofísicos, de los cuales, los más yormente utilizados en la prospección para el agua subterránea son:

- a). - Método Eléctrico de resistividad.
- b). - Método Sísmico de refracción.

Los cuales nos ayudarán entre otros, a definir la geometría del sistema acuífero y auxiliarnos en diversos problemas de tipo estructural.

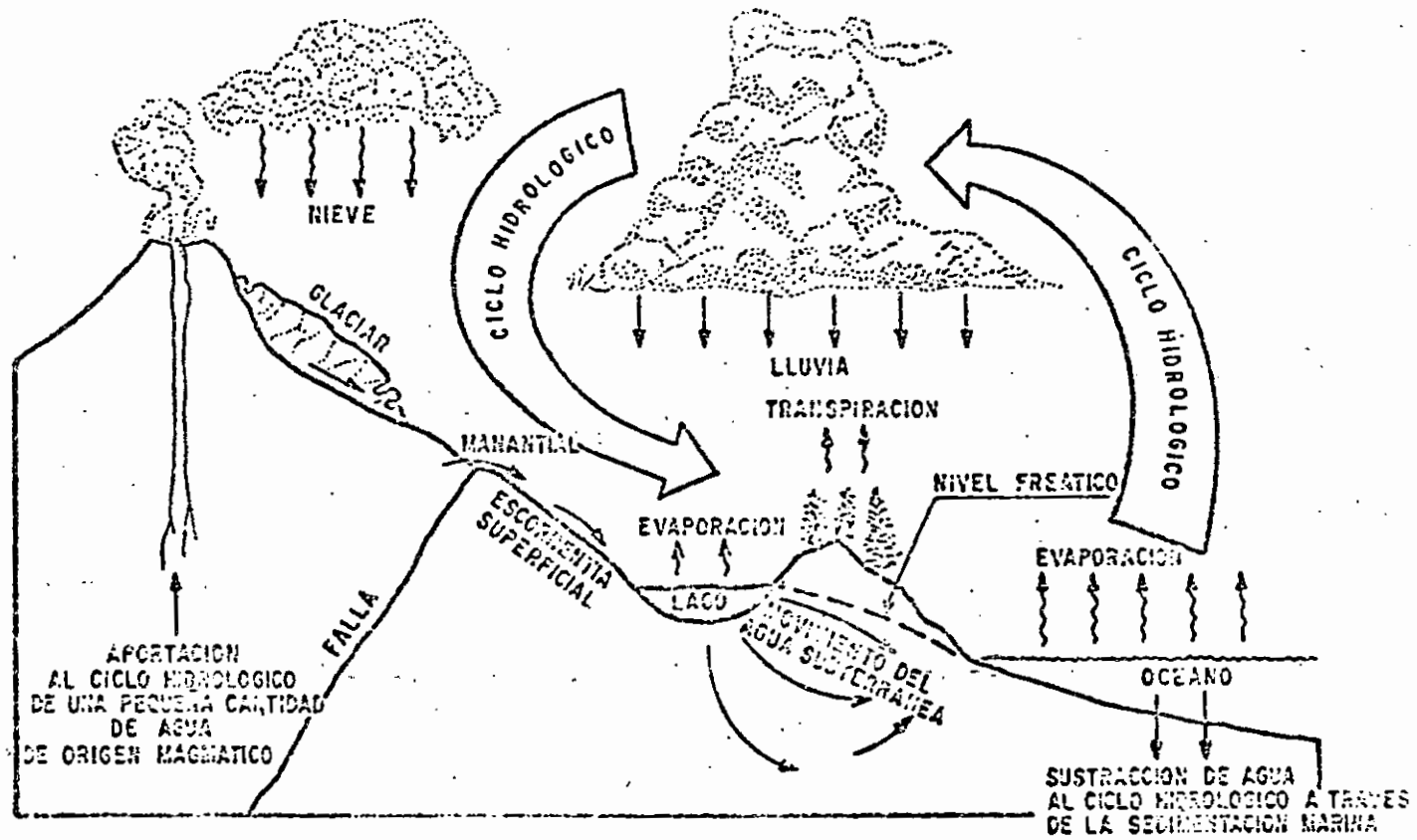


FIG. - 1



# C I C L O H I D R O L O G I C O

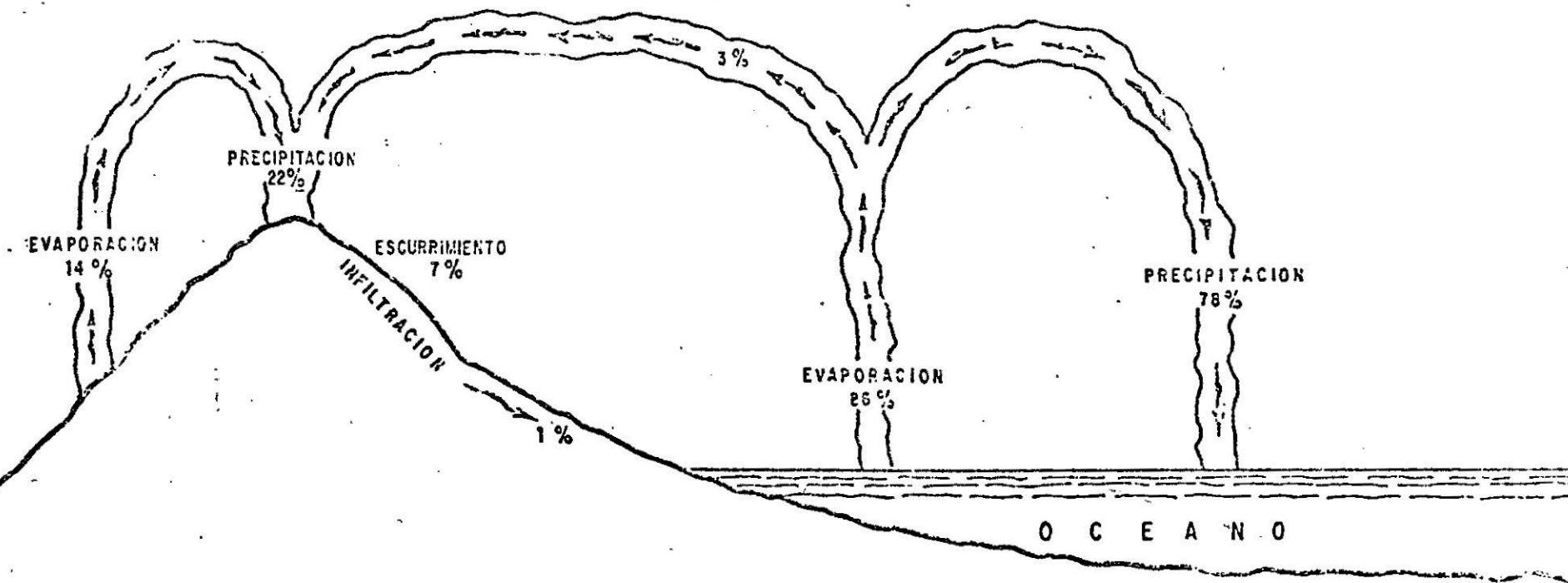
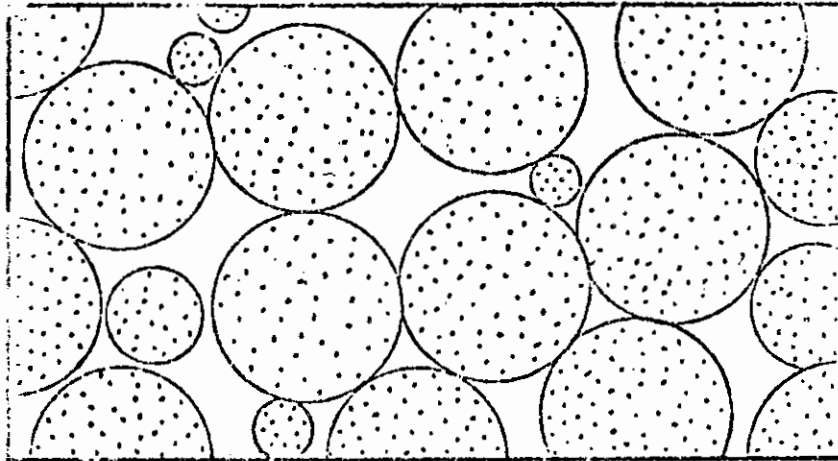
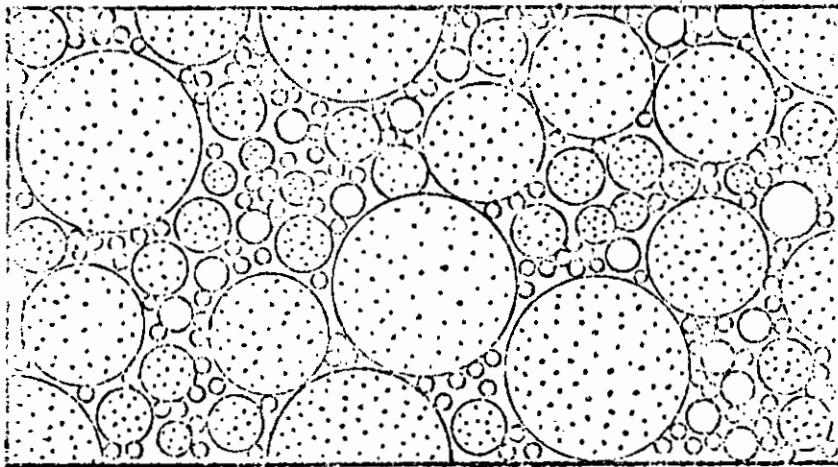


FIG. 2



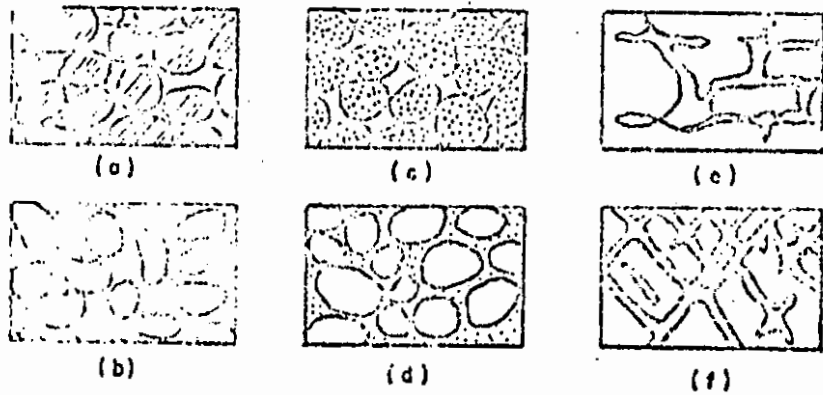
POROSIDAD 32%



POROSIDAD 17%

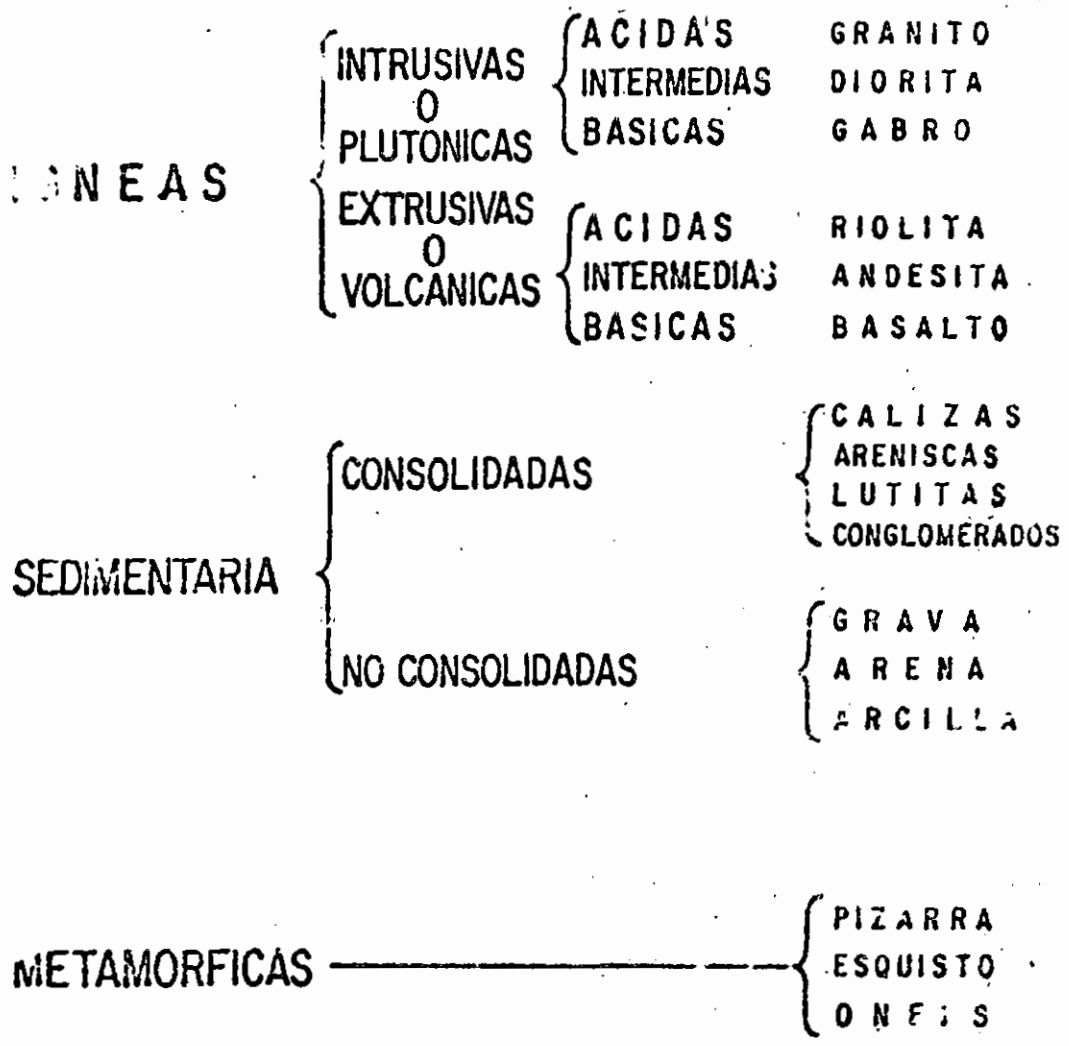
Variación de la porosidad debida al grado de homogeneidad del tamaño de los granos. Los números que figuran al pie de cada dibujo indican el porcentaje de porosidad de la muestra.

FIG. - 3



Distintos tipos de intersticios y relación entre la textura y la porosidad de las rocas. a) Depósito sedimentario de elementos de tamaño uniforme; porosidad alta. b) Depósito sedimentario constituido por elementos heterométricos; baja porosidad. c) Depósito homométrico de cantos rodados porosos; porosidad muy alta. d) Depósito sedimentario cuya porosidad ha disminuido por colmatación de los intersticios con materiales finos. e) Rocas cuya porosidad se debe a fenómenos de disolución. f) Rocas porosas por fracturación.

FIG. - 3a



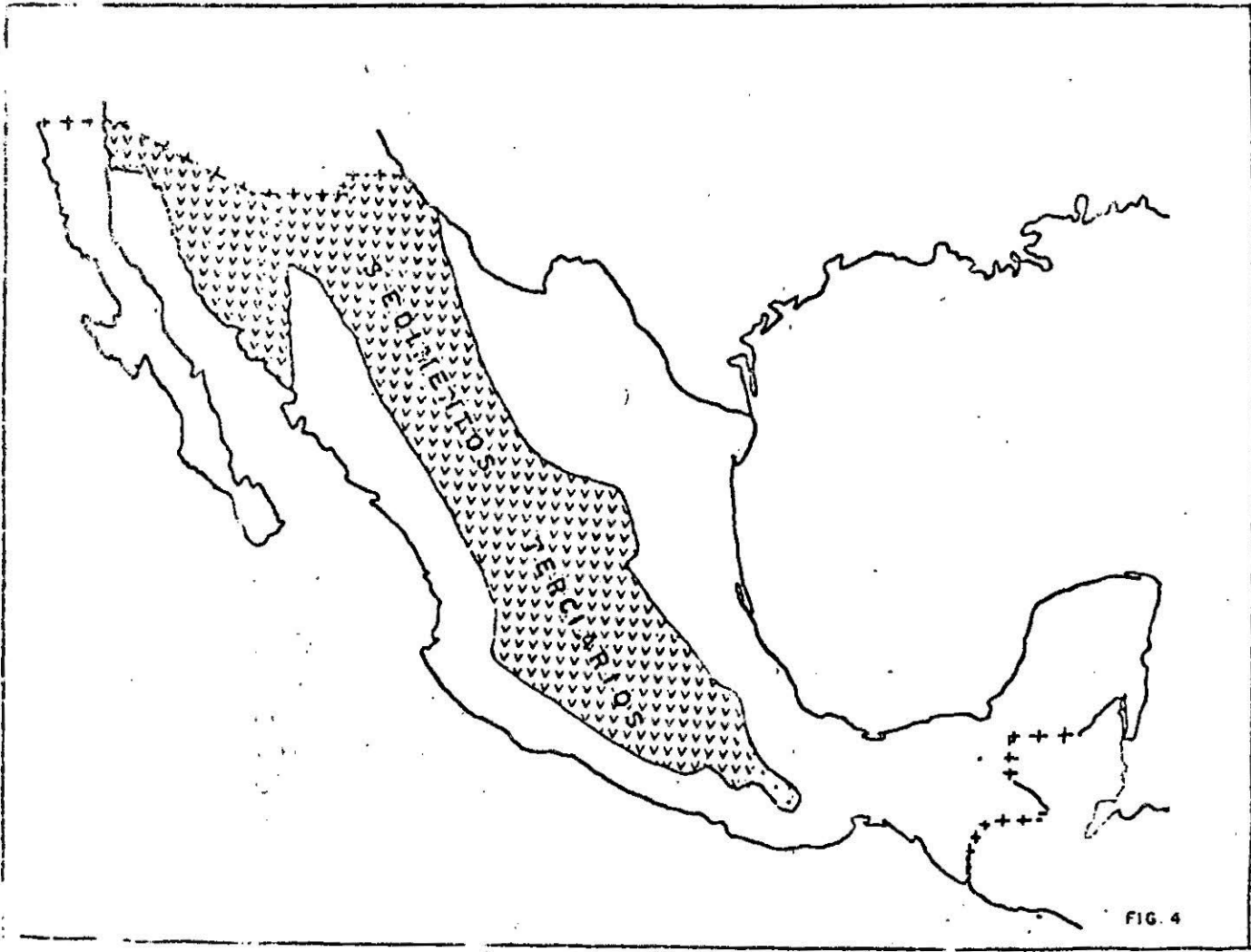


FIG. 4

---

## LAS CUENCAS LACUSTRES TERCIARIAS DEL ALTIPLANO MEXICANO.

Por: Inq. Jorge Antonio Trujillo Candelaria

### R E S U M E N

En la República Mexicana, las rocas volcánicas de tipo riolítico ocupan grandes extensiones, para fines de exploración geohidrológica, se consideraba, hasta hace poco tiempo, que este tipo de rocas generalmente impermeable, formaba el basamento en que descansaban los acuíferos contenidos en materiales granulares formados por gravas y arenas.

De esta manera, las áreas en que afloran rocas riolíticas eran desechadas para la perforación de pozos, pues éstas tienen muy pocas posibilidades de presentar permeabilidad. De modo semejante, cuando una perforación alcanzaba este tipo de rocas, de inmediato se daba la orden de parar, pues las perspectivas de encontrar más abajo zonas permeables, se consideraban prácticamente nulas.

Recientemente el concepto ha cambiado, pues se ha comprobado que, durante el período terciario (Tabla 1), la disposición de las Sierras Madre Occidental, Oriental y del Sur, dió lugar, en el Altiplano Mexicano, desde Chihuahua hasta Oaxaca, a la formación de extensas zonas lacustres en las que se depositaron potentes espesores de materiales detríticos constituidos por gravas, arenas y arcillas (Fig. 1).

Contemporánea a esta depositación lacustre, se presentó en el área, una gran actividad volcánica intermitente que cubrió con sus cenizas y lavas a los materiales de acarreo antes descritos, con los que se intercalaron al continuar la sedimentación lacustre.

De acuerdo con esta interpretación, se abre una nueva posibilidad en la prospección geohidrológica, pues abajo de las rocas volcánicas impermeables, pueden existir cuerpos de gravas y arenas que alojen importantes acuíferos de extensión regional.

En el año de 1973 el autor inició los trabajos de investigación y recopilación de información para dar forma a la presente teoría. A principios de 1975 el Ing. Heinz Lesser Jones, Director de Geohidrología y de Zonas Áridas de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, autorizó y apoyó el estudio a detalle de este nuevo concepto a fin de obtener la siguiente información:

- 1.- Extensión y continuidad de los sedimentos terciarios.
- 2.- Definir sus características geohidrológicas.
- 3.- Definir su funcionamiento como acuífero regional.

Los Estudios consisten en:

- 1).- Recopilación de información y reinterpretación de la geología regional.
- 2).- Elaboración de secciones geológicas-regionales.



# ESCALA DEL TIEMPO GEOLOGICO.

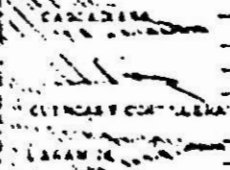
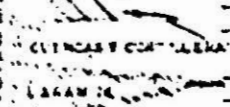



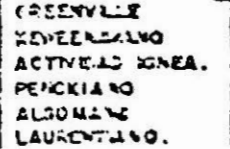
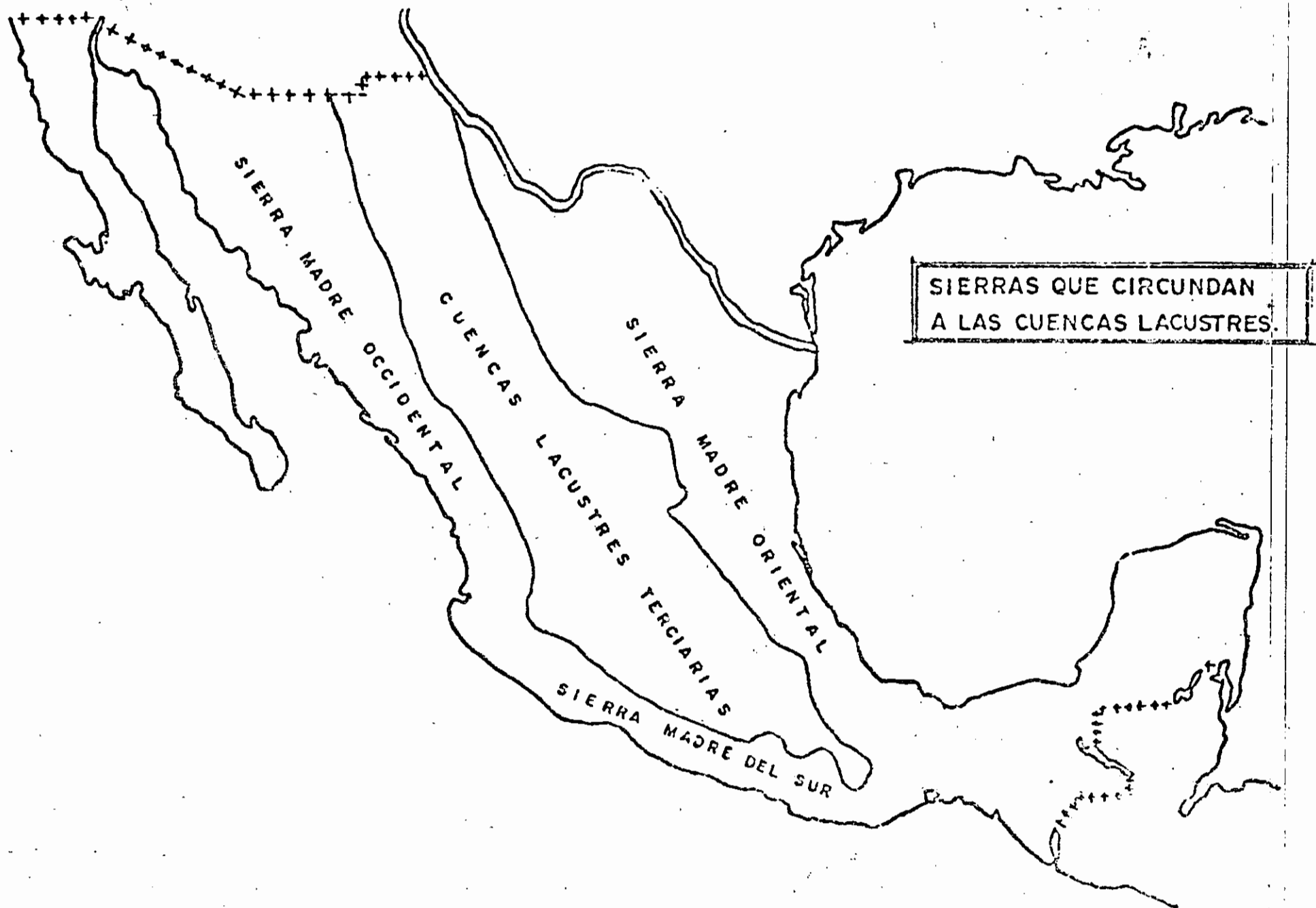
EPOCA	PERIODO		RASGOS CARACTERISTICOS.	OROGENIAS	MILLONES DE AÑOS ANTES DEL PRESENTE
	PERIODO	EPOCA			
CENOZOICO ERA	CUATERNARIO (C)	RECIENTE	HOMBRE MODERNO		0
		PLEISTOCENO	HOMBRE PRIMITIVO, GLACIACION		2.5 ± 3
		HOLOCENO	4-11.5 CARIBV. 43M		7 ± 1
	TERCIARIO (TERC.)	EOCENO	PRIMOS MAMIFEROS, PRIMOS REPTILES		23 ± 1
		OLIGOCENO	PRIMOS MAMIFEROS, PRIMOS REPTILES		35 ± 2
		PALEOCENO.	PRIMOS MAMIFEROS PLACENTARIOS		55 ± 2
MESOZOICO (Mes)	CRETACICO (K)		PRIMAS PLANTAS CON AFLORACION, CULMINACION DE LOS DINOSAURIOS Y AMONITAS, SIGUIDA DE LA EXTINCCION, EXTINCCION DE GLODOTRUNCANAS.		135 ± 5
	JURASICO (J)		PRIMOS PAJAROS, PRIMOS MAMIFEROS VERTEBRADOS, MUCHOS DINOSAURIOS Y AMONITAS		180 ± 5
	TRIASICO (R)		PRIMOS DINOSAURIOS, ABUNDANTES CICADEAS Y CONIFERAS.		225
PALEOZOICO (Pz)	PERMICO (Pzp)		EXTINCCION DE MUCHAS CLASES DE ANIMALES MARINOS, INCLUYENDO A LOS TRIDOLITAS, GLACIACION CONTINENTAL EN EL HEMISFERIO SUR.		260
	CARBONIFERO (Carb)	FENSLVANICO (P)	GRANDES PANTANOS DE CARBON, CONIFERAS, PRIMOS REPTILES, FUSULINIDOS.		310
		MISSISIPICO (Miss)	TIBURONES Y ANFIBIOS, ARBOLES CON GRANDES ESCAMAS Y HELECHOS CON SEMILLAS.		345
	DEVONICO (Dev)		PRIMOS ANFIBIOS, PECES, MUY ABUNDANTES.		400
	SILURICO (Sil)		PRIMAS PLANTAS TERRESTRES		435
ORDOVICICO (Ord)		PRIMOS PECES, DOMINAN LOS INVERTEBRADOS MARINOS.	500		
CAMBRICO (C)		PRIMER INDICIO ABUNDANTE DE VIDA MARINA, DOMINAN LAS TRILOBITAS Y DRAQUILOPODOS.	600		
PRE CAMBRICO	TARDIO		GLACIACION CONTINENTAL, FORMACIONES FERRICAS, GLACIACION CONTINENTAL ALAS MAS ANTIGUAS 800 MILL AÑOS ROCA " " 800 MILL AÑOS		600
	MEDIO				
	TEMPRANO				

FIG. 99

MODIFICADA DE LA ESCALA DEL TIEMPO GEOLOGICO DE J. ZUMBERG E C.A. NELSON 1978.

# CUENCAS LACUSTRES Terciarias



3).- Muestreo de rocas ígneas representativas para análisis isotópico (Potasio-Argón), para determinación de edades absolutas.

4).- Obtención de muestras de sedimentos lacustres para su análisis paleontológico (polen y esporas).

5).- Censo de pozos piloto y manantiales que puedan ilustrar el funcionamiento regional del acuífero en sedimentos terciarios.

6).- Obtención de muestras de agua para análisis físico-químicos y su interpretación.

## LAS CUENCAS LACUSTRES TERCIARIAS DEL ALTIPLANO MEXICANO.

### PRIMERA ETAPA DE DEPOSITACION.- CONGLOMERADOS ROJOS.

La existencia de depósitos terciarios aluvia--  
les y lacustres en el País, es conocida desde hace tiempo, sin em--  
bargo, su extensión, continuidad y en el caso particular, sus -  
grandes posibilidades acuíferas, no habían sido estudiadas.

Los sedimentos terciarios más conocidos en el\_  
País, son los Conglomerados Rojos, éstos afloran en una gran --  
área del Altiplano Mexicano, limitada por las Sierras Madre Occi-  
dental, Oriental y del Sur; fijar sus límites precisos es objeto  
de estudio actual (Fig. 2).

Algunas de las localidades estudiadas se encuen-  
tran en Zacatecas, Guanajuato y Taxco (Edwards. 1956).

Emiliano Zapata, 10 Km. al Sur de Cuernavaca, -

Tixtla, Gro. y numerosos sitios en la Cuenca del Balsas, donde -  
Fries (1957) definió el Grupo Balsas.

Ahuichila, Coah. (Schulze, 1953).

Otras localidades conocidas son:

Presa Las Lajas en Flores Magón, Chih.

Apizolaya, en Zacatecas,

Presa Las Piedras en El Grullo, Jal.

La Escondida, Villa de Ramos, S.L.P.

Huajuapán de León, Oax.

Litológicamente están constituidas por capas -  
bien estratificadas de conglomerados, areniscas y lutitas. Los  
fragmentos de los conglomerados son de composición muy variable,  
según el área de que se trate, en algunos lugares hay cierta se-  
lección de tamaños y en otros está mal clasificado.

Su color es preferentemente rojo, aunque puede

encontrarse en colores verde, morado o café.

Generalmente, se presentan en capas inclinadas, afectadas por fallas y fracturas, pero es difícil encontrar las plegadas.

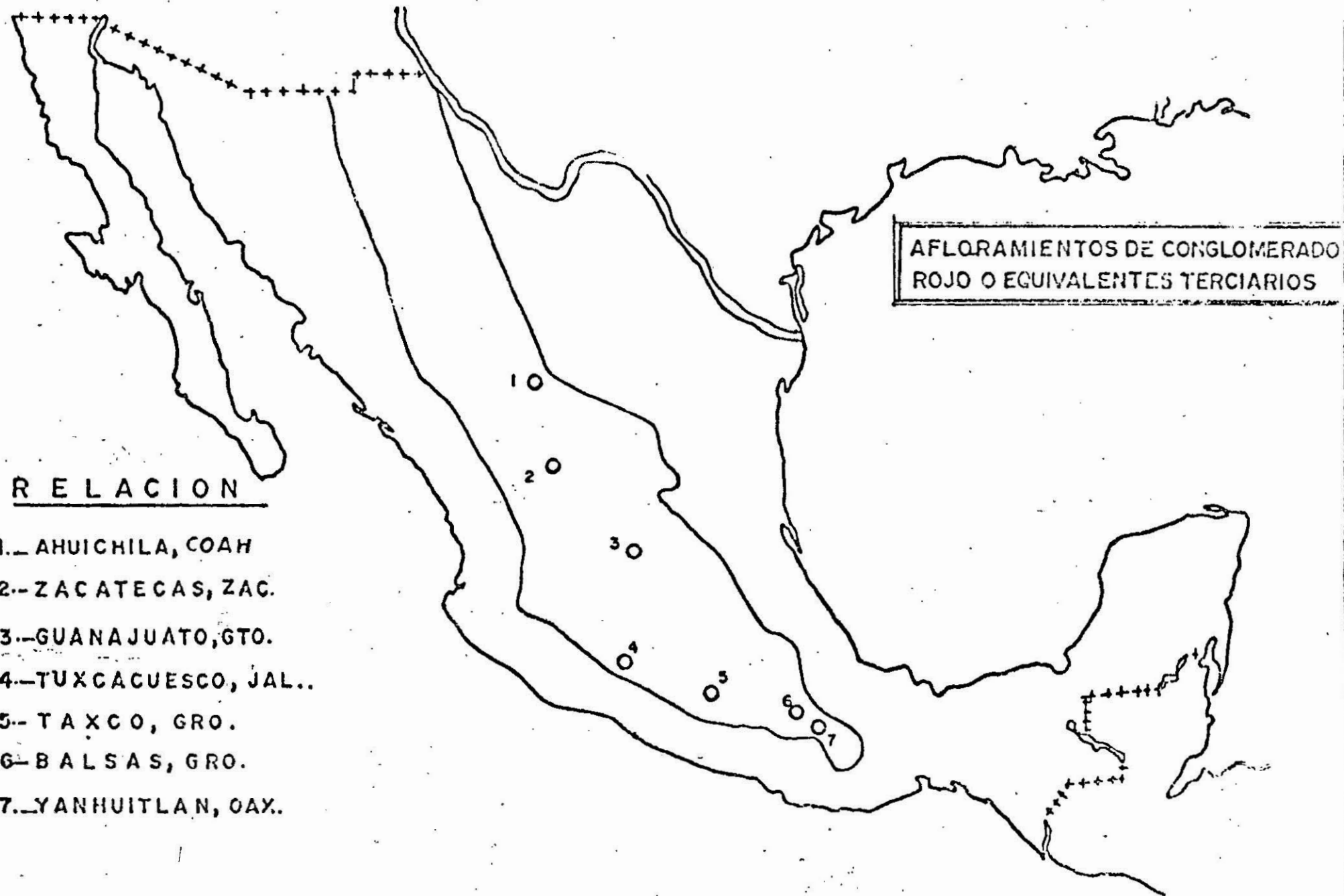
La intercalación con tobas riolíticas es frecuente.

La escasez de fósiles es notable y característica.

La presencia de areniscas y lutitas en capas bien estratificadas, revela un medio de depositación lacustre. El intenso tectonismo reinante durante este período y los cambios de clima, provocaron interrupciones en las condiciones lacustres, dando lugar a la depositación de sedimentos aluviales y conglomerados mal clasificados.

La distribución de sus afloramientos en áreas

# CUENCAS LACUSTRES TERCIARIAS



tan extensas como la del Grupo Balsas, desde Cuernavaca hasta -  
 Chilpancingo, hace pensar que su depósito se efectuó en grandes -  
 cuencas lacustres. La semejanza litológica entre estas formacio -  
 nes, aún en afloramientos separados por grandes distancias, su -  
 estratigrafía y sus relaciones con fenómenos ígneos intrusivos y  
 extrusivos, revelan temporaneidad y posiblemente hayan tenido in -  
 tercomunicación, pues no se observan barreras francas de rocas -  
 antiguas que hayan podido servir de límites entre cuencas.

Los orígenes de esta cuenca se remontan al perío -  
 do Cretácico, en ese tiempo, lo que ahora es territorio mexica -  
 no, estaba casi totalmente ocupado por mares, permanciendo emer -  
 gidas parte de la cordillera que ahora conocemos como Sierra Ma -  
 dre Occidental, constituida principalmente, por rocas ígneas ex -  
 trusivas e intrusivas. Hacia el sur, en el área actual de los -  
 Estados de Guerrero y Oaxaca, constituida por un complejo de ro -  
 cas metamórficas e intrusivas, permanecía emergida la Sierra Ma -  
 dre del Sur.

El resto del País se encontraba sumergido en -  
 mares de diferentes profundidades en los que se depositaban sedi



mentos predominantemente calcáreos, alcanzando espesores de miles de metros.

A fines del período Cretácico y principios del Terciario, la Revolución Laramide ocasionó que las capas sedimentarias depositadas en mares localizadas al Este de la Sierra Madre Occidental, se plegaran dando origen a la formación de la Sierra Madre Oriental.

Después de ésto, la disposición de las tres grandes Sierras había dado lugar a la formación de una gran cuenca cerrada y elevada. El continuo aporte de agua a la cuenca, por los ríos que en ella desembocaban, dió lugar a la formación de extensas zonas lacustres, que existieron durante el Eoceno-Oligoceno, recibiendo un gran aporte de sedimentos.

#### EJE NEOVOLCANICO.

A principios del Mioceno, la depositación de -

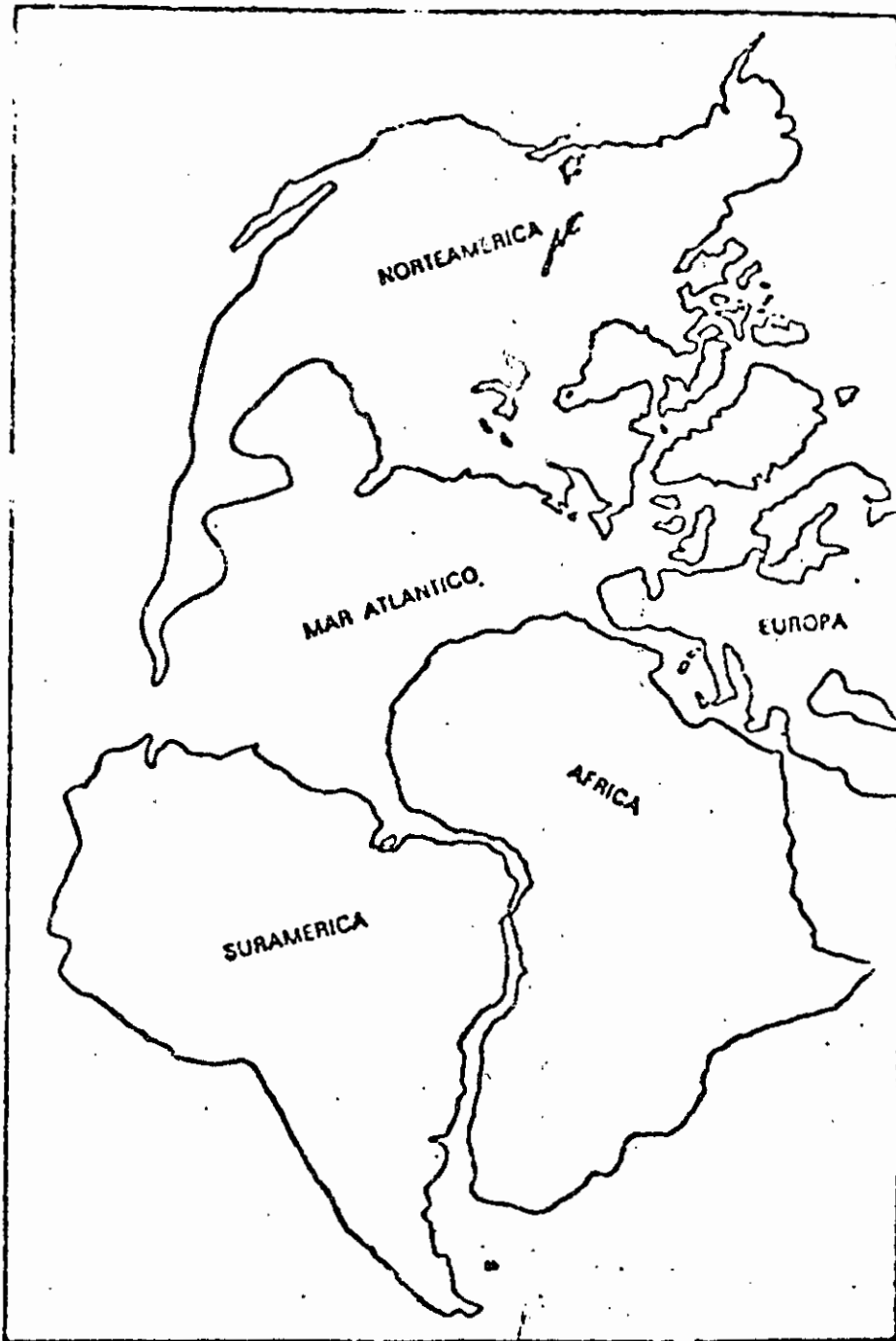
##.....

los Conglomerados Rojos se vió interrumpida bruscamente. En la parte central del País, una ancha franja que va de la costa del Pacífico a la del Golfo, pasando por Vallarta, Jal., México, D.F. y Jalapa, Ver., se vió afectada por un intenso fallamiento, producto de movimientos de placas tectónicas (Fig. 3) que abarcan la porción Sur del País, en desplazamiento que continúa actualmente hacia la zona de subducción de Acapulco, relacionados con la Placa de Cocos (Dewey, 1972) (Fig. 4).

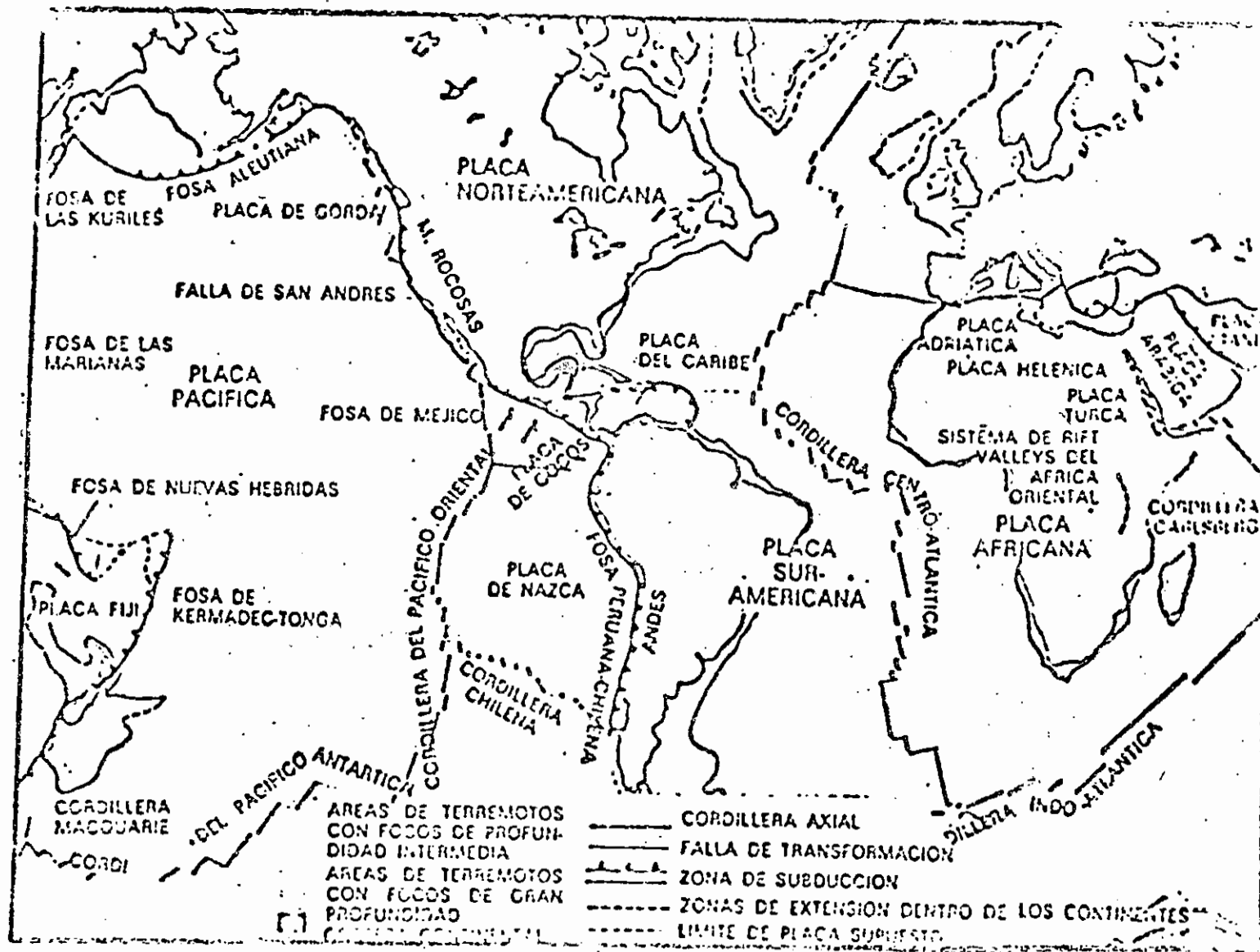
Estos movimientos dieron origen a la formación de profundos gravens con salida al mar, que ocasionaron que las zonas lacustres se drenaran totalmente, lo que produjo la repentina interrupción en la depositación de los conglomerados, quedando además, toda la zona expuesta a una intensa erosión.

Al mismo tiempo y como consecuencia directa del movimiento de placas descrito (Dietz y Holden, 1970), aparecieron en esa franja, numerosos volcanes de tipo andesítico y basáltico (Fig. 5), iniciándose la formación del Eje Neovolcánico. (Fig. 6). Algunos aparatos de este eje situados cercanos a las costas del Golfo y del Pacífico, acumularon lavas y piroclásticos.

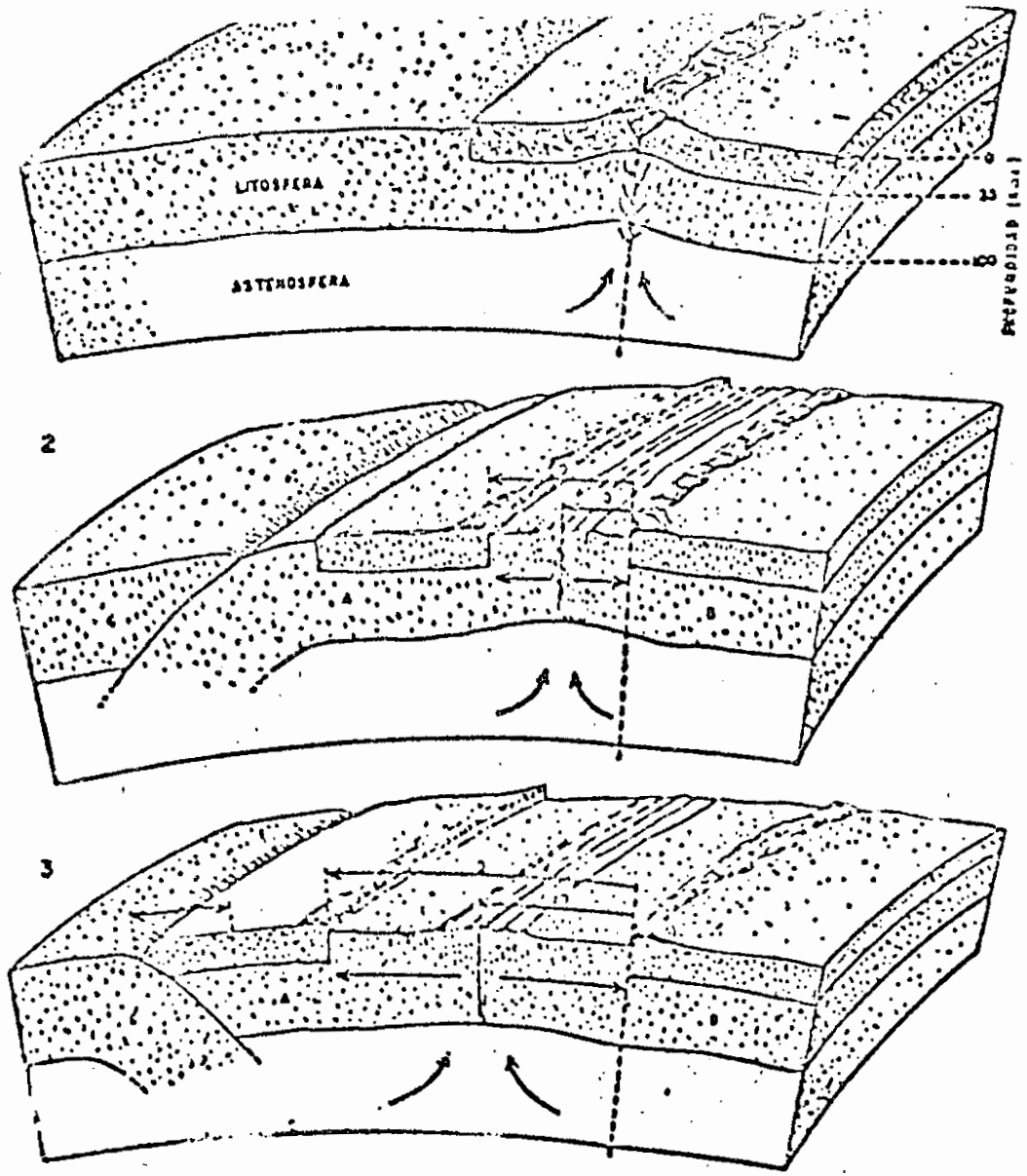
FIGURA No 3



EN UNA PRIMERA ETAPA de la deriva continental, el Atlántico era un mar con una circulación restringida por los continentes que le rodeaban. Al igual que el actual mar Rojo, las condiciones en el mar Atlántico favorecieron la preservación de la materia orgánica y la deposición de rocas evaporíticas, dando lugar posteriormente a la formación de acumulaciones de petróleo bajo los actuales bordes continentales.



(FIG. 4) PLACAS TECTONICAS (DEWEY 1972).



LA TEORIA DE LAS PLACAS TECTONICAS nos proporcionan un mecanismo para explicar la deriva continental. El proceso se inicia (1) cuando una sutura con tendencia a la expansion se forma bajo un continente (en color); el cual se encuentra sobre una placa cortical. Gran cantidad de material basaltico sale desde la astenosfera. La segunda y simultanea condicion que se requiere para la deriva continental es la formacion de una zona de subduccion o de fosas. en la cual la corteza oceanica de la nueva placa en movimiento (A) es sumergida y "devorada" (2). Como el nuevo continente transportado por la placa A es llevado como si fuera una balsa hacia la izquierda, se implanta una nueva cuenca oceanica entre las dos masas de tierra. En una tercera etapa (3) el continente situado sobre la placa A choca y sobremonta, anulándola, a la fosa a una distancia X y en algunas ocasiones puede producir la inversion o el cambio del buzamiento como en este caso, que da ser hacia el oeste pasa a buzar hacia el este. Puesto que hemos colocado arbitrariamente fijo el contenido situado sobre la placa B, la sutura centro-oceánica se traslada hacia la izquierda, permaneciendo siempre en el centro de la nueva cuenca oceánica en expansion, la cual tiene

# CUENCAS LACUSTRES TERCIARIAS

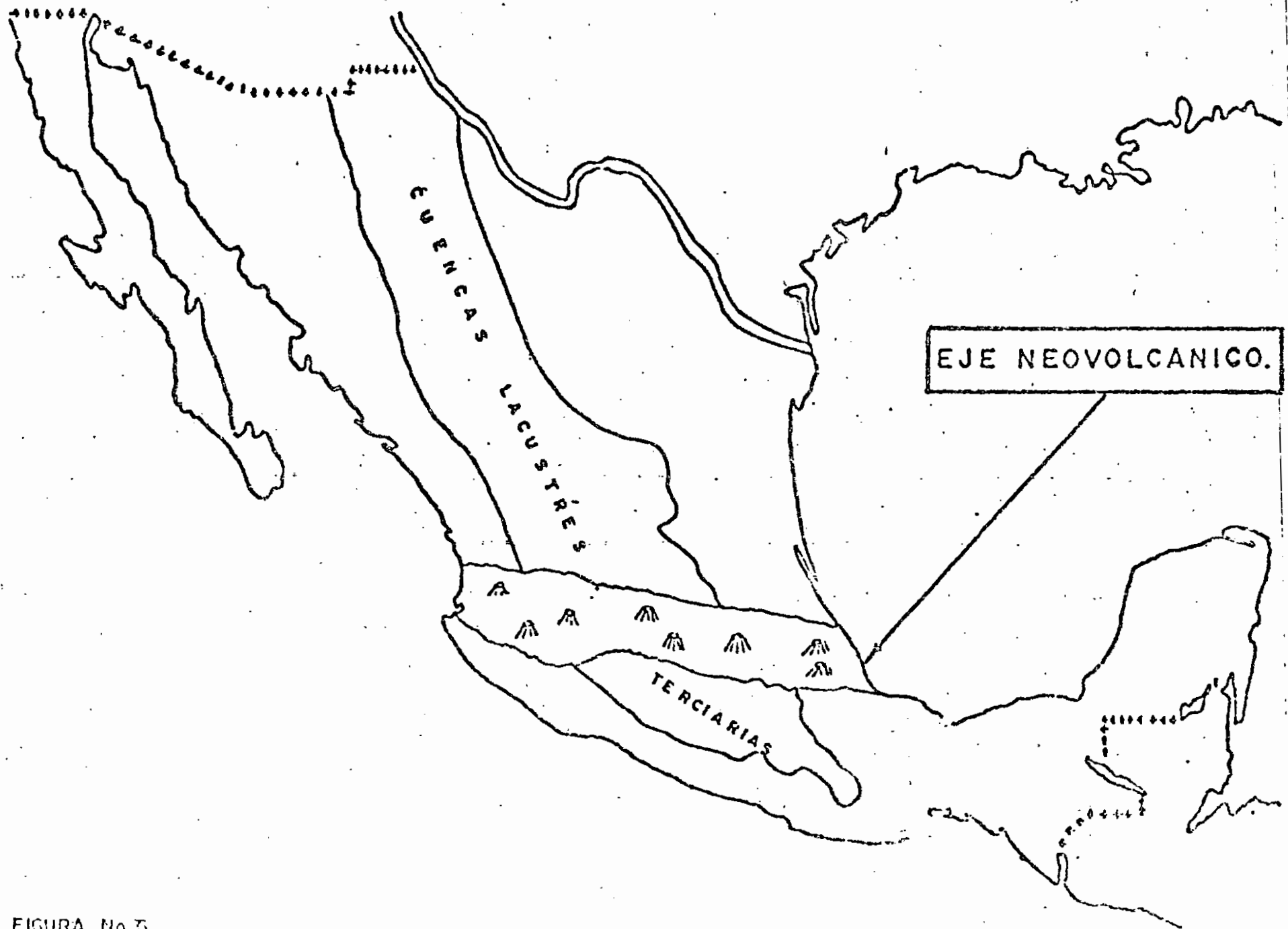


FIGURA No. 5

ocasionando que la cuenca quedara nuevamente cerrada, con lo que se inició una nueva etapa lacustre.

SEGUNDA ETAPA DE DEPOSITACION.- GRAVAS, ARENAS Y ARCILLAS.

Esta nueva cuenca lacustre presentó las mismas dimensiones y límites que la anterior. Es posible que la velocidad de depositación de sedimentos haya sido mayor que en la anterior, debido al rejuvenecimiento sufrido por los movimientos tectónicos y al gran vulcanismo que aportaba grandes volúmenes de piroclásticos y lavas.

Los sedimentos de la nueva etapa lacustre presentan características que los diferencian de los Conglomerados Rojos subyacentes, sobre los que descansan en discordancia angular y erosional.

Litológicamente están constituídos por capas -

de gravas, arenas y arcillas. Las gravas están formadas principalmente por fragmentos de origen volcánico. Su color es gris - claro y beige.

El tectonismo y las variaciones climáticas provocaron interrupciones temporales en las condiciones lacustres, durante las cuales se depositaron sedimentos aluviales mal clasificados.

La distribución de estos sedimentos en el Altiplano Mexicano, es muy amplia; su semejanza litológica con acarreos recientes, hace que se les confunda, siendo necesario en ocasiones, la utilización de métodos paleontológicos (polen-esporas, etc.) para diferenciarlos.

Es común encontrar a los sedimentos terciarios intercalados o cubiertos por rocas volcánicas. Frecuentemente, serranías volcánicas forman límites fisiográficos entre valles vecinos, sin embargo, se ha comprobado que en ocasiones sólo son



costras que no llegan a formar verdaderas barreras a profundidad (Fig. 7). Esta condición constituye una gran ventaja para la geohidrología, pues permite el flujo subterráneo a grandes distancias, sirviendo como recarga lateral en zonas de escasa precipitación, además, dada su gran extensión, hace posible la formación de acuíferos regionales.

Por ejemplo, en el centro del Estado de Chihuahua llueve poco, pero en la falda oriental de la Sierra Madre Occidental, llueve mucho y nieva en invierno, tal vez la recarga de agua subterránea venga desde allá y podamos disponer en el centro del Estado de más agua de la que se infiltra de la lluvia.

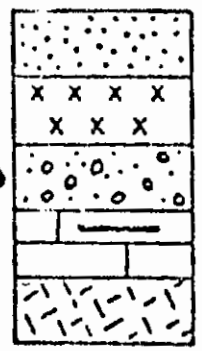
Tal vez a fines del Plioceno, la cuenca lacustre empezó a ser drenada por ríos del Pacífico y del Golfo, vaciándose paulatinamente y quedando sujeta, desde entonces hasta la fecha, a una intensa erosión; esto ha ocasionado que los acarreos recientes tengan, por lo general, poco espesor, en cambio, se tienen evidencias por perforaciones efectuadas en el Norte del Estado de Chihuahua, en que los sedimentos terciarios alcanzan espesores superiores a los 2,000.00 mts.

A principios del Cuaternario, lo que ahora es el Valle de México, estaba formado por una serie de depósitos lacustres, aluviales y volcánicos, principalmente de tipo andesítico y se drenaba hacia el Sur por afluentes del Río Balsas, de pronto, una serie de aparatos volcánicos de tipo basáltico formó la Sierra de Chichinautzin que cerró la salida del valle, formándose la cuenca lacustre del Valle de México, superpuesta a la Cuenca Terciaria.

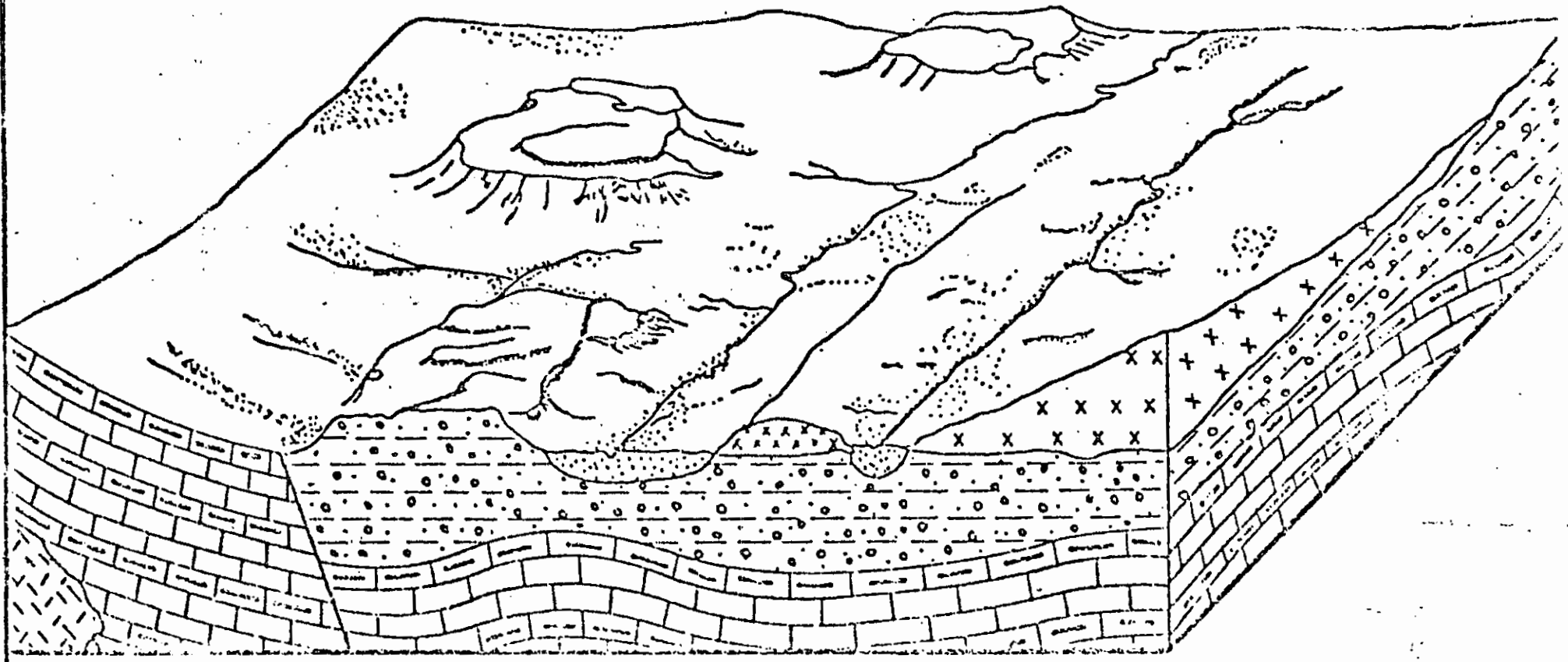
De acuerdo con este nuevo concepto, pueden existir, en el Valle de México, condiciones de confinamiento que aislen a los acuíferos terciarios profundos de los acuíferos cuaternarios someros explotados en la actualidad, siendo recomendable su exploración, pues tal vez podrían explotarse sin perjuicio para la estabilidad de la Ciudad de México.

En los Estados Unidos de Norteamérica, se presentan condiciones de sedimentación de edad terciaria, en el SW del Edo. de Montana (W.R. Lowell, 1956), semejantes a las observadas en el Altiplano Mexicano, considerándose que pueden estar relacionados.

SIMBOLOGIA



- ACARREOS RECIENTES
- ROCAS VOLCANICAS
- CONGLOMERADOS TERCIARIOS LACUSTRES
- CALIZAS CRETACICAS ARCILLOSAS
- INTRUSIVO IGNEO



TERMALISMO

En el Altiplano Mexicano existen numerosos manantiales termales en los que, la relación entre sedimentos terciarios y rocas volcánicas, es evidente. Se considera que el agua adquiere termalismo al circular a través de los sedimentos y las rocas volcánicas intercaladas o de cubierta, en zonas donde éstas aún irradian calor.

Algunos ejemplos de este tipo, los tenemos en:

Tequisquiapan, Qro.

Taboada, Gto.

Gogorrón, S.L.P.

Aguascalientes, Ags.

Ojo Caliente, Zac.

Gualterio, Dgo.

Ojo Caliente, San Buenaventura, Chih.

Estas aguas, por lo general, son de buena calidad y su temperatura es cercana a los 42°C. Una gran cantidad -

de pozos perforados en estos sedimentos, producen agua caliente.

En algunos lugares, como en el Valle de San Luis Potosí, conforme se alejan los pozos de los principales afloramientos de roblita, el agua va perdiendo temperatura.

Situando en un plano los manantiales termales del Altiplano Mexicano (Fig. 8), se puede, en cierto modo, definir los límites de las Cuencas Terciarias, por lo que se les ha considerado íntimamente ligados.

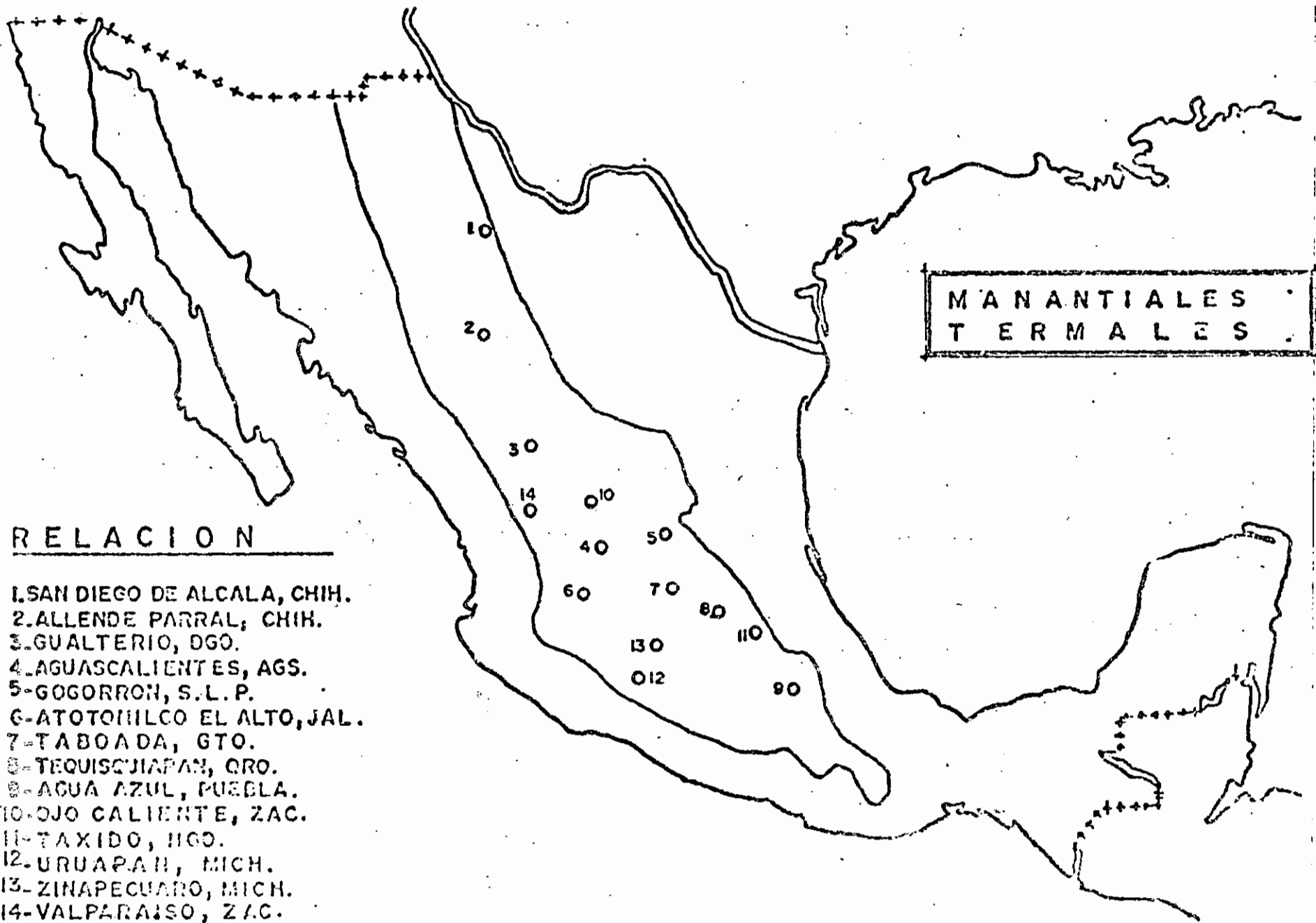
#### CONCLUSIONES.

La comprobación de este nuevo concepto está auxiliando en algunos importantes aspectos geohidrológicos como los siguientes:

1ª Se abrirán a la explotación acuífera, algunas zonas ocupadas por rocas volcánicas impermeables, cuando se

##.....

# CUENCAS LACUSTRES TERCIARIARIAS



## RELACION

1. SAN DIEGO DE ALCALA, CHIH.
2. ALLENDE PARRAL, CHIH.
3. GUALTERIO, DGO.
4. AGUASCALIENTES, AGS.
5. GOGORRON, S.L.P.
6. ATOTOIHILCO EL ALTO, JAL.
7. TABOADA, GTO.
8. TEQUISQUIAPAN, QRO.
9. AGUA AZUL, PUEBLA.
10. OJO CALIENTE, ZAC.
11. TAXIDO, HGO.
12. URUAPAN, MICH.
13. ZINAPECUARO, MICH.
14. VALPARAISO, ZAC.

vea la posibilidad de encontrar subyacentes conglomerados permeables.

2ª Se puede estudiar la posibilidad de una explotación intensiva de aguas subterráneas, aún en valles con poca recarga directa, debido a escasa precipitación, ya que su recarga puede ser subterránea, lateral y lejana, pudiendo encontrarse en áreas con mejores condiciones climatológicas.

3ª Para el cálculo de reservas, se contará con más elementos, pues los límites fisiográficos de una cuenca no necesariamente serán límites hidrológicos; de esta manera, cuencas intercomunicadas subterráneamente se estudiarán como una unidad.

4ª En el Valle de México, se recomienda la exploración de depósitos terciarios profundos, que pueden estar separados por confinantes ígneos o arcillosos impermeables, del acuífero superior actualmente en explotación. Se considera que el agua de estos depósitos lacustres drena subterráneamente hacia el Sur, saliendo en forma de manantiales en el flanco Sur del

Eje Neovolcánico en los Estados de Morelos y Guerrero.

5<sup>a</sup> Deberá considerarse esta posible disposición de las rocas volcánicas impermeables, cubriendo a depósitos conglomeráticos permeables, cuando se pretenda la construcción de presas de almacenamiento, pues podrían presentar fugas verticales.

6<sup>a</sup> Se considera que todos los distritos de riego por bombeo, importantes en el Altiplano Mexicano, están sobre sedimentos terciarios.

7<sup>a</sup>- Los sedimentos terciarios son, en ocasiones, tan impermeables que sirven como confinantes. Esto ocurre en la Mixteca Oaxaqueña, donde la Formación Yanhuitlán cubre a las calizas cretácicas de gran producción acuífera artesiana.

#### AFLORAMIENTOS

A continuación, se da una breve relación de



afloramientos de sedimentos terciarios en el Altiplano Mexicano.  
blas.

Considerando que las riolitas y andesitas relacionadas con este tipo de depósitos, siempre han sido determinadas de edad terciaria, los sedimentos que encontramos subyacentes, los consideramos de esa edad o anteriores.

#### CHIHUAHUA:

En el área de Ciudad Juárez, aflora la Formación Santa Fé, constituida por capas bien estratificadas de arenas, arcillas y gravas, ocasionalmente con capas de yeso, a la que se le ha determinado edad Mioceno-Plioceno (Córdoba, 1969).

Unos 150 Kms. al Sureste de Cd. Juárez, en el área de Rim Rock en el Estado de Texas, Ronald K. DeFord (1969), describe unidades litológicas compuestas por rocas sedimentarias e igneas a las que por paleontología y determinaciones de edades absolutas por el método de K-Ar se situaron en Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano.

## COAHUILA.-

En el flanco Sur de la Provincia de Sierras Atravesadas de la Sierra Madre Oriental, que se extiende de Monterrey a Torreón, se presentan grandes afloramientos de formaciones terciarias representadas en su base por la Formación Ahuichila del Eoceno-Oligoceno (Schulze, 1953).

## DURANGO.-

Hacia Pedriceñas y Cuencamé, existen además de las Formaciones Terciarias Ahuichila y Santa Inés, las siguientes: Formación Vizcarra del Eoceno-Oligoceno, compuesta principalmente por capas de areniscas arcillosas de composición ácida, con algunas intercalaciones lávicas del mismo tipo. Formación La Zorra del Oligoceno Tardío, compuesta por derrames lávicos de composición básica con intercalaciones locales de areniscas. Formación San José y Los Llanos del Mioceno-Plioceno, constituidas por conglomerados de rocas volcánicas y calcáreas, arenas y arcillas (De la Vega, 1963).

ZACATECAS.-

En la Capital del Estado, se presenta un gran afloramiento de Conglomerado Rojo del Eoceno-Oligoceno (Edwards, 1956).

En el Sur del Estado, cerca de los límites con Aguascalientes, en el área de Noria de Angeles, la Cía. Explomín perforó recientemente tres pozos con nuestro asesoramiento, en los que, abajo de espesores cercanos a los 100 mts. de tobas riolíticas, encontraron conglomerados y arenas. Uno de los pozos produjo más de 100 litros por segundo.

SAN LUIS POTOSI.-

En el Valle de San Luis-Villa de Reyes-Gogorrón, numerosos pozos han cortado en su columna geológica, intercalaciones de riolitas y conglomerados. De acuerdo con la presente teoría, se considera que este valle puede tener continuidad hacia el Norte con el Valle de Arista y al Sur con La Laguna Seca en San Luis de la Paz y San José Iturbide. Esta conexión hacia

el Sur, se detectó hace tiempo, por métodos geoquímicos. (Villalobos, 1969).

#### GUANAJUATO.-

En la Capital del Estado existe un gran afloramiento de Conglomerado Rojo, determinado como Eoceno-Oligoceno. (Edwards, 1956).

En la boquilla de Presa Chichimequillas, cerca de Silao, abajo de un depósito de tobas riolíticas, se encontró un conglomerado mal cementado, con capas de arcilla intercaladas.

#### QUERETARO.-

En Juriquilla, un poco al Norte de la Capital del Estado, derrames andesíticos descansan sobre conglomerados pumíticos altamente permeables; en este lugar existe una noria que produce por bombeo 600.00 litros por segundo.

En Tequisquiapan, al Sur del Estado, abajo de depósitos riolíticos, se han cortado en algunos pozos, conglomerados arenosos y pumíticos, intercalados con derrames basálticos.

JALISCO -

En Lagos de Moreno, al Norte del Estado, se han perforado pozos que han atravesado cuerpos de rocas riolíticas y han llegado a conglomerados permeables.

En el Sur del Estado, en el Mpio. de El Grullo, en la boquilla de la Presa Las Piedras, aflora la Formación Tuxcâcuesco, del Grupo Balsas, Eoceno-Oligoceno, constituida por Conglomerados Rojos.

ESTADO DE MEXICO.-

En varias localidades del Estado, aflora la Formación Tarango, constituida por conglomerados y piroclásticos, la cual ha sido determinada como Edad Mioceno (Bryan, 1948. Fries, 1957).

##.....

PUEBLA. -

En Tecamachalco hacia el Oriente del Estado, - aflora la Formación Huajuapán, determinada Eoceno-Oligoceno. Esos mismos conglomerados afloran en la zona de Chiautla, al Sur de Izúcar de Matamoros.

Conglomerados del Terciario Superior se encuentran en el Valle de Tehuacán.

MORELOS. -

En el Estado se presentan numerosas localidades en que aflora el Grupo Balsas del Eoceno-Oligoceno (Fries, - 1957).

Sobre ella descansan otras formaciones terciarias de origen volcánico y lacustre, como la Tilzapotla, Topoztlán y Zempoala.

GUERRERO.-

En Taxco se encuentra una localidad tipo del Conglomerado Rojo del Eoceno-Oligoceno (Edwards, 1956).

Al este de Chilpancingo, entre esta Ciudad y Tixtla, se presentan buenos afloramientos de Conglomerado Rojo del Grupo Balsas (Fries, 1957).

En Chilpancingo aflora la Formación del mismo nombre, constituida por gravas de caliza, limolitas y margas, de terminada de Edad Mioceno (De Cserna, 1956).

OAXACA.-

En Huajuapán de León, al Noroeste del Estado, aflora la Formación Huajuapán, constituida por Conglomerados Rojos, correlacionables con Formaciones del Grupo Balsas.

Hacia la zona Mixteca, se presenta la Formación Yanhuatlán, constituida por depósitos lacustres arcillosos, de color rojo, determinada de Edad Terciaria, por técnicos de PE

## BIBLIOGRAFIA

- Bryan, K. 1948.- Los Suelos Complejos y Fósiles de la Aitiplanicie de México, en relación a los cambios climáticos. Bol. Soc. Geol. Mexicana, XIII: (1a. Parte).
- Schulze Gustavo. 1953.- Conglomerados Terciarios Continentales en la Comarca Lagunera de Durango y Coahuila y sus Relaciones con Fenómenos Igneos Geomorfológicos y Climatológicos. Boletín No. 30 del Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales.
- De Cserna Zoltán. 1955-56.- Congreso Geológico Internacional XX Sesión México Excursiones A-9 y C-12, Hoja No. 7.
- Edwards John D. 1956.- Estudio Sobre Algunos de los Conglomerados - Rojos del Terciario Inferior del Centro de México. XX Congreso Geológico Internacional. Pett. John F. J. Rocas Sedimentarias.
- Carl Fries Jr. 1956.- Bosquejo Geológico de las partes Central y Occidental del Estado de Morelos y áreas contiguas - de Guerrero y México. Cong. Geol. Intern. XX Sesión México, 1956. Libreto Guía de la Excursión C-9.
- W.R. Lowell, 1956.- Tertiary Geologic History of the Rocky Mountains in Montana, U.S.A. XX Congreso Geológico Internacional. México.
- Carl Fries Jr. 1957.- Bosquejo Geológico de la Región entre México, D. F. y Acapulco, Gro.- Boletín No. 5 y 6 del Volumen IX de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros.
- De la Vega, Enciso. 1963.- Hoja Cuencamé 13 R-1(7) Instituto de Geología. UNAM.



Villalobos Crescencio I. 1969.- El Probable Gran Acuífero Taboada.  
Gogorrón. Folleto Técnico No. 22 del Inst. de Geología y Metalurgia. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

De Ford, Ronald K. 1969.- Some Keys to The Geology of Northern Chihuahua.- Guideboock, Twentieth Field Conference The Border Region. Chihuahua and the U.S.A. New Mexico Geological Society.

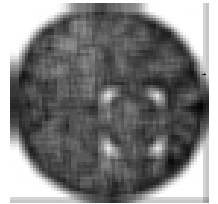
Córdoba, Diego. 1969.- Hoja Ciudad Juárez 13 R-a(3) Instituto de Geología UNAM.

Dietz Robert S. y Holden John C. 1970.- La Desintegración de la Pangea. Selecciones de Scientific American.

Dewey John F. 1972.- Placas Tectónicas. Deriva Continental y Tectónica de Placas. Selecciones de Scientific American.



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



## PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

### TEMA I: LOCALIZACION DE SITIOS PARA PERFORACION

- 1.1.- Introducción.
- 1.2.- Geología del Agua Subterránea
- 1.3.- Hidrogeología
- 1.4.- Búsqueda de los Acuíferos

ING. ROBISEL CHIÑAS LALO  
Marzo 1978



CENTRO DE EDUCACION CONTINUA DE LA UNAM  
SOCIEDAD GEOLOGICA MEXICANA A.C.

CURSO DE PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

TEMA  
LOCALIZACION DE SITIOS PARA PERFORAR

POR: ING. ROBISEL CHINAS LALO

CONTENIDO

I.- INTRODUCCION

- I.1.- El Agua Subterránea y la Geología
- I.2.- Geología e Hidrogeología

II.- GEOLOGIA DEL AGUA SUBTERRANEA

- II.1.- Procesos Geológicos
- II.2.- Geomorfología
- II.3.- Calidad de los Materiales
- II.4.- Estructura Geológica

III- HIDROGEOLOGIA

- III.1- Ciclo Hidrológico
- III.2- Movimiento del Agua Subterránea

IV.- BUSQUEDA DE LOS ACUIFEROS

- IV.1.- Fotointerpretación Hidrogeológica
- IV.2.- Geofísica por Resistividad Eléctrica

## I.- INTRODUCCION

### I.1.- El Agua Subterránea y la Geología

El presente curso de perforación de pozos para agua, que está realizando el Centro de Educación Continua de la Universidad Nacional Autónoma de México, en colaboración con la Sociedad Geológica Mexicana, A. C., incluye dentro del temario un renglón que se refiere a la localización de sitios para perforar.

Esto resulta muy interesante si se considera que para el aprovechamiento óptimo de las aguas subterráneas se requiere de la participación de diferentes disciplinas y tecnologías relacionadas con la exploración, perforación, explotación, aprovechamiento y suso de los acuíferos subterráneos.

En el caso de la perforación de pozos para agua, una de las cuestiones que se plantean es el de fijar o el de elegir el sitio para perforar y la profundidad que éstas deben tener, a fin de no encontrarse con eventualidades y gastos innecesarios que eleven los costos de un proyecto relacionado al aprovechamiento de las aguas subterráneas. Para poder decidir sobre estos puntos tan importantes conviene recordar lo que es el agua subterránea y su relación con las ciencias geológicas.

El agua subterránea es uno de los recursos indispensables para la vida de una comunidad, porque su aprovechamiento como agua potable o para fines agropecuarios o industriales, así como su conocimiento en potencialidad permite planear el desarrollo social y económico de una región o de un país. Pero también es necesario advertir que el agua subterránea no es un recurso ilimitado, por lo que su preservación y uso óptimo debe ser controlado de la misma manera que ocurre con otros recursos naturales.

En un país como el nuestro que tiene predominio árido y semi-árido y donde el agua superficial es escasa, el subsuelo constituye la única fuente que puede proporcionar agua en forma permanente, de aquí que sea un recurso básico para el desarrollo del territorio nacional.

El agua subterránea también reviste gran importancia, no sólo en zonas áridas y semiáridas, sino en aquéllas regiones que tienen una precipitación alta y donde se generan grandes ríos. Caso particular el sureste de México y algunas zonas costeras del país.

En efecto el aprovechamiento de estos ríos requieren de grandes inversiones para ejecutar obras de almacenamiento y una infraestructura hidráulica muy costosa para la conducción de los recursos hidráulicos, en cambio, el aprovechamiento del agua subterránea ofrece la ventaja de diferir la inversión inicial requerida para conseguir el suministro necesario, es decir, con pocos recursos poner, prácticamente de inmediato, en marcha la producción de una zona.

El agua subterránea también tiene la ventaja de su permanencia en los almacenamientos subterráneos, mayor distribución espacial y menor exposición a la contaminación, por lo que se le prefiere en los usos doméstico e industrial, además de que se puede utilizar en forma combinada con el agua superficial cuando ésta no alcanza para irrigar una mayor superficie de terreno.

Pero así como el agua subterránea ofrece muchas ventajas, en contraposición resulta que los almacenamientos subterráneos no son ilimitados y la renovación del agua que contienen ocurre en forma lenta por lo que su explotación debe ser controlada a efecto de no crear un déficit entre el volumen renovable y el volumen requerido y producir desequilibrios ocasionados por la sobreexplotación.

Aunque a veces se justifica una explotación a costa del almacenamiento de los acuíferos es necesario conocer sus características y su potencialidad para no causar daños irreparables tales como: Incremento de los costos de bombeo, disminución del rendimiento de las captaciones, hundimientos de terrenos, formación de grietas, intrusión salina que cuando el agua es utilizada para riego, trae la consiguiente contaminación de suelos y el abandono de instalaciones productivas.

Estos problemas de sobreexplotación y otros ocasionados por la concentración de las explotaciones, o la contaminación que ocurre en terrenos altamente permeables, o de aquéllos de naturaleza arcillosa que tienen agua con niveles someros que propician inundaciones y terrenos de escasa potencialidad y con niveles profundos son derivados de condiciones climáticas, pero principalmente de las características que presentan las diferentes provincias geológicas. De ahí la enorme importancia que tiene el conocer las condiciones geohidrológicas de una región en donde se pretende explotar agua subterránea e incluso de aquéllas que ya se encuentran en explotación.

Lo que se busca entonces es determinar las características de la calidad y estructura del subsuelo y la distribución espacial en las diferentes formaciones geológicas, en forma tridimensional por donde se recarga, circula y acumula el agua de los almacenamientos subterráneos.

#### .1.2.- Geología e Hidrogeología

La Geología como ciencia de la tierra se ha desarrollado siempre como el estudio cualitativo de los procesos que ocurren en la corteza terrestre; por ser una ciencia natural que se ocupa de las transformaciones de todo lo que ocurre en y sobre la superficie terrestre no puede estar desprovista de importancia práctica en cuanto a sus aplicaciones con relación al desarrollo de la humanidad.

De este modo se han desarrollado, en base a la geología diversas aplicaciones prácticas en relación con la exploración de recursos naturales, así como a la obtención de datos geológicos para la planeación y proyectos de obras de infraestructura. Ello ha permitido en la práctica de la geología la implantación de diversas disciplinas que se conocen como: Geología Petrolera, Geología Minera, Geotermia, Hidrogeología e Ingeniería Geológica.

Las necesidades de conocer y aprovechar mejor nuestros recursos naturales, así como el desarrollo que han tenido los procedimientos para las investigaciones de estas áreas, han creado verdaderas especialidades y en el caso del agua del subsuelo, que es atendida por la geohidrología, constituye la disciplina que estudia las leyes relativas a la existencia y movimiento de las aguas subterráneas.

Para su estudio la geohidrología se basa principalmente de la Geología porque presupone que son los factores geológicos los que condicionan su existencia, y también se auxilia de la hidráulica, matemáticas, geoquímica, geofísica, mecánica de suelos, probabilidad y estadística, hidrología superficial y subterránea, técnicas isotópicas y perforación de pozos.

Es de uso común utilizar el término Geohidrología para señalar aspectos más amplios del agua subterránea y la Hidrogeología como el estudio del agua subterránea con mayor atención énfasis en los aspectos geológicos, químicos y de circulación.

## II.- GEOLOGIA DEL AGUA SUBTERRANEA

La Geología que se aplica en la hidrogeología no es una disciplina pura y abstracta, sino que es una geología que tiene -- que ver con las características de la calidad de las formaciones y la estructura del subsuelo por donde se alimentan, circulan y acumulan las aguas de los almacenamientos subterráneos y por ese hecho es del dominio común llamar a esta disciplina como Geología del Agua Subterránea.

La Geología del Agua Subterránea tiene por objeto esencialmente establecer el marco o modelo conceptual hidrogeológico que sirve de base para la interpretación de otras tecnologías que intervienen en las distintas etapas de los estudios geohidrológicos como son: La prospección, la evaluación y el manejo del agua subterránea.

Como la mayoría de los terrenos no son homogéneos, sino que -- por distintas causas presentan variaciones laterales y en profundidad, éllo determina que la circulación y acumulación de agua ocurra bajo diferentes condiciones según la distribución espacial que presentan los materiales en la superficie y en el subsuelo.

Para comprender esto, es necesario analizar los procesos geológicos que han intervenido en la genesis de las rocas y los suelos, los cuales han dado lugar a las diferentes formas de terreno que se conocen.

### II.1.- Procesos Geológicos

Los procesos geológicos son un conjunto de agentes de tipo físico y químico que determinan y modifican la forma superficial de la tierra mediante una dinámica interna y externa cuya energía proviene tanto del interior de la tierra (energía radioactiva) como del exterior (energía solar).

La geodinámica interna incluye procesos de tipo plutónico, volcánico, orgánico y epeirogénico que dan lugar a los relieves del terreno como macizos intrusivos, montañas y mesetas volcánicas y formación de montañas de bloques o plegadas.

La geodinámica externa interviene en los procesos de intemperismo remoción por gravedad erosión acumulación y deposición de sedimentos, acompañados de procesos diagenéticos. -- Estos procesos son los más notables porque ocurren sobre la superficie terrestre y además porque la mayoría de los paisajes actuales, como la formación de redes hidrográficas, valles y llanuras son resultados de procesos geológicos evidentes, incluso en períodos cortos de tiempo.

Aunque en los trabajos de búsqueda de agua subterránea en general se engloban todos los conocimientos sobre los procesos geológicos esencialmente interesa analizar la geomorfología, la calidad de los materiales y estructura geológica.

## II.2.- Geomorfología.

En el análisis de la geomorfología se trata de interpretar -- las formas del terreno, variaciones de las pendientes del relieve y las características del drenaje superficial.

Existe una gran variedad de formas del terreno que es conveniente agruparlas de acuerdo con su origen y estructura, integrándolas en provincias geológicas para facilitar su estudio, ya que es muy frecuente observar cierta relación de las formas montañosas con las divisiones climáticas, incluso de un continente a otro. Las variaciones del relieve en montañas lomeríos y llanuras determinan la presencia o ausencia de cobertura intemperizada y ésta a su vez es un factor muy importante en el escurrimiento superficial o en la retención del agua de lluvia.

Un factor que determina la configuración de las formas del terreno, es el drenaje superficial, cuyos arreglos y densidad permiten definir zonas que ofrecen escurrimiento o infiltración, además de aquellas zonas que ocupadas por ríos, lagos, pantanos y manantiales nos indican de la influencia que tienen en la recarga de los acuíferos.

Existen muchos arreglos del drenaje que indican características que tiene relación con las condiciones geohidrológicas por ejemplo: Los drenajes de textura abierta se relacionan con materiales permeables, mas difíciles de erosionar o formaciones masivas y los drenajes con textura fina se desarrollan normalmente en materiales impermeables, en zonas fácilmente erosionables o donde el drenaje interno es lento.

La uniformidad del drenaje manifiesta también cierta homogeneidad en la constitución de los terrenos y susceptibilidad a erosionarse, en cambio las zonas no integradas o con ausencia de drenaje puede deberse a la presencia de aluviones granulares o de rocas permeables por fracturación o por cavidades de disolución.

Siempre conviene agrupar las características similares de los terrenos formando modelos que ayuden a establecer criterios que por analogías permitan estudiar zonas que carecen de información. Una clasificación útil y práctica de las formas de los terrenos es la de Von Engel, porque permite sistema-



tizar una variedad de formas en relación a la calidad y estructura de los terrenos agrupándolas en cinco clases y 19 unidades estructurales.

---

 CLASIFICACION GEOMORFOLOGICA DE VON ENGELN

## I.- CLASES DE ESTRUCTURAS SIMPLES.

A.- Unidades geomórficas de materiales no consolidados o debilmente consolidados que tienen en lo general una estructura horizontal o simple que está bien definida o en algunos casos poco definida.

- 1.- Llanura costera de levantamiento.
- 2.- Llanura o meseta de pie de monte.
- 3.- Llanura de tundra.
- 4.- Llanura fluvial, lacustre y deltaica.
- 5.- Erg o llanuras de dunas de arena.
- 6.- Llanura glacial.
- 7.- Llanura de loess.

B.- Unidades geomórficas compuestas de roca sedimentarias más o menos consolidadas o en algunos casos de rocas de origen ígneo. Los materiales, como en el caso A - se encuentran agrupados uniformemente y con una estructura simple.

- 8.- Meseta interior.
- 9.- Cuenca de lopolito
- 10.- Meseta o llanura de corriente de lava.
- 11.- Edificio volcánico.

C.- Unidades geomórficas de rocas casi totalmente calcárea con una estructura simple debido a la homogeneidad del material.

- 12.- Carst.
- 13.- Isla o barrera de coral.

## II.- CLASES DE ESTRUCTURA DESORDENADAS.

D.- Unidades geomórficas plegadas o falladas que se formaron de rocas compuestas de sedimentos consolidados o que incluyen otros materiales sedimentarios.

- 14.- Domo de levantamiento.
  - a).- Lacolito
  - b).- Batolito
- 15.- Montaña plegada.
  - a).- de pliegues simples
  - b).- de pliegues dislocados
- 16.- Montañas de fallamiento.

E.- Unidades geomórficas constituidas principalmente por escudos de rocas rígidas y antiguas; en este caso la morfología puede ser de llanura, de meseta y de domo.

- 17.- Escudo de rocas ígneas metamórficas antiguas.
- 18.- Peneplano de sedimentos y de rocas ígneas.
- 19.- Glaciar continental.

De esta clasificación son las tres primeras o sea las que están relacionadas con clases de estructuras simples, las que normalmente tienen interés acuífero, justamente por que se acercan mas a la homogeneidad y porque o son materiales no consolidados o materiales rígidos pero fracturados.

### II.3.- Calidad de los materiales.

Por definición los materiales que componen la corteza terrestre son rocas. Las rocas comprenden las formaciones geológicas que componen el suelo y el subsuelo, igualmente comprenden los fluidos que impregnan a estas formaciones (agua, gas, petróleo). Existe una variedad muy grande de materiales rocosos que se clasifican en base a su origen, textura, composición mineralógica y modo de ocurrencia y materiales sueltos que se clasifican tomando en consideración su granulometría, plasticidad y contenido de agua.

En geohidrología las variaciones en la calidad de los materiales influyen en la permeabilidad y en su porosidad y consecuentemente influyen en el flujo y almacenamiento del agua subterránea.

Desde el punto de vista del origen las rocas se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas: En la tabla se señala esta clasificación subdividiéndose en varios grupos. En la tabla 2 se presenta la clasificación de las rocas ígneas intrusivas y extrusivas con su composición mineralógica, así como la naturaleza de los piroclásticos y vidrios volcánicos. En la tabla 3 se han reunido a todas las rocas sedimentarias en función de su origen mecánico, químico y orgánico y en la tabla 4 se registra una clasificación de rocas metamórficas.

Los materiales que constituyen la corteza terrestre para fines de clasificación en las perforaciones, se muestran de tres maneras diferentes: suelo, fragmento de roca y roca.

El término suelo se aplica a todas aquéllas partículas de material menores de 7.6 cm (3"). Fragmento de Roca se aplica a todas aquéllas mayores de 7.6 cm. pero que no forman un macizo rocoso sino que los elementos sólidos están ligados entre si por material suelto (suelo). El término roca se usa para cuando se tienen formaciones rocosas rígidas o altamente cohesivas.

TABLA 1

## CLASIFICACION DE ROCAS

DIVISIONES	SUB-DIVISIONES	GRUPO	SIMBOLO
ROCAS	IGNEAS	EXTRUSIVAS	$R_{ie}$
		INTRUSIVAS	$R_{ii}$
	SEDIMENTARIAS	CLASTICAS	$R_{sc}$
		QUIMICAS	$R_{sq}$
		ORGANICAS	$R_{so}$
	METAMORFICAS	NO FOLIADAS	$R_{mn}$
		FOLIADAS	$R_{mf}$

TABLA 2

COMPOSICION Y CLASIFICACION DE ROCAS IGNEAS		
ROCAS	PRINCIPALES MINERALES QUE FORMAN LAS ROCAS	ROCAS
EXTRUSIVAS (Grano fino o porfírica)		INTRUSIVAS (Grano grueso)
RIOLITA	CUARZO $SiO_2$	GRANITO
TRAQUITA		SIENITA
ANDESITA	FELDESPATO POTASICO (Ortoclasa) $KAlSi_3O_8$	DIORITA
DACITA		GRANODIORITA
BASALTO	FELDESPATO SODICO-CALCICO (Plagioclasas) $CaAl_2Si_2O_8$ $NaAlSi_3O_8$	GABRO
AUGITITA		PIROXENITA
LIMBURGITA	Silicatos Ferromagnesianos Micas M.B. Hornblenda Piroxena Olivino	PERIDOTITA

ROCAS CLARAS

ROCAS OSCURAS \*\*

ORIGEN	NATURALEZA	R O C A		
ERUPCIONES TRANQUILAS	VITREA	OBSIDIANA		
		PERLITA		
ERUPCIONES EXPLOSIVAS	PIROCLASTICA (FRAGMENTOS)	PIEDRA POMEZ*		
		RETINITA (Piedra Pez)		
		PIEDRA POMEZ BLOQUES		
		BOMBAS		
		Sueltas	Consolidadas	} AGLOMERADO
		GRAVAS	BRECHAS	
LAPILLI	TOBAS			
ARENAS	ARENISCAS			
CENIZAS	TOBAS			
POLVOS	TOBAS			

\* Includida aquí solo por ser vítrea  
 \*\* Rocas básicas

ROCAS SEDIMENTARIAS			
ORIGEN	AGENTE TRANSPORTADOR	SEDIMENTO SUELT O	SEDIMENTO CONSOLIDADO
M E C A N I C O	AGUA	GRAVA (ARISTAS REDONDEADAS) GRAVA (ARISTAS AGUDAS) ARENA LIMO ARCILLA	CONGLOMERADO  BRECHA ARENISCA LIMOLITA ARGILITA
	VIENTO	MEDANOS LOESS	ARENISCA
	HIELO	GRAVAS ANGULOSAS ARENA LIMO ARCILLA	} TILITA
	GRAVEDAD	GRAVA ANGULOSA	BRECHA DE TALUD

ORIGEN	NATURALEZA	SEDIMENTO CONSOLIDADO
Q U I M I C O	CALCAREA	CALIZA DOLOMITA ARAGONITA TRAVERTINO MARCA
	CALCAREA ARCILLOSA	
	SILICOSA	PEDERNAL GEYSERITA
	SALINA	EVAPORITAS  SAL GEMA YESO BORAX TEQUESQUITE CRISTALILLO
O R G A N I C O	CALCAREA	CALIZA CORAL COQUINA CRETA (SASCAB)
	SILICOSA	DIATOMITA (TIZAR)
	CARBONOSA	TURBA LIGNITO HULLA ANTRACITA

TABLA 4

ROCAS METAMORFICAS	
ROCA ORIGINAL	PRODUCTO METAMORFICO
ARENISCA	CUARCITA
CALIZA	MARMOL
LUTITA	PIZARRA
BASICAS	ESQUISTOS, SERPENTINA, ETC.
GRANITO, DIORITA Y CONGLOMERADO	GNEISS

Las propiedades de las rocas cambian lateralmente y en profundidad así en profundidad las rocas tienden a ser más compactas y una roca en superficie que se sustrae de la compresión puede constituirse en una roca que cambia sus características originales, sin embargo, como no siempre se tienen macisos -- homogéneos, principalmente en las rocas sedimentarias, se hace necesario conocer la superposición de las diferentes formaciones a través de la estratigrafía para definir su distribución geográfica y correlación.

En México se han determinado las secuencias estratigráficas - en diferentes provincias geológicas; ello ha permitido conocer la posición que tienen algunos acuíferos principalmente en -- rocas calcáreas. En la Tabla 5 se muestra la tabla estratigráfica del estado de Nuevo León, donde formaciones del cretácico: Cuesta del Cura, Aurora y Cupido han sido detectadas con acuíferos importantes.

#### II.4.- Estructura Geológica.

El análisis de la estructura geológica se hace fundamentalmente para definir el grado de fracturación, posición, estratificación y potencia de las formaciones, características que permiten conocer el comportamiento geohidrológico de los terrenos.

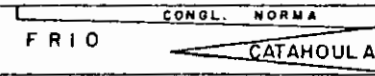
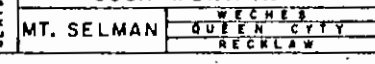

Las provincias geológicas presentan una variedad muy grande de estructuras que a veces se observan en la superficie con rasgos morfológicos determinados y otras veces están enmarcadas o poco definidas por una cobertura intemperizada o por efecto de la erosión. Las estructuras más comunes que se presentan son:

Rocas estratificadas:	Sedimentos y rocas volcánicas
Rocas solubles:	Calizas y yesos
Rocas alteradas:	Por fracturación, metamórfico e intemperismo.
Rocas plegadas:	Sedimentarias.
Rocas foliadas:	Metamórficas.
Rocas Masivas:	Macizos rocosos.

Las rocas estratificadas tienen una estructura bastante compleja no solo porque están falladas, plegadas y fracturadas, -- sino porque algunas tienen una disposición de asociaciones -- alternantes o con cambios de facies laterales de materiales -- de diferente permeabilidad.



TABLA ESTRATIGRAFICA DEL ESTADO DE NUEVO LEON

ERA	PERIODO	EPOCA	E D A D	FORMACIONES	
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEIST	CUATERNARIO	LISSIE y ALUVIONES	
		PLIOC		GOLIAD	
	MIOCENO	PONTIANO		FLEMING	
		BURDIGALIANO		OAKVILLE	
		AQUITANIANO		ANAHUAC	
		OLIGOCENO	CHATTIANO		FRIO 
			RUPELIANO		VICKSBURG
	EOCENO	PRIABONIANO	CLAIBORNE	JACKSON	
		LUTECIANO		YEGUA	
				COOK-MONTAIN	
				MT. SELMAN 	
		YPRESIANO		WILCOX-INDIO	
	PALEOCENO	MONTIANO		MIDWAY  VELASCO	
		DANIANO			
	CRETACICO	SUPERIOR	MAESTRICHTIANO	DIFUNTA	MENDEZ
			CAMPANIANO		
			SANTONIANO	PARRAS	SAN FELIPE
			CONIACIANO		
			TURONIANO	INDIDURA	AGUA NUEVA
			CENOMANIANO		
INFERIOR		ALBIANO		AURORA TAMPS. SUP.	
		APTIANO		LA PEÑA OTATES	
		BARREMIANO		CUPIDO	
		HAUTERIVIANO			
		VALANGINIANO		TARAISES	
		BERRIASIANO		TAMAULIPAS INFERIOR	
JURASICO	SUPERIOR (MALK.)	TITONIANO	LA CASITA	PIMIENTA	
		BONONIANO	OLVIDO	TAMAN	
		HAVRIANO			
		SEQUANIANO			
		ARGOVIANO	ZULOAGA		
	DIVESIANO				
	MEDIO DOGGER	CALOVIANO	SAL *	LA JOYA (CAPAS ROJAS) MINAS VIEJAS	
		BATONIANO			
		BAJOCIANO			
	INFERIOR LIASICO				
TRIASICO			CAPAS ROJAS (HUIZACHAL ?)		
Pz			ESQUISTOS y ROCAS VERDES (Reg. Aramberrí)		
Pc			GNEISSES ?		

\* INCLUYE CALIZAS Y ANHIDRITAS

TABLA 5

Esto mismo sucede con algunos materiales volcánicos de diferente emisión y composición (lavas y tobas) cuyas características de permeabilidad resultan diferentes.

En el caso de las rocas solubles, la presencia de cavidades, frecuentemente con una distribución irregular hace que la circulación de agua en una red cárstica presente serios problemas en su determinación.

Son muchos los casos en que las rocas presentan condiciones estructurales complicadas aún en las rocas foliadas y masivas. En la práctica las estructuras simples y homogéneas son poco frecuentes, salvo en algunas regiones que no han sido afectadas por procesos tectónicos o que están constituidas por materiales recientes.

### III.- HIDROGEOLOGIA. Tomado de Hidrogeología de Davis y Weist 1971.

#### III.1.- Ciclo Hidrológico

Aunque la hidrogeología se refiere exclusivamente al estudio del agua subterránea, un buen hidrogeólogo debe tener sin embargo una cierta formación en todos los aspectos del ciclo hidrológico del agua, al menos en sus términos más generales, ya que en el fondo las aguas subterráneas no representan más que una parte del ciclo hidrológico total del agua.

Los océanos son los inmensos depósitos de los cuales procede toda el agua del ciclo hidrológico y a los cuales retorna. Esta definición es naturalmente un tanto simplista, pues no todas las partículas de agua recorren el ciclo hidrológico de una manera completa; éste sería por ejemplo, el caso de las partículas de agua que se evaporan sobre la superficie de la tierra y vuelven a la tierra en forma de lluvia, desde donde se evaporan de nuevo, y así indefinidamente, sin llegar nunca a alcanzar el océano. En el caso más completo del ciclo hidrológico del agua, ésta se evapora desde el océano, forma nubes, las cuales son transportadas hacia los continentes donde se condensan y caen en forma de precipitaciones, las cuales, a su vez, son conducidas por medio de los ríos y del flujo subterráneo hasta el océano. Existe una pequeña aportación de agua al ciclo hidrológico que procede de los procesos magmáticos y metamórficos, que no ha sido tenida en cuenta en este esquema; pero existe también en contraposición, una sustracción constante de agua al ciclo hidrológico que pasa a incorporarse a la estructura de los minerales y de los depósitos sedimentarios. Fig. 1

#### III.1.1.- La precipitación

El vapor de agua contenido en la atmósfera procede de la evaporación sobre la superficie de los continentes y océanos se condensa y precipita por causa, fundamentalmente, de tres fenómenos meteorológicos: 1) La mayor cantidad de agua se precipita a lo largo de los frentes de las masas de aire cálido y húmedo que se desplazan sobre las regiones de masas de aire frío. Este desplazamiento suele aparecer generalmente asociado a los grandes movimientos ciclónicos, que recorren enormes distancias. 2) Durante la estación cálida del año, el aire que se calienta en contacto con la superficie de la tierra tiende a ascender en grandes masas hacia las zonas altas donde existen masas de aire más frío. Este movimiento ascendente de convección puede ser provocado simplemente por la inestabilidad de una masa de aire ligera y cá-

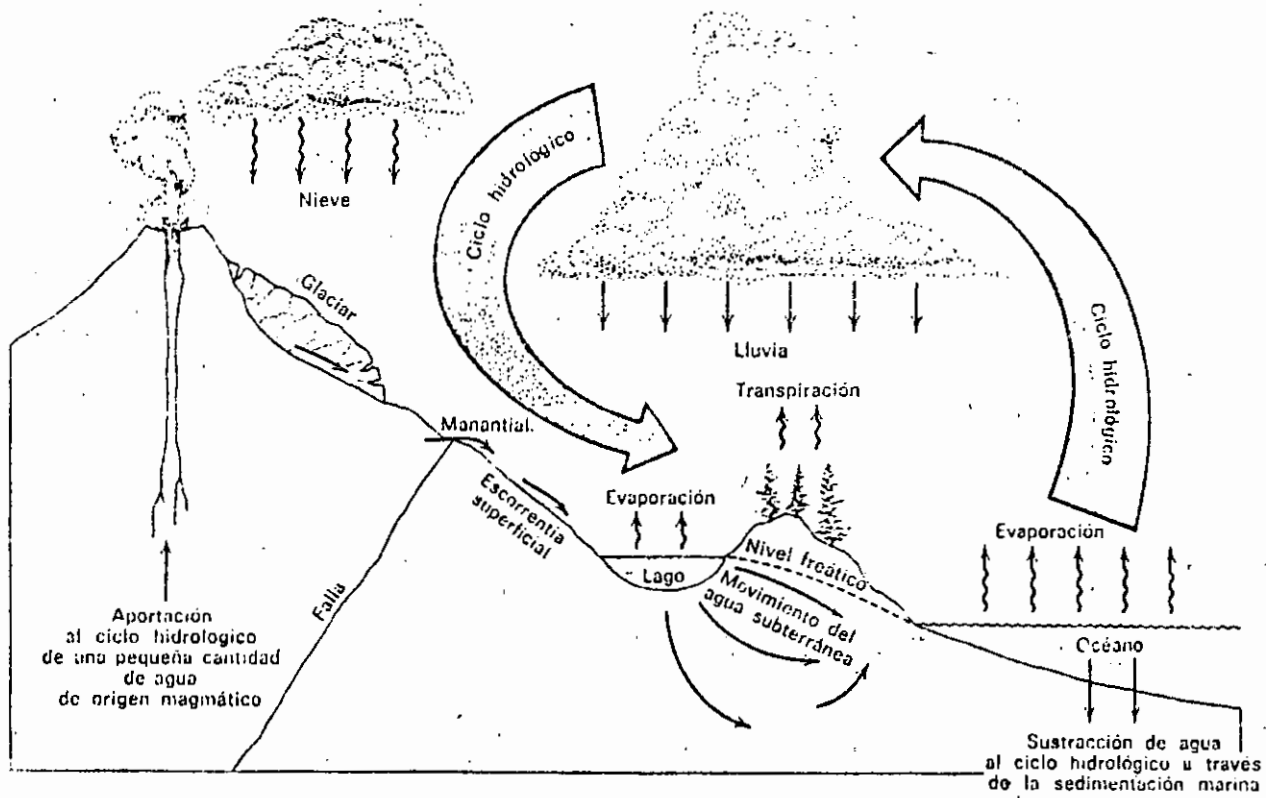


Fig. 1

Fig. 2. — Dibujo esquemático del ciclo de la escorrentía.

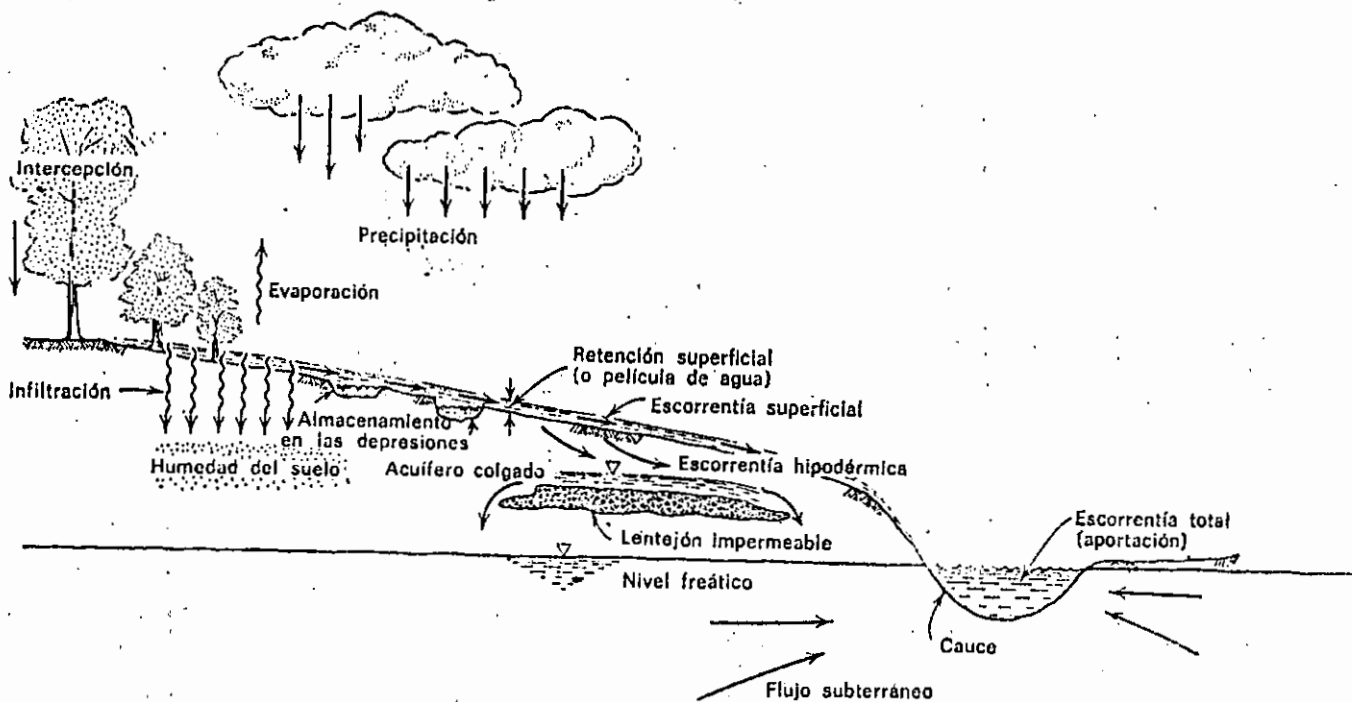


Fig. 2

lida situada por debajo de otra masa de aire más densa y fría aunque también puede ser producido por las corrientes de aire que ascienden sobre las barreras montañosas. 3) El tercer tipo de fenómeno es de carácter puramente orográfico; la precipitación, en este caso, se origina por el enfriamiento adiabático de las masas de aire a medida que éstas se desplazan sobre las elevadas barreras montañosas.

### III.1.2.- La evapotranspiración

Una gran parte del agua que se precipita sobre la superficie de la tierra vuelve a la atmósfera en forma de vapor a través de la acción combinada de la evaporación, la transpiración y la sublimación, las cuales son, en esencia, tres variantes de un único proceso debido a la acción de la energía solar, que es la que mantiene el ciclo hidrológico en marcha.

La evaporación es el proceso mediante el cual las moléculas de agua de una superficie libre o de un suelo humedecido adquieren, mediante la radiación solar, la energía suficiente para escapar del estado líquido y pasar al estado gaseoso. La sublimación difiere del fenómeno de la evaporación solamente en que las moléculas de agua pasan directamente del estado sólido (nieve o hielo) al estado de vapor, sin pasar por el estado líquido. La transpiración es el proceso mediante el cual las plantas ceden agua a la atmósfera.

En muchas regiones, el volumen total de la evaporación real no puede ser considerado independientemente de la transpiración, de ahí que ambos efectos suelen ser considerados en conjunto bajo el concepto más amplio de evapotranspiración. Los pulmones de los animales también exhalan al aire cierta cantidad de vapor, pero se trata de una cantidad completamente insignificante en comparación con los efectos totales de la evapotranspiración.

### III.1.3.- El Escurrimiento.

El término Escurrimiento es generalmente considerado como un sinónimo de aportación de un río; en este sentido representa la suma del escurrimiento superficial y del flujo subterráneo captado por los cauces de los ríos.

La expresión escurrimiento superficial suele referirse al volumen del conjunto de las precipitaciones que caen sobre una cuenca, menos la retención superficial y menos la infiltración (es decir el agua que llega a atravesar la superficie -

del suelo). Hay que distinguir claramente entre el significado de infiltración y el de flujo subterráneo. Para la comprensión de la relación que existe entre precipitaciones y escurrimientos de vital importancia en muchos proyectos hidráulicos-puede ser particularmente expresiva la representación gráfica del ciclo del escurrimiento.

El escurrimiento superficial es función de la intensidad de la precipitación, de la permeabilidad de la superficie del suelo, de la duración de la precipitación, del tipo de vegetación, de la extensión de la cuenca hidrográfica considerada, de la profundidad del nivel freático y de la pendiente de la superficie del suelo. A pesar de esta complejidad del fenómeno, los hidrólogos tienen unos procedimientos que les permiten realizar una serie de análisis muy significativos sobre la forma de los hidrogramas y, en muchas zonas, pueden incluso llegar a hacer predicciones suficientemente precisas sobre el valor del escurrimiento superficial que se producirá como consecuencia de una gran precipitación de características determinadas.

La aportación de una cuenca se representa comúnmente en forma de hidrograma. El hidrograma es una curva que representa las oscilaciones -en función del tiempo- del nivel del agua de un río en una sección dada del mismo. En el caso de un río que posea un tiempo de descarga muy largo, los caudales que por él circulan al cabo de un tiempo son el resultado de la acumulación del escurrimiento superficial con la aportación subterránea.

El estudio de los escurrimientos de los ríos como parte del ciclo hidrológico incluye el de la distribución del agua y el de su trayectoria desde que ésta se precipita sobre la tierra hasta que alcanza la red hidrográfica o vuelve directamente a la atmósfera a través de la evapotranspiración. La proporción correspondiente a cada una de las partes entre las que puede distribuirse el volumen total de agua caída durante una precipitación dada, depende tanto de las características y condiciones físicas -naturales o artificiales- de la cuenca como de las características de la propia precipitación.

Al comienzo de una fuerte precipitación, una gran cantidad de agua es interceptada por la vegetación; el agua así almacenada sobre la superficie de la capa vegetal se encuentra muy expuesta al viento y ofrece una enorme área de evaporación, de tal forma que las precipitaciones de corta du

ración y poca intensidad pueden llegar a ser completamente consumidas por la intercepción, por la pequeña cantidad de agua que se infiltra a través del suelo y por el agua que llena los charcos y las pequeñas depresiones de la superficie del suelo.

Para que el agua llegue a infiltrarse, la superficie del suelo debe presentar una serie de condiciones adecuadas. Cuando a lo largo de una precipitación, el poder de intercepción y de almacenamiento en la superficie del suelo han sido ya agotados, y cuando la precipitación es tal que su intensidad excede la capacidad de infiltración del suelo, comienza ya el escurrimiento superficial propiamente dicha (fig. 2). La superficie del suelo se cubre en ese momento con una fina película de agua llamada película de retención superficial. Una vez que el agua que corre sobre la superficie del suelo y alcanza los cauces de la red hidrográfica, comienza a aparecer el escurrimiento superficial en los cauces.

Parte el agua que se infiltra en el suelo continúa fluyendo lateralmente como un flujo hipodérmico, que tiene lugar a pequeñas profundidades debido a la presencia de horizontes relativamente impermeables situados muy cerca de la superficie del suelo, alcanzando de este modo los cauces de la red sin haber sufrido una percolación profunda. Otra parte de esta agua infiltrada percola hacia la zona de saturación de las aguas subterráneas y, eventualmente, alcanza la red hidrográfica para suministrar el caudal de base de los ríos. Existe todavía otra porción del agua infiltrada que no llega a alcanzar el nivel de saturación de las aguas subterráneas y queda retenida en la zona situada por encima del nivel freático de las aguas subterráneas, llamada también zona de saturación incompleta.

### III.2.- Movimiento del agua subterránea

#### III.2.1.- Zona de humedad

La parte subterránea del ciclo hidrológico constituye el principal centro de interés del hidrogeólogo. En el subsuelo, el agua se puede encontrar bajo una amplia gama de condiciones que se extienden desde el agua que circula libremente hasta el agua que se encuentra firmemente fijada en el interior de las estructuras cristalinas. La mayoría de las discusiones clásicas acerca de las aguas subterráneas tienden a hacer fuerte hincapié en la existencia de diversos tipos de agua subterránea, más o menos bien definidos. En la figura 3 mos-

## CLASIFICACION DEL AGUA DEL SUBSUELO

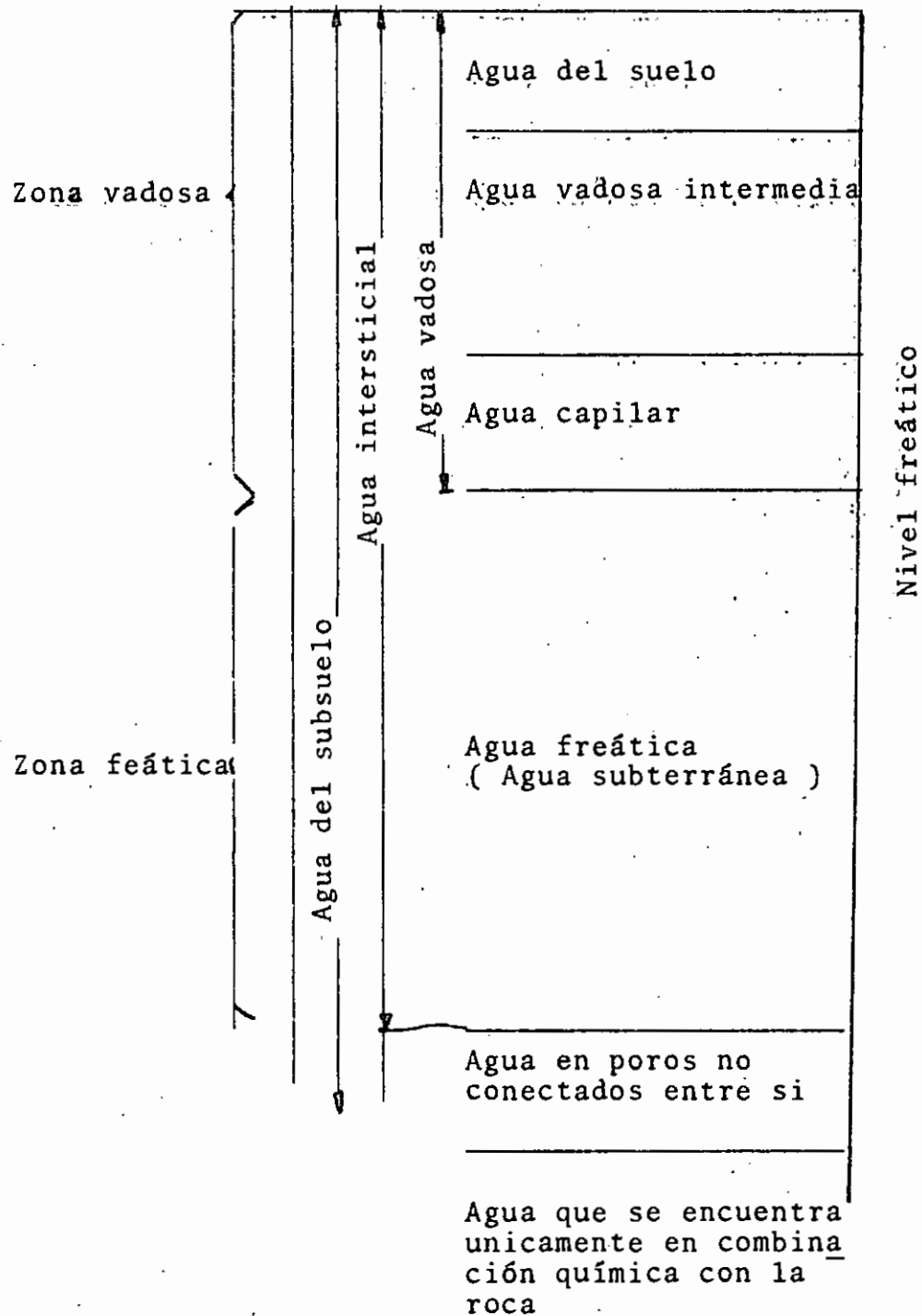


Fig. 3



tramos la clasificación de las aguas subterráneas. No existen, sin embargo, límites tajantes entre cada uno de los tipos de agua de estas dos clasificaciones; así por ejemplo, el agua del suelo está diferenciada del agua de las zonas más profundas.

Las fluctuaciones de humedad producidas por el efecto evapotranspirante de las plantas disminuye gradualmente en profundidad; de hecho, en las zonas de bosque normal, sólo algunas raíces llegan a alcanzar profundidades superiores a los diez metros. En las zonas más altas del suelo, hasta una profundidad de unos pocos centímetros, el contenido de humedad varía en función de las fluctuaciones de la temperatura y de la tensión del vapor, causadas por las variaciones de la temperatura del aire y del suelo. En las noches en las que el suelo pierde gran cantidad de calor por efecto de una fuerte radiación, tiene lugar, como consecuencia, una gran condensación de vapor de agua de la atmósfera sobre la superficie del suelo en forma de rocío; este fenómeno puede llegar a humedecer muy considerablemente los tres primeros centímetros del suelo. Durante los días cálidos, el agua es transportada hasta la superficie del suelo por la acción de las fuerzas capilares, desde donde puede ser evaporada a la atmósfera.

### III.2.2.- Zona Intermedia

Generalmente existe una zona intermedia que separa la superficie superior de la zona de saturación de la zona de humedad del suelo. Al agua del suelo y a la de la zona intermedia se le suele denominar agua suspendida, o vadosa; esta agua se desplaza únicamente bajo la acción de la fuerza de la gravedad, por lo que también ha sido denominada por algunos autores con el calificativo de agua gravífica o gravitacional. En este libro no se utiliza este término por considerar que casi todos los desplazamientos del agua libre del suelo y del subsuelo están condicionados por la acción de la fuerza de la gravedad.

La zona intermedia puede llegar a no existir en el caso de medios muy húmedos o, por el contrario, puede poseer un espesor superior a los 300 m en el caso de las regiones áridas. Si el material de esta zona es isótropo y existe además una importante recarga de agua, su contenido de humedad estará generalmente comprendido entre un punto próximo a la saturación y un punto próximo al índice de retención específica del material en cuestión. Sin embargo, el terreno natural no suele ser homogéneo; con lo que la recarga se verifica de manera --

desigual, no uniforme, de unas zonas a otras. Esto se da particularmente en las regiones áridas, donde las precipitaciones son pocas veces suficientes como para satisfacer la capacidad de almacenamiento del suelo. En estas regiones, la principal recarga tiene lugar a través del lecho de los cauces de los ríos, donde se concentra el escurrimiento directo y donde los depósitos permeables de arenas y gravas suelen ser más abundantes. En muchas regiones, es probable que la zona intermedia nunca haya llegado a estar siquiera mojada.

### III.2.3.- Franja Capilar

La zona intermedia, en su parte inferior, acaba donde comienza la llamada franja capilar. La transición entre ambas es más bien frusca en el caso de sedimentos de grano grueso, pero, por el contrario, puede llegar a ser prácticamente imperceptible en los limos y en las arcillas. En el caso de suelos de grano fino, si la recarga es activa, la diferencia del contenido de humedad entre la zona intermedia y la franja capilar puede llegar a ser muy pequeña. La superficie de la franja capilar, vista a gran escala, es irregular y su posición varía constantemente al variar el nivel freático y el caudal de la recarga. La parte superior de la franja capilar contiene numerosas bolsas de aire que pueden constituir un freno al movimiento descendente del agua. En la parte inferior de la franja capilar, el terreno alcanza justamente el punto de saturación total. Las fuerzas físicas que gobiernan el flujo del agua de la parte inferior de la franja capilar son prácticamente idénticas a las fuerzas que rigen el movimiento del agua subterránea en la zona de saturación.

### III.2.4.- Superficie Freática.

La zona de aguas subterráneas, o aguas freáticas, está separada de la franja capilar por la superficie freática. La superficie freática es una superficie teórica que viene determinada de manera muy aproximada por el nivel de la superficie del agua en el interior de los pozos que justamente penetran en el interior de la zona de saturación. Si el flujo del agua subterránea es horizontal, los niveles del agua en el interior de los pozos corresponden exactamente a la superficie freática. Sin embargo la presencia de pozos de bombeo distorsiona la forma natural de las superficies equipotenciales y, con ello, el nivel del agua en el interior de los pozos.

Las definiciones más generalizadas de la superficie freática la consideran como la superficie que separa la franja capilar de la zona de saturación, o bien como la superficie definida por los niveles de agua en los pozos que alcanzan un terreno saturado en condiciones de no confinamiento. Una definición más exacta diría que la superficie freática es la superficie saturada de un terreno no confinado sobre la cual la presión hidrostática es igual a la presión atmosférica.

### III.2.5.- Zona de Saturación

El agua situada por debajo de la superficie freática es generalmente denominada agua subterránea, y la zona situada por debajo de esta superficie es llamada zona de saturación. Ambos términos suelen ser un tanto confusos a causa de su frecuente interpretación no científica. Frecuentemente el término agua subterránea suele hacer referencia a todo tipo de agua situada por debajo de la superficie del suelo, y el término zona de saturación suelo referirse a todo tipo de material saturado de agua. Por esta razón, proponemos la utilización del término "agua subterránea" como medio muy general de expresar toda el agua situada por debajo de la superficie del suelo. El término "zona de saturación" no es un término tampoco muy exacto, ya que la parte inferior de la franja capilar está también saturada. Teniendo en cuenta que el agua de la parte inferior de la franja capilar emigra casi con la misma velocidad que el agua situada justo por debajo de la superficie freática, no nos parece justificada esta definición de zona de saturación. Un término más aceptable para definir esta zona sería el de zona de agua freática, puesto que con este término se acostumbra designar el agua que puede entrar libremente en los pozos. El agua de la franja capilar no fluye a los pozos que la atraviesan, a no ser que se trate de un pozo de captación que penetre por debajo de la superficie freática y la capte indirectamente.

La zona de agua freática limita en su parte inferior con una zona donde la compacidad del terreno hace que éste contenga muy pocos poros, no conectados entre sí, con lo que el agua no puede emigrar en profundidad.

### III.2.6.- Los Acuíferos

Solamente una reducida minoría de zonas freáticas puede suministrar caudales significativos de agua a los pozos que las atraviesan. Las zonas que poseen agua de llaman acuíferos.

Una roca que ni almacena ni transmite agua se llama acuífugo -término que contrasta, pues con el de acuífero, que se refiere a las formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir agua a los pozos gracias a los espacios porosos que existen en su interior, y con el de acuícludo, que se refiere a las formaciones geológicas que solamente almacenan agua, pero que no la transmiten en cantidades significativas-. El término acuitardo es también utilizado por algunos autores para describir las formaciones geológicas que, aunque almacenan agua y la transmiten en cantidades significativas a escala regional, no son suficientes para abastecer por sí instantáneamente a los pozos.

Los términos precedentes carecen todos de definiciones precisas en lo que respecta a las propiedades físicas mensurables de los terrenos acuíferos; de hecho, se ha dicho con frecuencia que un acuífero de una región desértica que pudiese suministrar a un pozo un caudal de 500 litros/día sería clasificado como acuitardo, o incluso como acuícludo, si ese mismo terreno estuviera situado en un valle aluvial colmatado por gravas, las cuales son capaces de suministrar volúmenes de varios miles de metros cúbicos al día. Por esta razón, algunos hidrogeólogos prefieren definir los acuíferos como zonas naturales situadas por debajo de la superficie del suelo que son capaces de suministrar agua en cantidades suficientemente grandes como para ser económicamente explotables.

Los acuíferos pueden estar constituidos por depósitos sedimentarios no consolidados, por rocas plutónicas masivas fracturadas, por estratos de areniscas porosas, por bancos de calizas carstificadas y por otros muchos contextos geológicos diferentes. Aunque se pueden hacer cálculos sumamente útiles partiendo de la hipótesis simplificadora de que los acuíferos son uniformes en su composición, horizontales y tabulares, el hidrogeólogo debe tener siempre presente que existe, sin embargo, una variedad casi infinita de formas y condiciones hidrogeológicas posibles. En los capítulos siguientes se analizan muchas de las posibles condiciones acuíferas que pueden presentar los terrenos geológicos en la naturaleza.

### III.- 2.7.- Agua Confinada y no Confinada

El agua de un acuífero que se encuentra en contacto directo con la atmósfera a través de los espacios huecos de un terreno permeable se la denomina agua no confinada. El agua confinada está separada de la atmósfera por un terreno impermeable. La división entre aguas confinadas y no confinadas no tiene solución de continuidad. El término semiconfinado se utiliza para las condiciones intermedias. En muchas zonas, la primera

agua no confinada que se suele encontrar está frecuentemente por encima de la zona general de las aguas freáticas, constituyendo un volumen de agua más o menos aislado cuya posición está impuesta por la estructura y la estratigrafía del terreno; al agua que se encuentra bajo estas condiciones se la denomina agua colgada; su superficie freática recibe el nombre de superficie freática colgada. La distinción tajante entre agua confinada, semiconfinada, no confinada y colgada es generalmente muy difícil de establecer en la naturaleza.

Al agua confinada se le suele denominar también agua artesiánica. Esta expresión, sin embargo, fué aplicada al principio exclusivamente para las aguas subterráneas sometidas a una presión hidráulica suficiente como para dar lugar a pozos surgentes. En los últimos años, el término artesiano se ha venido utilizando más o menos como sinónimo de confinado.

### III.2.8.- Elementos de un Sistema Artesiano.

El concepto primitivo de flujo artesiano estaba basado en una concepción análoga a la de un depósito estanco alimentado por una fuente de agua con una carga hidrostática situada a una cota superior a la del punto de descarga. La mayoría de los ejemplos de los libros de texto muestran, todavía hoy día, una estructura geológica sinclinal con una fuente de recarga situada por encima del nivel piezométrico del agua en un pozo de descarga, como ejemplo de un sistema acuífero artesiano.

En estos libros se suele ver cómo el nivel piezométrico del acuífero se obtiene uniendo con una línea recta la posición del nivel del agua en la zona de recarga con la posición alcanzada por el nivel del agua en un pozo surgente. En estos ejemplos. El acuífero suele estar confinado por una formación porosa prácticamente impermeable, llamada acuicludo, o por formaciones ligeramente permeables, llamadas acuitardos. Esta imagen estructural clásica, si bien es cierta para una gran parte de los grandes sistemas artesianos, en la naturaleza, sin embargo, las variedades de condiciones hidráulicas de artesianismo son infinitas.

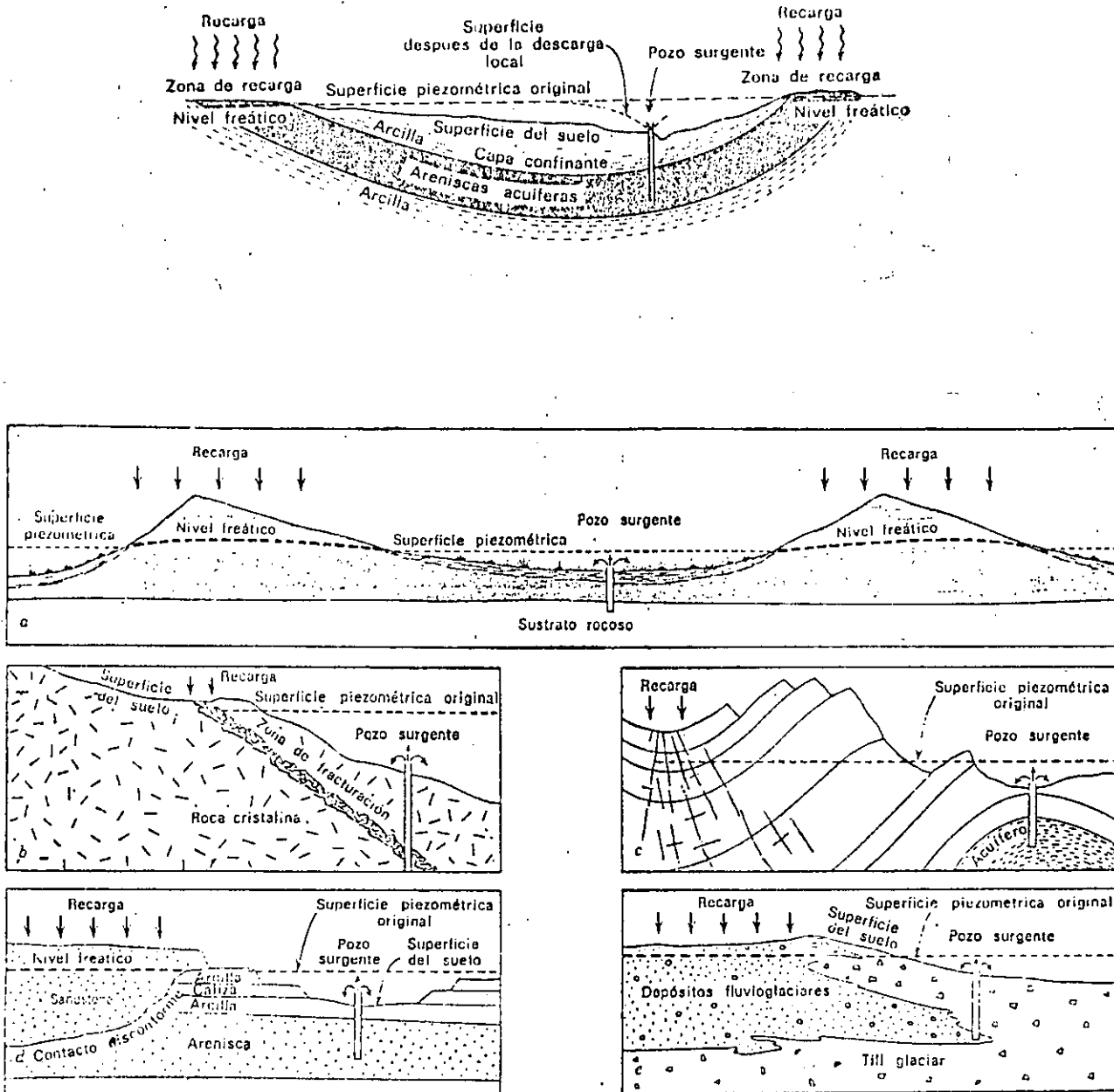
### III.2.9.- Origen de la Presión Hidráulica en los Acuíferos Artesianos.

El solo hecho de que la cota del agua sea más elevada en la --

zona de recarga que en un punto de descarga de un pozo explica ya que éste pueda llegar a ser surgente. Esta explicación tan simplista sólo suele ser rigurosamente exacta en los casos de acuíferos de extensión local, en rocas consolidadas. Los acuíferos de gran extensión pueden presentar una complejidad notablemente mayor, siendo necesario recurrir a modelos gráficos más complicados para poder explicar satisfactoriamente el conjunto de fenómenos observados en la mayor parte de los grandes sistemas artesianos. Fig. 4

Si un sistema artesiano fuera perfectamente rígido y estuviera saturado de un fluido ideal que no tuviera ninguna viscosidad y fuera incomprensible, los efectos de la descarga de un pozo serían observados a través de una caída instantánea del nivel del agua en todos los pozos del acuífero así como en la zona de recarga del sistema. Este fenómeno, sin embargo, no suele observarse en los sistemas artesianos, donde, por lo general, los efectos que producen los bombeos de los pozos son de un orden de magnitud tal que prácticamente quedan limitados a una zona próxima a los pozos bombeados que normalmente no suele ser superior a unos 15 km.

Meinzer fué uno de los primeros geólogos que siguió esta línea de razonamiento hasta llegar a una conclusión lógica. Meinzer observó que el nivel del agua en los pozos del gran sistema artesiano de Dakota, en los Estados Unidos, respondía solamente a los efectos de los bombeos locales; observó también que el volumen del cono de depresión creado por los bombeos era notablemente inferior al del agua bombeada. Los cálculos posteriores de Meinzer pusieron de manifiesto que el agua bombeada en los sistemas acuífero confinados y semiconfinados proviene simultáneamente de tres fuentes principales: 1) Del agua que se desplaza dentro de la formación acuífera hacia la zona de descarga. 2) Del agua que sería expulsada al exterior, a través del pozo, por la compactación del terreno acuífero descargado. 3) De la expansión del volumen de agua comprimida en el acuífero. Concluyó que de estas tres fuentes, la segunda -el agua expulsada al exterior por la compactación del acuífero- era la más importante.



- Pozos artesianos (surgentes) en dunas estabilizadas (a), en rocas cristalinas (b), en rocas sedimentarias complejamente plegadas y fracturadas (c), en rocas sedimentarias horizontales (d) y en depósitos glaciares (e).

Fig. 4

#### IV.1.- FOTOINTERPRETACION GEOHIDROLOGICA

En nuestro país existen muchas áreas con escasa información geohidrológica, es necesario iniciar los estudios prácticamente desde la prospección o búsqueda del agua subterránea, fijando los sitios para las exploraciones geofísicas o para las perforaciones y posteriormente, en otras etapas, de la investigación de los recursos hidráulicos subterráneos se requiere el establecimiento de un marco geohidrológico o modelo conceptual que sirva de base para la interpretación del funcionamiento de los acuíferos a fin de definir las zonas de explotación más convenientes.

Mucha de la información necesaria para los estudios geohidrológicos puede ser obtenida con rapidez y bajo costo, mediante la interpretación de fotografías aéreas, ya que ellas ofrecen una visión regional del terreno, de todos los aspectos que interesan al estudio del agua subterránea, tales como la geomorfología, el drenaje superficial, las fronteras superficiales de unidades geohidrológicas, la vegetación y uso del suelo; la utilización de fotografías aéreas resulta favorable incluso para aquellas zonas que ya están en explotación o que cuentan con cartas geológicas, pues éstas generalmente no registran toda la información útil para el estudio del agua subterránea.

Por ser de mucha utilidad y por la riqueza de información que se obtiene de las fotografías aéreas, en estas notas se señalan los alcances y procedimientos de la fotointerpretación en el estudio del agua subterránea y sobre la manera más conveniente de registrar la información obtenida. Los criterios de interpretación pueden ser válidos tanto para fotografías aéreas verticales obtenidas con cámaras comerciales como para fotografías espaciales.

La interpretación de fotografías aéreas es una técnica basada en la observación y análisis de las imágenes fotográficas a fin de deducir el significado de ellas: la calidad y cantidad de información que se puede obtener, depende de la formación y experiencia del fotointérprete y del tipo de material fotográfico utilizado.



La técnica de fotointerpretación proporciona información eminentemente de tipo cualitativo mediante el análisis y clasificación de los rasgos que presentan los objetos fotografiados. Con este análisis se trata de establecer todos los tipos de interrelación que existe entre los rasgos y formas que han intervenido en su formación; de esta manera se establecerán diferencias y discontinuidades de los terrenos que luego es necesario rectificar o ratificar en el campo; es por eso que esta actividad de ninguna manera desecha los trabajos de campo, aunque se ve considerablemente reducida, en virtud de -- que previamente se pueden ubicar en las fotografías aéreas los sitios de muestreo y se puedan programar los recorridos a los lugares de interés.

En los estudios de fotointerpretación intervienen distintos factores que influyen en la calidad de la fotointerpretación; entre los más importantes se tienen los siguientes:

- a).- Características de la fotografía aérea
- b).- La imagen estereoscópica
- c).- Característica de la fotointerpretación

Fotografías Aéreas.- Las fotografías aéreas de eje vertical es una proyección central que registra todos los objetos visibles en la superficie terrestre. Sus características geométricas resultan incorrectas debido al desplazamiento causado por el relieve y por la distorsión de la cámara fotográfica. Existen numerosas características de las fotografías aéreas que influyen en la fotointerpretación y que son: calidad de la imagen, tipo de cámara, tipo de películas, tipo de filtro, proceso de revelado, estación durante la cual fué tomada la fotografía, escala, dirección del vuelo.

Entre la variedad de películas existentes, la película pancromática (blanco y negro) tiene el mayor uso y tradicionalmente es la que se ha utilizado en los trabajos de fotointerpretación, sin embargo, actualmente con el avance de las nuevas técnicas de percepción remota, se han desarrollado nuevos tipos de película y filtros permitiendo mejorar también la calidad de la fotointerpretación y consecuentemente obtener una mayor riqueza de información.

En la práctica de la fotointerpretación la utilización de las fotografías a color e infrarrojo a color, ha dado buenos resultados en los estudios de cobertura vegetal, suelos y cuerpos de agua, ya que por la calidad de la información, se disminuye considerablemente la verificación de campo.

La escala de la fotografía está determinada por la relación que existe entre la distancia focal de la cámara y la altura de vuelo. La elección de las escalas fotográficas depende mucho del tipo de trabajo por desarrollar; comúnmente se recomienda la escala 1:25,000 a 1:50,000 para trabajos de reconocimiento y 1:10,000 a 1:20,000 para trabajos de detalle; sin embargo, deben tenerse presente dos factores que incluyen en el uso de la fotografía y que son el relieve y la vegetación. Para fines geomorfológicos a veces es conveniente contar con fotografías de escala chica o espaciales, ya que en una sola fotografía pueden aparecer estructuras geológicas de conjunto, que a una escala mayor, serían registrados sólo parcialmente, por lo que estas estructuras pudieran pasar desapercibidas.

Estereoscopia.-La interpretación de fotografías aéreas requiere primordialmente de la utilización de fotografías estereoscópicas y éstas no son más que fotografías que contienen rasgos y objetos registrados desde posiciones diferentes del avión y que al examinarlos a través de un estereoscopio se puede observar tridimensionalmente.

En general puede decirse que cuando los objetos son observados con un solo ojo (visión monocular) estos se perciben únicamente en dos dimensiones y sólo la sensación de profundidad se obtiene utilizando los dos ojos (visión binocular). La visión estereoscópica es la reproducción artificial de la visión binocular y se puede obtener utilizando estereoscopios o anaglifos. Comúnmente en los trabajos de fotointerpretación se utilizan estereoscopios de lentes, prismas y espejos.

Características de la fotointerpretación.- La parte más importante de los trabajos de fotointerpretación la constituye el elemento humano ya que en la mayoría de los casos, la calidad depende fundamentalmente de la experiencia y formación profesional del intérprete; esto y los objetivos que persigue la fotointerpretación determinan el nivel y el alcance del trabajo.

La práctica de la fotointerpretación aconseja que los trabajos con fines geológicos, agua, suelos, bosques, urbanismo, actividades agrícolas, etc. sean desarrollados por personas con una formación acorde a esas disciplinas; las cuales deben reunir ciertas condiciones fisiológicas y psicológicas favorables para aplicar la técnica inductiva y deductiva que se utiliza en la fotointerpretación.

Para el caso de una interpretación geohidrológica los fotointérpretes, deben tener una base de conocimientos geológicos, hidrológicos y de uso del suelo; para poder --conceptuar a través de fotografías todos los factores que tienen relación con el agua subterránea.

De todas maneras, en términos generales; la fotointerpretación utiliza una serie de criterios para identificar, analizar y clasificar los rasgos fotográficos, bajo una visión estereoscópica, como son:

Criterios derivados de las características físicas de la fotografía como son: textura, tono y color fotográfico.

Criterios derivados de las características de tamaño y forma de los objetos fotografiados.

Criterios derivados de las características geomorfológicas de las zonas fotografiadas.

Criterios derivados de las características de los suelos, cobertura vegetal y su relación con el uso actualizado del suelo y la actividad agrícola.

#### IV.- RESISTIVIDAD ELECTRICA

En la explotación del agua subterránea con frecuencia se plantea la necesidad de ubicar adecuadamente las perforaciones y la profundidad de ellas; esto se puede lograr si se conoce tridimensionalmente la estructura geohidrológica y las discontinuidades que presentan los terrenos.

Investigar la estructura del subsuelo en base a perforaciones resulta demasiado costoso y hacer exploraciones aisladas, sea por sondeos mecánicos o geofísicos, pueden proporcionar información falsa sobre las condiciones del subsuelo, ya que generalmente los terrenos no son homogéneos y presentan variaciones o discontinuidades tanto laterales como en profundidad.

Aunque hay varios procedimientos geofísicos para investigar el subsuelo, tratándose del agua subterránea, el que mayores ventajas tiene es el método de resistividad eléctrica, porque el recíproco de ésta o sea la conductividad eléctrica, está íntimamente ligada a la naturaleza de los elementos sólidos (conductividad electrónica) y al contenido y calidad del agua que están en los intersticios de las rocas y los suelos (conductividad iónica).

En la práctica, numerosas experiencias han permitido señalar la bondad del método resistivo, aclarando que las medidas resistivas no determinan ni la presencia de agua ni la cantidad de agua disponible, sino que un conjunto de medidas de terminan como es la distribución de la corriente eléctrica en el subsuelo, lo que indudablemente está relacionado con su estructura geohidrológica. La interpretación y calibración posterior de las medidas resistivas con datos de perforaciones permite ver hasta entonces cual es el horizonte o cuerpo que tiene interés acuífero.

La ventaja del método resistivo, calibrado con perforaciones, estriba en que no se tiene una información puntual sino una información tridimensional de toda una cuenca geohidrológica.

Es por eso que la práctica aconseja que se obtenga una cantidad suficiente de medidas para poder registrar con seguridad las variaciones que muestran los terrenos, aún tratándose de definir la ubicación de una perforación, pues un sólo sondeo geofísico puede estar afectado por influencias laterales que distorcionan la realidad.

#### IV.2.1.- Fundamentos

Existen varios métodos de investigación geofísica -- que se fundan en el estudio de la circulación de la corriente eléctrica a fin de establecer una relación entre la propaga---ción de la corriente y las características físicas del subsue---lo.

Esta circulación se produce en forma natural median---te corrientes telúricas o en forma artificial cuando se intro---duce una cantidad de corriente conocida, pues todos los mate---riales facilitan en mayor o menor grado el flujo de la corrien---te, ya sea a través de los elementos sólidos (conductividad -- electrónica) o por medio de los iones del agua que ocupa los - intersticios de las rocas y los suelos (conductividad iónica).

Una circulación artificial de la corriente es la que se lleva a cabo por el método de resistividad eléctrica, que - consiste en crear un campo de potencial al introducir una co---rriente continua de intensidad conocida y medir los efectos -- que dicha corriente provoca, es decir medir el valor del poten---cial o de alguna otra cantidad asociada con este flujo de elec---trones.

La medición del campo eléctrico se logra mediante -- instrumentos y dispositivos de medidas tetrapolares (2 electro---dos de corriente y dos de potencial), haciendo sondeos eléctri---cos verticales o secciones cuya ubicación y arreglo, permite - obtener información sobre la distribución y anomalías de la co---rriente eléctrica en el subsuelo y por tanto de su estructura.

Para los estudios geohidrológicos este método resul---ta de gran valor porque la conductividad iónica está relaciona---da con el volumen de los poros y con la disposición y el volu---men de los poros reemplazados por agua, lo que significa que - si un terreno es compacto, presentará una elevada resistencia al paso de la corriente eléctrica; en caso contrario, si son - porosos, tendrán baja resistencia la cual disminuye más si los poros contienen agua.

La oposición que muestran los materiales al paso de la corriente es una resistividad aparente que resulta ser una función de la resistencia específica real de los terrenos que afectan la circulación de la corriente; entonces al hacer una investigación por el método de resistividad eléctrica, la base fundamental de ésta es determinar y analizar las resistivida---des aparentes.

La determinación del valor de la resistividad aparentemente se obtiene mediante la medida de la diferencia de potencial entre dos puntos del terreno, con relación a la intensidad de la corriente introducida al subsuelo y a un arreglo geométrico de los electrodos de emisión (AB) y recepción (MN) de la corriente eléctrica (Figura 5).

La fórmula base se determina de la manera siguiente:

Considerando un medio homogéneo e isótropo como el de la Figura 6 que tiene una resistividad específica ( $\rho$ ) en el que se coloca un electrodo en A y si se aplica una corriente de intensidad I y además se trazan dos espesores de radio ( $r$ ) y ( $r+dr$ ) con centro en A se forma un cono de ángulo muy pequeño, la caída de potencial  $dV$ , originada por el paso de la corriente en el tronco de cono según la ley de Ohm se escribe:

$$-dv = \rho \frac{dr}{ds} I$$



Fig. 5

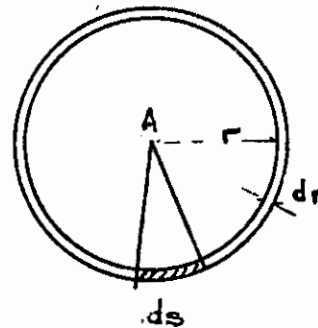


Fig. 6

Para la esfera total de radio r

$$-dv = \rho \frac{dr}{4\pi r^2} I$$

$$V = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{r} + cte$$

En el caso de una medición en el cual los electrodos estén situados en la superficie del terreno o sea en un semiespacio in finito entonces:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r}$$

En la práctica los métodos más utilizados emplean 4 electrodos. Si se aplica la fórmula anterior a un cuádrupolo cualquiera -- ABMN, en la que se tiene un circuito de emisión AB y otro de recepción MN (Fig. 7) los potenciales producidos se sumarán algebraicamente.

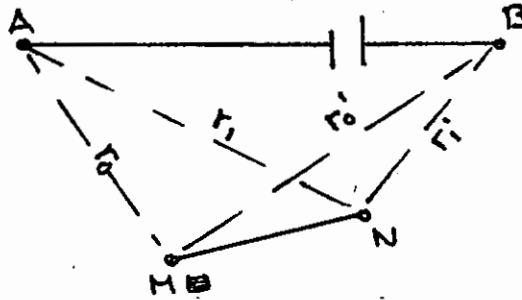


Fig. 7

En este caso el potencial en M y N será

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_0'} \right)$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1'} \right)$$

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_0'} \right) - \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1'} \right)$$

$$V_M - V_N = \Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0'} + \frac{1}{r_1'} \right)$$

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \left( \frac{2\pi}{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0'} + \frac{1}{r_1'}} \right)$$

si llamamos

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0'} + \frac{1}{r_1'}}$$

entonces

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

que es la fórmula general de resistividad para cualquier dispositivo cuádrupolar.

En el caso de un terreno cualquiera no isótropo  $\rho$  resulta aparente y la fórmula se expresa:

$$\rho_a = K \frac{V}{I}$$

El concepto de este valor radica en el hecho de que proporciona una medida que es función de la caída de potencial de los terrenos homogéneos y las unidades están expresadas en las dimensiones de una resistencia multiplicada por su longitud o sea en ohmios-metro ( $\Omega/m$ ); los demás factores que intervienen están expresados: ( $\Delta V$ ) en milivoltios e ( $I$ ) en ----- miliampers; el valor  $K$  es de longitud y depende del arreglo y separación de los electrodos.



### I V.2.2.- Dispositivos de Medida

De manera general se puede decir que los métodos tradicionales de medida adoptan un arreglo cuadripolar con 2 electrodos de emisión y 2 de recepción, en las que las separaciones pueden variar o permanecer constantes según sea el tipo de investigación por efectuar.

Los dispositivos de uso común más importantes son el Schlumberger y el Wenner, de los que se ha derivado una serie de variantes y combinaciones para realizar los trabajos en forma más expedita.

El arreglo Schlumberger es el más ampliamente usado en prospección eléctrica. Para este arreglo los 4 electrodos se colocan a lo largo de una línea recta sobre la superficie del terreno (Fig. No. II.4a), en el mismo orden A, M, N y B, la distancia  $\overline{AB}$  suele ser mayor 5 veces a la separación  $\overline{MN}$  ( $\overline{AB} = 5 \overline{MN}$ ), en este caso la constante K de un arreglo simétrico AMNB es:

$$K = \pi \left( \frac{\overline{OA}^2}{\overline{MN}} - \frac{\overline{MN}}{4} \right)$$

Por ejemplo, si se tiene un arreglo de  $\overline{AB}=100$  y  $\overline{MN}=20$ , la constante valdrá:

$$K = 3.1416 \left( \frac{50^2}{20} - \frac{20}{4} \right)$$

$$K = 377.0$$

El arreglo Wenner también utiliza 4 electrodos equidistantes que se colocan en la superficie del terreno a lo largo de una línea recta (Fig.No.II.4b), así se tiene que:

$$\overline{AM} = \overline{MN} = \overline{NB} = a$$

y

$$K = 2 \pi a$$

en este caso el valor de K depende directamente del valor que tenga  $\underline{a}$ ; por ejemplo si  $a=30m$ , entonces:

$$K = 2 \pi \times 30$$

$$K = 2 \times 3.1416 \times 30$$

$$K = 188.5$$

Además de los arreglos electródicos antes mencionados existen una serie de variantes y combinaciones entre las que se cuenta la de Wenner-Lee, que utiliza un electrodo central, que permite comprobar la medición en ambos lados del dispositivo (Fig. No.II.4c); el valor de la resistividad aparente viene dado por la ecuación siguiente:

$$\rho_a = 4 \pi a \Delta V_U^P = 4 \pi a \frac{\Delta V_P^N}{I}$$

$$\rho_a = 2 \pi a \frac{\Delta V}{I}$$

Los tres arreglos descritos son los más utilizados en la prospección eléctrica aplicada para geohidrología.

#### IV.2.3.- Trabajo de Campo

Los trabajos de campo consisten esencialmente en un reconocimiento del terreno para fijar los sitios de medición y la operación para obtener las medidas resistivas.

##### Reconocimiento del Terreno

En los estudios de resistividad eléctrica previamente se requiere realizar un reconocimiento de campo para ubicar adecuadamente los sondeos y los perfiles, mismos que estarán acordes con el objetivo y nivel de la investigación.

Durante este recorrido se debe tomar nota sobre la forma topográfica del terreno, las características de calidad y estructura geológica observable en la superficie, así como los escurrimientos y arreglo de la red hidrográfica. También es necesario obtener información sobre los aprovechamientos hidráulicos superficiales y subterráneos para que sea utilizada y tomada en cuenta tanto en la fijación de los sondeos como en el proceso de interpretación de medidas.

Una manera de auxiliarse en el reconocimiento de campo es mediante la interpretación de fotografías aéreas, porque en ellas se pueden delimitar las variaciones que tienen las rocas y los suelos y hacer un análisis de la estructura geomorfológica. Este procedimiento además de proporcionar una riqueza de información, es rápida y económica y dará una base objetiva para hacer posteriormente una correlación de resultados.

Al registrar todos los elementos que se identifiquen en la superficie del terreno, se estará en posibilidad de decidir sobre los dispositivos de medida, separación de los electrodos, y las diferentes profundidades a que deberá orientarse la investigación.

##### Operación de Campo

La ejecución de un programa de exploraciones en el campo es parte fundamental dentro del proceso de investigación, ya que de su buena realización depende el resultado final del estudio, por lo que las medidas deberán realizarse correctamente.

El proceso para realizar un programa de investigaciones debe incluir sistemáticamente los siguientes pasos:

- a) Preparación del dispositivo e instalación del equipo.
- b) Obtención de la medida
- c) Comprobación de las medidas y trazo de la curva del sondeo
- d) Observaciones durante la medición y tipo de registro.
- e) Sondeos de prueba y de correlación
- f) Separación de sondeos y promedio de medidas.

a).- Preparación del dispositivo e instalación del equipo.- Una vez seleccionado el punto por investigar, se coloca en dicho sitio una estaca con su número correspondiente, se señala el rumbo del dispositivo de acuerdo con el programa previsto o en su defecto hacia las zonas de mejor acceso para el dispositivo de medida, se proporciona al personal una cuerda de 100 m y se les dan instrucciones sobre las sucesivas posiciones del cuadripolo AMNB, la cual depende del dispositivo empleado. Las maniobras anteriores deberán realizarse simultáneamente con la instalación del equipo de medida.

b).- Obtención de la medida.- Una vez instalado el equipo y verificado la correcta posición de los electrodos se procede a verificar la calibración del instrumento de medida, este paso deberá realizarse antes de iniciar cada sondeo; posteriormente se efectúa la cancelación de las tensiones parásitas y se procede a realizar las medidas de  $V_e I$  correspondientes a la primera estación; enseguida, los obreros desplazan los electrodos a las demás posiciones; en cada posición deberá compensarse la tensión entre los electrodos M y N y realizar la medición lo más rápidamente posible. Lo anterior se repetirá en cada estación hasta terminar con el sondeo.

La realización de las medidas depende mucho del equipo que se utilice. A continuación se describe una medida para arreglo Schlumberger utilizando un equipo constituido por un potenciómetro y un convertidor de corriente; la parte inicial del proceso es semejante a otros sondeos, se proporciona a los peones una cuerda en donde van marcadas las sucesivas posiciones de los electrodos A y B, ya que los electrodos M y N debe-

rán desplazarse con otra frecuencia, se realiza la instalación del equipo, se conectan los electrodos M y N a los carretes y estos a su vez al potenciómetro, los electrodos de emisión se conectan por medio de sus carretes a la fuente de energía en este caso al convertidor.

Se realiza el ajuste de cero del aparato y se procede a efectuar la compensación de las tensiones parásitas que se encuentran en los electrodos de potencial; tan pronto como se ha efectuado, se cierra el circuito de emisión y se procede a realizar las medidas de  $V$  e  $I$  de la primera estación, después de esto los obreros desplazan los electrodos A y B a las demás estaciones. En cada estación debe compensarse la tensión entre los electrodos M y N y realizar la medición lo más rápidamente posible; después de cada lectura deberán verificarse las tensiones parásitas, si éstas han variado notablemente, se deberá repetir la lectura, una vez que se haya compensado la polarización espontánea.

Cuando se está utilizando dispositivo Schlumberger, los valores de  $V$  disminuyen rápidamente de estación a estación, cuando el operador prevea que la siguiente lectura va a resultar difícil, se procede a la operación de empalme, es decir, el paso a un valor mayor de MN. Generalmente la distancia MN AB/5.

c).- Comprobación de las medidas y trazo de la curva en el campo.- Se debe ir comprobando la calidad de los resultados por lo que se debe calcular y dibujar la curva de resistividades aparentes que las expresa, si la curva presenta saltos o irregularidades, se repiten las estaciones correspondientes procurando eliminar las causas de la irregularidad; esto es, realizar pruebas de fuga, compensación de tensiones parásitas, correcta colocación de los electrodos, buen estado de cables, calibración del instrumento de medida y tomar nota del material en que se hayan clavado los electrodos. La comprobación de las pruebas de fugas deberá realizarse periódicamente; en tiempo húmedo y terreno cubierto de barro se efectúa varias veces en cada sondeo.

d).- Observaciones durante la medición y tipo de registro.- La correcta anotación de las observaciones de campo es uno de los factores que más influyen en la calidad de los resultados finales. Las lecturas de los instrumentos deben ser registrados fielmente, es necesario que el operador anote todos los factores que puedan influir en la medición, como estado y anomalías del equipo, pruebas de fuga, estabilidad de la compensación, estado del tiempo, estado y naturaleza del suelo, accidentes topográficos, caminos, líneas eléctricas, --

etc., que hayan sido atravesadas por los electrodos de corriente. También son muy importantes los datos geológicos, tales como naturaleza del recubrimiento y acarrees, afloramientos próximos, etc.

Las Figuras Nos. 8 y 9 reproducen una hoja para registro de campo para dispositivo Schlumberger y Wenner respectivamente.

e).- Sondeos de prueba y correlación.- Cuando en una zona por investigar se desconocen por completo las resistividades, es conveniente realizar algunos sondeos de prueba, para conocer los rangos de variación de la resistividad así como el número de medidas a realizar por cada sondeo. Si en la zona de estudio o en áreas adyacentes existen perforaciones profundas, es conveniente efectuar en cada pozo sondeos en cruz, es decir investigar el mismo punto con los azimutes del cuadripolo perpendiculares, lo anterior se realiza para calibración posterior de las medidas con los resultados de la perforación.

f).- Separación de sondeos y promedio de medidas.- Las separaciones más comunes entre centros de cada sondeo es de 400 a 500 m, pero esto depende del detalle que se desee obtener.

El promedio de medidas en la exploración geoelectrica es importante desde el punto de vista económico, pero depende de factores tan esenciales como la práctica y experiencia del personal y de las condiciones imperantes en la zona de estudio, sobre todo hacia las áreas donde se desplazarán los electrodos, ya que una zona poco accesible permite un avance lento del dispositivo AMNB. También depende de la longitud final de la línea AB y del desplazamiento entre los centros de cada sondeo.

El rendimiento diario promedio es de 4 sondeos con 22 estaciones cada uno, cuando la separación entre sondeos sea de 500 m y las longitudes de las líneas de emisión queden comprendidas entre 800 y 1,200 m, es decir se deberán realizar entre 80 y 100 medidas de resistividad diarias. Conforme se vaya adquiriendo destreza en la operación del equipo y experiencia deberá aumentar el promedio de medidas diarias.

#### I V.2.4.- Interpretación

Después de obtener la información de campo y las medidas resistivas se lleva a cabo la interpretación de resultados tanto cualitativa como cuantitativamente; en el primer caso para determinar un esquema de la distribución de la corriente en

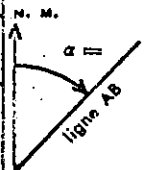
MISSION N°			AZIMUT N. M.			<b>S. E.</b>		
STUDE								
OPERATEUR			J			M		
pht 1			A					
OA	MN	K	$\Delta V$	$i$	$\rho$	OBSERVATIONS		
1								
1,5								
2								
3								
3	2	1,26						
5	2	3,77						
7	2	7,54						
10	2	15,55						
10	5	5,89						
15	5	13,75						
20	5	24,75						
30	5	56,2						
40	5	100,1						
50	5	156,7						
50	20	37,7						
70	5	307,5						
70	20	75,4						
100	20	155,5						
150	20	352						
200	20	627						
200	80	150,8						
300	20	1412						
300	80	347						
400	20	2510						
400	80	622						
500	20	3925						
500	80	975						

Fig. 8 Schulumberger

Proyecto \_\_\_\_\_

Perfil \_\_\_\_\_

SEV. N° \_\_\_\_\_

e	I (mA)	V (mV)	K	$\rho_a$
1			6.3	
2			12.5	
3			18.8	
4			25.5	
6			37.5	
8			50.0	
10			62.5	
12			75.0	
16			100.0	
20			125.5	
24			150.0	
32			200.0	
40			250.0	
48			300.0	
56			351.6	
64			402.0	
72			452.0	
80			500.0	
100			628.0	
120			754.0	

Observaciones. —

Fig. 9 Wenner

el subsuelo y en el segundo caso para definir la posición, espesor y profundidad de aquellas zonas que presentan variaciones o anomalías resistivas.

La interpretación normalmente se hace en función de valores de resistividad pero si se tiene información geológica de superficie y del subsuelo, entonces estos datos ayudan a calibrar las medidas y correlacionar conjuntamente la información permitiendo obtener perfiles de resultados con sus características geofísicas y geológicas. A continuación se describen estos procedimientos.

### Interpretación Cualitativa

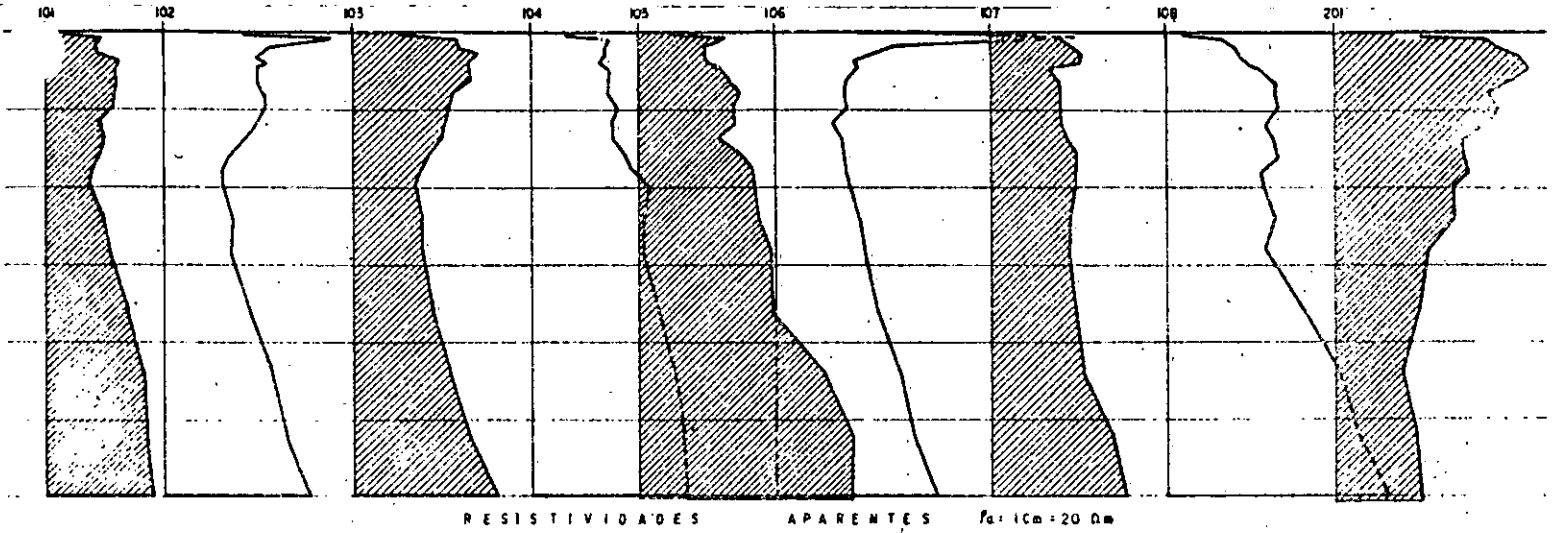
Este tipo de interpretación permite establecer conceptualmente las irregularidades del terreno en función de la distribución de la corriente en el subsuelo; para tal fin se lleva a cabo el procesamiento de los valores resistivos y elaboración de varios tipos de curvas. El procesamiento incluye:

- a).- Verificación de las resistividades aparentes.
- b).- Elaboración de curvas de resistividad aparente-distancia de emisión.
- c).- Elaboración del perfil de curvas de isorresistividad.
- d).- Elaboración del perfil de resistividad aparente-distancia de emisión constante.
- e).- Mapa de isorresistividad aparente con distancia de emisión constante.

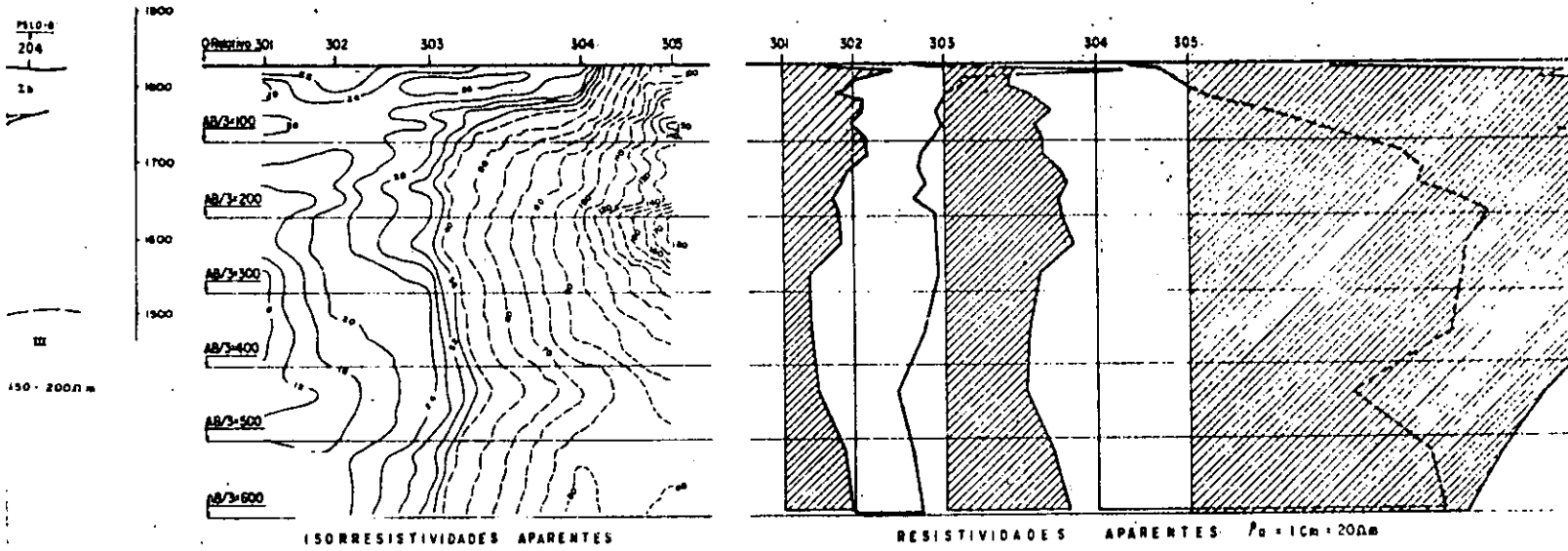
a).- Verificación de las resistividades aparentes.- Esta operación consiste en una verificación de los valores de resistividad calculados en el campo y la transferencia de dichos valores en una tabla para obtener un conjunto de todas las medidas según el número de sondeos y separación de los electrodos. Cuando se utilizan arreglos tipo Schlumberger es necesario además realizar correcciones de los valores en los puntos necesarios del sondeo hasta donde se encuentre otro empalme.

b).- Elaboración de curvas de resistividad aparente-distancia de emisión.- Estas curvas se trazan en coordenadas cartesianas en la cual las ordenadas corresponden a la distancia de emisión y las abscisas a la resistividad aparente. Cada una de estas curvas se ordenan o acomodan a escala bajo una alineación determinada, obteniéndose un esquema de conjunto que permite observar las variaciones de resistividad para cada distancia de emisión y consecuentemente definir la continuidad o discontinuidad de un horizonte. En la Figura No. 10 se

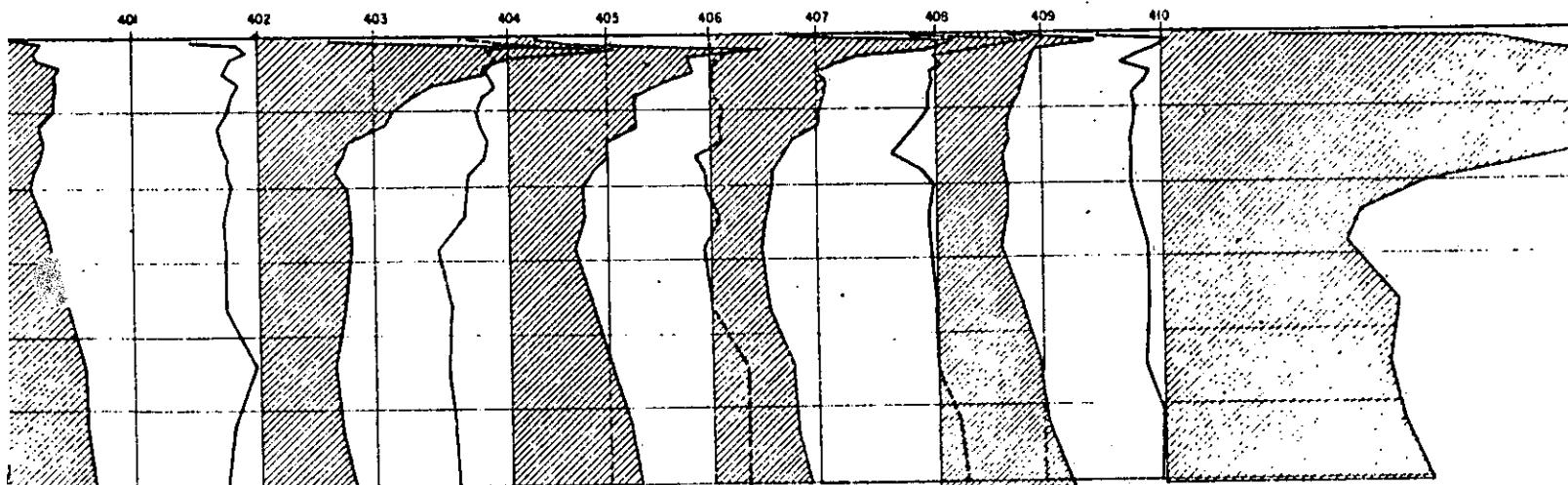
# P E R F I L N° 1



# P E R F I L



# P E R F I L N° 4





muestra un ejemplo de esta curva, en la cual la escala vertical es de 1:4,000 y en la horizontal 1 cm corresponde a un valor de la resistividad equivalente a 40  $\Omega$  m.

c).- Elaboración del perfil de curvas de isorresistividad. Estas curvas se construyen debajo de un perfil del terreno donde quedan alojados varios sondeos alineados; en este perfil se marcan los valores de resistividades aparentes bajo cada punto de emisión para realizar una configuración de puntos de igual resistividad. Las curvas de isorresistividad permiten mostrar un esquema general de la distribución de la corriente en el subsuelo, proporcionando información sobre zonas con variaciones, discontinuidad o anomalías resistivas, o en su caso zonas homogéneas o continuas que dan una idea de las condiciones estructurales que prevalecen en el terreno investigado. La Figura No. 11 a muestra un esquema de isorresistividad en la que se observa que se trata de un terreno no homogéneo.

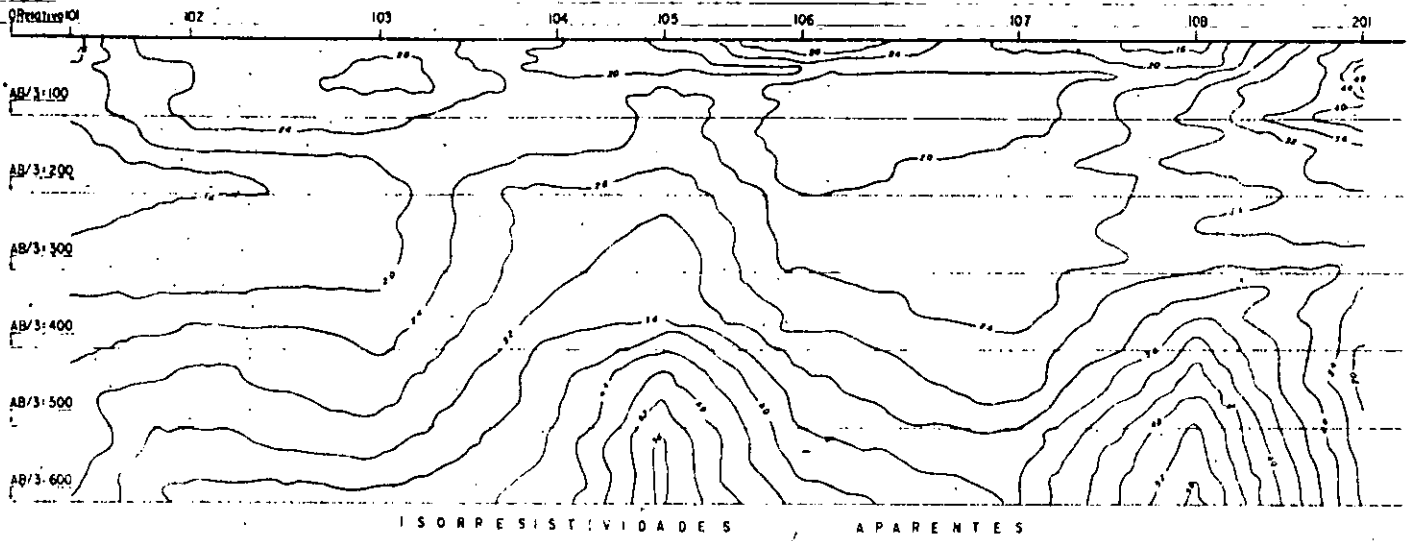
d).- Perfil de resistividad aparente-distancia de emisión constante.- Cuando se trata de definir la continuidad de un horizonte determinado en forma más detallada, se hacen lecturas a una distancia de emisión constante y los puntos de observación también a distancias constantes (Fig. 12 ).

### Interpretación Cuantitativa

La interpretación cuantitativa tiene por objeto determinar las resistividades reales del terreno y la posición en el subsuelo de las zonas que muestren interés en el estudio geohidrológico, esto es zonas que presentan cambios de resistividad notables o presencia de anomalías; en zonas donde no existen diferencias notables en las resistividades, el método de resistividad pierde un poco de eficacia. El cálculo de las resistividades reales y la profundidad a la que se encuentran, se puede determinar analíticamente por ello representaría un trabajo muy laborioso, por lo que en la práctica lo más usual es utilizar tablas y curvas maestras previamente calculadas que facilitan la interpretación. El procesamiento en este caso incluye:

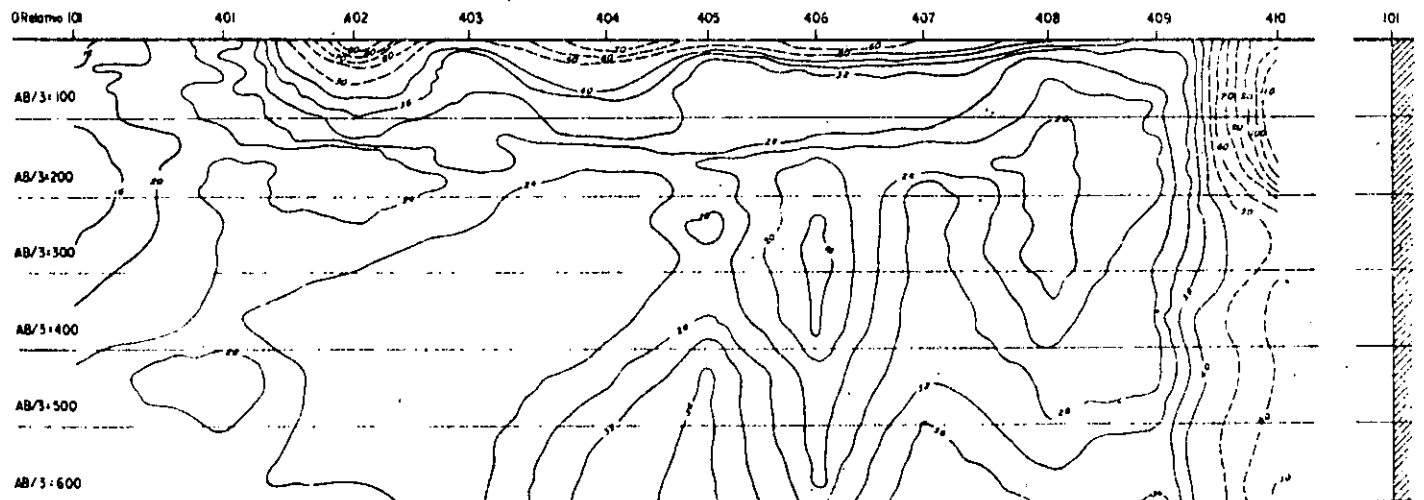
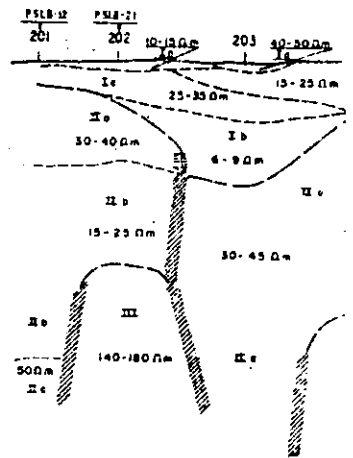
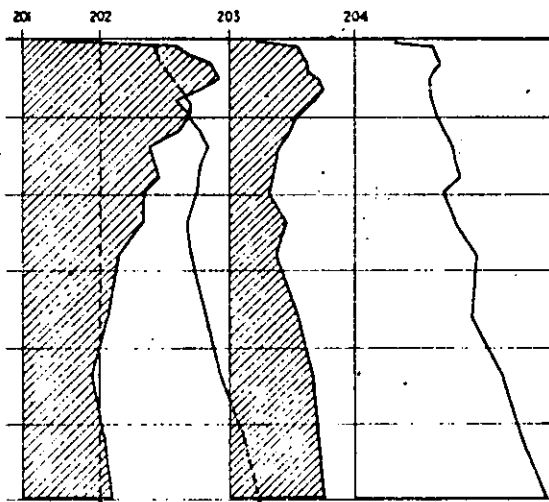
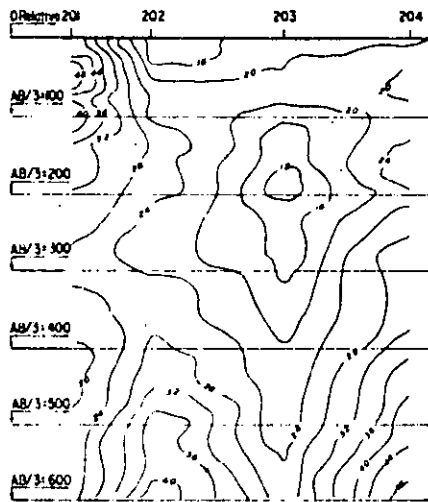
- a).- Elaboración de la curva resistividad aparente-distancia de emisión en --- coordenadas logarítmicas.
- b).- Clasificación de las curvas.
- c).- Ajuste de las curvas por medio de -- ábacos.
- d).- Elaboración de perfiles de resultados

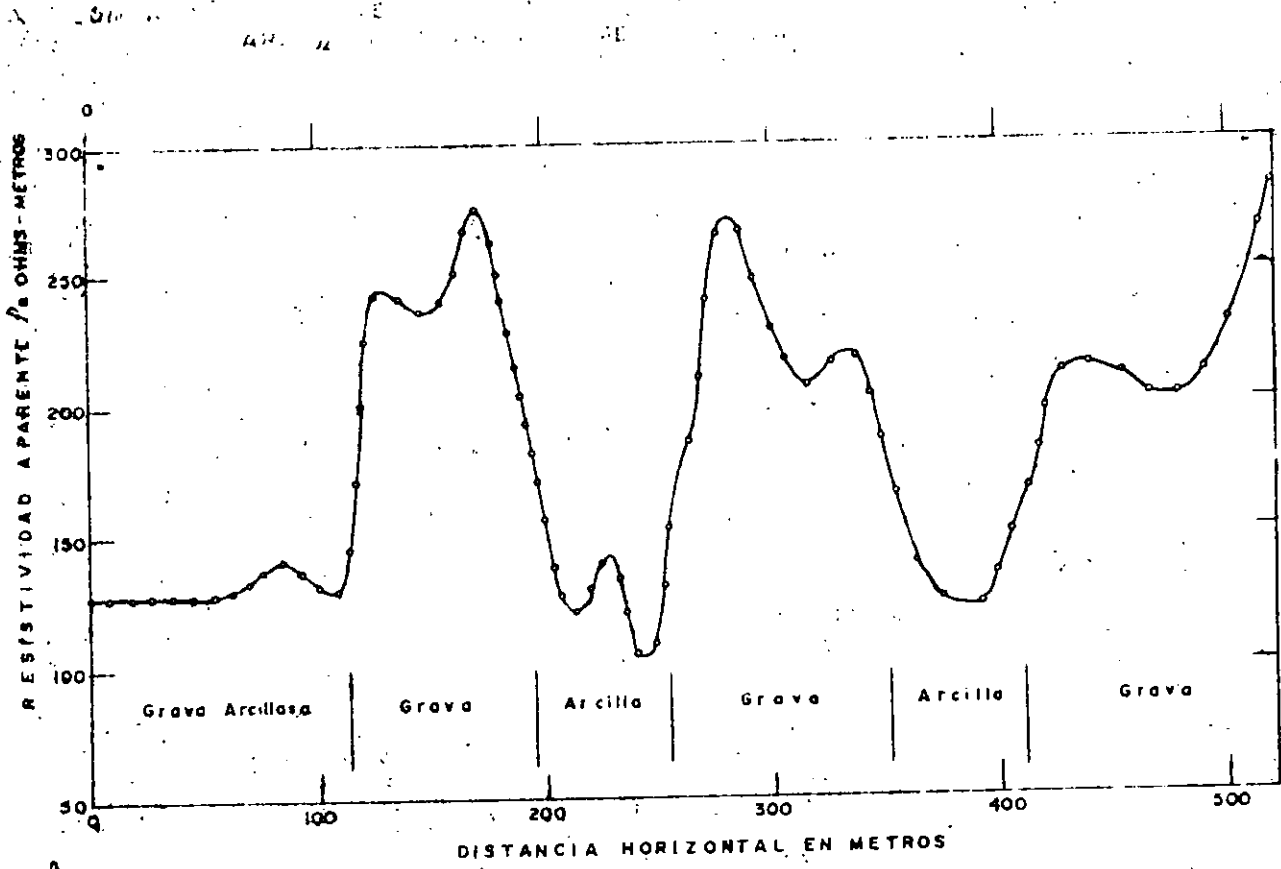
a).- Elaboración de la curva resistividad aparente--- distancia de emisión en coordenada logarítmicas.- Esta curva se construye con los valores resistivos verificados, colocando -- las resistividades aparentes en las ordenadas y la distancia -



# P E R F I L

Nº 2





PERFIL HORIZONTAL E INTERPRETACION SOBRE UN DEPOSITO DE GRAVA USANDO ARREGLO WENNER  $a = 9.15$  m

Fig. 12

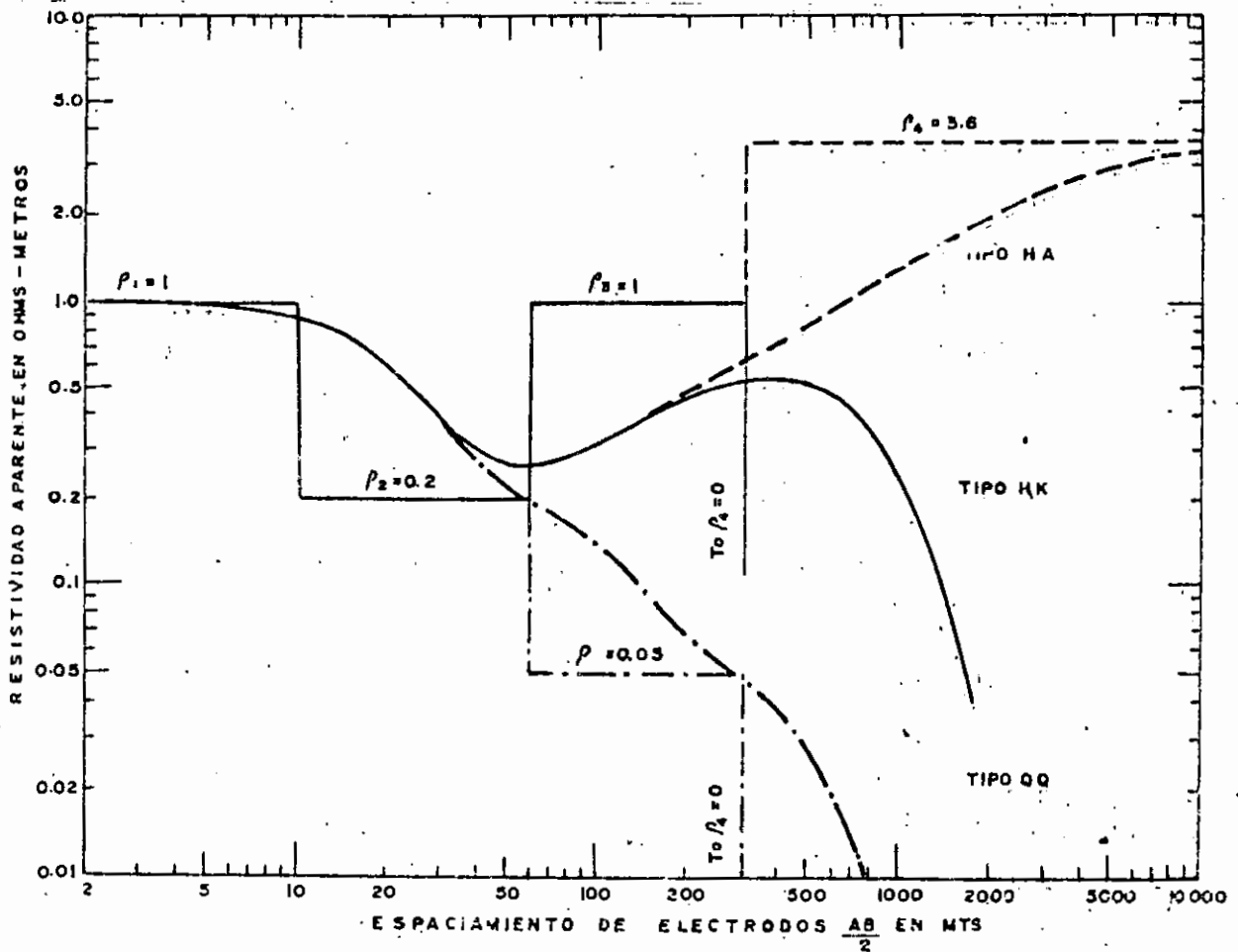
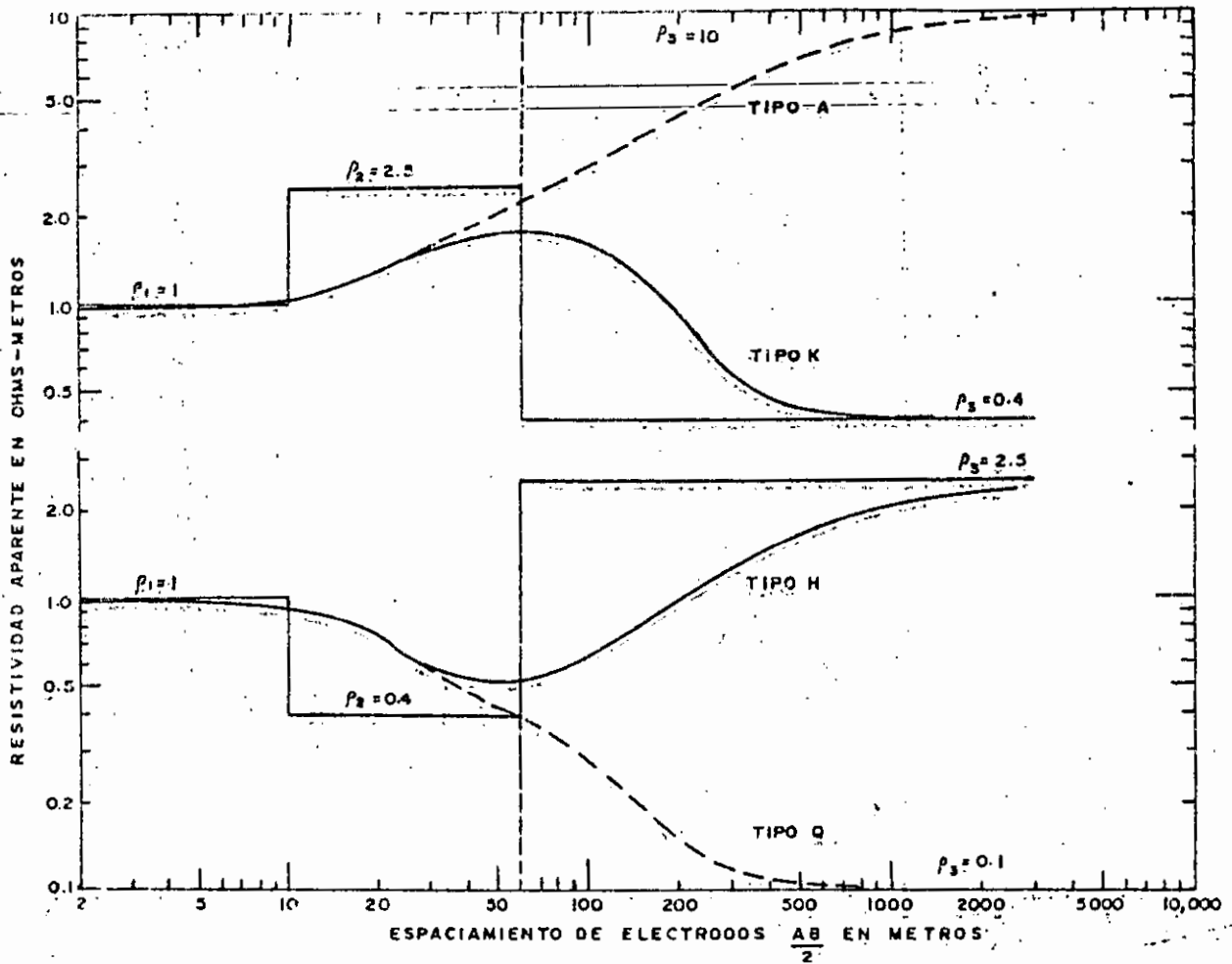


Fig. 13

de emisión AB/2 o AB/3, en las abscisas de un papel logarítmico cuyo formato, generalmente con módulos de 10 cm. debe ser igual al de las curvas maestras

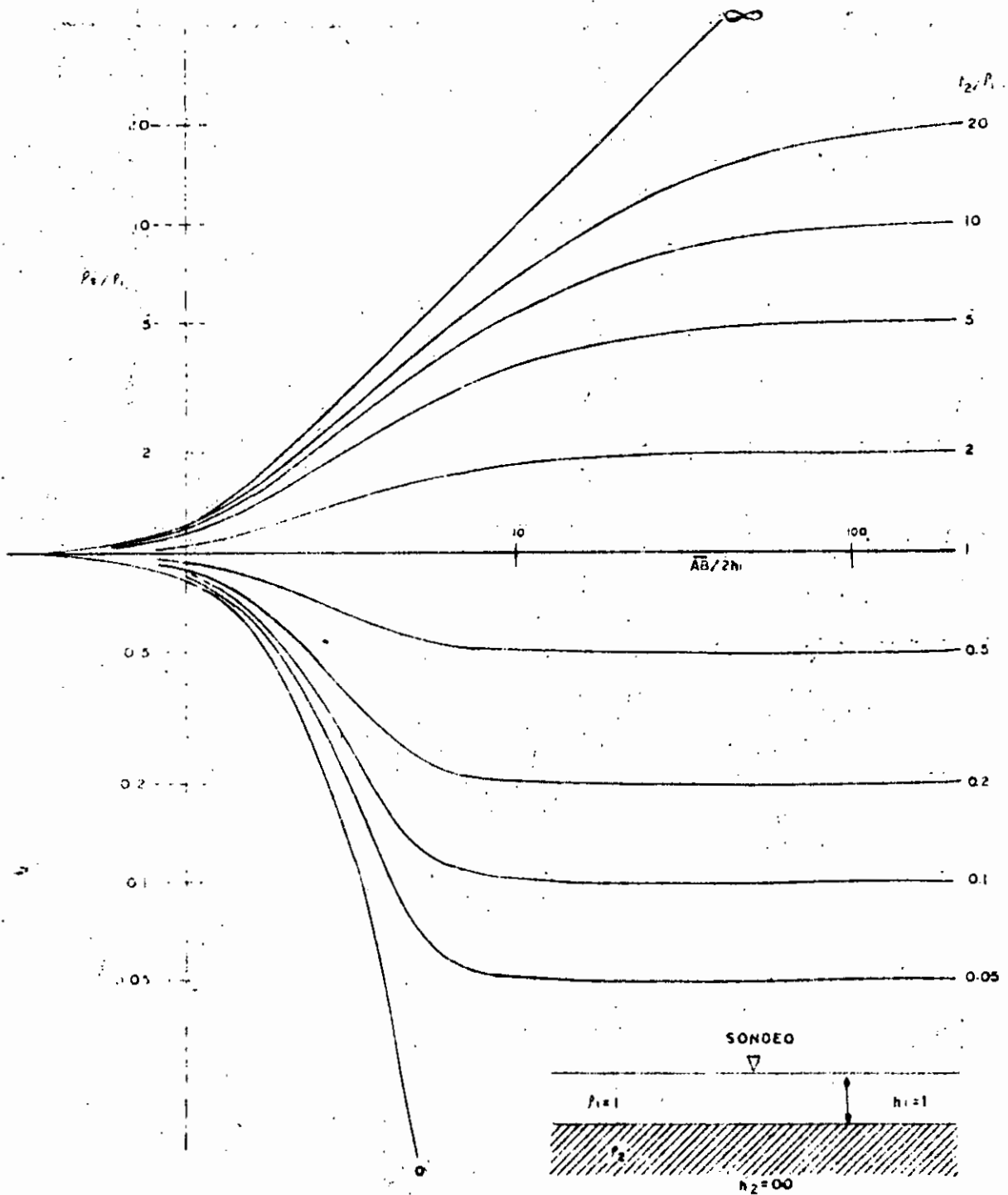
b).- Clasificación de las curvas.- Una vez trazadas todas las curvas de los sondeos, se hace la clasificación de ellas según su forma agrupándolas en familias de tal manera que faciliten su interpretación, identificándose con las curvas maestras.

Las curvas maestras son curvas que se han trazado con valores resistivos teóricos en condiciones ideales para cada tipo de estructura del terreno, aunque generalmente se refieren a medios horizontales estratificados. Existen catálogos de curvas según el tipo de dispositivos que se utilicen tanto para Wenner como para Schlumberger, o también se pueden construir para cualquier otro tipo de arreglo.

En la práctica las curvas se clasifican como H, A, K y Q. Según las relaciones que existan entre los diversos rangos de resistividades. Con esta clasificación se pueden hacer todas las combinaciones según la relación de resistividades. La Figura No. 13 muestra una curva de cada tipo.

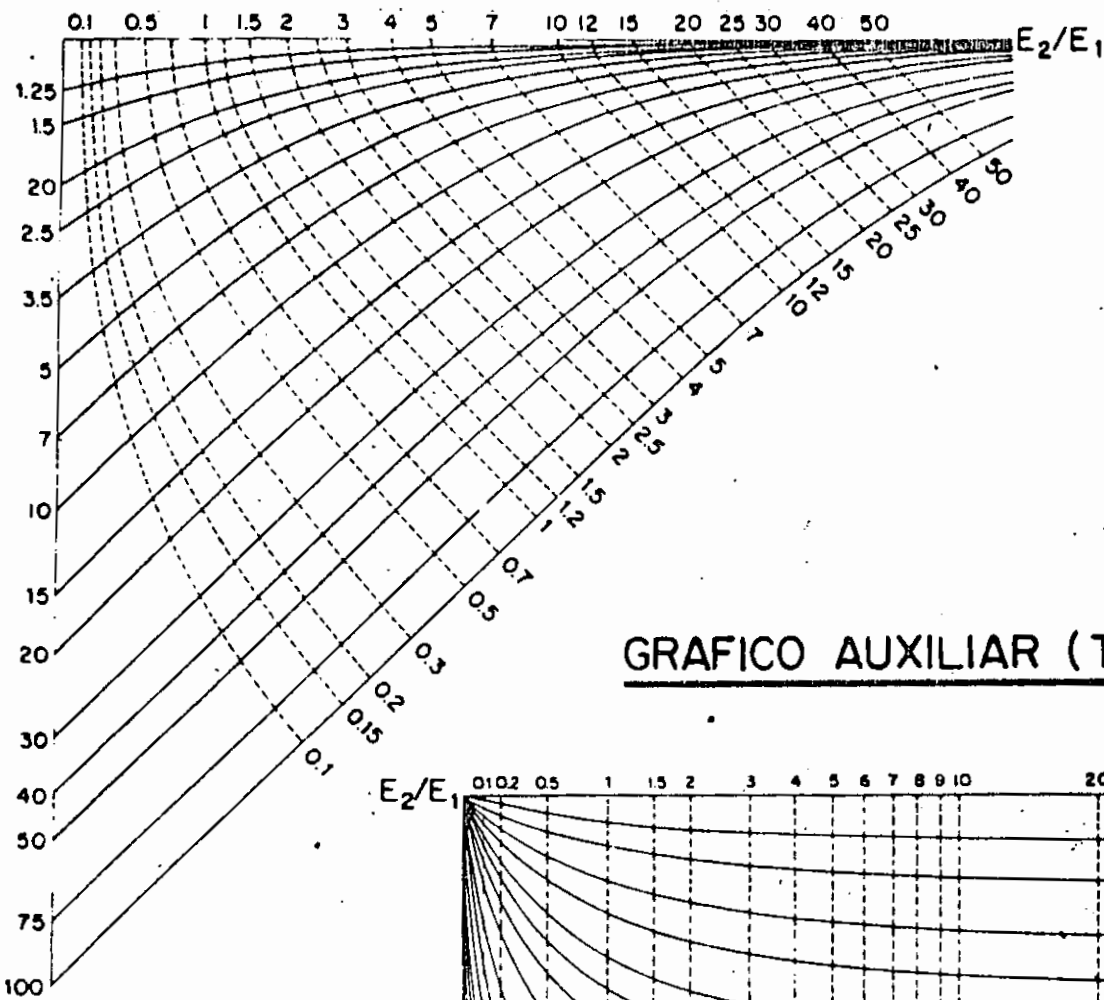
c).- Ajuste de las curvas por medio de ábacos.- Según el tipo de dispositivo utilizado, el ajuste de curvas por medio de ábacos se hace con el fin de obtener las resistividades reales y el cálculo de profundidad. Esto se hace por medio de sobreposición de la curva obtenida en el campo con la curva teórica del catálogo, utilizando el método del punto auxiliar o cualquier otro método. En las Figuras Nos. 14, 15 y 16 se muestra un conjunto de curvas de 2 capas para un arreglo electrodi-co Schlumberger y los diagramas auxiliares tipo H, A, K, Q respectivamente.

d).- Elaboración de perfiles de resultados.- Una vez calculadas las resistividades reales y las profundidades a las que se encuentran, se construye el perfil de resultados, colocando bajo cada sondeo los contactos notables con sus resistividades reales correspondientes que han sido determinados durante el ajuste de curvas. Posteriormente se correlacionan estos valores según una sección determinada, uniendo los grupos de valores semejantes y determinando la continuidad de los horizontes. En caso de que los valores no sean correlacionables esto indicará que en el subsuelo existirá una discontinuidad que puede ser debida a cambios en la naturaleza del material, cambio en la estratigrafía o presencia de algún accidente de tipo tectónico. En todo caso el perfil de resultados presenta una imagen de la estructura del subsuelo basada únicamente en valores de resistividad. La Figura No. 17 muestra un esquema de este tipo de información obtenida.



CONJUNTO DE CURVAS MAESTRAS PARA SONDEOS ELECTRICOS DE 2 CAPAS  
(Arreglo SCHLUMBERGER)

# GRAFICO AUXILIAR (TIPO-A)



# GRAFICO AUXILIAR (TIPO-H)

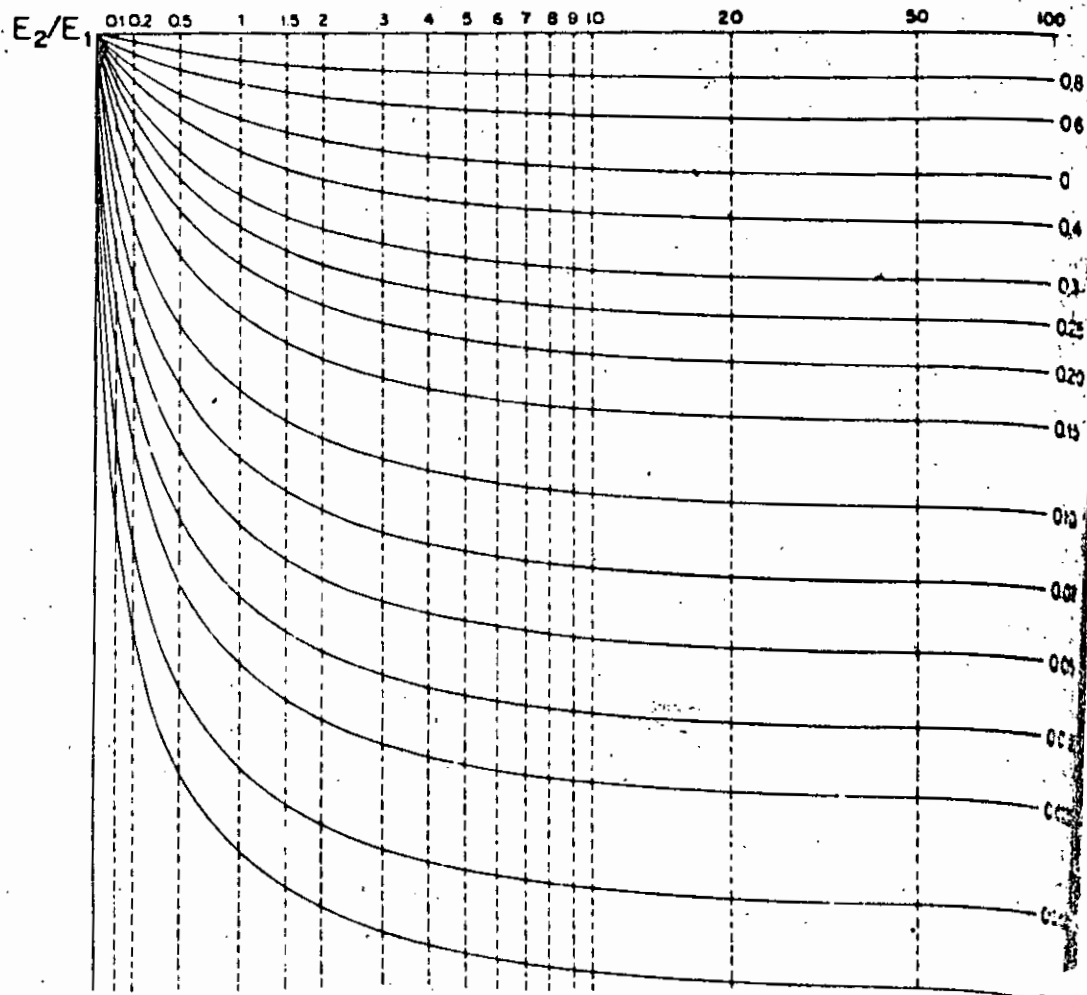
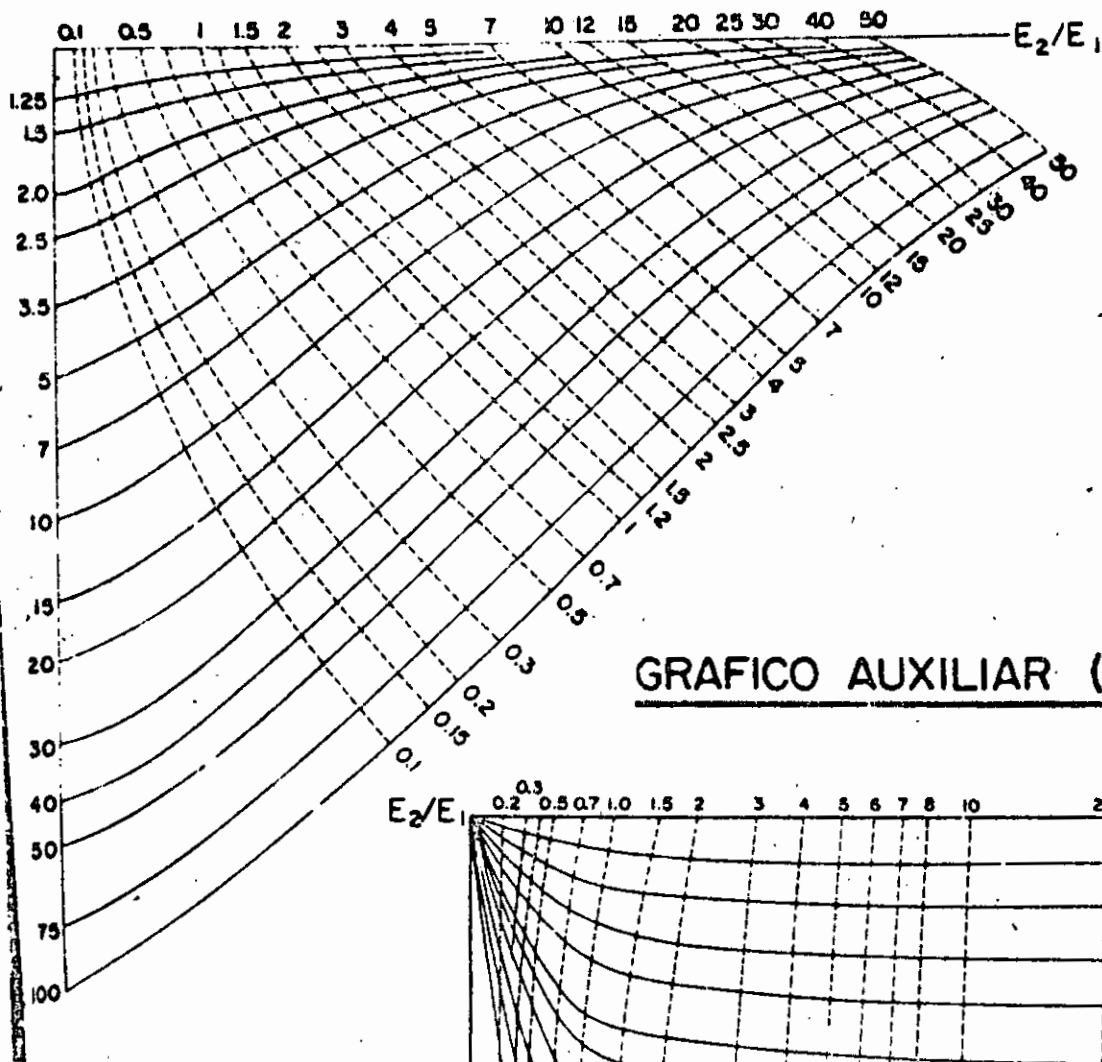


Fig. 15

# GRAFICO AUXILIAR (TIPO-K)



# GRAFICO AUXILIAR (TIPO-Q)

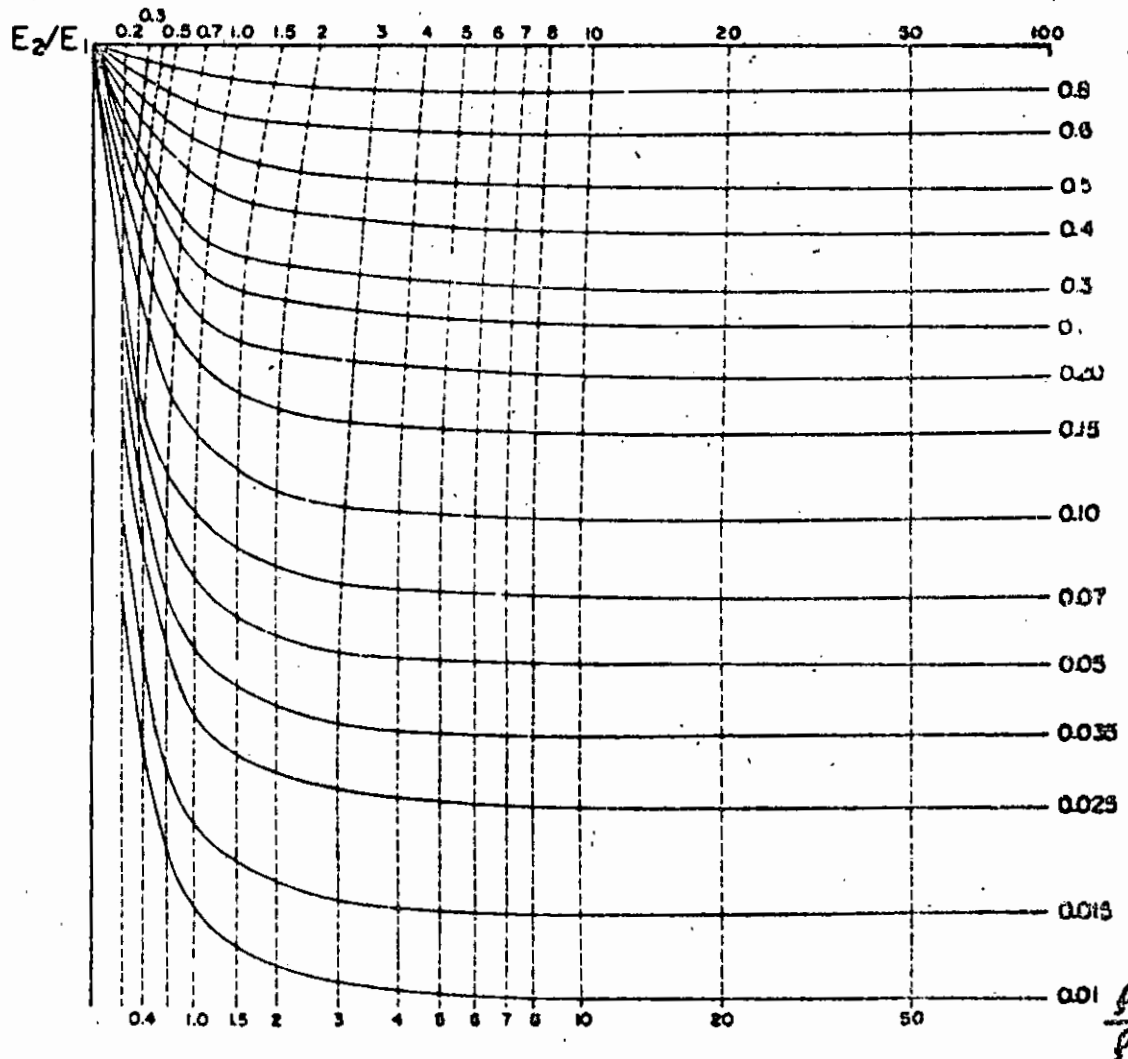
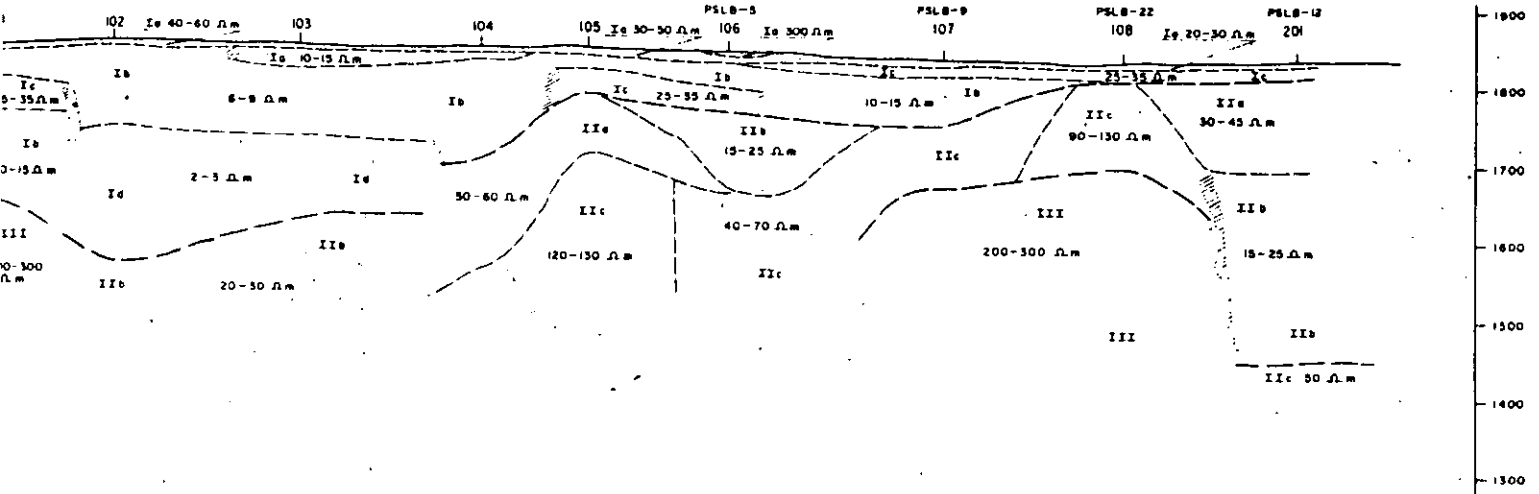
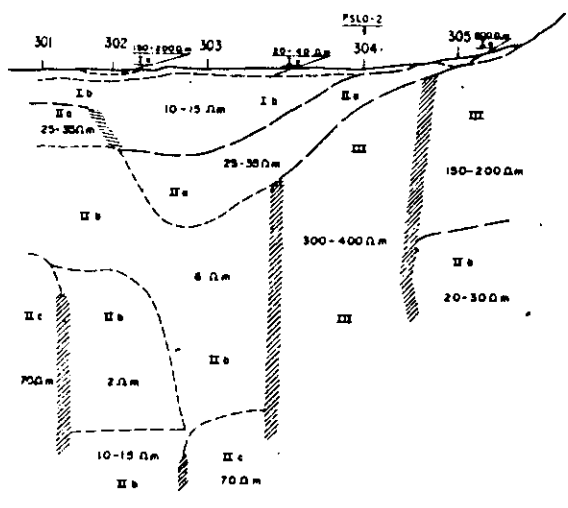


Fig. 16





3



EXPLICACION

ZONA	UNIDAD	VALORES DE RESISTIVIDAD	CORRELACION PROBABLE
SUPERIOR	Ia	10-15, 20-30, 20-40, 30-50, 40-60, 60-80, 70-90, 100-150, 150-200, 300-400, 500, y 700-800 Ωm	Cobertura superficial drenada
	Ib	6-9, 10-15, 15-25 y 30-35 Ωm	Aluvion mezcla de arenas y arcillas
	Ic	10-30 y 25-35 Ωm	Aluvion intercalaciones granulares e mas compactas
INTERMEDIA	IIa	25-35, 30-45, 50-60 y 75 Ωm	Tabas compactas, pueden ser tambien redepositadas
	IIb	2-6, 10-15, 15-25 y 20-30 Ωm	Tabas de grano fino e intercalaciones de riolita
	IIc	40-70, 90-100 y 120-150 Ωm	Atterramiento de tabas y riolitas
PROFUNDA	III	140-180, 150-200, 200-300 y 300-400 Ωm	Reda compacta volcanica o sedimentaria

ESCALA HORIZONTAL 1:100,000  
 ESCALA VERTICAL 1:10,000

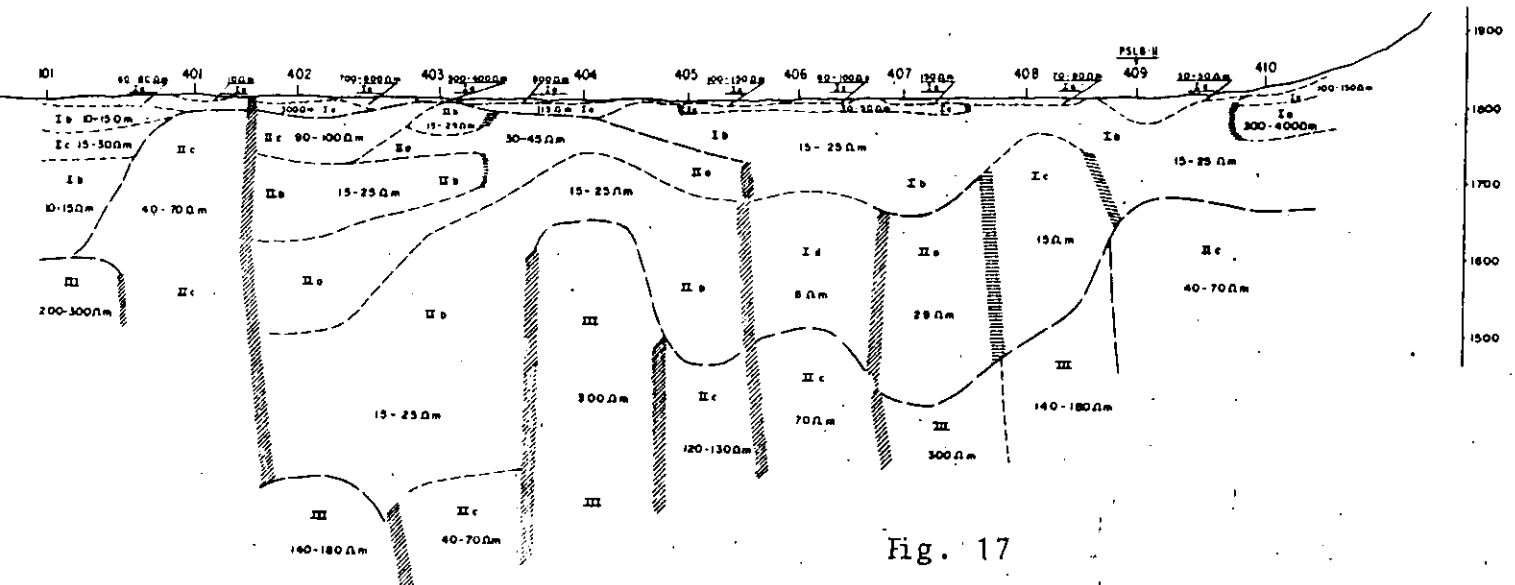


Fig. 17

FIGURA Nº III-1

#### IV.2.5.- Correlación de Medidas con Datos Geológicos

La interpretación de medidas resistivas por sí sola, únicamente permite obtener resultados en cuanto a las características eléctricas del terreno, por lo que es necesario calibrar y correlacionar dichas medidas con información geológica de la superficie y del subsuelo obtenida durante el reconocimiento de campo.

En el caso de manejar información de superficie, la correlación de las primeras medidas de los sondeos obviamente se hará con los materiales que afloran, sea cobertura intemperizada, rellenos aluviales superficiales u otro tipo de roca, mientras que los valores más profundos deberán ser relacionados con materiales que de acuerdo con los procesos geológicos se espera existan en el subsuelo, considerando las condiciones de sedimentación, de estructura, de geomorfología, o procesos tectónicos de deformación o roturas de las rocas. Estas características geológicas permiten establecer algunas ideas sobre el comportamiento geohidrológico de la zona de estudio.

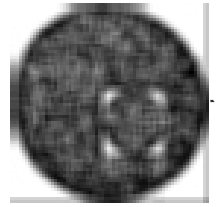
La información del subsuelo se tiene cuando en la zona de trabajo existen pozos, debiendo hacerse sondeos cercanos a dichos pozos, de manera que los cortes geológicos y registros eléctricos se puedan correlacionar con los valores de la resistividad medida y propagar hacia otros sitios que presenten condiciones eléctricas similares o análogas, con lo que estará en posibilidad de definir con más precisión los diferentes cuerpos acuíferos.

Podría también extrapolarse otro tipo de información geohidrológica obtenida de los pozos existentes, aunque esto está fuera de la geofísica eléctrica, en lo que se refiere a caudales, piezometría, transmisibilidad y calidad de agua, factores todos que intervienen en un trabajo integral de geohidrología.

Cuando no se tienen perforaciones, entonces se recomienda que se hagan en aquellos sitios donde la interpretación geofísica indique que ellos puedan proporcionar mejores resultados.



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

TEMA I: LOCALIZACION

1.5.- Prospección Geohidrológica

ING. J. ANTONIO TRUJILLO C.

Marzo, 1978



## PROSPECCION GEOHIDROLOGICA

Por: ING. J. ANTONIO TRUJILLO C.

### I. - EL CICLO HIDROLOGICO.

El agua subterránea explotable es un recurso renovable que proviene de la lluvia.

Como es sabido, el agua de lluvia que se precipita sobre los continentes, tiene tres caminos por seguir: 1) - evaporarse para formar las nubes; 2) escurrirse por la superficie del suelo formando arroyos y ríos que finalmente vierten sus aguas al mar; 3) infiltrarse en el subsuelo para formar acuíferos. (Fig. 1)

De acuerdo con Garrels y Mackenzie (1971), del 100% del agua que se evapora, para incorporarse a la atmósfera en forma de nubes, el 86% proviene del mar y el 14% restante, de los continentes (Fig. 2) del 86% que se evapora en los océanos el 78% se precipita en el mismo mar y el 8% en los continentes.

El 14% de la evaporación que se efectúa en los continentes se precipita sobre ellos mismos haciendo un total de 22% con los 8% del mar; de este 22% evapora el 14% escurre hacia el mar en forma de corrientes superficiales el 7% y solamente el 1% restante se infiltra en el subsuelo y en forma de agua subterránea circula hacia el mar.

En esta etapa del Ciclo es donde nos interesa encontrar el agua.

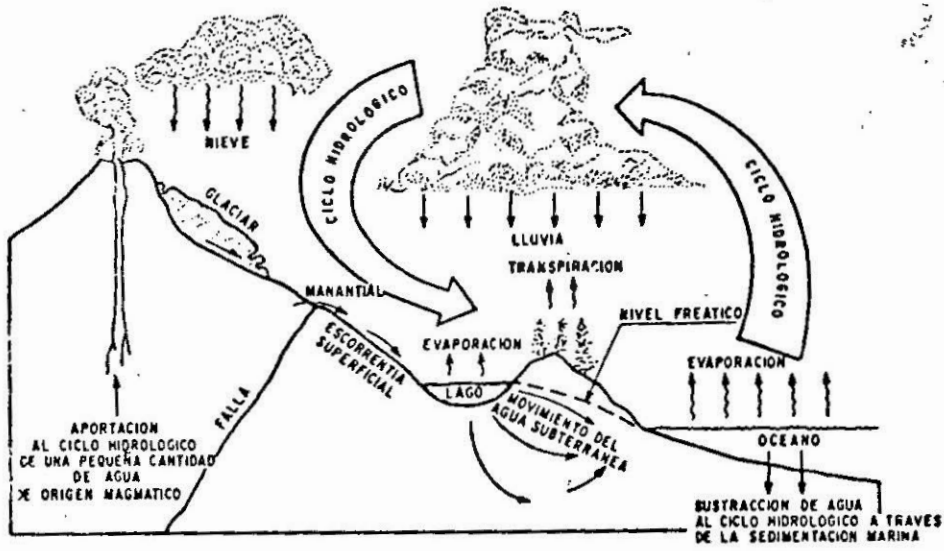
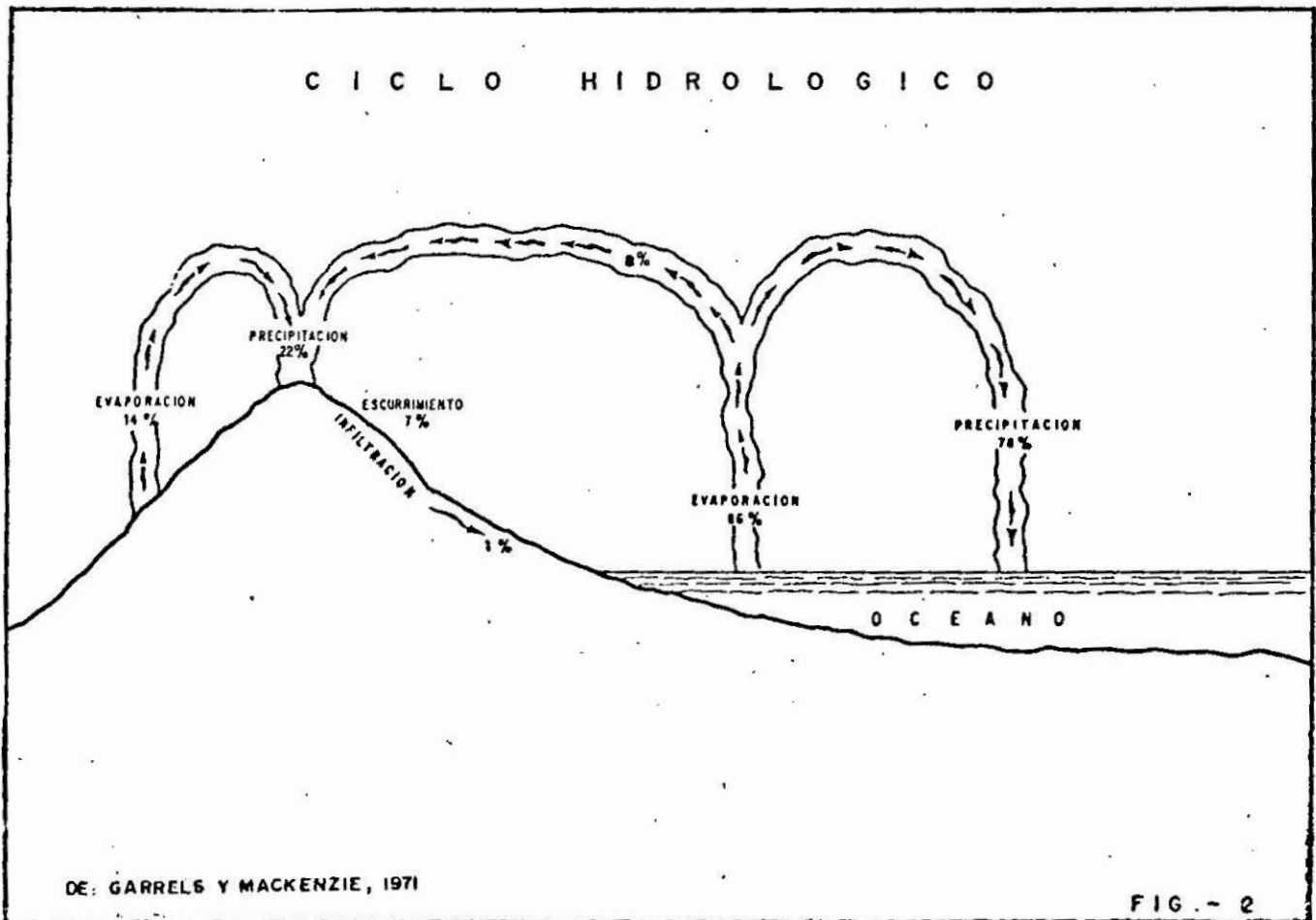


FIG.- 1



## II) DEFINICIONES.

Porosidad. - Poro significa intersticio hueco.

La porosidad de una roca es la relación del volumen de sus huecos con su volumen total. (Fig. 3).

Permeabilidad. - La palabra permeabilidad significa penetrable, un cuerpo es permeable si se deja atravesar por los fluidos o las radiaciones.

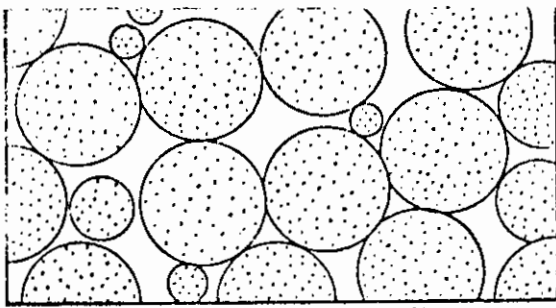
Para el caso que nos ocupa, la permeabilidad de las rocas es la propiedad de dejarse atravesar por el agua.

La permeabilidad en las rocas puede ser primaria cuando se forma al mismo tiempo que la roca, como los huecos que quedan en un depósito de grava al irse acumulando, o secundaria como en una roca compacta que por algún movimiento de la corteza terrestre se fracture y la adquiera.

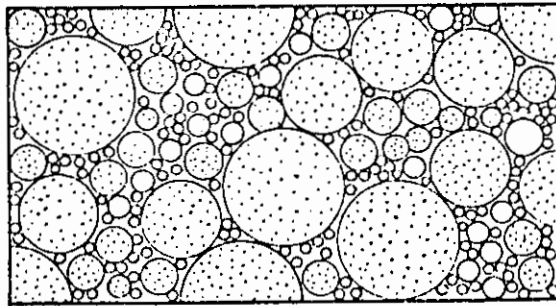
## III) LAS ROCAS Y SU PERMEABILIDAD.

Al iniciarse el estudio de un lugar determinado lo primero que se debe conocer es su litología, ya que cada tipo de roca tiene una permeabilidad característica; esta propiedad limita las áreas de interés, pues la búsqueda se enfoca a las zonas donde se encuentren rocas consideradas favorables.

Para dar una idea aproximada de esta selección desde el punto de vista litológico, se presenta la siguiente tabla en la que se muestran algunos de los tipos de roca más comunes en nuestro País. (Tabla No. 1)

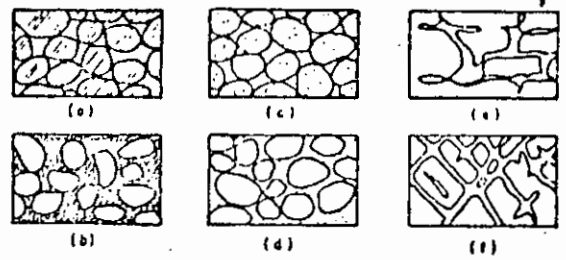


POROSIDAD 32%



POROSIDAD 17%

Variación de la porosidad debida al grado de homogeneidad del tamaño de los granos. Los números que figuran al pie de cada dibujo indican el porcentaje de porosidad de la muestra.



Distintos tipos de intersticios y relación entre la textura y la porosidad de las rocas. a) Depósito sedimentario de elementos de tamaño uniforme: porosidad alta. b) Depósito sedimentario constituido por elementos heterométricos: baja porosidad. c) Depósito homométrico de cantos rodados - porosos; porosidad muy alta. d) Depósito sedimentario cuya porosidad ha disminuido por colmatación de los intersticios con materiales finos. e) Rocas cuya porosidad se debe a fenómenos de disolución. f) Rocas porosas por fracturación.

FIG. 3

IGNEAS	INTRUSIVAS O PLUTONICAS	ACIDAS	GRANITO
		INTERMEDIAS	DIORITA
		BASICAS	GABRO
	EXTRUSIVAS O VOLCANICAS	ACIDAS	RIOLITA
		INTERMEDIAS	ANDESITA
		BASICAS	BASALTO
SEDIMENTARIA	CONSOLIDADAS	CALIZAS	CONGLOMERADOS
		ARENISCAS	
LUTITAS			
NO CONSOLIDADAS	GRAVA		
		ARENA	
		ARCILLA	
METAMORFICAS		PIZARRA	
		ESQUISTO	
		GNEIS.	

Tabla No. 1

En la tabla aparecen tipos de rocas con características diferentes, sin embargo, son solo cuatro de estas, las que ofrecen posibilidades de permeabilidad para constituir acuíferos importantes, gravas, arenas, basaltos y calizas.

Gravas y Arenas. - Las gravas y arenas son sedimentos no consolidados constituídos por fragmentos de rocas arredondados por efecto del arrastre de los ríos que las transportan en grandes cantidades, depositándolas en su propio cauce o en cuencas lacustres y marinas.

La permeabilidad de estos depósitos es mayor cuando tenga mayor uniformidad en el tamaño de los fragmentos. Si hay una gran diversidad de tamaños, los más pequeños rellenan los espacios entre los grandes disminuyendo en forma notable su permeabilidad. (Fig. 3).

Por su origen y medios de depósitos, las gravas están íntimamente relacionadas con las arenas y las arcillas, por lo que es común encontrarlas intercaladas en capas o mezcladas.

Los mayores afloramientos de gravas y arenas en el Altiplano Mexicano y en el Noroeste del País, son sedimentos de edad terciaria (Las Cuencas Lacustres Terciarias del Altiplano Mexicano, Jorge A. Trujillo C. 1975), y en ellos se localizan los principales acuíferos en explotación en el País. (Fig. 4).

Las principales diferencias entre sedimentos terciarios y aluviones recientes son:



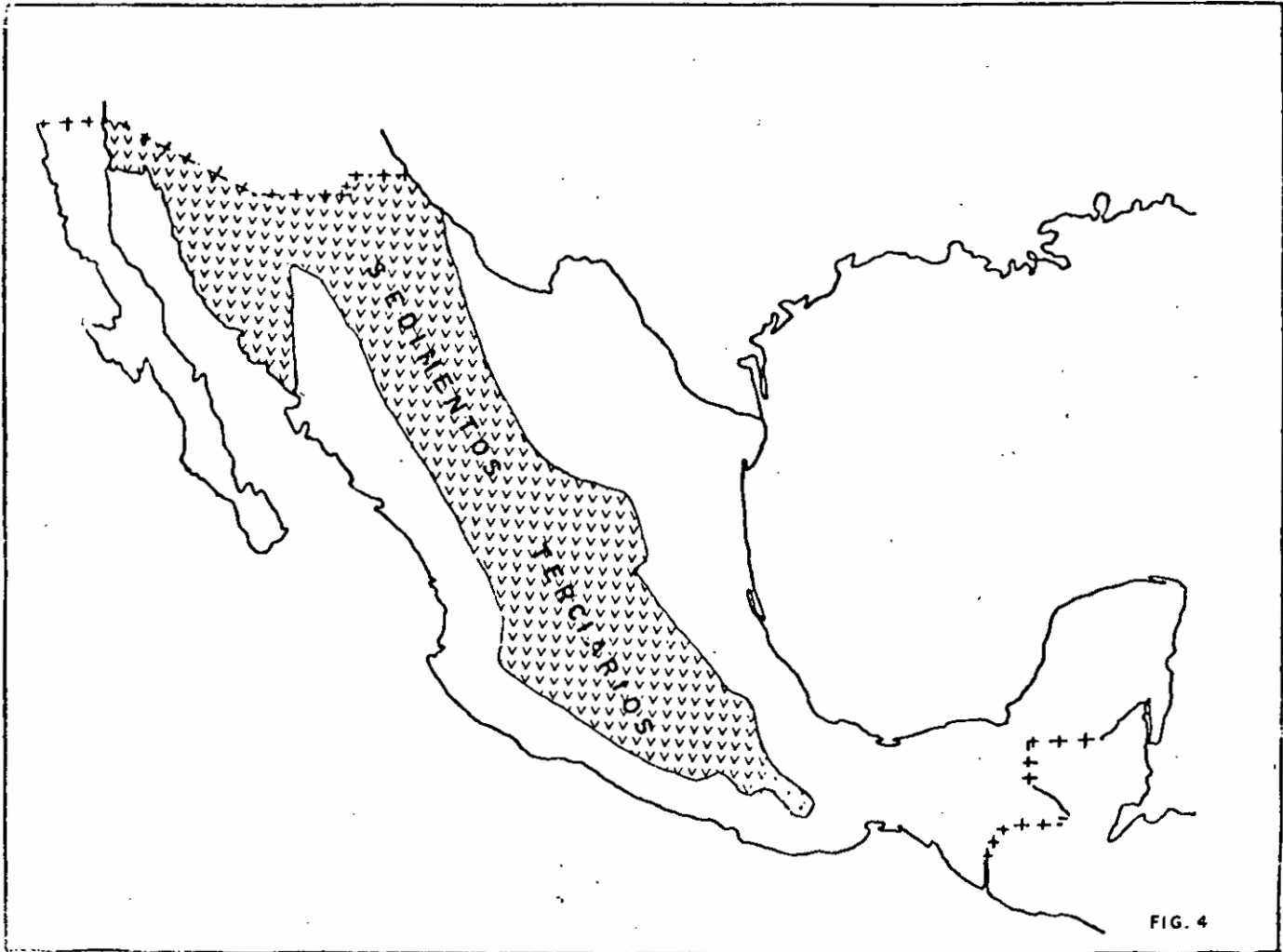


FIG. 4

1o. Es comun encontrar a los sedimentos terciarios intercalados o cubiertos por materiales volcánicos, riolíticos, andesíticos y basálticos.

2o. Los sedimentos terciarios por lo común están afectados por tectonismo en mayor o menor grado.

3o. Por medio de análisis micropaleontológicos, ha sido posible datar la edad de los sedimentos terciarios gracias a que es frecuente que estos contengan diatoméas.

4o. Es espesor de los sedimentos terciarios es en general, mayor que el de los aluviones recientes pues el País, debido a su geomorfología, se encuentra actualmente en una etapa de erosión activa.

Algunas recomendaciones para dar localizaciones sobre gravas y arenas son:

1o. Deben buscarse lugares donde las gravas y arenas esten bien seleccionadas por tamaños, procurando evitar las zonas donde el contenido de arcilla sea grande.

2o. Deben evitarse dar localizaciones en parateaguas o en muestras cortadas por barrancas profundas.

3o. Si se pretende perforar sobre riolitas o andesitas con el fin de atravesarlas para encontrar subyacentes gravas y arenas terciarias, deben primero determinarse aunque sea en forma aproximada el espesor de cubierta, ya sea por métodos geológicos o geofísicos, pues podría resultar demasiado potente y ser incosteable su perforación.

Basalto. - Es una roca ignea, volcánica, básica; se presenta en forma de derrames lávicos, brechas, aglomerados, conos cineríticos y de tezontle. Su gran permeabilidad se debe a los espacios huecos entre coladas superpuestas, a la existencia de fracturas originadas por enfriamiento, a las grietas originadas por la resistencia a la deformación plástica de las corrientes de lava solidificada y a las zonas de tezontle.

La presencia de horizontes de depósitos lacustres y suelos arcillosos poco permeables es frecuente en las potentes series de derrames lávicos, originando acuíferos colgados, generalmente de bajo potencial pero de gran importancia, debido a la escasez de otros tipos de acuíferos en esas zonas.

La porosidad y permeabilidad de las rocas volcánicas tiende a disminuir con el tiempo geológico, debido al sellamiento de los espacios huecos con los materiales arcillosos producto de la descomposición de las propias rocas.

Para dar localización sobre este tipo de rocas donde la permeabilidad es generalmente grande, deben escogerse sitios bajos, respecto a la topografía regional, pues es común que el agua que se infiltra en ellos, se drene rápidamente.

Calizas. - Las calizas son rocas formadas principalmente por carbonato de calcio, originadas por procesos orgánicos y químicos en medios lacustres y marinos, las cuales han emergido a la superficie por medio de movimientos tectónicos.

Estas rocas tal como surgen a la superficie, por lo común presentan baja permeabilidad que puede ser primaria como la causada por la porosidad entre los fragmentos fósiles en las zonas arrecifales o en los planos de estratificación entre dos capas superpuestas o secundaria, como la que se presenta por fracturamiento y principalmente por la dilución de la roca por el agua de lluvia.

El agua de lluvia a su paso por la atmósfera se carga de ácido carbónico, el cual ataca fuertemente a las rocas calcáreas, disolviéndolas. Al caer sobre ellas, se encuentra alguna zona fracturada, así sea poco permeable inicia su infiltración y ataque ensanchando las grietas y produciendo conductos y cavernas, lo cual incrementa grandemente su permeabilidad.

Debido a la plasticidad de este tipo de rocas, es común que al verse afectados por movimientos tectónicos no se fallen y fracturen tan fácilmente sino que primero se plieguen.

Para dar localizaciones sobre este tipo de rocas, se deben localizar:

a). - Zonas donde las calizas estén lo más pura que sea posible, o sea que su contenido de arcilla sea mínimo, pues mientras más contenga será menos soluble.

b). - Las zonas donde se observan gran cantidad de cavernas y conductos de disolución son favorables.

c). - Las zonas arrecifales, con restos de fósiles, frecuentemente ofrecen buena permeabilidad.

d). - Que no hayan capas de lutitas intercaladas en gran proporción.

e). - El fracturamiento, por lo general es mayor en los lomos de los anticlinales y en los fondos de los sinclinales resultando sitios buenos para la perforación de pozos, sin embargo, los lomos anticlinales haya ocasiones en que son de difícil acceso y los sinclinales es frecuente que estén cubiertos por gruesos depósitos de formaciones impermeables, por lo que muchas de las perforaciones se dan en los flancos de estas estructuras.

f). - Siendo la permeabilidad, entre estratos la más importante, es conveniente dar las localizaciones de tal manera que corten el mayor número de estratos posible. De esto se concluye que las calizas con echado horizontal serían más favorables que las que tengan echado vertical; sin embargo es frecuente que las calizas con echado horizontal hayan permanecido tan quietas que no estén afectadas por fracturas lo que disminuye sus posibilidades de permeabilidad. Por lo que es más recomendable dar localizaciones en formaciones medianamente plegadas.

g). - Existen formaciones calcáreas que en un determinado lugar de presentan permeables y producen eficientemente y en distancias más o menos cortas se encuentran impermeables e improductivas.

Uno de los principales motivos de este comportamiento son los cambios laterales en su composición, como un aumento en su contenido de arcilla, lo que provoca una disminución en su solubilidad.

Otras Rocas. - Los demás tipos de rocas no deben desecharse totalmente, pues hay varios lugares donde algunas de ellas están produciendo en forma eficaz.

Sin embargo, deben considerarse con posibilidades, mucho menores pues su permeabilidad dependerá de zonas de fracturamiento, las cuales no siempre son fáciles de detectar a profundidad.

Hay ocasiones en que no se tiene otra alternativa y es necesario dar localizaciones para perforación sobre este tipo de rocas, en cuyo caso deben buscarse zonas afectadas por fallas y fracturas, tratando de cortarlas en forma y a la profundidad más conveniente. De ser posible se recomienda efectuar exploraciones directas con pozos de pequeño diámetro, con equipo de muestreo de núcleos.

#### IV. - MÉTODOS DE EXPLORACION.

Los métodos de exploración se dividen en directos e indirectos. Los métodos directos más comunes consisten en observaciones de campo y perforaciones; los indirectos en métodos geofísicos.

Métodos Directos. - En la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, los métodos directos de exploración más utilizados son:

Observaciones de Campo. - En estas se aplica lo que se ha tratado de exponer en los párrafos anteriores. Para lo cual nos auxiliamos con planos geológicos topográficos, climatológicos y fotografías aéreas.

Perforaciones Exploratorias. - Consisten en perforaciones en diámetro de 3 a 4 1/2" con brocas de diamante o de roles, con o sin muestreo de núcleos. En estas perforaciones se obtienen los siguientes datos:

- a). - Columna Litológica.
- b). - Nivel Estático.
- c). - Calidad del Agua.
- d). - Una idea sobre las posibilidades de producción de acuerdo con las pérdidas de fluidos de perforación, sifoneo, extracciones con émbolo, inyección de agua, etc.

Además se puede obtener el registro eléctrico del pozo.

Métodos Indirectos. - La característica principal de estos métodos es que las mediciones de ciertos parámetros físicos (resistividad, elasticidad, etc.,) se realizaran desde la superficie del terreno, y en base a estos es posible inferir ciertas condiciones del subsuelo. Dentro de esta clasificación se encuentran los métodos geofísicos, de los cuales, los mayormente utilizados en la prospección para el agua subterránea son:

a).--Método Eléctrico Resistivo.

b). - Método Sísmico de Refracción.

Los cuales nos ayudaran entre otros a definir la geometría del sistema acuífero y auxiliarnos en diversos problemas de tipo estructural.



## FOTOGRAMETRIA

Por: Ing. Jorge Antonio Trujillo C.

### DEFINICION. -

Fotogrametría es la técnica de hacer planos y mapas por medio de fotografías aéreas y terrestres.

### APLICACION. -

Topografía  
Catastro Rural y Urbano  
Agricultura  
Arqueología  
Geología  
Ingeniería Civil

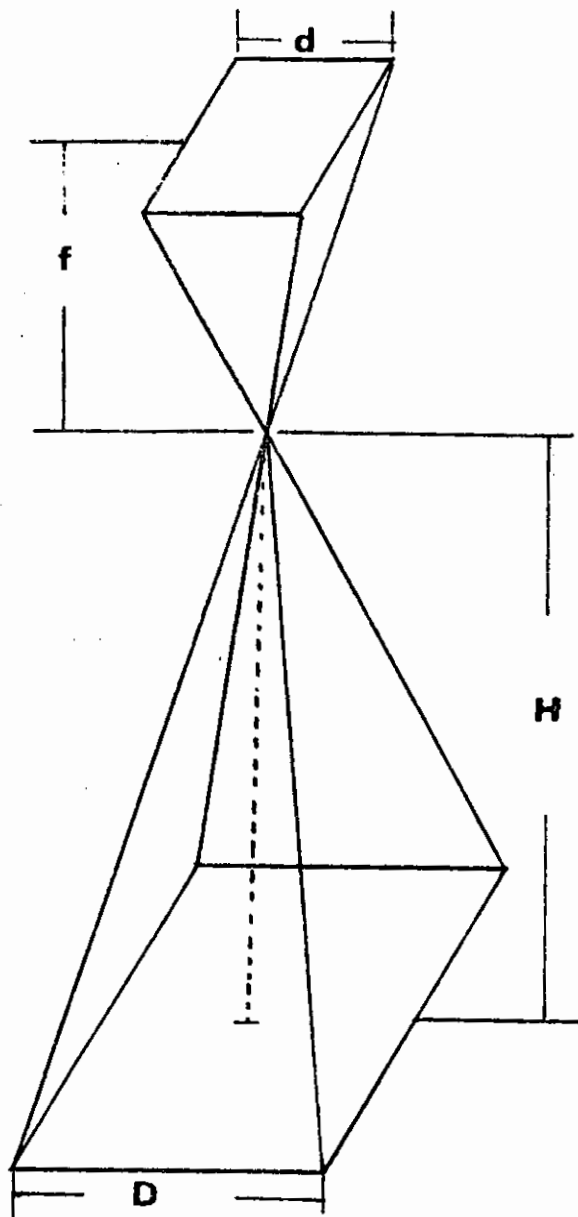
### FOTOGRAFIAS AEREAS. -

Sus dimensiones más comunes son de 23 X 23Cm, las escalas más convenientes para la elaboración de planos es entre 1:20,000 y 1:50,000, normalmente se conoce la escala de las fotografías desde que se adquieren, pero se puede investigar utilizando la siguiente formula:

$$1:E = \frac{l}{E} = \frac{d}{D} = \frac{f}{H}$$

Donde d es la medida de la imagen fotografica de un objeto, D la medida real en el terreno del objeto fotografiado, f la distancia focal de la camara con que se tomó la foto (viene en el margen de la fotografía) y H la altura del vuelo sobre el terreno (también viene en el margen de la fotografía).

El traslape lineal entre dos fotografías sucesivas no debe ser menor del 60% y el lateral no menor de 30%.



Ejemplo para obtener la escala de una fotografía

$$1: E = \frac{1}{E} = \frac{d}{D} = \frac{f}{H}$$

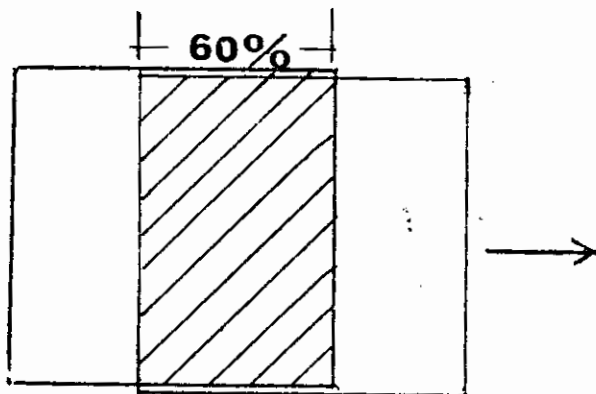
a)  $\frac{1}{E} = \frac{d}{D}$

$$\frac{1}{E} = \frac{1 \text{ cm}}{200 \text{ m.}} = \frac{1}{20000}$$

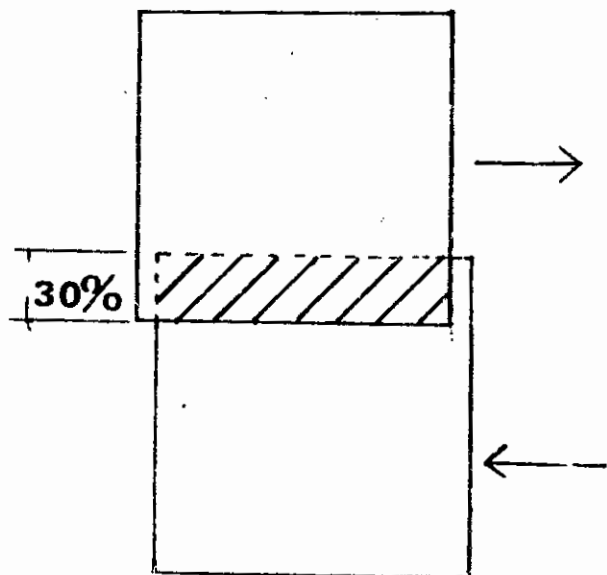
Escala 1: 20000

b)  $\frac{1}{E} = \frac{f}{H} = \frac{150 \text{ mm}}{3000 \text{ m}} = \frac{150}{300000} = \frac{1}{20000}$

Escala 1: 20000



TRASLAPE LINEAL



TRASLAPE LATERAL

## MOSAICO FOTOGRAFICO. -

Se forma colocando ordenadamente las fotografías en el sentido de las líneas de vuelo y lateralmente correlacionando las líneas paralelas adyacentes.

Cuando se inicia el estudio de una área determinada, el mosaico sirve para observar en conjunto sus condiciones generales, con el mosaico formado se elabora un FOTOINDICE, el cual es un dibujo en el que se incluye la colocación de cada foto, su nomenclatura, el sentido de las líneas, su traslape real, tanto longitudinal como lateralmente. En este FOTOINDICE, se marcan también los poblados y caminos de todo tipo, ya que se utilizan en la elección de itinerarios programas de trabajo, avance real y anotaciones sobre trabajos especiales que deban efectuarse en determinadas zonas del área, por ejemplo muestreos de agua, rocas, minerales, suelos, etc.

EL FOTOINDICE, facilita tanto en el campo como en el gabinete a la pronta localización de una fotografía determinada.

ESTEREOSCOPIA. - La Estereoscopia es un fenómeno por medio del cual dos imágenes de un objeto fotografiado de dos ángulos diferentes se unen y dan visión estereoscópica o de tercera dimensión.

La estereoscopia se logra en la zona de traslape de dos fotos consecutivas, con la ayuda de estereoscopios que pueden ser de bolsillo o de lentes para uso de campo o de espejos y prismas para uso de gabinete.

## ELABORACION DE UN PLANO GEOLOGICO

1. - Se forma un mosaico fotográfico y se elabora un fotoíndice como se describió anteriormente.
2. - Se marcan los centros de las fotografías aprovechando las marcas que tienen las fotos en las esquinas y en los lados.
3. - Se transfieren los centros de las fotos sucesivas, utilizando el estereoscopio. Con esto se logra fijar linealmente las fotografías.
4. - Se localizan tres puntos auxiliares en la parte superior de las fotos y tres en la inferior con el fin de ligar la línea con las líneas paralelas adyacentes, los puntos auxiliares se transfieren a ojo o con el auxilio del estereoscopio tanto a las fotos de la misma línea como a las de la línea adyacente.
5. - Se marca la zona de trabajo poniendo líneas verticales entre el centro de la foto y los centros transferidos, el límite inferior y superior lo dan los puntos auxiliares. Siendo la fotografía una proyección cónica, los puntos que quedan dentro de la zona de trabajo son los más cercanos al centro y por lo tanto los menos deformados.
6. - Se inicia la observación estereoscópica de las fotos marcando hidrografía, geología, caminos y poblados exclusivamente en la zona de trabajo de cada foto.

7. - Si la zona no es conocida, la litología puede marcarse solo como unidades con números o letras, describiendo sus características observables como color, estratificación, resistencia a la erosión tipo de drenaje, etc.

8. - Los colores más usuales son azul para los ríos y arroyos, rojo para contactos geológicos, verde para rasgos estructurales como ejes anticlinales, fallas, fracturas, etc. Amarillo para caminos y poblados, los caminos se ponen con línea doble los pavimentados, línea sencilla continua los de terracería transitable en todo tiempo y línea discontinua las brechas.

9. - Una vez terminada la fotointerpretación, se procede a dibujar un plano base que servirá para el chequeo de campo, de la siguiente manera:

a). - Se toma papel albanene cuyas medidas cubran al mosaico que se pueda armar con las fotos.

b). - Se pone la primera foto bajo del papel albanene y se marcan su centro, sus centros transferidos y sus puntos auxiliares.

c). - Se dibuja con colores los ríos, arroyos contactos geológicos, caminos y poblados.

d). - Terminada la primera foto se pone la segunda de la línea, haciendo coincidir su centro transferido con el centro de la anterior y a la inversa, así como los puntos auxiliares.

e). - Se procede a marcar los nuevos centros transferidos y puntos auxiliares.

f). - Se dibuja la hidrografía, geología, caminos y poblados.

g). - Terminada la segunda fotografía se retira y se pone la tercera procedido de manera semejante y así sucesivamente.

h). - Para armar y enlazar las líneas paralelas adyacentes inferior y superior se procede de la misma manera solo que además deben hacerse coincidir los puntos auxiliares que aparecen en la parte inferior y superior de las fotos respectivamente.

10. - Para que un plano con interpretación fotogeológica sea de confianza, es necesario que tenga chequeo de campo, a menos que el fotointerprete esté muy familiarizado con las condiciones geológicas del lugar.

II. - Para chequeo de campo deben seguirse los siguientes pasos.

a). - Recopilación de información.

b). - Elección de sitios para campamento procurando situar los en lugares bien comunicados y lo más cercano posible al área de trabajo.

c). - Itinerarios procurando cubrir primero las zonas más alejadas del área de trabajo. Deben marcarse como puntos de chequeo y muestreo, sitios de fácil acceso, si es posible junto a los caminos para ahorrar tiempo.

d). - Si el chequeo se hace a base de secciones se facilita la interpretación.

e). - Por el reverso de las fotos se pone su nomenclatura con números grandes de diferentes colores para diferentes líneas, esto faci

litará su localización cuando se revuelva.

f). - En la libreta deben anotarse los siguientes datos, en las columnas de la página izquierda:

PUNTO NUM.	NO. DE FOTO	RUMBO	ECHADO	ELEVACION.	MUESTREO

En la página derecha, generalmente cuadrículada, se describe el sitio visitado, anotando su litología, estructura geológica, geomorfología y todo lo que sea de interés.

Si es posible se hace un croquis geológico del afloramiento.

g). - Para marcar un punto en una fotografía, primero se localiza sobre ella, si es necesario con el auxilio de esteroscopio de bolsillo.

h). - En seguida se perfora con un alfiler y se pone en el reverso, el número del punto y un pequeño círculo rodeando a la perforación.

i). - Se toma el rumbo y echado de las capas que forman el afloramiento si es que las hay, si no existen o no es posible apreciar rumbo y echado, se llena el espacio con un guión.

12). - Vaciado de Datos al Plano Base. Este trabajo debe hacerse diariamente en el campamento, pues si hay alguna duda se puede

---

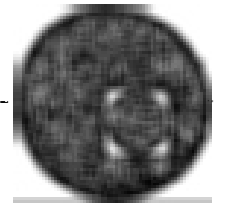
13. - Una vez que se tienen todos los datos en la libreta, en las fotos y en los planos, se regresa al gabinete, donde se afina y se dibuja, cambiando las anotaciones de unidades litológicas puestas con letras y números por el nombre o las iniciales de las unidades litológicas reconocidas en el campo.

14. - Se escribe el informe y se acompaña con el plano elaborado finalizando el trabajo.





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



## PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

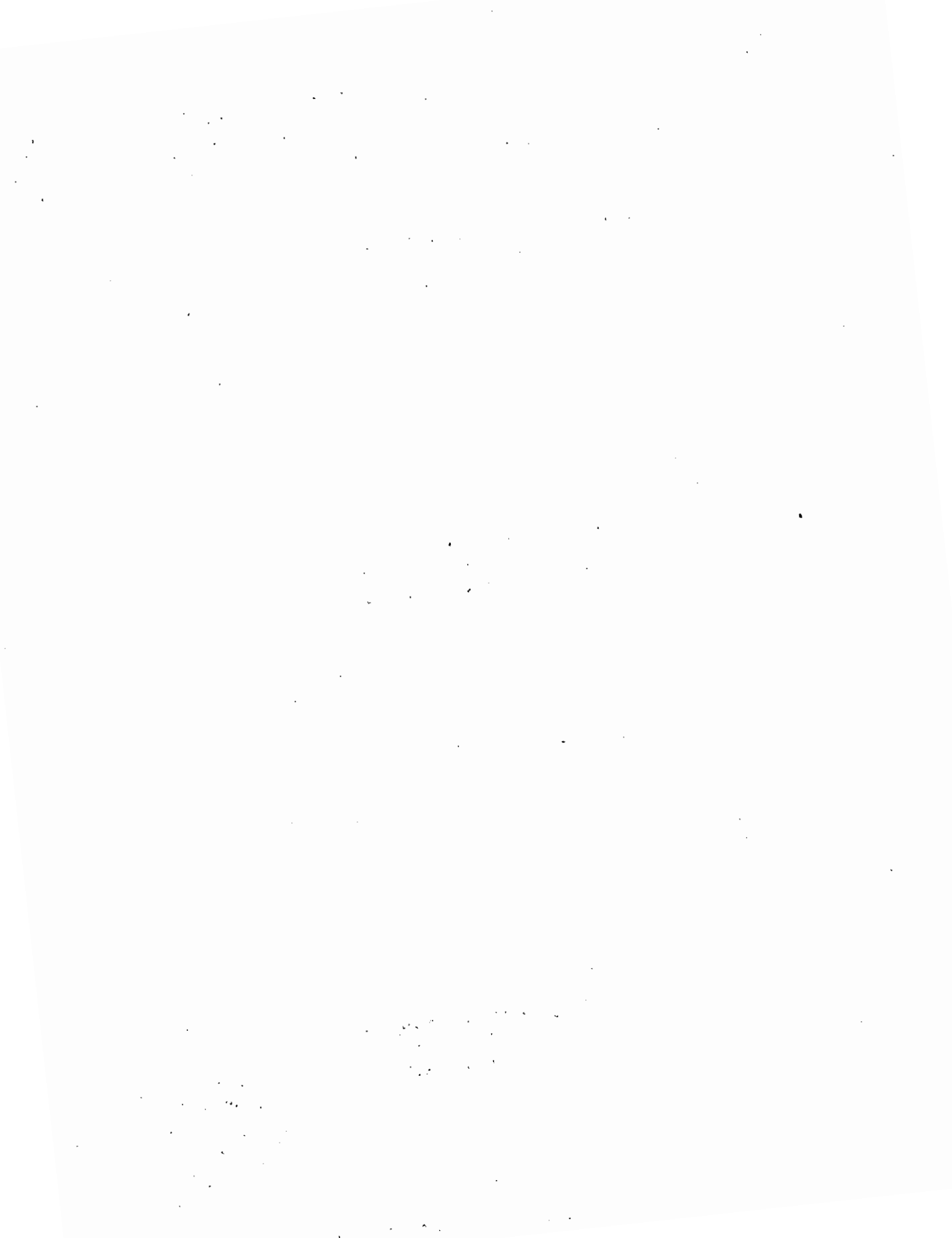
### TEMA I: LOCALIZACION

#### 1.6. - Trazadores

ING. JUAN M, LESSER

Marzo, 1978





## C O N T E N I D O

- RESUMEN .
- INTRODUCCION
- FLUORICEINAS
  - URANINA
  - EOSINA
  - AMINORHODAMINA G EXTRA
  - RHODAMINA F B
- EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE FLUORICEINA
- SALES
- EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE SALES
- ESPORAS
- ISOTOPOS
  - DEUTERIO Y OXIGENO 18
  - TRITIO
  - CARBONO 14
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS

EL USO Y LA APLICACION DE TRAZADORES  
DE AGUA SUBTERRANEA

---

Por: Ing. Juan Manuel Lesser Illades.\*

R E S U M E N

La técnica sobre la aplicación de trazadores en agua subterránea, se ha venido desarrollando con nuevas metodologías en los últimos 25 años. Los principales trazadores utilizados son fluoriceinas, sales, esporas e isótopos. Las fluoriceinas son uno de los trazadores más económicos y fáciles de utilizar. Su aplicación se ha incrementado al introducir en el proceso de -- detección, el espectrofluorómetro y la concentración por medio -- de carbón activado. Las esporas, son el trazador más nuevo que existe, el cual ha probado ser de gran utilidad. Otro tipo de trazadores de agua subterránea, son los isótopos deuterio, oxígeno 18, tritio y carbono 14, cuya técnica y aplicación es cada -- día mayor.

\* Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas.- S.A.R.H.

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

En determinadas ocasiones es de esencial importancia el conocer con exactitud si existe conexión entre dos puntos de un acuífero. Para ello se han llevado a cabo, desde el siglo pasado, experimentos consistentes en mezclar, en el agua de un aprovechamiento subterráneo localizado aguas arriba, una sal o un tinte, el cual puede ser reconocido en otro aprovechamiento localizado a cierta distancia aguas abajo, determinando así, la posible conexión entre dichos puntos. A esta técnica se le conoce como trazadores de agua subterránea.

Este método, se ha aplicado principalmente en rocas fracturadas, donde el tiempo de tránsito es corto, y en distancias hasta de 40 km (Zotl, 1970). En menor proporción, se ha llevado a cabo en medios granulares, ya que por una parte la velocidad de flujo es relativamente pequeña y por otra, la arcilla produce absorción e intercambio iónico, por lo cual la aplicación en este medio debe ser en distancias cortas.

Los puntos de inyección más comunes, son ríos subterráneos localizados dentro de cavernas y los principales puntos de muestreo son manantiales. Con algunas limitaciones los puntos de inyección y muestreo de trazadores pueden ser también pozos, norias,

galerías filtrantes, drenes, lagos y presas.

En algunas ocasiones, se ha utilizado esta técnica para determinar si el agua de manantiales, ríos o drenes, corresponden a filtraciones de una presa o lago.

Un buen trazador, debe de reunir las características siguientes: Debe ser no tóxico; soluble en agua, identificable en pequeñas concentraciones; resistente a cambios químicos; tener poca o nula capacidad de intercambio iónico; no ser absorbido o retenido por suelo o rocas; su determinación debe ser mediante análisis sencillos y su aplicación económica.

Los principales trazadores son fluoriceinas, sales espumas e isótopos.

### FLUORICEINAS

Son sustancias que tienen la propiedad de emitir luz fluorescente. La longitud de onda de esta luz, varía de una sustancia a otra, propiedad que se utiliza para identificarlas. Las sustancias más comunes utilizadas como trazadores son: Uranina, Eosina, Amidorhodamina G extra, Rhodamina FB y Tinopal CBS-X. A continuación se describen las características de cada una de estas sustancias.

URANINA.- Es la de mayor aplicación. Consiste en una fluoriceina de sodio que presenta un color naranja en soluciones concentra

das (mas de 1 ppm), que cambia a verde-amarillento al ser diluída. La intensidad de fluorescencia depende del pH. En la figura 1, se muestra la relación entre el pH y la intensidad de fluorescencia de la uranina. En aguas muy ácidas, pierde su fluorescencia pero este proceso es reversible, pudiendo recobrarla al añadir un compuesto básico, como KOH ó NH<sub>3</sub>. Esta propiedad puede utilizarse para identificar el trazador.

El poder de la uranina, puede disminuir por medio de procesos fotoquímicos como la luz ultravioleta, por agentes oxidantes como el cloro y el ozono y en algunos casos por procesos biológicos.

Es visible en concentraciones mayores de 0.01 ppm. Antiguamente se utilizaban lámparas de luz ultravioleta para identificarla cuando se encontraba en concentraciones bajas. Actualmente las concentraciones entre  $1 \times 10^{-2}$  y  $2 \times 10^{-6}$  ppm son medidas con espectrofluorómetro.

La intensidad máxima de fluorescencia se detecta a una longitud de onda de  $515 \times 10^{-9}$  m. A mayor o menor longitud de onda la intensidad disminuye en forma simétrica (figura 2) y la forma de la curva distingue a la uranina de otra fluoriceína. Para concentraciones menores a  $2 \times 10^{-6}$  ppm, se utiliza carbón activado (W.B. WHITE, 1967, F. BAVER, 1972) el cual se coloca en el agua durante un tiempo que varía de un día a semanas, donde la uranina es absorbida y concentrada de 50 a 500 veces por el car--

bón y su concentración medida posteriormente.

Para extraer la uranina del carbón, se le agrega a éste - algunas gotas de una de las siguientes preparaciones:

- a) Una parte de alcohol etílico al 95% y una parte de - hidróxido de potasio diluido al 15% en agua destilada.
- b) Ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF), dos partes de agua destilada y una gota de  $\text{NH}_3$ .

Por último, la uranina es resistente a la absorción por - arcillas y su uso no es tóxico para el hombre o animales.

EOSINA.- Presenta una fluorescencia naranja-rosa, cuya máxima - intensidad se detecta a una longitud de onda de  $535 \times 10^{-9}$  m.

Cuando se presentan valores mayores de 0.01 ppm, es visi- ble al ojo humano. Entre 0.01 y  $50 \times 10^{-6}$  ppm, puede detectarse con espectrofluorómetro. Concentraciones menores se concentran con carbón activado del cual puede extraerse añadiendo una subs- tancia compuesta por ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y - dos de agua destilada.

Al utilizarse junto con rhodamina FB o uranina, se produ- cen interferencias por lo que su aplicación conjunta es limitada.

AMINORHODAMINA G EXTRA.- Conocida anteriormente como sulforhoda



mina G extra, presenta una fluorescencia naranja-rosa en soluciones concentradas, que cambia a verde al ser diluída. Su mayor intensidad se presenta a una longitud de onda de  $554 \times 10^{-9}$  m. Es visible en concentraciones mayores de 0.01 ppm y con espectrofluorómetro pueden detectarse hasta  $6 \times 10^{-3}$  ppm. Valores menores pueden concentrarse por medio de carbón activado, del cual puede ser extraída la fluoriceína, por medio de una solución de ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

Esta fluoriceína presenta inconvenientes, ya que es difícil de disolver y fácilmente absorbida por arcillas. En presencia de uranina, rhodamina FB o eosina, se producen interferencias.

RHODAMINA FB.- Presenta un color púrpura y fluorescencia roja. Su mayor intensidad se detecta a una longitud de onda de  $578 \times 10^{-9}$  m. Es visible al ojo humano en concentraciones mayores de 0.01 ppm. Con espectrofluorómetro se detectan hasta  $10 \times 10^{-3}$  ppm. Valores menores pueden ser concentrados por medio de carbón activado del cual se extrae por medio de una de las soluciones siguientes:

- a) Cinco partes de propanol y 5 partes de hidróxido de amonio.
- b) Ocho partes de N-N dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

La rhodamina FB, presenta interferencias al combinarse -

con uranina, eosina o aminorhodamina G extra. Es tóxica cuando se inhala en soluciones concentradas. Por otra parte, en presencia de arcillas es altamente absorbida.

TINOPAL CBS-X.- Presenta un color verde con fluorescencia azul. Su mayor intensidad se determina a una longitud de onda de  $430 \times 10^{-9}$  m. Es visible sólomente en concentraciones mayores de 1 ppm. Con espectrofluorómetro se pueden detectar hasta  $440 \times 10^{-3}$  ppm. Valores menores son concentrados por medio de carbón activado del cual la fluoriceina puede extraerse agregando unas gotas de una solución que contenga ocho partes de N-N dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada. Este producto, es absorbido por arcillas.

#### EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE FLUORICEINA

Con el propósito de ilustrar su aplicación, a continuación se presentan los resultados obtenidos en un experimento llevado a cabo en una región cárstica.

Se propuso conocer la conexión entre el agua de un río - que se infiltraba dentro de una dolina y dos manantiales situados a 5 kilómetros de la primera. Para ello, se inyectaron 3 kg de uranina en el agua de la dolina y se obtuvieron muestras de agua cada dos horas en los manantiales "H" y "S".

En el manantial "S", no se detectó uranina, por lo que --

se concluye que este no tiene conexión con la zona de recarga -  
donde se inyectó el trazador.

En el manantial "H", se empezó a detectar uranina 56 horas después de la inyección, y la concentración del trazador -- fue aumentando hasta llegar a  $32 \text{ mg/m}^3$ , según muestra en la figura 3.

Tomando en cuenta el tiempo requerido por el trazador para circular entre los puntos de inyección y muestreo, y la distancia entre ellos, se obtuvo la velocidad mínima de circulación, - la cual fue de  $3.7 \text{ km/día}$ .

Otro ejemplo ilustrativo de la aplicación de trazadores, ahora en acuíferos granulares someros es el siguiente:

En un valle aluvial que presenta un acuífero freático a 3 m de profundidad, se perforaron 9 pozos a 3" de diámetro y 5 m de profundidad, distribuidos en la forma como se ilustra en la - figura No. 4.

En el pozo central, se inyectó uranina y se obtuvieron - muestras de agua en el resto de los pozos, cada 20 minutos.

Después de 3 horas 20 minutos de la inyección, se detectó uranina sólo en los pozos 4 y 5, de donde se puede obtener que el agua subterránea fluye en dirección Sureste, a una velocidad de  $1.5 \text{ m/hr}$ .

Este método es utilizado en zonas sin información y su aplicación queda limitada por la profundidad a que se encuentre el nivel estático, ya que mientras mayor es ésta, mayor es el costo de los pozos de muestreo e inyección.

### S A L E S

Las sales son el trazador artificial de agua subterránea más antiguo que se conoce se haya aplicado con éxito. Los productos utilizados más comunes son, sal de cloruro de sodio y sal de cloruro de potasio.

La sal es disuelta en agua y posteriormente incorporada al acuífero. Una de las desventajas que presenta este método, es que requiere que en la zona de inyección el caudal de agua que entre el acuífero sea grande. Por otra parte se necesita una gran cantidad de sales en cada experimento.

En zonas cársticas, para distancias entre 3 y 5 km se requiere inyectar un mínimo de 500 kg de sal (Zotl, 1975). La cantidad más grande que se ha llegado a inyectar en un experimento de trazadores, fue de 50 toneladas de NaCl, (W. Kass. en H. Batsche et. al., 1970), donde después de 4 días, se encontró en uno de los manantiales de observación un incremento de cloruros de solo 39 ppm.

Los grandes volúmenes de trazador requeridos mediante es

te método, hacen que su uso sea limitado. La ventaja consiste en que pueden efectuarse determinaciones cuantitativas.

#### EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE SALES

Durante los trabajos realizados para conocer la posible conexión entre el agua de un río que se infiltraba en una dolina y dos manantiales localizados a 5 kilómetros de ésta, como se mencionó en párrafos anteriores, se inyectaron 600 kg de cloruro de sodio y 400 kg de cloruro de potasio.

Posteriormente se obtuvieron muestras de agua con intervalos de dos horas cada una, tanto en el manantial "H" como en el "S", las cuales se analizaron químicamente determinándose el contenido de cloruros, sodio y potasio.

Al igual que en los resultados obtenidos para la fluoriceína (párrafos anteriores), en el manantial "S", no se detectó incremento alguno en su contenido salino, por lo cual se concluyó que este manantial no tiene conexión con el agua de infiltración de la dolina.

Por lo que se refiere al manantial "H", los resultados de los análisis se graficaron en la figura 5, donde se observa que 56 horas después de la inyección de las sales, se detectó un incremento en los iones determinados, ratificando la comunicación entre la dolina y el manantial.

Considerando el tiempo que tardó en aparecer el trazador en el manantial y la distancia entre éste y la dolina, se obtuvo la velocidad de flujo del agua de este acuífero.

Por otra parte, con estos resultados y los de los análisis químicos y volúmenes aforados, es factible determinar el volumen mínimo de agua almacenado, así como el conocer en que proporción el agua del manantial, proviene de la que se infiltra en la dolina.

### E S P O R A S

Las esporas utilizadas como trazadores corresponden al tipo *Lycopodiun Clavatum*. Tienen un diámetro de 30-55 micras y un color amarillo pálido (1 micra =  $10^{-4}$  cm).

Su forma es similar a la de un triángulo isóseles con los dos convexos. Sus orillas forman cadenas de semicírculos cóncavos (figura 6). Están cubiertas por una fina membrana insoluble por lo que al ser incorporadas al agua son transportadas en suspensión. No se sedimentan y tienen la propiedad de no ser absorbidas o intercambiadas con el suelo o rocas.

En el año de 1953, A. Mayr, trató de emplear las esporas como trazador debido a las propiedades que presentan pero su identificación resultó problemática. J. Zotl y V. Maurin, idearon teñir las esporas de diferentes colores para facilitar su

identificación lo cual resultó exitoso. De esta manera pueden -  
mezclarse en agua, esporas de diferentes colores y posteriormente  
detectarse en cierta zona de muestreo identificándose, por el co-  
lor, con cuales sitios tiene conexión.

El muestreo de esporas se lleva a cabo instalando redes -  
para plancton las cuales se pueden dejar por tiempo indefinido en  
el lugar de muestreo. Al preparar la muestra para observarla en  
el microscopio, se ha visto que se obtienen resultados satisfacto-  
rios, si se lleva a cabo lo siguiente:

A las muestras de campo se le agregan 3 gotas de hidróxi-  
do de potasio al 10%, 3 gotas de formol al 35% y una pisca de --  
urea; posteriormente se calienta en baño de María por tres minu--  
tos. Se centrifuga y el sedimento se concentra en un tubo al --  
que se le agrega una gota de ácido etílico. Se coloca una peque-  
ña parte de la preparación en una lámina delgada para su análisis  
al microscopio.

### I S O T O P O S

Los principales isótopos utilizados como trazadores en --  
agua subterránea, se dividen en estables (Deuterio y Oxígeno 18)  
y radioactivos (Tritio y Carbono 14). A continuación se descri-  
ben sus principales características.

DEUTERIO Y OXIGENO 18.- Son identificados con las siglas  
D y <sup>18</sup>O. Se encuentran en el agua de mar en promedio de 320 y

2 000 ppm respectivamente. Sus concentraciones son representadas mediante las relaciones D/H y  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  y expresadas en unidades  $\delta$  como sigue:

$$\delta D = \frac{(D/H)_{\text{MUESTRA}} - (D/H)_{\text{SMOW}}}{(D/H)_{\text{SMOW}}} \times 1000$$

La evaporación produce un fraccionamiento isotópico y en el agua de lluvia de zonas con climas moderados es lineal y en la proporción siguiente:

$$\delta D = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

El fraccionamiento isotópico, está en relación con la temperatura y altitud.

Tomando en cuenta los procesos y propiedades de estos isótopos, es posible diferenciar agua superficial sujeta a evaporación, de agua de lluvia, o de agua infiltrada a diferentes alturas.

TRITIO.- Tiene una vida media de 12.26 años. Antes del año de 1953, cuando se efectuaron las primeras pruebas con bombas atómicas, el agua de lluvia, contenía entre 5 y 10 unidades de tritio (U.T.). Como resultado de dichas explosiones, el contenido de tritio en la atmósfera se incrementó llegando a medirse hasta 800 U.T. en algunos lugares. La concentración de este isótopo en el agua, varía con la latitud y los cambios estacionales.

\* Standard Mean Ocean Water.



Tomando en cuenta lo anterior se puede decir que el agua con contenidos bajos de tritio, menores de 1 U.T. corresponde a agua infiltrada hace más de 50 años. Si tiene concentraciones entre 10 y 20 U.T. indica que el agua es de lluvia o reciente infiltración y si tiene más de 20 U.T. corresponde a agua con entre 10 y 50 años de infiltrada.

CARBONO 14.- Este isótopo junto con los mencionados anteriormente, son los de mayor aplicación de hidrología y tiene una vida media de 5730 años. El carbono 14 contenido en el agua, empieza a desintegrarse al incorporarse al acuífero, por lo cual al medir su contenido en algún punto, es posible determinar el tiempo que ha permanecido en el acuífero. Pueden detectarse edades hasta de 30,000 años.

La edad del agua por medio del carbono 14, se complementa con la del tritio, debido a los diferentes rangos que abarcan. Cuando la concentración de tritio es menor de 2 U.T. o sea infiltrada antes de 1954, se dice que es negativa y para valores mayores, o sea posteriores a 1954 se dice que es positiva. Respecto al carbono 14, si se detecta alguna concentración, significa que el agua tiene menos de 30,000 años y se dice ser positiva, pero si no se detecta entonces tiene más de 30,000 años y es negativa.

Combinando a estos isótopos, tenemos que si ambos son positivos el agua es posterior a 1954; si son negativos es que tie

no más de 30,000 años y si el tritio es negativo y el carbono 14 positivo, el agua se infiltró entre 1954 y hace 20,000 años.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los trazadores de agua subterránea más comunes son: fluoriceinas, sales, esporas e isótopos.

Este método es de mayor aplicación, en rocas fracturadas, donde el tiempo de tránsito es corto. En medios granulares, ya que por una parte la velocidad de flujo es relativamente pequeña y por otra, la arcilla producen absorción e intercambio iónico, - se utiliza para distancias cortas.

Dentro de las fluoriceinas, la que ha reportado mejores resultados es la uranina. Su utilización permite determinar, -- principalmente, la conexión entre dos puntos de un acuífero pero es también posible, conocer velocidades y direcciones del flujo - de agua subterránea.

El uso de sales es restringido debido a la gran cantidad de trazador que se necesita utilizar en cada experimento. Es -- recomendable para distancias cortas.

Las esporas son el trazador más nuevo que se haya aplicado con éxito. Su manejo es sencillo, económico y puede utilizar se para distancias hasta de 40 kilómetros.

Por las características que presentan el deuterio y el oxígeno 18, es factible a partir de su determinación, diferenciar aguas superficiales sujetas a evaporación, de agua de lluvia o de agua infiltrada a diferentes alturas.

Los isótopos tritio y carbono 14, son utilizados para datar el agua, abarcando un rango de prácticamente cero a 30,000 años.

#### REFERENCIAS

- Back W. and J.Zotl., 1975, "Application of Geochemical Principles, Isotopic Methodology and Artificial Tracers to Karst Hydrology" In: Hydrogeology of Karstic Terrains, I.A.H.
- Dansgaard W., 1964, "Stable Isotopes in Hydrology" Tellus 16, 436-468.
- Dechant, M., 1967 "Die Färbung der Lycopodiumspores" Steir Beitr. Z. Hydrogeologie, 18/19, 241-247.
- Dechant M., 1977, "The Dyeing of Lycopodium-Spores" Notes of The Ground Water Tracing Techniques Course" Graz, Austria.
- Gonfiantini, R., 1971 "Notes on Isotope Hydrology" International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria.
- Institute for Karsresearch SAZU. "Underground" Yugoslavia.
- Payne R.B., 1975, "Isotope Hydrology" International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- White, W.B., 1967, "Modifications of Fluorescein Dye Groundwater Tracing Techniques". Steir. Beitr. Z. Hydrogeologie, 18/19 151-158.

Wittwen R., Waser H. and Matthe, B., 1971, "Essai de Fixation -  
de la Sulforhodamine B et de la Sulforhodamine G. -  
Extra sur Charbon Actif".  
Act. 4e Congr. Suisse Speleol. Neuchatel 1971,78-83.

Zotl J. G., 1965, "Carst Hydrological investigations for the Constr  
uction of the Diessbach Reservoir".

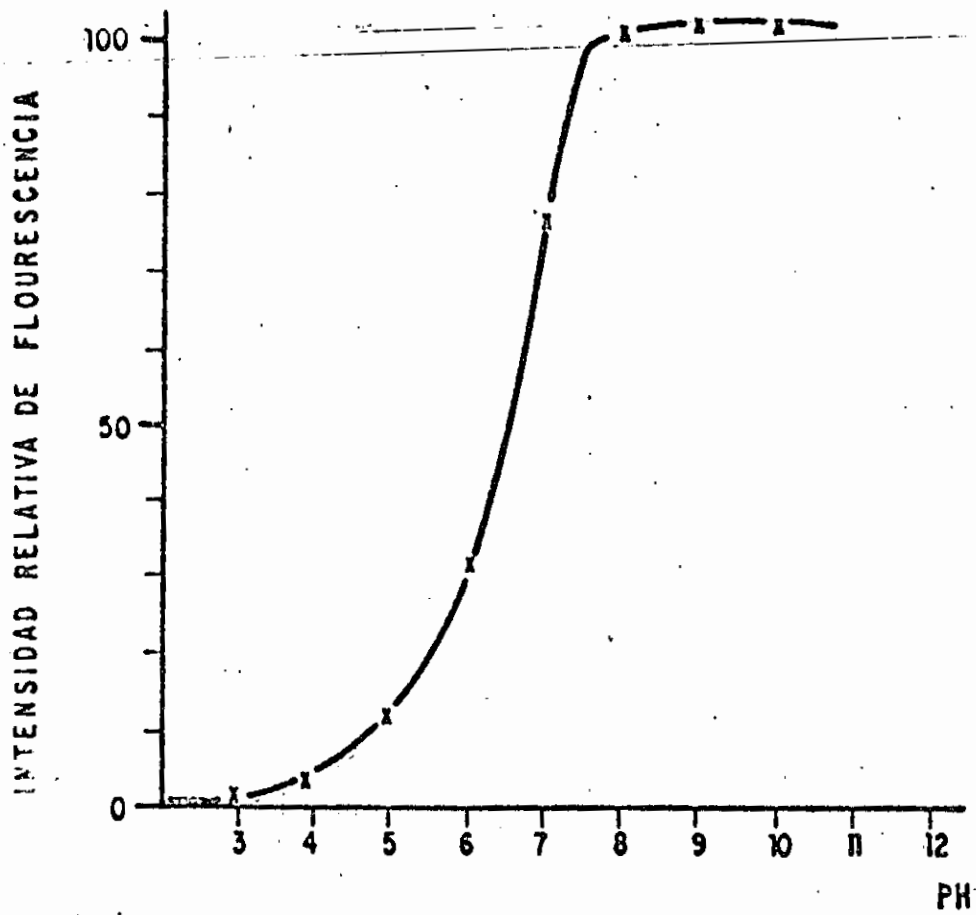


FIGURA 1

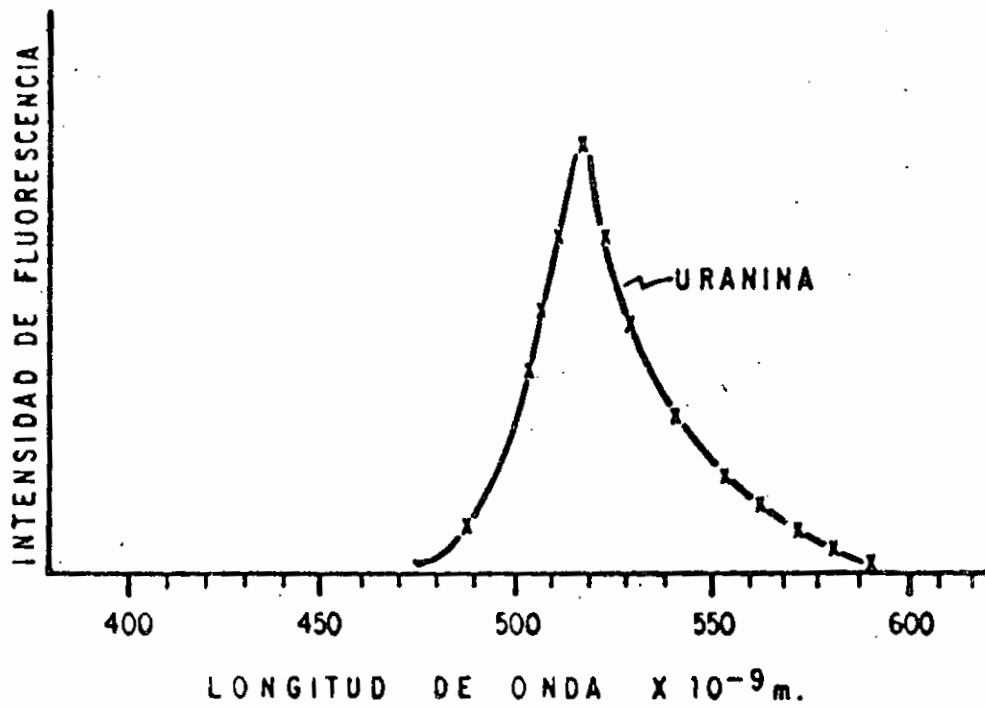


FIGURA 2

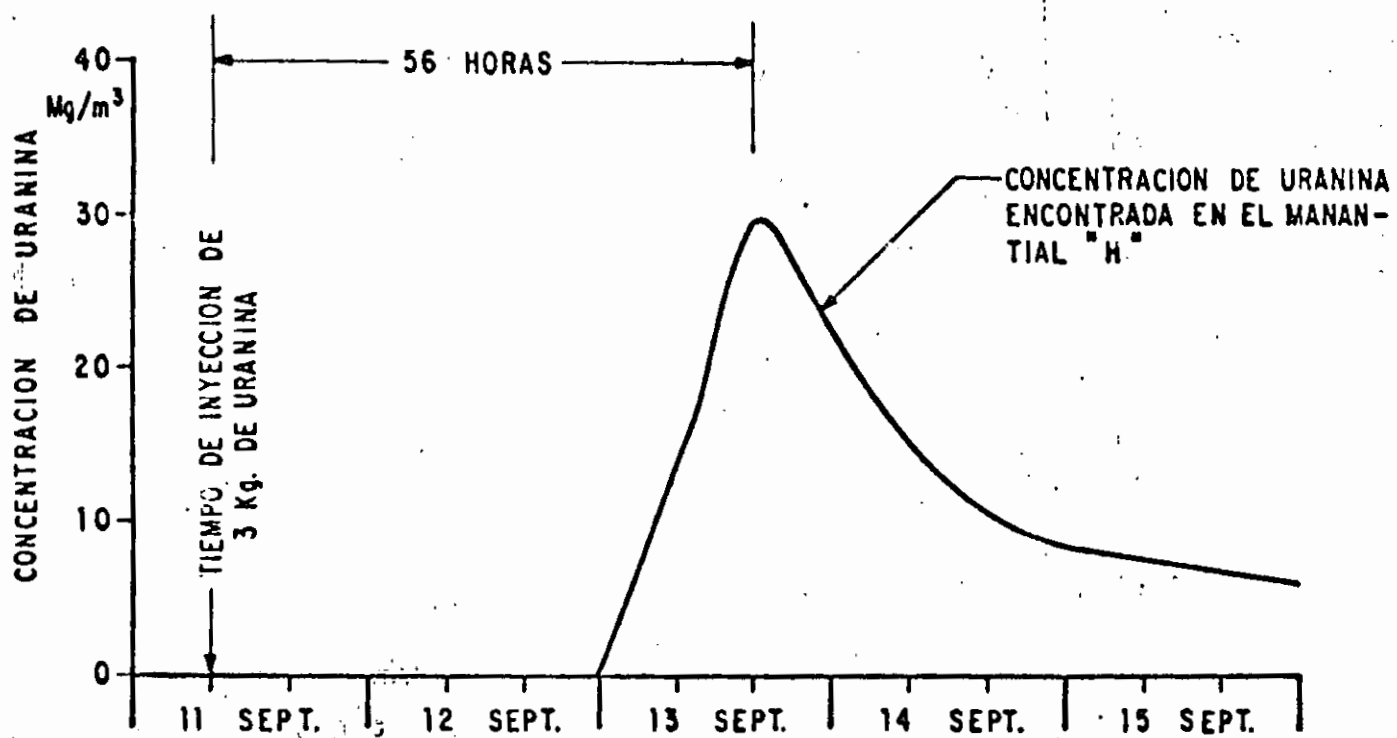
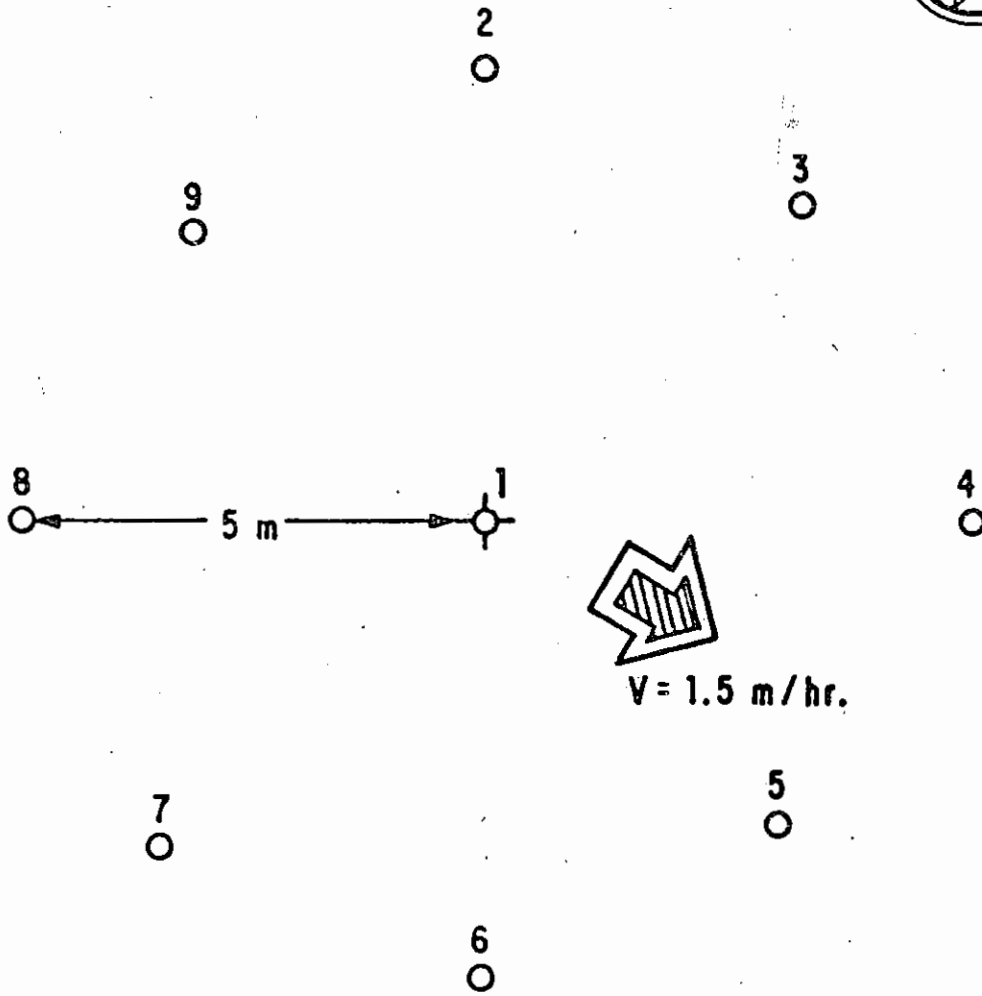
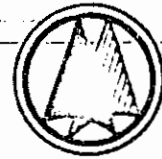


FIGURA 3




$V = 1.5 \text{ m/hr.}$

$$v = \frac{d}{t}$$

$d = 5 \text{ metros}$

$t = 180 \text{ minutos}$

### EXPLICACION

 POZO DE INYECCION

 POZOS DE MUESTREO



DIRECCION Y VELOCIDAD DEL FLUJO  
DEL AGUA SUBTERRANEA OBTENIDO  
POR MEDIO DE TRAZADORES

FIGURA No. 4

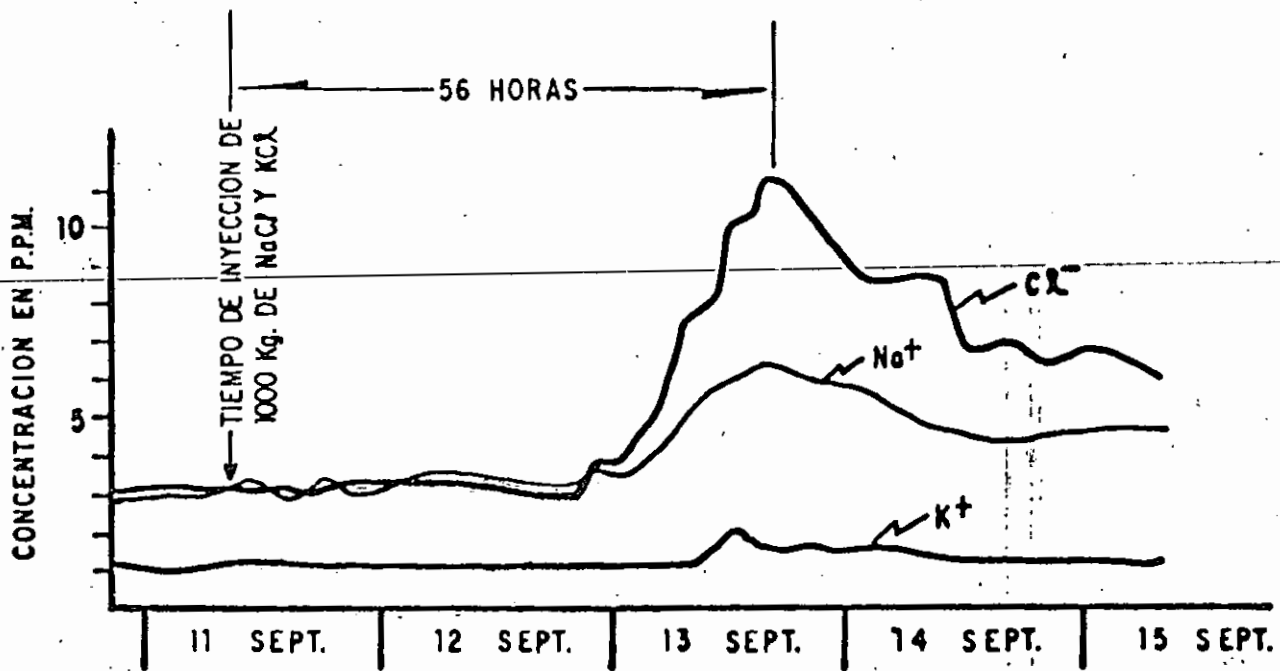


FIGURA 5

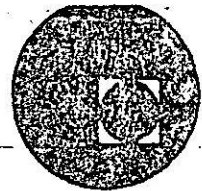


FIG 6





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



## PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

### TEMA I: LOCALIZACION

#### 1.7.- Registros Eléctricos

ING. LUIS LARA TRUJILLO

Marzo, 1978



NOTAS PARA LA INTERPRETACION DE REGISTROS EN  
POZOS DE AGUA.

---

Introducción.- Los registros de pozos representan en la actualidad el método seguro y conveniente para la obtención de datos de subsuelo, al efectuarse la perforación de pozos que tienen como objetivo la localización de hidrocarburos, agua ó minerales. En general puede decirse que de acuerdo con la cantidad de información requerida así como su confiabilidad y costo, existen en la tecnología de registros varios tipos de métodos y herramientas, siendo en algunos casos necesario utilizar computadoras no solamente por la rapidez de obtención de resultados sino por lo complejo y/ó rutinario de los procedimientos de cálculo.

Las características ó propiedades físicas de las rocas, son de importancia básica para los distintos tipos de registros que existen: cuándo están parcial ó totalmente saturadas de agua, se aprovechan sus propiedades eléctricas; sus propiedades radioactivas ya sea en forma natural ó inducida por bombardeo de neutrones; sus propiedades de propagación de ondas acústicas; y su densidad y conductividad termal.

Atendiendo a razones de costo, los programas de registros en pozos de agua, se configuran sobre la base de un registro eléctrico y en ocasiones la curva de rayos gamma. La información obtenida a partir de éstos registros es complementada por el conocimiento geológico del área, muestras litológicas, observaciones sobre la perforación y cierta experiencia.

Con el objeto de lograr el aprovechamiento adecuado de los registros tomados en la perforación de pozos de agua, se describirán los métodos comunes, sus principios e interpretación de resultados.

Registro eléctrico. - Para nuestros propósitos, puede considerarse que un registro eléctrico es la gráfica de ciertas propiedades eléctricas de las rocas atravesadas por un pozo. Tales propiedades son medidas por dos ó más configuraciones de electrodos los cuales son bajados dentro del pozo por medio de cables eléctricos. Generalmente el registro eléctrico presenta dos gráficas diferentes: en la parte izquierda aparece el potencial espontáneo

también llamado SP, mientras que las mediciones registradas de la resistividad están en la porción derecha. Tanto el potencial natural como las resistividades, son registradas simultáneamente en una sola "corrida" ó viaje del instrumento.

Las mediciones de los parámetros mencionados, solo pueden efectuarse en los pozos que no tienen ademe ó tubería de revestimiento y que estén llenos de un fluido conductor.

El procedimiento para obtener el registro eléctrico consiste en bajar un sistema de electrodos sobre un cable multiconductor aislado, hasta el fondo del pozo y al subirlo a la superficie ir registrando de acuerdo a la profundidad, las lecturas correspondientes a los parámetros medidos, sobre un papel con las escalas convenientes.

Potencial espontáneo.-- La curva del potencial espontáneo, es el registro de los potenciales naturales que se generan en el pozo, siendo la representación de las diferencias de potencial que existe entre un electrodo colocado en la superficie y otro que se introduce al pozo.

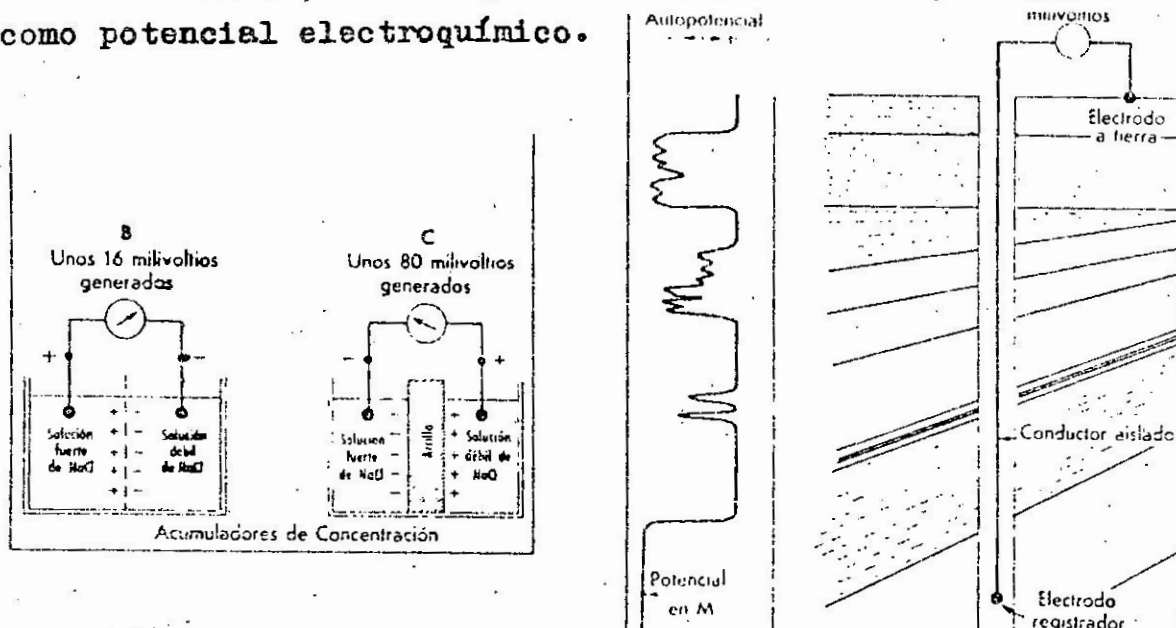
El potencial espontáneo es obtenido simultáneamente a otros registros. Las variaciones de la curva reflejan las diferencias de potencial entre puntos dentro del agujero frente a rocas porosas y puntos frente a cuerpos arcillosos. Cuando las rocas atravesadas están constituidas por capas de arcilla ó lutita, se observa que tienen aproximadamente el mismo potencial, lo cual provoca que en la curva del potencial espontáneo aparezca casi una línea recta vertical, llamada "línea base de lutitas". A partir de ésta línea base se miden las deflexiones de la curva ocasionadas por las otras rocas.

Generalmente la curva del potencial espontáneo permite obtener la siguiente información:

- 1.- El límite de capas y su espesor efectivo.
- 2.- Determinar en forma aproximada la resistividad -- (ó bien la salinidad) del agua contenida en la roca.
- 3.- Correlación de capas.

Experimentalmente se ha logrado demostrar que las principales fuentes de potencial que originan la curva del SP, son las siguientes: Potencial de difusión ó efecto de la pila de con-

centración, potencial de membrana ó de Nerst y el potencial de electrofiltración ó de corriente. Los dos primeros son resultados de fenómenos electroquímicos y responsables principales de la curva del SP, por lo que sumando sus efectos, se les conoce como potencial electroquímico.



Los fenómenos electroquímicos que producen la mayor parte del potencial natural, se puede explicar por su analogía con las llamadas pilas de concentración. Estas se forman al contacto de dos soluciones salinas de diferente concentración: los iones

$\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  pueden pasar de una solución a otra. Como los iones de  $\text{Cl}^-$  tienen mayor movilidad que los iones de  $\text{Na}^+$  resulta un flujo de cargas negativas de la solución más concentrada a la menos concentrada. Esto equivale a un flujo de corriente convencional en la dirección opuesta. El fenómeno se reproduce en un pozo en el límite de la zona invadida por el filtrado del lodo de perforación que ha penetrado a la formación y el agua que contiene ésta, produciendo el potencial de concentración.

Cuándo una arcilla separa soluciones de  $\text{NaCl}$  de diferente concentración, los cationes  $\text{Na}^+$  se desplazan a través de la arcilla (las arcillas son permeables a los cationes  $\text{Na}^+$  e impermeables a los aniones  $\text{Cl}^-$ ), desde la solución más concentrada hacia la menos concentrada. Esta situación se presenta en los pozos cuando se encuentra una formación permeable entre dos cuerpos de arcilla, siendo las soluciones el filtrado del lodo de perforación y el agua intersticial.

El movimiento de iones de  $\text{Na}^+$  a través de la arcilla, desarrolla el potencial de membrana.

Tanto el contacto de las dos soluciones representadas por el filtrado del lodo de perforación y el agua contenida en la roca permeable, como la relación de las mismas a través de la arcilla producen la fuerza electromotriz electroquímica total, - que está representada por la siguiente ecuación:

$$E_c = -K \log \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (1)$$

en donde:

$E_c$  = fuerza electromotriz electroquímica.  
 $a_w$  = actividad química del agua intersticial.  
 $a_{mf}$  = actividad química del filtrado del lodo  
 $K$  = coeficiente proporcional a la temperatura absoluta. Para soluciones de  $\text{NaCl}$  es igual a 71 á  $25^\circ\text{C}$ .

Para soluciones de  $\text{NaCl}$  no demasiado concentradas, las resistividades son inversamente proporcionales a las actividades químicas, por lo que la ecuación anterior se puede escribir:

$$SP = -K \log \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (2)$$

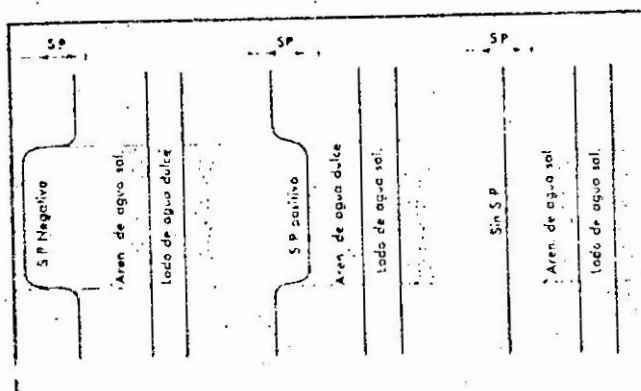
en donde:

$SP$  = potencial espontáneo obtenido del registro.  
 $R_{mf}$  = resistividad del filtrado del lodo.  
 $R_w$  = resistividad del agua intersticial.  
 $K$  = coeficiente proporcional a la temperatura abs.

Por lo anterior, en algunos casos es factible obtener un valor estimado de  $R_w$  (ó la salinidad del agua de formación), aunque teniendo en mente siempre que la fórmula (2) es una -- aproximación permisible cuando el contraste de salinidades entre el agua de formación y del filtrado del lodo es grande y la formación no contiene arcilla que pudiera reducir la amplitud del  $SP$ . En pozos de agua, donde el interés reside en la obtención de la salinidad de aguas útiles, ésta posibilidad se ve muy restringida, por lo que generalmente el uso de la curva del potencial espontáneo, es de tipo cualitativo.

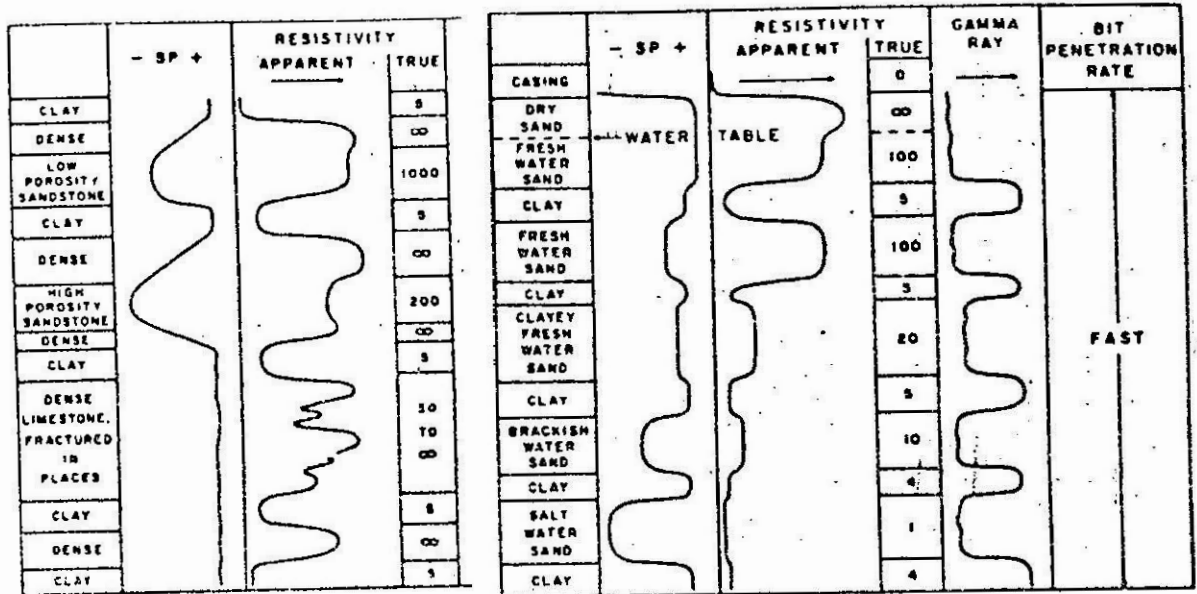
Tomando como referencia, la línea base de lutitas, el potencial espontáneo que es medido en milivolts, puede ser negativo si su deflexión es a la izquierda, positivo si la deflexión es a la derecha de la misma referencia ó bien nó dar ningún valor relativo.

De acuerdo al principio electroquímico que genera los potenciales dentro del pozo, se puede considerar como una regla: si la curva del potencial es negativa, el agua contenida en la roca es más salada que la del lodo de perforación; en cambio si es positiva, el agua intersticial es más dulce que la del lodo y si nó tiene expresión en uno u otro sentido, el agua intersticial es muy semejante a la del lodo de perforación.



En la práctica, la medición del SP se obtiene mediante un circuito potenciométrico, que es conectado entre un electrodo móvil (M) y un electrodo fijo en la superficie (N). El medidor (R), registra las deflexiones del potencial por medio de un galvanómetro que responde a las variaciones de las corrientes que fluyen a través del circuito.

Existen algunos modelos teóricos de las curvas de potencial, aunque pueden existir diferencias notables con respecto a las curvas reales, siendo las principales las siguientes:



a.- Comúnmente la línea base de lutitas es recta y vertical, pero en algunos pozos y a profundidades someras, se desvía ya sea en forma total ó en los intervalos arcillosos y generalmente hacia la izquierda conforme decrece la profundidad.

b.- Cambio brusco en la línea base de lutitas, frecuentemente observado cuando hay un fuerte cambio en la salinidad de las aguas de formación.

c.- Inestabilidad en la curva del SP, principalmente en la parte superior de los agujeros en donde hay un movimiento apreciable de agua, como en los pozos artesianos, en donde la señal cambia constantemente, aún si el electrodo de registro se conserva estacionario. La inestabilidad desaparece abajo de la zona de agua en movimiento.

d.- Cambios de polaridad en la curva del potencial espontáneo en acuíferos de algunos pozos, aún teniendo sus aguas salinidades del mismo orden. Estos cambios son generalmente debidos a variaciones en el tipo de iones ó a las cantidades de algunos de esos iones.

Efecto de la porosidad: Aunque el potencial electroquímico no es influenciado por la porosidad, la amplitud de la curva del SP es indirectamente afectada por los cambios de porosidad. Una disminución en la porosidad de la roca, incrementa su resistividad reduciendo la amplitud de la curva del SP.

En acuíferos de tipo granular, empacados en formaciones arcillosas, la respuesta de la curva de potencial es clara y se puede considerar que: si las aguas en el acuífero son de mayor salinidad que el lodo de perforación, el SP es negativo y si las aguas son menos salinas que el lodo, el SP será positivo con respecto a la línea base de lutitas.

Los acuíferos que se encuentran interestratificados con capas de arcilla y capas densas, tanto la forma como amplitud del potencial son diferentes de aquellos obtenidos en los acuíferos del caso anterior. La curva del potencial, generalmente se distorsiona y no puede por sí sola ser interpretada.

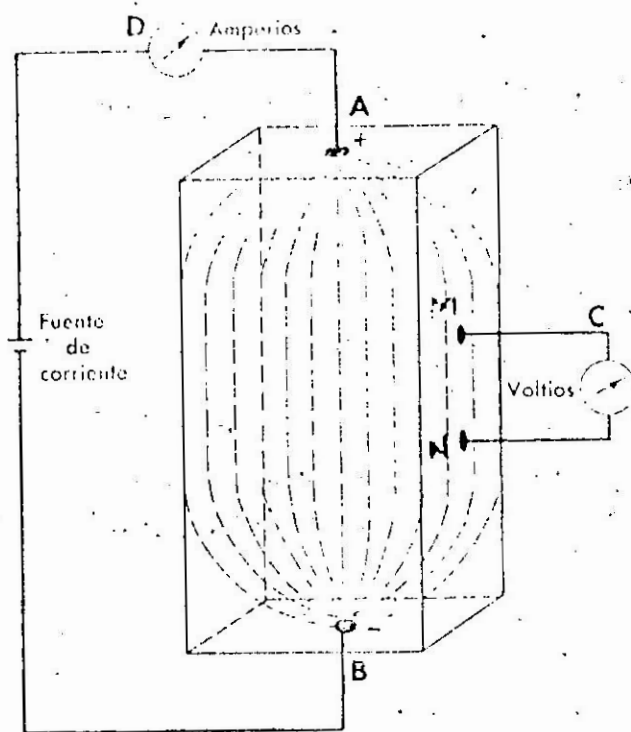
Cuando existen acuíferos asociados con rocas densas pero ausentes de capas arcillosas, el potencial electroquímico discutido anteriormente, prácticamente desaparece y, al no haber otra fuente de potencial, la curva del SP es aproximadamente una línea recta vertical.

Haciendo un resumen y mientras no se puedan aplicar las determinaciones cuantitativas de la curva del SP, es permisible utilizar cualitativamente el potencial espontáneo de acuerdo con las siguientes reglas generales:

- 1.- Los acuíferos que presentan un SP positivo bien definido ó estable, casi invariablemente contienen agua de menor salinidad que la contenida en el fluido de perforación.
- 2.- En los intervalos en donde la amplitud del SP frente a los acuíferos potentes, permanece constante con respecto a la profundidad, todas las aguas de formación tienen aproximadamente la misma salinidad.
- 3.- Si la curva del SP en los acuíferos penetrados por un agujero, se presenta cada vez más negativo con la profundidad, indica que la salinidad de los acuíferos se incrementa con la profundidad.
- 4.- Los acuíferos que presentan un franco y amplio SP negativo, generalmente contienen aguas que son mucho más saladas que en donde el SP tiene una baja amplitud ó es positivo.
- 5.- Los cambios erráticos en la polaridad del SP, provocan que la amplitud del SP sea pequeña, pudiendo o no corresponder a cambios significativos en la salinidad del agua.



RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS.- La forma más simple de determinar la resistividad en las rocas, es considerar una muestra y conectar en las partes superior e inferior, los polos de un generador eléctrico. La corriente fluye del punto A al punto B a través de la muestra, siendo mayor el potencial en el punto A y teniendo una pérdida ó caída de potencial en el punto B debido a la resistencia eléctrica que ofrece la roca. La resistencia que ocasiona una pérdida de potencial entre M y N es una característica de la roca que está siendo analizada. A mayor resistencia eléctrica de la roca, corresponderá una mayor pérdida de presión entre los puntos M y N.



Si se considera una cierta unidad de volumen de roca, la resistencia ofrecida se puede considerar como una resistencia específica, llamada resistividad, la cual será una propiedad de la roca, independiente de la forma y dimensiones de la misma, en función únicamente de la naturaleza y temperatura del material considerado. En la práctica el efecto de la temperatura no es demasiado grande y puede ser despreciado, por lo que la resistividad de un material, puede ser considerada como dependiente de la naturaleza del mencionado material únicamente. Por otra parte, la resistencia es una propiedad eléctrica que depende no solamente de la

naturaleza del material considerado, sino también de la forma y dimensión de éste, siendo distinta por lo tanto, de la resistividad. Las expresiones que nos definen tanto una como otra propiedad, son las siguientes:

$$R = \frac{V}{I}, \text{ para la resistencia y}$$

$$R = \frac{r A}{L} \text{ para la resistividad.}$$

en donde:

I = corriente

V = Voltaje

R = resistividad del medio

r = resistencia del conductor ó de medio.

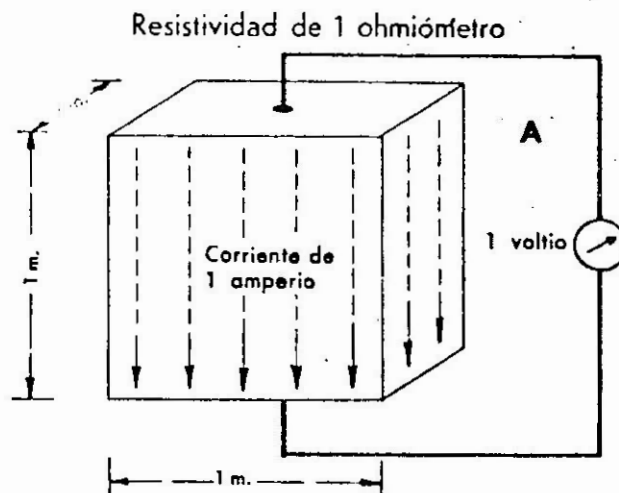
A = Area del conductor.

L = longitud del conductor.

Si la resistividad es la resistencia específica ó sea la resistencia por unidad de volúmen, en las mediciones que se hacen de resistividad en los pozos, es común utilizar como unidad :

$\text{ohm} \times \frac{\text{metro}^2}{\text{metro}}$  ó simplemente ohm-metro.

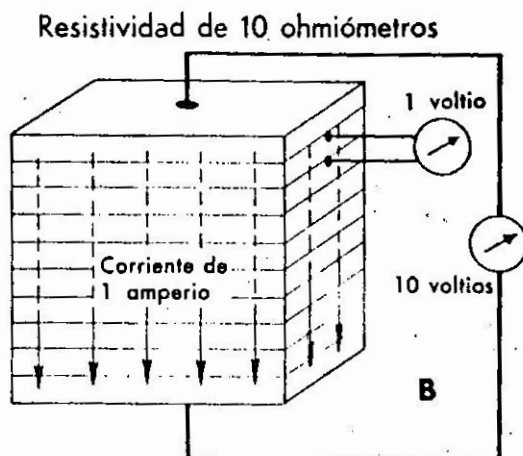
Para ilustrar el concepto, en la siguiente figura se tiene un cubo de un metro por lado de un determinado material,



Si la diferencia de potencial entre los extremos del cubo, es de un volt y la intensidad de corriente de un amperé, se tendrá representada la unidad de resistencia eléctrica:  $\frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ amperé}} = 1 \text{ ohm}$

y también la unidad de resistividad:  $1 \text{ ohm} \times \text{m}^2/\text{m}$ , utilizada en registros eléctricos.

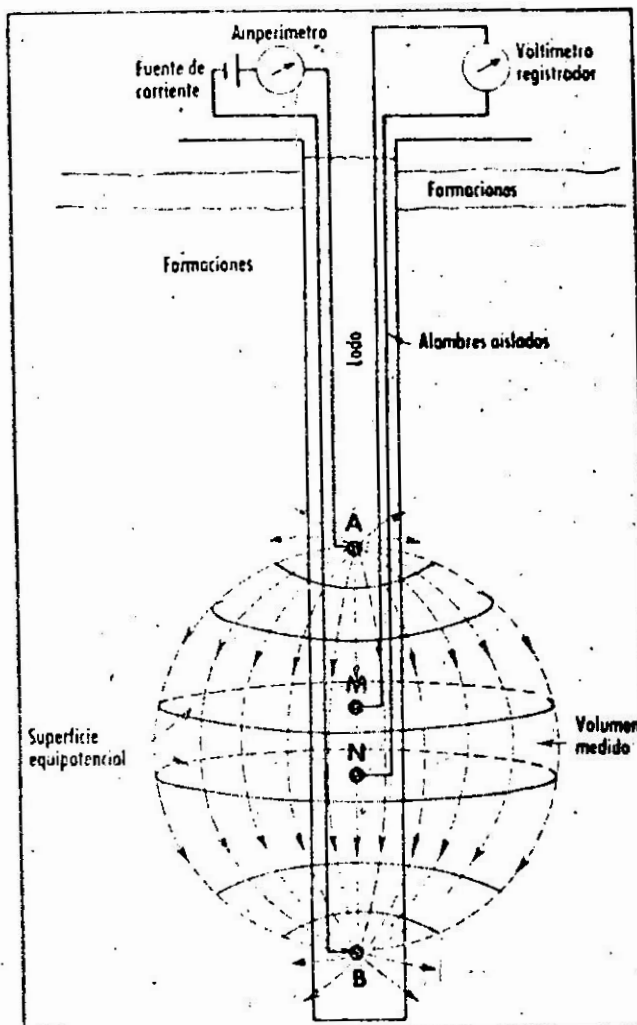
Si se tuviese el mismo volumen de roca y la misma corriente, pero una diferencia de potencial de 10 volts, la resistencia en tal caso será:  $\frac{10 \text{ volts}}{1 \text{ ampere}} = 10 \text{ ohms}$  y la resistividad igual a:  $10 \text{ ohms} \times \text{m}^2/\text{m}$ , que puede expresarse más comúnmente como 10 ohms-metro.



**MEDICION DE LA RESISTIVIDAD EN EL POZO.**— Para efectuar la medición de la resistividad en pozos, se pueden utilizar los registros convencionales de resistividad, en los cuales se envían corrientes a la formación a través de unos electrodos y se miden los potenciales eléctricos entre otros. La medición de éstos potenciales permite determinar las resistividades.

Considerando una formación homogénea, isotrópica y de extensión infinita, en la cual se encuentran los electrodos A, B, M y N. Una corriente eléctrica es enviada entre los electrodos A y B, la cual fluirá en una trayectoria esférica dentro de la formación. Utilizando los electrodos M y N para medir el voltaje entre ellos, se puede investigar la resistencia entre las dos superficies equipotenciales que pasan por M y N.

En la práctica el medio que rodea a los dispositivos de medida no es homogéneo, por lo que la corriente fluirá desde el electrodo que se envía, en forma distorsionada.

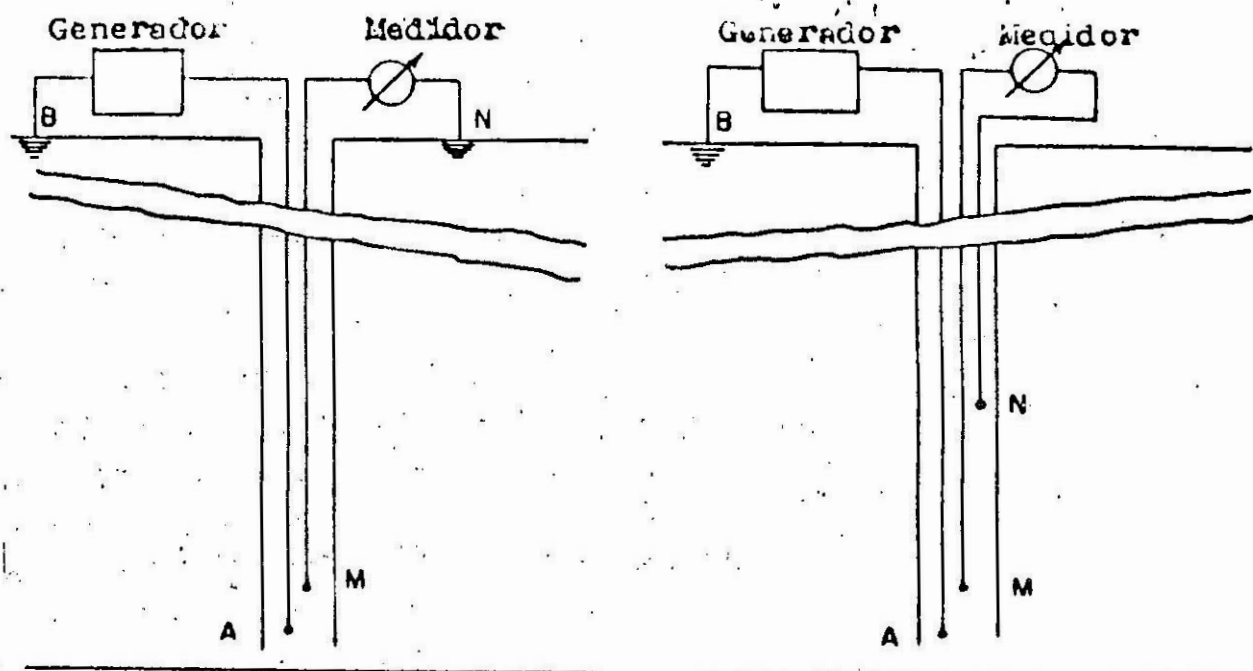


Los dispositivos usados para medir la resistividad, comúnmente llamados sondas, consisten fundamentalmente de un cable conductor múltiple que en el extremo que se introduce al pozo quedan dentro de un cilindro metálico, con orificios a ciertas distancias, en los cuales se localizan los electrodos. Con éstos - electrodos es posible formar distintos arreglos ó configuraciones de electrodos de medida y corriente. La distancia existente entre un electrodo de medida ( M ó N de las figuras) y uno de corriente ( A ó B en las figuras), se llama espaciamento, teniendo la particularidad de que a distintos espaciamentos miden la resistividad de las rocas a diferentes distancias a partir del eje del pozo. Si por penetración de la sonda se define el radio al cual la caída de potencial es el cincuenta por

ciento de la caída total, se tiene que para algunos arreglos la penetración de investigación es el doble del espaciamento.

De acuerdo con el arreglo ó disposición de los electrodos de medida y de corriente, se construyen sondas que reciben nombres convencionales para su identificación por parte del analista y su diferenciación entre ellas.

SONDA NORMAL.- El dispositivo conocido con éste nombre, teóricamente lo integran un electrodo de corriente A y un electrodo de medida M dentro del pozo. Estos electrodos tienen una separación ó espaciamento pequeño en comparación con los otros electrodos B y N que cierran el circuito, que pueden quedar situados en la superficie. En la práctica el segundo electrodo de corriente B, también es bajado al pozo pero a una distancia tal del conjunto AM, que la influencia que pudiese tener en el potencial medido por M, en la mayoría de los casos es despreciable. El objeto de introducir también el electrodo B dentro del pozo, es el de utilizar el circuito para medir simultáneamente el potencial espontáneo. La figura siguiente ilustra tanto el circuito teórico como el arreglo real utilizado.



A). CIRCUITO DE DOS ELECTRODOS

B).- CIRCUITO REAL

El espaciamiento comunmente empleado en las sondas normales es de 0.40 m. y 1.60 m. Estas gráficas se toman al mismo tiempo y para diferenciarlas entre sí, una de ellas, la de 0.40 m. de espaciamiento, recibe el nombre de normal corta y su gráfica se hace con raya continua. La de 1.60 m. de espaciamiento se conoce como normal larga y se grafica con raya discontinua. Estas dos curvas de resistividad nos indican la resistividad en zonas someras y más o menos profundas, en donde existe en todas aquellas rocas permeables, un cierto contenido del filtrado del lodo, el cual ha desplazado o se ha mezclado con el fluido original de la roca. En otras palabras, las sondas normales estarán midiendo a una distancia tal del pozo, que los fluidos existentes en la formación han sido alterados por la introducción en ella del filtrado del lodo principalmente en aquellas rocas permeables que tienen una porosidad pobre o regular. Esta zona afectada por el filtrado del lodo se conoce con el nombre de "zona de invasión" o "zona invadida". En los casos de formaciones con alta porosidad la invasión no es profunda y probablemente las mediciones hechas por la normal larga no se encuentran afectadas por la invasión del filtrado del lodo.

Las curvas típicas registradas por un dispositivo normal, indican:

- a) La curva es simétrica con respecto al centro de la capa.
- b) Las capas que tienen un espesor menor que el espaciamiento, indicarán una baja resistividad o depresión en la curva.
- c) Debido a su corto espaciamiento y por lo tanto sujetas a la influencia del agujero y a la zona invadida, las curvas norma-

los no pueden ser adoptadas, en la mayoría de los casos, para mediciones directas de la resistividad verdadera ( $R_f$ ) de la formación.

#### SONDA LATERAL.

Cuando se tiene un arreglo tal que sean tres electrodos - los que se bajen al pozo, mientras que un cuarto electrodo es conservado en la superficie, se trata de un arreglo de tres electrodos o un arreglo "Lateral". Este dispositivo lateral fue diseñado para atravesar la zona de influencia del agujero y la zona de invasión e investigar la resistividad de la roca sin alteraciones. En la figura del circuito, dos electrodos M y N están relativamente cerca con respecto del electrodo A. La distancia desde A hasta O, punto medio de M y N, es considerado el espaciamento y al referirse a él se hará como AO.

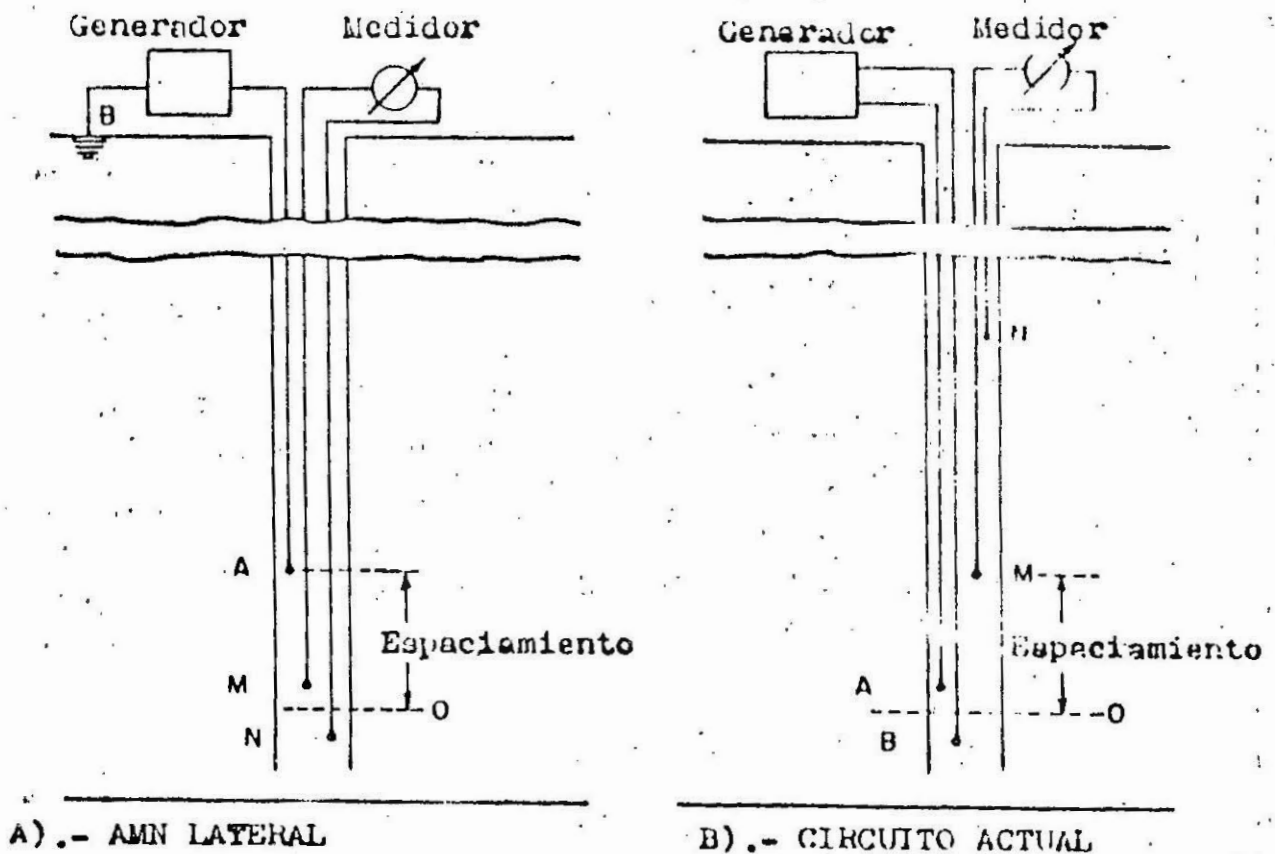


Figura 7

Aún cuando los efectos del agujero y de la zona invadida son despreciables en un espaciamiento  $\Delta O$  suficientemente grande, las lecturas tomadas de este registro son consideradas como de una resistividad aparente ( $R_a$ ) de la formación, por lo que se ha de necesario aplicarle ciertas correcciones para convertirlas en resistividades verdaderas de la formación.

En la práctica el espaciamiento de la lateral es generalmente de 5.70 m. lo cual da un considerable radio de investigación, aunque también causa una pérdida de detalle en capas delgadas así como distorsión en determinados casos. Aún con estos inconvenientes, su uso en ocasiones es muy ventajosa.



Tipo de sonda	espaciamiento	radio de investigación
Normal corta	0.25 a 0.50 m	0.50 a 1.00 m.
Normal larga	0.50 a 2.00 m	1.00 a 2.00 m.
Lateral	4.00 a 10.00 m	4.00 a 10.00 m.

#### Características de investigación de distintos tipos de sondas

El concepto básico para la interpretación de las propiedades eléctricas de las rocas como auxiliar en el análisis de los -- fluidos contenidos en ellas, es el conocimiento que se tiene -- de que las rocas sedimentarias en general, tienen un cierto -- rango de porosidad ya sea de origen primario ó secundario y de que esos espacios intergranulares ó fracturas están ocupados -- generalmente por agua.

Una roca que tiene una porción de su volúmen ocupado por -- agua, su resistividad depende en forma notable del tipo de agua contenida, pudiendo hacerse una diferenciación inicial entre -- una roca porosa que contiene agua salada y una roca semejante -- que contenga agua dulce, porque en el primer caso, o sea la roca con agua salada, como ésta es buena conductora de la electricidad, la resistencia ofrecida al paso de una corriente enviada a través de ese material será mínima, por lo que la resistividad medida en tales condiciones será baja; cosa distinta ocurre cuando ese mismo material poroso está ocupado por agua dulce, -- puesto que no es buen conductor eléctrico, dá por resultado que aparezcan valores más altos de resistividad al efectuarse su medición.

Esta característica general, que establece una diferenciación inicial entre los acuíferos de agua dulce y salada, por -- medio de sus resistividades, se combina con la medición del potencial espontáneo, que es la gráfica generada por los fenómenos electroquímicos de soluciones de distinta concentración, -- producidos en el pozo al entrar en contacto el filtrado del -- lodo de perforación, con el agua intersticial de las rocas. Efecto del filtrado del lodo en rocas permeables.-- El lodo de perforación está constituido en términos generales por partículas coloidales y agua, siendo introducido durante la operación de perforación con una determinada presión por el interior de -- la tubería, sale por los orificios de la barrena en el fondo -- del pozo y regresa a la superficie por el espacio existente --

entre el exterior de la tubería y las paredes del pozo.

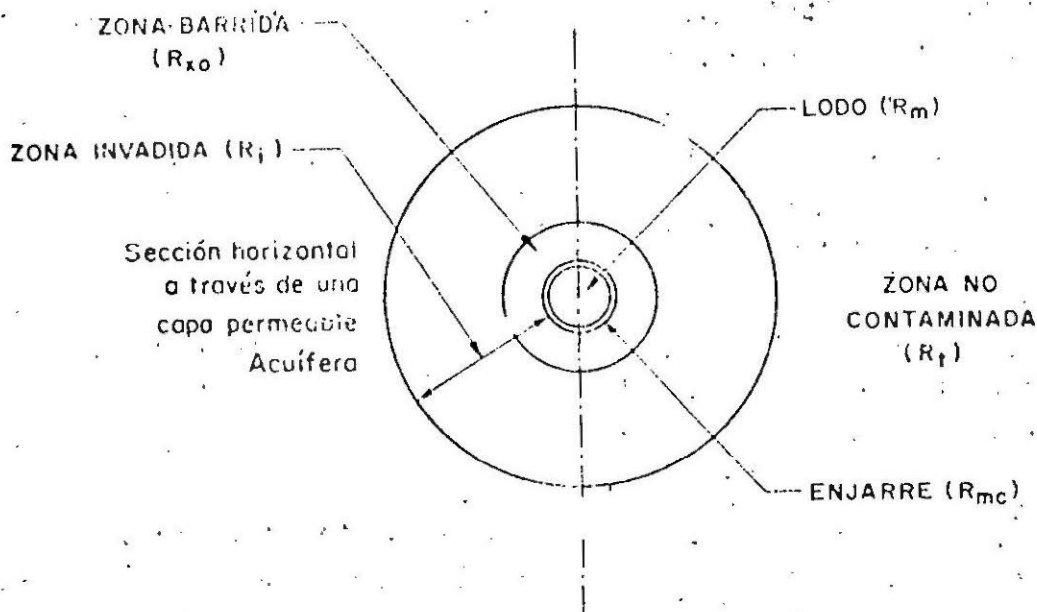
En los intervalos permeables atravesados, la presión del lodo hace que se forme una película con las partículas en suspensión y penetre en la roca agua constituyente del lodo, que recibe el nombre de filtrado del lodo. El agua ó filtrado del lodo que penetra en la formación permeable, puede ser de distinta composición en cuanto a salinidad, que la existente en la roca, alterando por lo tanto la resistividad de la roca en esa zona en que ha penetrado el filtrado del lodo.

Debido a éste fenómeno, se pueden distinguir a partir de la pared del pozo y en sentido horizontal, en la mayoría de las rocas permeables, las siguientes zonas:

a). - Zona "lavada", que es la inmediata a la pared del pozo, y es donde probablemente haya habido un desplazamiento casi total del agua intersticial de la roca por la del filtrado del lodo.

b). - Zona "invadida" ó de transición, es la zona inmediata a la zona lavada y que ha recibido parcialmente agua del filtrado del lodo.

c). - Zona "no contaminada" que es la zona a donde no ha llegado el filtrado del lodo, conservándose intacta en cuanto a los fluidos originales de la roca.



La penetración del filtrado del lodo a la formación es variable, pues depende de varios factores que están un poco fuera de control, sin embargo, puede decirse que en lo relativo a la roca, mientras menor sea su porosidad, mayor es de ser la penetración del filtrado del lodo.

Para conocer con cierta confiabilidad a partir de la resistividad de la roca, si ésta contiene agua dulce ó agua salada, es indispensable tener la certeza de que las lecturas de resistividad han sido hechas en la zona no contaminada. Esta es la razón fundamental por la cual existen varias posibilidades de arreglos en las sondas, como son normal corta ó larga y lateral, ya que con una sola de ellas, aunque en muchos casos es suficiente, existe la posibilidad de que esté afectada su lectura por fenómenos de invasión del filtrado del lodo.

Clasificación de formaciones.- Para el propósito de interpretación de registros en pozos de agua, se ha encontrado conveniente clasificar las formaciones entre los siguientes grupos:

1.- Acuíferos granulares limpios. Comprende gravas, arenas, areniscas y rocas carbonatadas que tengan porosidad granular. el aluvión podría agregarse a éste grupo, si sus partículas no están compuestos de minerales arcillosos.

2.- Acuíferos granulares arcillosos.- Este grupo incluye cualquier acuífero granular que en parte esté compuesto de granos formados por minerales arcillosos ó contengan material arcilloso dentro de sus espacios porosos.

3.- Acuíferos fracturados. Representado por rocas fracturadas ó con juntas teniendo escasa ó ninguna porosidad de tipo granular.

4.- Acuíferos complejos, en los que la porosidad es un tipo diferente de los especificados anteriormente, por ejemplo, carbonatos que tienen porosidad granular y por fracturamiento, lava y rocas cavernosas.

5.- Formaciones densas, ó sea, rocas que tienen una porosidad efectiva tan baja, que normalmente no se podría obtener agua de ellas. Aparte de algunas rocas carbonatadas, se incluyen anhidrita, yeso, sal, así como muchas clases de rocas ígneas y metamórficas.

6.- Arcillas. En éste grupo se incluyen todas las formaciones que consisten de partículas muy finas, que reciben el nombre genérico de arcillas ó lutitas. Por tener todas ellas propiedades semejantes en cuanto al registro eléctrico y rayos gamma se refiere, por razones de simplicidad son llamadas arcillas.

Por conveniencia, especialmente en el análisis del registro de rayos gamma, cualquier formación de los grupos 1 a 5 es llamada "roca".

Si se considera como un acuífero limpio, el constituido por una estructura rocosa no conductiva y agua intersticial, su resistividad queda determinada por:

- a).- La resistividad ó salinidad del agua.
- b).- La cantidad de agua que contiene ó sea la porosidad de la roca.
- c).- La distribución y continuidad del agua contenida en los espacios porosos.

De acuerdo con lo anterior, se ha encontrado que la resistividad  $R_t$ , de un acuífero limpio puede expresarse así:

$$R_t = F \times R_w \quad (1)$$

en donde:

$R_w$  = resistividad del agua.

$F$  = es una constante que representa el efecto de la porosidad.

La constante  $F$ , es denominada factor de resistividad de la formación ó simplemente factor de formación y está dada por la siguiente fórmula:

$$F = A/\phi^m \quad (2)$$

en donde:

$\phi$  = porosidad efectiva.

$A$  = constante que se determina empíricamente.

$m$  = factor de cementación.

La resistividad del agua  $R_w$ , decrece cuando la salinidad se incrementa. A una temperatura dada, la resistividad del agua está en relación con el contenido de sólidos disueltos, en partes por millón (ppm), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R_w = k/\text{ppm} \quad (3)$$

en donde  $k$  es un factor que es aproximadamente constante para una sal, cuando la concentración es baja (menos de 3000 ppm de sólidos disueltos). Para aguas de baja salinidad,  $k=6500$  a  $25^\circ\text{C}$ .

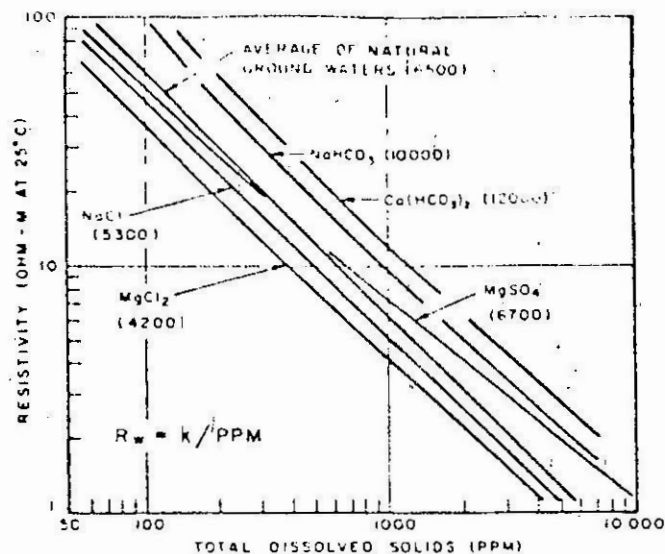


Fig. 1 - Solution resistivity vs. total dissolved solids at 25° C. Figures in parenthesis are k values. (After Agriculture Handbook 60, USDA).

Para rocas granulares limpias, que tienen una porosidad mayor del 10 por ciento, A y m tienen los siguientes valores:  
rocas poco cementadas ó no cementadas:

$$F = \frac{0.62}{\phi^{2.15}}$$

- rocas que están más cementadas:

$$F = \frac{1}{\phi^2}$$

La siguiente figura ilustra la relación entre el factor de formación y la porosidad, utilizando los valores anteriores.

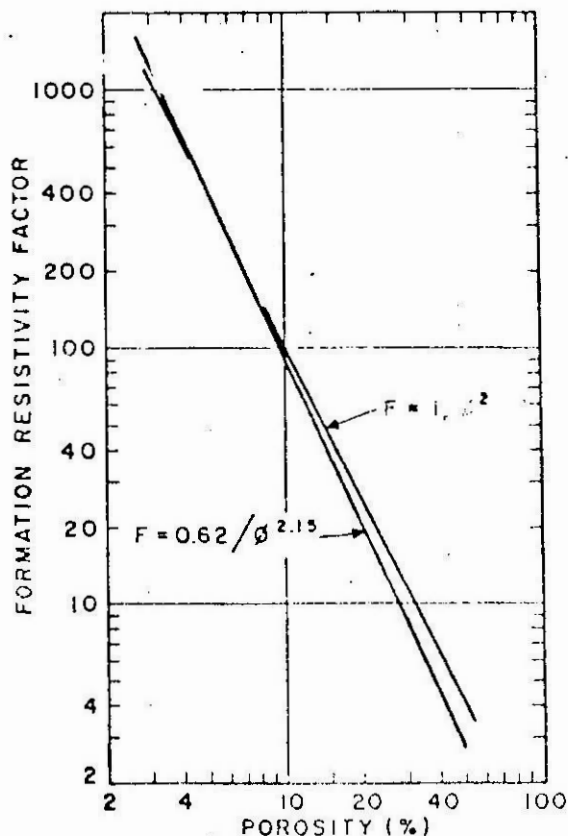


Fig. 2 - Approximate formation resistivity factor vs. porosity for granular aquifers.

Combinando las fórmulas (1), (2) y (3), así como el factor de formación de acuíferos granulares limpios, poco cementados, se obtiene:

$$R_t = \frac{0.62 k}{\phi^{2.15} \text{ ppm}} \quad (4)$$

La figura 3 es una carta basada en ésta fórmula, usando para k el valor de 6500. Esto proporciona la resistividad de acuíferos granulares limpios, como una función de sus porosidades, expresados en por ciento del volumen total, utilizando unos cuantos valores de salinidad de aguas. Este nomograma es solamente aproximado cuando se aplica a acuíferos particulares puesto que A, m y k, tienen asignados valores promedio; sin embargo, es confiable en forma estadística y aceptable cuando no existen nomogramas más exactos, especialmente cuando la porosidad es alta.

La geometría y continuidad de los espacios porosos, en materiales de baja porosidad granular, es bastante irregular y no es posible asignar a los parámetros A y m, promedios ó valores aproximados que pudieran ser aplicables a una roca dada. A pesar de lo anterior, la fórmula (4) ó la figura 3, pueden ser usadas para obtener datos semi-cuantitativos.

Se puede observar en la figura 3 que los otros factores permanecen constantes:

1.- Para las mayores porosidades, corresponden a las menores resistividades del acuífero.

2.- Para las más bajas salinidades del agua, corresponden las más altas resistividades del acuífero.

La porción superior derecha de la figura 3 corresponde a los acuíferos de agua dulce, comúnmente sus resistividades son del orden de 50 a 1000 ohm-m. Los acuíferos de agua salobre y salada, de buena porosidad, tienen resistividades que son menores que los 50 ohm-m.

Los acuíferos no granulares, tienen una porosidad tan variable e irregularmente distribuida, que podría ser ilusorio buscar una expresión ó establecer una gráfica que relacionase la resistividad con la porosidad. Todo lo que puede decirse con certeza es que la resistividad decrece cuando la porosidad ó salinidad del agua se incrementan, si los otros factores permanecen constantes.

Las arenas que no tienen porosidad efectiva, tienen resistividades extremadamente altas, generalmente del orden de 100,000 ohm-m.

En cuanto a resistividad se refiere, las arcillas pueden ser consideradas como un material granular, cuyos espacios porosos tienen una geometría particular. Por lo anterior, la fórmula (2) es aplicable, pero los parámetros A y m tienen valores que probablemente sean algo diferentes de aquellos previamente especificados.

Las arcillas tienen una alta porosidad y generalmente contienen agua salobre, dos factores que hacen que sus resistividades sean bajas: comúnmente en el rango de 2 a 10 ohm-m, esto es, que tienen más bajas resistividades que la de los acuíferos de agua dulce, con los que están asociadas. Este rango se muestra en la porción inferior derecha de la figura 3.

Acuíferos granulares arcillosos.- La arcilla diseminada -- dentro de los espacios porosos, reduce la resistividad de los acuíferos de agua dulce. La figura 4 proporciona la resistividad reducida para un acuífero granular, como una función de su contenido arcilloso.

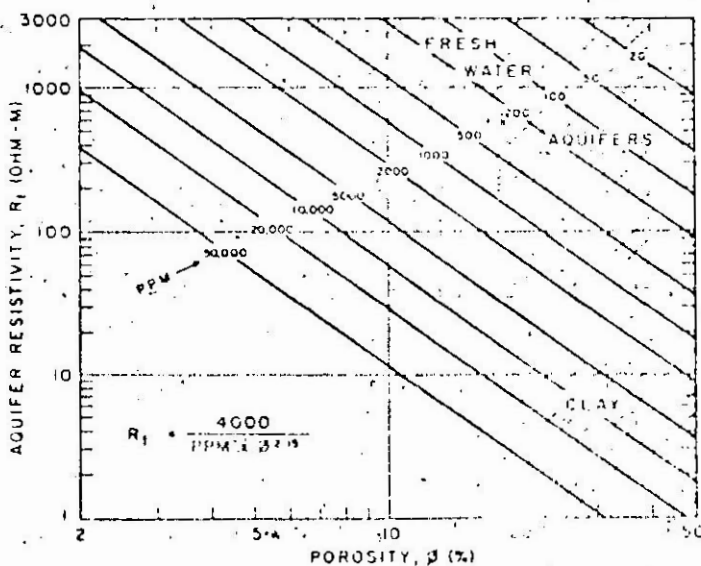


Fig. 3 - Approximate resistivity of granular aquifers vs. porosity for several water salinities.

La curva ó curvas de resistividad, se toman simultáneamente con la del potencial espontáneo y su conjunto es, como se mencionó anteriormente, el registro eléctrico.

La ventaja de disponer de dos ó más curvas de resistividad en un registro eléctrico, es la posibilidad de establecer con mayor confiabilidad, aún en el análisis cualitativo, si las lecturas de resistividad de la roca están efectuándose sin la influencia de agua filtrante durante la operación del pozo.

Como una guía general para el análisis cualitativo del registro eléctrico, se puede considerar la siguiente figura que representa un registro con dos curvas de resistividad con diferente espaciamiento y el potencial natural; el lodo de perforación es de agua dulce.

Las formaciones  $A_1$ ,  $A_2$ , ..., son de lutita considerando:

- a).- La uniformidad en la curva de potencial.
- b).- La resistividad es baja y muy semejante en valor en -- las dos curvas.

La formación B es una arenisca con interclación de lutitas -- por las siguientes razones:

- a).- El potencial manifiesta amplitud negativa.
- b).- La resistividad mostrada en ambas curvas, tiene un valor ligeramente mayor que el de las lutitas, indicando que están presentes arena y lutitas.

La formación  $C_1$  es una arena con agua dulce por:

- a).- La curva del potencial natural es positiva.
- b).- Ambas curvas de resistividad muestran valores altos.

La formación  $C_2$  es una arena petrolífera debido a:

- a).- La curva de potencial espontáneo es negativa en forma -- amplia.
- b).- La resistividad con el espaciamiento corto, es mayor -- que la del otro espaciamiento por la influencia del filtrado del lodo.
- c).- La resistividad con el espaciamiento largo, también tiene valor alto, atribuible a la presencia de petróleo.

La formación  $C_3$ , es una arena con agua salada por:

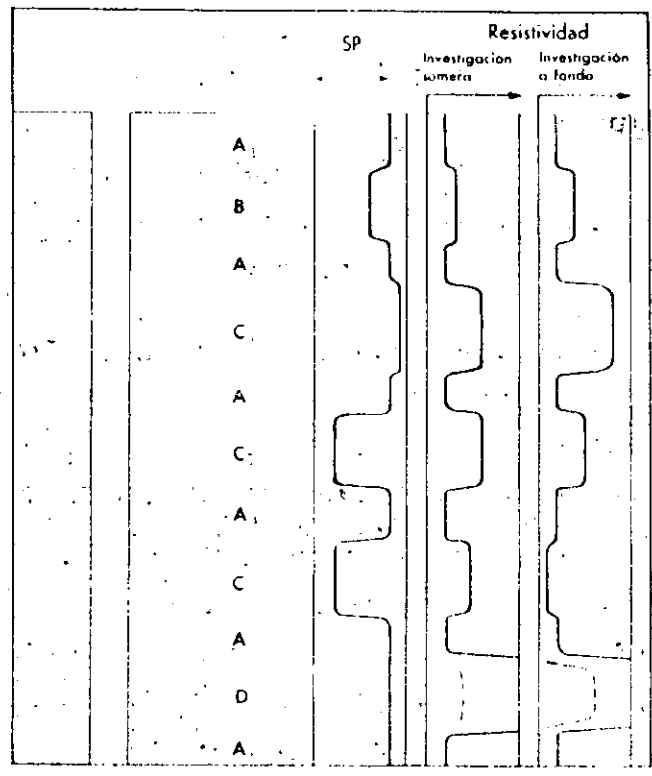
- a).- El potencial muestra deflexión negativa amplia.
- b).- La resistividad del espaciamiento corto, es alta, debido al desplazamiento del agua salada por agua dulce del filtrado del lodo.
- c).- La resistividad del espaciamiento largo es muy baja, -- por estar midiendo atrás de la zona lavada en donde la roca tiene agua salada que es conductiva.



La formación D es de una caliza dura por:

- a).- SP no tiene desplazamiento, indicando impermeabilidad en la roca.
- b).- Ambas resistividades son muy altas.

Estas reglas básicas para la interpretación de registros -- eléctricos, se complementan con la información geológica del -- área, así como de la obtenida durante la perforación del pozo. Es conveniente cuando el caso lo amerite, disponer de informa- ción que proporcionan otro tipo de registros como el microregis- tro, sísmico, radioactivo, etc.



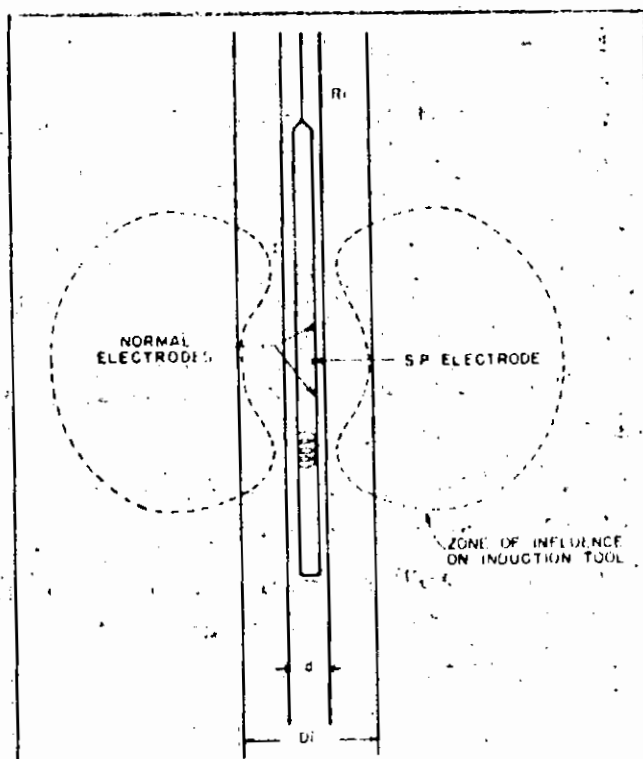
**PRESENTACION ESQUEMATICA** de las curvas típicas de las necesarias para establecer las reglas básicas de interpreta- ción • 5

## REGISTRO DE INDUCCIÓN

Actualmente se encuentra generalizado el uso del registro de inducción para determinar de manera más confiable el tipo de fluidos contenidos en las rocas, sin influencia del filtrado del lodo que penetra en éstas durante la perforación del pozo.

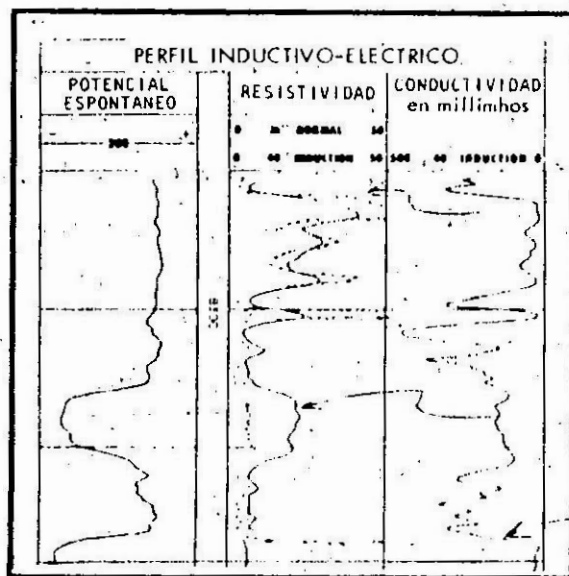
El registro de inducción mide la conductividad de las formaciones, mediante corrientes alternas inducidas. La resistividad en las rocas es determinada con el cálculo de la recíproca de la conductividad que se mide con el registro de inducción, apareciendo en la gráfica tanto los valores de resistividad calculados como los de conductividad.

Las sondas de inducción tienen un grupo ó sistema de varias bobinas transmisoras y receptoras. En forma esquemática se puede ver en la figura siguiente una bobina transmisora que envía corriente alterna de alta frecuencia y de intensidad constante, generando un campo magnético que induce corrientes secundarias en la formación. Estas corrientes crean a su vez campos magnéticos que inducen señales en la bobina receptora. Las señales recibidas son proporcionales a la conductividad de la formación.



El registro de inducción proporciona valores que requieren poca ó ninguna corrección por diámetro de agujero, resistividad del lodo, invasión del filtrado ó espesor de las capas. Tiene además la ventaja en la perforación de pozos de agua de no requerir para su funcionamiento, que exista algún líquido dentro del pozo, por lo que es el más conveniente en aquellos pozos que se perforan con pulseta.

La combinación del registro de inducción es al igual que el registro eléctrico convencional, pudiendo ser juntamente con una curva de potencial natural ó con una de rayos gamma para definir los estratos ó cuerpos litológicos que se atraviesan.



Resistividad recíproca de la conductividad.

Resistividad de una curva normal.

Curva de conductividad.

**REGISTRO DE RAYOS GAMMA.**— El registro de rayos gamma es una medida de la radioactividad natural de las formaciones. En las rocas sedimentarias refleja el contenido ó la presencia de lutita, esto es debido a que los elementos radioactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas.

Las formaciones limpias (sin contenido de arcilla), tienen generalmente un nivel bajo de radioactividad, a menos que estén contaminadas con cenizas volcánicas, cantos rodados graníticos que sean radioactivos ó bien si sus aguas intersticiales tienen sales de potasio disueltas.

El registro de rayos gamma puede ser tomado en pozos que ya han sido ademados, lo cual lo ha útil en operaciones de reacondicionamiento.

La particularidad del registro de rayos gamma de identificar por su contenido radioactivo a las arcillas, diferenciándolas -- de otras rocas, lo hace convenientemente sustituible del potencial espontáneo cuando éste no es satisfactorio.

Los rayos gamma son erupciones de ondas electromagnéticas de alta energía que son emitidas espontáneamente por algunos elementos radioactivos. Casi toda la radiación gamma en la tierra es emitida por el isótopo radioactivo del potasio de peso atómico 40 y por elementos radioactivos de la serie uranio y torio.

La emisión de los rayos gamma, por la desintegración de los elementos radioactivos, se hace juntamente con los rayos alfa y beta; pero éstos tienen un poder de penetración bajo a través de la materia por lo que no pueden ser medidos en un pozo.

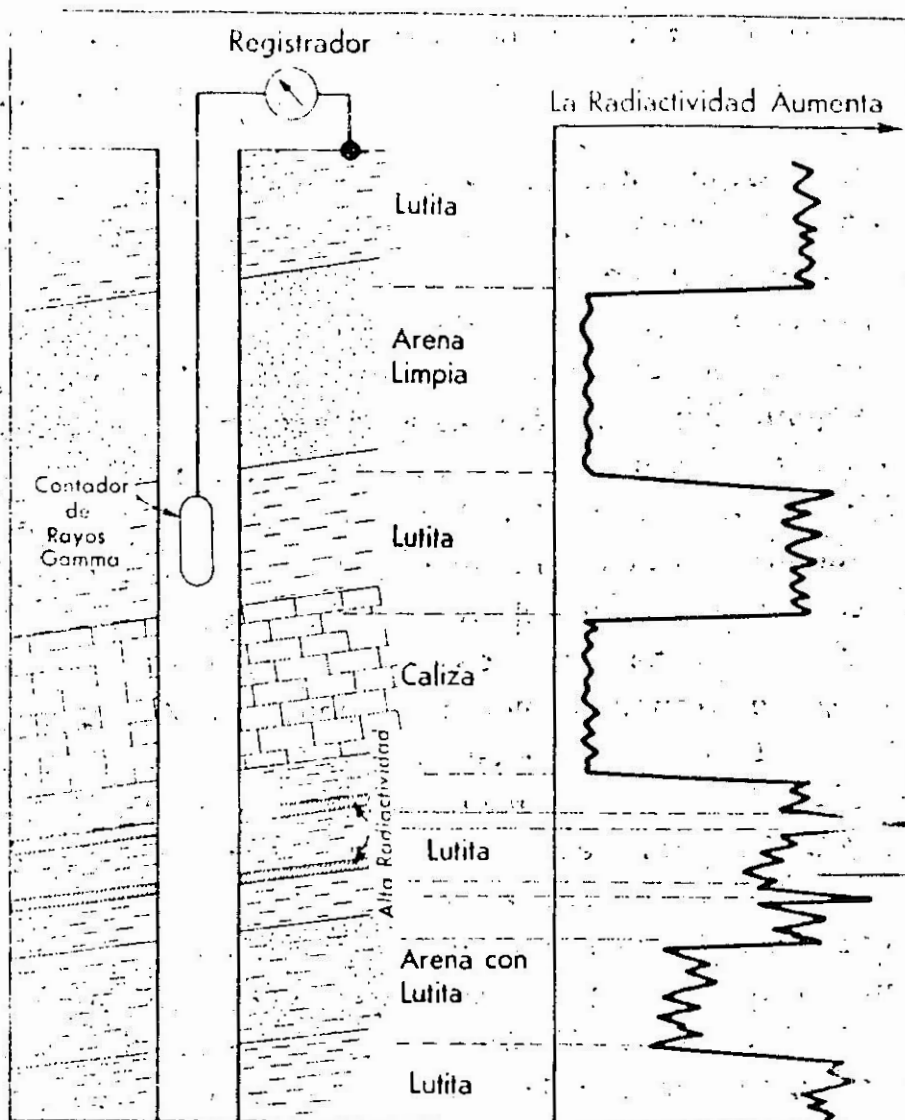
La energía de los rayos gamma emitida por las rocas sedimentarias, es variable; pero en promedio es de 1 Mev, aunque la emitida por el potasio tiene una energía de 1.5 Mev.

Los rayos gamma, que son ondas electromagnéticas como la luz y el calor, no paran su penetración en forma repentina, sino que declina gradualmente con la distancia. En general se puede decir que la distancia investigada por el registro de rayos gamma es de aproximadamente 30 centímetros en acuíferos de arena y caliza.

Reacción de los rayos gamma.-- Los rayos gamma no pueden ser detectados directamente, solamente a través de su interacción con la materia por medio del proceso de ionización; esto es liberando uno ó más electrones de átomos neutros. Debido a que tanto los iones y electrones están eléctricamente cargados, el proceso puede ser detectado.

Hay tres distintos tipos de detectores que han sido usados -- para el registro de la radioactividad natural: La cámara de ionización, el contador Geiger-Mueller y el de centelleo.

Una tonelada métrica de una lutita promedio, contiene aproximadamente unos 6 gramos de uranio, 12 de torio y 20 kg de potasio aunque el potasio es cerca de 1/10,000 menos radioactivo. La contribución respectiva del potasio, uranio y torio, es de importancia comparable.



En la figura aparece en forma generalizada la respuesta de una sonda con registrador de rayos gamma en distintas formaciones. La radioactividad natural de las rocas se grafica de menor a mayor cantidad a partir de la izquierda de la pista, dando un aspecto muy semejante a la gráfica del potencial natural para facilitar en caso necesario, su comparación ó correlación.

La radioactividad total según la registra el detector, se puede expresar en términos del peso de un elemento (radio por ejemplo) que produzca una cantidad de radiación equivalente. Por lo tanto la intensidad de las rocas se puede calibrar en microgramos de radio equivalentes por tonelada métrica de esa formación. También se puede medir en unidades rayos gamma API. Las unidades API indican la radioactividad de una roca artificial que sirve de norma, en la que se han diseminado cantidades conocidas de uranio, torio y potasio. Todos los registros actuales están calibrados en unidades API.

La sonda de rayos gamma contiene un detector para medir la radiación originada en el volumen de formación cercano a la sonda. Se ha generalizado el uso de cintilómetros para la medición de la radioactividad en pozos. Son más eficientes que los contadores Geiger-Mueller que se usaban antes.

Los rayos gamma pueden ser registrados simultáneamente con otro tipo de curvas.

En la actualidad ningún equipo comercial permite la diferenciación de rayos gamma del potasio y de la serie de uranio y torio. Un equipo tal tendría que ser sensible a variaciones en el nivel de energía de los rayos gamma.

Variaciones estadísticas. Dada la naturaleza estadística de la radiación, el número de rayos gamma que llegan al contador fluctúa incluso cuando la sonda está inmóvil en el pozo. Las variaciones son más grandes para un número bajo de cuentas ó pulsos. Sin embargo el número de rayos gamma contados por segundo sobre un período de tiempo suficientemente largo será prácticamente constante. El período de tiempo necesario para obtener un buen promedio de cuentas, usualmente es de varios segundos.

Se utilizan circuitos amortiguadores de variaciones estadísticas a base de aconplamiento capacitor-resistor en los circuitos de medida, pudiendo seleccionarse distintas "constantes de tiempo" de acuerdo con el nivel de radioactividad medido.

El circuito amortiguador de variaciones estadísticas introduce un retraso en el registro de la señal y para evitar una excesiva distorsión en la curva, se elige una velocidad de registro tal que el contador no se desplace más de un pie durante una constante de tiempo. Así por ejemplo para una constante de tiempo de 2 segundos, la velocidad de registro es de 1800 pies/hora (550 metros/hora.)

## Aplicaciones del registro de rayos gamma.

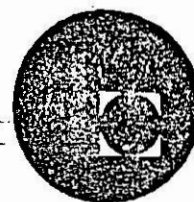
- 1.- El registro de rayos gamma es particularmente útil para la definición de estratos de lutita, cuando la curva del SP está redondeada (en formaciones muy resistivas) ó cuando no tiene expresión por ser la resistividad del filtrado del lodo muy semejante a la del agua intersticial.
- 2.- Puede ser usado para efectuar correlaciones.
- 3.- Algunas veces el registro de rayos gamma es usado en relación con operaciones en que se usan trazadores radioactivos.

## Bibliografía:

- N.D. Bryan  
Application of Electric Logging to Water Well Problems.  
Water Well Journal, Vol. 4, No. 1, January-February, 1950.
- Carl Gatlin  
Petroleum Engineering: Drilling and Well Completions;  
Prentice-Hall, Inc. 1960.
- Hubert Guyod:  
"Interpretation of electric and gamma-ray logs in water wells."  
The Well Log Analysts - January-March 1966.
- H.A. Puzin.  
¿Qué es Perfilaje de Pozos?  
Artículos publicados de junio a diciembre de 1962. Petróleo Interamericano.
- J.T. Hamilton and J.I. Myung.  
Summary of Geophysical Well Logging. Birdwell Division.  
Schlumberger Limited  
Fundamentos de la interpretación de perfiles. julio de 1970.



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

TEMA II: TECNICAS DE PERFORACION  
CIRCULACION INVERSA

ING. HECTOR SILVA GUTIERREZ

MARZO, 1978.





A diferencia del sistema rotatorio convencional de circulación directa, el método de circulación inversa consiste en invertir el sentido de circulación del fluido de perforación, de manera que el extremo de succión de la bomba de lodos se conecta a la cabeza giratoria (Swivel), en vez del extremo de descarga, de esta forma, el fluido es desplazado hacia arriba por dentro de la tubería de perforación, con todos los fragmentos y cortes, producto de la perforación del pozo y es descargado por la bomba a la fosa de sedimentación.

El fluido retorna al agujero por flujo gravitacional, desde la fosa de abastecimiento y se desplaza hacia abajo, a través del espacio anular formado por la tubería de perforación y las paredes del pozo, hasta llegar al fondo, donde recoge los recortes de la barrena y vuelve a entrar a la tubería.

El diseño del equipo de perforación de circulación inversa, obedece al mismo principio del de circulación directa, siéndole sus principales diferencias las siguientes: Figúras No. 2 y 3

Bomba.- Se emplea una bomba centrífuga de un solo paso que ofrece grandes espacios al paso del fluido y los cortes de perforación en ocasiones hasta de 12.70 cm. (5") de diámetro aparente. Es usual una bomba de 15.24 cm. (6") de aspiración por 15.24 cm. (6") de descarga con capacidad de bombeo de 65 l.p.s. Para iniciar la circulación del fluido, el equipo de perforación cuenta con una bomba reciprocante de vacío de pistones conectada a un tanque, a su vez conectado a la tubería de succión de la bomba centrífuga.

Con esta bomba centrífuga, es posible perforar hasta un máximo de 120 m. Puede también optarse por una bomba centrífuga de 20.32 cm. (8") X 20.32 cm. (8"). Figúras No. 4 y 5

Tubería de Perforación.- Los tubos de perforación que se utilizan son de 15.24 cm. (6") a 20.32 cm. (8") de diámetro nominal, siéndole las más usuales de 15.24 cm. (6").

El límite de aspiración de la bomba, hace que los tubos hayan sido diseñados de 3.05 m. (10') de longitud y su acoplamiento se hace a base de bridas atornilladas. Figura No. 4

Cabeza giratoria (Swivel) y flecha de la zarta de perforación (Kelly).-- Con el propósito de no tener que usar una manguera de gran diámetro que vaya siguiendo el movimiento de ascenso y descenso de la cabeza giratoria, se diseñó un Swivel fijo con un tubo lavador muy largo, donde se telescope el Kelly para hacer las conexiones de los tubos de perforación. Figura No. 4

Hy Flo.-- Con este nombre se conoce un sistema patentado de bombeo con aire para usarse en los equipos de perforación de circulación inversa, que substituye a la bomba centrífuga y permite que los pozos perforados con este sistema, puedan llegar a profundidades mayores de 120 m., dependiendo de la presión a que se pueda comprimir el aire, sin embargo, con los compresores que comunmente se usan en este equipo, que son de 125 psi, se puede perforar a 200 m. de profundidad.

Para usar este sistema, se requiere: Un compresor, adaptar a los tubos de perforación 2 tubos laterales de pequeño diámetro, para la inyección de aire comprimido por dentro de los tubos de perforación, desde el fondo del pozo ó desde un punto intermedio de la zarta y una cabeza giratoria que permita el paso del aire comprimido. Figuras No. 6 y 7

Para el empleo del Hy-Flo, se requiere perforar cuando menos 15 m. con la bomba centrífuga para que haya la sumergencia necesaria que permita el funcionamiento del sistema.

Aplicación del sistema de Circulación Inversa.-- Este sistema ha sido desarrollado fundamentalmente para la construcción de pozos de gran diámetro (hasta 1.50 m.), en formaciones suaves y no consolidadas (arenas, limos, arcillas, gravas, etc.) y no es más que una especialización del sistema rotatorio convencional, que le da ventajas importantes en áreas restringidas, pero limita su versatilidad.

El fluido de perforación que se maneja es fundamentalmente agua, aunque avanzada la perforación puede describirse como agua lodosa, ya que el agua retiene en suspensión únicamente partículas finas recogidas en las formaciones superficiales. En raras ocasiones se usan bentonitas ó otros aditivos para aumentar la viscosidad del fluido.

Para dar estabilidad a las paredes del agujero y prevenir socavaciones, debe mantenerse el nivel del agua dentro del pozo a ras del suelo, durante todo el tiempo que dure la perforación, con el propósito de sostener la mayor presión hidrostática sobre las paredes del pozo. La inercia que desarrolla la columna hidrostática al descender, ayuda también a mantener estables las paredes del pozo. Figuras No. 4, 6 y 7

La erosión que por el fondo de la barrena causa el sistema de circulación directa a lo largo de la perforación de pozo, en el sistema de circulación inversa, prácticamente no existe, y la erosión de las paredes no constituye un problema, ya que la velocidad del fluido en el espacio anular, es baja.

Como consecuencia de la forma de estabilización de las paredes del pozo con el sistema de circulación inversa, el suministro de agua al pozo cobra especial importancia, por lo que es necesario poder contar con un volumen de agua importante al empezar la perforación. Se recomienda que las fosas de lodos puedan almacenar un mínimo de tres veces el volumen de agua que cubre el pozo que se va a perforar, repartido en la fosa de sedimentación y la fosa de abastecimiento. Figuras No. 2 y 3

En cualquier caso, se pierde cierta cantidad de agua en las formaciones permeables al estarlas perforando; algunas partículas finas que se encuentran en suspensión en el fluido, se infiltan a través de las paredes del pozo, cerrando parcialmente los poros y por tanto reduciendo la pérdida de agua. Sin embargo, cuando se están perforando formaciones arenosas ó con grava, se necesita disponer de una cierta cantidad de agua considerable en todo momento.

Dependiendo de la permeabilidad de las formaciones que se penetren, se requerirá agregar agua en cantidades que pueden variar entre 1.0 y 30 l.p.s.

La pérdida de agua puede ser reducida agregando arcilla al fluido de perforación, pero esto debe tratarse de evitar, a menos que sea muy necesario.

La perforación de gravas gruesas y secas es la que presenta mayores problemas.

De cualquier manera, es conveniente recalcar que una pérdida súbita que provoque que el nivel de agua descienda del nivel del terreno, puede ocasionar socavaciones en el pozo.

En un proyecto de muchos pozos en una área limitada, es conveniente contar con un pozo de abastecimiento de agua, que puede muy bien ser uno de los pozos productores.

También al iniciar las perforaciones es necesario colocar un conductor de 2 a 4 m. de profundidad, para evitar erosión en la boca del pozo y pérdidas innecesarias de agua al inicio de la perforación. Sin embargo, no es necesario casi en ningún caso colocar un contrademe formal cementado.

Las barrenas que se emplean, son de gran diámetro con una entrada por el fondo del diámetro de los tubos de perforación y pueden ser del tipo "Cola de pez" ó "Drag" con dientes intercambiables de carburo tungsteno, aunque también pueden usarse barrenas construídas a base de cortadores ó rollos, cuidando que cubran toda el área de corte de la barrena y que reduzcan lo menos posible el espacio anular por donde circula el fluido. Figuras No. 5, 4 y 6

La velocidad de rotación disponible en la mesa rotaria es de 10 a 40 rpm dependiendo de la formación que se esté perforando.

Gracias a la gran velocidad a que se hace circular el fluido por dentro de la tubería de perforación (3.5 m/seg.), los cortes son arrastrados hacia la superficie inmediatamente que son removidos por la barrena, evitándose el tener que remoler el material cortado; lo cual permite muy buenos avances de perforación. Velocidades de penetración de 50 cm./min. son frecuentemente observados y promedios de rendimiento de 10 m./h. son comunes a la terminación de la perforación.

Debido a que todo el material, producto de la perforación, es desalojado por el interior de los tubos de perforación, cuando se presentan boleos mayores de 13.0 cm., se acumulan en el fondo del agujero hasta que no es posible seguir perforando, en este caso, se recomienda sacar la zarta y sacar los boleos con un cucharón tipo almeja operado con la línea de maniobras.

Cuando se perforan pozos utilizando el sistema "Hy-Flo" y se llega a una profundidad tal que sea difícil ó imposible romper la circulación con la presión de aire que es posible suministrar con el compresor de que se disponga, lo que debe de hacerse es subir a un punto intermedio de la zarta, la inyección de aire.

En pozos profundos programados, lo que se acostumbra es meter 2 ó mas manifolds de inyección a intervalos regulares de la zarta de perforación, de otra manera, es necesario sacar la zarta y meter en el fondo varios tubos de perforación ciegos antes de poner el manifold de inyección.

Para mantener estable la pared del agujero, es importante prevenir la erosión que la circulación del fluido pueda causarle, por tal razón la velocidad recomendada de descenso del agua en el espacio anular, es del orden de 0.30 m./seg.

Asumiendo que el diámetro de las bridas de acople es de unos 0.26 m. y el caudal de extracción de la bomba centrífuga es de unos 65 l.p.s., el diámetro mínimo recomendable de perforación será de unos 0.45 m.

El sistema de circulación inversa constituye el método de perforación más económico en diámetros grandes para formaciones suaves y no consolidadas.

Por otra parte, cuando las condiciones son favorables, el incremento de costo al aumentar el diámetro de perforación es muy bajo, lo que permite diseñar la terminación del pozo con un espacio anular entre los cedazos y la pared del agujero, lo suficientemente grande para colocar un buen filtro de grava. Tanto el diámetro grande del agujero como la existencia de un apropiado filtro de grava, permiten obtener caudales óptimos de los acuíferos explotados.

El procedimiento de perforación con circulación inversa previene en forma importante la contaminación de acuíferos, de manera que la limpieza y el desarrollo primario del pozo requiere un mínimo de tiempo, con la ventaja adicional que con el equipo de bombeo Hy-Flo, dicha limpieza y desarrollo primario es un trabajo fácil y efectivo.

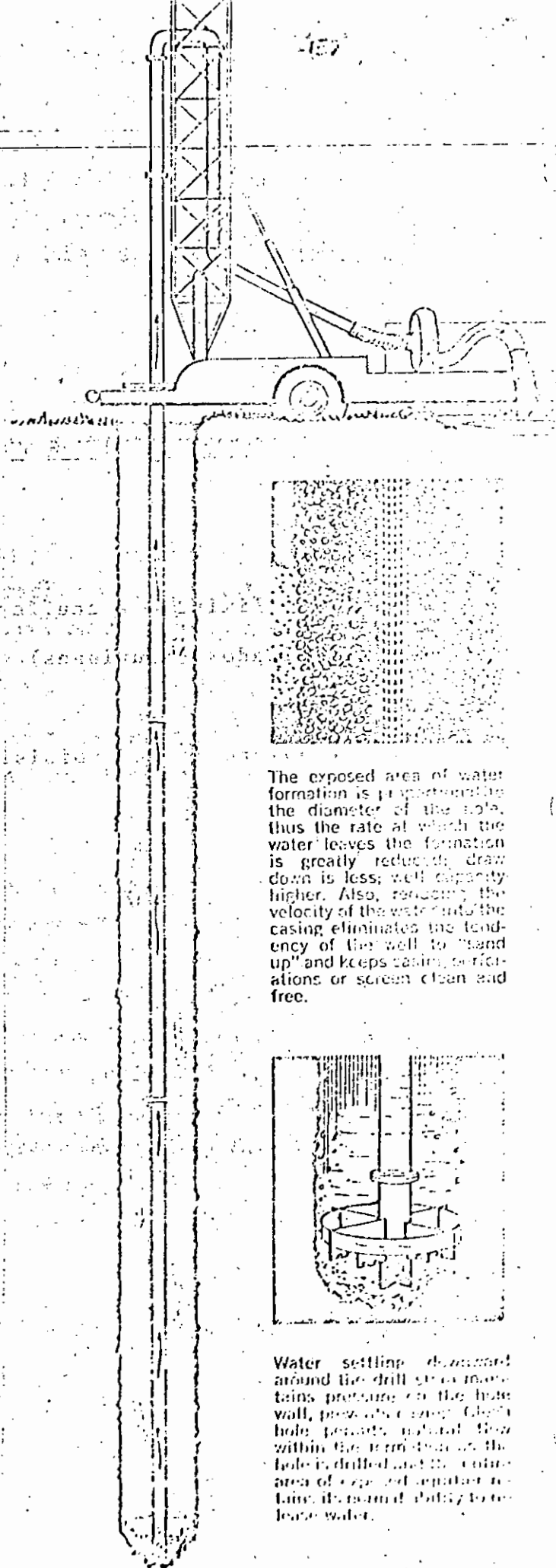
**VENTAJAS DEL SISTEMA DE CIRCULACION INVERSA:**

- 1.- Constituye un método rápido y económico de construcción de pozos de agua en materiales aluviales.**
- 2.- El fluido de perforación es agua clara, sin el uso de bentonitas y otros aditivos.**
- 3.- Se obtiene una alta eficiencia en el aprovechamiento del acuífero, al reducirse su contaminación y al poder limpiarlo y desarrollarlo eficientemente con el mismo equipo.**
- 4.- La colocación de filtros de grava grandes y bien diseñados permite prevenir arrastre de materiales finos de la formación; alargando la vida del pozo, reduciendo su mantenimiento y alargando la vida del equipo de bombeo.**

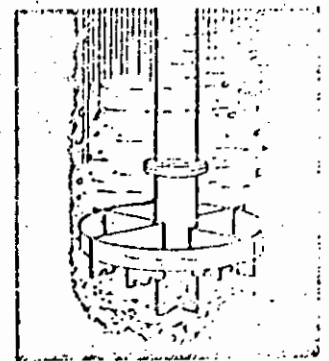
DESVENTAJAS DEL SISTEMA DE CIRCULACION INVERSA:

- 1.- Esta limitado a acuíferos de materiales suaves no consolidados (aluviones)
- 2.- Requiere de un suministro de agua en grandes volúmenes.

ESQUEMA ILUSTRATIVO DEL SISTEMA  
 DE PERFORACION CON CIRCULACION  
 INVERSA.



The exposed area of water formation is proportional to the diameter of the hole, thus the rate at which the water leaves the formation is greatly reduced; draw down is less; well capacity higher. Also, reducing the velocity of the water into the casing eliminates the tendency of the well to "stand up" and keeps casing perforations or screen clean and free.



Water settling downward around the drill bit maintains pressure on the hole wall, prevents casing. Clean hole permits normal flow within the formation as the hole is drilled and the entire area of exposed annulus retains its normal ability to receive water.



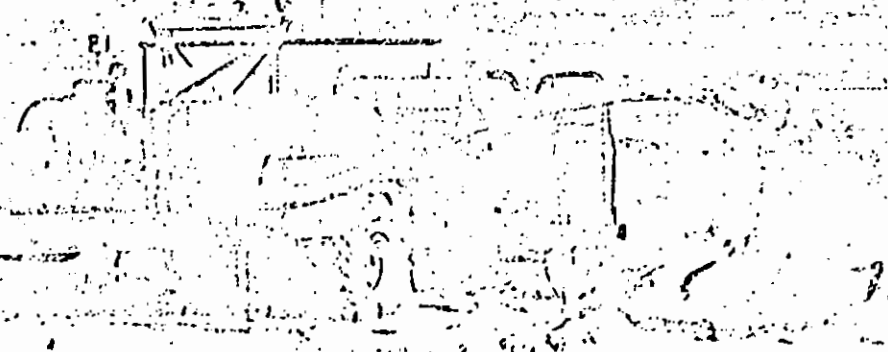
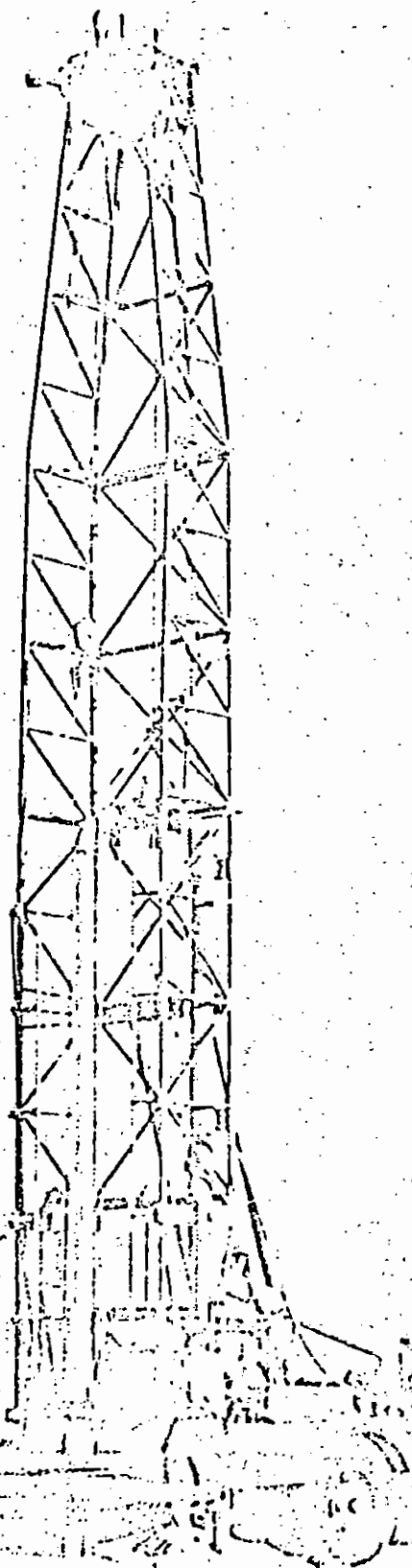


WINTER WEISS  
PORTLAND CEMENT

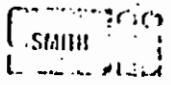
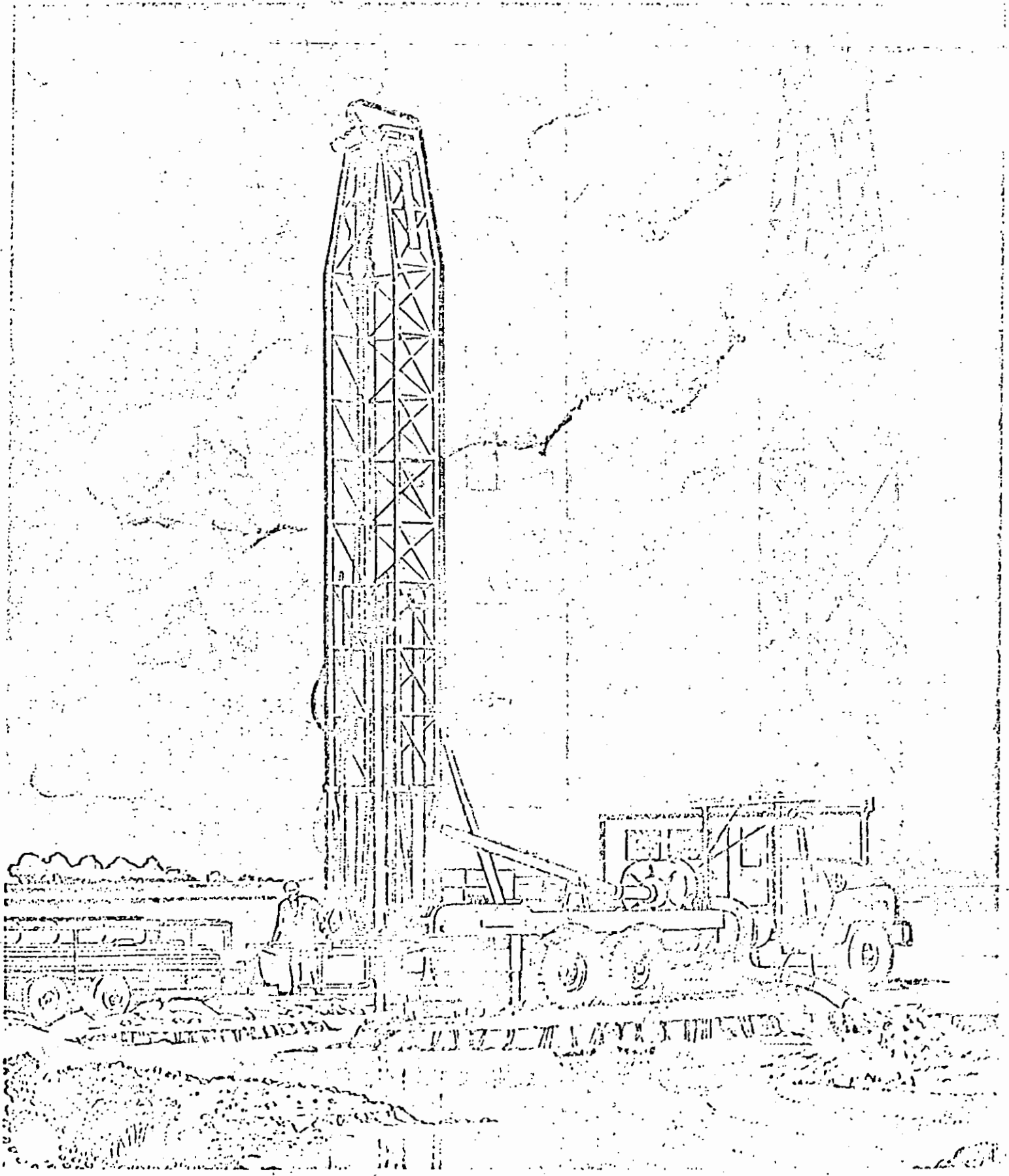
# RV-6 SERIES

MODEL RV-6

FOR WATER ENGINEERING AND DESIGN  
COVERING THE MEASUREMENT WEIRS  
TO 600 FT DEPTH

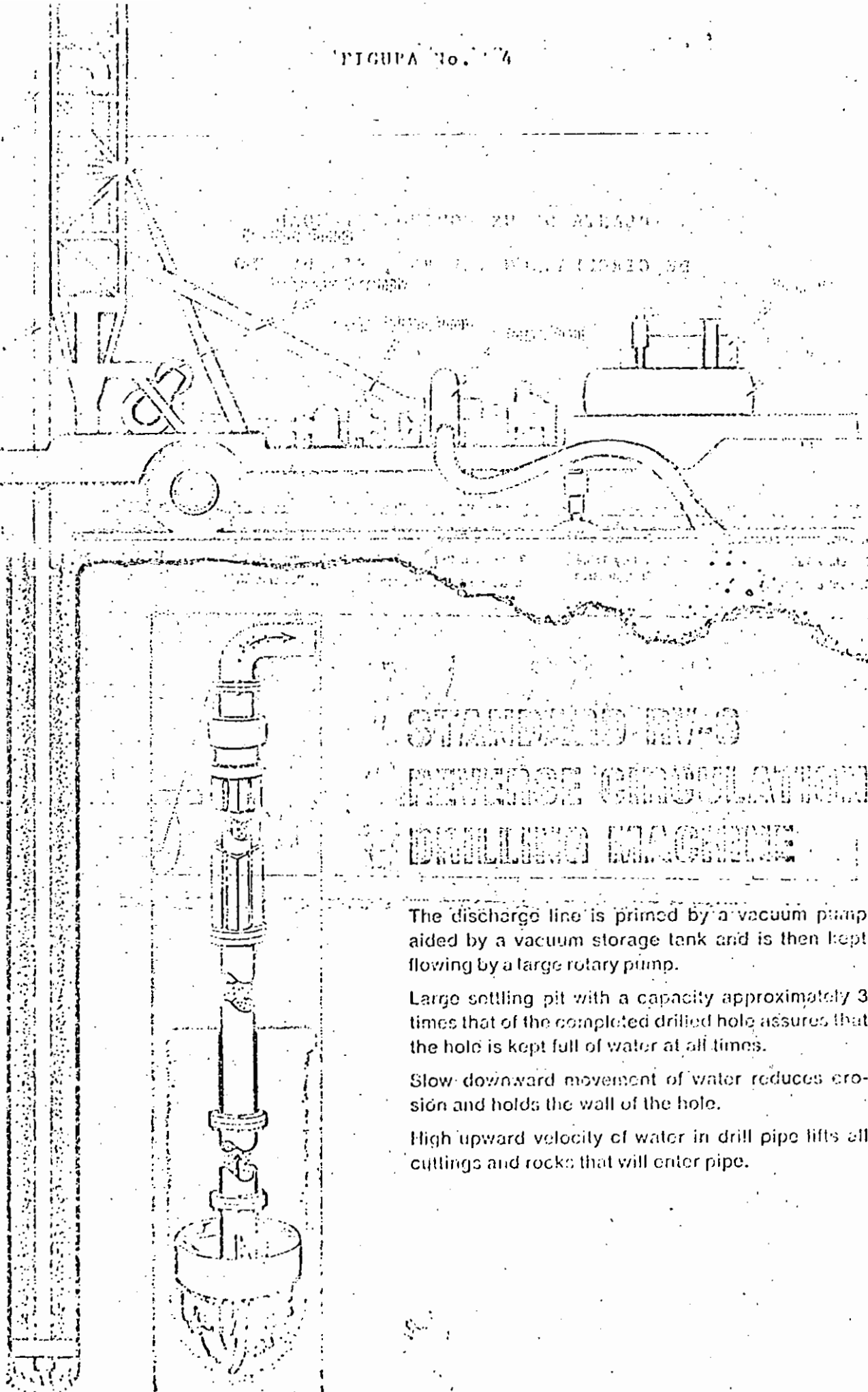


# KV Series PORTADRILL for reverse circulation drilling



## PORTADRILL

Division of Smith International, Inc.



# STANDARD RV-3 REVERSE CIRCULATION DRILLING MACHINE

The discharge line is primed by a vacuum pump aided by a vacuum storage tank and is then kept flowing by a large rotary pump.

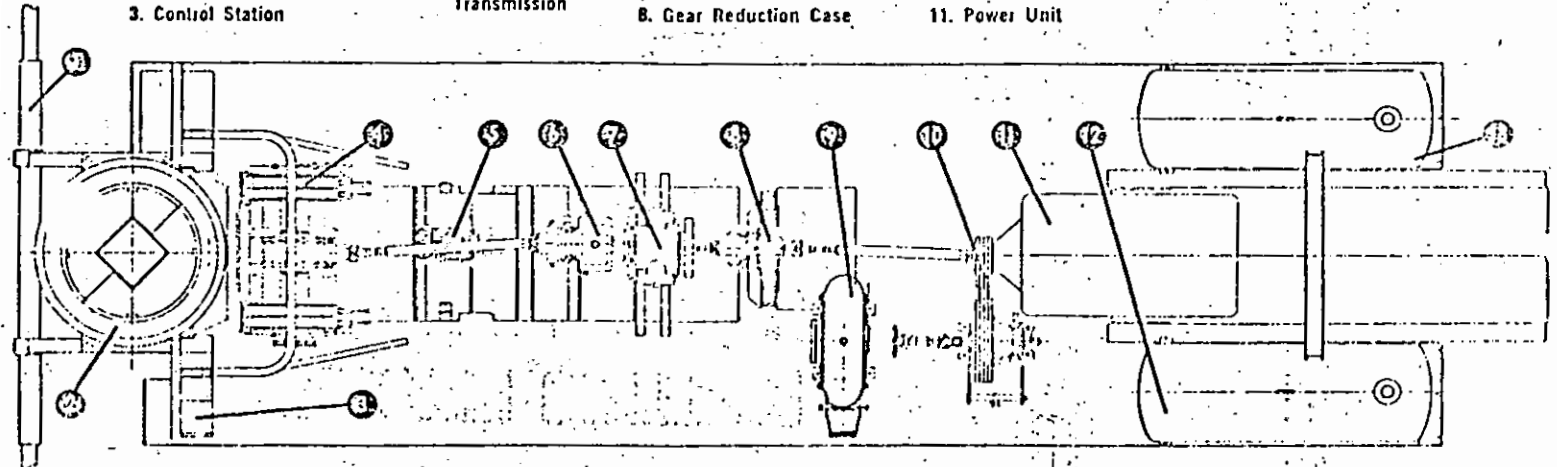
Large settling pit with a capacity approximately 3 times that of the completed drilled hole assures that the hole is kept full of water at all times.

Slow downward movement of water reduces erosion and holds the wall of the hole.

High upward velocity of water in drill pipe lifts all cuttings and rocks that will enter pipe.

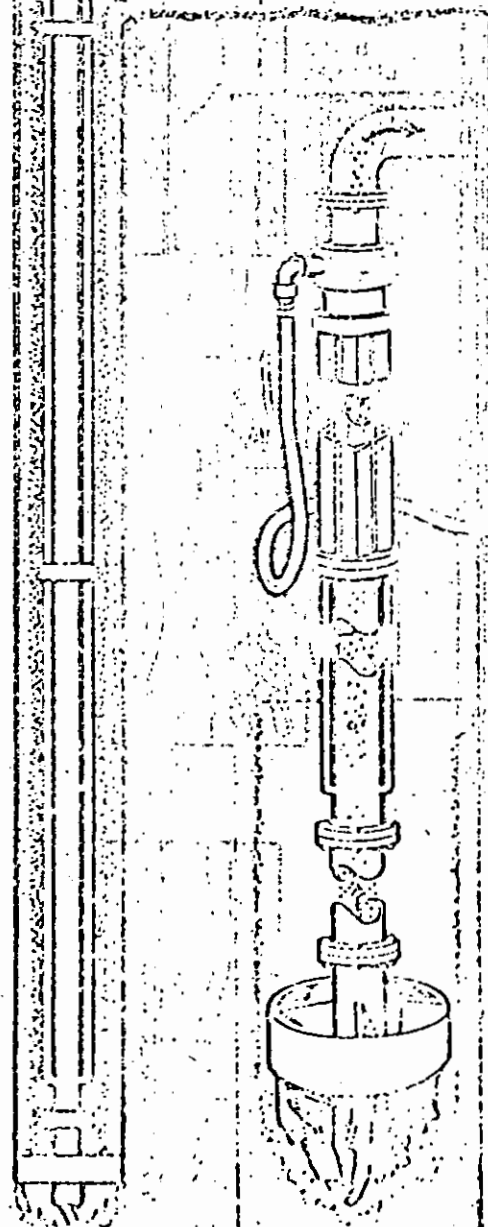
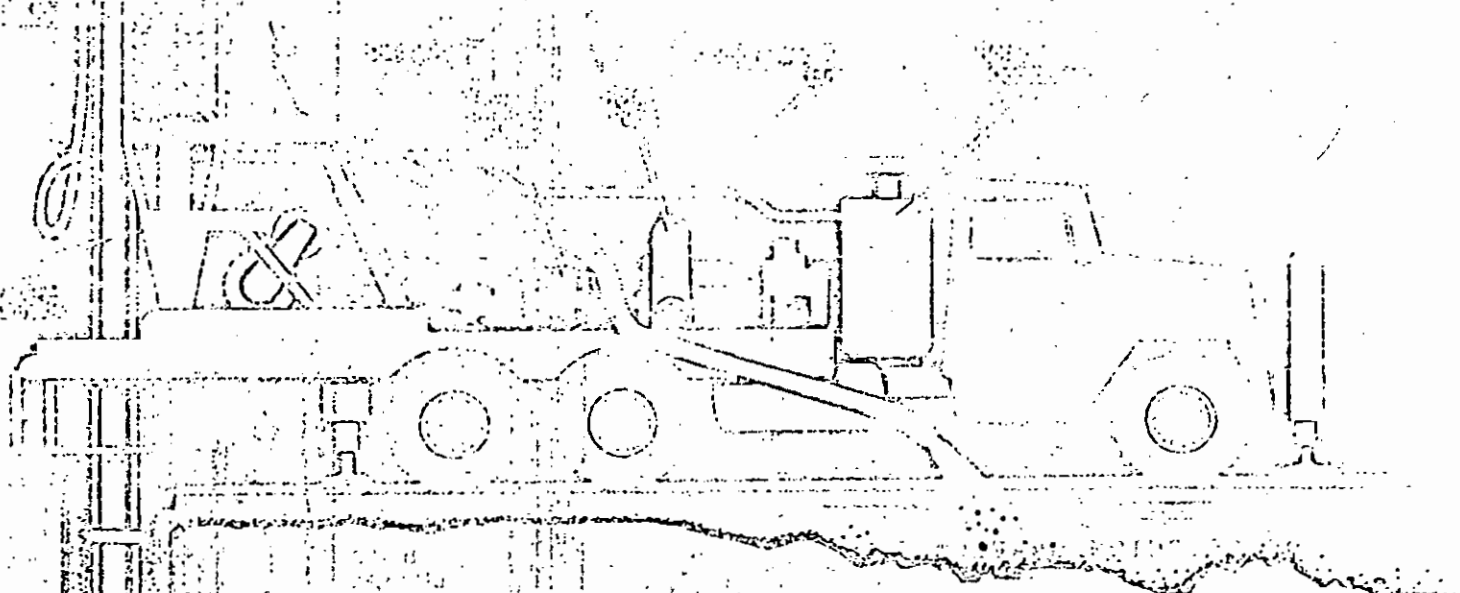
PLANTA DE UN EQUIPO ESTANDAD  
DE CIRCULACION INVERSA, SIN HY-FLO

- |                           |                              |                        |                |                 |
|---------------------------|------------------------------|------------------------|----------------|-----------------|
| 1. Telescoping Stabilizer | 4. Drawworks                 | 6. Chain Case          | 9. Rotary Pump | 12. Vacuum Tank |
| 2. Rotary Table           | 5. Rotary Table Transmission | 7. Vacuum Priming Pump | 10. Pump Drive | 13. Fuel Tank   |
| 3. Control Station        |                              | 8. Gear Reduction Case | 11. Power Unit |                 |



**"HY-FLO" CIRCULATION SYSTEM**

is a modification of the rotary pump method of drilling



The Pertadrill HY-FLO circulation system can be used to increase drilling rates and extend hole depths.

**How it works**

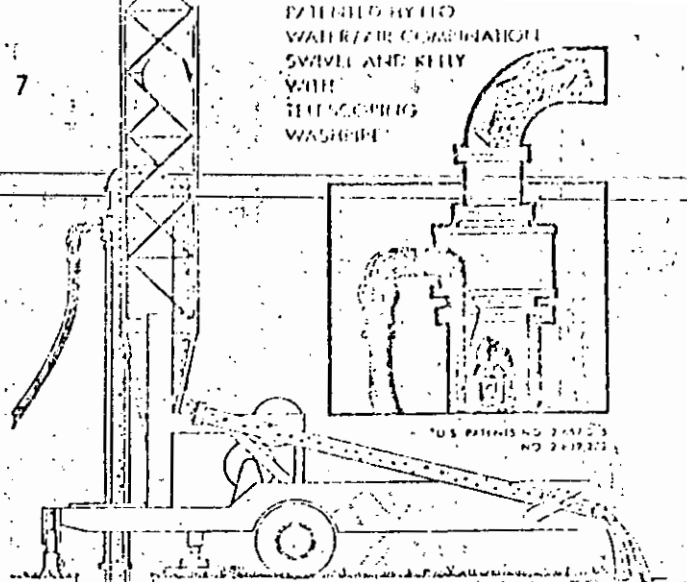
First, the hole is drilled to about 50 feet using the rotary pump. Then a special manifold and subsequent lengths of HY-FLO drill pipe are installed onto a special square kelly bar with built-in air lines. This allows compressed air to be injected from the two air line pipes on the outside of the main drill pipe through the manifold and into the column of upward moving water. The rotary pump is bypassed at this stage and the system becomes, in effect, a dynamic air-lift pump with an unobstructed 6-inch diameter conductor pipe for evacuation of cuttings.

The water column within the pipe from the manifold upward is less dense than the water outside the pipe thus causing a pressure differential. This creates a high velocity upward flow of water with cuttings inside the drill pipe.

The maximum depth to which air can be injected into the drill column depends upon the air pressure used. Normally a 125 psi compressor is used that allows a maximum manifold submergence of approximately 250 feet.

When the manifold reaches this depth, 30 to 50 feet of drill pipe are pulled, another manifold is installed in the line, the string is tripped to bottom and air is again injected through the upper manifold at approximately the 50 foot depth. Pump priming is not required.

PATENTED HY-FLO  
WATER/AIR COMBINATION  
SWIVEL AND KELLY  
WITH  
TELESCOPIC  
WASHER



DESCRIPCION GRAFICA DEL

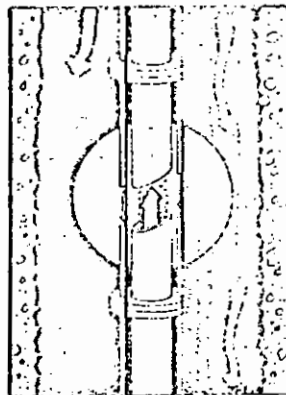
SISTEMA DE BOMBEO

"HY-FLO" Y EL EQUIPO

EMPLEADO.

[Faint, mostly illegible text describing the equipment and its use. The text is very light and difficult to read, but appears to be a technical description of the 'HY-FLO' system.]

HY-FLO  
DRILL PIPE  
WITH  
EXTERNAL  
AIR LINES



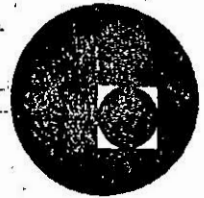
HY-FLO  
AIR INJECTION  
MANIFOLD

STANDARD  
FLANGED  
DRILL PIPE  
AND  
FABRICATED  
DRAG BIT





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



## PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

### TEMA II: TECNICAS DE PERFORACION

#### 2.1.- Perforabilidad de las Rocas

ING. EDUARDO BARNETCHE

Marzo, 1978



## TECNICAS DE PERFORACION

### PERFORABILIDAD DE LAS ROCAS

La perforabilidad de las rocas es un término demasiado vago o ambiguo y no existen unidades para medirla en términos absolutos, y tal vez pudiera afirmarse que tampoco puede definirse con exactitud en términos relativos.

La perforabilidad de las rocas como va a tratarse en el curso de esta plática, se define como la inversa de la resistencia de una roca a ser perforada, estando esta resistencia relacionada no solamente con la composición de las rocas, a sus características y propiedades físicas sino muy especialmente a las condiciones en que las rocas se encuentran en el fondo de una perforación, condiciones que prácticamente es imposible duplicar en el laboratorio.

La mayor o menor perforabilidad de las rocas se percibe en los trabajos reales de perforación, en forma relativa y con un gran número de condiciones dadas, por el "avance" de la barrena en determinado tiempo, o lo que es lo mismo, por la "velocidad de penetración", o por el "rendimiento".

Se sabe que este "avance", "penetración" o "rendimiento" está influenciado por más de 40 variables, algunas de las cuales pueden ser relacio



nadas en el laboratorio donde las condiciones pueden controlarse, pero la mayoría tiene que relacionarse en el campo, en los trabajos reales de perforación, los cuales están a su vez afectados por circunstancias muy ajenas a la investigación de los diversos parámetros que intervienen en la perforación. Por lo anterior puede decirse que los mayores conocimientos y experiencia provienen de la perforación para la industria petrolera, en la cual no existe, o existe en menor grado la severa presión económica a que está sujeta nuestra industria de perforación somera, principalmente para pozos de agua y minería que no permite llevar a cabo trabajos de investigación. De esta forma observamos que los mayores avances en la tecnología de nuestra perforación somera, ya sea en herramientas, barrenas, equipos, fluidos de perforación, etc., son transferencias y adaptaciones de la tecnología petrolera con una gran diferencia de tiempo en nuestra contra, y es a nosotros los técnicos de la perforación a quienes corresponde hacer llegar al perforador práctico en el campo, lo antes posible, los conocimientos o enseñanzas que le ayuden a desempeñar mejor su cometido.

Entre el gran número de variables que intervienen en la perforación, indudablemente se encuentran las que se refieren a las características y propiedades físicas de las rocas por lo que nos referiremos brevemente a las principales y a su intervención e influencia en la perforabilidad con herramientas del tipo rotatorio y cortadores rodantes en el fondo de la perforación.

Las propiedades de las rocas a que haremos referencia son las siguientes:

- 1.- Dureza.
- 2.- Estructura mecánica y tipo de fractura.
- 3.- Plasticidad.
- 4.- Resistencia a la compresión y al aplastamiento.
- 5.- Resistencia a la tensión.
- 6.- Resistencia al esfuerzo cortante
- 7.- Porosidad.

1.- Dureza. - La escala mas usada para describir esta propiedad de las rocas es la propuesta por Mohs. En esta escala numerada del 1 al 10 la roca más dura en la escala ascendente raspará a las rocas más suaves - aún a la inmediata en la escala descendente. Se transcribe esta escala -- como una mera referencia util:

- 1.- Talco.
- 2.- Yeso.
- 3.- Calcita.
- 4.- Fluorita.
- 5.- Apatita.
- 6.- Feldepasto ortoclasa.
- 7.- Cuarzo.
- 8.- Topacio.
- 9.- Corindón (zafiro)
- 10.- Diamante.

El acero usado en barrenas de dientes corresponde a una dureza entre 6 y 7 y el carburo de tungsteno; muy usado en barrenas modernas corresponde a una dureza variable entre 8 y 9.

El efecto de la dureza de una roca en la velocidad de perforación está grandemente afectado por otras propiedades, de tal manera que no se ha obtenido una correlación directa de esta propiedad por sí misma con la perforabilidad. Por otra parte, las rocas muy raramente están compuestas de un solo mineral; y este hecho en sí mismo haría tal correlación muy difícil aun sin contar con otros factores involucrados.

En general, la dureza de la roca que se perfora determina la acción abrasiva a que está expuesta la barrena, tanto sus cortadores o conos, como a la propia estructura rodante cualquiera que ésta sea y por consiguiente afectará la vida útil de la herramienta.

2.- Estructura mecánica y tipo de fractura. Las rocas, al igual que otros materiales, pueden ser descritos como quebradizos, o tenaces, o fibrosos, o de acuerdo a variaciones de grado de estas propiedades combinadas. Como un ejemplo tenemos vidrios volcánicos masivos, (obsidiana) extremadamente duros, los cuales cuando son quebradizos se perforan a razón de varios metros por hora. Lo mismo puede decirse de algunas rocas que exhiben fractura concoidal, lo cual facilita la perforación a condición de que se aplique suficiente peso o impacto por medio de la barrena de perforación. Sin embargo, cuando minerales de este tipo como la sílice se encuentran diseminados en partículas pequeñas, venillas o nodulos en una matriz de roca caliza, se tiene una de las formaciones más di-

fáciles de perforar en cuanto a "avance" se refiere. No debemos olvidar que las condiciones de confinamiento en que estas formaciones se encuentran en el fondo del pozo cambian su comportamiento al ataque de la barrena.

Formaciones como las descritas aparecen como quebradizas fácilmente -- pulverizables, si pequeñas porciones o pedazos se sujetan a ligeros golpes de martillo.

Las características de fractura de las lutitas; y por tanto su perforabilidad, varían muy ampliamente, especialmente con la profundidad.

3.- Plasticidad. -- Como propiedad de una roca la plasticidad puede tomarse como opuesta a lo quebradizo. La plasticidad se presenta en la perforación somera en todas sus gradaciones. Desde las formaciones que no exhiben plasticidad alguna hasta las arcillas extremadamente suaves y pegajosas que no son capaces por sí mismas de soportar el peso de las formaciones que se encuentran por encima de ellas, por lo que una vez perforadas o penetradas, se cierran y fluyen sobre el agujero disminuyendo el diámetro, pese a que se repasen una y otra vez. Este es un claro ejemplo de lo vago que es el término "perforabilidad", pues en este caso la resistencia de la arcilla suave a la perforación propiamente dicha es muy baja, se emplea poca energía para penetrarla, y podría clasificarse como de alta o fácil perforabilidad. No obstante, los avances reales, los rendimientos efectivos en metros por hora o por día son muy bajos aún cuando se utilicen técnicas de lodos muy especiales y costosos. En muchas ocasiones los avances reales en arcillas excesivamente plásticas son comparables o inferiores a-

los que se obtienen en rocas ígneas o metamórficas cuya perforabilidad es muy baja.

Siendo el anterior un caso extremo, puede decirse, en general que las rocas y formaciones que tienen cierto grado de plasticidad, representado en términos generales por moderados contenidos de arcilla, como arena arcillosa, clásticos finos ligeramente arcillosos, calizas con contenido de arcilla, tobas arcillosas, etc., son bastante nobles y competentes, o lo que es lo mismo, presentan una alta perforabilidad.

A este tipo de formaciones y especialmente a las lutitas, las cuales se presentan con mucha frecuencia al perforar en yacimientos petroleros, se debe el desarrollo y obtención de las modernas barrenas de tobera (jet) que producen un alto impacto hidráulico y turbulencia en el fondo de la perforación lográndose incrementos verdaderamente notables en los avances o rendimientos con esa moderna tecnología, la cual desafortunadamente sólo puede aplicarse con ventaja en diámetros relativamente pequeños (6-1/2" a 9-1/2") muy por abajo de los diámetros usados en nuestra perforación so-  
mera, además de que su empleo requiere grandes cantidades de energía hidráulica.

4. - Resistencia a la compresión y al aplastamiento.

5. - Resistencia a la tensión.

6. - Resistencia al esfuerzo cortante. - Indudablemente que la resistencia mecánica de una roca es el factor más importante en la determinación de la velocidad a que puede ser perforada. Desde luego que la resistencia de una roca a la compresión, a la tensión y al esfuerzo cortante pueden deter

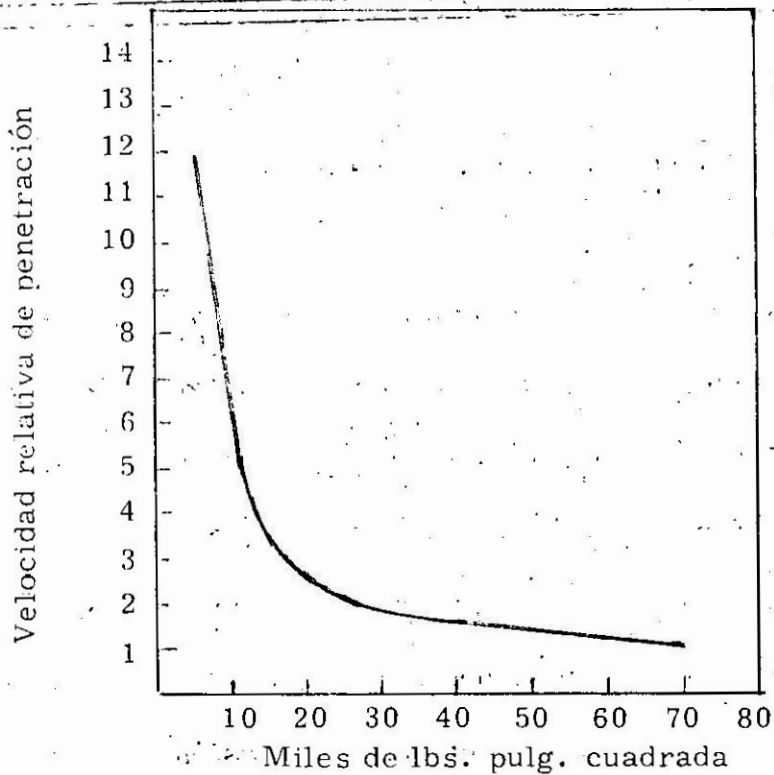
... determinarse separadamente por medio de especímenes en las máquinas de prueba del laboratorio de resistencia de materiales; pero los valores obtenidos carecen de validez y significación ya que la resistencia que nos preocupa o interesa es la resistencia a la penetración de una barrena, la cual mas bien mide las fuerzas cohesivas entre las partículas constituyentes de la roca, in situ, con todas sus condiciones protectivas como lo es el confinamiento en todas las direcciones, excepto por la cara o sección expuesta a la acción de la barrena. De manera que las propiedades elásticas de la roca son en realidad muy diferentes a las que pueden determinarse en las máquinas de prueba en las que no existe confinamiento alguno.

... Sin embargo, puesto que la barrena ataca la roca principalmente por percusión e impacto, si se ha encontrado correlación entre la resistencia a la compresión y la perforabilidad, tras de numerosas pruebas de laboratorio y también por experiencias y registros de campo.

... La relación que se encontró fue una función hiperbólica en la forma que se ilustra en la figura siguiente:

... Debe quedar bien claro que los valores de la gráfica son relativos y se ha expuesto sólo para ilustrar el tipo de función entre los parámetros considerados, conservando todas las demás condiciones de perforación idénticas e ideales. Mas adelante en nuestra exposición daremos una relación matemática de carácter práctico, en la cual figura en forma preponderante la resistencia a la compresión de las rocas.

... 7. Porosidad. - Los espacios porosos dentro de una roca disminuyen desde luego la resistencia mecánica y obviamente también disminuye la canti-



#### RESISTENCIA A LA COMPRESION LBS/PULG. CUAD.

dad de material sólido que debe ser removido por la acción de la barrena. -

Desde luego, que esta propiedad de las rocas está bien relacionada con la --  
velocidad de penetración, aun cuando no pueda hacerse cuantitativamente. -

A título de ejemplo podemos citar la perforación en rocas calizas de gran -  
espesor y en corrientes basálticas, en las que pueden percibirse zonas po-  
rosas por los mayores avances o velocidades de penetración en comparación  
con las zonas en que la roca es masiva.

#### Teorías relacionadas con la trituración, molienda o falla de las rocas.

Con objeto de tratar de entender la forma en que actúan las barrenas; o yen  
do más allá, el mecanismo por el cual los dientes de la barrena atacan la -  
roca, consideramos pertinente examinar aunque sea brevemente las teorías  
más conocidas a este respecto.

Cuando se perfora un pozo por medios mecánicos, que es lo que nos ocupa, se producen pequeños pedazos de roca por la acción de la barrena contra la formación.

En un intento de obtener un cálculo o estimación del trabajo útil desarrollado por la barrena en la destrucción de la roca, puede suponerse que la energía requerida es proporcional a la nueva superficie de roca producida durante el proceso de perforación. Esta suposición fué usada para obtener la ley de Rittenger, la cual fué desarrollada en principio para su aplicación a máquinas quebradoras de roca. Sin tratar de exponer la secuencia matemática, diremos que se llega a la conclusión siguiente:

$$\text{Trabajo por unidad de volumen de roca} = \frac{\text{constante}}{a}$$

siendo "a" el tamaño efectivo de los recortes de perforación.

Esta relación implica que la energía gastada en la perforación de un metro de un determinado diámetro, será inversamente proporcional al tamaño de los recortes. O de otra manera, el tamaño de los recortes nos dá un indicio bastante directo de la perforabilidad relativa de las rocas; es decir, si con la misma barrena y conservando invariables todas las condiciones de perforación, peso, rotación, etc., entre más pequeños sean los recortes la formación requerirá más energía y por tanto es más resistente a la perforación. Sin embargo, esto no quiere decir que las condiciones de perforación y destrucción de la roca en las que se requiera el mínimo de energía o trabajo mecánico sean las más deseables o económicas; es decir, que no siempre la obtención de los fragmentos más grandes deba ser el objetivo del perfo-



rador, pues como veremos mas adelante existen condiciones en las que la obtención de pequeñas partículas de roca trituradas, prácticamente polvo, proporcionan los mayores avances por unidad de tiempo.

Por cuanto a la potencia real que se consume en la perforación, generalmente se cuenta con un exceso considerable, principalmente en los equipos de perforación petrolera. Por ejemplo, en la perforación o molienda de rocas duras y tenaces como calizas, dolomitas, areniscas, etc., en diámetros de alrededor de 20 cm. (8") se utilizan en forma efectiva, en la barrena, potencias del orden de 25 a 50 H. P., contándose en el equipo con capacidad de 2000 H. P. o más, los cuales se utilizan principalmente para las maniobras de elevación de la sarta de perforación desde profundidades de varios miles de metros, en tiempos razonables, así como en potencia hidráulica tanto en la barrena como en vencer pérdidas por fricción producidas por la circulación de los fluidos empleados.

Tratándose de las máquinas comunmente empleadas en nuestra perforación, somera podemos afirmar que sí es frecuente que se tengan limitaciones en la potencia disponible, sobre todo en los diámetros de más de 25 cm. (10") que se requieren para la explotación del agua subterránea.

Otras teorías referentes a la molienda o falla de las rocas son las siguientes:

- a) La teoría del máximo esfuerzo, la cual establece que la falla ocurre en cualquier punto donde el esfuerzo excede cierto valor crítico.
- b) La teoría de la máxima deformación, la cual, como su nombre lo indica, establece que la falla ocurrirá cuando se sobrepasa cierto lí-

mite crítico.

c) La teoría de la máxima diferencia de esfuerzos o del máximo esfuerzo-cortante, la cual fué desarrollada por Mohr, según la cual la falla está determinada por las máximas diferencias entre los esfuerzos principales.

d) Teorías de percusión. - Puesto que las herramientas mecánicas más usuales y prácticas consisten en elementos rodantes en el fondo del pozo y la acción de destrucción o molienda se produce por impacto o percusión, este procedimiento o acción ha sido objeto de muy numerosos estudios y experimentos dando lugar a las correspondientes teorías.

Por ejemplo, Drilling Research, Incorporated de los E. U. A., llevó a cabo experimentos que fundamentalmente consistieron en dejar caer herramientas o dados parecidos a cinceles con filo truncado o plano, actuando en determinada roca caliza. Se encontró que era necesario emplear una determinada cantidad mínima de energía para que la falla ocurriera. Por abajo de esa energía mínima, la roca se comportaba elásticamente y no ocurría falla alguna.

Sin embargo cuando se empleaba suficiente energía para producir la falla, la porción inmediatamente abajo de la parte plana del dado tomaba la forma de una cuña y se formaban esquirlas o fragmentos a ambos lados con ángulos de fractura de alrededor de  $20^\circ$  hasta la superficie del espécimen.

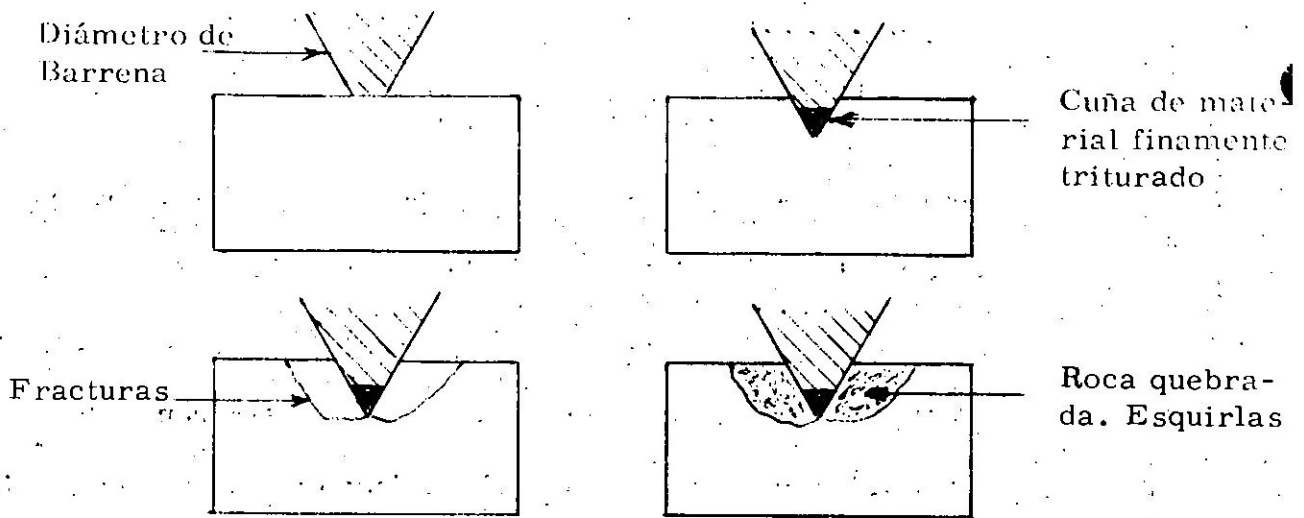
Cuanto mayor era la energía del golpe o impacto, mayor era la pene

tracción y la cantidad de roca removida.

Por métodos muy precisos y elaborados se midieron los esfuerzos en los dados y se tomaron películas a muy alta velocidad así como en pantallas de osciloscopio. Pruebas a distintas velocidades, pruebas estáticas y aplicación lenta de las cargas mostraron un comportamiento idéntico observado cuando el dado era forzado contra la roca. Se concluyó por lo tanto que no existe una ventaja en la percusión por sí misma, excepto en los casos en que la energía cinética se emplea en lugar de mayores pesos sobre la barrena o dado para llevar a cabo la acción de triturar o perforar.

En este mismo sentido se llevó a cabo una investigación exhaustiva de los mecanismos de la formación de cráteres por los impactos -- producidos por los dientes de las barrenas de perforación contra las rocas. Esta investigación fué conducida por W. C. Maurer desde 1959 hasta 1965 y llegó a resultados prácticos, al grado de elaborar una relación matemática definida entre los principales parámetros que intervienen en la perforación de las rocas.

De acuerdo con esta investigación, cuando el diente de una barrena produce un impacto sobre la roca, ésta se deforma elásticamente -- hasta que se excede el límite de su resistencia al aplastamiento y -- trituración, momento en el que se forma bajo el diente una cuña de material finamente triturado. A medida que la fuerza que ejerce el diente aumenta, la cuña de material triturado es más fuertemente comprimido, produciéndose fuerzas laterales de gran intensidad en



### MECANISMO DE FORMACION DE CRATERES

el material sólido que rodea a la cuña inicial.

Cuando estas fuerzas llegan a cierta intensidad se inician fracturas debajo de la cuña y se propagan hasta la superficie de la roca.

Las trayectorias de éstas fracturas intersectan a las líneas de acción de los esfuerzos principales a un ángulo constante como lo predice la teoría de Mohr que se mencionó anteriormente relativa a la máxima diferencia de esfuerzos principales o sea donde ocurre el máximo esfuerzo cortante.

En estos estudios se encontró una correlación entre la profundidad del cráter y la inversa de las importantes propiedades de las rocas como son: La resistencia al corte y la resistencia a la compresión.

Como resultado de todos esos estudios y experimentos Maurer propuso la siguiente importante ecuación, siempre que se den las condiciones de una "perfecta limpieza" del fondo del agujero, es decir, que el material triturado bajo cada impacto de los dientes de la barrena sea removido inmediatamente, de manera que siempre se produzca el meca-

nismo de craterización sobre roca "virgen". (Esto explica en parte la mayor eficiencia de las barrenas con toberas (jets) ).

$$R = K \frac{N W^2}{D^2 S^2}$$

R = rendimiento (pies/hr.)

K = condiciones de perforación (constante)

N = Velocidad rotaria r.p.m.

W = Peso total sobre la barrena, Lbs.

D = Diámetro de la barrena, pulgs.

S = Resistencia a la penetración (compresión) de la roca  
Lbs/pulg. cuadrada.

Como se vé, la ecuación anterior relaciona cuatro variables de las muy importantes en la técnica y práctica de la perforación. Comentaremos brevemente sobre cada una de ellas. En primer lugar, "S" resistencia a la penetración cuyo índice mas próximo o semejante es la resistencia a la compresión influye en la velocidad de perforación o rendimiento en razón inversa del cuadrado de su valor. Es decir que si una roca "B" es doblemente fuerte o doblemente resistente en comparación con una roca "A", "B" se perforará a una velocidad cuatro veces menor, o -- bien, tomará cuatro veces mas tiempo perforar una misma longitud o tramo de pozo.

Por otra parte, observamos también que la velocidad de perforación es proporcional a la velocidad angular de la barrena, lo cual indica que -- entre ciertos límites, para obtener "limpieza perfecta", el volumen de

roca triturada es proporcional al número de impactos producidos por los dientes de la barrena.

Por otra parte, vemos que el rendimiento es proporcional al cuadrado de "W" o sea al peso total efectivo sobre la barrena y podemos obtener una consecuencia práctica muy útil, que consiste en saber que cualquier cantidad de peso que podamos agregar a la barrena se reflejará grandemente en nuestros rendimientos.

También es importante observar que el rendimiento varía en razón inversa del cuadrado del diámetro, o lo que es lo mismo, varía en función inversa del volumen de roca triturada.

Esta relación es cierta y corresponde a la experiencia dentro de ciertos límites a condición de que se conserven invariables los demás elementos o parámetros que intervienen. Por ejemplo, según la fórmula que comentamos, un agujero de 2" podría perforarse a una velocidad 16 veces mayor que un agujero de 8", lo cual evidentemente no sucede en la práctica por la imposibilidad material de mantener el mismo peso total "W" sobre la barrena, además de otros impedimentos de semejante naturaleza, que hacen que seguramente un agujero de 8" pueda perforarse a mayor velocidad que uno de 2".

Finalmente, el rendimiento está afectado por la constante "K", lo cual representa una manifestación matemática de que muchos otros parámetros pueden afectar la velocidad de perforación, incluyendo otras propiedades de las rocas diferentes a la resistencia a la compresión, las propiedades y características del fluido de perforación empleado,

condiciones de presión e incluyendo la presión de confinamiento y aún el diseño de la barrena.

De modo que la magnitud de "K" es constante para una determinada barrena, a determinada profundidad y todas las demás variables están representadas en esta "constante", siempre y cuando, también se logre una perfecta limpieza del fondo.

De suma importancia es decir, aunque sea muy brevemente, algunos de los muchos efectos que los fluidos de perforación tienen sobre la perforabilidad de las rocas o su influencia en el comportamiento de las barrenas.

En términos generales se han obtenido estadísticamente buenas correlaciones respecto a las propiedades de los lodos como son: viscosidad, filtrado, contenido de sólidos y coloides, densidad, etc., sin poder establecerse relaciones numéricas. Así tenemos que a mayor viscosidad menor rendimiento, el mayor contenido de sólidos principalmente coloides también disminuye la velocidad de perforación. Puede decirse que un lodo de muy buena calidad, de baja viscosidad y contenido de sólidos puede dar una velocidad de perforación inferior a la mitad de la que se obtiene cuando se usa solamente agua; pero todos sabemos bien que rara vez puede usarse agua sola para perforar.

La densidad de los lodos tiene también una influencia decisiva en el avance de perforación, especialmente a profundidades apreciables, al producir altas presiones hidrostáticas que tienden a conservar la formación en su lugar aumentando el confinamiento y por consiguiente a retar

dar el avance.

La utilización del agua como fluido de perforación reduce el tamaño de los recortes y da también una mayor velocidad de perforación, conservando el resto de las condiciones iguales.

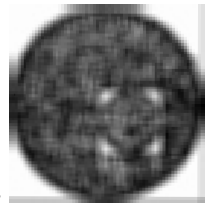
Por último, la utilización de aire, cuando esto es posible y deseable, da aún mayores velocidades de perforación y en los casos en que puede usarse gas de hidrocarburos con densidad inferior a la del aire, la velocidad de perforación se aumenta notablemente.

La utilización de lodos y demás fluidos de perforación es una ciencia, en si misma ligada estrechamente a la tecnología de la perforación, -- por lo que consideramos que lo dicho basta para dar una idea en cuanto se refiere a la perforabilidad de las rocas.





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

TEMA II: TECNICAS DE PERFORACION

2.2 PERCUSION SIMPLE

ING. JOSE LUIS SANCHEZ LAZCANO

MARZO, 1978.



---

## PERCUSIÓN SIMPLE

La historia de la perforación se remonta a épocas anteriores a Cristo. Uno de los pozos más famosos es el de Jacob, perforado hace unos 3,500 años, aproximadamente a 24 metros de profundidad. En este pozo Jesús le pidió a la mujer de Samaría que le permitiera tomar agua del mismo. Se dice que en ciertas estaciones, aún fluye agua.

El pozo de José, en El Cairo, consistente en una noria perforada a unos 90 metros de profundidad, permitía extraer el agua con botes.

Algunos datos indican que los Chinos y Persas, construyeron pozos no excavados antes del año 2000 AC.

Se cree que por el año 600 AC, en la época de Confucio, los Chinos construyeron el primer pozo, usando el principio de dejar caer libremente un peso, lo que constituiría la primera perforadora de percusión simple.

Uno de los pozos Europeos más antiguos, se localiza en el Norte de Francia, en la provincia que era conocida como Artois, cerca de la actual Villa Lilliers. Se perforó en el año de 1126 y ha estado fluyendo desde esa época. El nombre "Artesiano" que quiere decir pozo que fluye, proviene del nombre de dicha provincia.

En 1832, el Departamento de Agricultura de Francia, inició la perforación de pozos en París, para obtener agua artesiana, por lo que se diseñó una máquina para manejar brocas de acero de 8 a 40 pulgadas de diámetro, llegando a perforar en 1842 un pozo de 543 metros, que produjo un pozo artesiano con aproximadamente 40 litros por segundo de flujo.

Por supuesto la herramienta utilizada era bastante inadecuada y se producían muchos abandonos de pozos, debido a problemas de "pescas".

En los E. U. A., por el año de 1807, se inició la perforación por el método de percusión simple, estableciendo la utilización de una polea con resorte. Estas perforadoras fueron operadas por gente o utilizando caballos.

En 1830, se adaptó el motor de vapor a una perforadora que operaba una viga móvil para subir y bajar la herramienta de perforación.

Al principio, las uniones o roscas fueron hechas con rosca recta, pero rápidamente se descubrió que las roscas cónicas eran más fuertes y seguras.

La fundación en 1919 del American Petroleum Institute (API), trajo consigo la estandarización de los tamaños de uniones o juntas que actualmente se fabrican.

En 1859, la perforación de pozos para agua, se vió impulsada cuando fue perforado el primer pozo petrolero, por el Coronel E. L. Drake.

En 1868, Henry Kelly, construyó en Iowa la primera perforadora de percusión simple portátil, utilizando la viga o caballo para mover la herramienta y cable de manila.

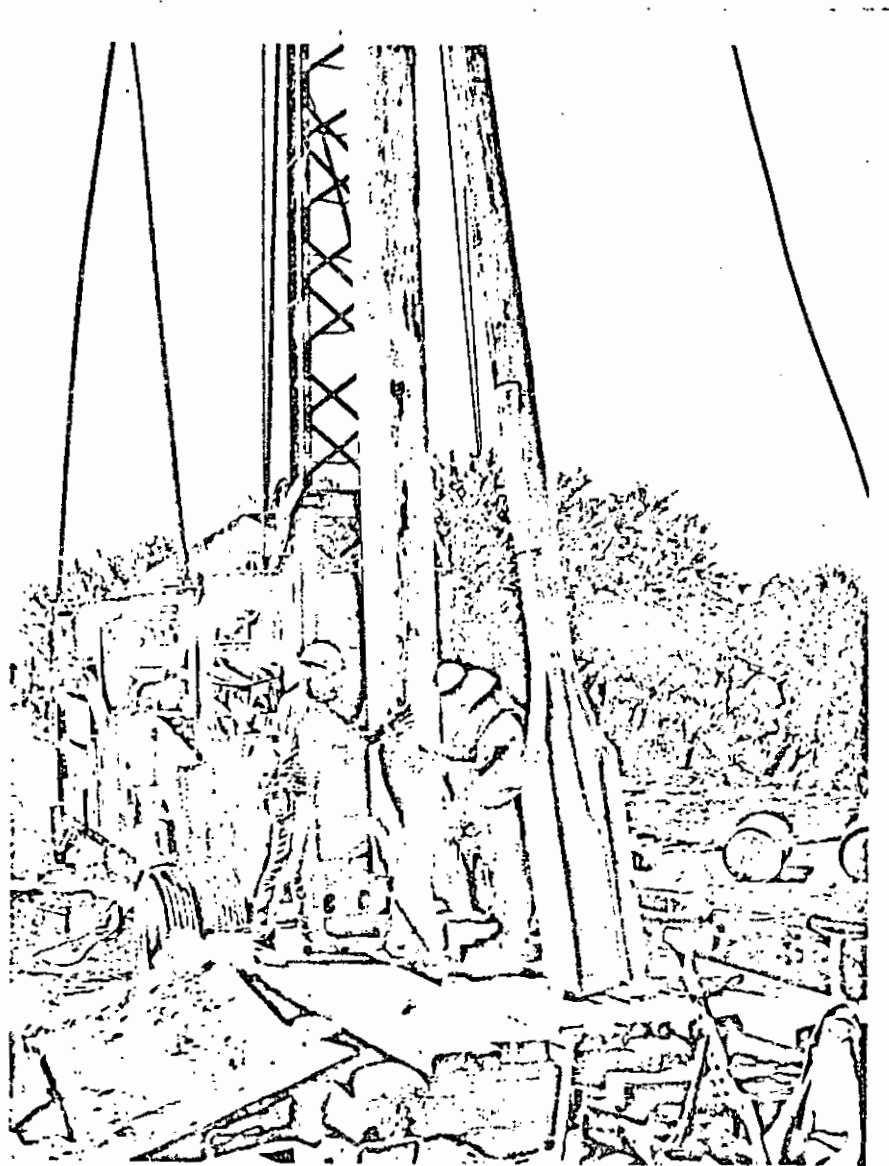
A principios del presente siglo, se comenzó a utilizar el cable de acero, pero debido a la rigidez de la torre de perforación, se tenía que utilizar un tramo de cable manila entre las herramientas y el cable de acero, para absorber parte del impacto que transmite la herramienta de perforación, que de otra manera tendrían que absorber la torre de perforación y las chumaceras.

Posteriormente, se colocó cable de manila entre la parte inferior y la parte superior de la torre de perforación, para absorber el golpe y las vibraciones.

Actualmente, se utilizan roldanas de hule montadas en la cabeza del mástil, en la base de las poleas, para absorber el fuerte impacto que se produce especialmente cuando se ha ido incrementando el peso de la herramienta de perforación.

Es interesante señalar, que muchos pozos petroleros han sido -  
construídos con perforadoras de percusión simple.

## EQUIPO DE PERCUSION SIMPLE.



Perforadora de Percusión Simple

Fig. 1.

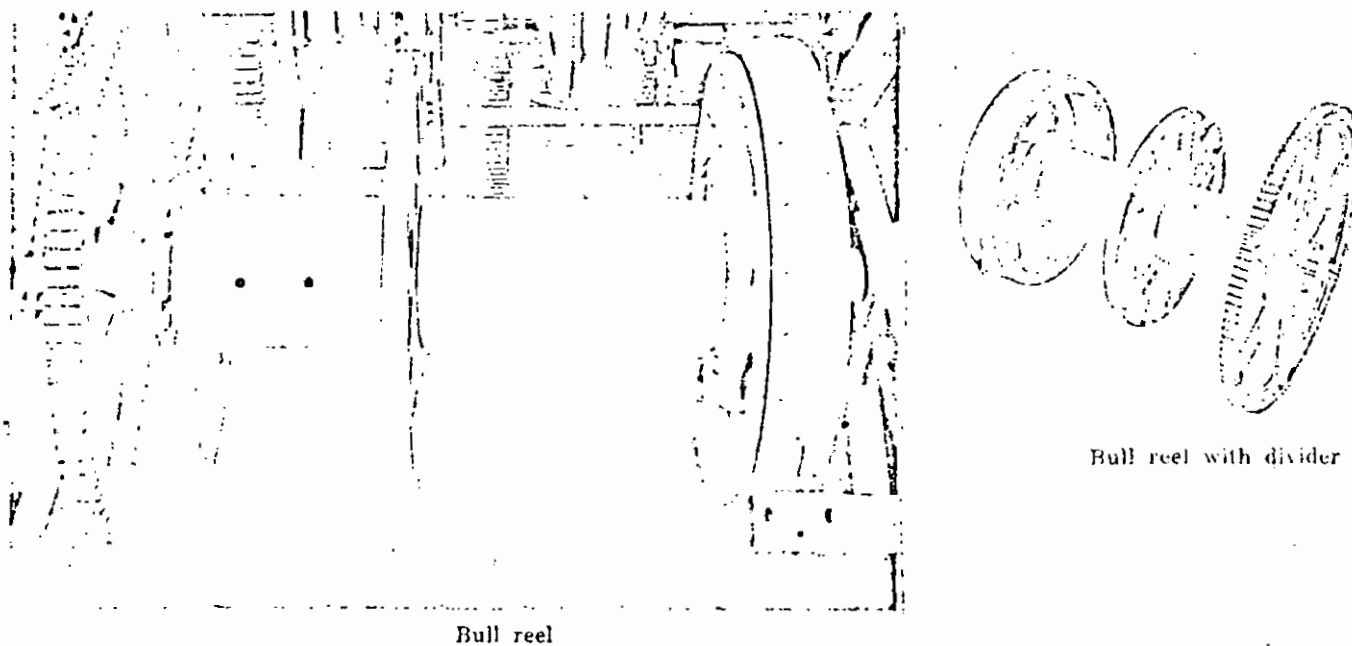
Este tipo de equipo es el que maneja las herramientas de perforación utilizando cable de acero para su movimiento, dejándolas caer libremente sobre el fondo del pozo en movimiento rít-

mico. Esta operación permite ir perforando el pozo.

Los cortes resultantes de la perforación mencionada son removidos al exterior mediante la operación de "cuchareo" utilizando la llamada "cuchara" o también la herramienta conocida como "bomba de arena".

Las herramientas para perforar y para cucharear, se manejan en líneas de cable y malacates diferentes para evitar pérdidas de tiempo.

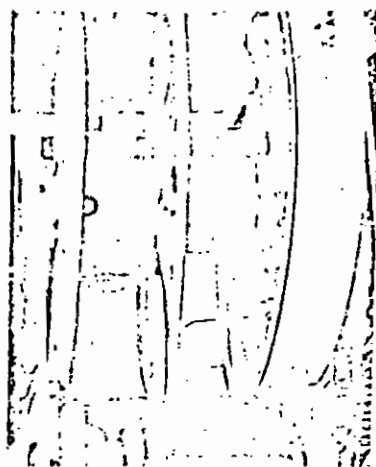
En general, una perforadora de percusión simple consiste de: - Una unidad de potencia o motor, que opera todo el sistema de malacates. Un malacate principal (bull reel)(fig. 2). Un mala-



Malacate principal

Fig. 2.

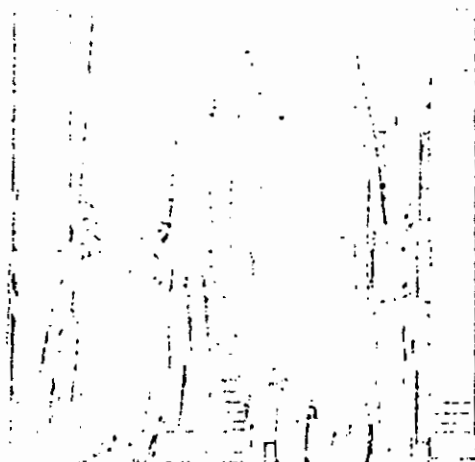
cate auxiliar (sand reel) (fig. 3). Un malacate para manejo de



Sand reel

Fig. 3.  
Malacate auxiliar

ademes (Casing reel) (fig. 4). Una viga o caballo de perforación



Casing reel

Fig. 4.  
Viga o caballo de perforación

(spudding beam) (fig.5). Todo lo señalado montado en un marco-  
y por último una torre de altura adecuada para manejar la lí-  
nea de herramienta de perforación. (fig. 10)

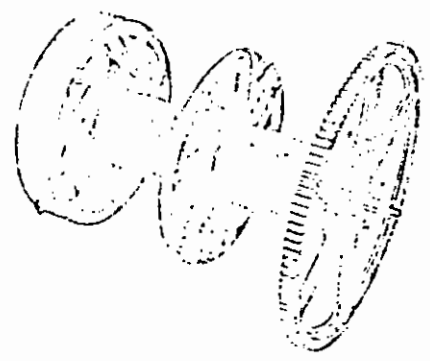
Caballo de perforación  
o viga



Spudding beam

Fig. 5.

El malacate principal, (fig. 2), permite almacenar el cable requerido a medida que la perforación avanza. Normalmente, está dividido en dos partes mediante un disco colocado casi al centro del tambor. De un lado el cable se enreda para almacenarlo luego el cable pasa al otro lado del tambor y se enrolla, procurando utilizar solo una capa de cable y durante la operación de perforación, no encimar cable en este último lado del tambor.



Bull reel with divider

Malacate principal con divisor

Fig. 6.



Después de avanzar en la perforación, la herramienta se descansa en el fondo del pozo y se traspasa cable del almacenamiento por el disco divisor al lado del tambor que se debe operar con una sola capa de cable y así continuar la perforación.(fig.6)



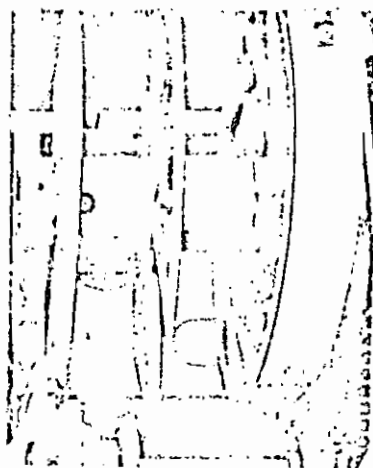
Perforadora de Percusión Simple  
Fig. 7.

Cuando el malacate principal saca la línea de herramientas del pozo, el cable se enrolla en el lado de trabajo del tambor.

El malacate principal, está equipado con frenos de fricción, -  
manualmente operados. Así el operador puede bajar o subir la -  
herramienta o dejarla a cualquier elevación aplicando el freno.

El malacate auxiliar, (fig. 8), maneja la herramienta de cucha

reo, que sirve para limpiar el fondo del pozo.



Sand reel

Fig. 8.

Malacate auxiliar

La viga o caballo, (fig. 5), imparte movimiento a las herramientas de perforación. Esta viga se encuentra montada en una flecha. En la misma flecha normalmente se encuentra montada una polea móvil lateralmente, para permitir que el cable del malacate principal, pase adecuadamente por la mencionada polea.

En el extremo opuesto de la viga, se encuentra otra polea, que permite que el cable pase del malacate principal, sobre la polea móvil, montada en la flecha y bajo la polea del extremo opuesto de la viga para así llegar a la polea de la corona del mástil.

El lado libre de la viga, está conectada a un gran brazo o biela (fig. 9), que imparte movimiento vertical a la viga o caba-

llo. Este movimiento hace que el cable de acero del malacate principal, que a una profundidad específica se encuentra fijo-frenado, se estire o afloje, levantando y soltando la línea-

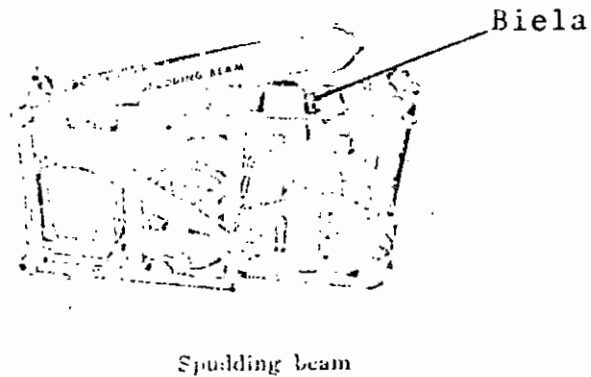


Fig. 9.

Brazo o biela

de herramienta. (fig. 10). Esta última al quedar flojo el cable, cae por peso propio libremente, golpeando el fondo del pozo.

Parte del impacto y vibraciones consecuentes, se transmiten a la polea de la corona, que son amortiguadas por el sistema de amortiguación a base de roldanas de hule o de cuero.

La línea de herramienta (fig. 10), está compuesta por la broca (drill bit), el barretón (drill stem), las tijeras (drill jar) unión de cable o socket (rope socket) y el cable mismo.

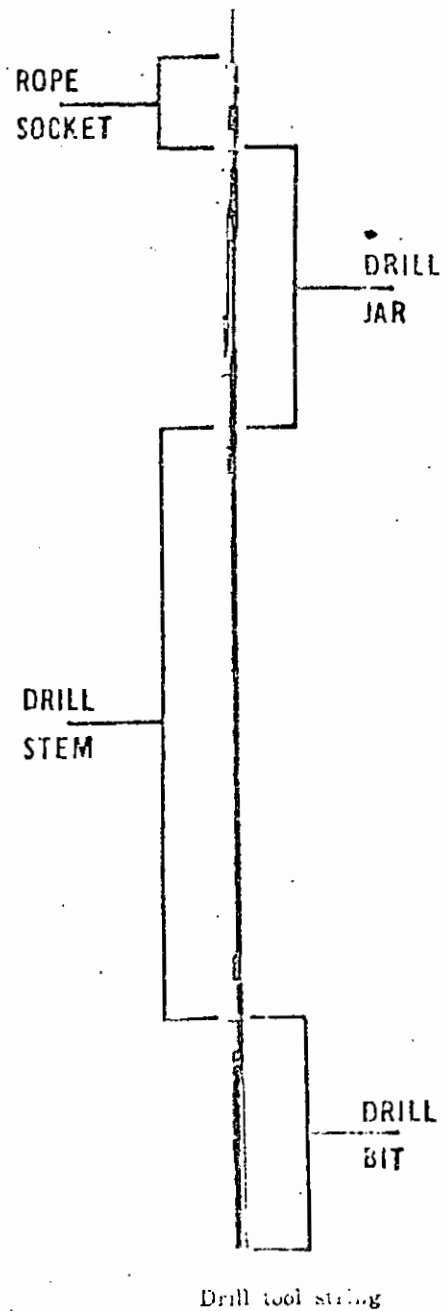


Fig. 10.

Línea de herramienta o sarta de perforación

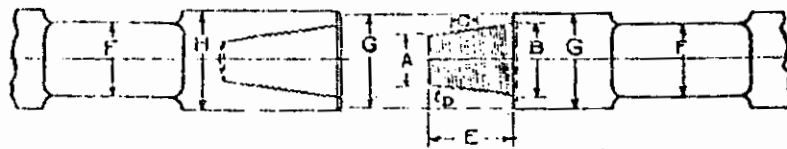
UNIONES O CONEXIONES.

Todas las uniones, juntas o conexiones de las herramientas de perforación, de pesca y otras herramientas de acero, llevan

juntas roscadas, hembra y macho, mediante las cuales se conectan entre sí o al socket que a su vez, se conecta al cable de acero.

El roscado de las uniones es de forma cónica, con una diferencia entre la base y la punta de aproximadamente 1". Las roscas sirven para unir las herramientas y los hombros de las juntas bien apretados sirven para evitar que se desenrosquen y para transmitir el impacto y las fuerzas de compresión, esto evita, que las roscas se dañen.

En las figuras 11 y 12, se muestran las conexiones API normales y una junta con sus acotaciones.



Cable tool joint

TABLE API STANDARD CABLE TOOL JOINTS  
Dimensions in Inches

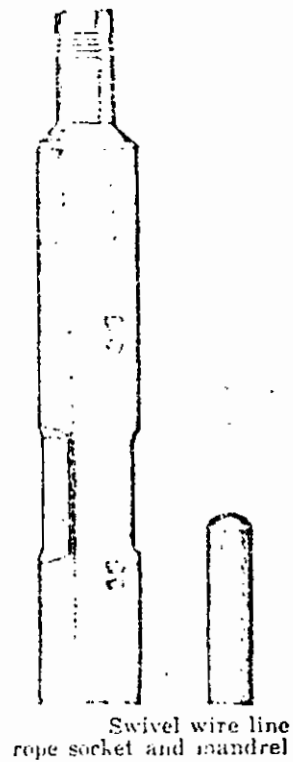
Min. Size of Hole	A & B Nom. Size of Joint	C No. Threads per Inch	D Type of Thread	E Length of Taper Pin	F Size of Wrench Square	G Diam. of Pin Collar	H Diam. of Box Collar
3 to 3½	1½ x 1¾	8	Flat US Form API	2½	1¾	2½	2¾
4 to 4¼	1½ x 2¼	8		3	2¼	3½	3¾
4½ to 5	1¾ x 2¾	7		3½	2¾	3¾	3¾
5½ to 6	2 x 3	7		4	3¼	4¼	4¾
6 to 6¾	2¼ x 3¼	7		4	3½	4½	4¾
6¾	2½ x 3½	7		4¼	4	5	5¼
6¾ to 8	2¾ x 3¾	7		4½	4	5¼	5½
8¼ & larger	3 x 4	7		4¾	4½	6	6¼
9 & larger	3¼ x 4¼	7		5	5	6¼	6½
10 & larger	3½ x 4½	7		5½	5	6½	6¾
10 & larger	4 x 5	7		5½	5½	7	7¾
10 & larger	4 x 5½	7		6½	5½	7½	7¾
12 & larger	4¼ x 6	7	7	6	8¼	8¾	

Fig. 11 y 12.

Tabla de juntas o conexiones

## SOCKET Y MANDRIL.

El tipo de socket normalmente utilizado es el tipo rotatorio, a base de cable y mandril.(fig. 13).



Swivel wire line  
rope socket and mandrel

Fig. 13

### Socket y Mandril

El diámetro del cuerpo y las llaves de apriete, son de acuerdo con la junta seleccionada.

La tabla de la figura 14, muestra las dimensiones de diferentes tamaños de socket.

TABLE NECK DIAMETERS OF ROPE SOCKETS  
EQUIPPED WITH VARIOUS JOINT SIZES

Tool Joint Size (In Inches)	Neck Diam. (In Inches)	Approx. Wt. (In Pounds)	Extra Mandrel Wt. (In Pounds)
1½ x 1¾ --- 8 API	2	35	2
1½ x 2¼ --- 8 API	2	43	4
1½ x 2¾ --- 7 API	2½	49	4
2 x 3 --- 7 API	2¾	80	4
2¼ x 3¼ --- 7 API	3¼	93	6
2½ x 3½ --- 7 API	3½	114	7
2¾ x 3¾ --- 7 API	3½	136	8
3 x 4	4	178	9
3¼ x 4¼ --- 7 API	4½	192	15
3½ x 4½ --- 7 API	4½	210	16
4 x 5 --- 7 API	4½	240	27
4 x 5½ --- 7 API	5½	285	30
4¼ x 6 --- 7 API	5½	325	35

Fig. 14

Diámetros de juntas y cuello de sockets

El mandril también va de acuerdo al tamaño del socket, y debe permitir el acomodo del cable a utilizar. En la fig. 15, se muestran diferentes diámetros de juntas de acuerdo al diámetro del cable.

TABLE CABLE REQUIREMENTS  
FOR SPECIFIED JOINT SIZES

Joint Size (In Inches)	Size of Cable (In Inches)
1½ x 2¼ --- 8 API	5/8
1½ x 2¾ --- 7 API	5/8 or 3/4
2 x 3 --- 7 API	5/8 or 3/4
2¼ x 3¼ --- 7 API	5/8 or 3/4
2¾ x 3¾ --- 7 API	3/4 or 7/8
3¼ x 4¼ --- 7 API	3/4, 7/8 or 1
4 x 5 --- 7 API	7/8, 1 or 1 1/8

Fig. 15

Diámetros de cable de acero para diferentes juntas.

El mandril permite el movimiento rotatorio de la sarta de perforación, permitiendo perforar un agujero redondo.

El cable de acero se fija al mandril generalmente usando metal fundido que puede ser zinc o metal babbitt de baja velocidad. En la figura 16, se muestran los pasos a seguir para fijar el cable al mandril.

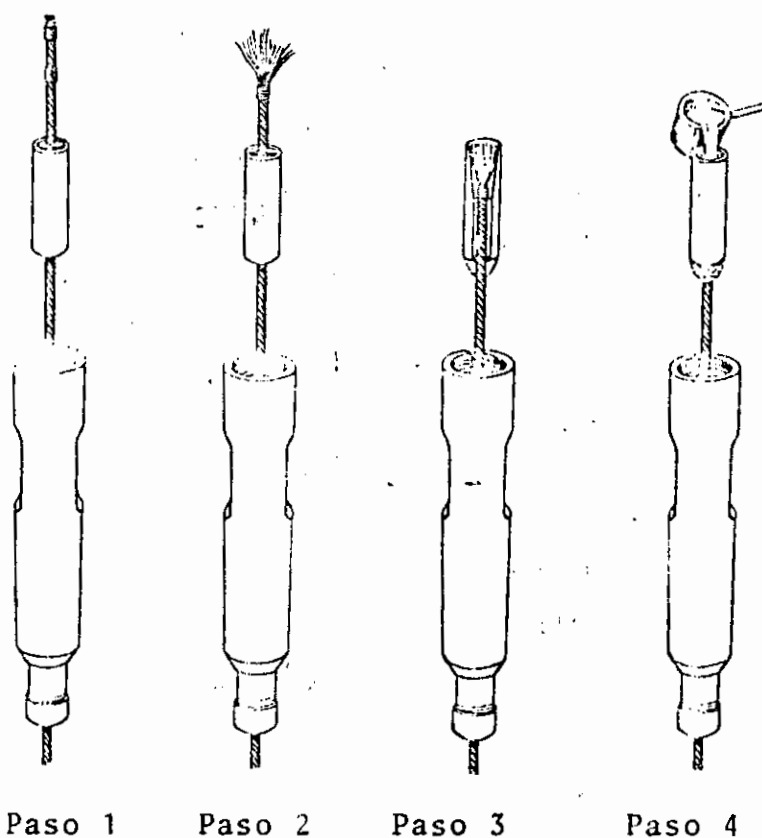


Fig. 16

Debe de cuidarse mucho la limpieza del cable y del mandril, antes de colar el metal fundido y este no debe de calentarse demasiado.



Cada viaje de las herramientas al interior del pozo debe de revisarse el cable en el contacto con el socket ya que es el punto de mayor desgaste. En general, cada 50 horas de trabajo es necesario cortar un tramo de cable y volver a colocarlo en el socket. Esto depende de la dureza del terreno pero la revisión visual determina cuando se requiere lo señalado.

#### TIJERAS DE PERFORACION.

Las tijeras de perforación mostradas en la fig. 17, se utilizan en forma normal como parte de la sarta, como medida precautoria para el caso en que la broca se tienda a pegar o para recuperarla rápidamente en caso de un caído sobre la herramienta.

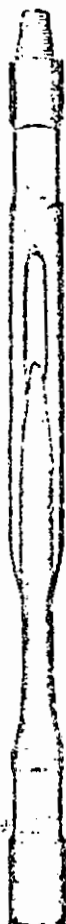


Fig. 17  
Tijeras  
de  
perforación

La tijera consiste de dos eslabones conectados con junta macho en un extremo y hembra o caja en el otro.

Algunos fabricantes hacen este tipo de herramienta, utilizando dos trozos de acero y soldando la caja y el macho a los extremos abiertos.

Otros fabricantes hacen las tijeras de un solo trozo de metal, sin soldadura alguna, mediante el forjado de la pieza y con tratamiento del metal e insisten en su durabilidad aunque su costo es mayor.

Al atraparse la herramienta se puede de inmediato golpear hacia arriba, utilizando el juego de la tijera y de esa manera normalmente se logra desatorar la herramienta muy rápidamente.

En la figura 18, se muestra una tabla que con las medidas apropiadas de las tijeras para diferentes diámetros de perforación y los tamaños de juntas recomendables.

TABLE JAR DIAMETERS REQUIRED  
FOR VARIOUS SIZES OF HOLE

Min. Size of Hole (In Inches)	Diam. of Jar Over Reins (In Inches)	Nominal Size of Joint (In Inches)	Diam. of Box Collar (In Inches)	Nom. Lgth. of Stroke Dr. Jar (In Inches)	Approx. Wt. (In Pounds)
3 to 3½	2½ to 2¾	1½ x 1¾ — 8 API	2¾	4½ to 8	63
4 to 4½	3¾	1½ x 2¾ — 8 API	3¾	4½ to 8	100
4½ to 5	3¾	1¾ x 2¾ — 7 API	3¾	4½ to 8	140
5¼ to 6	4¾	2 x 3 — 7 API	4¾	4½ to 8	237
6 to 6¾	4¾	2¼ x 3¾ — 7 API	4¾	4½ to 8	285
6¾	5¼	2½ x 3½ — 7 API	5¼	4½ to 8	375
6¾ to 8	5¼	2¾ x 3¾ — 7 API	5¼	4½ to 8	400
8¼ & larger	6¾	3 x 4 — 7 API	6¾	4½ to 8	600
9 & larger	6¾	3¼ x 4¼ — 7 API	6¾	4½ to 8	650
10 & larger	6¾	3½ x 4½ — 7 API	6¾	4½ to 8	670

Fig. 18

Diámetros de tijeras para diversos tamaños de pozos

Las tijeras, durante la perforación, deben mantenerse en tensión para no dañarlas. No deben de usarse al iniciar la perforación.

## BARRETONES.

El barretón es una herramienta que sirve para agregar peso a la sarta y para balancearla. En general, la caja o hembra del barretón es ma - yo - r que el macho. Esto se debe a - que junto a la broca, los esfuer - z - o - s de vibración y flexión, son ma - yo - res. En la fig. 19, se aprecia - un barretón. En pozos para agua - los barretones más utilizados, tie - n - e - n una longitud entre 4.8 y 7.3 m.



Drill stem

Fig. 19  
Barretón

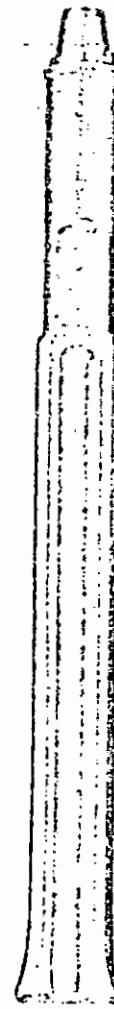
## BROCAS.

En la figura 20, se observa una broca típica y consiste en un extremo cortante, un cuerpo con vías para agua y una junta macho en la parte superior.

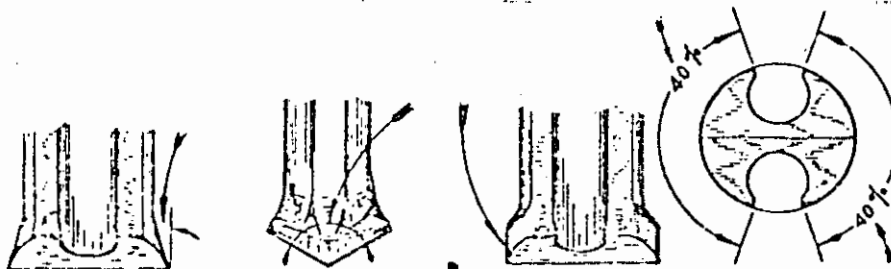
En muchas ocasiones las brocas llevan una caja para colocar - las llaves de apriete, aunque en otras ocasiones se utilizan - llaves de apriete tipo perforadoras rotatorias.

El extremo inferior afilado de la broca, determina el diámetro del pozo y sus filos son de mucha importancia. El peso depende además del diámetro, de la longitud que regularmente es de 1.5 m.

Las brocas tienen que cumplir con las condiciones de penetrar, triturar, rimar y mezclar, para lo cual su diseño toma en cuenta los siguientes factores geométricos que se observan en las figuras 21 y 22.



Drill bit  
Fig. 20  
Broca



*The Angle of Clearance is the taper on the outside or reaming edges. Drawing shows drill bit having wide angle of clearance and no wearing surface. Arrow points to angle of clearance.*

*The Angle of Penetration is the bevel on the cutting edge which penetrates or breaks up the material in the bottom of the drill hole. Drawing shows drill bit having a penetrating angle of 120°. Arrow points to the angle of penetration.*

*The Wearing Surface is the area which has no clearance and is in actual contact with the wall of the drill hole. This drill bit has a large area of wearing surface and no angle of clearance. Arrow points to wearing surface.*

*The Reaming Edge is the outside edge of the bit, and is measured as a part of the full circumference. Drawing shows drill bit having 80 per cent reaming edge—40 per cent reaming edge on either side of the water courses.*

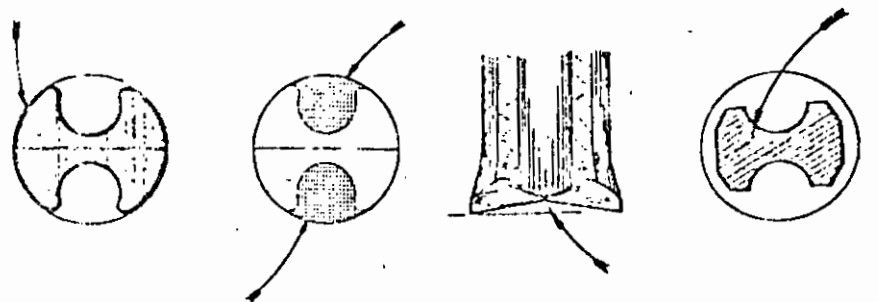
Fig. 21

Angulo ext.

Angulo de penetración

Superficie de desgaste

Filo de rimado



*The Crushing Face* is the area of surface on the bottom of the bit and is compared by measuring its percentage of the total area of the drill hole. Arrow points to crushing face — the shaded portion of the drawing. Water courses are shown in white.

*The Water Course* consists of the channeled portions of the bit, through which water and cuttings must pass when the bit is moved up and down in the hole. Arrows point to water courses, cross-hatched in black in this drawing.

*The Contour of Penetrating Edge* on a drill bit may be concave, straight, or convex, and the degree of contour is measured by the change in angle from a square line across the bottom of the bit. The drawing shows a concave penetrating edge.

*The Cross Section* of a drill bit is the size of the body at a point back from the end when it is not upset. Arrow points to cross section. The drawing shows the cross section of a drill bit back a few inches from the cutting edge.

Fig.22

Cara de trituración

Pasos de agua

Filo de penetración

Sección transversal.

Una formación suave arcillosa o caliza muy suave, requiere un di seño que proporcione un buen mezclado del material cortado y muchas veces requiere retardar la velocidad de penetración para asegurar el mezclado.

Requiere pues, ninguno o poco ángulo de penetración, el mayor po sible ángulo exterior y una sección transversal chica. Es reco<sup>o</sup> mendable una cara de trituración grande para retardar la penetra<sup>o</sup> ción y para empaçar el material en el fondo y evitar pegaduras.

Una formación muy dura como un granito abrasivo, requiere una broca en donde lo más importante es la penetración y el rimado.

En la figura 23, se muestran varios tipos de brocas.

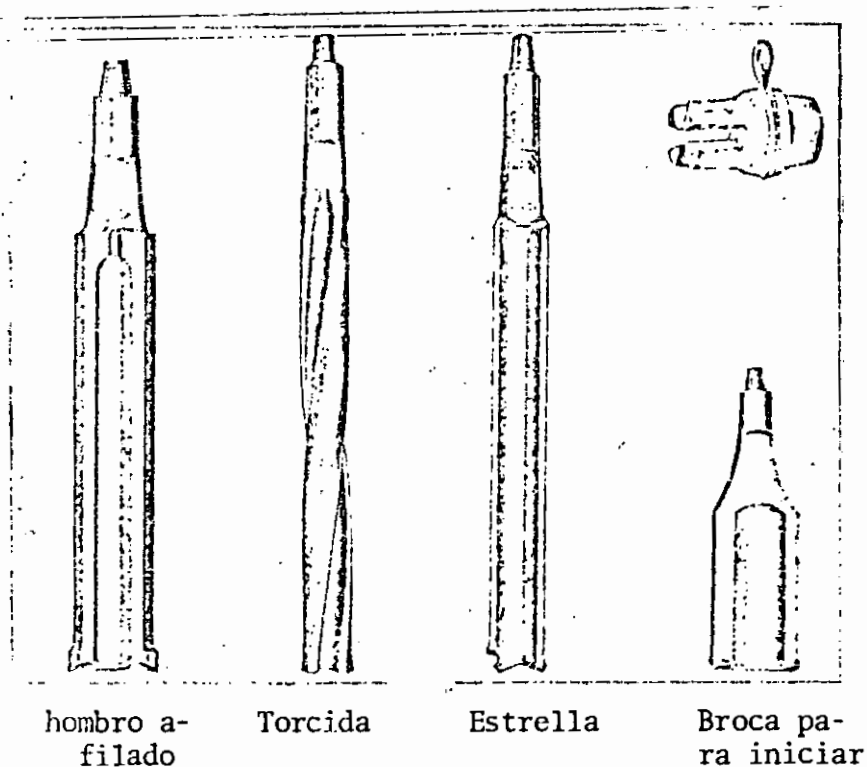


Fig. 23

El peso de la sarta de perforación, de ser posible, debe ser como mínimo de unos 90 kg. por pulgada de diámetro. Así para 12 - pulgadas de diámetro se deberá contar con un peso mínimo de 1080 kg. Sin embargo, es conveniente contar con mayor peso para tener buena velocidad de penetración en materiales duros.

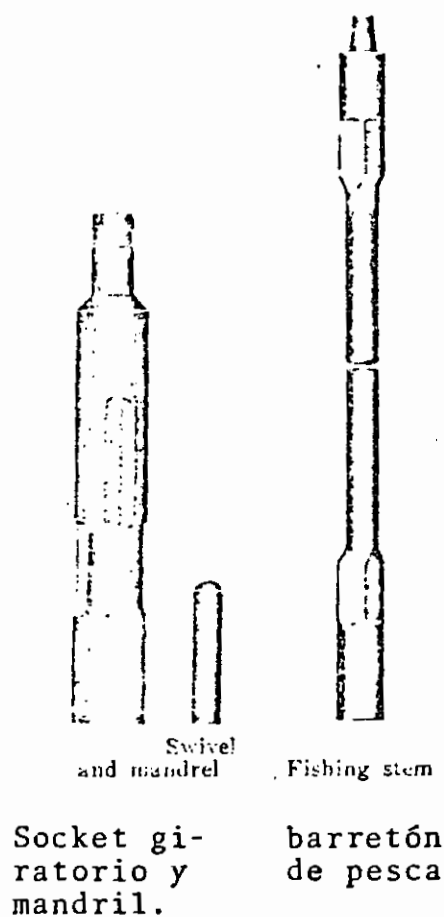
Un operador experimentado "siente" el fondo del pozo, tomando el cable con la mano y sintiendo las vibraciones que se presentan. - Esto le permite seguir la perforación con detalle y saber que ha cer en caso de presentarse un cambio o un problema.

Cuando se atrapa o se rompe una herramienta en un pozo, es necesario "pesarla". Para esto cuando es posible, se utiliza un so-

cket, un barretón corto (3m), un juego de tijeras de carrera larga y la herramienta de pesca, que va a sujetar a la herramienta-  
rota o atrapada.

En la figura 24, se muestra parte de la herramienta a usar.

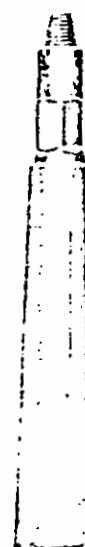
Fig. 24



Una herramienta de pesca muy común y fácil de utilizar, es la -  
mostrada en la figura 25. Simplemente se introduce en la herra -  
mienta a pescar, se golpea hacia abajo con la tijera y se jala ex -  
trayendo la herramienta rota o a -  
torada.

Fig. 25.

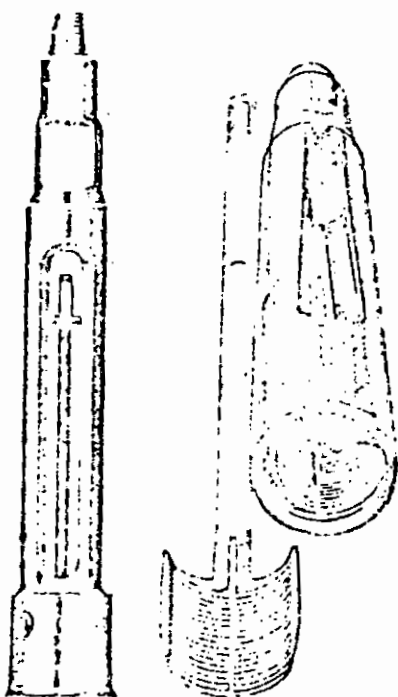
Campana



Horn socket

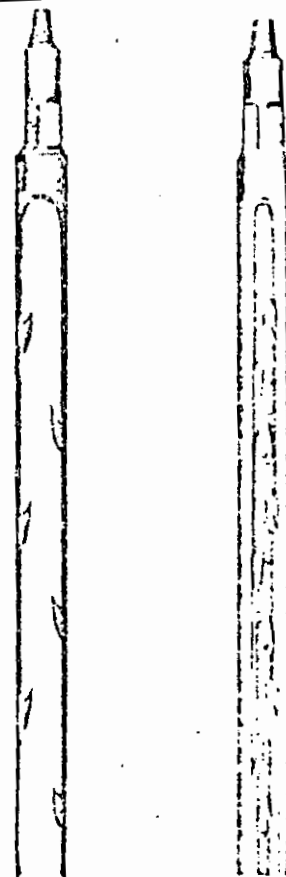
En la figura 26, se observa una herramienta para sujetar cable roto dentro de la perforación.

Fig. 26  
Herramientas para pescar cable



Sockets con  
cuñas

Sockets con  
cuñas de cir-  
culo completo



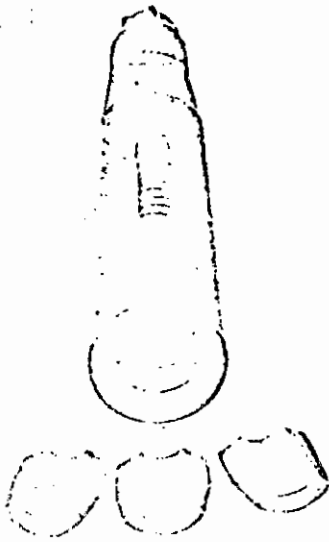
Two  
prong grab

Three  
prong grab

En la figura 27, se aprecian sockets o herramientas tipo campana con cuñas de agarre.

Fig. 27





Socket combinado con  
resorte

Fig. 28

En la figura 28, se muestra un socket combinado con resorte para la pesca - por la base estriada del socket del - cable especialmente cuando no hay es - pacio para manejar herramienta mayor.

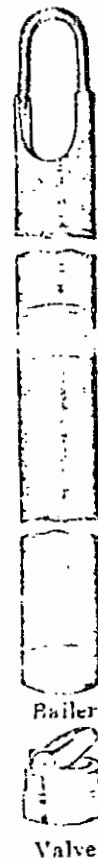
El resorte empuja a las cuñas hacia - abajo, para que trabajen sin necesi - dad de mucho espacio.

#### CUCHARAS.

Estas se utilizan para limpiar el fon - do del pozo, extrayendo los cortes acu - mulados por el efecto de perforación - de la broca. La cuchara (fig. 29) con - siste en un tubo con una válvula en la parte inferior que se cierra al extra - er la cuchara con cortes de perfora - ción en su interior; se opera con el - malacate auxiliar.

Cuchara

Válvula  
plana.



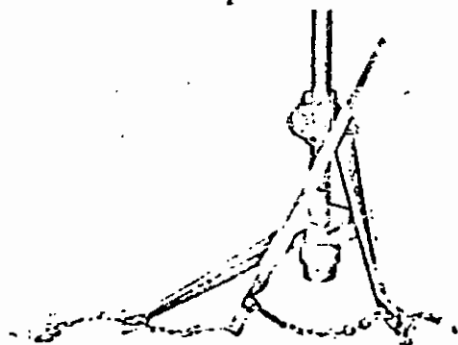
Flat  
valve with bailer

Fig. 29

En general, para levantar los cortes acumulados en el fondo del pozo se agita la cuchara y se golpea hacia abajo para hacer que los cortes se alojen dentro de la cuchara, a esto se le llama "cuchareo". Cuando las partículas cortadas son pesadas como pequeños fragmentos de roca o grava, se hace necesario agregar algo de lodos o bentonita en el fondo del pozo y agitar para poner en suspensión a dichas partículas y poder extraerlas con la cuchara.

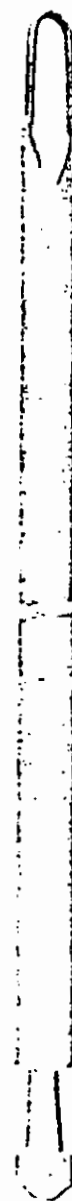
En la figura 30, se puede ver una válvula de espátula, que se abre al pegar en el fondo del pozo y se cierra al izarla. Este tipo se utiliza mucho, ya que permite golpear abajo agitando bastante.

En la figura 31, aparecen las herramientas que se utilizan para apretar o aflojar a toda la sarta de perforación.

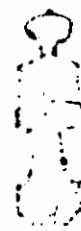


Llaves con palanca  
y cadena

Fig. 31

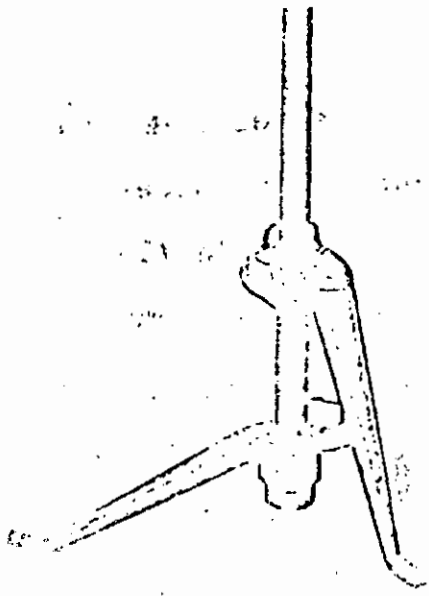


Cuchara



Válvula de  
espátula

Fig. 30



Como ya se señaló antes, también se utilizan, aunque poco, llaves tipo máquina rotatoria para apretar y aflojar la herramienta.

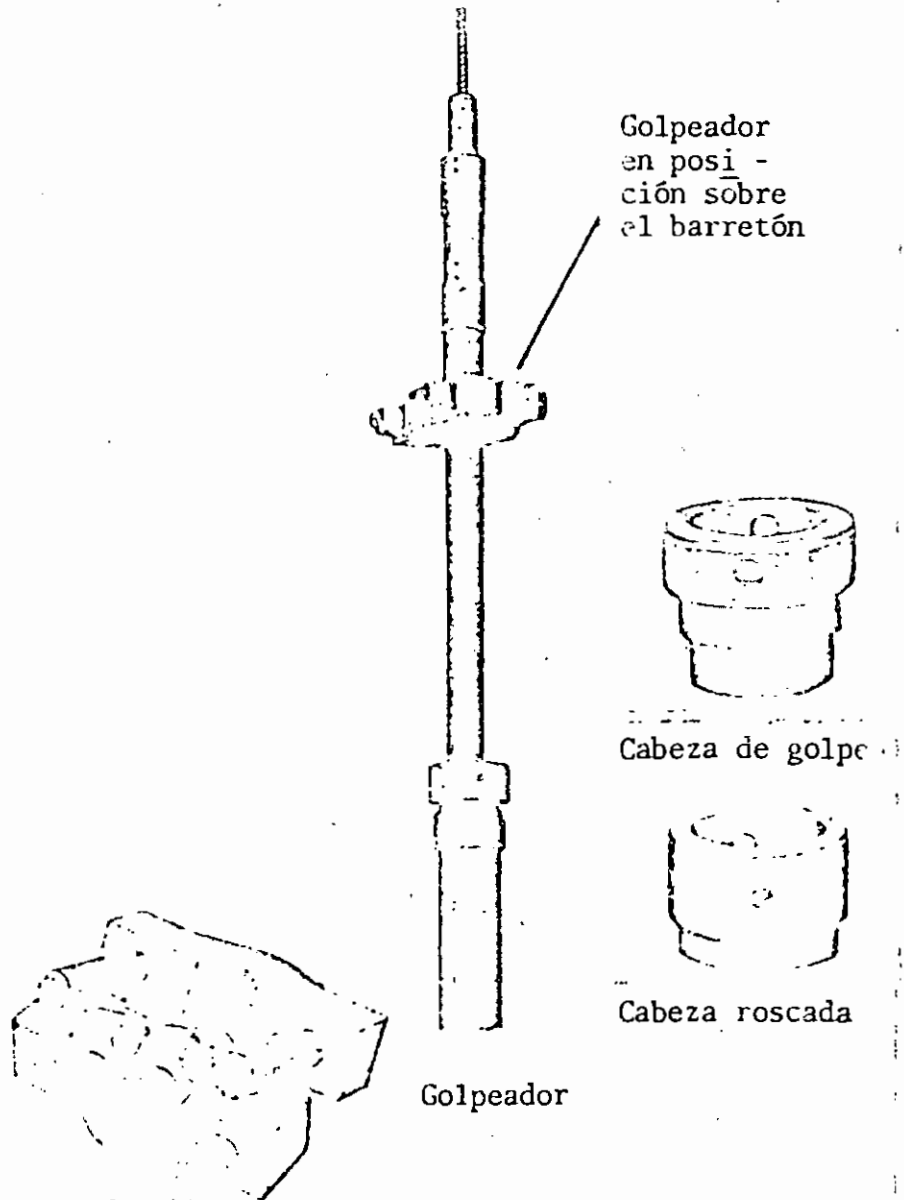
Estas llaves se usan especialmente cuando se maneja sarta de perforación de diámetros grandes y de mucho peso y fuerza de apriete.

Llaves para utilizar con gato y semicírculo.

Fig. 31

Para hincar ademes, se utilizan golpeadores como los que se muestran en la figura 32, con las herramientas auxiliares señaladas.

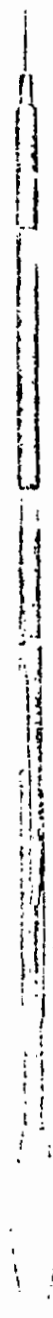
Fig. 32



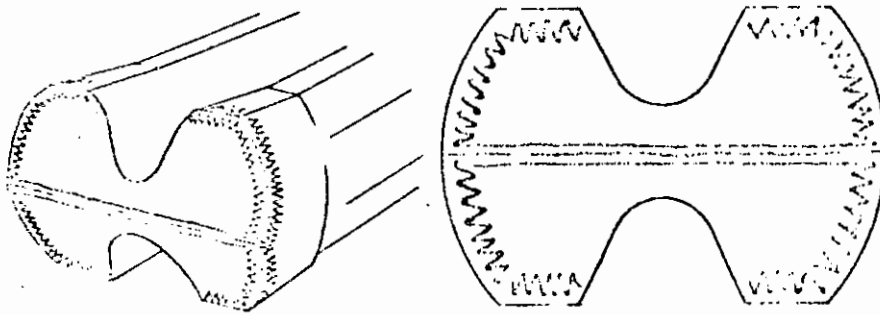
En el caso de que un ademe se haya colapsado dentro de un pozo o se haya cerrado por cualquier motivo y sea necesario abrirlo para dejar un paso libre, se utilizan los conos sólidos, como los que se observan en la figura 33. Se golpea abriendo hacia abajo y se saca con golpes hacia arriba.

Fig. 33

Conos para abrir ademes



Por último, se muestra en la figura 34, las partes más importantes de una broca que deben de revestirse con soldadura dura y muchas ocasiones con alta resistencia a la abrasión.



Revestimientos de brocas

Fig. 34

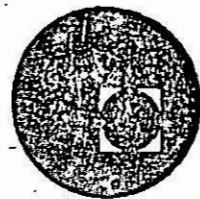
---

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

- WATER WELL DRILLING - Raymund W. Gordon
- WATER WELL TECHNOLOGY - Campbell y Lehr
- THE DRILLING OF ROCK - K. McGregor



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



## PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

### TEMA II: TECNICAS DE PERFORACION

#### 2.5 Perforación

Aire

Aire y Espumantes

ING. ANDRES BENTON CUELLAR

MARZO, 1978.



## LAS ROCAS Y SUS CARACTERISTICAS DE PERFORABILIDAD

### Rocas Igneas y su Perforabilidad

Las rocas ígneas son particularmente difíciles de perforar, especialmente donde se encuentran en estado inalterado o poco intemperizado. Lo anterior provoca que generalmente se tenga una vida muy corta de las brocas y velocidades de penetración muy bajas.

En general puede decirse que las rocas ígneas ácidas, altas en contenido de cuarzo como por ejemplo; las granodioritas, son muy duras, quebradizas y abrasivas, las básicas que contienen menos cuarzo y mas minerales ferromagnesianos por ejemplo; el gabbro, basalto, etc., son menos abrasivas, pero debido a la textura y disposición natural de los minerales ferromagnesianos tienden a ser rocas mas difíciles de perforar a pesar del hecho de ser menos dura y menos abrasivas.



## ROCAS SEDIMENTARIAS.

Como las rocas sedimentarias son formadas por acumulación de sedimentos en un medio acuoso, seco o una combinación de ambos y de la evaporación, durante el proceso, su naturaleza es muy variable y depende como es natural del tipo de roca que las originó, de su composición química, tamaño, tipo de cementante que contienen y de las cargas que soportan o hayan soportado todo esto hace que su grado de perforabilidad sea muy variable, pudiendo encontrar rocas muy difíciles de perforar por su dureza o muy abrasivas como algunas areniscas y algunas otras, como algunos tipos de lutitas cuya dificultad de perforación no es triba en su dureza o abrasividad sino en su coeficiente de abundamiento al hidratarse o en otros casos la falta de cementante, como es el caso de algunos rellenos del cuaternario.

## Rocas Metamórficas

En el caso de las rocas metamórficas como en el de las rocas ígneas, sus características de perforabilidad son producidas por su composición mineral, el tamaño de los cristales y su grado y tipo de alteración y/o recristalización.

En los 3 tipos de rocas hay otros factores a considerar durante la perforación que se agregan a lo mencionado, como son:

- a) Estructura
- b) Fracturamiento
- c) Fallamiento
- d) Estratificación
- e) Espesor de los Estratos
- f) Alternancia de los Estratos
- g) Intrusiones
- h) Tipo de Foliación
- i) Grado de Intemperismo
- j) Tipo de Intemperismo (físico o químico)

Las Diaclasas ocurren prácticamente en todos los tipos de rocas conocidas son producidas por las tensiones a que están siendo sometidas. El fracturamiento o el fallamiento provoca una pérdida de eficiencia durante la perforación, debido a que provoca una pérdida de circulación desde ligeras hasta totales, con la consiguiente disminución de velocidad de retorno aún en aquellos casos en que la pérdida de fluido es mínima, creando durante el recorrido del fluido zonas con muy diversas velocidades de circulación por los cambios bruscos de áreas, lo que produce en algunos casos la acumulación y el anillamiento del corte y la disminución de su potencial para el acarreo de los cortes, además de lo anterior el fracturamiento provoca que se tenga que usar menor velocidad de rotación de la herramienta de perforación para evitar la rotura de diamantes, insertos de carburo de tungsteno o de los dientes.



## 2.5 PERFORACIÓN

### AIRE

#### AIRE - ESPUMANTES

##### Perforación a Rotación con Aire

El proceso constructivo que se utiliza es prácticamente el mismo que el de los sistemas rotatorios de circulación directa y el único cambio que se tiene es la utilización del aire como fluido de perforación para mantener limpio el fondo del pozo, para el desalajo del corte de la formación, y para el enfriamiento de la broca.

El procedimiento de perforación con aire contempla la utilización de una

torre de perforación con kelly y mesa rotaria o con cabezal de rotación,

la sarta de perforación completa consistente en las tuberías de perforación,

lastrabarrenas, con sus combinaciones para hacer las conexiones

entre las diferentes roscas, sus portabarrenas, las llaves, cuñas y colla-

nines adecuados para el manejo de la sarta y por supuesto la broca ade-

cuada, en lugar de la utilización de la bomba de lodos que nos suministra

el lodo, debemos contar con el compresor y las mangueras y conexiones

de acuerdo al trabajo que se pretenda realizar además de una bomba alta

presión (poco volumen) que nos permita incluirle agua-espumante al aire

utilizado para la perforación

Método de Perforación.

La acción perforadora es debida a la rotación de una broca en el fondo del pozo, transmitida por una sarta de perforación manejada desde la superficie por un kelly y una mesa rotaria o un cabezal de rotación todo sostenido a través de cables por los malacates o por sistemas de transmisión a base de cadenas o una combinación de ambos.

La broca al girar corta y desmenuza el material conforme penetra en la formación, una vez realizada esta operación, limpia el fondo del pozo y desaloja los cortes con el fluido de perforación que se alimenta a través de la herramienta de perforación y que al descargar a través de la broca golpea el fondo del pozo limpiándolo de las partículas quebradas y ayudando en algunos casos a fracturar la roca, el fluido prosigue desplazándose hacia afuera del pozo acarreado los cortes a la superficie dejándolo limpio. Mientras la tubería y la broca prosiguen su movimiento hacia abajo profundizando el pozo, el fluido descarga en la superficie.

Para que pueda realizarse el trabajo de la broca es necesario aplicar peso sobre la misma, lo que se logra utilizando una parte del peso de las lastrabarreras, el peso aplicado dependerá de las características y estructura propias de la formación por atravesar y además de la capacidad de la máquina rotaria utilizada. Podemos decir que en el caso de las

máquinas para perforación de pozos de agua, que son por regla general prácticamente someros, no se tiene el riesgo de sobrepasar las especificaciones del fabricante de brocas en cuanto al esfuerzo que deben transmitir para su funcionamiento óptimo, esto tiene sus excepciones en algunas perforaciones profundas como es el caso de los pozos para abastecimiento de agua potable de la Cd. de Monterrey y algunos otros.

**Funciones de los Fluidos de Perforación.**

1. Enfriamiento de la Broca. - Es una de las funciones más simples y esenciales. Prácticamente cualquier fluido que pueda ser bombeado, cumplirá esta función.

2. Remover el Corte del Fondo del Barreno. - Al perforar un material o formación, los cortes producidos por la broca deben removerse continuamente del barreno. En algunos casos, ocurren caídos de la pared del barreno, éstos también deberán ser removidos.

La capacidad de un fluido de perforación para remover el recorte, dependerá de los siguientes factores:

- Peso específico de la roca que se esta cortando.
- Tamaño del recorte.
- Densidad del fluido.

- Viscosidad del fluido.

- Velocidad del fluido en el espacio anular.

Es sumamente importante el último punto, ya que puede suceder que en

secciones del barrenado donde se han erosionado mucho las paredes, el

espacio anular sea muy grande y la velocidad del fluido no sea suficiente

para mantener los cortes en movimiento hacia afuera del pozo, lo cual

produce acunamientos o atascamientos de la tubería de perforación.

La remoción de los cortes de una medida y densidad dadas con un fluido

de poca densidad requiere de una velocidad de circulación hacia arriba

superior a la que se necesitaría con cualquier fluido que presente una

mayor densidad, este es el caso del aire por lo que se agrega agua-espu

manté que le proporciona un soporte adicional de las partículas por la

tensión superficial del espumante. Cuando el fluido de perforación po

see una determinada densidad los cortes de determinada medida y densi

dad serán removidos fuera de la perforación bajo la misma velocidad de

ascenso.

Lo dicho anteriormente es válido para cualquier fluido de perforación.

A continuación se da un ejemplo del cálculo del retorno anular del corte

para una perforación con equipo semi petrolero; considerando que la ve

locidad de retorno recomendada es entre 70 y 125 pies/min = 23.3 a

41.6 m/min.

a. Considerando que contamos con bombas duplex Gardner Denver de

$5 \frac{1}{2}'' \times 8''$ , se obtienen los gastos siguientes:

Una embolada doble = 8.6 lts.

60 emboladas por minuto = 516 lts/min = 140 gal/min

70 emboladas por minuto = 592 lts/min = 164 gal/min

80 emboladas por minuto = 688 lts/min = 192 gal/min

b. Volumen del espacio anular, considerando la utilización para este

ejemplo de una tubería de diámetro  $3 \frac{1}{2}''$  I.F. que desplaza un vo-

lumen dentro del pozo de 6.2 lts/metro lineal.

Perforación  $\varnothing 9 \frac{1}{2}'' = 46$  lts/metro lineal

Perforación  $\varnothing 10'' = 51$  lts/metro lineal

Perforación  $\varnothing 7 \frac{7}{8}'' = 31.4$  lts/metro lineal

Utilizando perforación  $\varnothing 9 \frac{1}{2}''$  con tubería de  $3 \frac{1}{2}''$  I.F.

Tendremos que el volumen del espacio anular es de:

$46.0 - 6.2 = 39.8$  lts/ml

Velocidad de retorno

Con 60 emboladas:  $\frac{516 \text{ lts/min.}}{39.8 \text{ lts/ml.}} = 13.0 \text{ m/min}$

Con 70 emboladas:  $\frac{592 \text{ lts/min.}}{39.8 \text{ lts/ml.}} = 14.0 \text{ m/min}$



Con 80 emboladas:  $\frac{688 \text{ lts/min.}}{39.8 \text{ lts/ml}} = 17.3 \text{ m/min}$

Podemos observar que en este ejemplo será necesario utilizar dos bombas del tipo disponible para alcanzar la velocidad recomendada, para lograr la mayor eficiencia durante la perforación del pozo de  $9 \frac{1}{2}$ " de  $\varnothing$  con una tubería de perforación de diámetro  $3 \frac{1}{2}$ " I.F., o substituir las 2 bombas por una de mayor capacidad.

Lo anterior debe ser considerado como la base del rendimiento que se obtiene sobre todo en la perforación de materiales suaves donde al ir penetrando la formación vamos teniendo una gran cantidad de cortes que deben ser desalojados rápidamente para poder perforar y no provocar un atascamiento de la herramienta o un fracturamiento en la estructura de la formación que nos produzca caídas graves o pérdidas muy importantes del fluido de perforación que puedan llegar a ser totales.

El procedimiento de cálculo mostrado es el mismo que utilizaremos mas adelante para el caso de la perforación con aire substituyendo unicamente la acción de bomba por la del compresor.

3. Prevención de Derrumbes. - Dando una suficiente presión hidrostática diferencial dentro del agujero, se pueden mantener formaciones poco consolidadas en su lugar. La columna de fluido en un pozo - -

ejerce una determinada presión en cualquier dirección en un punto -  
 que se encuentre a una profundidad determinada. Teóricamente es-  
 ta presión puede ser aumentada hasta que sea suficiente para mante-  
 ner en su lugar cualquier formación, que de otra manera sin este -  
 soporte podría derrumbarse dentro de la misma. En la práctica, -  
 en la mayoría de los casos los fluidos se empiezan a perder agua -  
 hacia la formación atravesada, por lo que, cuando esto se conside-  
 ra de importancia es necesario mejorar las características del fluj-  
 do de perforación, tratándose de evitar la alteración de la formación -  
 con el agua filtrada y el depósito del gel en las paredes en espesores  
 importantes que provocan el taponamiento de las formaciones permea-  
 bles y o el atascamiento de la herramienta por una pegada diferen-  
 cial al adherirse las paredes de la sarta de perforación con el lodo -  
 que a su vez está adherido a la formación, lo que nos provoca la re-  
 tención de la sarta por la pequeña fuerza de adherencia, pero multi-  
 plicada por una área muy grande, dándonos una acción similar a la  
 de un pilote hincado, esta es una de las pegaduras menos deseadas -  
 por la dificultad de su rescate.

En algunas ancillas y otras formaciones que no están sujetas al con-  
 tacto con el agua, cuando un fluido de perforación las alcanza en -  
 cantidad suficiente, se expanden y cierran el calibre del pozo pueden  
 llegar hasta fallar resbalando dentro del agujero. Además debe evi-  
 tarse la excesiva entrada de agua del fluido a la formación, porque

al penetrar en las fracturas o planos de falla tiende a lubricar las partes arcillosas de las mismas, de manera que se facilita su movimiento hacia la perforación, como vemos se debe tener suficiente cuidado para no alterar la formación y tener resultados no considerados inicialmente.

En las formaciones poco consolidadas o inestables como las gravas, arenas, acarreos, etc., el fluido de perforación envuelve las partículas sueltas o poco estables con las que entra en contacto y las consolida por medio del soporte que les da la película con determinada resistencia de gel.

#### a.4. Control de Presiones de Gases, Aceites o Agua . En las Forma-

ciones Penetradas. Debe haber siempre una diferencia positiva entre la presión hidrostática de la columna del fluido de perforación y la presión de gas, agua o aceite en la formación penetrada, para que ésta pueda ser soportada. Si la presión diferencial dentro de columna hidrostática se vuelve negativa, los gases, aceites o agua a presión que se encuentran en la perforación invaden el agujero y desplazan el lodo; cuando el desplazamiento se vuelve continuo llega a provocar una expulsión violenta del lodo y materiales y el atrapamiento de la herramienta al derrumbarse el pozo por haber perdido su soporte, corriéndose además el riesgo de un incendio del equipo que se encuentra en la superficie, este accidente es comúnmente conocido como un "BLOW OUT" y sólo puede controlarse

- a.5. Lubricación de la Tubería de Perforación de las Paredes de Perforación del Ademe, de la Bomba y de la Broca. - Un buen fluido de perforación cubre todo con una película que sirve para lubricar, reduciendo pérdidas durante la rotación.
- a.6. Impedir la Corrosión. - Un buen fluido de perforación tiene un adecuado porcentaje de coloides que tienen que impedir la corrosión. - Para condiciones corrosivas muy severas, es aconsejable agregar inhibidores químicos de la corrosión, como el nitrato o el cromato de sodio.
- a.7. Sostener todos los Sólidos en Suspensión en el Fluido dentro de la Perforación, Particularmente Durante Interrupciones de la Perforación. - La fuerza de gel de un fluido debe ser suficiente para prevenir que los cortes y otros sólidos se asienten en el fondo del agujero. De una manera similar, los materiales sueltos en grietas e intersticios deben ser sostenidos y evitar su entrada a la perforación. La fuerza de gel varía sobre límites amplios, según el peso, viscosidad y medida de los cortes o caídos que contenga el lodo.
- a.8. Depositar todas las Arenas y Cortes en la Zanja o en la Fosa de Sedimentación. - Así como es importante la remoción de todas las arenas y cortes fuera de agujero y tenerlas en suspensión durante las interrupciones de la perforación, es igualmente importante, que la consistencia del fluido permita el asentamiento de la arena o de los

cortes en el canal o en la fosa de sedimentos. Estas funciones aparentemente opuestas, pueden obtenerse a través de un control muy cuidadoso de la viscosidad y de la fuerza de gel, en conjunto con un apropiado arreglo de los canales, mallas vibradoras y fosas.

#### a.9. Facilitar Movimientos de la Tubería de Perforación y de Ademe. --

Este movimiento es facilitado por medio de una correcta lubricación del fluido de perforación y manteniendo el agujero libre de una capa gruesa en las paredes de cortes y caídos.

NOTA: La habilidad de un fluido de perforación de llenar las funciones anteriores, excepto aquellas dadas por el peso unitario, es debida grandemente a la concentración de materiales coloidales en el fluido de perforación.

#### Propiedades de los Lodos de Perforación.

##### 1. Peso del Lodo o Densidad. -- La densidad de un lodo de perforación debe

controlarse con objeto de suministrar suficiente carga hidrostática para

impedir la entrada al pozo de fluidos del subsuelo, pero no tan grande --

que ocasione pérdida de circulación o afecte de una manera adversa la

velocidad de perforación.

La balanza de lodos Baroid se usa para determinar la densidad de un lo-

do en la cual se puede leer directamente la densidad en diferentes unidades.

- lb/gal      agua 8.33
- lb/ft<sup>3</sup>      agua 62.4

Gravedad específica: agua 1

Gradiente de presión en psi/1000 ft

2: Viscosidad del Lodo: Se define como la resistencia a fluir.

La viscosidad deseada en una perforación en particular, está influenciada por algunos factores, entre ellos: la densidad del lodo, tamaño del barrenó, capacidad de bombeo, velocidad de perforación, presiones requeridas y problemas del barrenó.

La viscosidad aparente de un lodo de perforación, se mide con el cono Marsh, y es el tiempo en segundos requerido para vaciar un litro de lodo contenido en el embudo a través de un orificio en el fondo.

Quando se perfora con un fluido a base de aire, a diferencia del lodo de perforación que mantiene limpio el agujero con una velocidad anular que puede considerarse baja, del orden de 70 - 125 pies por minuto, es necesario alcanzar velocidades de retorno de aproximadamente 3000 pies por minuto, por lo que el recorte es removido casi tan rápidamente como se forma, incrementando con esto la velocidad de penetración sobre

todo cuando se atraviesan materiales suaves y la producción de corte

es abundante, como ya lo hicimos notar, el aire como no proporciona el soporte en las paredes puede ser utilizado únicamente en formaciones que se tengan aún después de perforadoras; no puede utilizarse en arenas, materiales de acarreo o sueltos, que no presenten determinada cementación. Es particularmente útil en lugares donde se tiene graves problemas de abastecimiento de agua o en formaciones que presentan pérdidas totales de circulación que obligan a un gasto excesivo de bentonita y agua y que no solucionan el problema de la extracción de los cortes.

Existe otra propiedad que se utiliza con gran ventaja en este método, en

entre menos densidad y viscosidad presenta un lodo de perforación es mayor el rango de penetración de la formación; es decir, se perfora más rápidamente con aire que con agua y más rápidamente con agua que con lodo; por lo anterior siempre que sea posible y en lugares donde existan pequeñas o grandes pérdidas de circulación, este método puede ser usado con ventaja, esto es posible por el incremento en la velocidad de extracción del corte como ya se mencionó.

A poca profundidad puede utilizarse aire únicamente como fluido de perforación, (+ 25 m) pero al profundizar o al encontrar materiales fracturados se tiene dificultades en el acarreo de los cortes a la superficie para facilitar la extracción de los materiales se adiciona una mezcla de agua y espumante con una bomba de mayor presión que el compresor uti-

lizado, produciendo con esto una columna con un peso específico muy --

bajo pero con gran capacidad de acarreo de las partículas de la forma--  
 ción por la tensión superficial de la película de las burbujas de espuman--  
 te.

El fluido aire-agua-espumante es la solución para la extracción del cor--  
 te y la lubricación y enfriamiento de las herramientas de perforación en  
 pozos profundos.

#### Perforación con Martillo Neumático (Sistema Down The Hole)

La perforadora de roca fue probablemente la primera herramienta neu--  
 mática. Originalmente fue diseñada para ser operada por vapor de --  
 agua, pero su aplicación en el túnele y la minería bajo la superficie --  
 forzó el uso de aire comprimido y consecuentemente al desarrollo de --  
 los compresores de aire. En 1861 se usó por primera vez en Europa --  
 la perforadora neumática en el túnele para la construcción del primer  
 túnel en los Estados Unidos en el año de 1866 se usaron perforadoras --

neumáticas, desde entonces su uso ha hecho posible muchas cosas, in--

dustrias enteras dependen de la excavación de bancos de materiales ro--  
 cosos o yacimientos mineralógicos.

Los sistemas de transportación, como ferrocarriles, caminos, super--



carreteras, han podido realizarse con mayor facilidad, debido al uso del aire en la perforación, las grandes Presas y Plantas Hidroeléctricas, canales, tuneles, sistemas de abastecimiento y de drenaje y muchas otras obras existen en la actual debido a las facilidades que han otorgado el uso de esta herramienta tan importante.

La primera perforadora usada estaba conectada al final de un recipiente que daba la acción pulsadora para quebrar la roca, y fue conocida como la perforadora de pistón. No fue sino hasta 1890 que la primera perforadora práctica de percusión o martillo fue perfeccionada, en la actualidad todas las perforadoras son martillos donde un pistón dentro de un cilindro se mueve rápidamente hacia adelante y atrás, golpeando directamente en la tubería de perforación o en la broca, éste último método reproduce el diseño original y es el denominado "Down The Hole".

La perforación con esta herramienta es una variante de la perforación con aire pero presenta mayores ventajas que la perforación con broca tricomica y aire, sobre todo en formaciones que presentan tendencias a desviar la herramienta o de una dureza alta que prolongue demasiado los tiempos de perforación.

En la Fig. VI-1-10 Martillo, presentamos un corte de este tipo de martillos que puede manejar brocas tricomicas desde 4 3/4" de  $\phi$  hasta 17 1/2" para perforar directamente a estos diámetros.

## El Martillo Neumático "Down Hole"

Este es el martillo más eficiente de todos, y el pistón golpea directamente sobre la broca y prácticamente la sigue dentro de la perforación.

La broca utilizada generalmente, es parte integral del martillo, pero sin embargo es posible la utilización de brocas tricónicas acopladas en lugar de las usuales de carburo de tungsteno.

El aire necesario es suministrado a través de la tubería de perforación y proporciona la potencia y el fluido de limpieza del fondo del agujero y

acarreo y desalojo de las partículas cortadas hacia la superficie. Para

barrenaciones en bancos para voladura de rocas se puede utilizar aire

seco y será necesario contar con colectores de polvo en la superficie

que faciliten el trabajo y eviten el deterioro del equipo de perforación

pero en el caso de perforaciones para exploración o construcción de pozos

profundos, no es necesario utilizar el aditamento citado por ser

obligado el uso de aire con agua espumante, como ya se mencionó

La rotación necesaria para la operación les es transmitida por la mesa

rotaria o cabezal de rotación desde la superficie a través de la sarta

de perforación.

En el mercado encontramos una variedad amplia de martillos que gene-

ralmente cubren comercialmente el rango entre 4 3/4" de  $\varnothing$  y 17 1/2" de  $\varnothing$  aunque sobre pedido ya se fabrican hasta de 30" de  $\varnothing$  como los usados en el caso particular del tendido del oleoducto en Alaska.

Cuando se utiliza el martillo para perforar, se trabaja a bajas revoluciones de la rotaria (entre 10 y 20 RPM) y se debe transmitir a través de la herramienta un peso que va únicamente de 1,000 a 3,000 lbs., no debiendo aplicar una carga mayor porque se impide el golpeo del martillo. LO anterior es una gran ventaja cuando se perforan formaciones que pueden dar lugar a desviaciones, porque la mejor práctica para evitarlas es la de aplicar poco peso a través de la columna de perforación, además en la perforación de pozos de gran diámetro se reducen pasos de rimado, al poder perforar directamente hasta 17 1/2" de  $\varnothing$ . Debido a el uso de poca velocidad en la rotaria y la aplicación de poco peso, es muy pequeño el esfuerzo que se transmite al equipo de perforación lo que redundará en un menor deterioramiento de éste, al perforar materiales de gran dureza.

Este método exige la utilización de aire a una presión de cuando menos 250 lbs/pulg<sup>2</sup> y solo podrá utilizarse un compresor de 100 lbs/pulg<sup>2</sup>, usando martillos que operen a baja presión y solo en aquellos casos en los que el pozo al perforarse no proporcione agua, con un compresor de 100 lbs/pulg<sup>2</sup> solo podrá llegarse al nivel freático en algunos casos de pozos para procesos constructivos, se puede utilizar el martillo con ai-

re a baja presión.

De acuerdo al diámetro de perforación se utilizan volúmenes de aire entre 450 y 2100 PCM resultando la velocidad de penetración en relación directa al volumen de aire utilizado que en el caso de la utilización de los martillos influye no sólo en la velocidad de extracción de los cortes sino en el número de golpes que transmite a la formación.

Con una buena operación y supervisión de los trabajos de perforación, podemos considerar que la perforación con martillo neumático es la más rápida tratándose de formaciones compactas o duras, sin embargo obliga a la utilización de herramientas de alto valor y de maquinaria auxiliar como son los compresores y bombas de alta presión, así como el uso de espumantes adecuados, por lo que el método incrementa el rendimiento pero también costos de perforación en una forma notable, su mayor ventaja es la reducción del tiempo en la construcción de un pozo.

Durante la perforación con martillo pueden encontrarse estratificaciones de materiales sueltos, zona en la que deberá repasarse lo suficiente hasta que el material suelto que fluye encuentre su ángulo de reposo o se contenga, también pueden encontrarse estratos de arcillas en cuyo caso será necesario incrementar la velocidad de rotación y aumentar la cantidad de espumante para mejorar la extracción del corte, en estos materiales es necesario que el perforista cuide sobre todo, el

no encajarse en la arcilla por aplicación de peso excesivo, lo que provoca que se embole la broca y se suspenda la circulación del aire.

El efecto del volumen de aire utilizado.

En el caso de perforación directa con broca tricónica, entre mayor volumen de aire se utilice, se tendrá una mayor velocidad de retorno y de transporte de los sólidos (cortes) y se mantendrá más limpio el agujero, lo que nos permitirá un avance mayor por no tener que remover cortes obteniendo un tamaño mayor de corte arrastrado.

En el caso del martillo neumático a mayor volumen utilizado (con la presión adecuada para vencer la carga dentro del pozo) se tendrá un mayor número de golpes del martillo a la formación y consecuentemente una mayor velocidad de penetración, además de la que se produce por la buena limpieza del fondo y el arrastre de partículas mayores.

El martillo es un motor recíprocante y tiene una cámara donde admite y expulsa el aire proporcionando la energía necesaria al pistón, entre ma-

yor sea el volumen de la cámara, mayor será la potencia del golpe transmitido y mayor será el avance en materiales que necesiten de este mayor impacto para hacerlos fallar, en el caso de perforación de materiales un poco más suaves será contraproducente utilizar el martillo

con mayor cámara de admisión porque dará menor número de golpes por

minuto.

Es evidente que si utilizamos un compresor 750 PCM para mover el martillo nos dará un determinado número de golpes por minuto y si ponemos 2 compresores 750 PCM en paralelo el volumen se duplicará, la veloci-

dad se duplicará así mismo para fines prácticos el número de golpes y así sucesivamente. Lo ideal según gráficas americanas de perforación

con aire es utilizar en un agujero de 12 1/4" de Ø cuando menos 3000 PCM, esto nos permite pensar en que cuando esto sea posible, cuando menos utilicemos 3 compresores 750 PCM alimentando un tanque a presión que sirva de regulador para obtener el rendimiento máximo. Se

anexa un instructivo de la Gulf Publishing Company sobre los volúmenes requeridos de aire o gas para la perforación donde se obtienen los CFM necesarios para lograr determinados rendimientos de perforación dependiendo del diámetro del pozo, del área anular (tubería usada) y la profundidad del pozo.

Deben considerarse esos datos solo como una guía puesto que son datos de trabajos realizados en las provincias petroleras norteamericanas y considerando condiciones de optimización, en la realidad, en la República Mexicana hemos perforado con volúmenes de aire menores o a diámetros que no cabrían dentro de esas especificaciones.

Practicamente hemos perforado a diámetros de 12 1/4" y a 17 1/2" de

diámetro con volúmenes entre 1500 CFM y 2100 CFM, con la correspondiente reducción en los rendimientos de perforación.

En forma por demás eficiente se pueden realizar perforaciones exploratorias de 6 1/2" de diámetro y tubería de 3 1/2" con 450 CFM, lo que nos da una velocidad de retorno de 2750 piés/min. aún la perforación de 8 5/8" de diámetro con tubería de 4 1/2" de diámetro, nos da 2540 piés/min. cuando usamos 750 CFM y al perforar 12 1/4" de  $\phi$  con tubería de 5 1/2" de  $\phi$  nos da velocidades de 2300 piés/min, el máximo rendimiento se obtendrá al utilizar 2100 CFM con una velocidad de retorno de 3200 piés/min.

**Presiones Necesarias.**

Cuando se perfora directamente con broca tricónica y aire se necesitará una presión suficiente para vencer la carga piezométrica en el acuífero por atravesar mas las pérdidas de carga en el sistema, esto permite perforar en algunos casos con compresores de baja presión, con las limitaciones que esto nos produce, siempre es recomendable la utilización de compresores de alta presión que nos dé una presión adicional que nos permita resolver cualquier problema que se presente durante la perforación que nos impida la circulación y pueda atrapar la herramienta.

Cuando se utiliza un martillo neumático deberá considerarse la presión de trabajo del mismo adicional a la necesaria para circular el fluido en

el sistema y para vencer la carga del agua que penetra al pozo.

Las profundidades a las que se puede perforar con el aire disponible -- pueden verificarse facilmente durante la perforación llevándose una gráfica de presiones - profundidades con la que se observa en nuestros manómetros por ejemplo en el caso del uso del martillo, la presión que nos marcarán será la suma de las pérdidas de carga en el sistema, -- mas la presión de operación del martillo, conforme vamos profundizando nos van aumentando las pérdidas de carga en el sistema y la pendiente que se observa es la causada por las pérdidas de carga por conducción, la pendiente proseguirá hasta donde se manifieste el nivel piezométrico que podrá mostrarse con un incremento violento de la presión de trabajo en nuestros manómetros y en una forma evidente en el

volumen de agua que retorna del pozo, esto en el caso de acúfferos con finados, o podrá observarse unicamente un cambio de pendiente que corresponde a la carga adicional producida por el agua que penetra el acúfero y el incremento del volumen de agua que retorna del pozo.

Manejando en esta gráfica las pendientes que vamos obteniendo se puede pronosticar la profundidad bastante aproximada a la que se puede llegar con las presiones entregadas por el compresor usado que serán evidentes al reducirse bruscamente la velocidad de penetración de la

formación y que en ocasiones son confundidas con problemas dentro del pozo.



En esta forma podemos programar hasta donde llegaremos a perforar con el martillo que generalmente alcanza las profundidades de diseño de las cámaras de bombeo.

Cuando es necesario profundizar y no se cuenta con mayor presión, se deberá quitar el martillo y proseguir con broca tricónica y aire, puesto que dispondremos de la presión que se utilizaba para operar el martillo, para proseguir profundizando el pozo, esa nueva profundidad es fácilmente programable reduciendo en el último punto la presión del martillo y

llevando una paralela a nuestra última pendiente hasta llegar a la presión disponible que corresponderá a la profundidad que puede programarse.

Cuando disponemos de un "Booster" o recompresor se integra el sistema y se podrán alcanzar mayores profundidades dependiendo de su capacidad.

Se puede observar la gran versatilidad que se obtiene con la combinación del sistema de perforación con martillo neumático y posteriormente con broca tricónica y aire, se perforará la parte correspondiente a la cámara de bombeo con el martillo, logrando con esto la mayor verticalidad posible en esa zona, además de que el ritmo de perforación de una misma formación es prácticamente desde el inicio del pozo cuando

no se puede contar con el peso de las lastrabarrenas y además se trans-

mient el menor esfuerzo a la perforadora con su menor deterioro, cuando ya no es posible utilizar el martillo ya existe la posibilidad de usar el peso de las lastrabarreras para proseguir con un buen ritmo de avance. Es necesario aclarar que aún utilizando martillos es indispensable el uso de lastrabarreras, ya no para proporcionar peso sino para rigidizar la sarta e impedir la desviación de la perforación por la acción pendular al encontrar el martillo, planos de contacto entre materiales duros y suaves.

Es recomendable diseñar el sistema compresor, perforadora, mangueras y conexiones de diámetros amplios y válvulas de seguridad adecuadas y válvulas check horizontales para evitar contrapresiones que no dañen el compresor o rompan mangueras, se debe dar preferencia al uso de tuberías de diámetro exterior grande (4 1/2", 5 1/2") y por lo mismo un diámetro interior grande que nos reduzca al mínimo las pérdidas de circulación. Sobre el martillo deberá de colocarse, si no viene integrado al mismo, una válvula check que tiene la función primordial de evitar que se invierta la circulación del agujero perforado al interior de la tubería cuando se tenga un paro inesperado o para hacer las conexiones de tubería, si no se tiene esta precaución se tapaná la broca y el martillo se calzará con partículas de corte, lo que provoca en algunos casos hasta el atrapamiento de la herramienta y en el mejor de los casos tendrá uno que sacar toda la sarta y desarmar y limpiar el martillo con la perforadora.

dida de tiempo correspondiente.

Es indispensable una limpieza absoluta en los tubos y conexiones por los que se deberá soplear perfectamente cada tubo antes de su conexión a la sarta, así mismo se debe contar con el sistema de lubricación de aceite que alimente en forma continua sarta y martillo.

### Brocas.

Son las herramientas que propiamente efectúan la perforación de una formación y están constituidas por conos dentados que son los elementos cortadores. Normalmente, cada broca consta de tres conos (brocas tricónicas), aunque hay también de dos rolles. Estos conos cortadores se fabrican en diferentes diseños, de tal manera que cada tipo de cono perfora en la forma más eficiente en cada una de las formaciones litológicas existentes.

Obviamente, en las formaciones suaves se obtendrán rendimientos muy altos en velocidad y en consumo de barrenas, en materiales duros se obtendrán penetraciones muy pequeñas y un gasto excesivo de la barrena.

Los rendimientos que se tengan con las brocas dependerá directamente de la selección del tamaño de los dientes del cono cortador; así, si van a perforarse formaciones suaves, deberán usarse barrenas de dientes

largos, lo cual evitará que los rollos se "atasquen" al acumularse el material (arcilla y lutitas) entre los dientes.

En formaciones que presentan alternancia en la estratificación o capas de materiales suaves con firmes o duros, es necesario escoger la que nos perfora la formación que nos limita la velocidad de penetración que puede ser la de mayor espesor o posiblemente la mas dura o considerar una solución intermedia.

Cuando se encuentran rocas duras a muy duras, poco abrasivas, deberán utilizarse brocas de dientes cortos y para el caso de materiales mas duros y abrasivos que los anteriores, los dientes deberán ser cortos a muy cortos. El número de dientes aumenta de acuerdo a la dureza y su tamaño disminuye hasta cuando la roca es extremadamente dura y muy abrasiva, donde se llega al uso de las brocas de botones de carburo de tungsteno.

Como guía muy general para darse cuenta del buen funcionamiento de las brocas tricónicas, se deberá observar el tamaño de las esquirlas del fondo del corte, el cual deberá estar entre tres y diez mm. de diámetro.

Cada fabricante tiene una diferente nomenclatura para sus tipos de barrenas para utilizarlas de acuerdo al tipo de material de que se trate.

En el caso de los martillos de perforación generalmente son de inser-

tos de carburo de tungsteno y construídas como una sola pieza con el zanco sobre el que golpea el pistón, pero también pueden ser utilizadas las brocas tricónicas de uso común conectadas a través de un zanco especial contruído con ese objeto.

Los fabricantes de brocas tricónicas no las garantizan en su uso para martillos por no estar construídas para este tipo de trabajo, pero pueden utilizarse adecuadamente y se deberá tener la precaución de solicitar la broca para aire "air blast", en el caso de perforación de basalos y otras rocas de muy alta dureza es conveniente una revisión periódica para poder detectar cualquier falla con oportunidad.

**Espumantes,** el espumante de sodio se obtiene al reaccionar el ácido dodesil-benzen-sulfónico con la soda.

El espumante (perfoam) es un detergente sintético que tiene propiedades de producción de alta espuma, que se obtiene neutralizando un ácido con un alcali que puede ser dietanolamina, monoetanolamina, amoniaco, sosa o potasa.

Al ácido dodesil-benzen-sulfónico lo hacen reaccionar con sosa y como producto nos dá el dodesil-benzen-sulfonato de sodio, que es una sal soluble que tiene la propiedad de hacer mas espuma que el jabón.

Además se le adicionan fosfatos solubles (hexametáfosfato y tripolifosfato de sodio) que tienen la función de "secuestrantes" para reducir la

dureza de los iones de Ca y Mg, formando un complejo soluble en agua, ablandandola, lo que permite que se haga mas espuma, además con estos fondos fosfatos se mejoran sus condiciones de tensión superficial.

Los espumantes no contienen los precipitantes que contiene el jabón que serían contraproducentes durante la perforación.

Viene envasado en tambores y aislados con bolsas impermeables para evitar su contacto con la atmósfera puesto que si permanece en contacto con la atmósfera se producen hongos en la superficie que dan mal olor, cuando han estado almacenados por un tiempo largo, es necesario agitar nuevamente la solución pues suelen precipitarse algunas de las sustancias en solución, con la agitación se obtiene la recuperación total de las funciones del espumante.

Para incluirlo en el aire comprimido se utilizan bombas pequeñas de pistón a alta presión, la presión deberá ser mayor que la del aire comprimido y contar con su válvula check para evitar algún daño y con los tanques

donde se succiona la mezcla agua-espumante una vez preparada.

La mezcla agua-espumante varía de acuerdo a lo soluble de la formación atravesada y a los iones que contenga y en cada caso debe experimentar

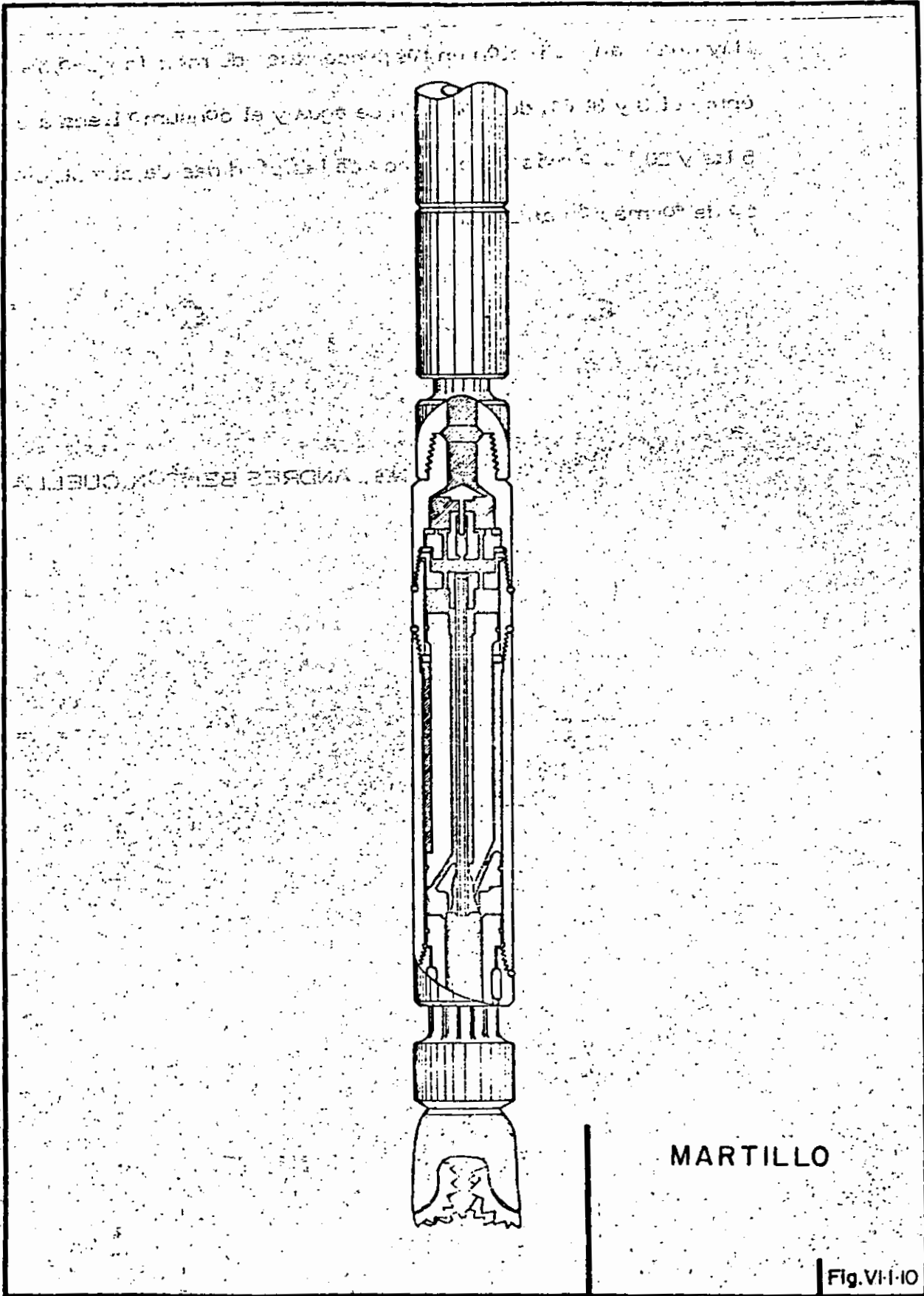
se en los primeros metros perforados hasta encontrar la mezcla que menea los cortes de tamaño adecuado rápidamente.

Hay una gran variación en los porcentajes de mezcla pero se preparan - entre el 3 y 31.6% del volumen de agua y el consumo llega a estar entre 5 lts y 20 lts o más dependiendo de las pérdidas de circulación y del tipo de formación atravesada.

ING. ANDRES BENTON CUELLAR

OLITHAIA

WIN:5



MARTILLO

Fig.VII-10



## AIRE COMPRIMIDO

**Definiciones:** Para los gases perfectos a: Para los gases perfectos a: Para los gases perfectos a:

### Capacidad del Compresor.

Se refiere al flujo del aire o gas comprimido, entregado de acuerdo a las condiciones de temperatura, presión atmosférica y composición del aire a la entrada del compresor.

### Desplazamiento del Compresor.

Es el volumen desplazado por unidad de tiempo y usualmente se expresa en pies cúbicos por minuto, por ejemplo: En un compresor recíprocante, es igual al área del pistón multiplicado por el desplazamiento del mismo y por el número de emboladas por minuto.

En el caso de multicompresores (booster) el dato que nos da el fabricante, corresponde al desplazamiento de los cilindros de baja presión únicamente, salvo una indicación contraria.

### Compresión Adiabática.

Se considera compresión adiabática cuando no se agrega o se quita calor al gas durante el proceso de compresión. La ecuación característica que relaciona la presión y el volumen durante este proceso es:

$$PV^k = C$$

que es la relación entre el calor específico a una presión constante y el calor específico a un volumen constante.

## COMPRESIÓN ISOTERMAL

Se realiza cuando la temperatura del gas permanece constante durante la compresión. Para los gases perfectos su producto presión por volumen permanece constante y su proceso es reversible.

### Relación de Compresión

Es la relación entre la presión absoluta de descarga y la presión absoluta de entrada.

### Eficiencia de Compresión

Es la relación entre los HPs teóricos y los HPs agregados al aire o al gas que entrega el compresor.

La potencia agregada es la potencia al freno menos las pérdidas de carga en el sistema.

### Eficiencia Isotermal

Es la relación entre el trabajo teórico calculado bajo una base isotermal y el trabajo agregado al gas durante la compresión.

### Eficiencia Mecánica

Es la relación entre los HPs agregados al aire o gas y la potencia al freno.

### Eficiencia Volumétrica

Es la relación entre la capacidad del compresor y el desplazamiento del compresor, este término no se aplica a los compresores centrífugos.

## AIRE LIBRE

Se define como aire libre aquel que se encuentra a las condiciones atmosféricas en cualquier lugar, se refiere a desplazamiento o capacidad.

## Potencia al Freno

Es la potencia que recibe el compresor a través de la flecha.

## Potencia Teórica

Son los HPs requeridos para comprimir el aire o el gas entregado por el compresor sin cambios de temperatura del mismo, a través de los rangos de presión especificados.

## Humedad relativa

La humedad específica es el peso del vapor de agua en una mezcla de aire vapor, por unidad de aire seco.

## Presión absoluta

Es la presión total medida desde el cero absoluto, desde el vacío absoluto.

Es la suma de la presión barométrica y la presión medida.

## PRESIÓN DE DESCARGA.

Es la presión absoluta total en la descarga del compresor, comúnmente se define como presión medida, pero a menos que se incluya la presión barométrica, no debe considerarse como "presión de descarga"

## Gravedad (Específica)

Es la relación entre el peso específico del aire o gas y el peso del gas seco a la temperatura y presión ambiente.

## Peso Específico

Peso específico de un gas es el peso del aire por unidad de volumen y a menos que se especifique, se refiere al peso por unidad de volumen en las condiciones de temperatura, presión y composición que prevalece a la succión en el compresor.

## Aire Standard

ASME se define como tal aquel que se encuentra a  $68^{\circ}\text{F}$ ,  $14.70 \text{ psi A}$  y humedad relativa de 35%. (Densidad 0.0750) pero en la industria la

temperatura del aire Std es de  $60^{\circ}\text{F}$

## FACTORES QUE SE DEBEN TOMAR EN CUENTA PARA LA

### SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA NEUMÁTICA

1.- **Peso de la Herramienta.** Una herramienta ligera es más fácilmente manejable.

2.- **Velocidad.** Entre mayor velocidad se imprima a la herramienta, más pronto se realiza el trabajo.

3.- **Potencia.** Con mayor potencia (cuando se necesita) se logra la estabilización de la velocidad a una carga determinada.

4.- **Medida.** Debe ser tal que pueda realizar el trabajo fácilmente.

5.- **Calidad.** Este es un factor muy importante a tomar en cuenta.

6.- **Uniformidad**

7.- **Mantenimiento.** Costos bajos en arreglos y mantenimiento.

8.- **Eficiencia Relativa.** La eficiencia de trabajo comparada con otros métodos para realizar el trabajo.

El escoger la herramienta adecuada hace posible a un operador realizar mejor su trabajo. El costo del uso de la herramienta misma más el costo del aire requerido es en ocasiones pequeño comparado con las consecuencias en el costo de una incorrecta selección del equipo.

**Adecuada Presión de Aire.** Evitar la pérdida de aire cuando se

A. La importancia de una adecuada selección de mangueras y el valor de una adecuada presión de aire es indiscutible, casi sin excepción las ma-

yores pérdidas de carga en cualquier sistema neumático se encuen-

-tran en las mangueras y conexiones, desafortunadamente no siempre

se le da la atención adecuada a la selección de mangueras y se llegan-

a tener pérdidas de carga exageradas, produciendo un efecto negativo

en la producción.

Las pérdidas mayores se encuentran en los sistemas que utilizan --

mangueras muy largas y o muy pequeñas, así mismo el uso de coples

niples, reducciones y un diseño geométrico inadecuado, provocan re-

ducciones importantes del aire entregado.

La altitud del sitio de operación afectará el volumen de aire libre --

requerido que depende no solo de la presión a la entrada de la herra-

mienta sino de la presión atmosférica del lugar.

El factor para convertir su volumen de aire comprimido a un volumen

de aire libre se obtiene al dividir la presión a la entrada (psiA) entre

la presión atmosférica (psiA)

A continuación damos una tabla con los coeficientes para obtener el --

volumen de aire requerido por una herramienta, cuando conocemos --

su consumo de aire libre al nivel del mar que es un dato que nos en-

trega el fabricante.

### Coeficiente de Corrección por Altitud

Piés	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
Metros	0	305	610	915	1220	1526	1831	2136
Coeficiente	1.0	1.02	1.05	1.08	1.11	1.14	1.18	1.22

Piés	8000	9000	10000	12500	15000
Metros	2441	2746	3050	3813	4577
Coeficiente	1.26	1.30	1.34	1.46	1.58

Este tipo de corrección y otros de flujo continuo

Existen métodos para determinar los

Métodos de flujo continuo

de flujo

Es más interesante en nuestro caso es el de flujo continuo a través de un tubo de vidrio y otros de flujo continuo

Para determinar los coeficientes de corrección

Orificios de flujo continuo

de flujo continuo y otros de flujo continuo

## COMPRESORES

### Propósitos de la Compresión.

La compresión de un gas tiene como objetivo entregar gas a una presión mayor que la existente originalmente.

La compresión tiene varios propósitos como son:

- 1.- Transmitir potencia
- 2.- Proveer aire para combustión
- 3.- Transportar y distribuir gas
- 4.- Circular gases durante proceso
- 5.- Para acelerar reacciones químicas, etc..

El más interesante en nuestro caso es el de transmitir potencia a través de un sistema de aire comprimido para mover herramientas neumáticas y de proveer la potencia necesaria que dará velocidad al fluido de perforación.

### Métodos de Compresión.

Existen 4 métodos para comprimir un gas.

Dos del tipo intermitente y dos de flujo continuo.

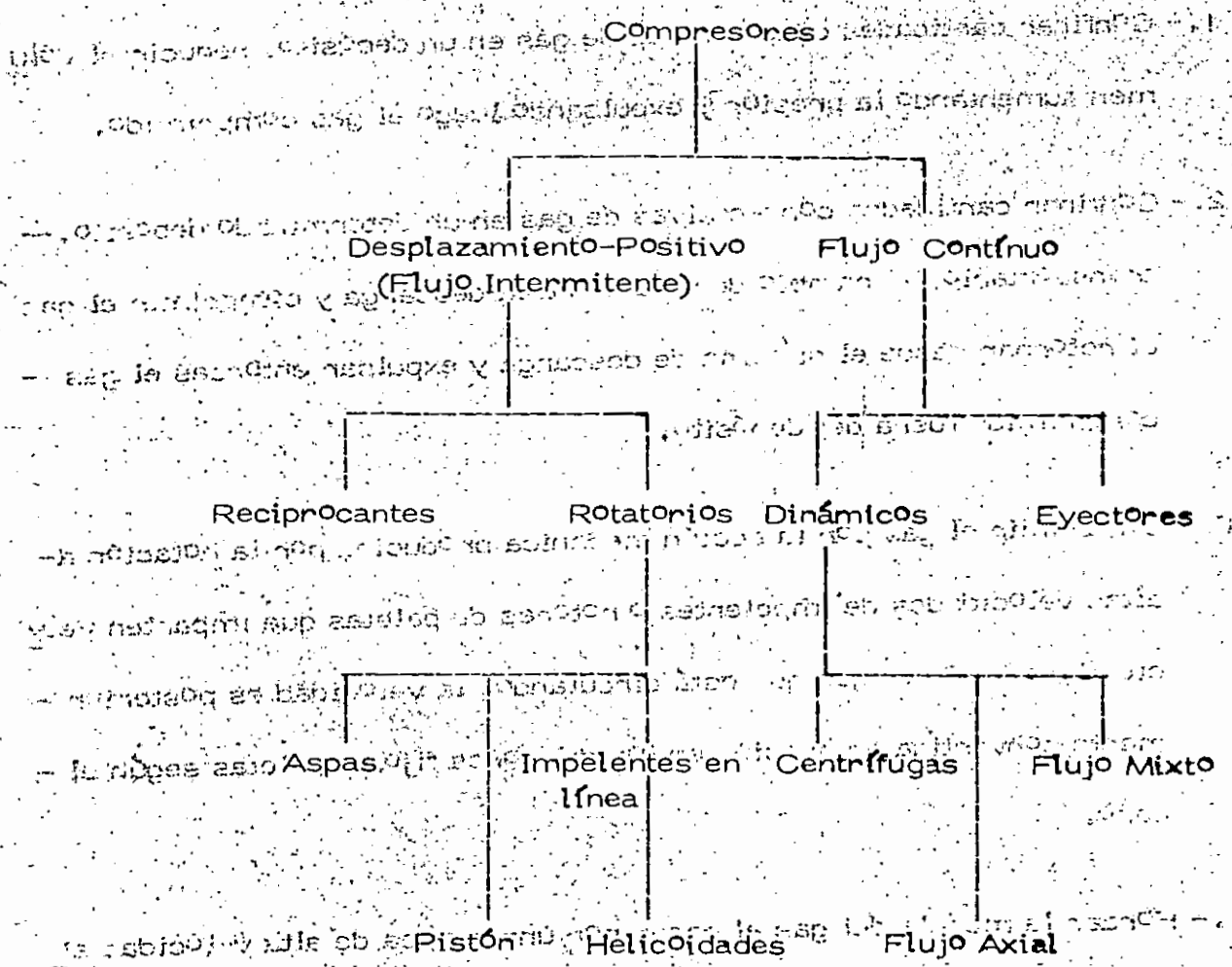


Estos métodos son:

- 1.- Confinar cantidades consecutivas de gas en un depósito, reducir el volumen aumentando la presión y expulsando luego el gas comprimido.
- 2.- Confinar cantidades consecutivas de gas en un determinado depósito, transportarlo sin cambio de volumen a la descarga y comprimir el gas al retornar desde el sistema de descarga y expulsar entonces el gas comprimido fuera del depósito.
- 3.- Comprimir el gas por la acción mecánica producida por la rotación a altas velocidades de impelentes o rotores de paletas que imparten velocidad y presión al gas que está circulando, la velocidad es posteriormente convertida en presión en los difusores fijos o paletas según el caso.
- 4.- Forzar la mezcla del gas al pasar por una espina de alta velocidad sobre el mismo o diferente tipo de gas (vapor de agua) y convertir la alta velocidad de la mezcla en presión en un difusor.

Los compresores que usan los métodos 1 y 2 son del tipo intermitente y son conocidos como compresores de desplazamiento positivo, los que utilizan el tercer método son conocidos como dinámicos y los que utilizan el cuarto método son conocidos como eyectores y normalmente operan con vacío en la succión.

# TIPOS DE COMPRESORES.



**Compresores de Desplazamiento Positivo.** Son aquellas unidades que

confinan volúmenes sucesivos de gas en un depósito y lo elevan a una mayor presión.

- 1) **Compresores Reciprocantes.** - El elemento de desplazamiento y compresión es un pistón que tiene un movimiento recíprocante dentro de una camisa.

2) Rotatorios. - En este caso la compresión y desplazamiento es producido por la acción positiva de elementos a rotación.

2a) De Aspas. - En los que aspas radiales se desplazan en un rotor excéntrico montado en un cuerpo cilíndrico. El gas atrapado entre las aspas al rotor, es comprimido y desplazado.

2b) De Pistón. - Aquí se utiliza un líquido como el pistón para comprimir y desplazar el gas manejado.

3b) Impelentes en línea. Dos impelentes de forma tabular comprimen gas y lo acarrear desde la entrada hasta la descarga. No hay compresión interna.

4b) Helicoidales. - Dos rotores interconstruidos cada uno con forma helicoidal comprimen y desplazan el gas.

Compresores Dinámicos. Son máquinas rotatorias de flujo continuo en el que la rápida rotación de los elementos acelera el gas, convirtiendo la carga de velocidad en presión, parte en los elementos de rotación y parte en los difusores estacionarios o paletas.

a) Centrífugas. - La aceleración del gas es provocada por uno o mas elementos rotatorios usualmente curvados en los extremos, -

el flujo principal es radial.

b) Axiales.- En este caso la aceleración es obtenida por la acción de rotores de aspas (paletas) redondeadas en los extremos, el flujo principal es axial.

e) De tipo mixto. Los impelentes tiene una forma combinada de - ambos tipos axial y centrífugo.

Eyectores.- Son artefactos que mezclan el gas al paso en una es- prea de alta velocidad, convirtiendó posteriormente la velocidad de- la mezcla en presión en un difusor.

VOLUME  
REQUIREMENTS  
for  
AIR & GAS  
DRILLING

By R. R. Angel

*Drilling Engineering Division  
Production Department  
Phillips Petroleum Company*



Published by  
GULF PUBLISHING COMPANY  
Houston, Texas

WORLD  
OIL  
AND  
GAS  
DRILLING

VOLUME REQUIREMENTS  
FOR AIR & GAS DRILLING

Copyright © 1958, by The Gulf Publishing Company.  
Printed in the United States of America. All rights  
reserved. This book, or parts thereof, may not be  
reproduced in any form without permission of the  
publishers.

U.S. DEPARTMENT OF  
COMMERCE  
BUREAU OF OIL RESOURCES



U.S. DEPARTMENT OF  
COMMERCE  
BUREAU OF OIL RESOURCES

## FOREWORD

This book presents the circulation rates that are required for air and gas drilling. These rates are the minimum necessary to produce velocities in the bottom of the annulus that are equivalent in lifting power to a standard air velocity of 3000 feet per minute. This standard air velocity is required for best results in drilling dry formations.

Each curve gives the air or gas requirements in standard cubic feet per minute versus depth for a particular drilling rate. Data for gas gravities of 1.0 (air), 0.8 and 0.6 are included. Circulation rates for intermediate gravities can be found by interpolation.

Each curve is a plot of solutions to the following equation:

$$\frac{6.61 S(T_s + G h) Q^2}{(D_h^2 - D_p^2)^2 V_s^2} = \sqrt{(P_s^2 + b T_{av}^2) e^{2ah/T_{av}} - b T_s^2}$$

Where:  $a = \frac{S Q + 28.8 K D_h^2}{53.3 Q}$

$$b = \frac{1.625 \times 10^{-6} Q^2}{(D_h - D_p)^{1.333} (D_h^2 - D_p^2)^2}$$

- $D_h$  = Hole diameter, Ft.
- $D_p$  = Pipe outside diameter, Ft.
- $e$  = Base of natural logarithms, 2.71828
- $G$  = Annular temperature gradient, °R/Ft.
- $h$  = Depth, Ft.
- $K$  = Drilling rate, Ft./Hr.
- $P_s$  = Pressure in the annulus at the surface, #/Ft.<sup>2</sup> Abs.
- $Q$  = Required circulation rate, standard Ft.<sup>3</sup>/Min. (60°F and 14.7 psia)
- $S$  = Specific gravity of the gas related to air, dimensionless
- $T_s$  = Surface temperature in the annulus, °R
- $T_{av}$  = Average down hole temperature in the annulus, °R
- $V_s$  = Velocity of standard density air, Ft./Min.

This equation includes the effect of the drilled solids on down hole pressures and velocities. It was derived by applying the Weymouth fraction factor to vertical flow. This derivation was presented in the author's paper 873-G, "Volume Requirements for Air or Gas Drilling" at the annual fall meeting of AIME in Dallas, Texas, on October 8, 1957.

The solutions that are presented in this book were obtained on a digital computer. The use of this computer saved about six months of slide rule calculating.

## ACKNOWLEDGMENT

The author wishes to express his appreciation to the management of Phillips Petroleum Company for permission to publish this material.



# CONTENTS

Hole Size in Inches	Pipe OD in Inches	Air 1.0	.8 Gas Gravity	.6 Gas Gravity
17½	6⅝	p. 1	p. 31	p. 61
	5½	p. 2	p. 32	p. 62
	4½	p. 3	p. 33	p. 63
15	6⅝	p. 4	p. 34	p. 64
	5½	p. 5	p. 35	p. 65
	4½	p. 6	p. 36	p. 66
12¼	6⅝	p. 7	p. 37	p. 67
	5½	p. 8	p. 38	p. 68
	4½	p. 9	p. 39	p. 69
11	6⅝	p. 10	p. 40	p. 70
	5½	p. 11	p. 41	p. 71
	4½	p. 12	p. 42	p. 72
9⅞	5½	p. 13	p. 43	p. 73
	5	p. 14	p. 44	p. 74
	4½	p. 15	p. 45	p. 75
9	5	p. 16	p. 46	p. 76
	4½	p. 17	p. 47	p. 77
	3½	p. 18	p. 48	p. 78
8¾	5	p. 19	p. 49	p. 79
	4½	p. 20	p. 50	p. 80
	3½	p. 21	p. 51	p. 81
7⅞	4½	p. 22	p. 52	p. 82
	3½	p. 23	p. 53	p. 83
7¾	3½	p. 24	p. 54	p. 84
6¾	3½	p. 25	p. 55	p. 85
6¼	3½	p. 26	p. 56	p. 86
	2⅞	p. 27	p. 57	p. 87
4¾	2⅞	p. 28	p. 58	p. 88
	2¾	p. 29	p. 59	p. 89

GAS GRAVITY

HOLE SIZE IN INCHES

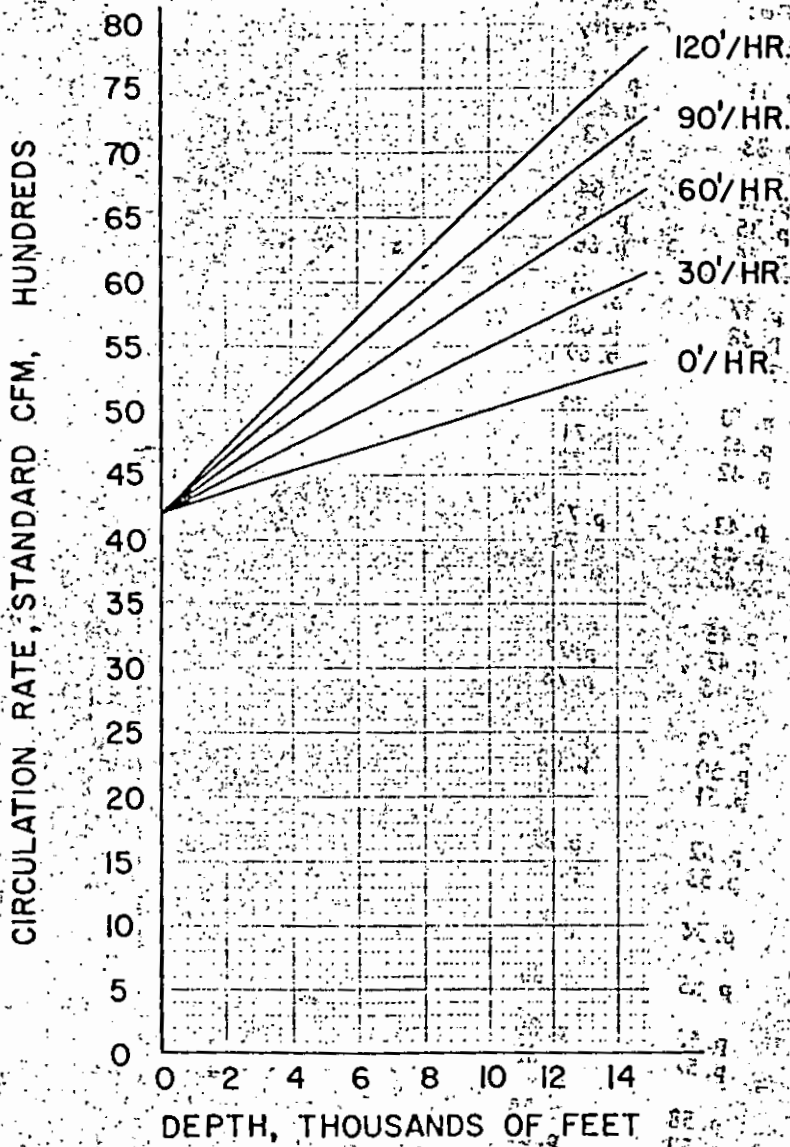
CALCULATION UNIT (MCM) (MCF) (M3) (M3)

DEPTH IN FEET

— 27 INCHES —

GAS GRAVITY 1.0

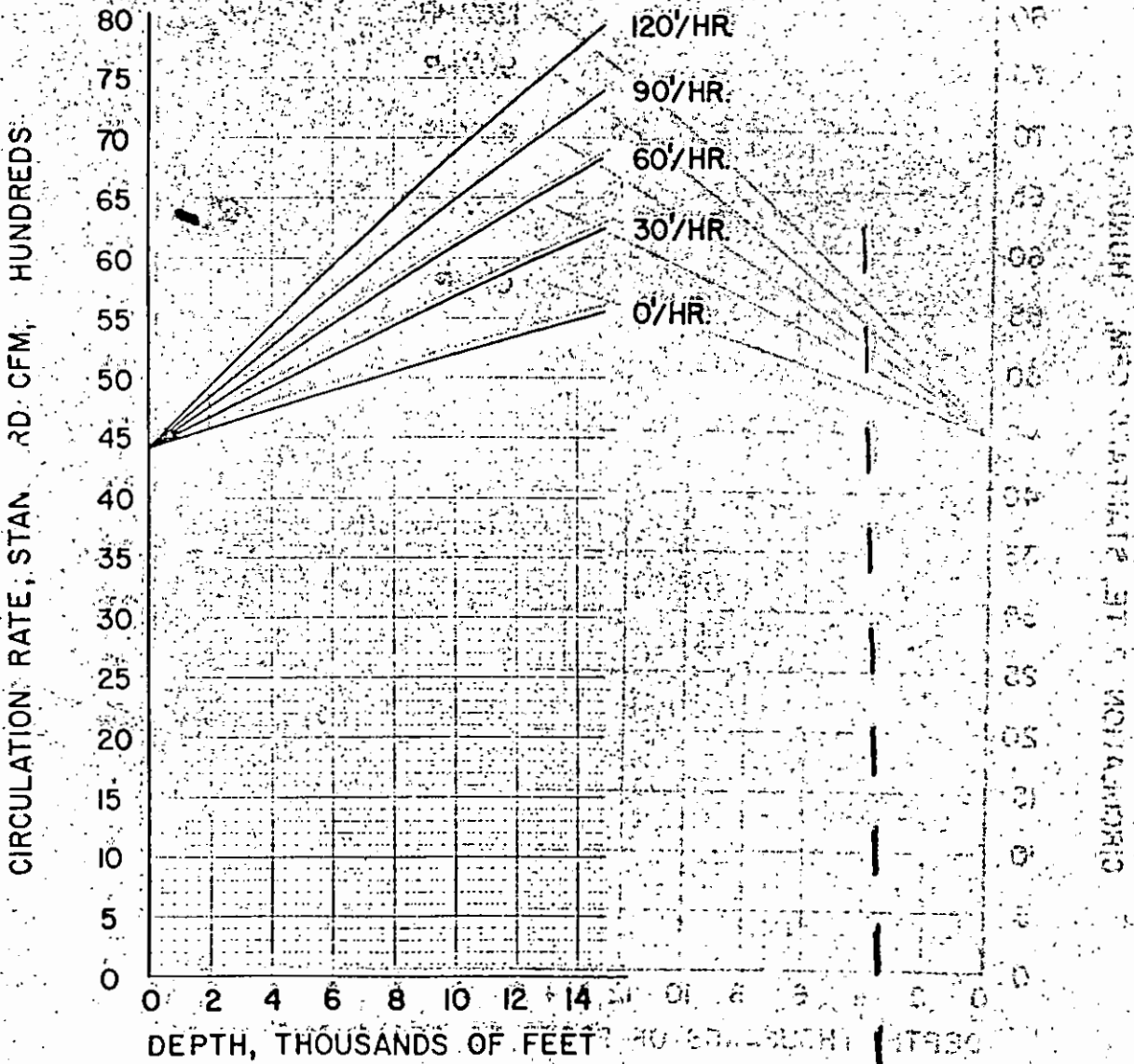
HOLE SIZE 17 1/2" DRILL PIPE O.D. 6 5/8"



VOLUME REQUIREMENTS — 1

GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 17 1/2" DRILL PIPE O.D. 5 1/2"



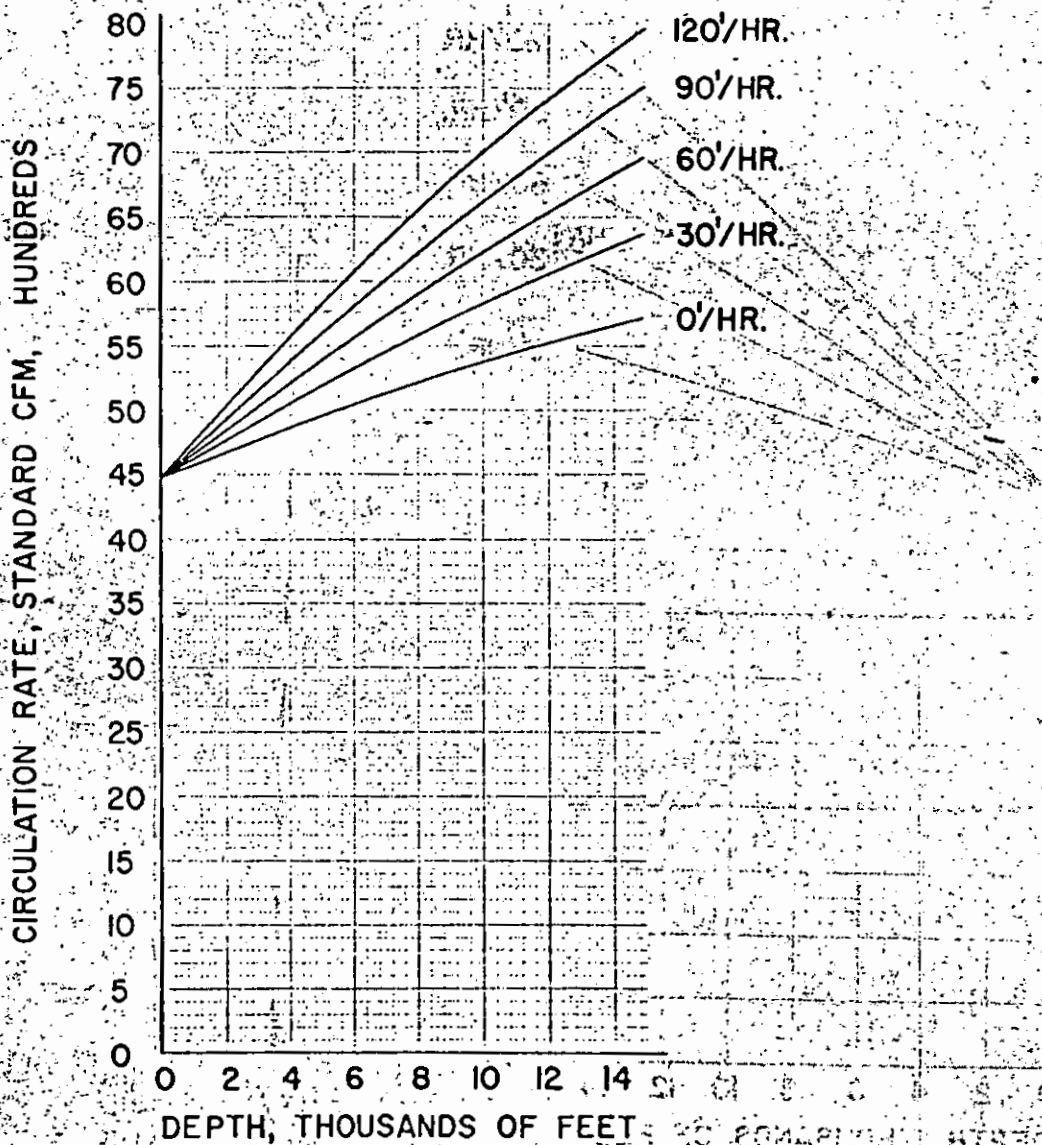
2 - VOLUME REQUIREMENTS

3 - FLOW VELOCITY

GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 17 1/2"

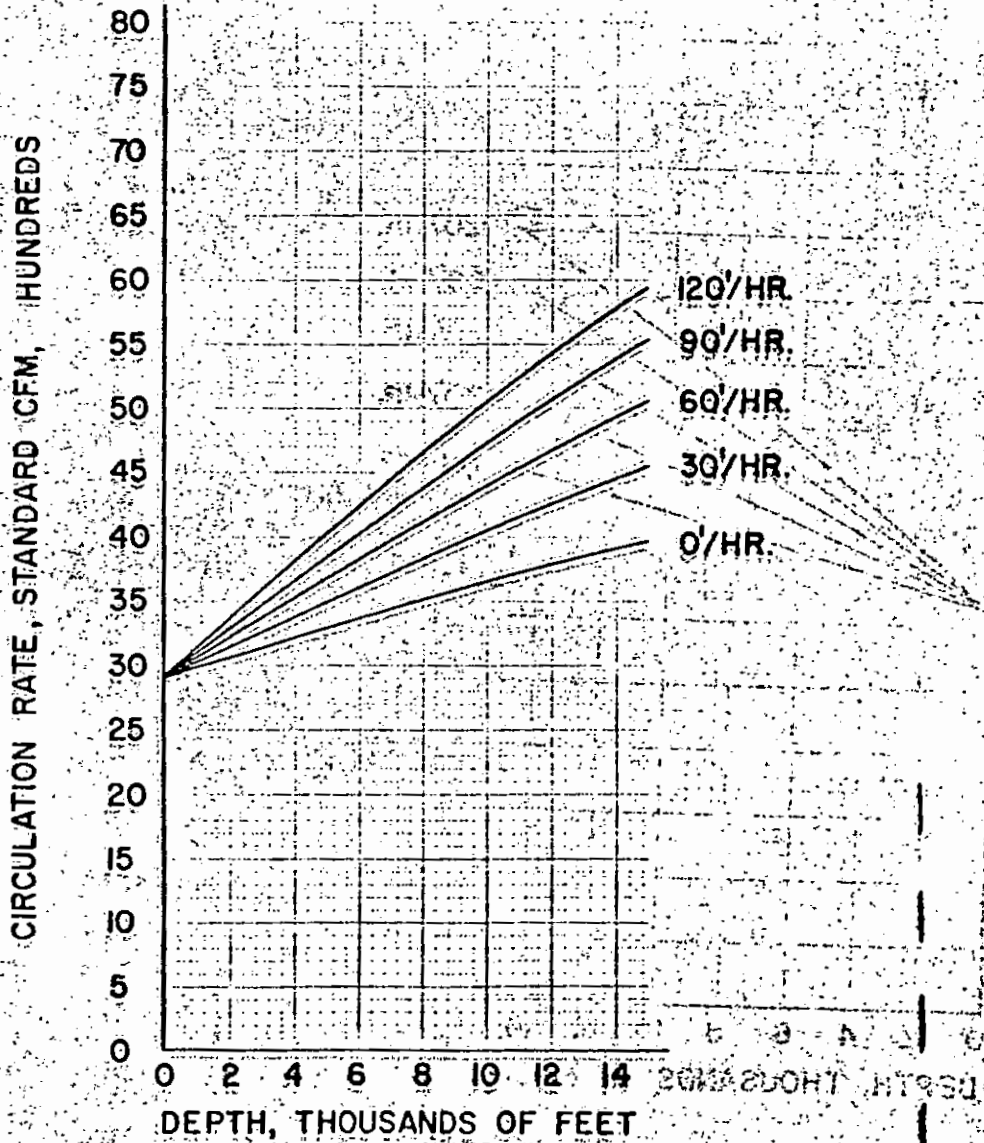
DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 15"

DRILL PIPE OD. 6 5/8"

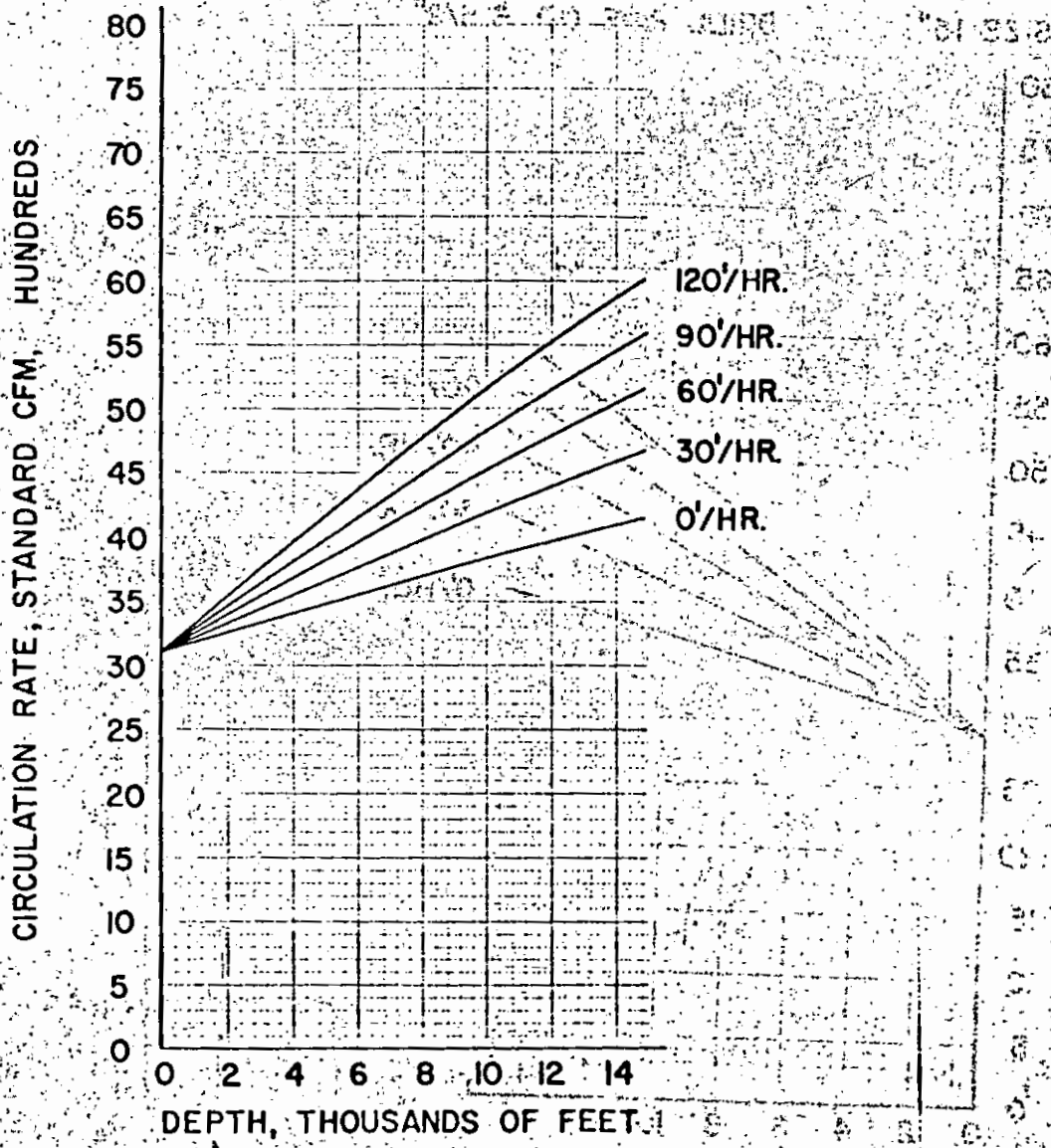


4 - VOLUME REQUIREMENTS

GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 15"

DRILL PIPE O.D. 5 1/2"



CIRCULATION RATE, STANDARD CFM, HUNDREDS

DEPTH, THOUSANDS OF FEET

FIELD TO BWAADHRY HINBO  
VOLUME REQUIREMENTS - 5

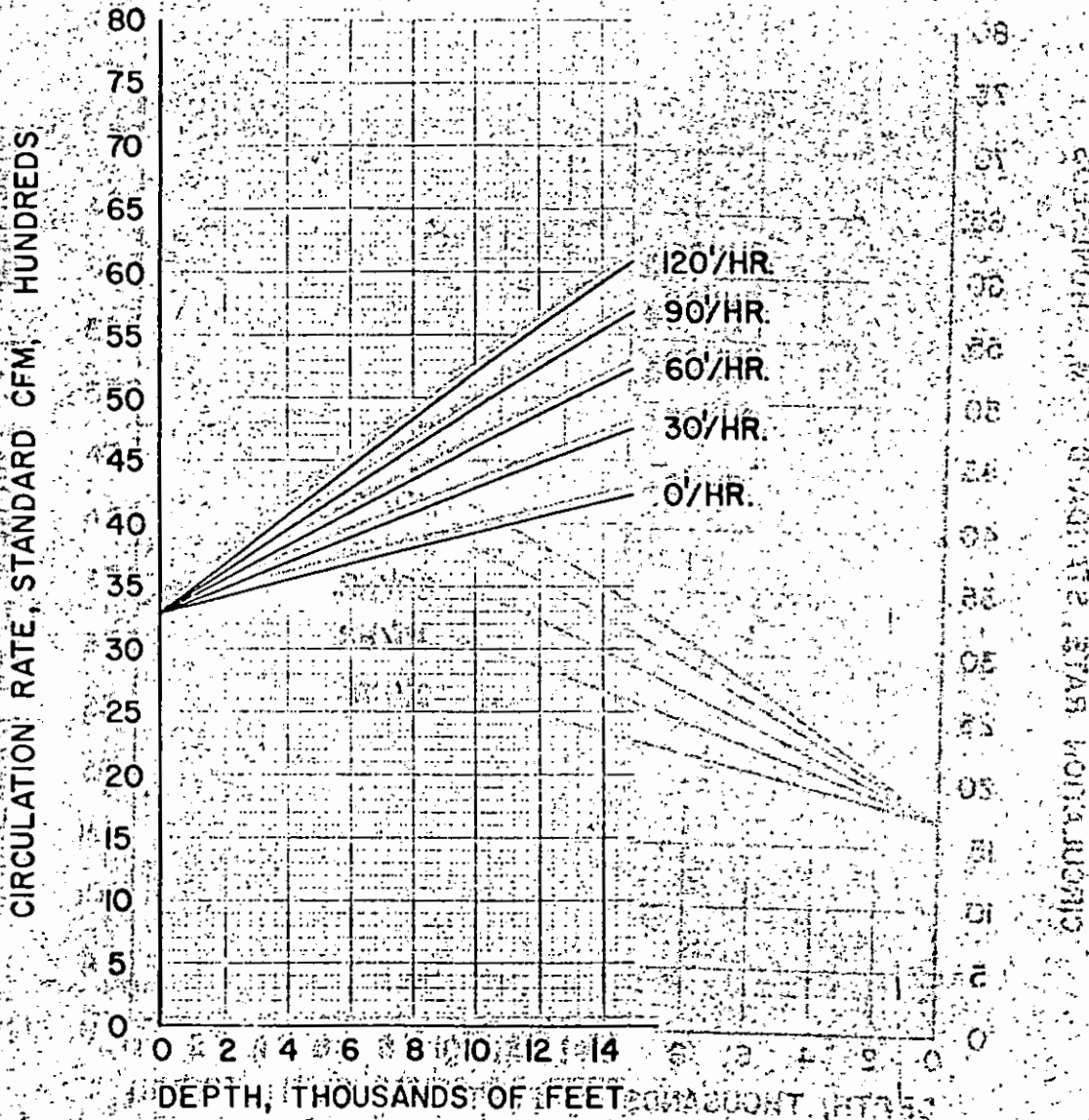
CIRCULATION RATE, STANDARD CFM, HUNDREDS

GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 15"

DRILL PIPE OD. 4 1/2"

WELL SIZE 2.0"

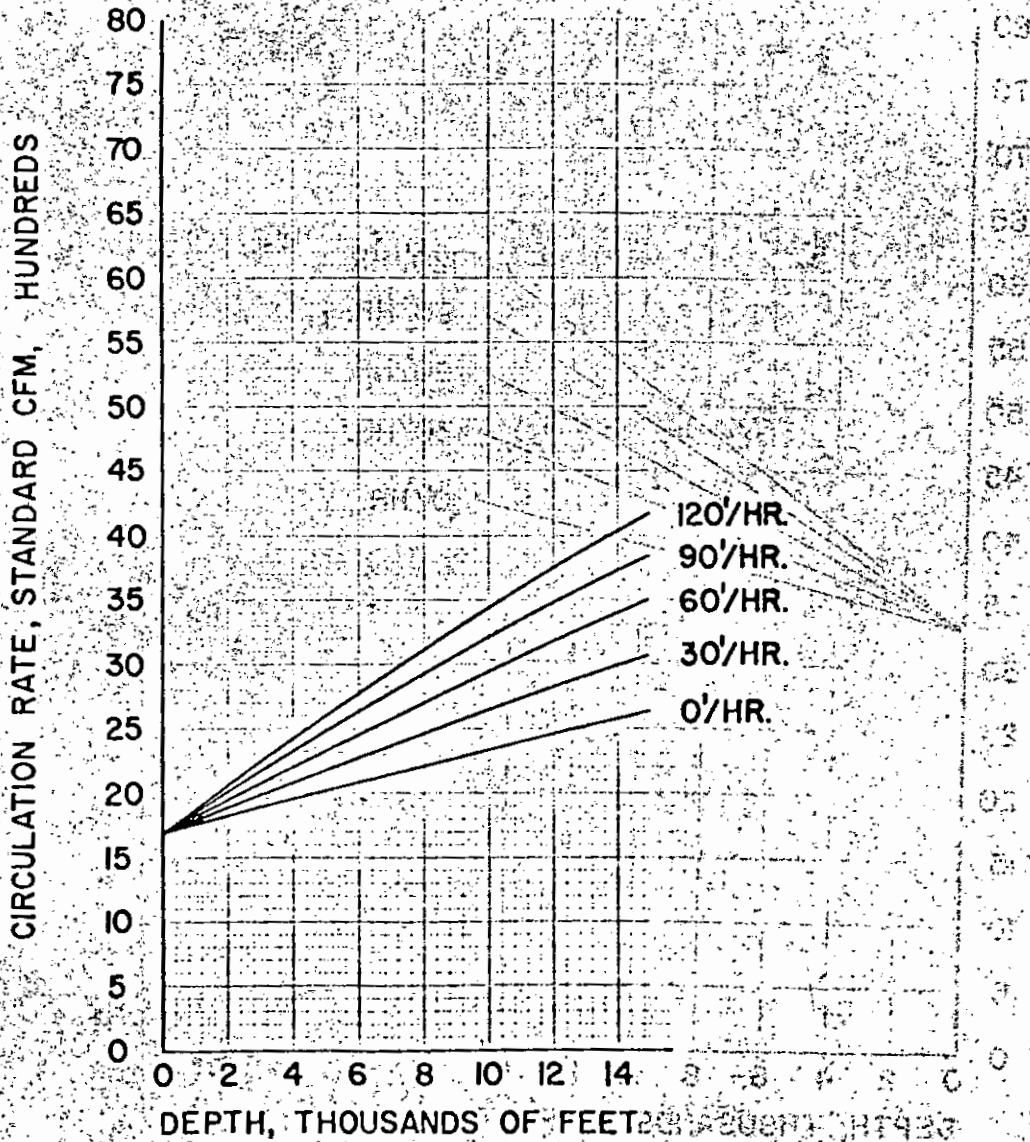


6 — VOLUME REQUIREMENTS — ELEMENTARY WELL

GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 12 1/4"

DRILL PIPE O.D. 6 5/8"



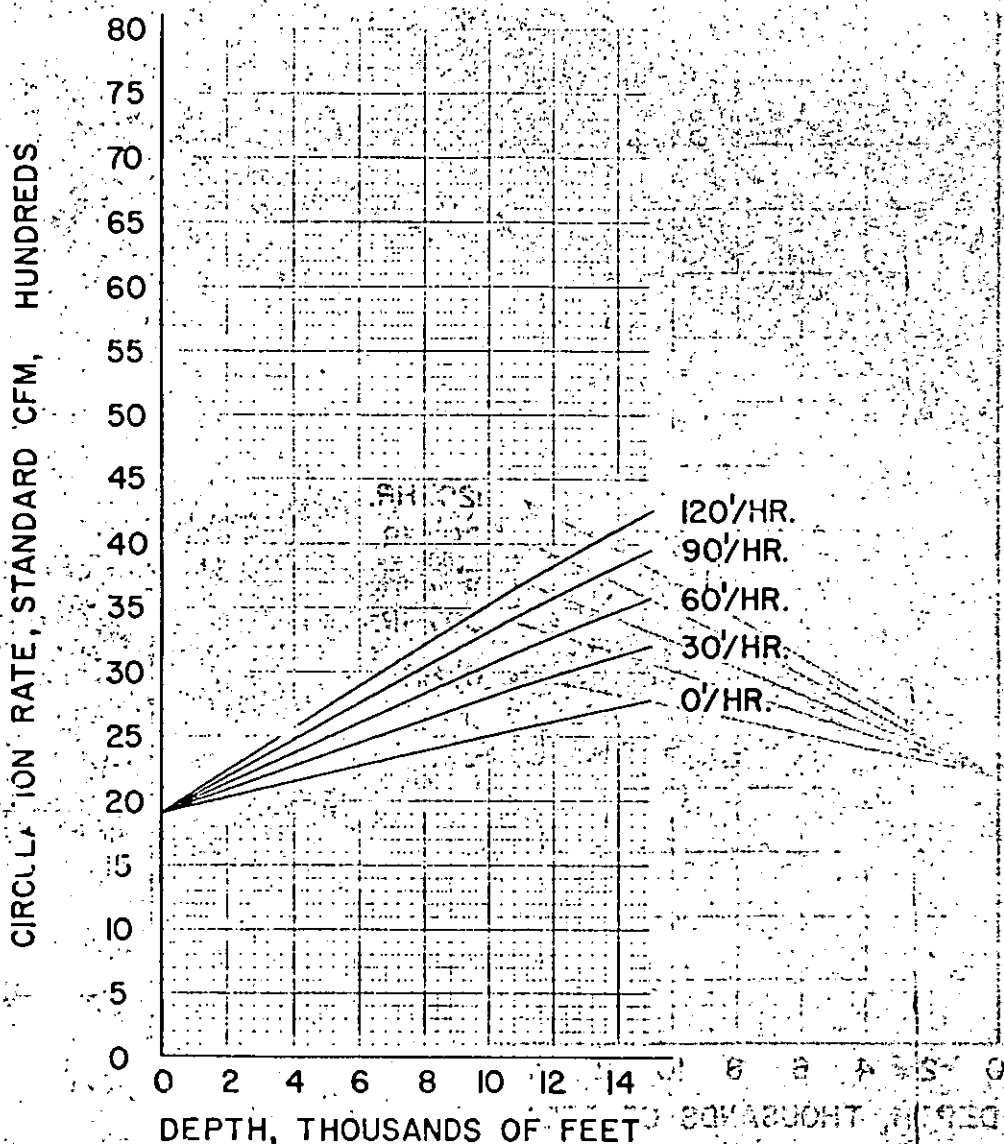
VOLUME REQUIREMENTS — 7



GAS GRAVITY 1.0

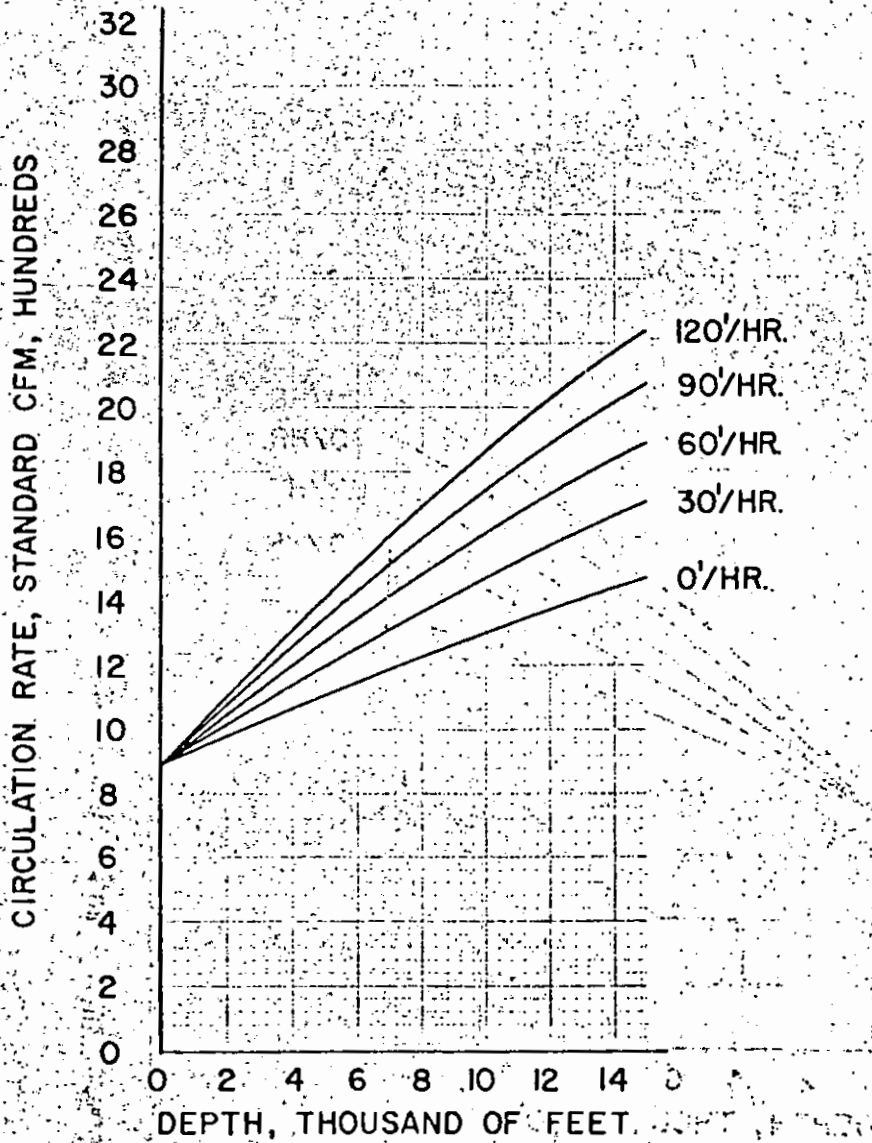
HOLE SIZE 12 1/4"

DRILL PIPE O.D. 5 1/2"



GAS GRAVITY 0.8

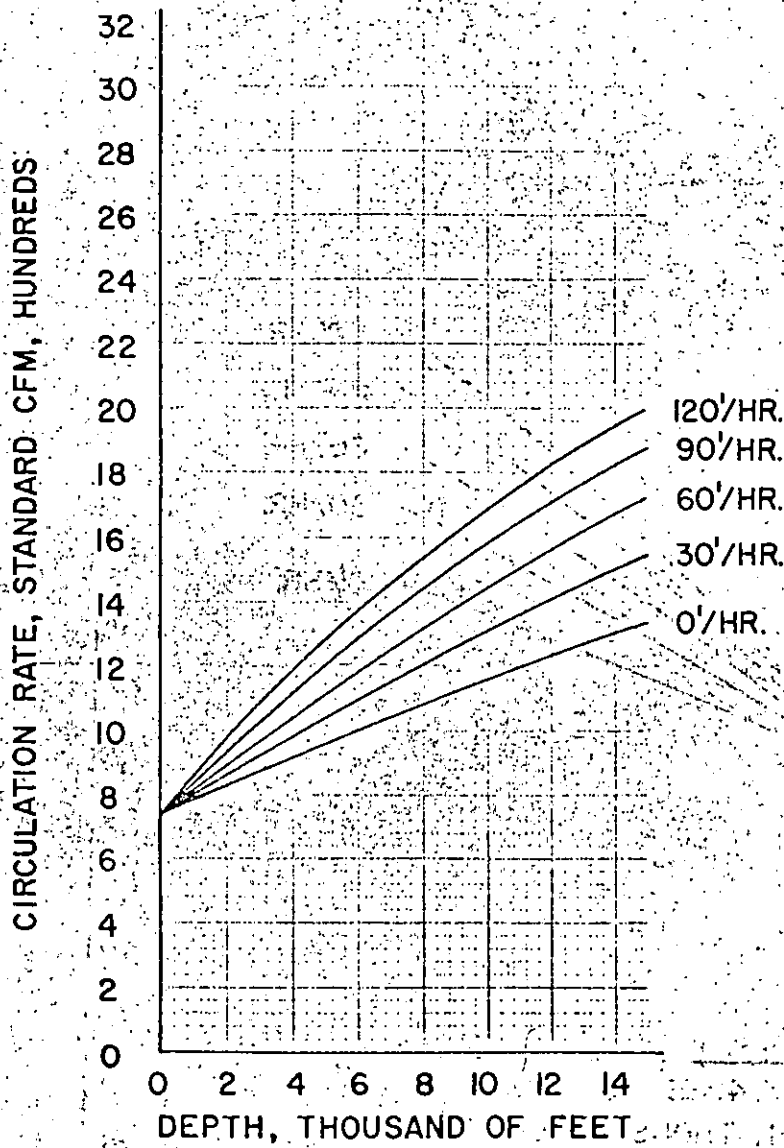
HOLE SIZE 7 7/8" DRILL PIPE O.D. 3 1/2"



VOLUME REQUIREMENTS — S3

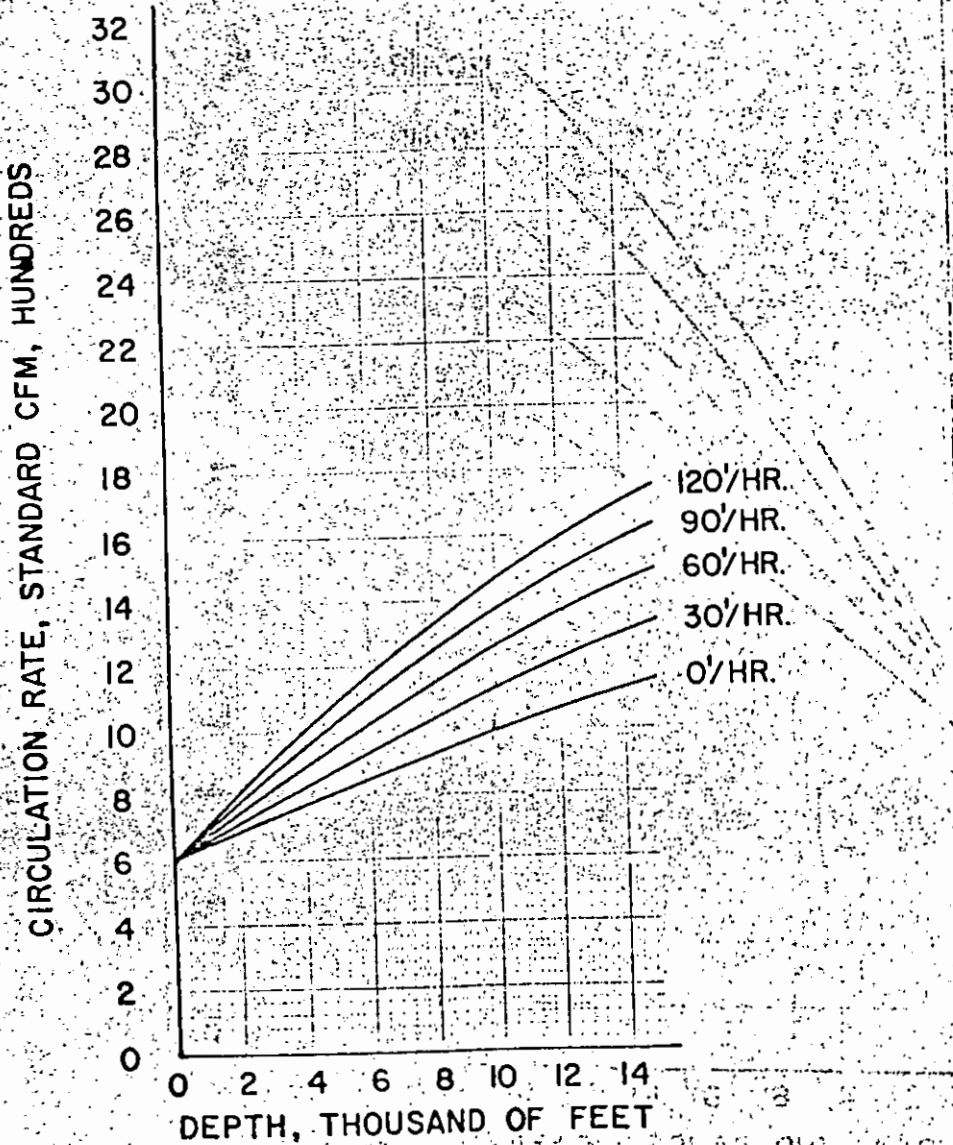
GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 7 3/8" DRILL PIPE O.D. 3 1/2"



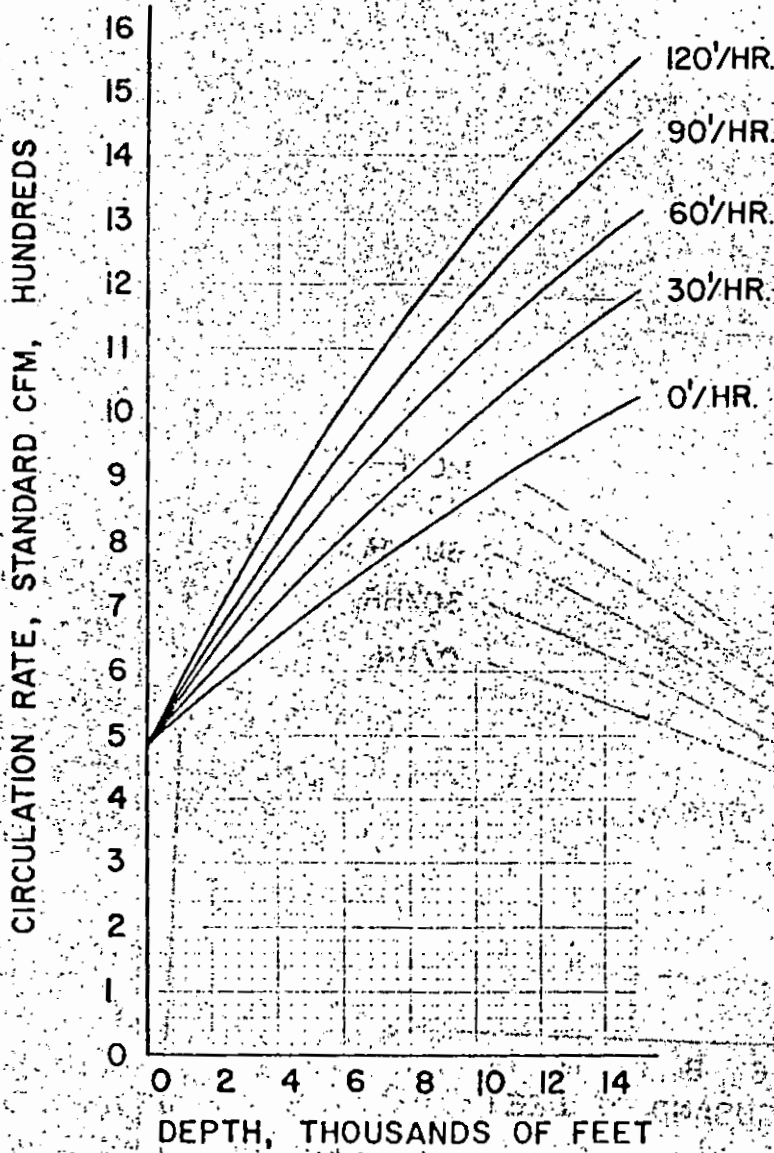
GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 6 3/4" DRILL PIPE O.D 3 1/2"



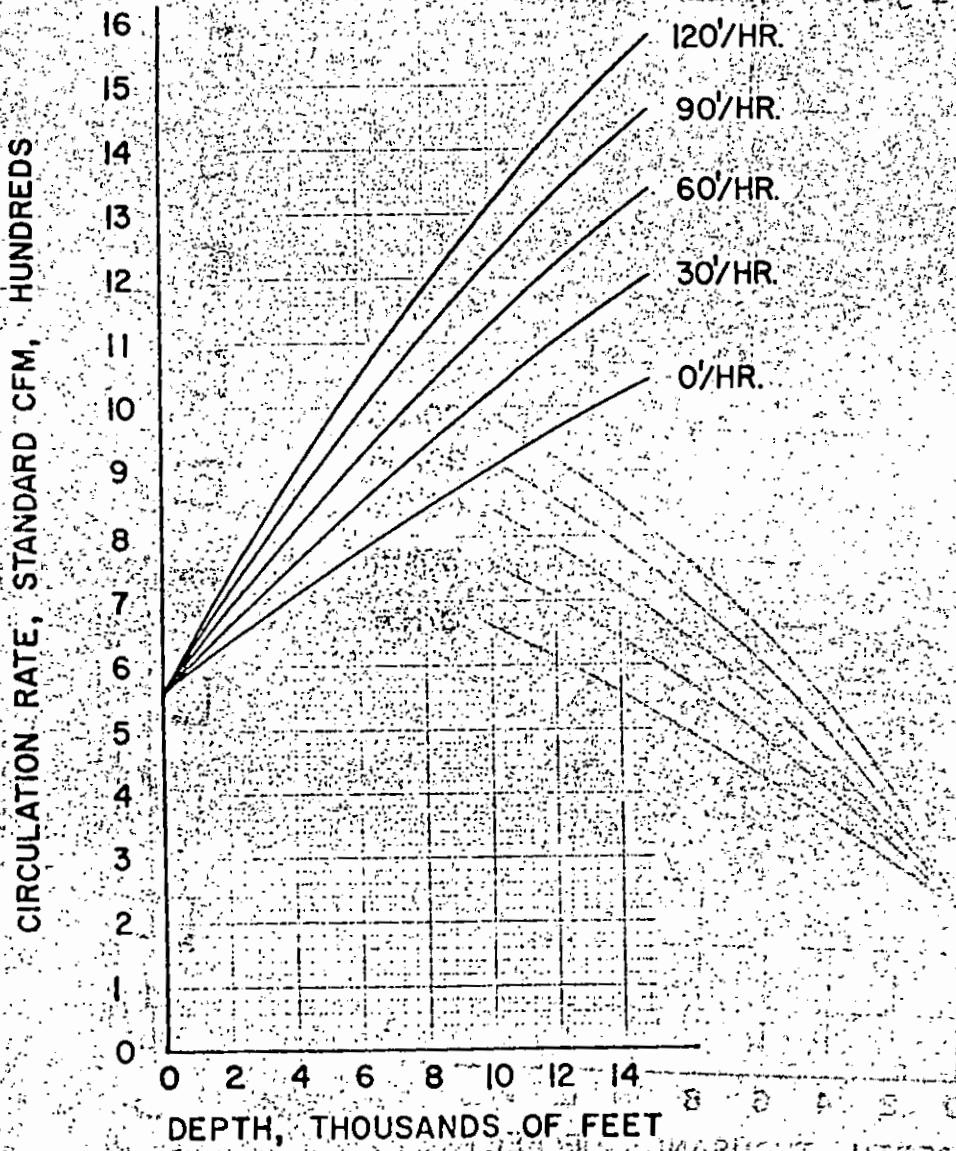
GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 6 1/4" DRILL PIPE OD. 3 1/2"



GAS GRAVITY 0.8

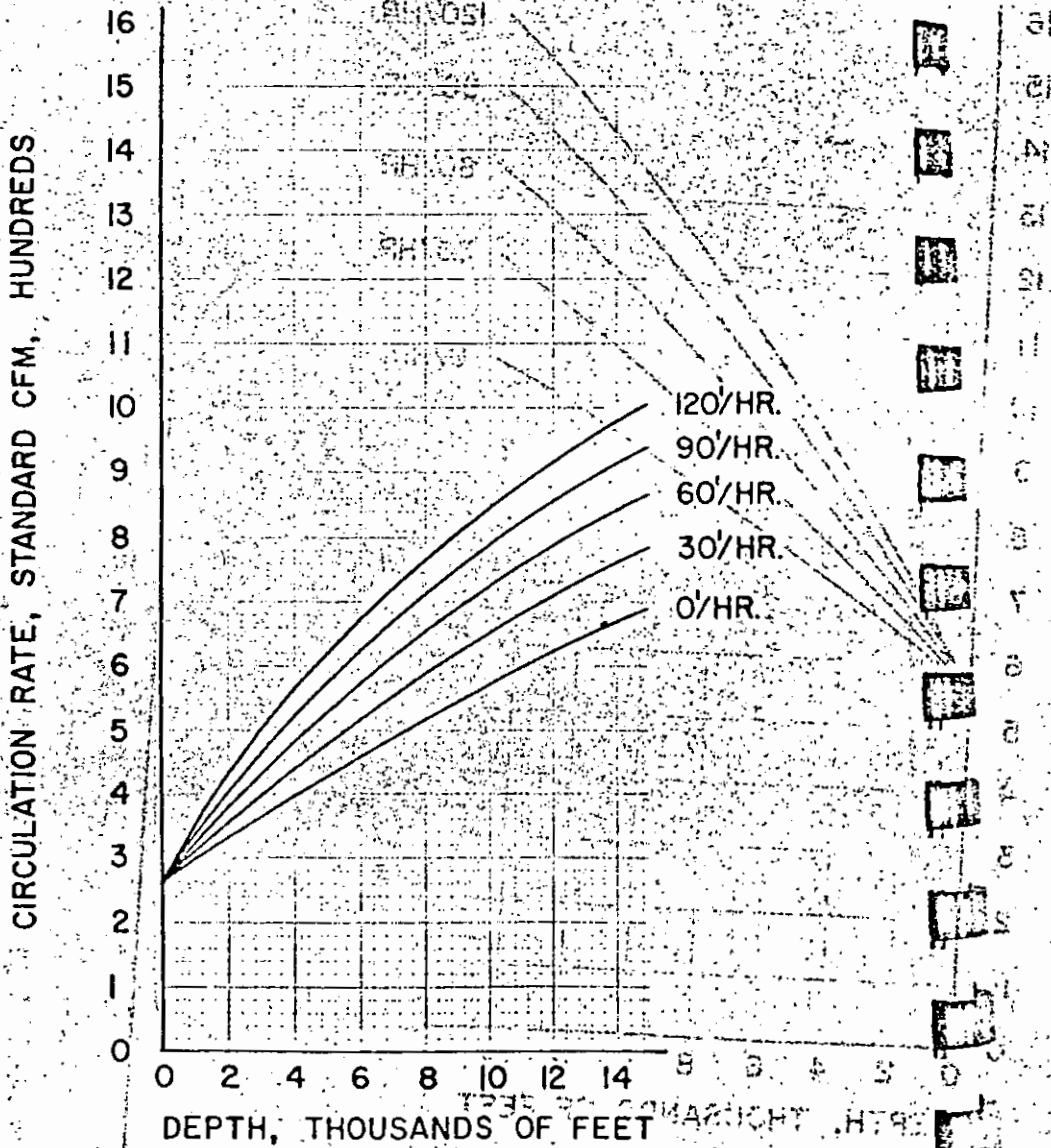
HOLE SIZE 6 1/4" DRILL PIPE OD. 2 7/8"



GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 4 3/4"

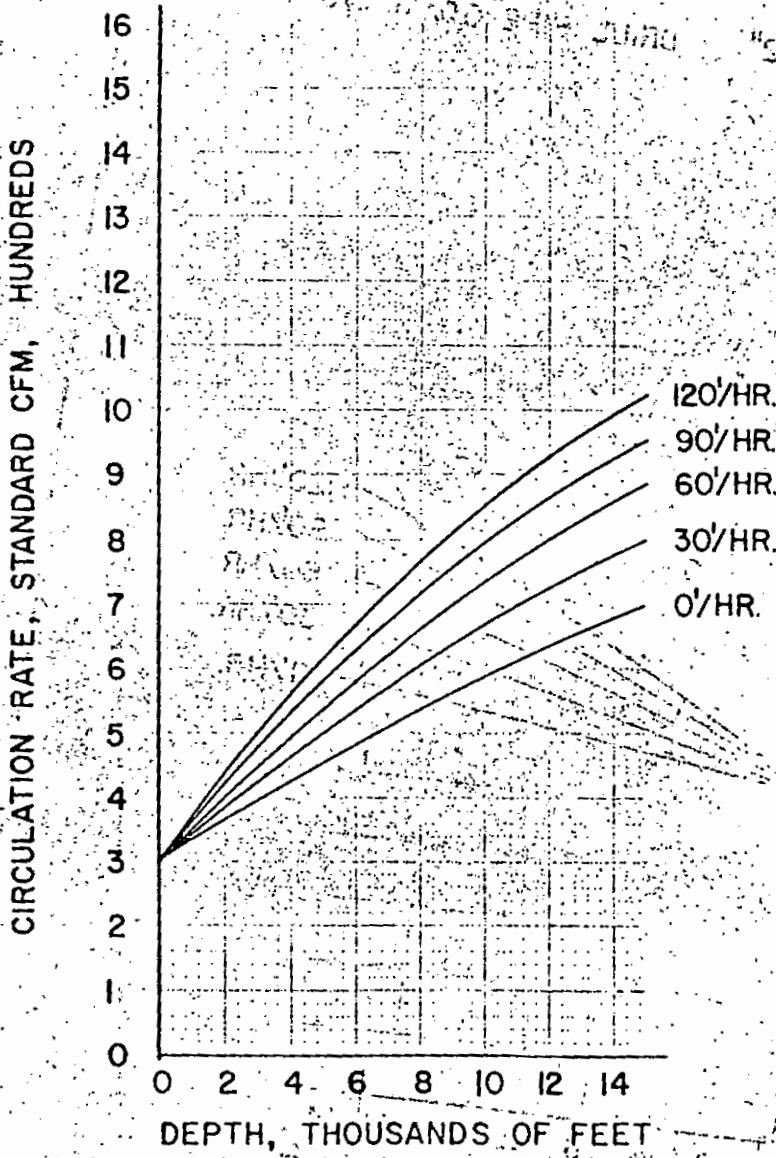
DRILL PIPE OD 2 7/8"



58 — VOLUME REQUIREMENTS

GAS GRAVITY 0.8

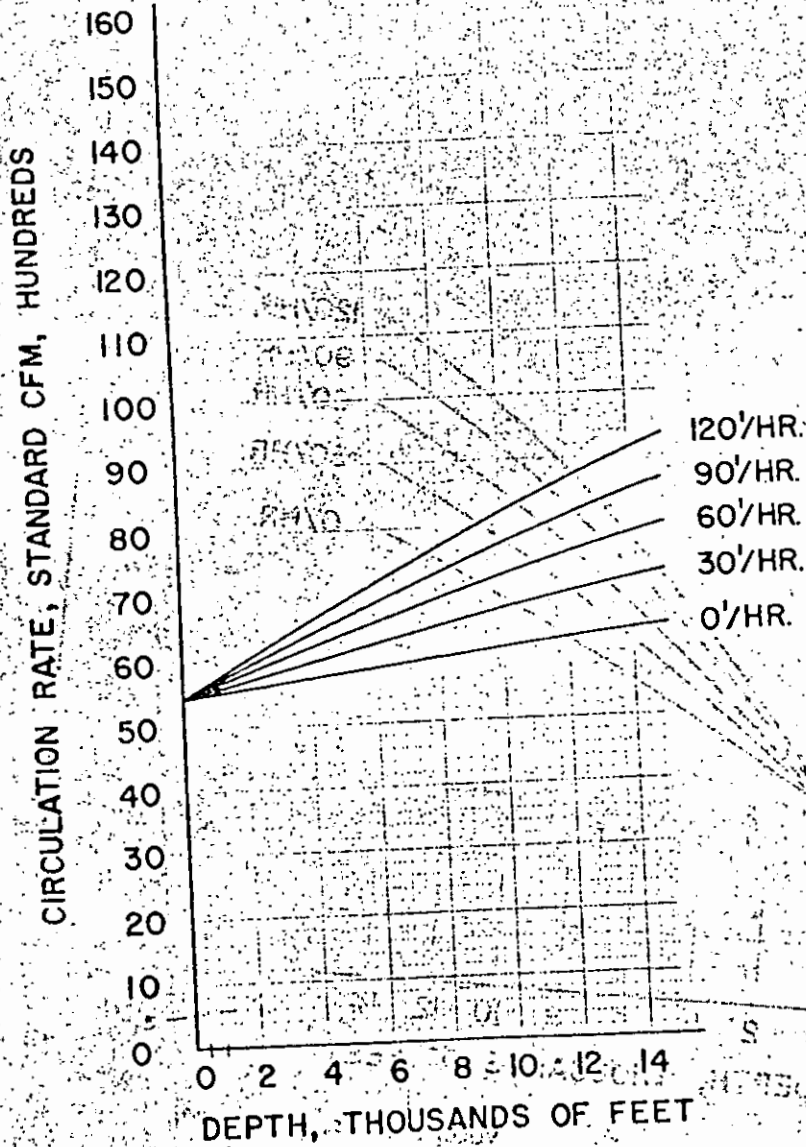
HOLE SIZE 4 3/4" DRILL PIPE OD. 2 3/8"





GAS GRAVITY 0.6

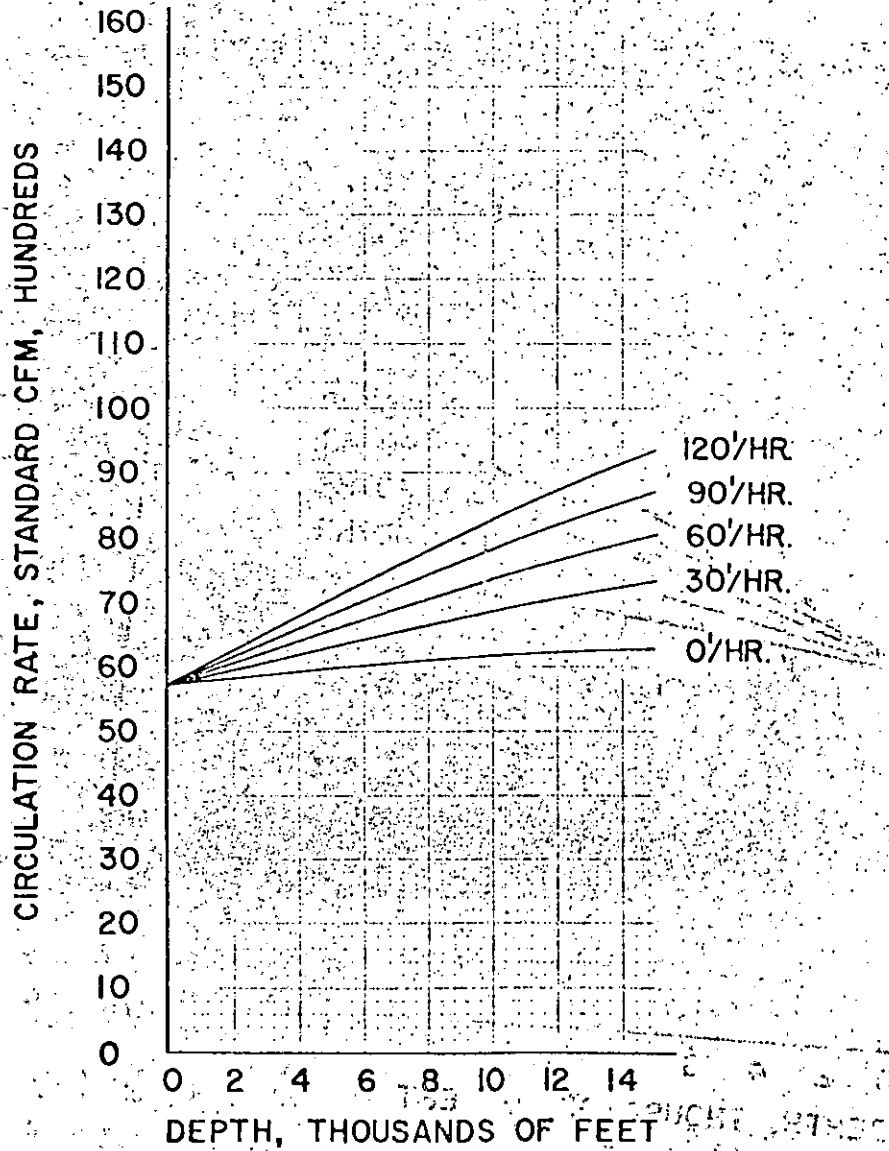
HOLE SIZE 17 1/2" DRILL PIPE O.D. 6 5/8"



GAS GRAVITY 0.6

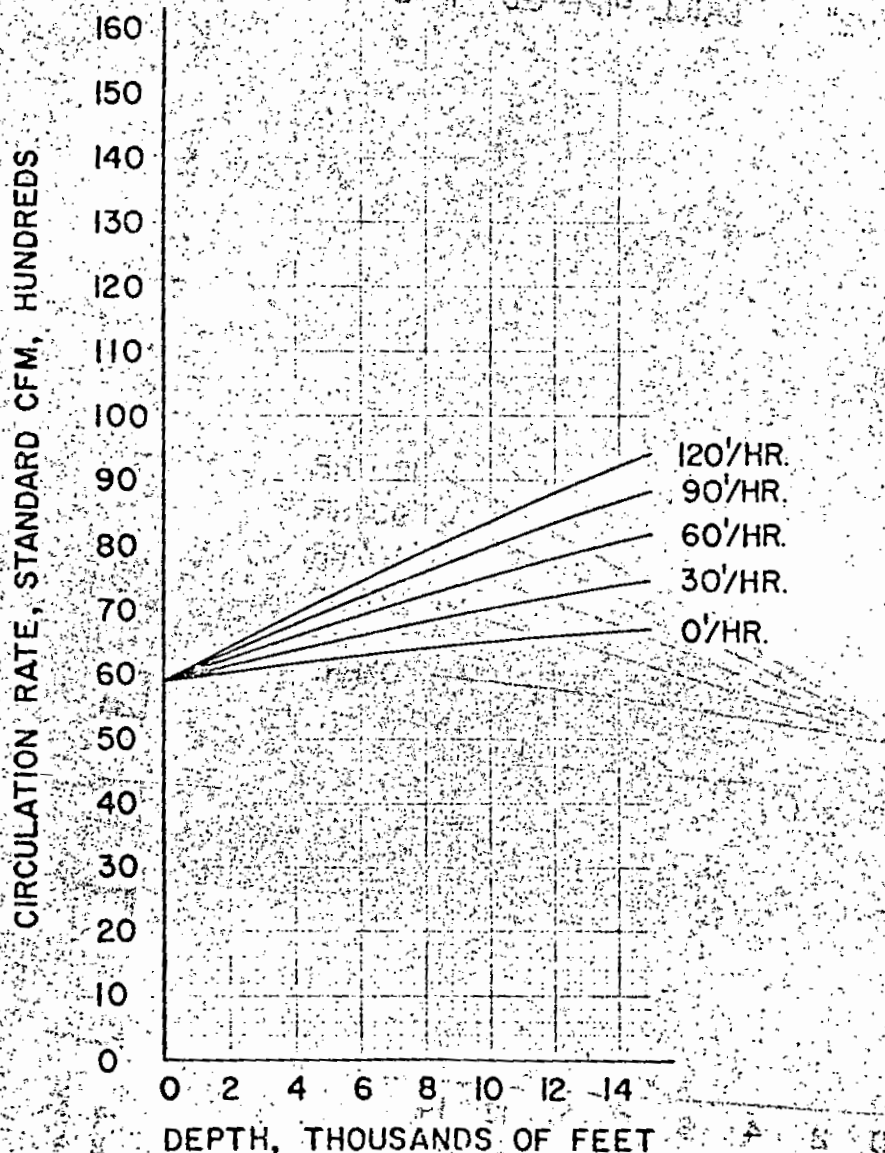
HOLE SIZE 17 1/2"

DRILL PIPE O.D. 5 1/2"



GAS GRAVITY 0.6

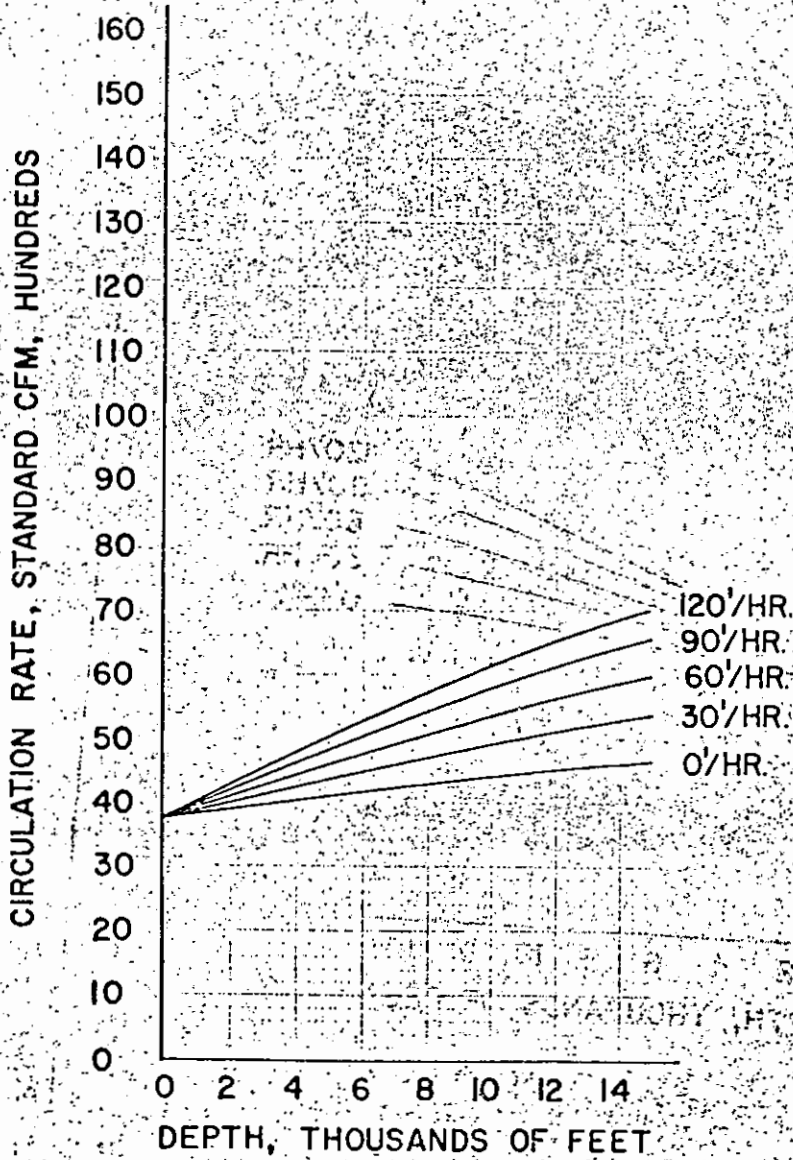
HOLE SIZE 17 1/2" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 15"

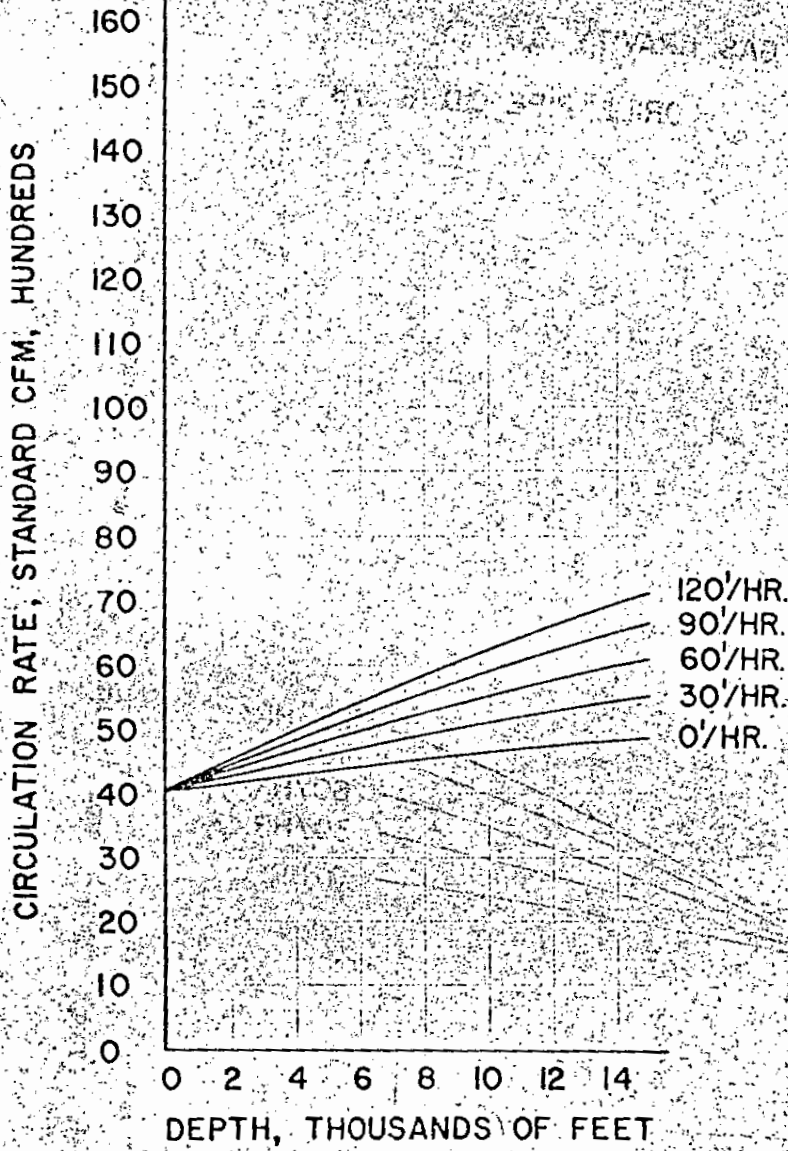
DRILL PIPE O.D. 6 5/8"



GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 15"

DRILL PIPE OD. 5 1/2"



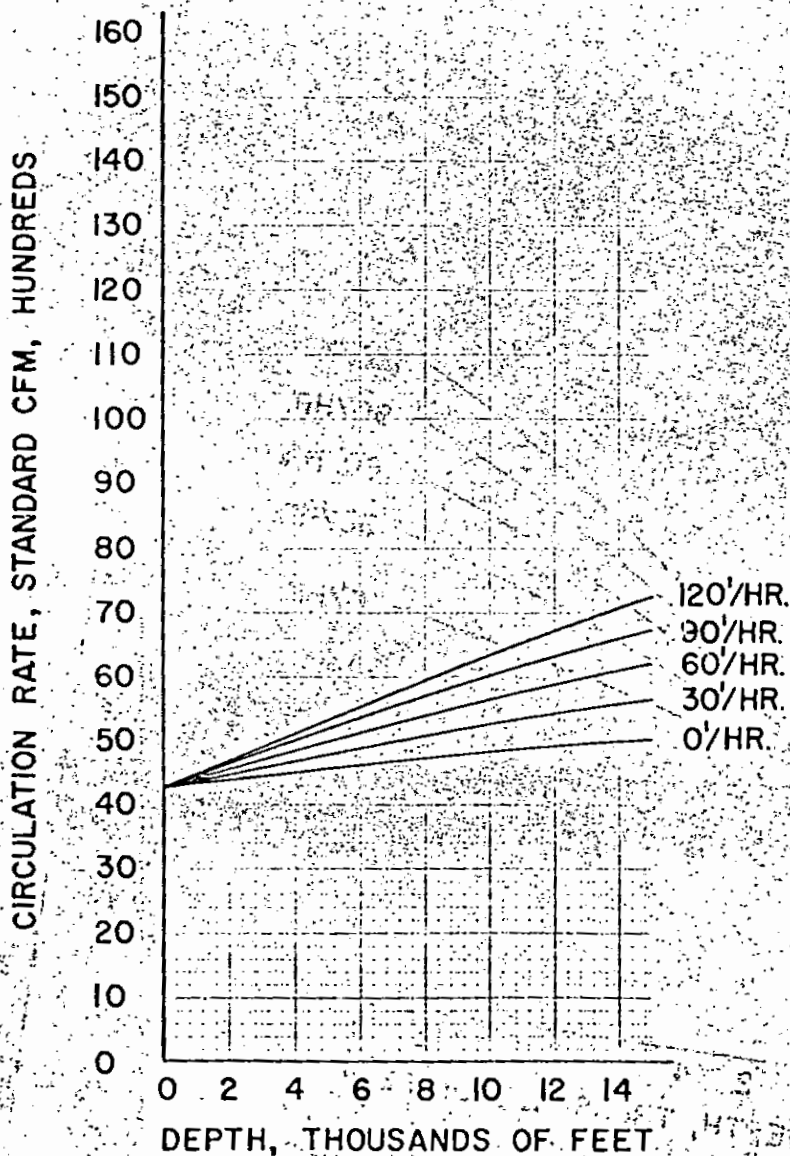
VOLUME REQUIREMENTS = 65

DEPTH IN THOUSANDS OF FEET

GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 15"

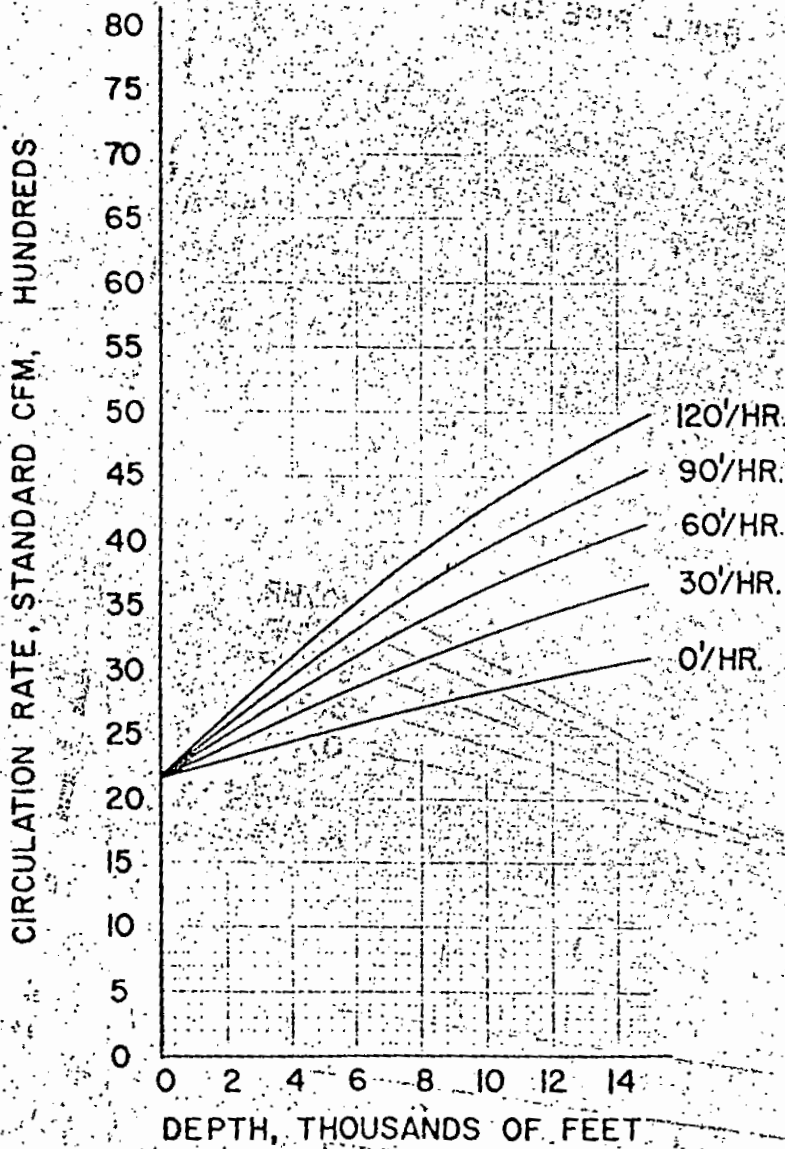
DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 12 1/4"

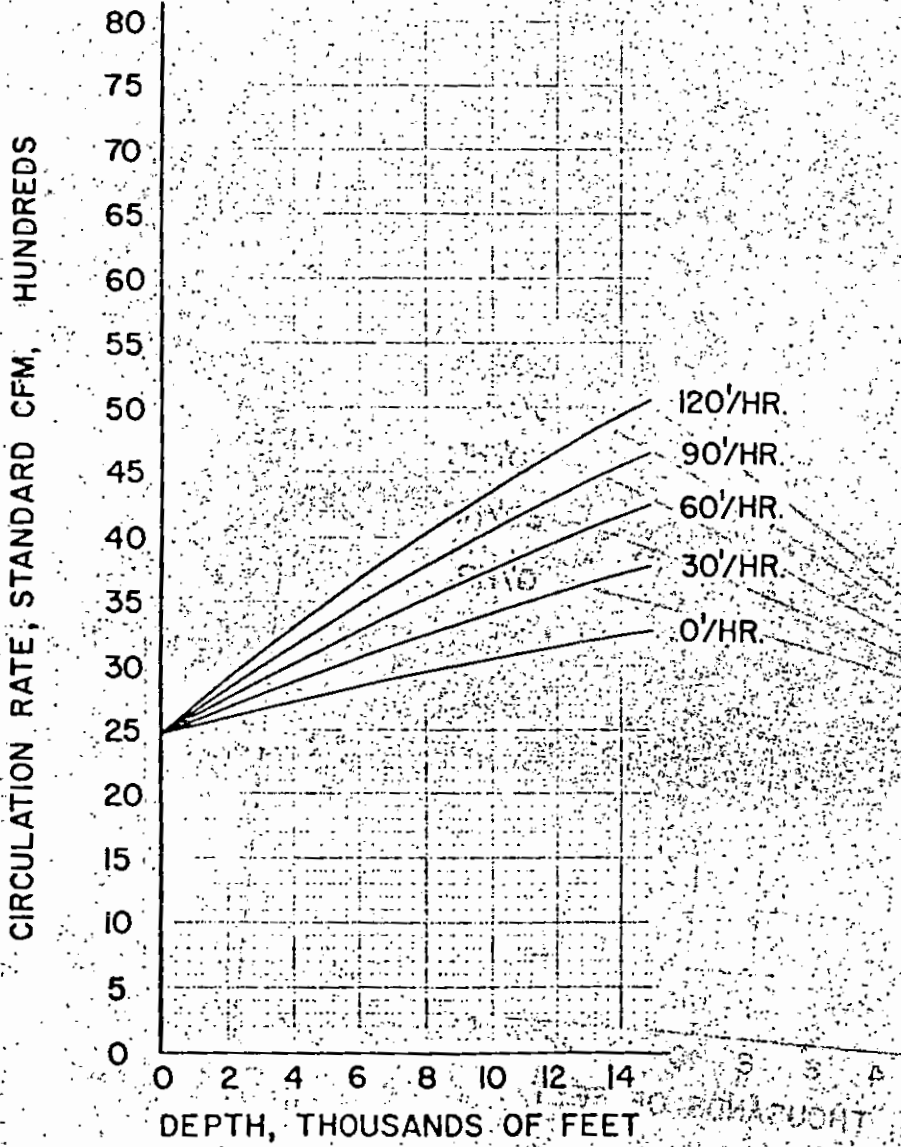
DRILL PIPE O.D. 6 5/8"



VOLUME REQUIREMENTS - 67

GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 12 1/4" DRILL PIPE O.D. 5 1/2"

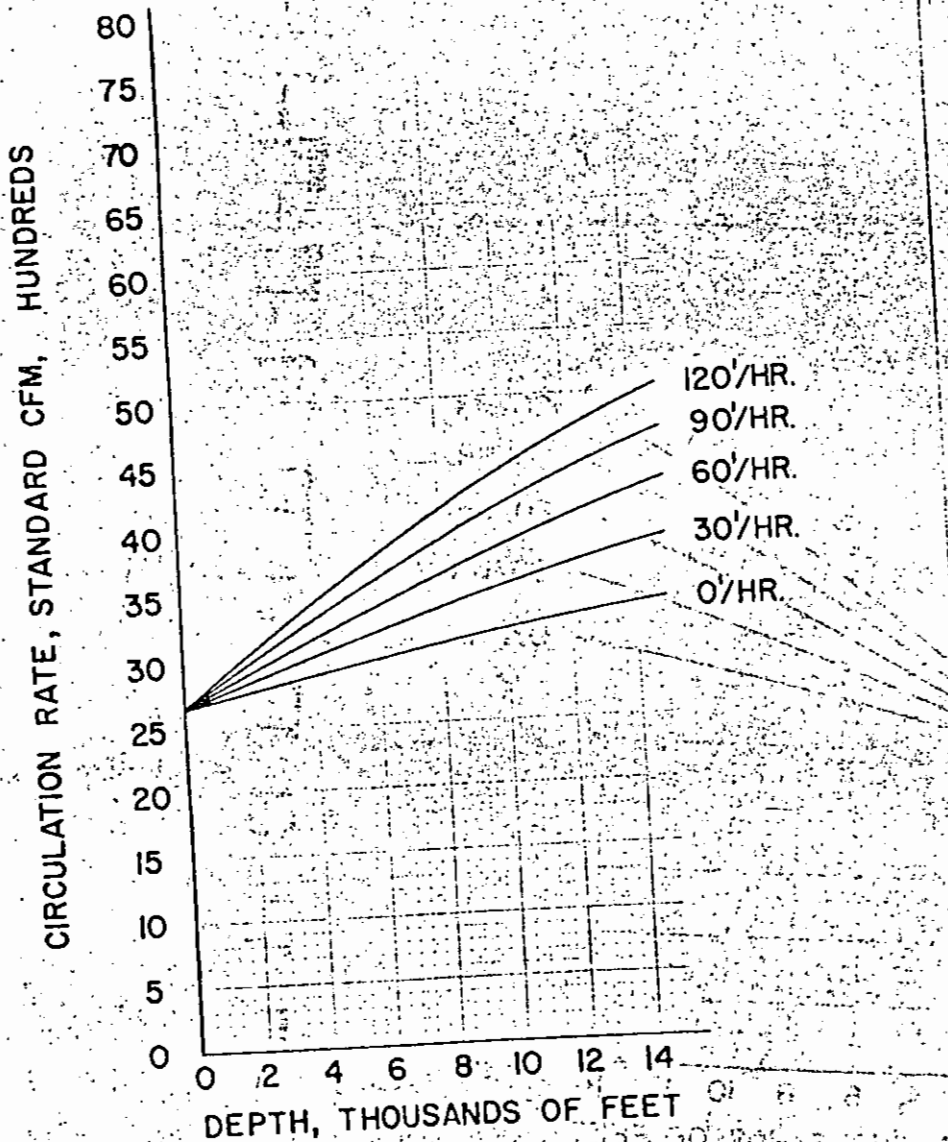




GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 12 1/4"

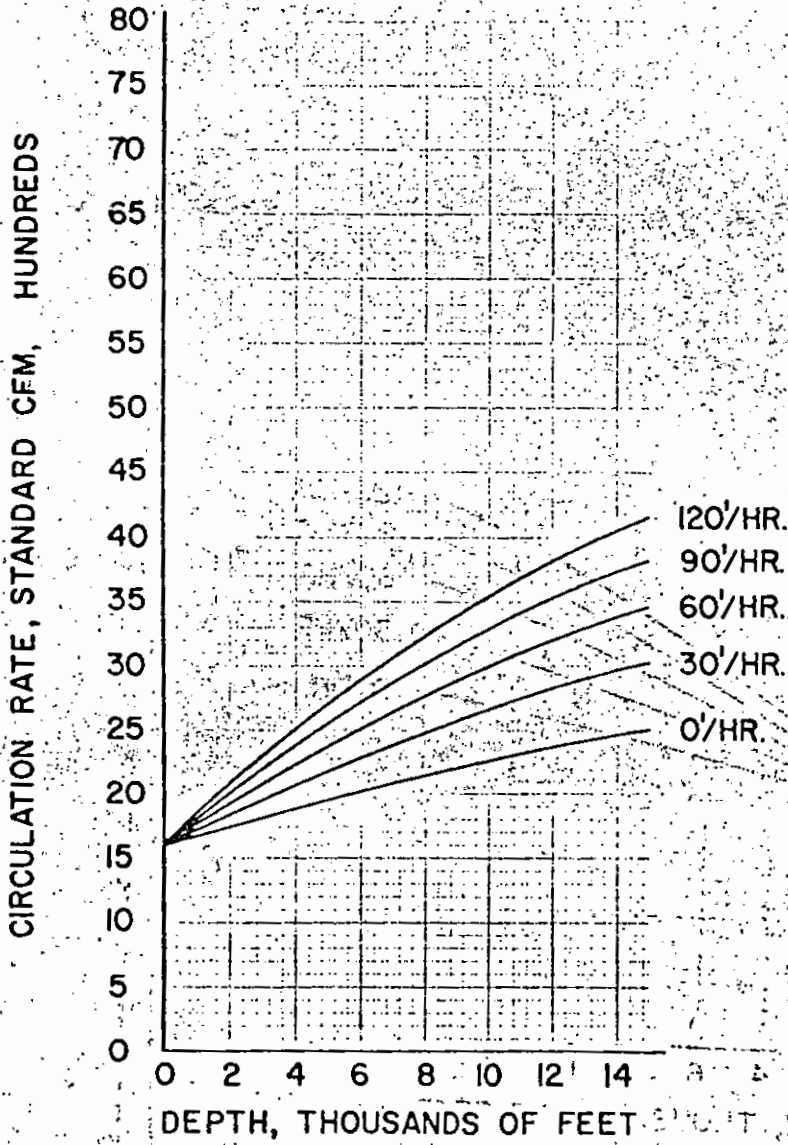
DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 11"

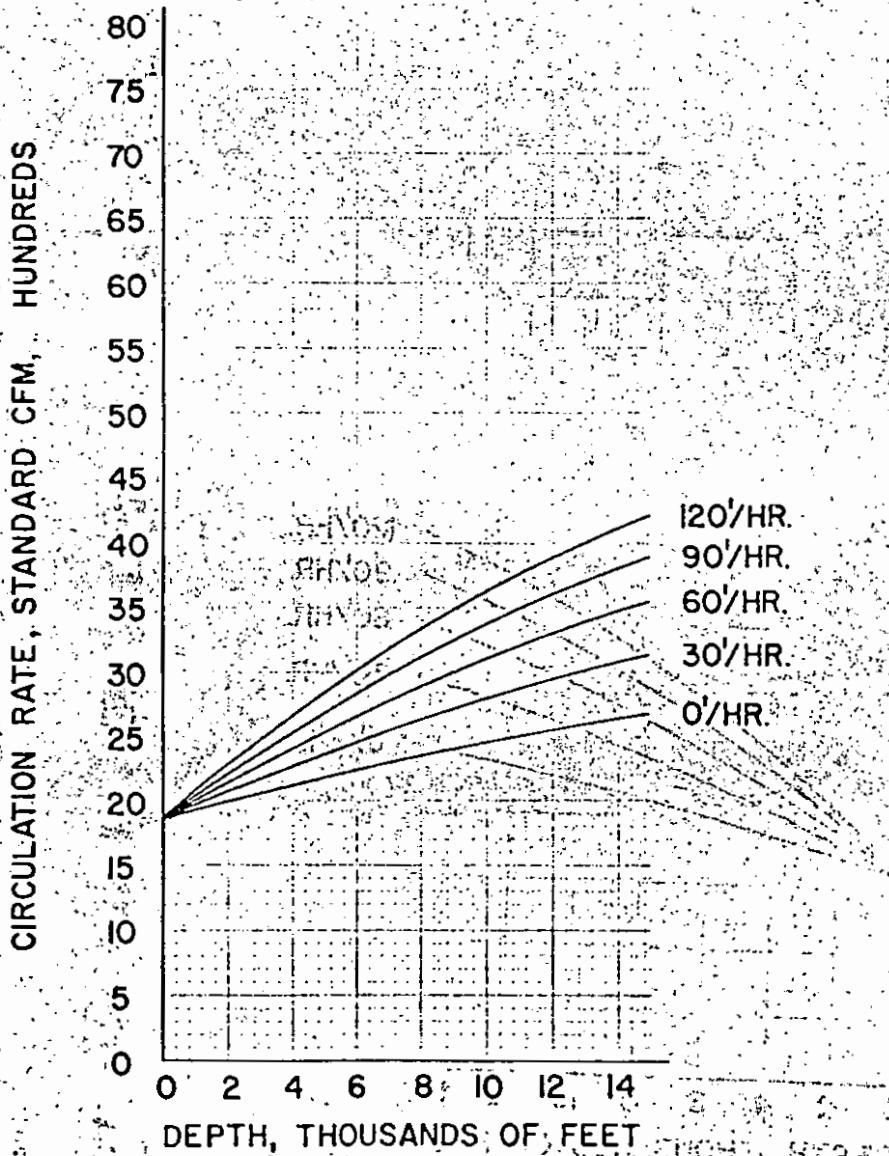
DRILL PIPE O.D. 6 5/8"



GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 11"

DRILL PIPE O.D. 5 1/2"



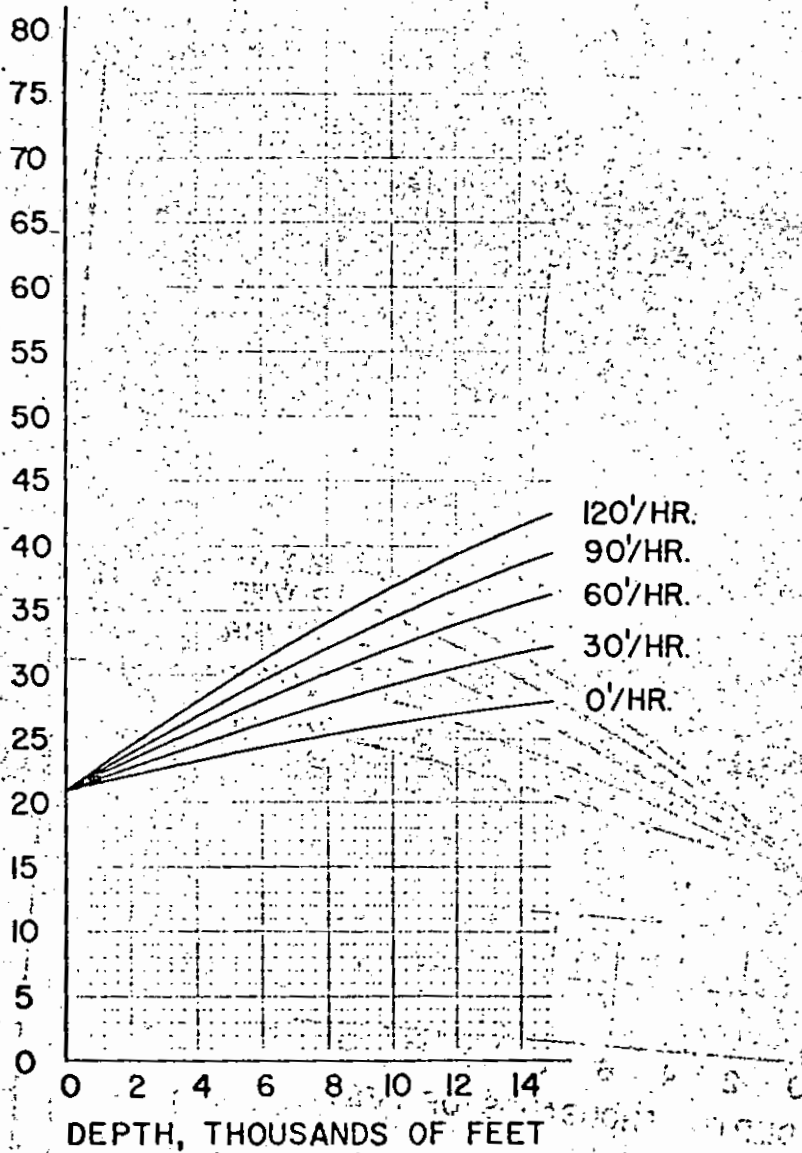


GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 11"

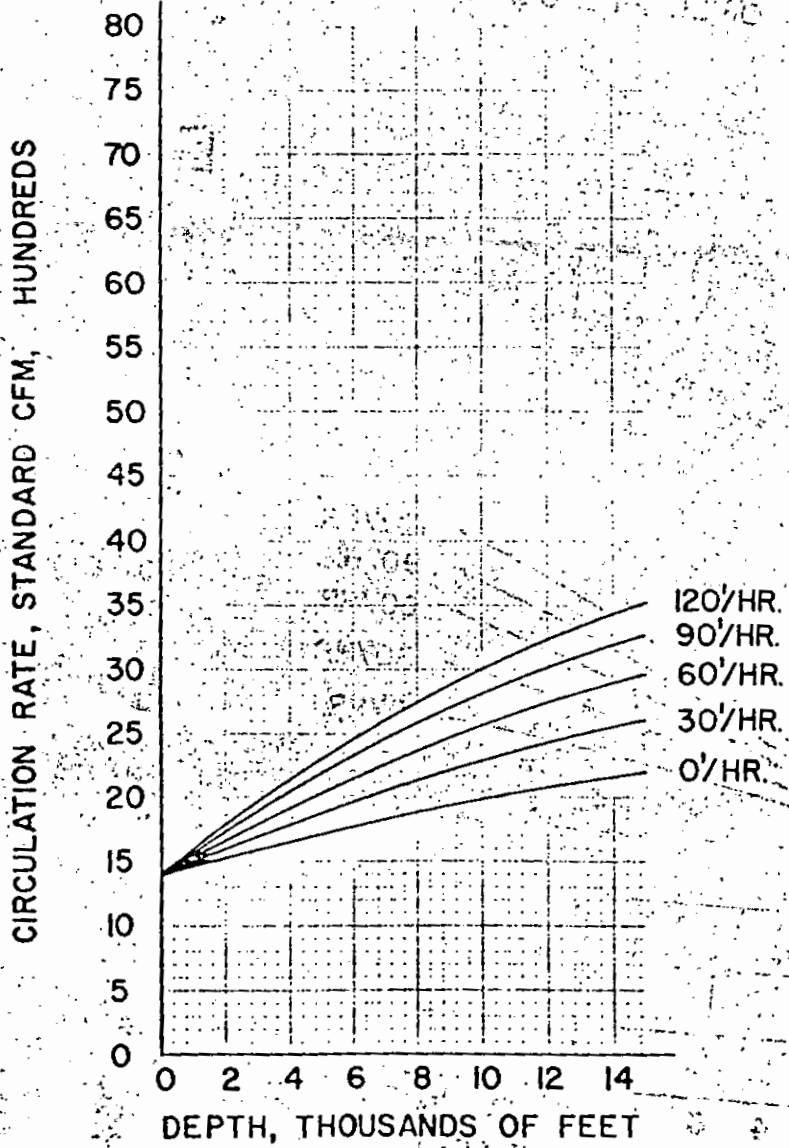
DRILL PIPE OD. 4 1/2"

CIRCULATION RATE, STANDARD CFM, HUNDREDS



GAS GRAVITY 0.6

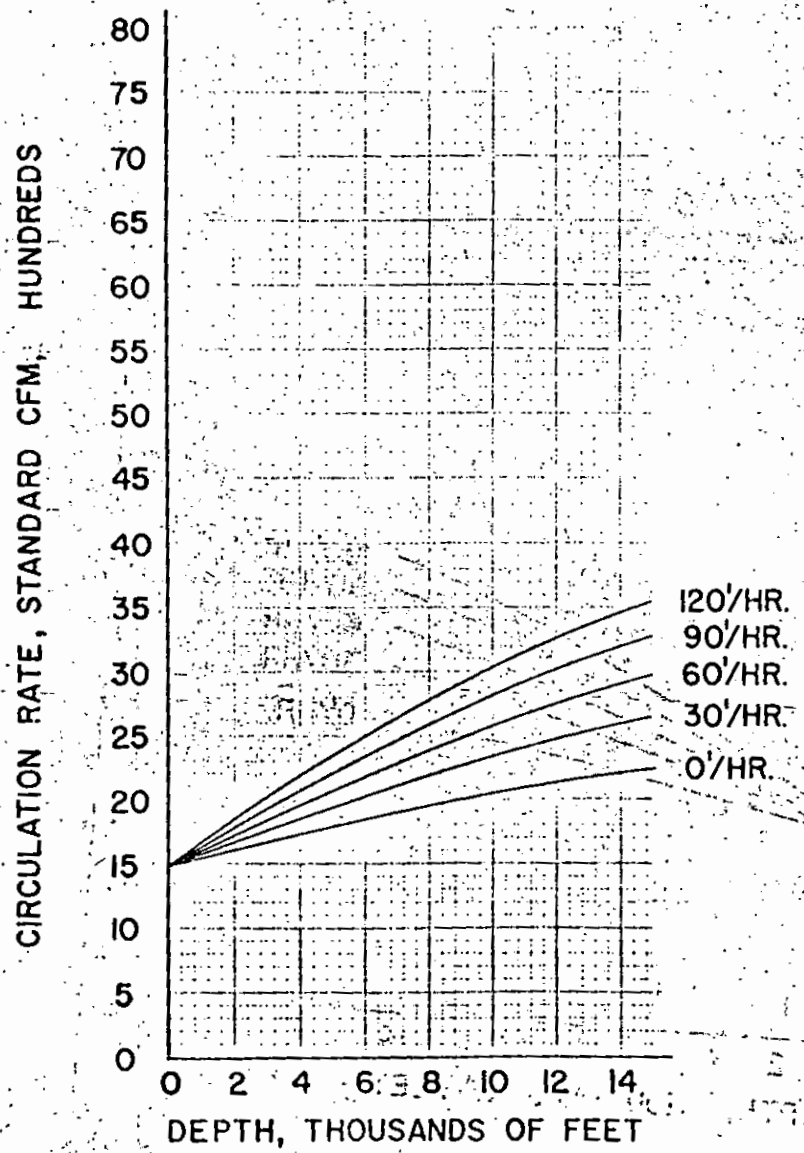
HOLE SIZE 9 7/8" DRILL PIPE O.D. 5 1/2"



GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 9 7/8"

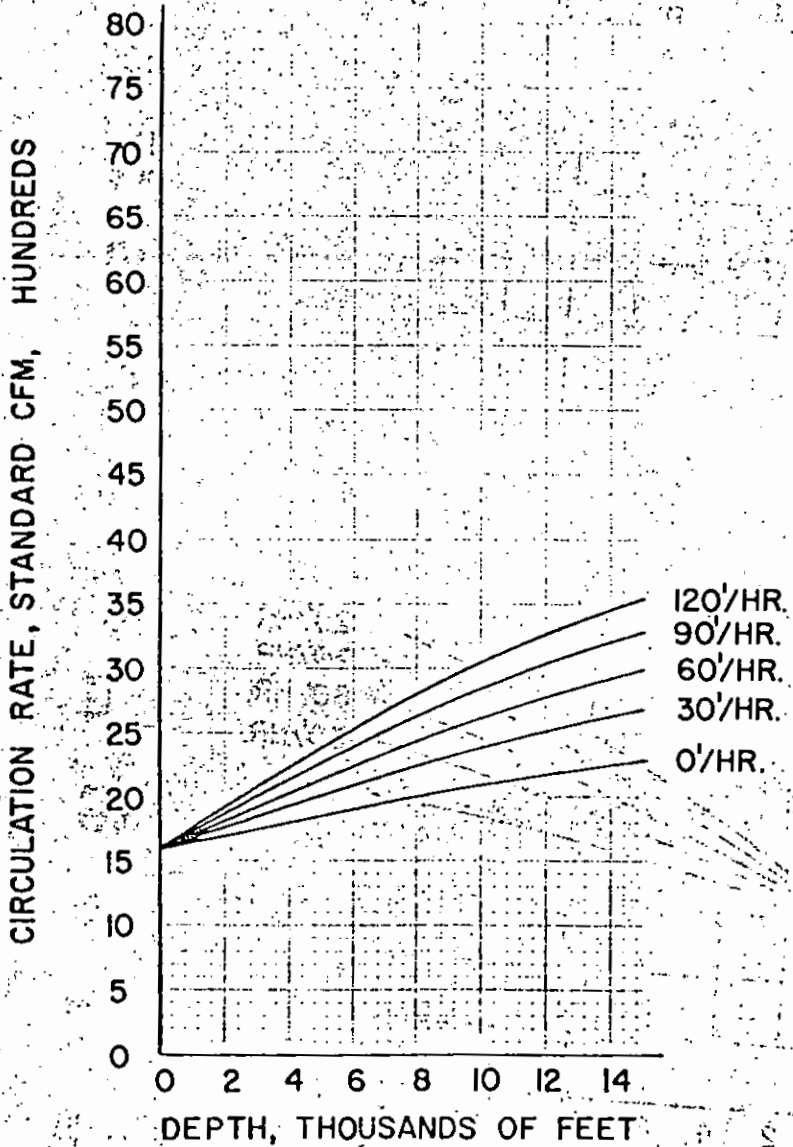
DRILL PIPE O.D. 5"



GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 9 7/8"

DRILL PIPE O.D. 4 1/2"

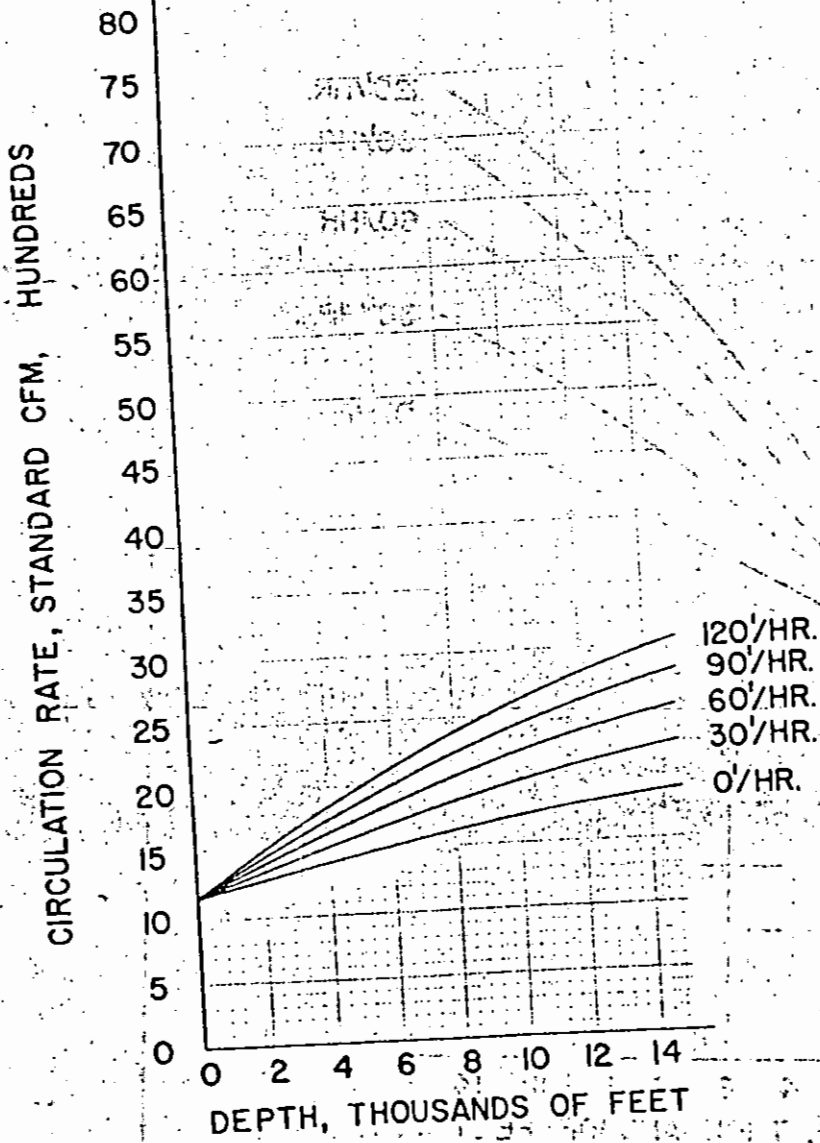


VOLUME REQUIREMENTS — 75

THOMSON-SCOTT



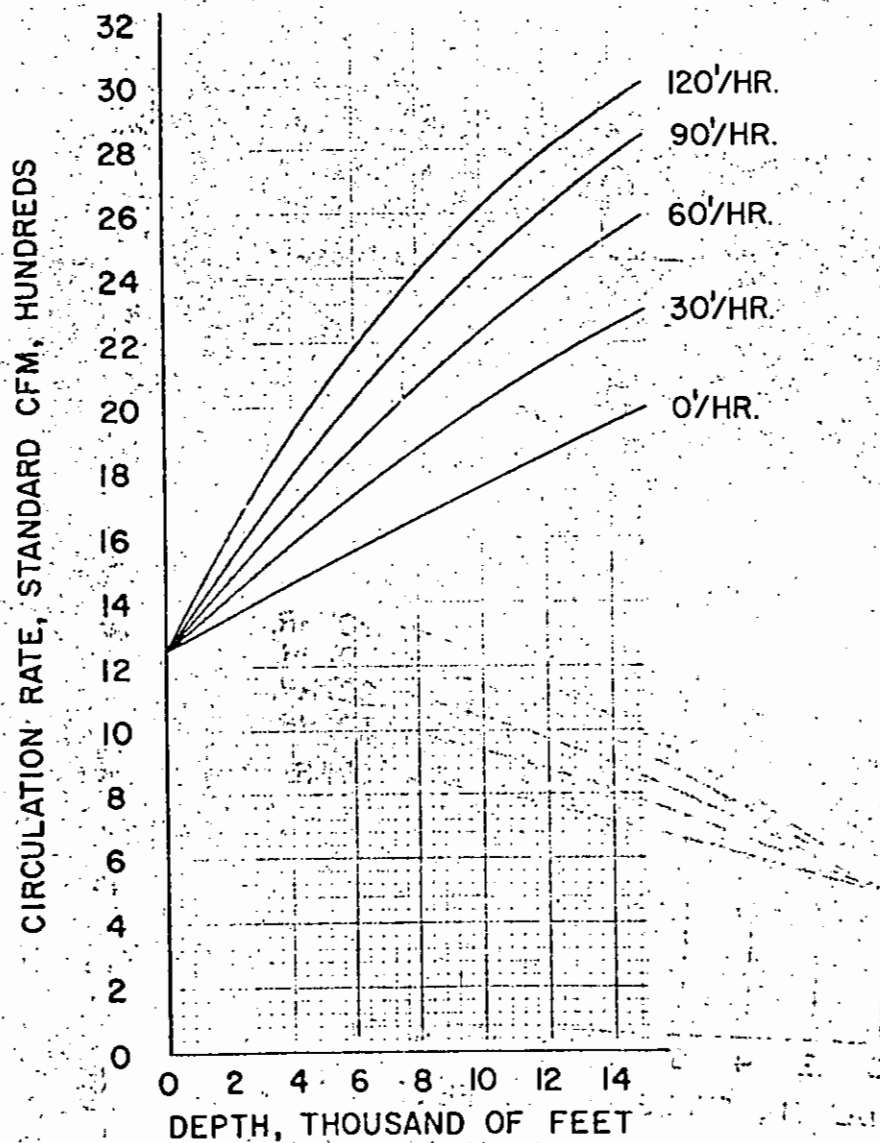
HOLE SIZE 9"      GAS GRAVITY 0.6  
 DRILL PIPE O.D. 5"



GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 9"

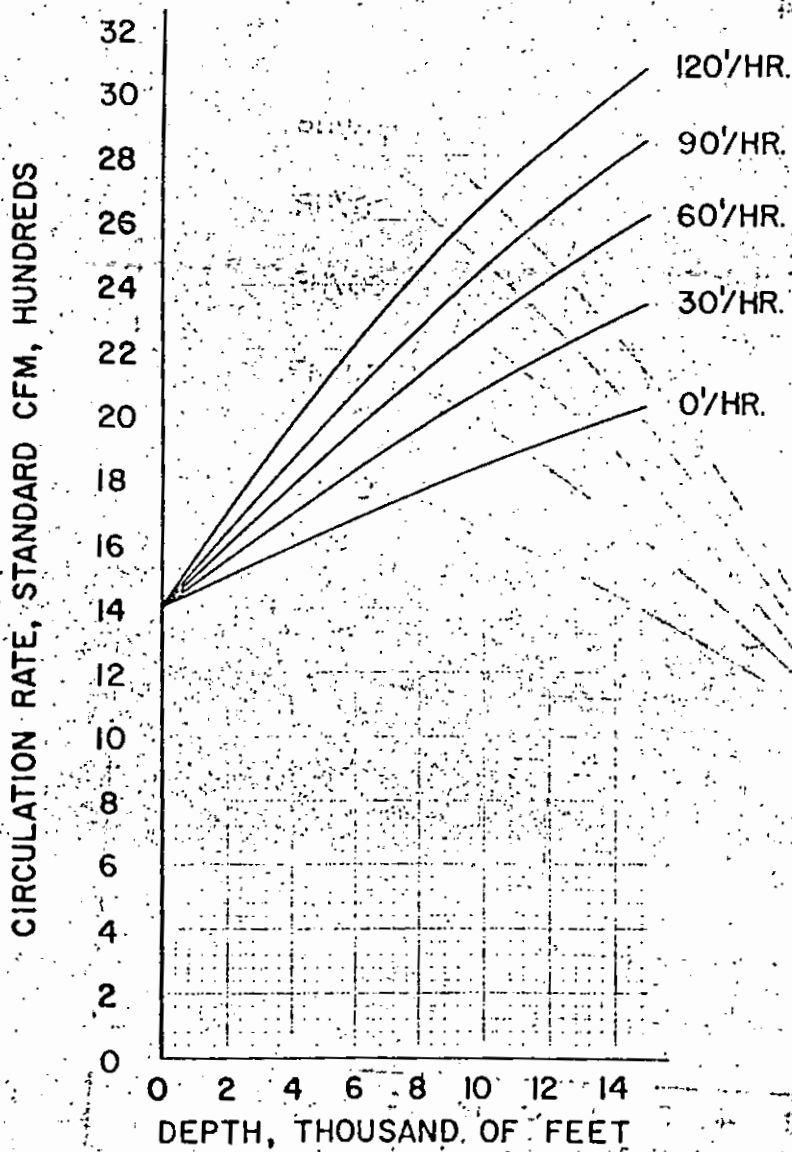
DRILL PIPE O.D. 4"



GAS GRAVITY 0.6

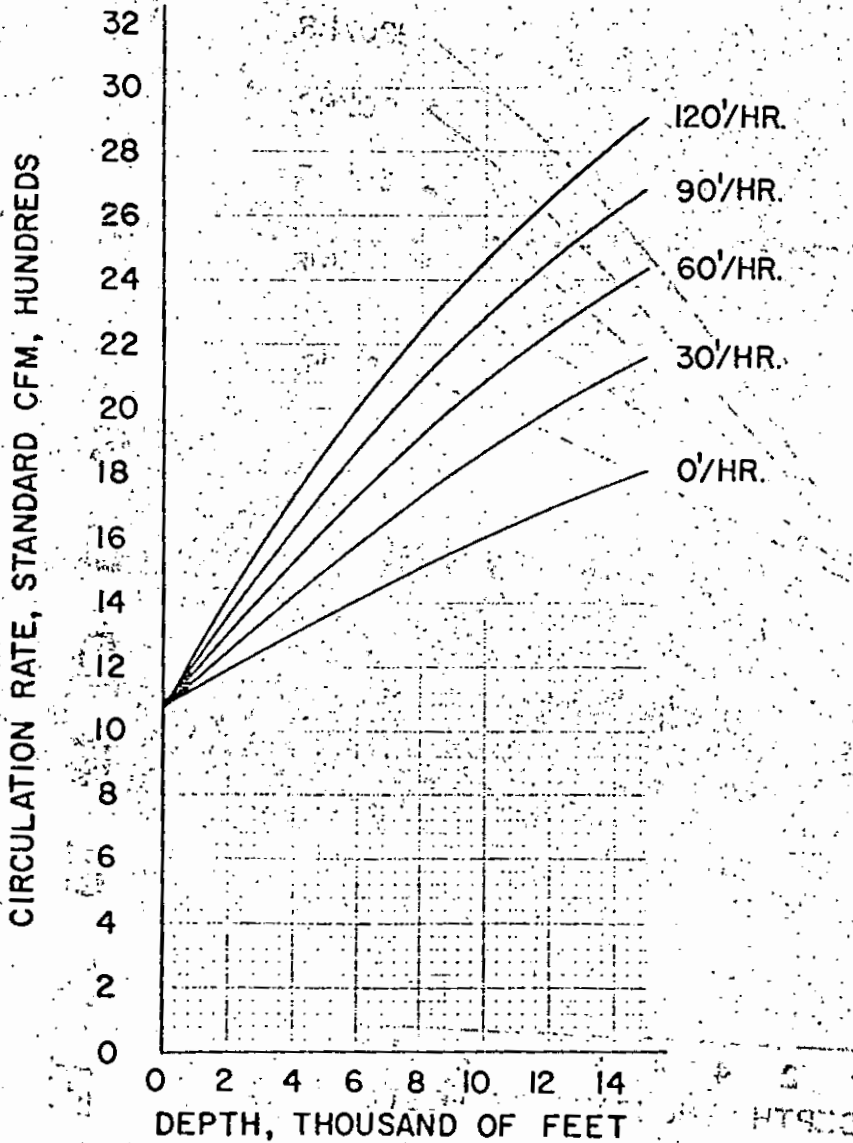
HOLE SIZE 9"

DRILL PIPE O.D. 3 1/2"



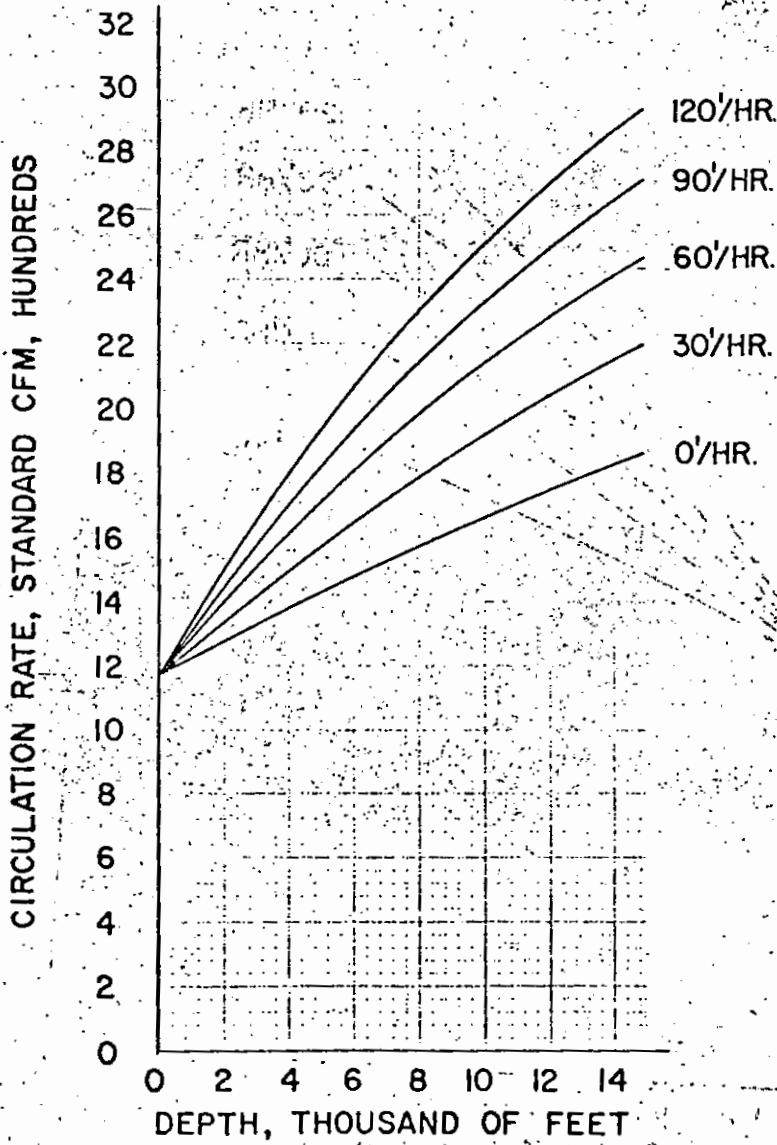
GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 8 3/4" DRILL PIPE O.D 5"



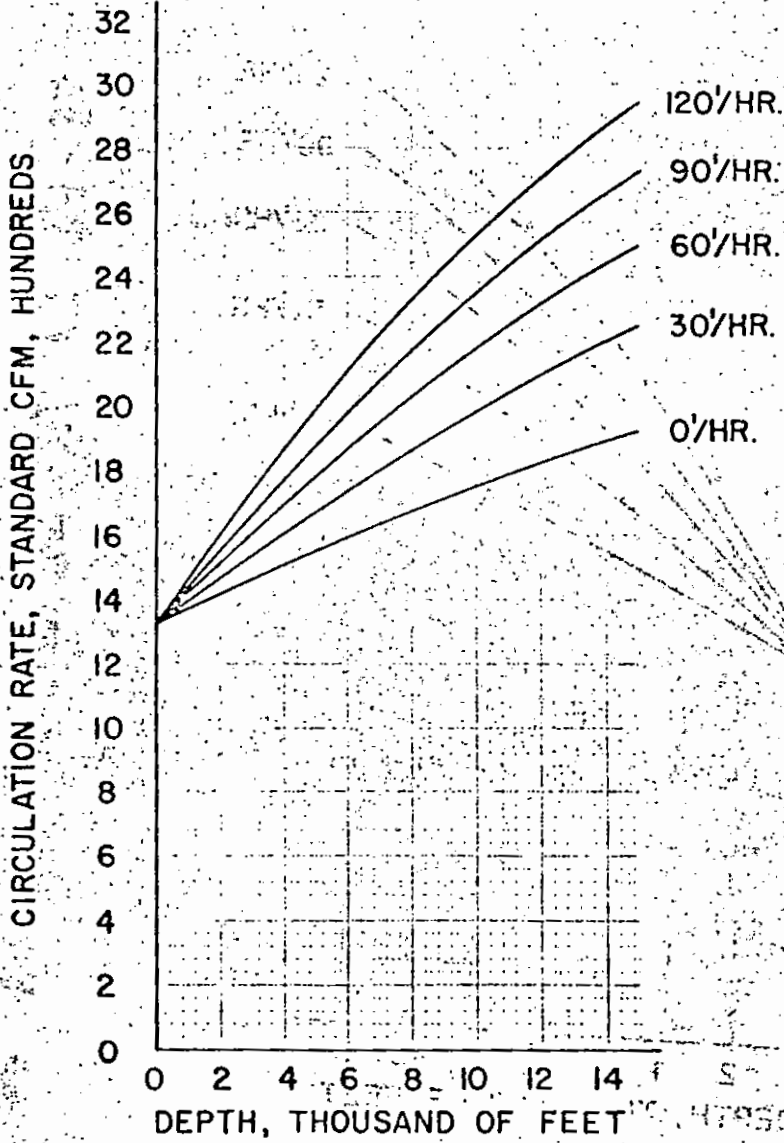
GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 8 3/4" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 0.6

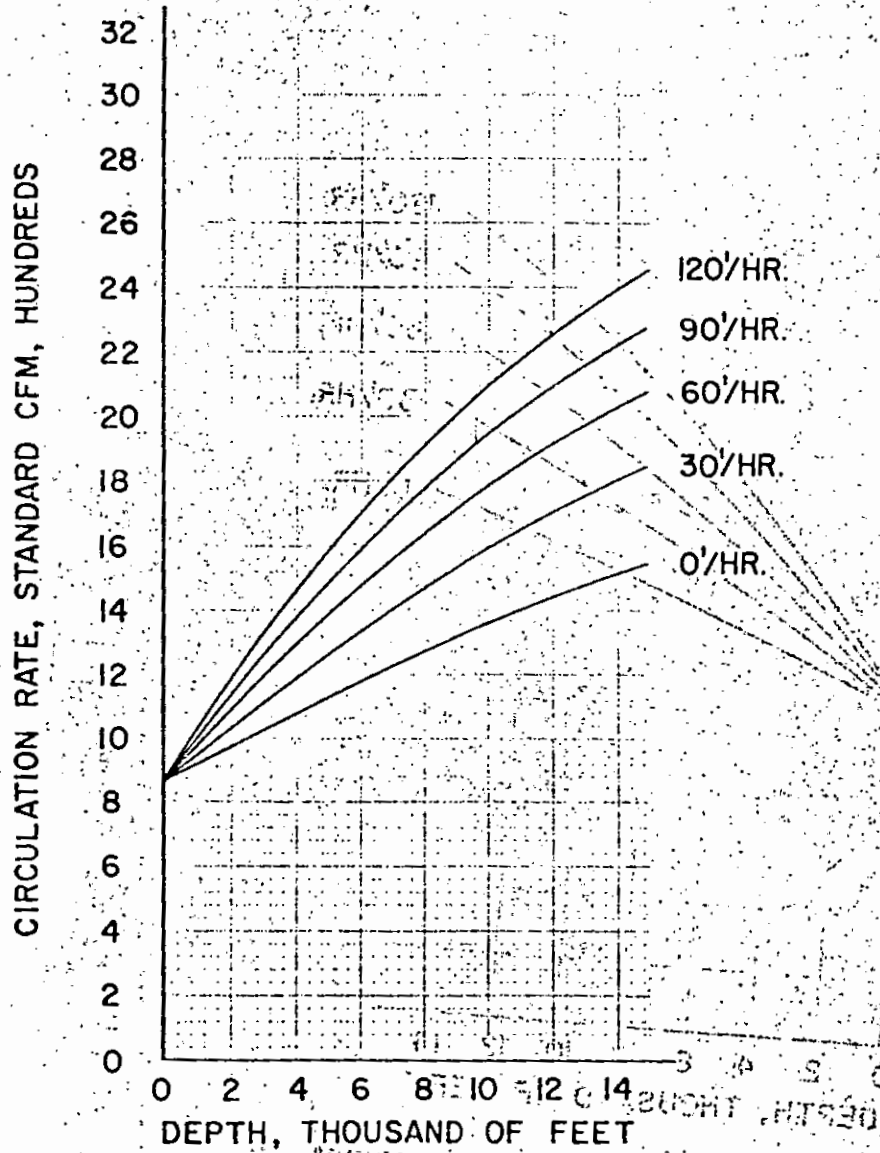
HOLE SIZE 8 3/4" DRILL PIPE O.D 3 1/2"



VOLUME REQUIREMENTS 81

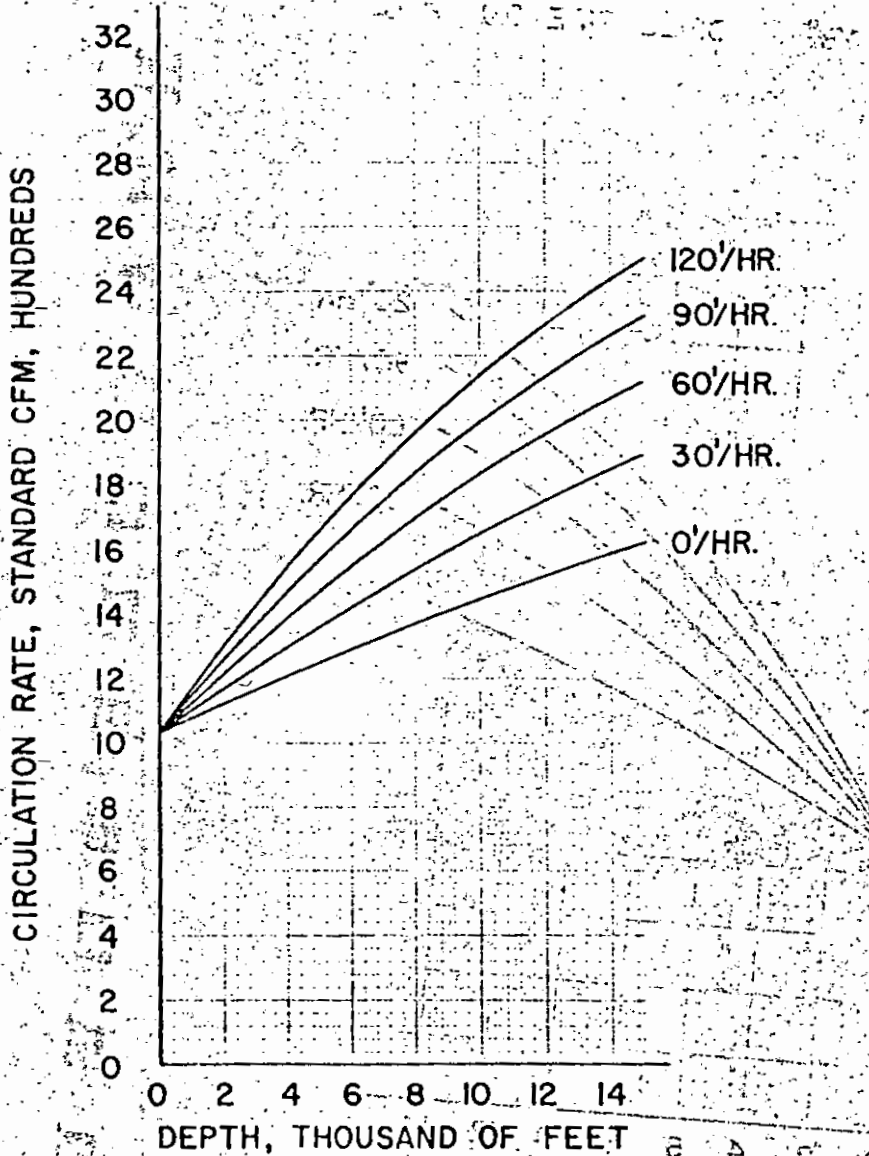
GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 7 7/8" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 7 7/8" DRILL PIPE O.D. 3 1/2" S.A.S.

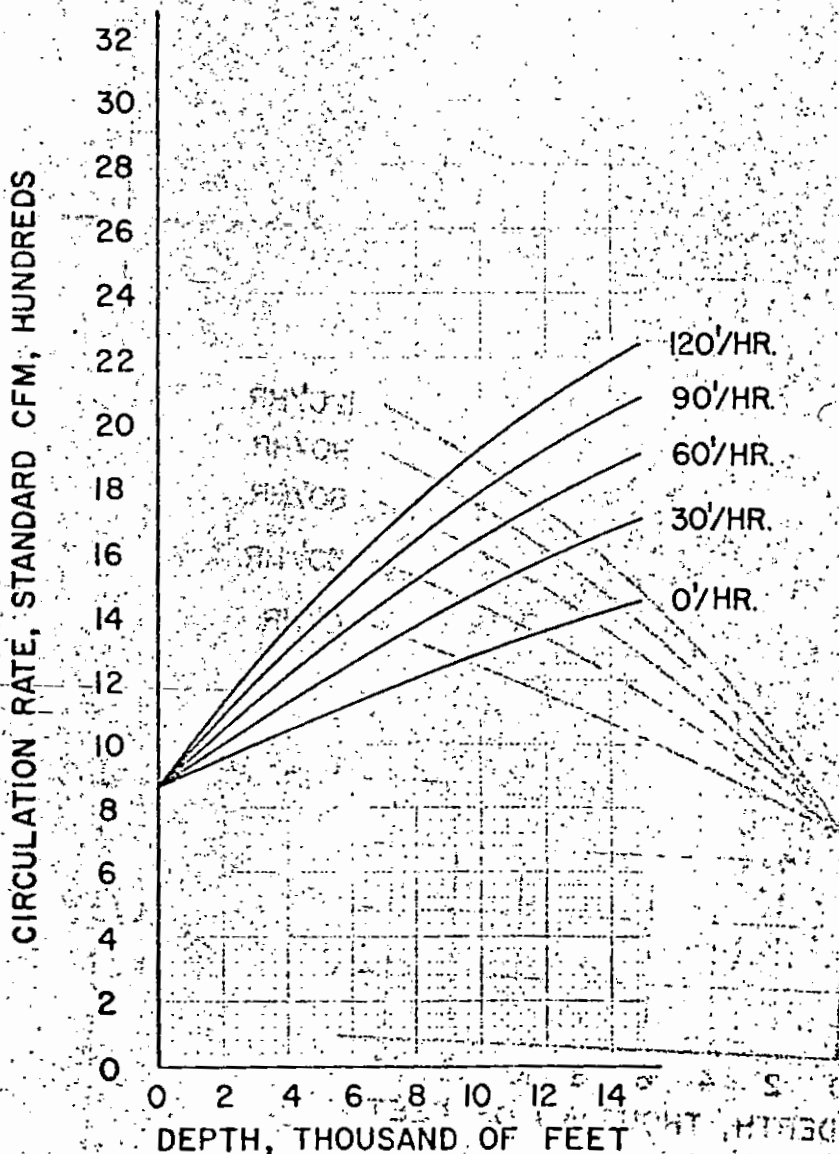


VOLUME REQUIREMENTS — 83



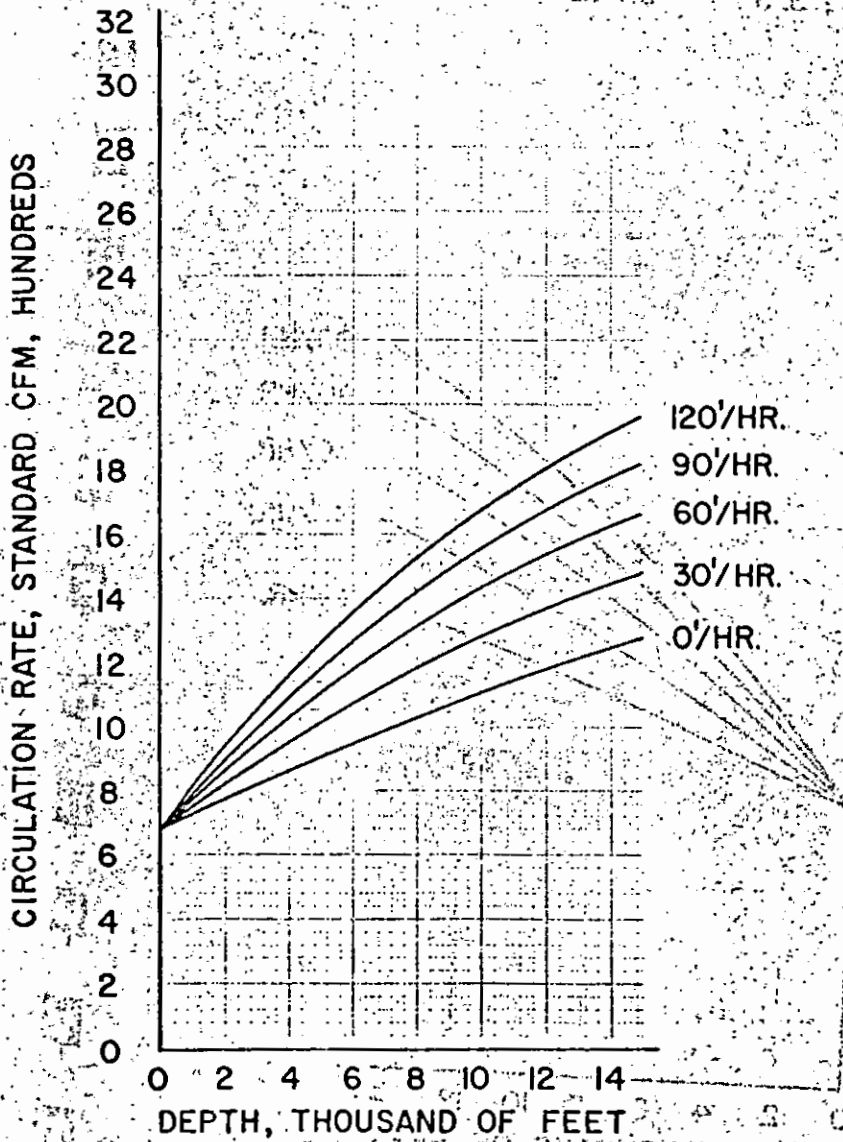
GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 7 3/8" DRILL PIPE O.D. 3 1/2"



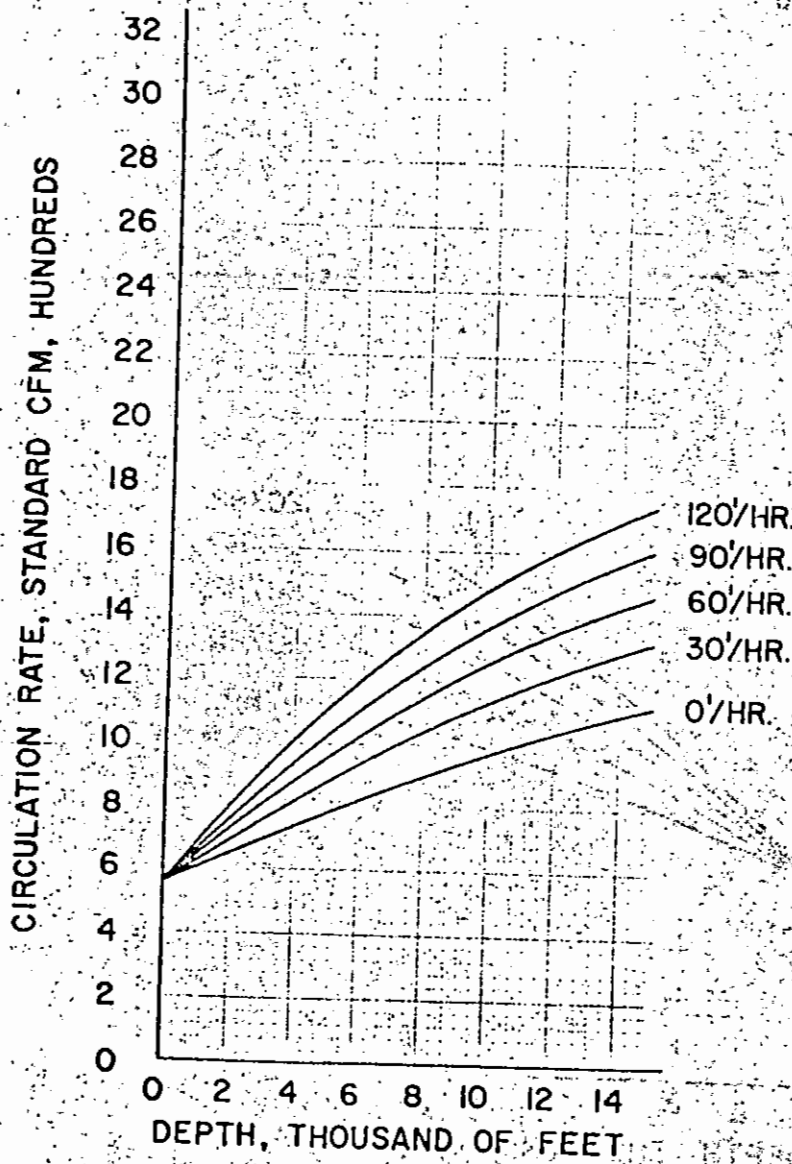
GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 6 3/4" DRILL PIPE O.D. 3 1/2"



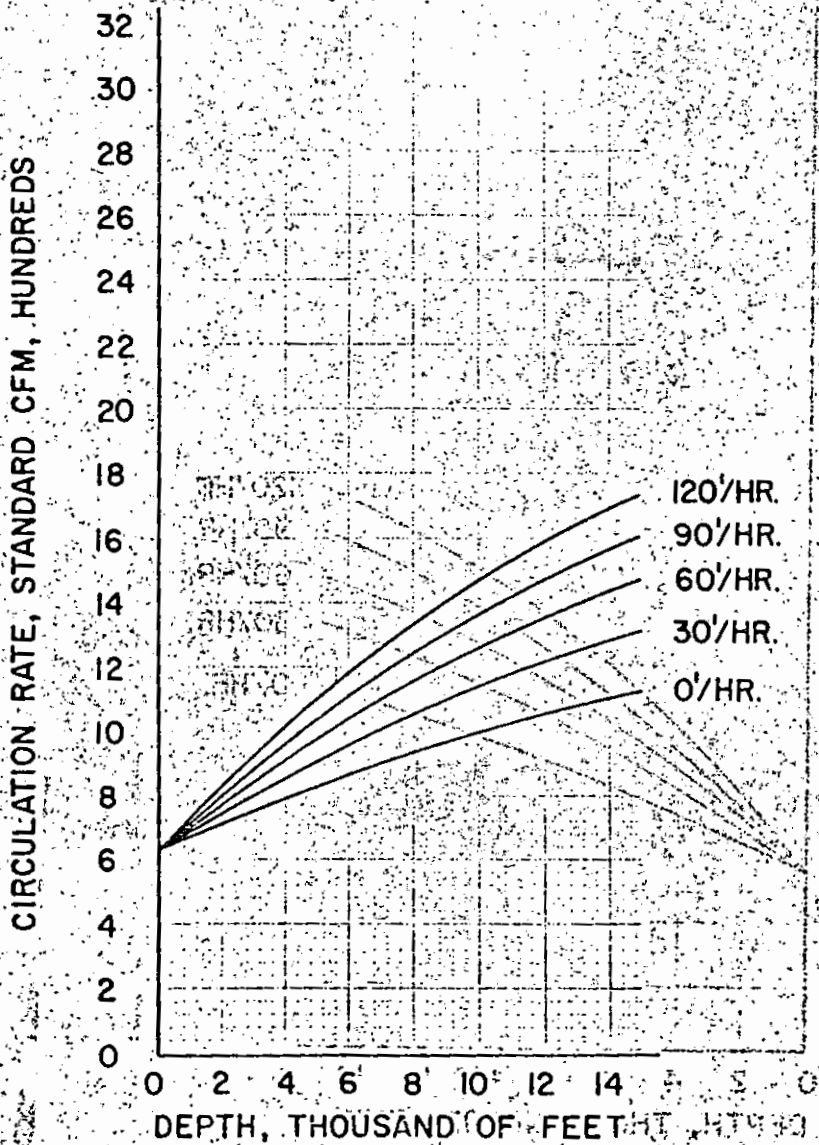
GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 6 1/4" DRILL PIPE O.D 3 1/2"



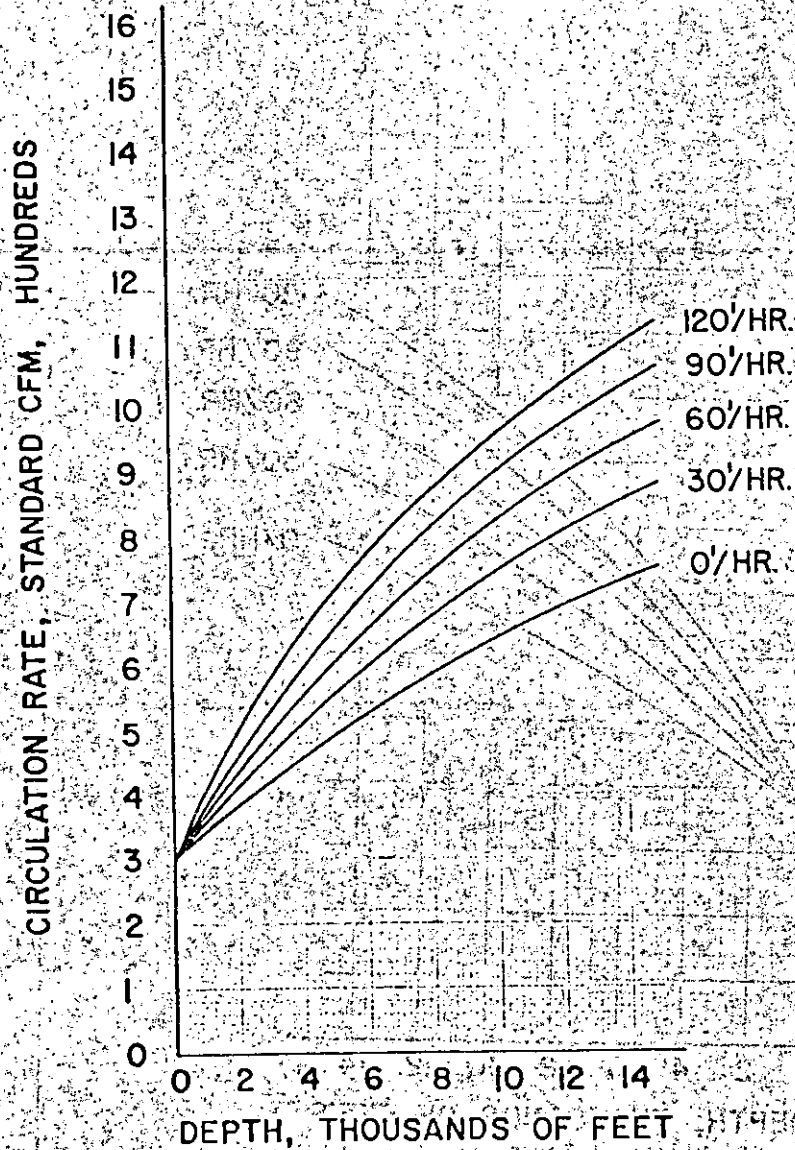
GAS GRAVITY 0.69

HOLE SIZE 6 1/4" DRILL PIPE O.D. 2 7/8"



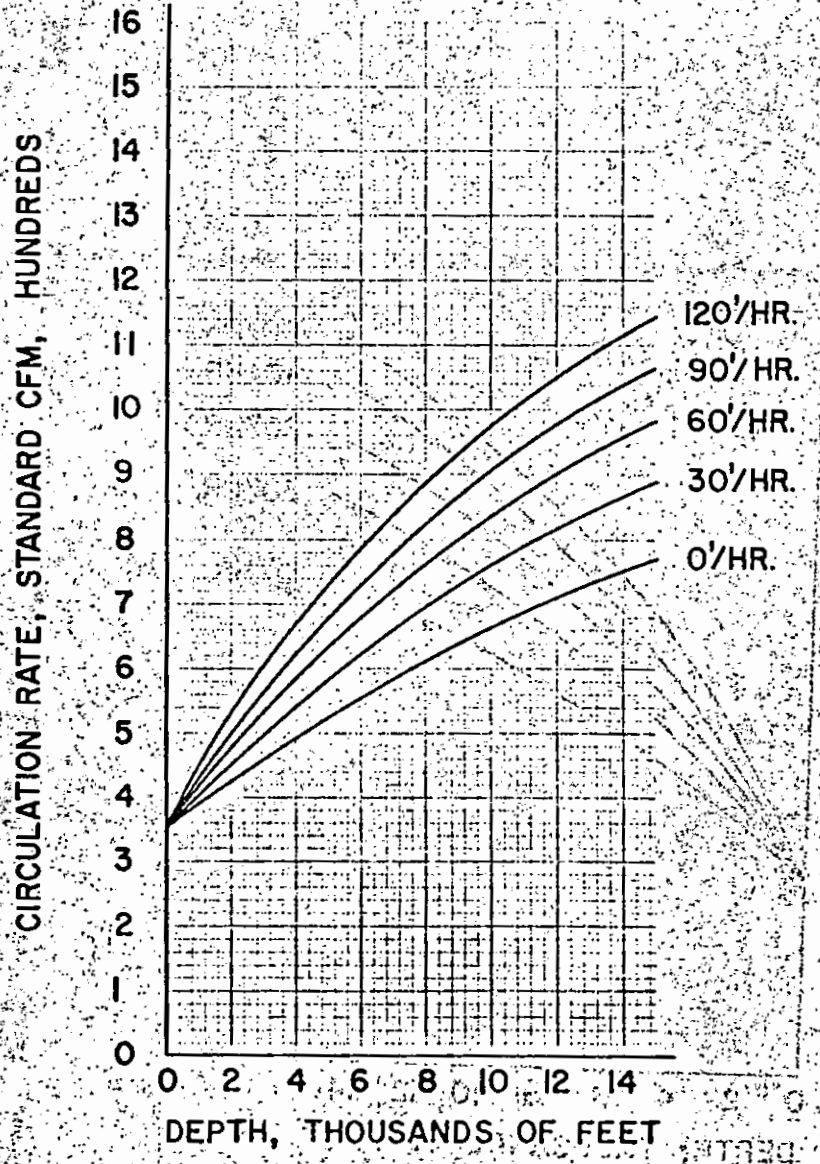
GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 4-3/4" DRILL PIPE OD. 2 7/8"



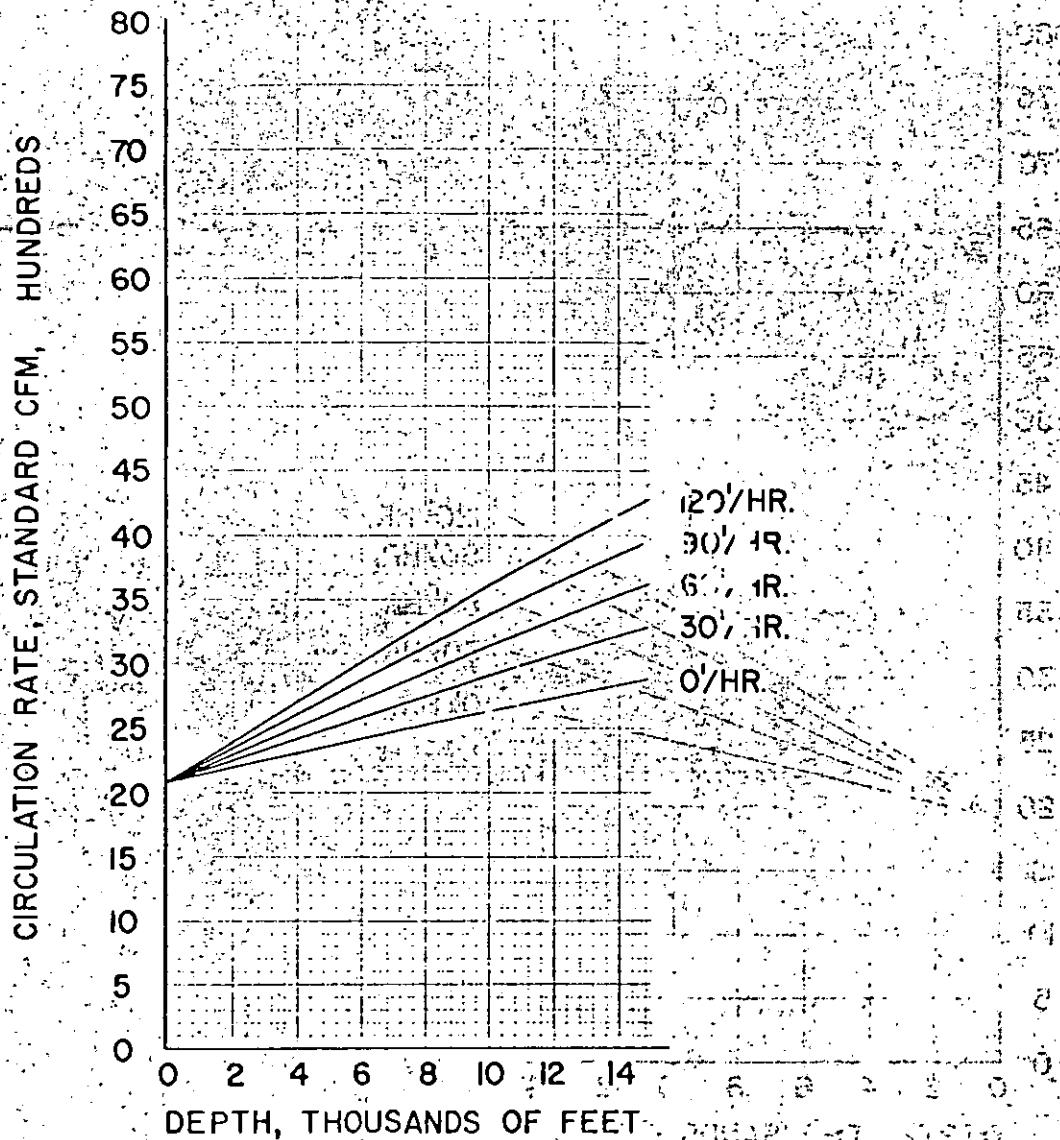
GAS GRAVITY 0.6

HOLE SIZE 4 3/4" DRILL PIPE OD. 2 3/8"



GAS GRAVITY 1.0

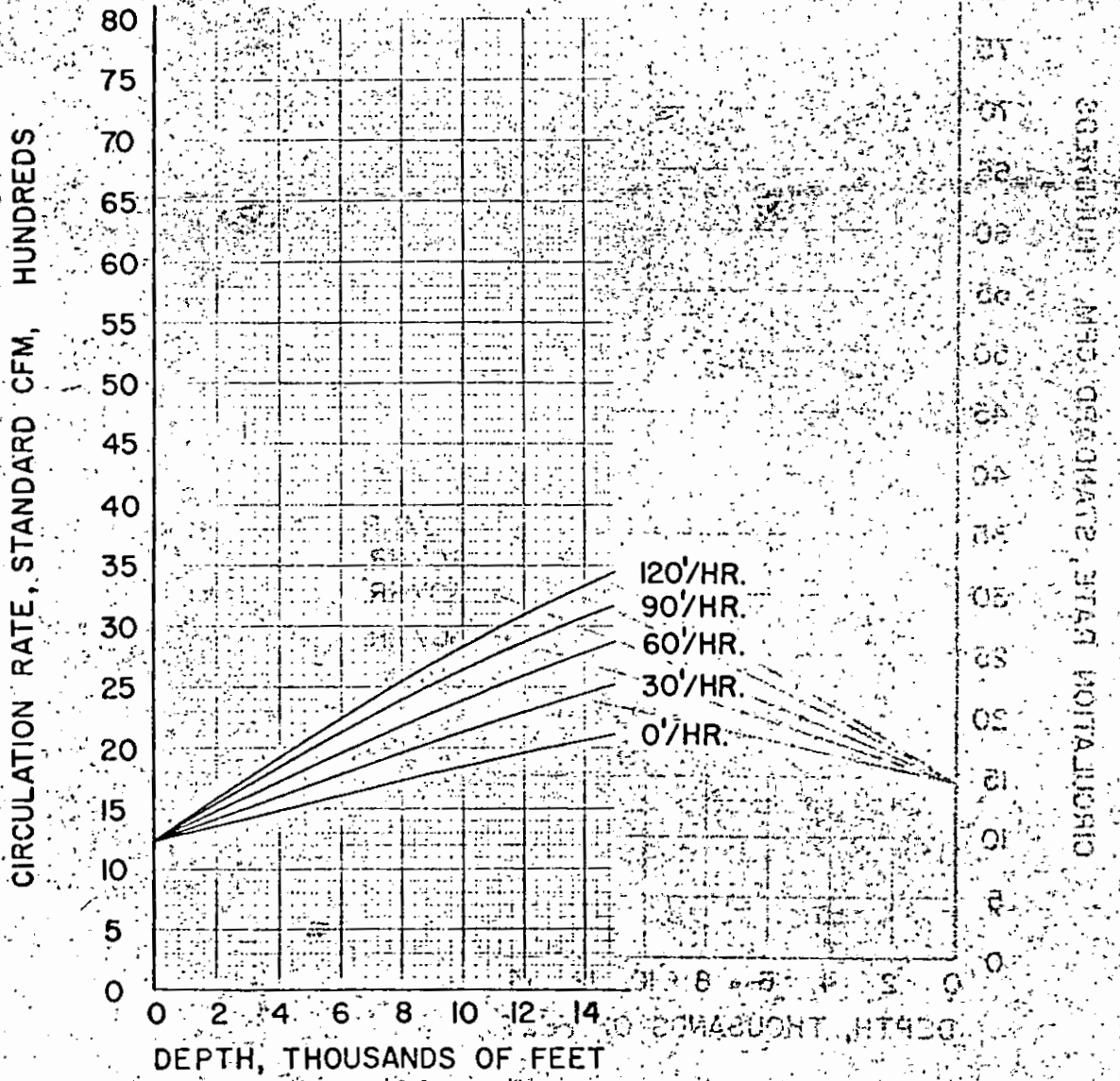
HOLE SIZE 12 1/4" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

DRILL PIPE OD. 6 5/8"

HOLE SIZE 11"

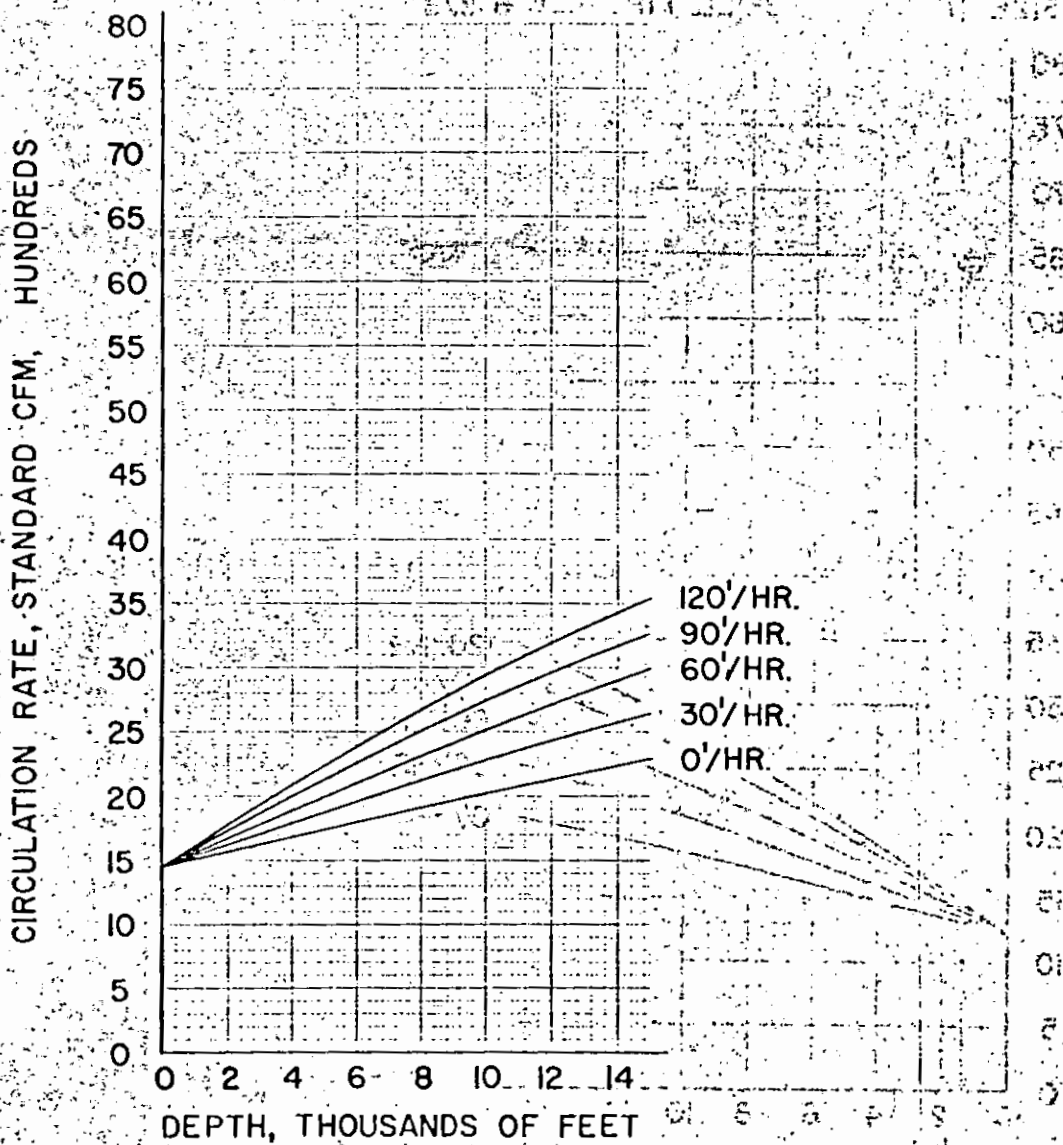




GAS GRAVITY 1.0

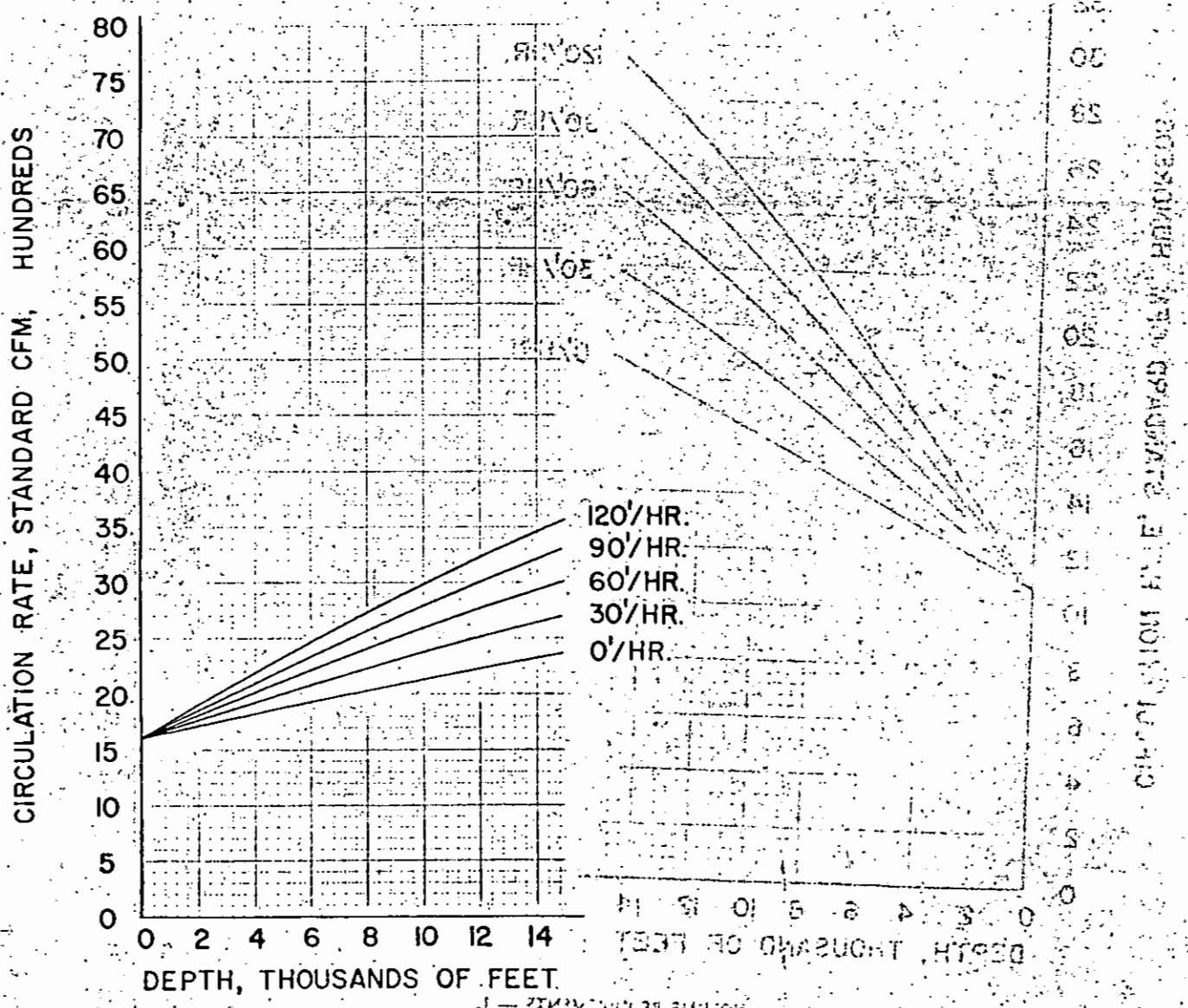
HOLE SIZE 11"

DRILL PIPE O.D. 5 1/2"



VOLUME REQUIREMENTS — 11

GAS GRAVITY 1.0  
 DRILL PIPE O.D. 4 1/2"  
 HOLE SIZE 11"

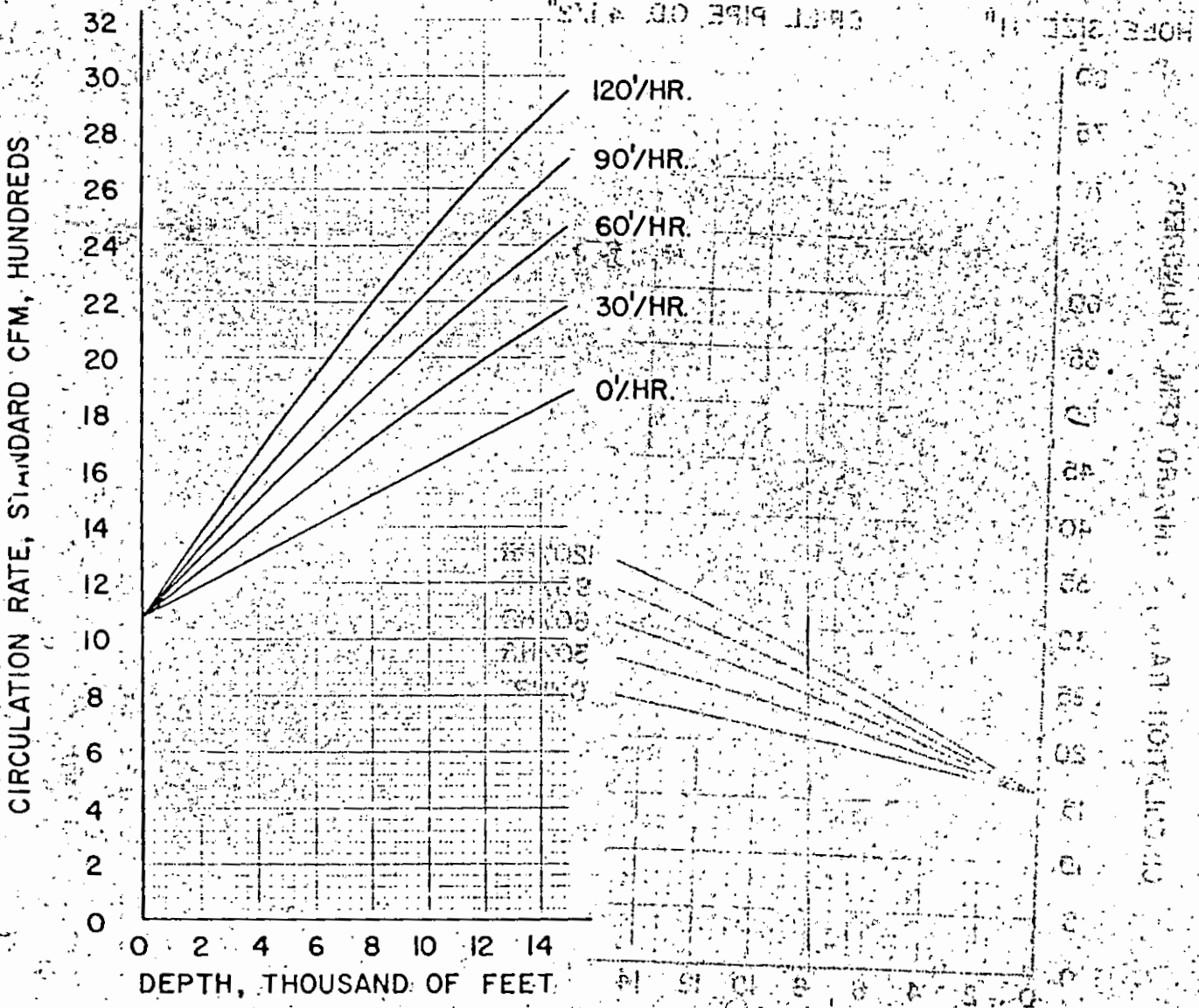


GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 9 7/8"

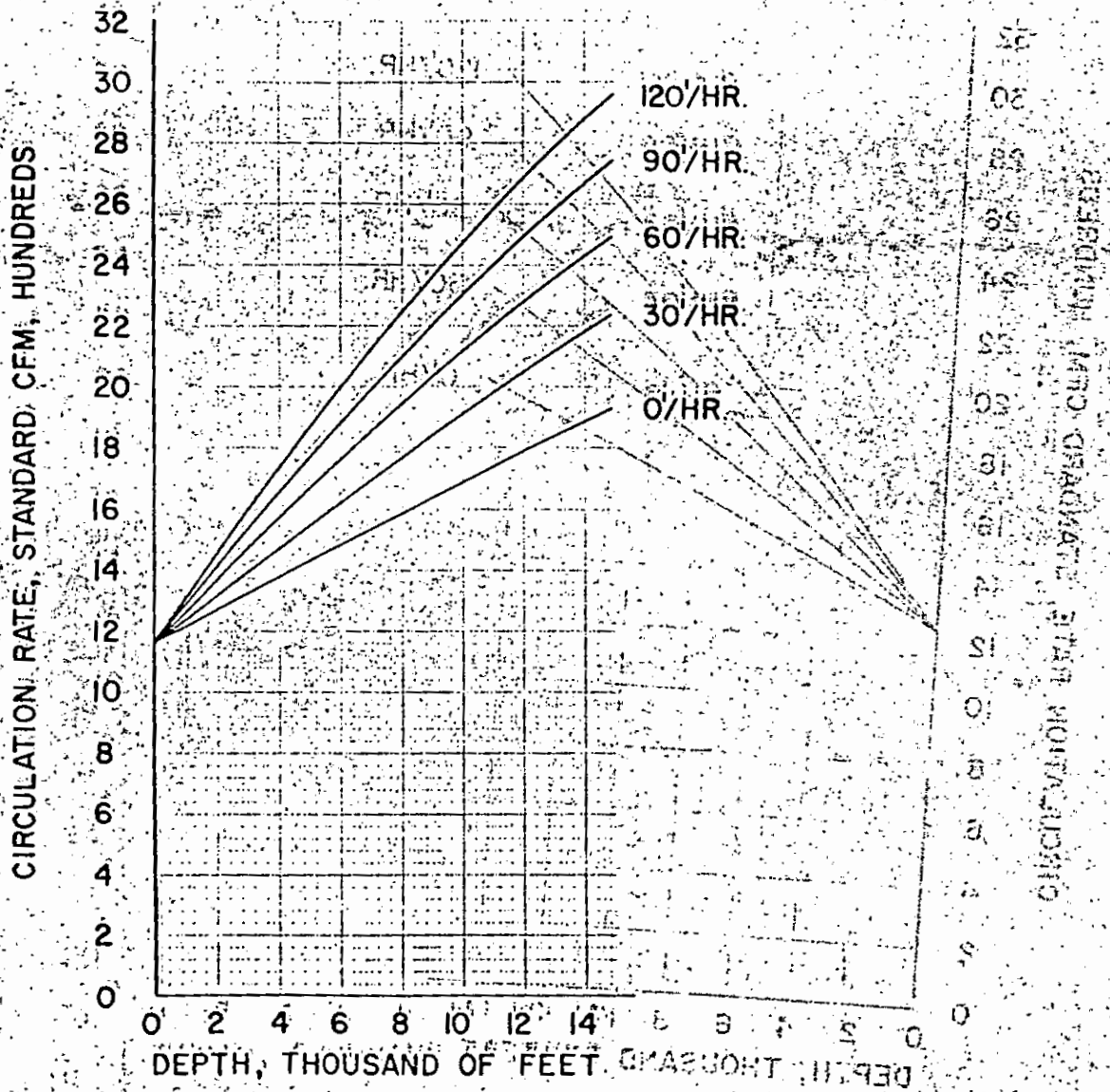
DRILL PIPE O.D. 5 1/2"

GAS GRAVITY 1.0



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 9 7/8" DRILL PIPE O.D. 5" LARG

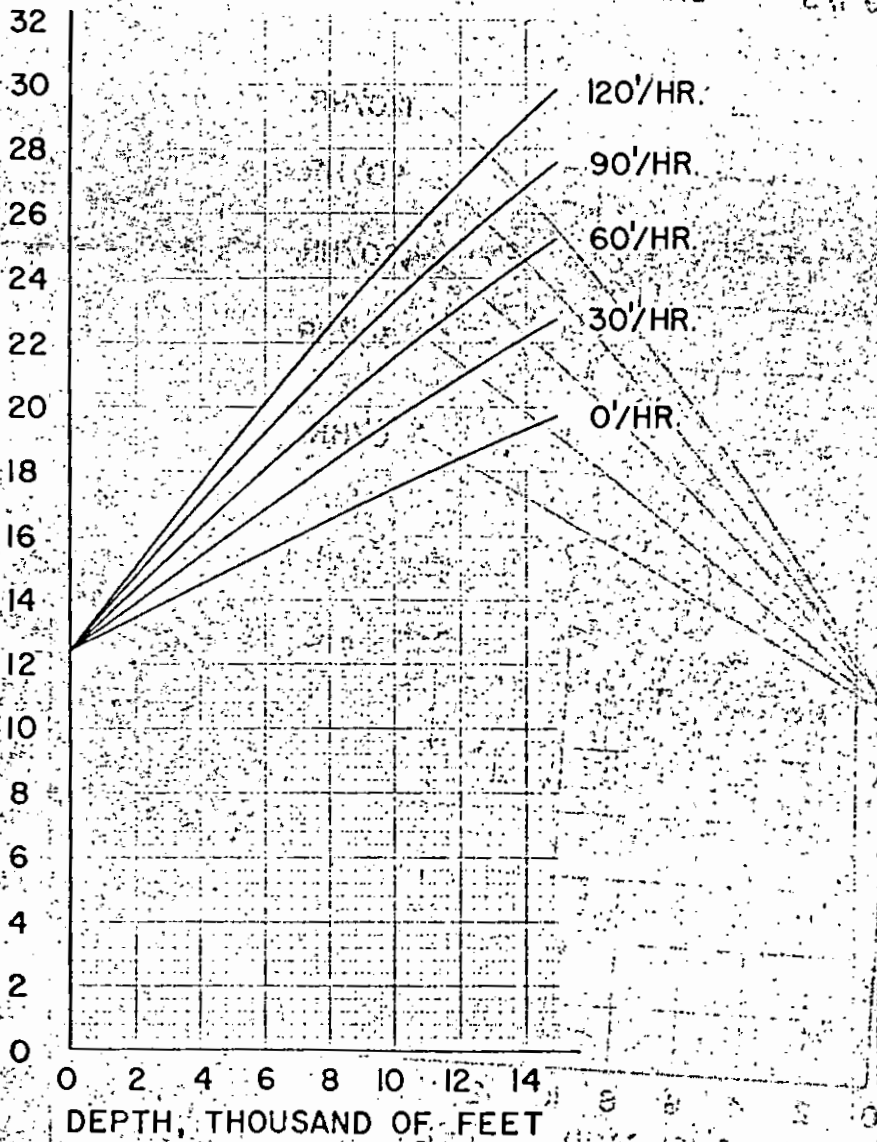


GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 9 7/8"

DRILL PIPE O.D. 4 1/2"

CIRCULATION RATE, STANDARD CFM, HUNDREDS

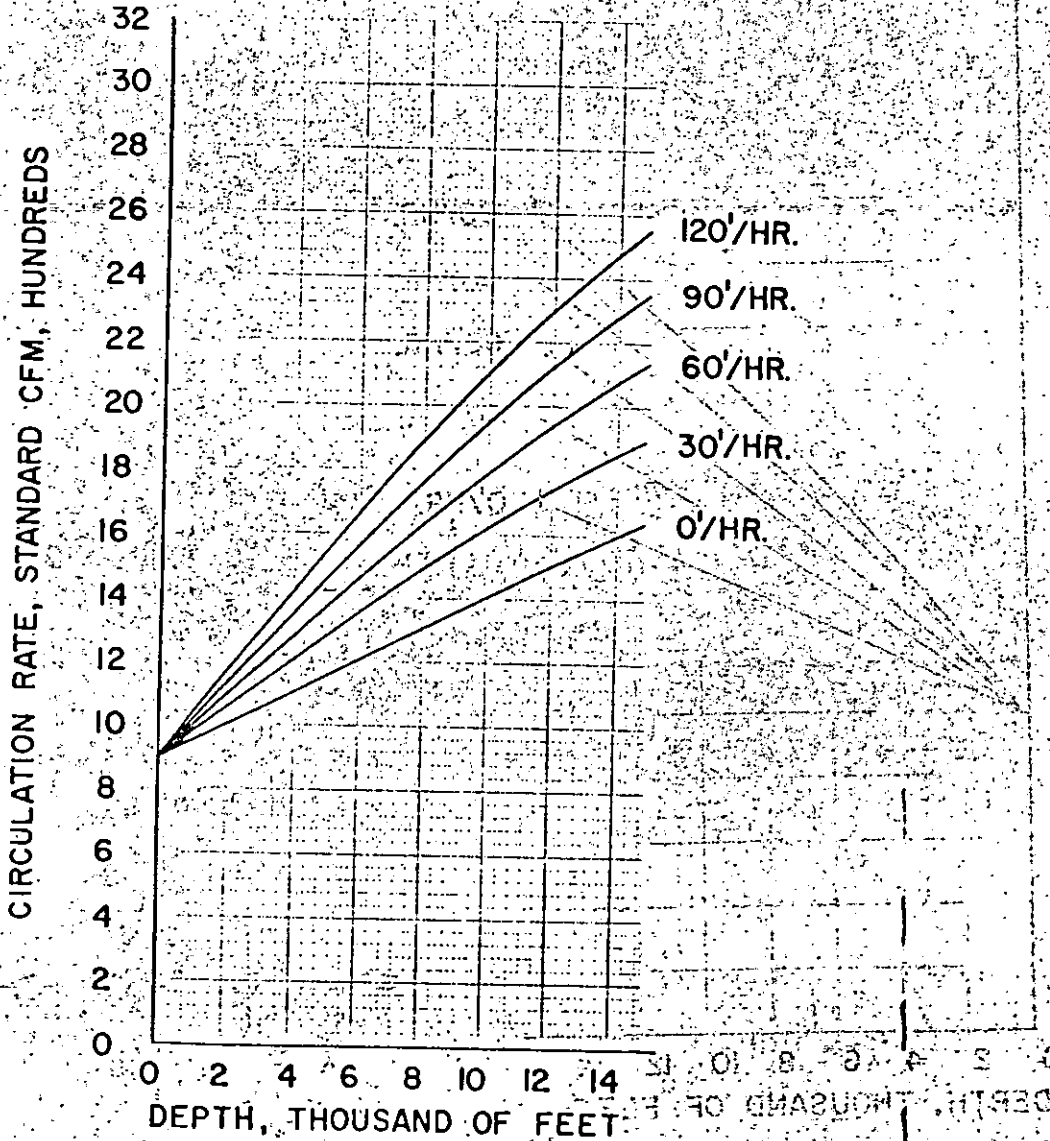


DEPTH, THOUSAND OF FEET

GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 9"

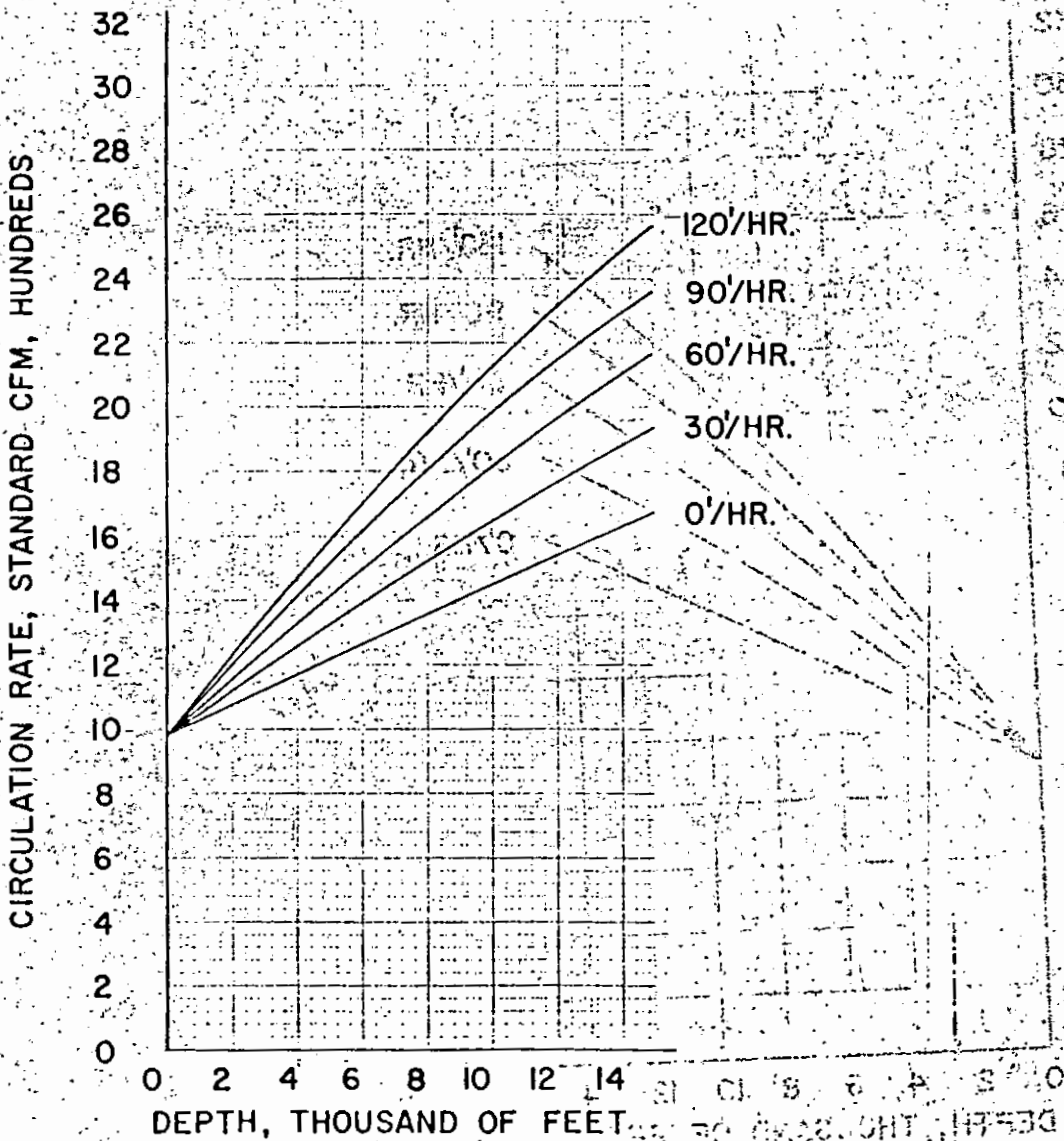
DRILL PIPE O.D. 5"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 9"

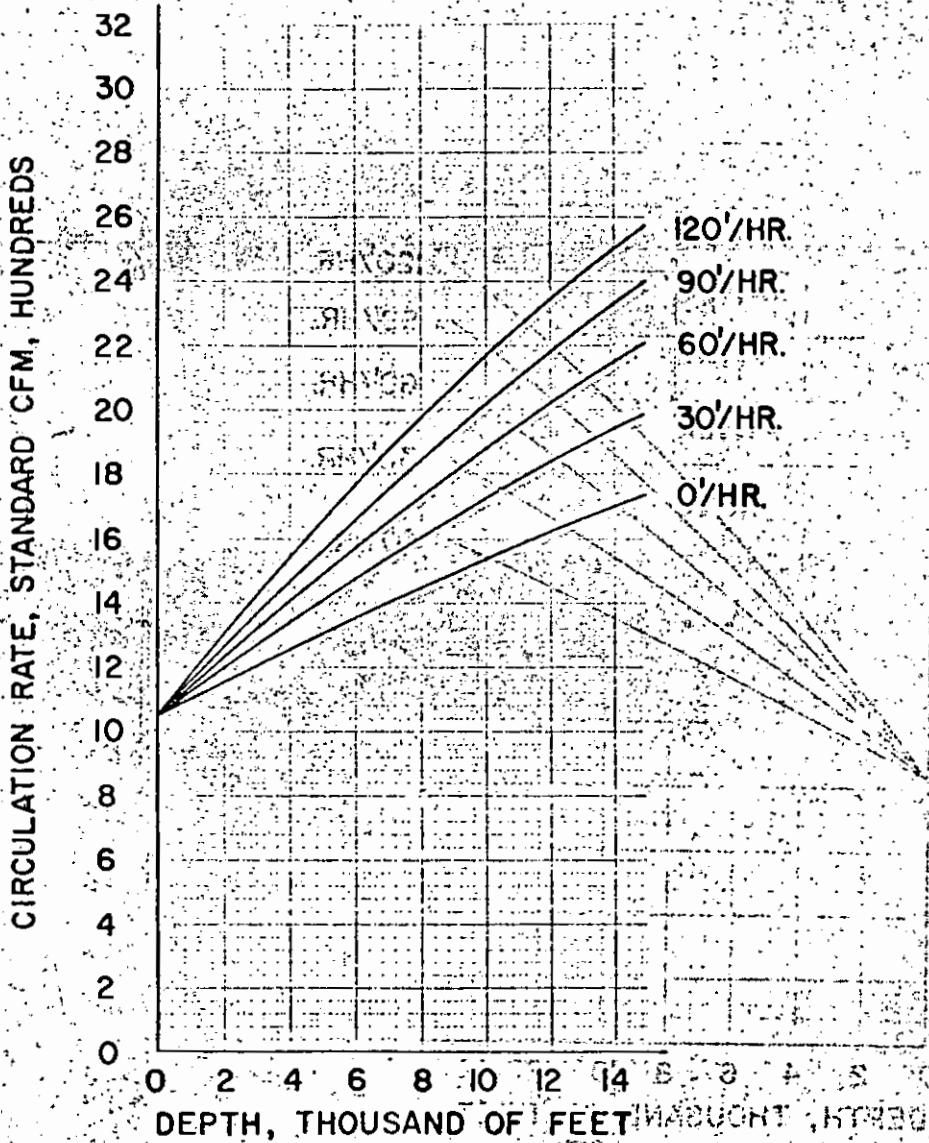
DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 9"

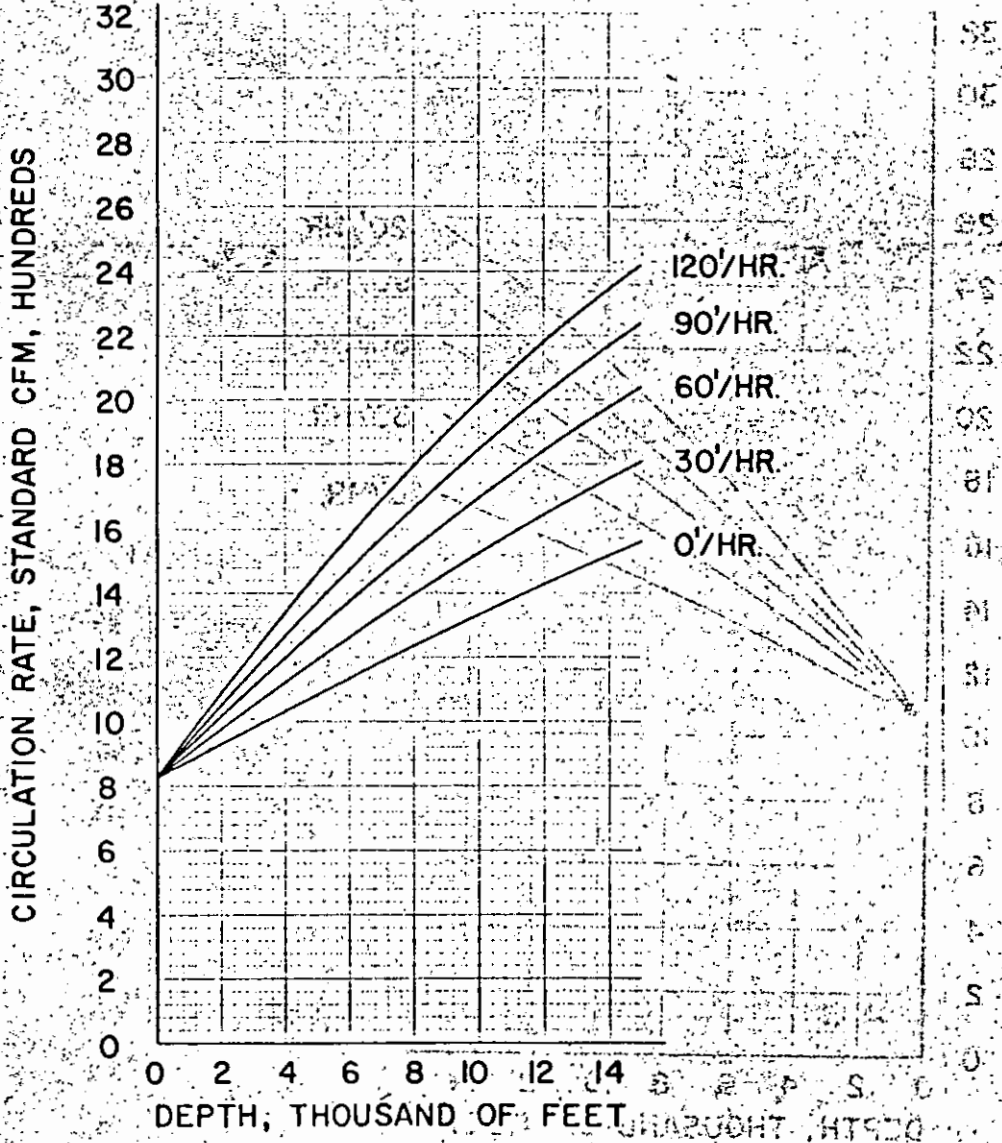
DRILL PIPE O.D. 3 1/2"





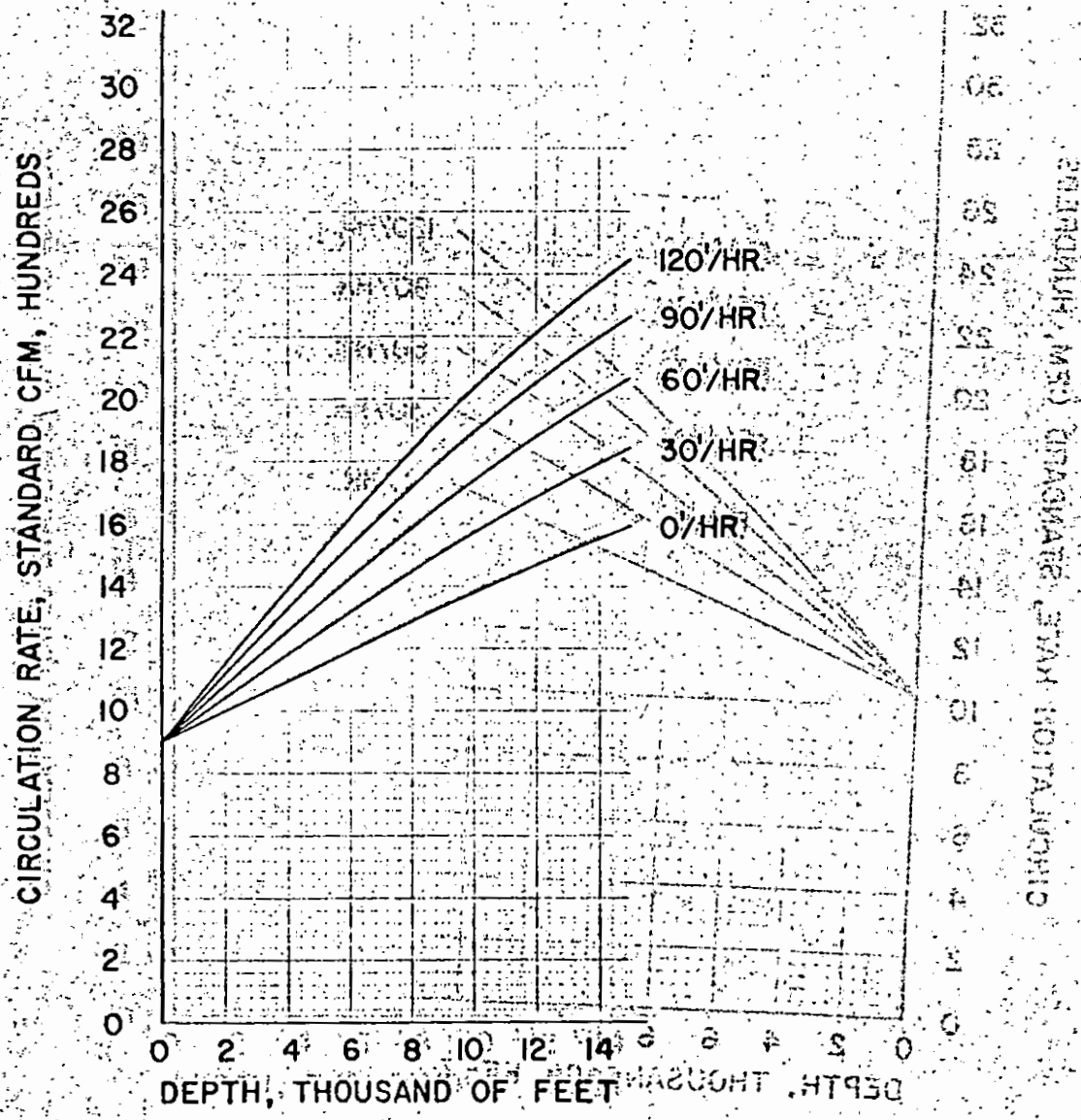
GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 8 3/4" DRILL PIPE OD 5"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 8-3/4" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"

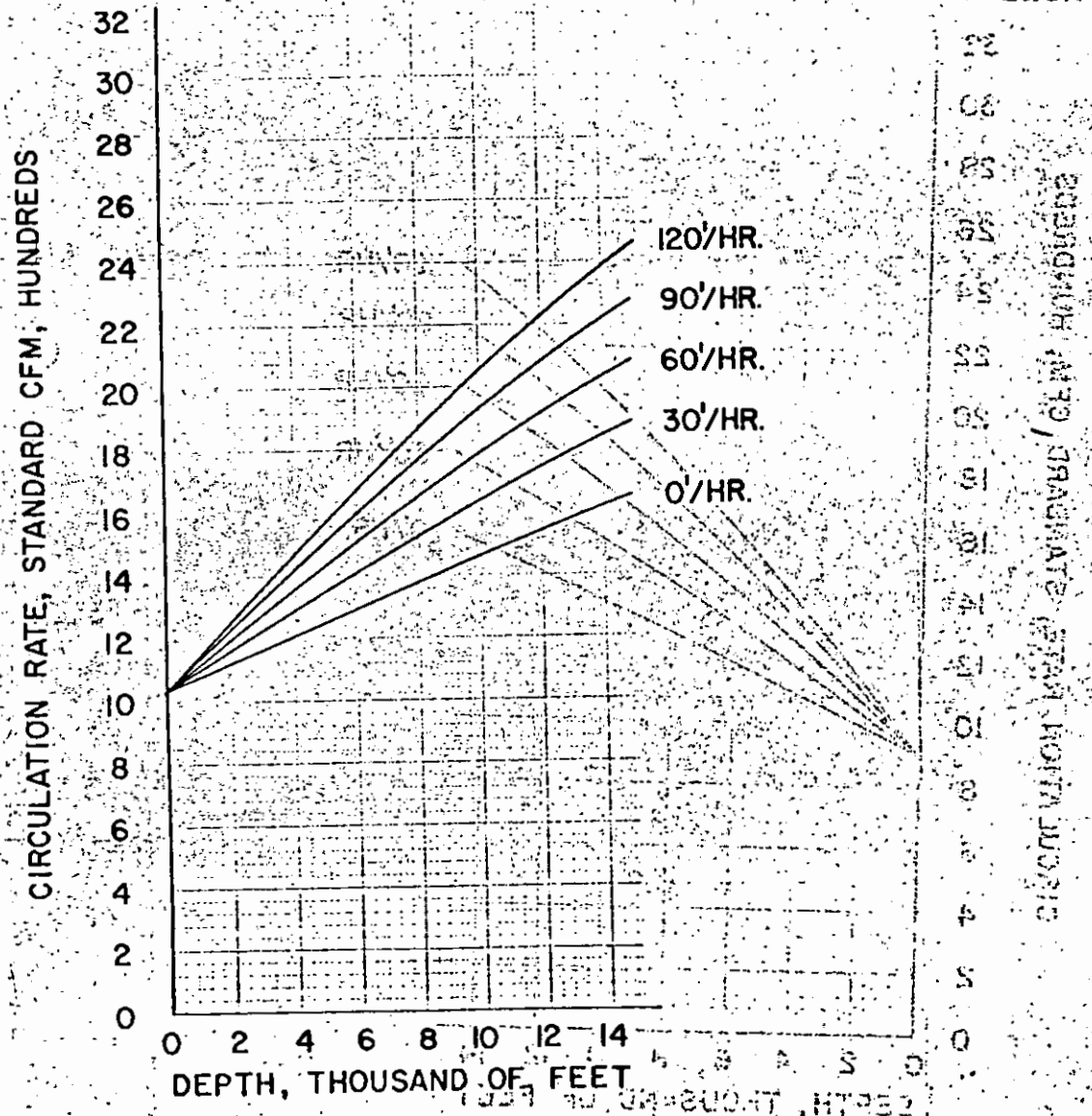


20 — VOLUME REQUIREMENTS

GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 8 3/4"

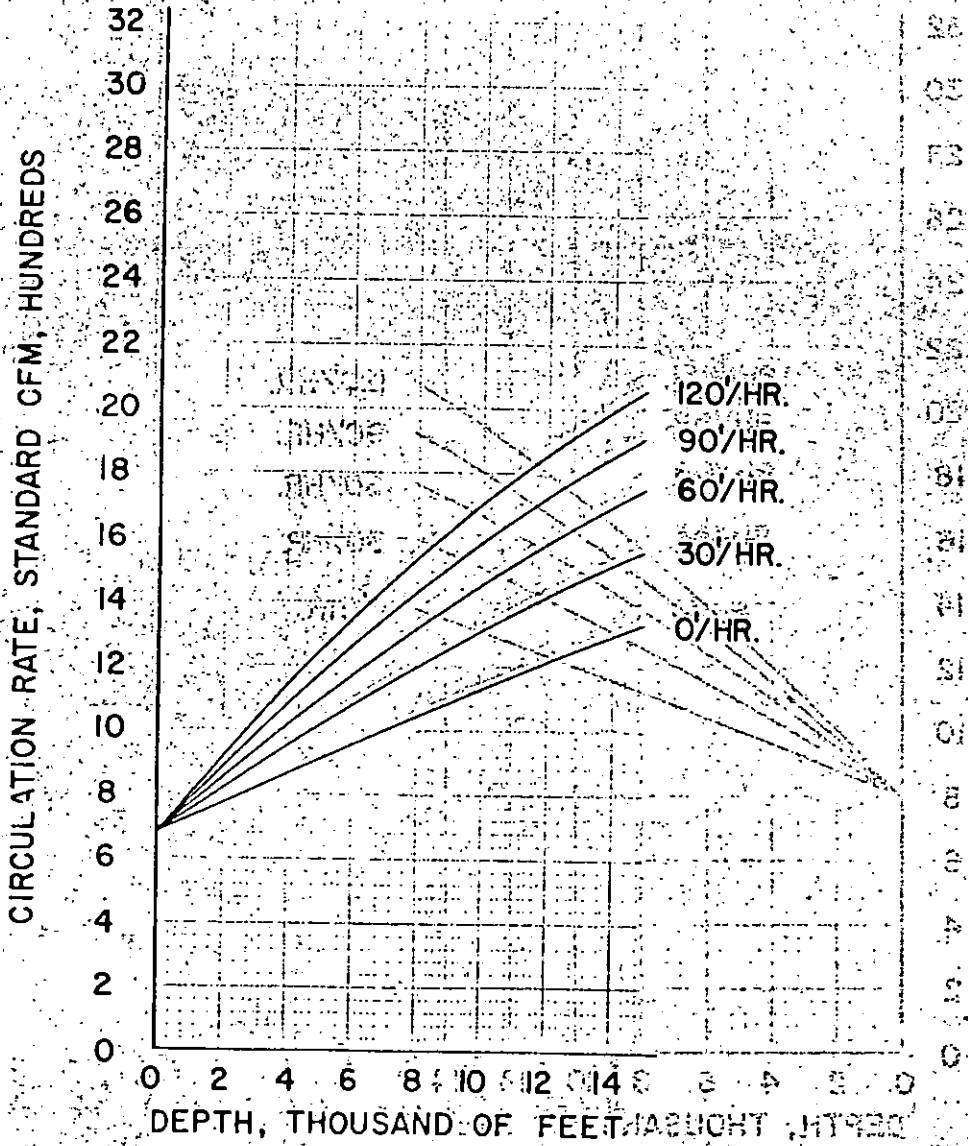
DRILL PIPE O.D. 3 1/2"



VOLUME REQUIREMENTS — 21

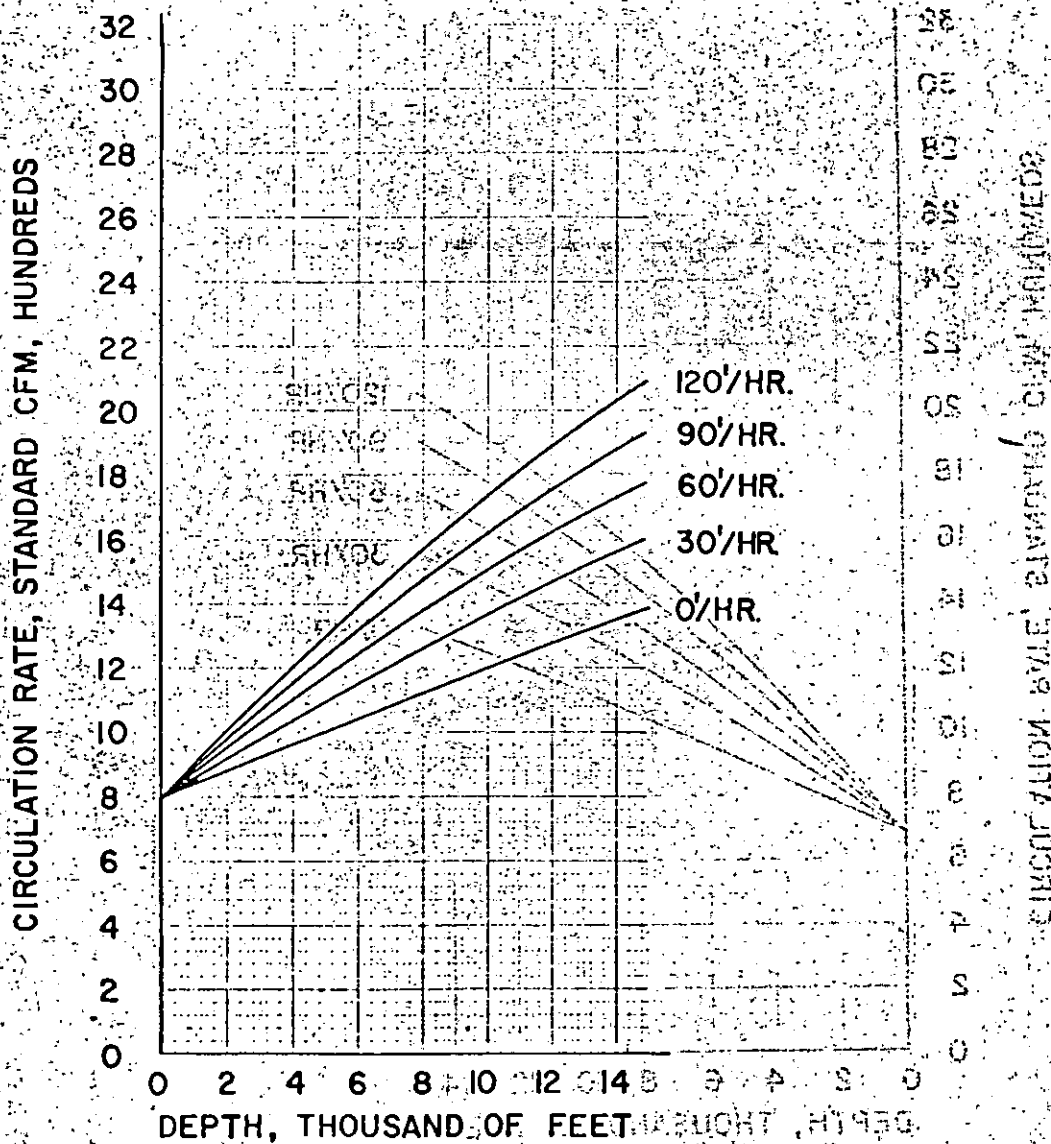
GAS GRAVITY 1.07459 2.00

HOLE SIZE 7 7/8" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 1.0 (VARD 240)

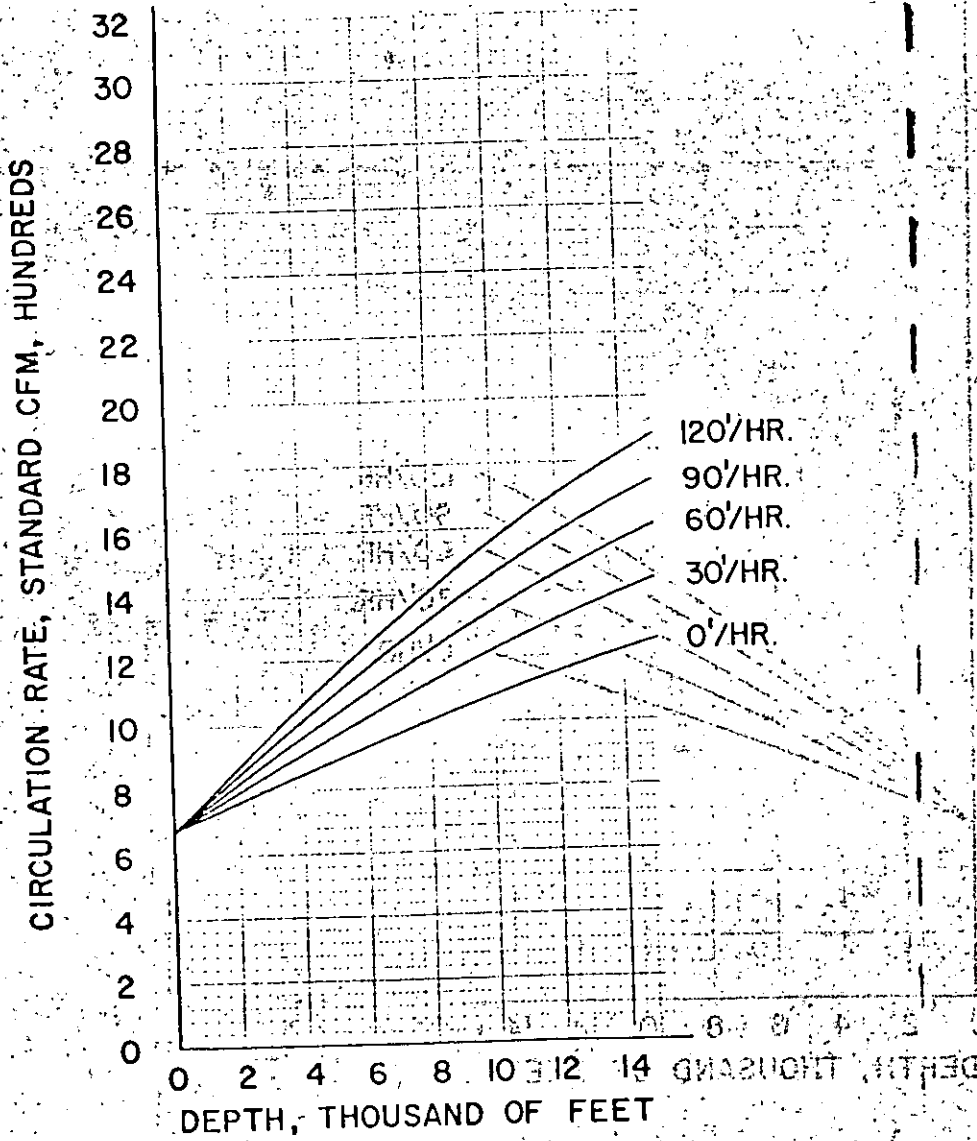
HOLE SIZE 7 7/8" IN. DRILL PIPE O.D. 3 1/2" IN. BIT



GAS GRAVITY 1.0

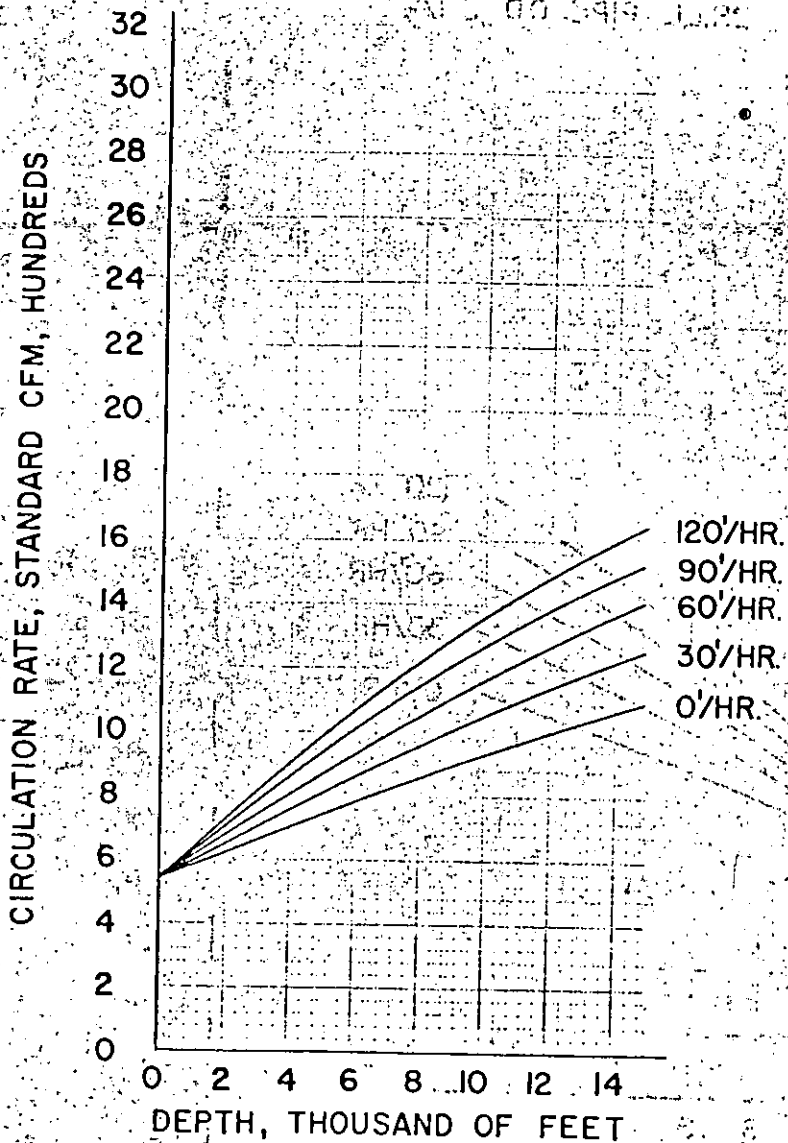
HOLE SIZE 7 3/8"

DRILL PIPE O.D. 3 1/2"



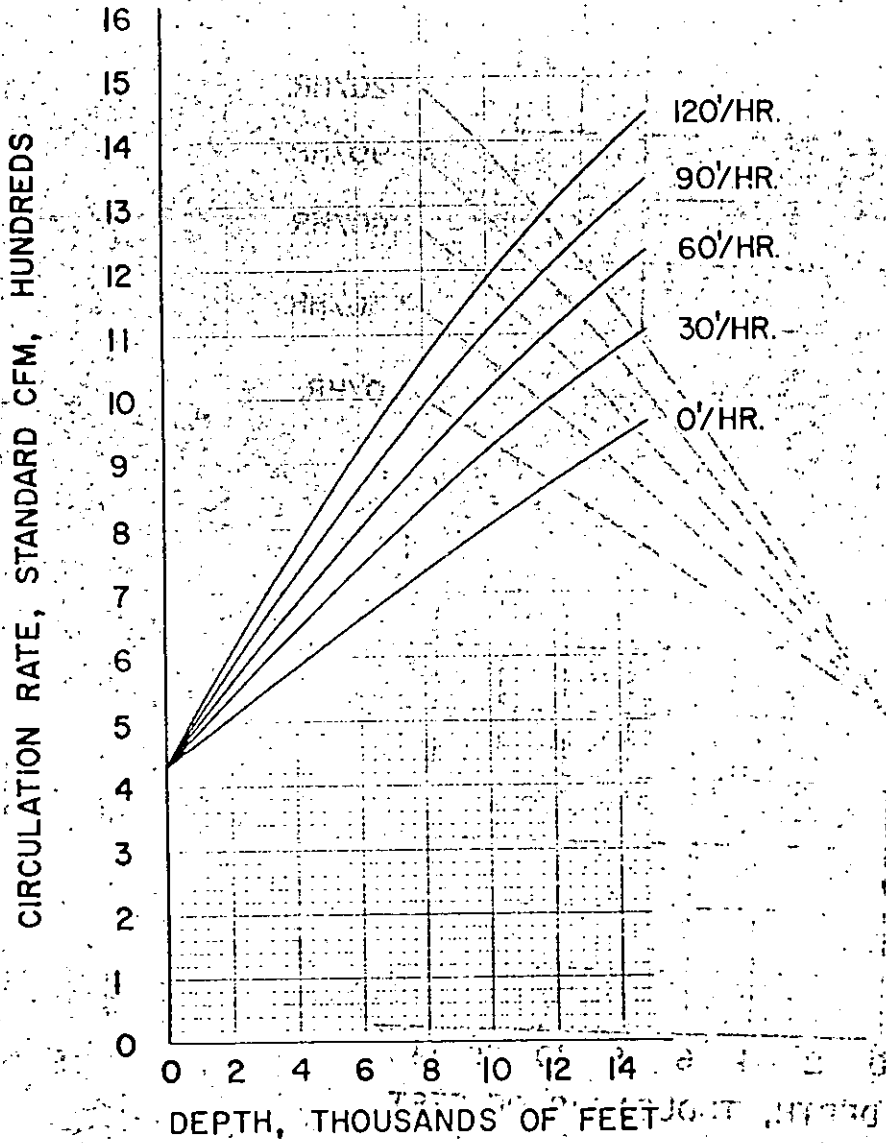
GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 6 3/4" DRILL PIPE OD 3 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

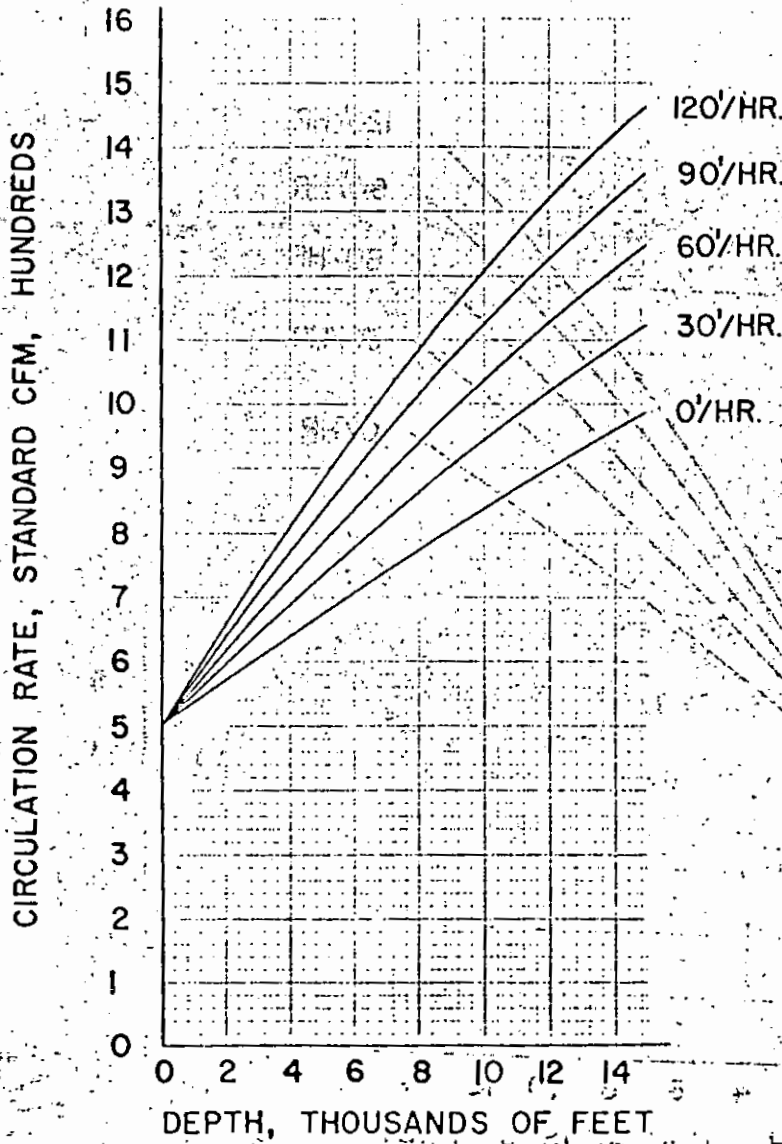
HOLE SIZE 6 1/4" DRILL PIPE OD. 3 1/2"





GAS GRAVITY 1.0

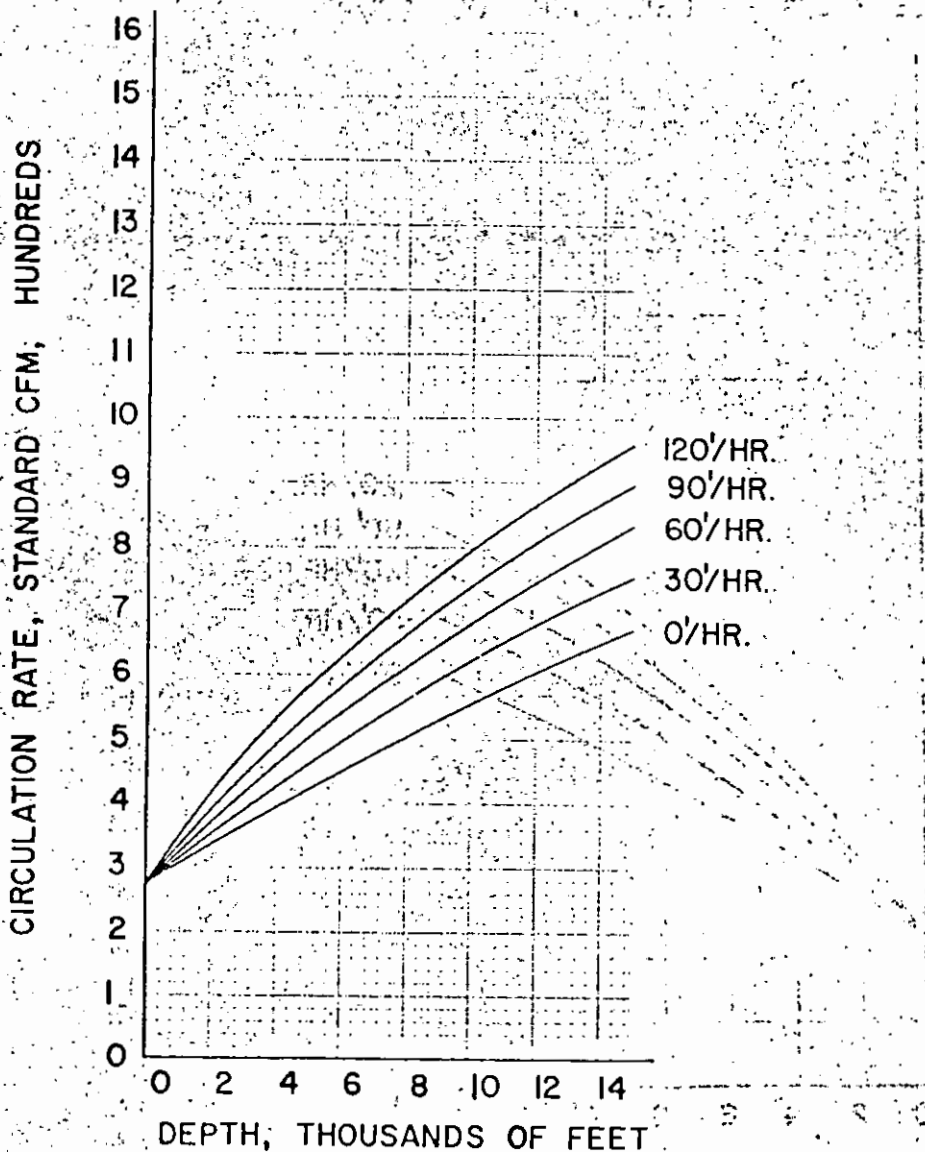
HOLE SIZE 6 1/4" DRILL PIPE OD. 2 7/8"



GAS GRAVITY 1.0

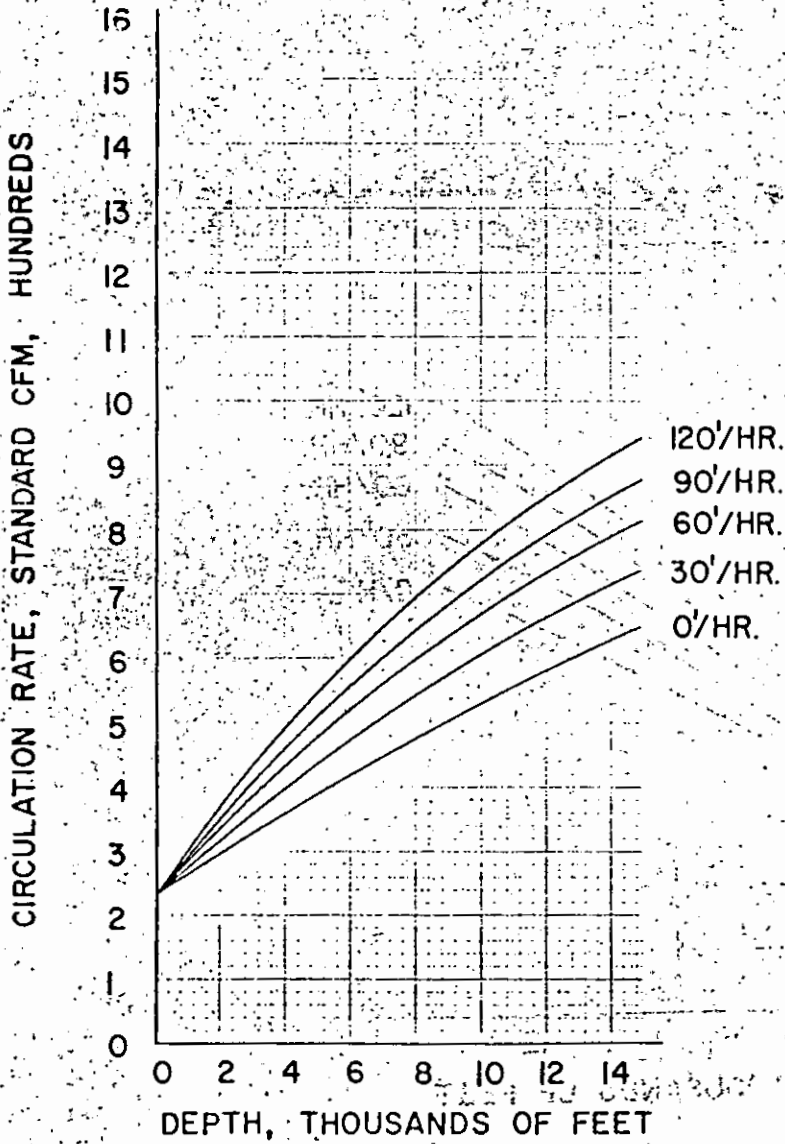
HOLE SIZE 4 3/4"

DRILL PIPE OD. 2 7/8"



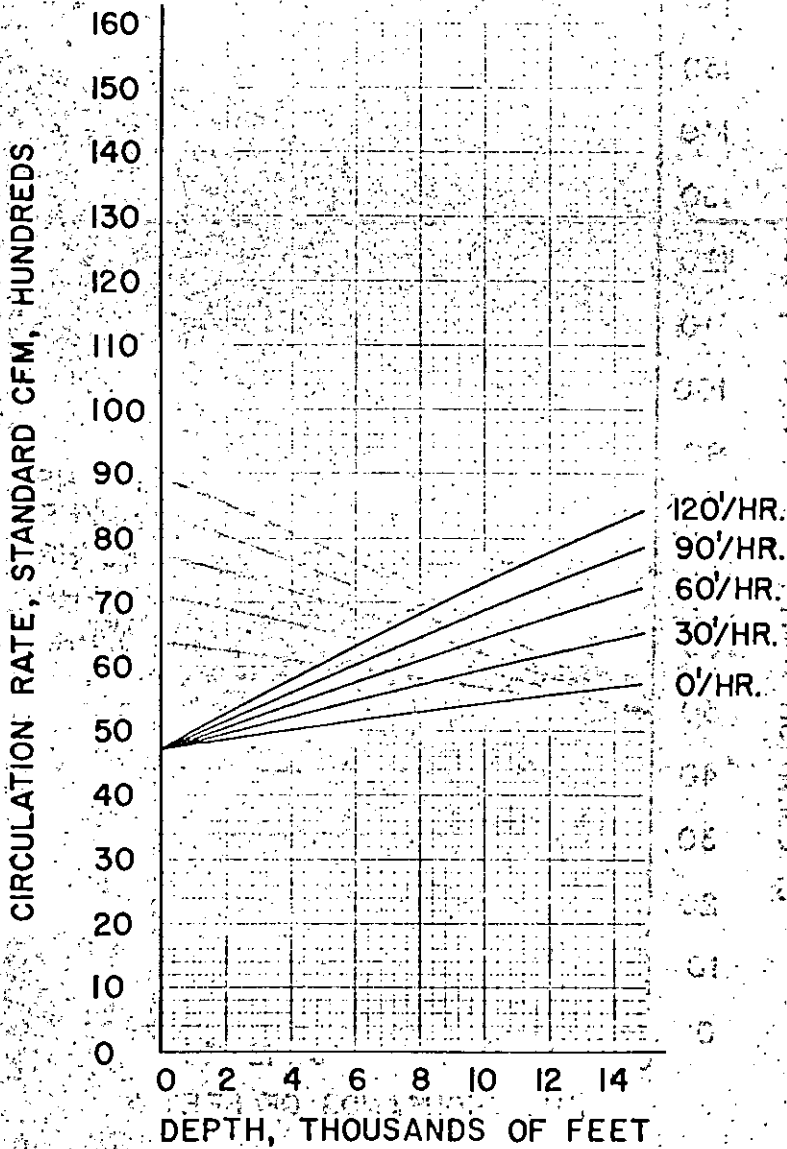
GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 4 3/4" DRILL PIPE OD. 2 3/8"



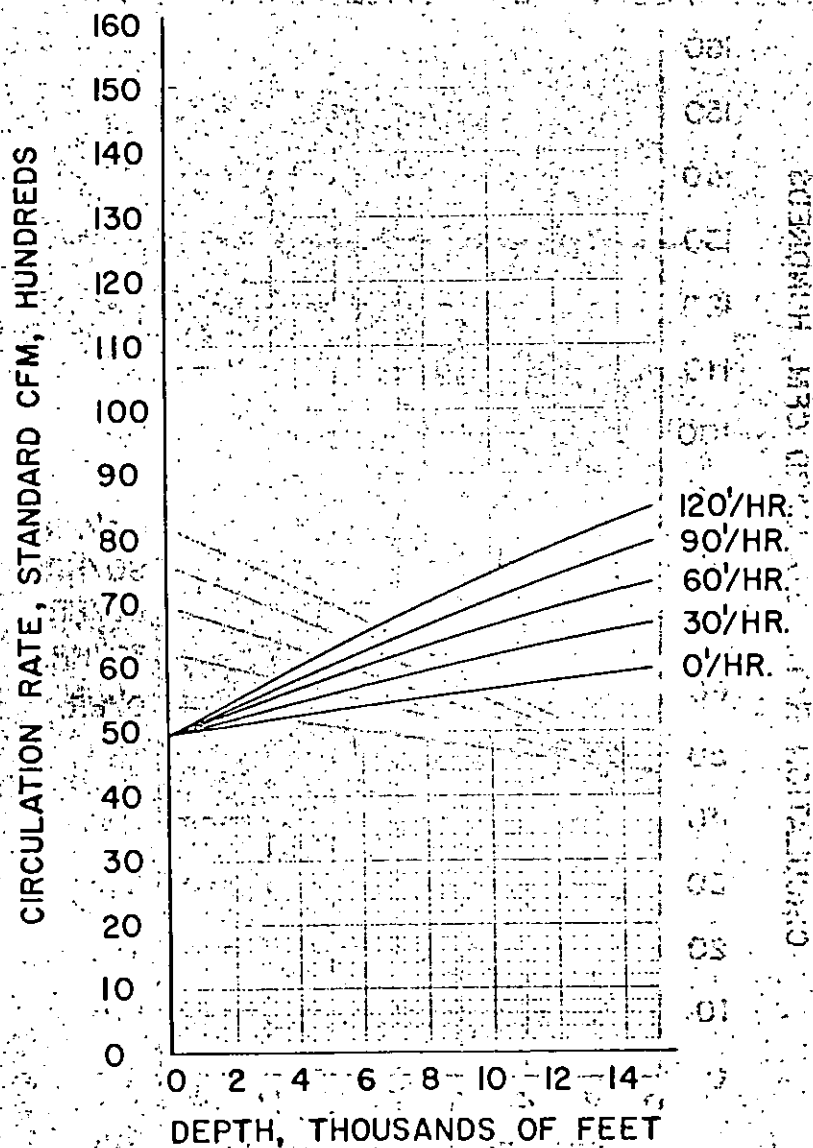
GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 17 1/2" DRILL PIPE O.D. 6 5/8"



GAS GRAVITY 0.8

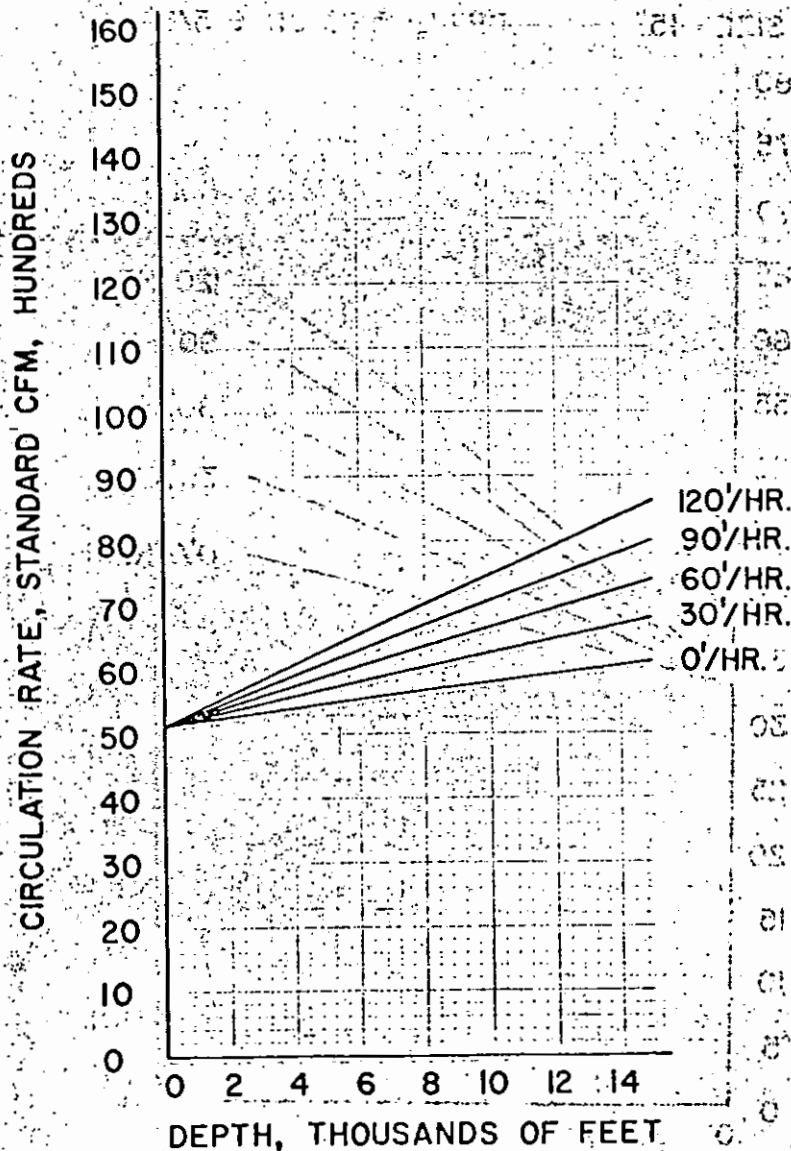
HOLE SIZE 17 1/2" DRILL PIPE O.D. 5 1/2"





GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 17 1/2" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



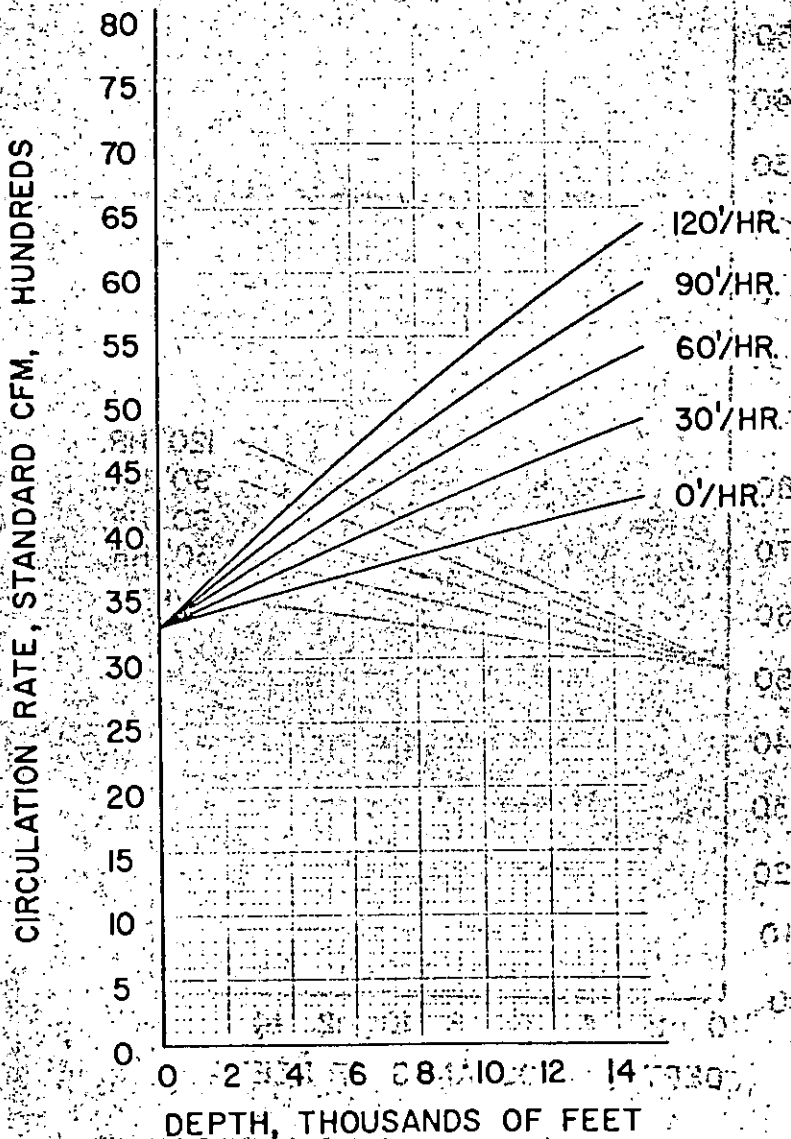
WELLS TO GO VOLUME REQUIREMENTS — 33

THE OIL FIELD ENGINEER

GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 15"

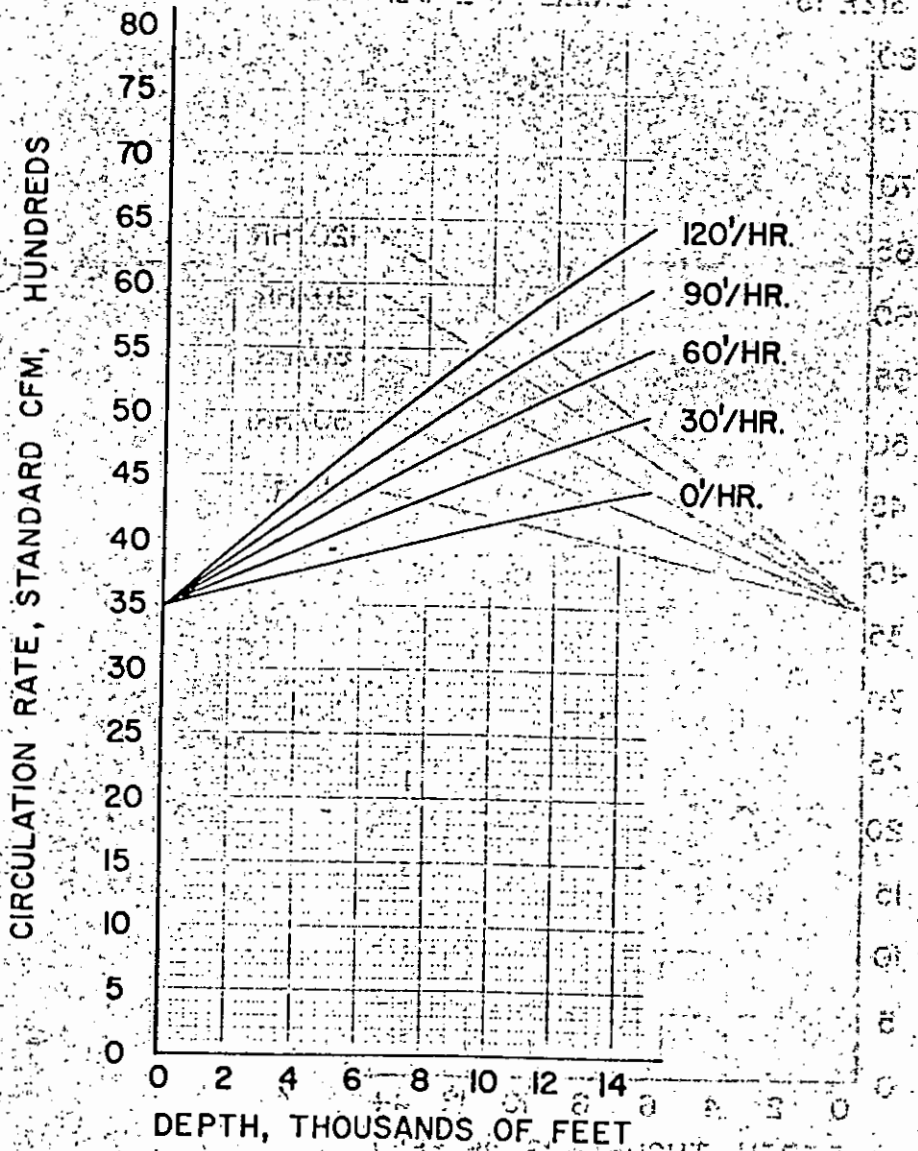
DRILL PIPE OD 6 5/8"



GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 15"

DRILL PIPE O.D. 5 1/2"



CIRCULATION RATE, STANDARD CFM, HUNDREDS

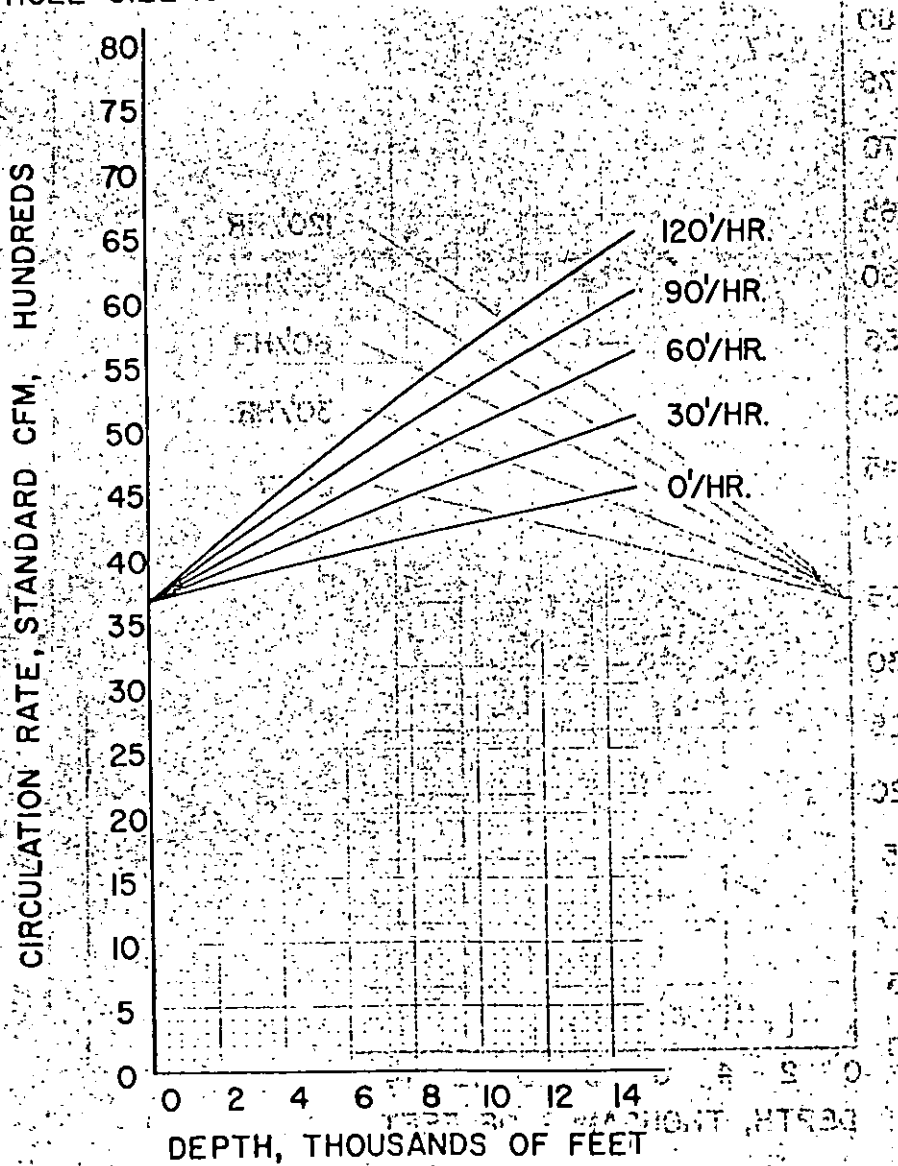
DEPTH, THOUSANDS OF FEET

VOLUME REQUIREMENTS — 35



GAS GRAVITY 0.8

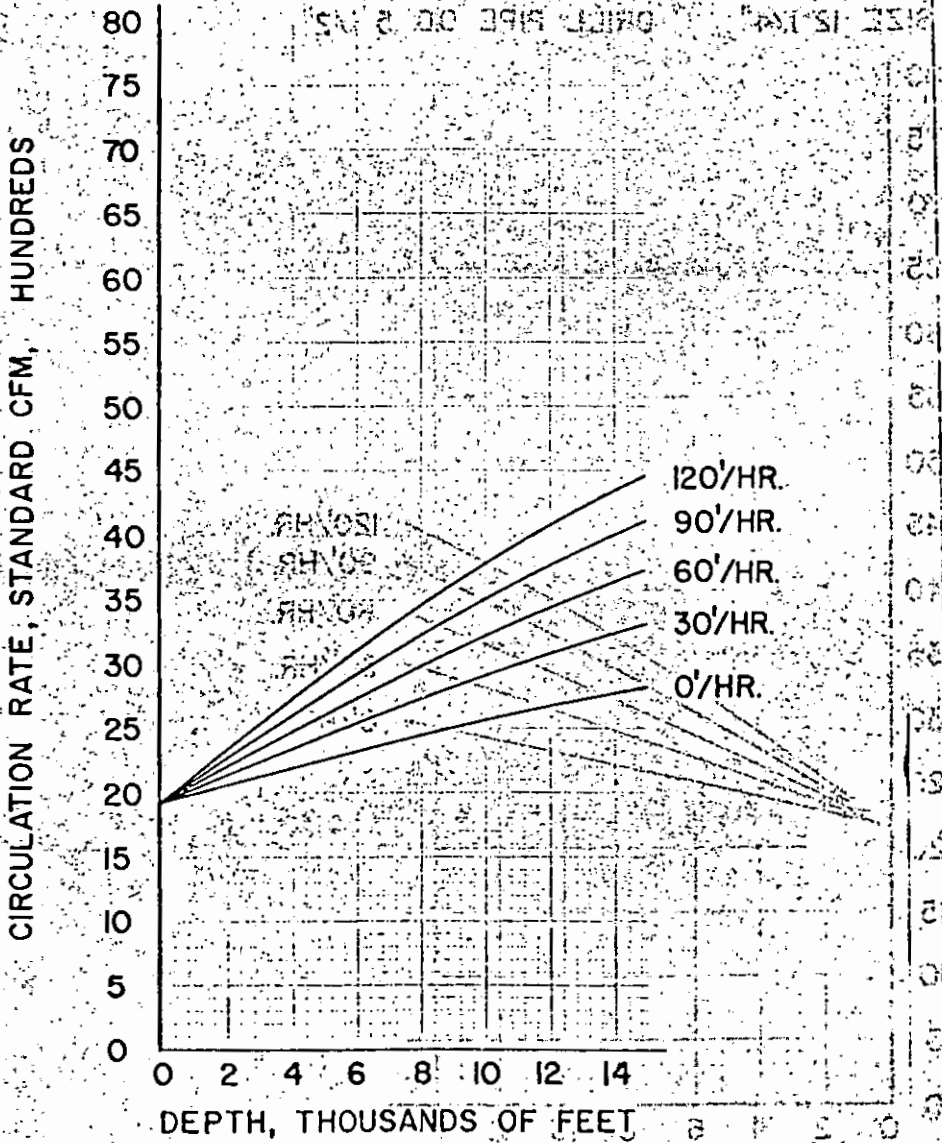
HOLE SIZE 15" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 12 1/4"

DRILL PIPE O.D. 6 5/8"



VOLUME REQUIREMENTS — 37

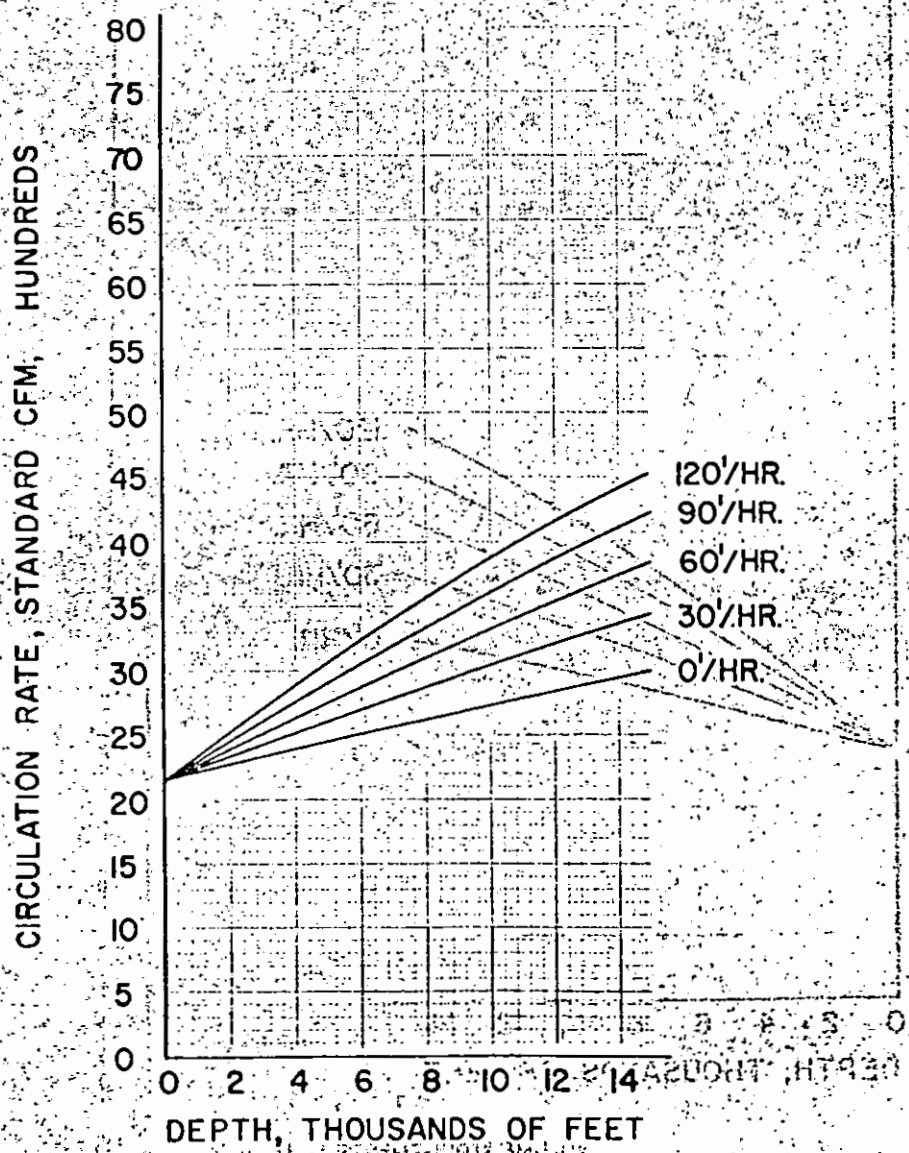
VOLUME REQUIREMENTS — 37

BO YTHWAB BAS

GAS GRAVITY 0.8

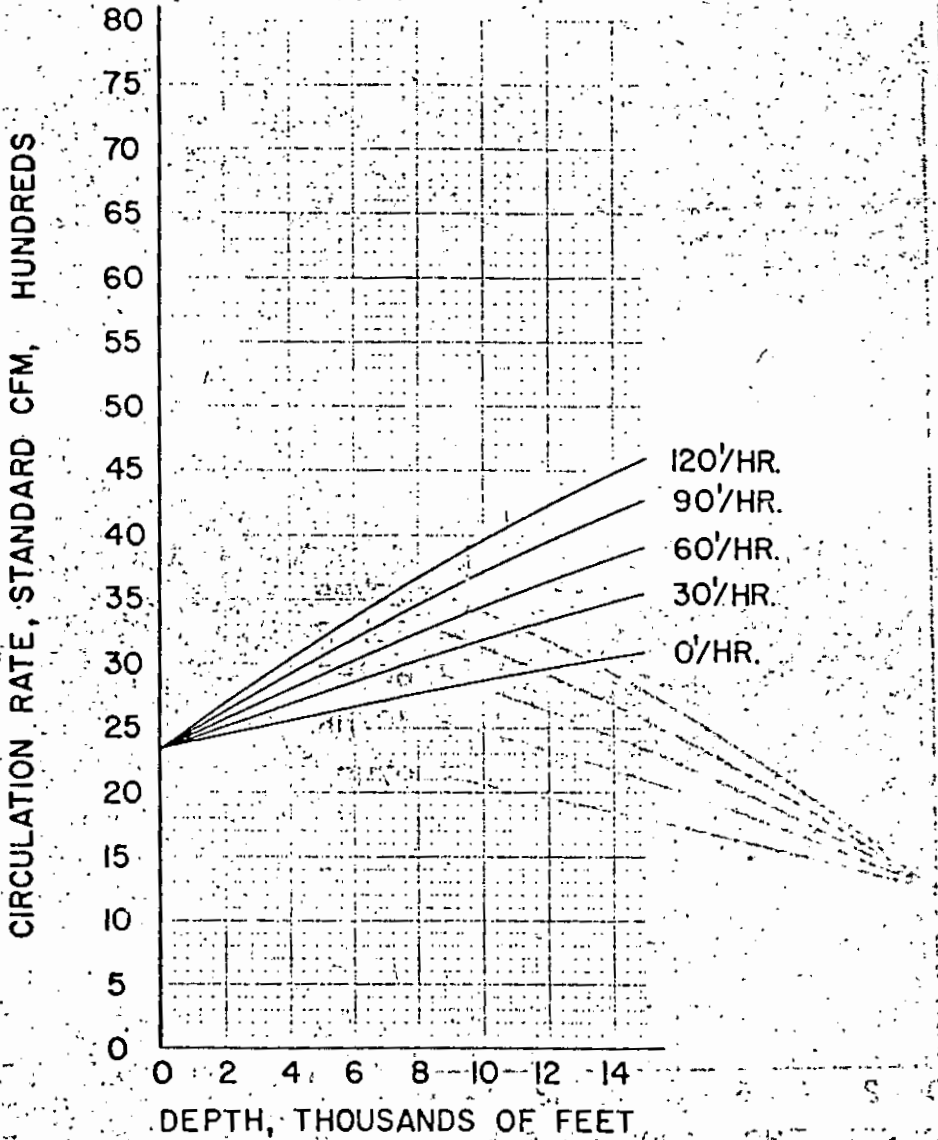
AN SI 12 1/4

HOLE SIZE 12 1/4" DRILL PIPE OD. 5 1/2"



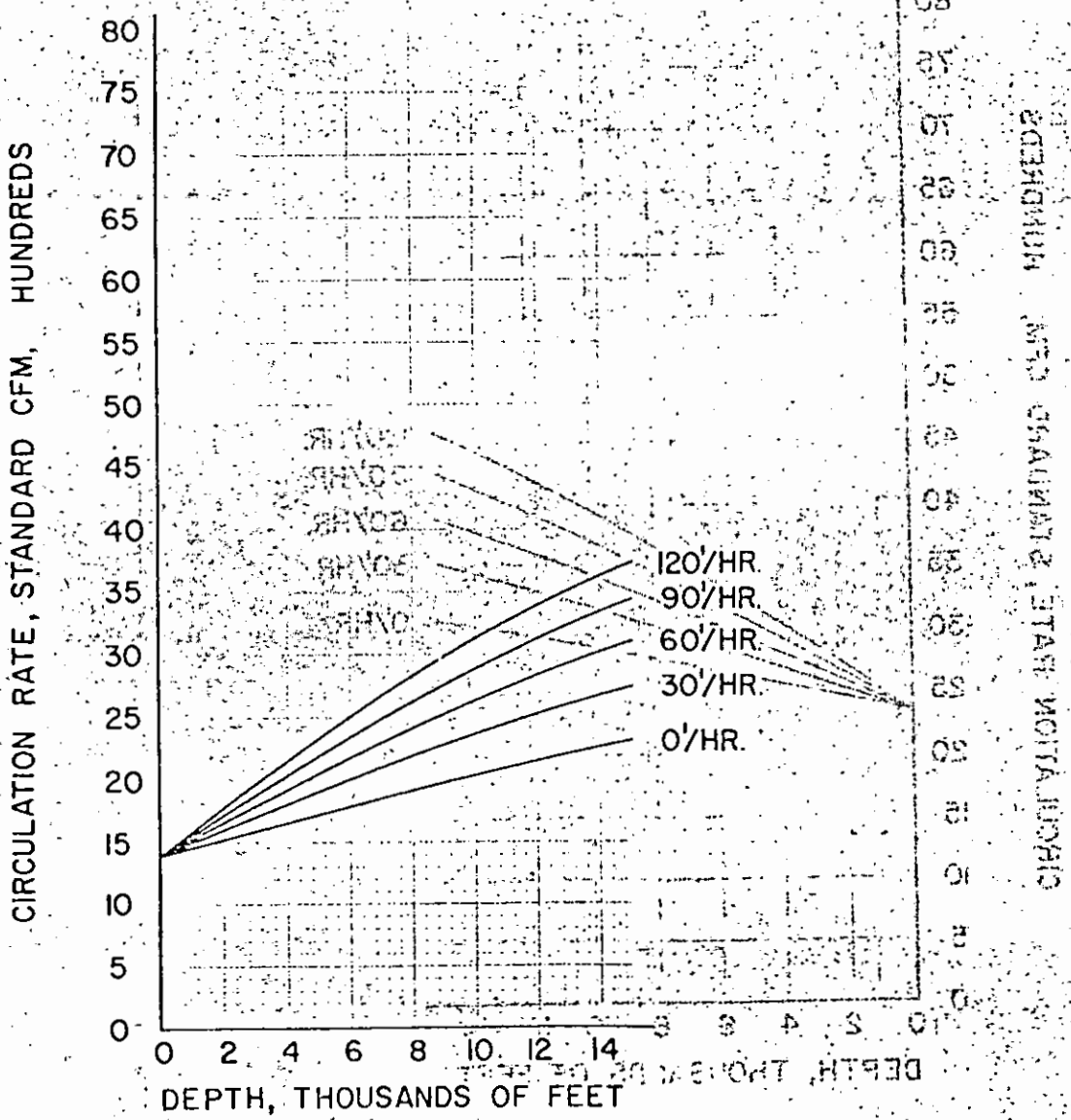
GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 12 1/4" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 0.8

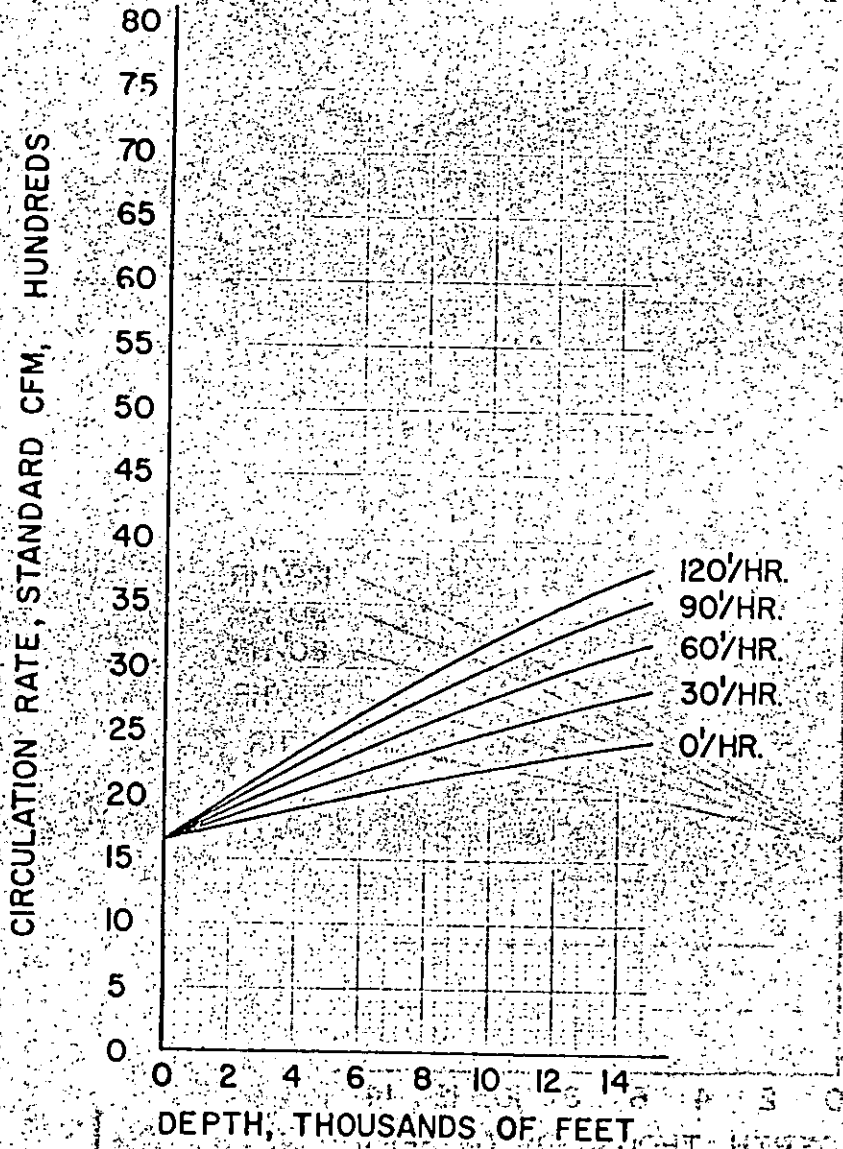
HOLE SIZE 11" DRILL PIPE O.D. 6 5/8"



GAS GRAVITY 0.8

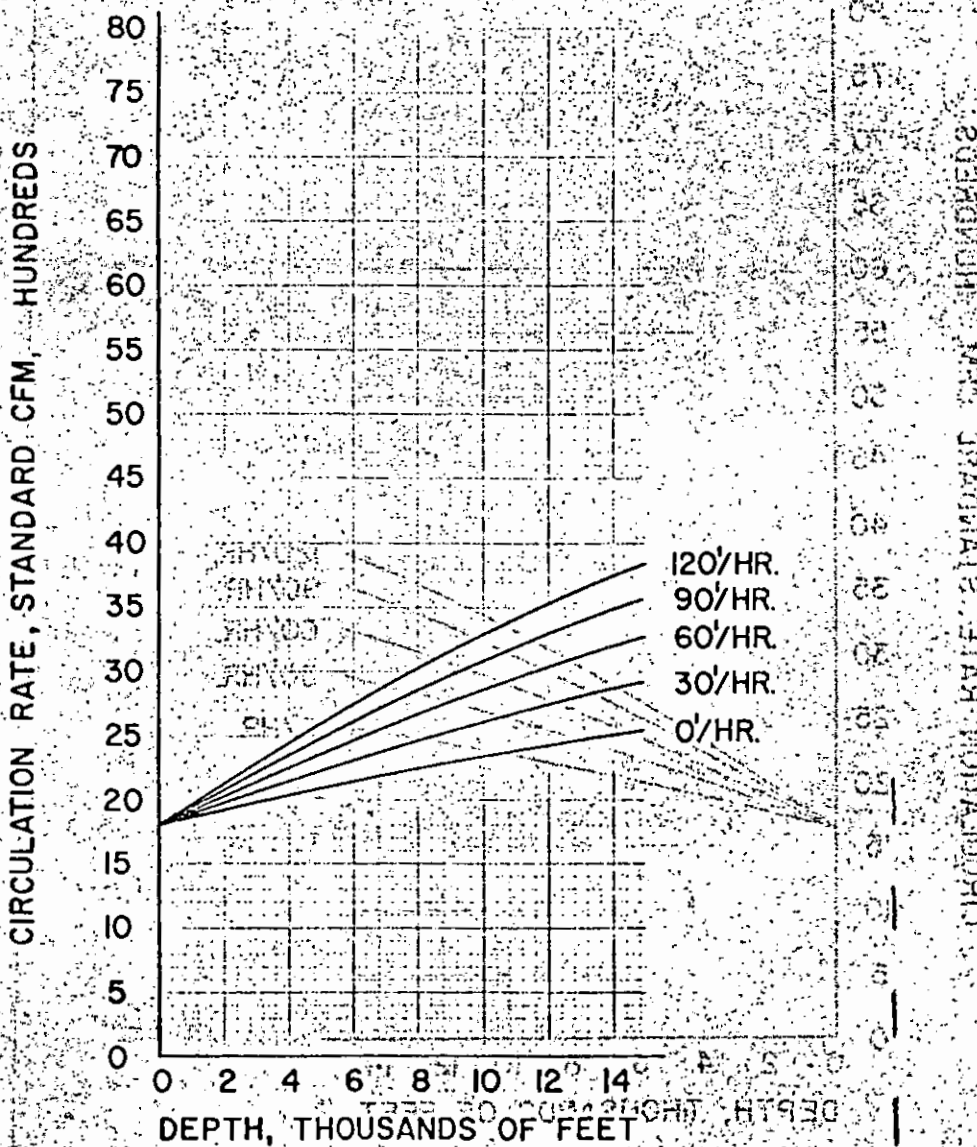
HOLE SIZE 11"

DRILL PIPE O.D. 5 1/2"



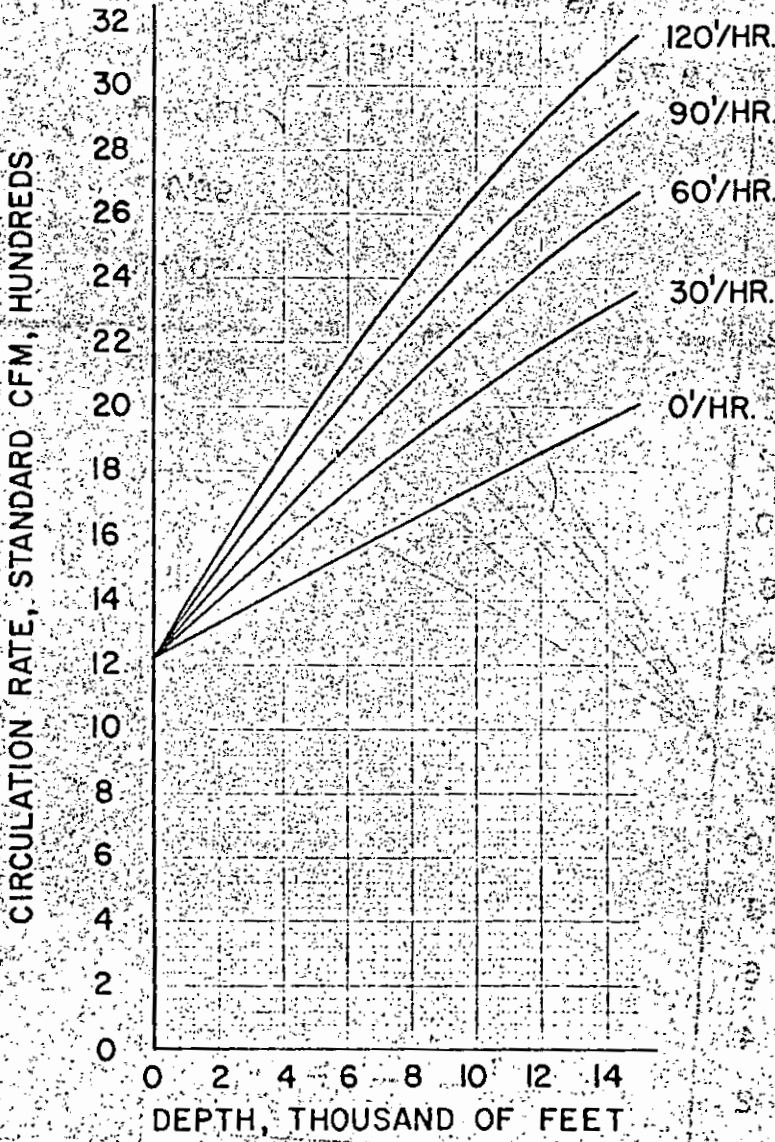
GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 11" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 9 7/8" DRILL PIPE OD 5 1/2"

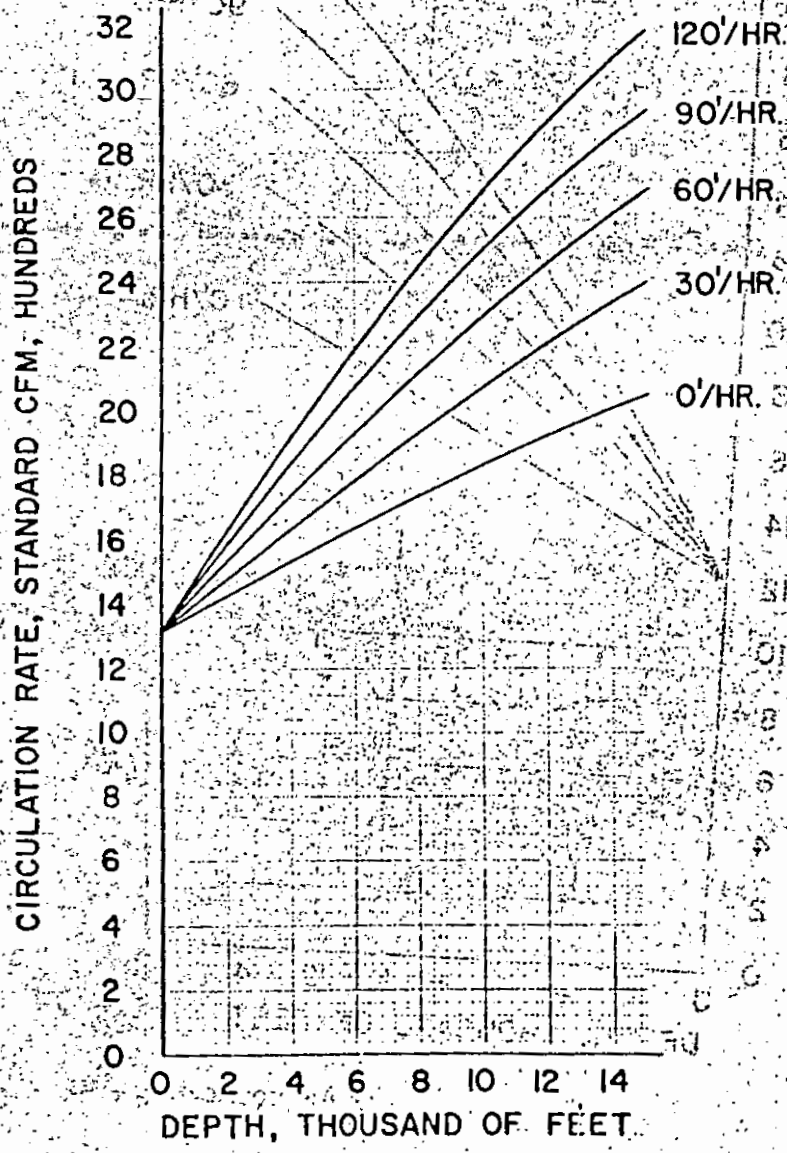




BULLYVARD 240

GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 9 7/8" DRILL PIPE O.D. 5"

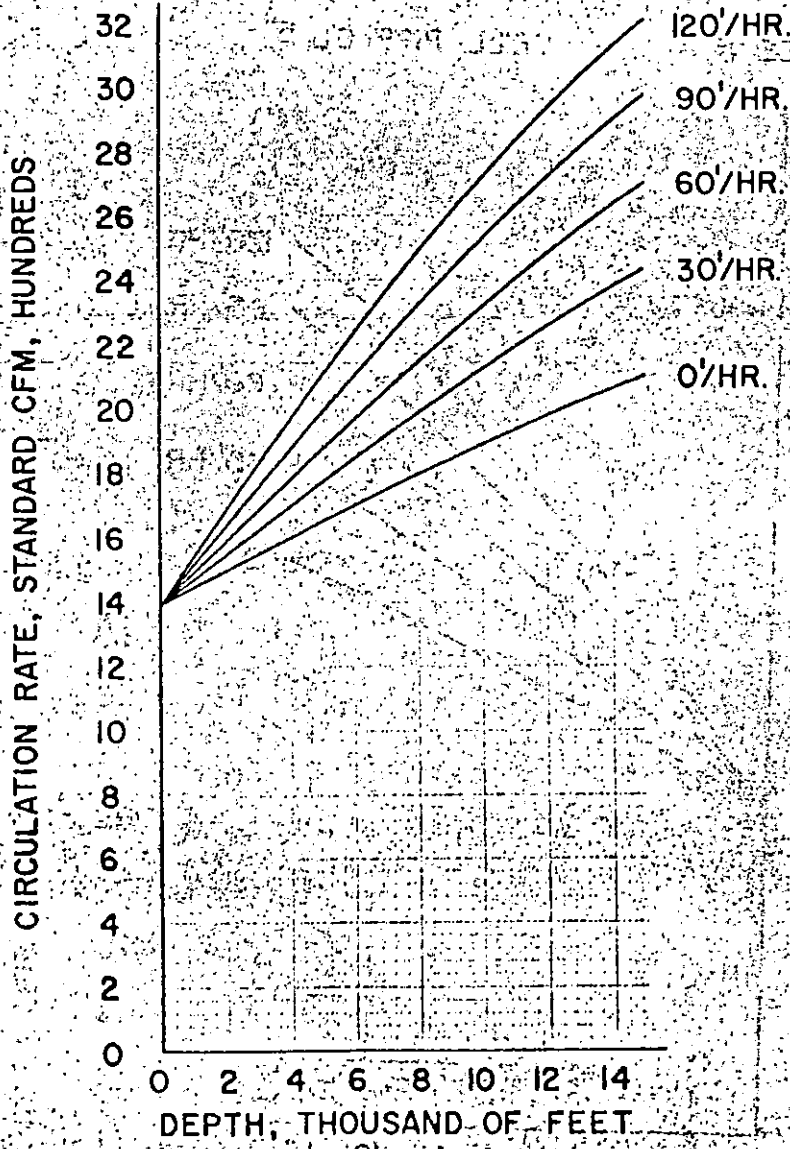


CIRCULATION RATE 20 MINUTE CLEAN HOURS



GAS GRAVITY 0.8

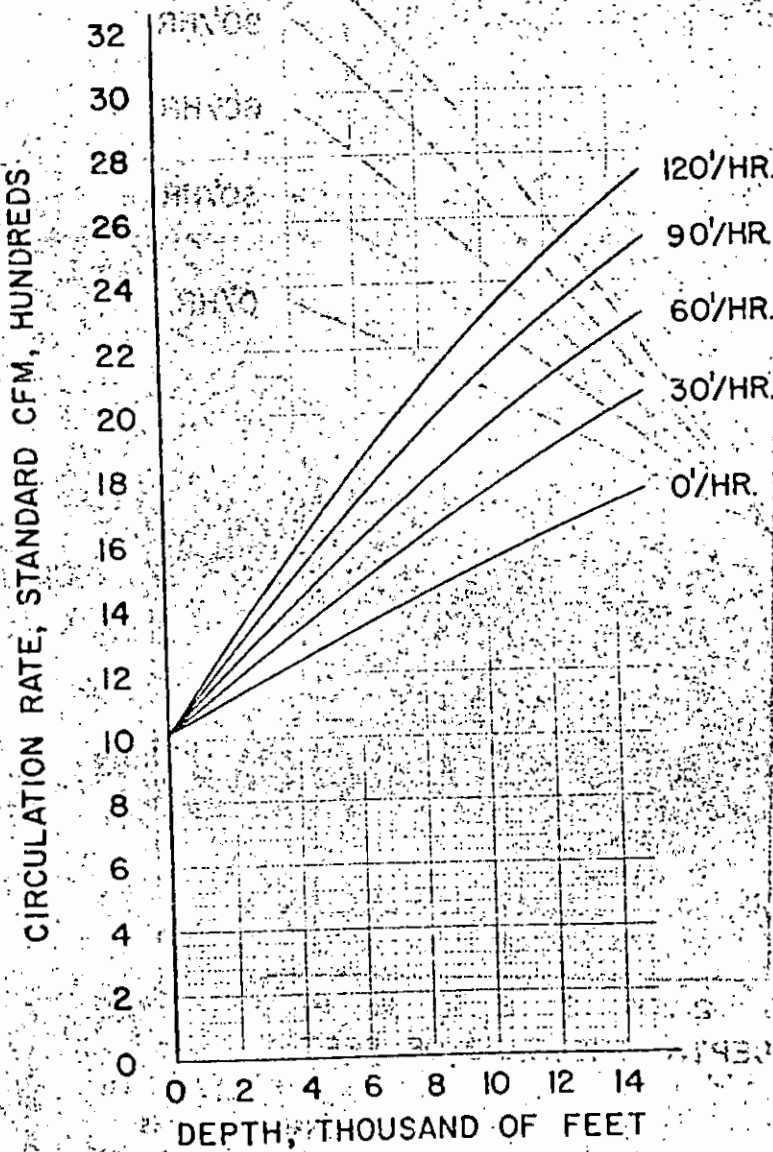
HOLE SIZE 9 7/8" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 9"

DRILL PIPE O.D. 5"

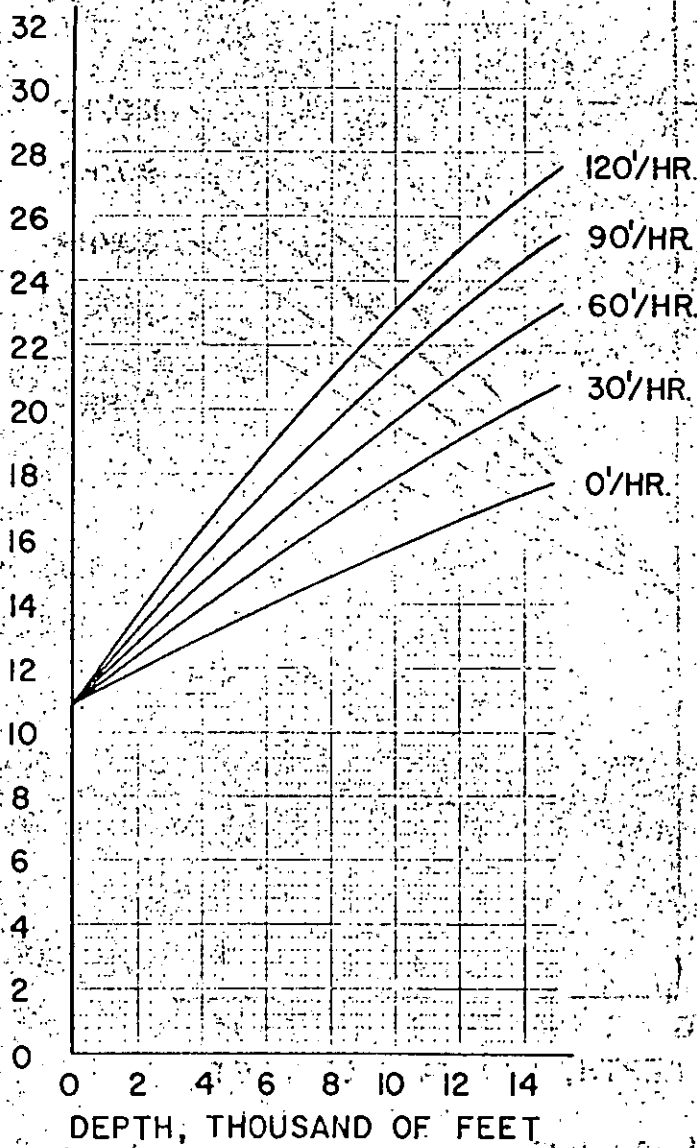


GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 9"

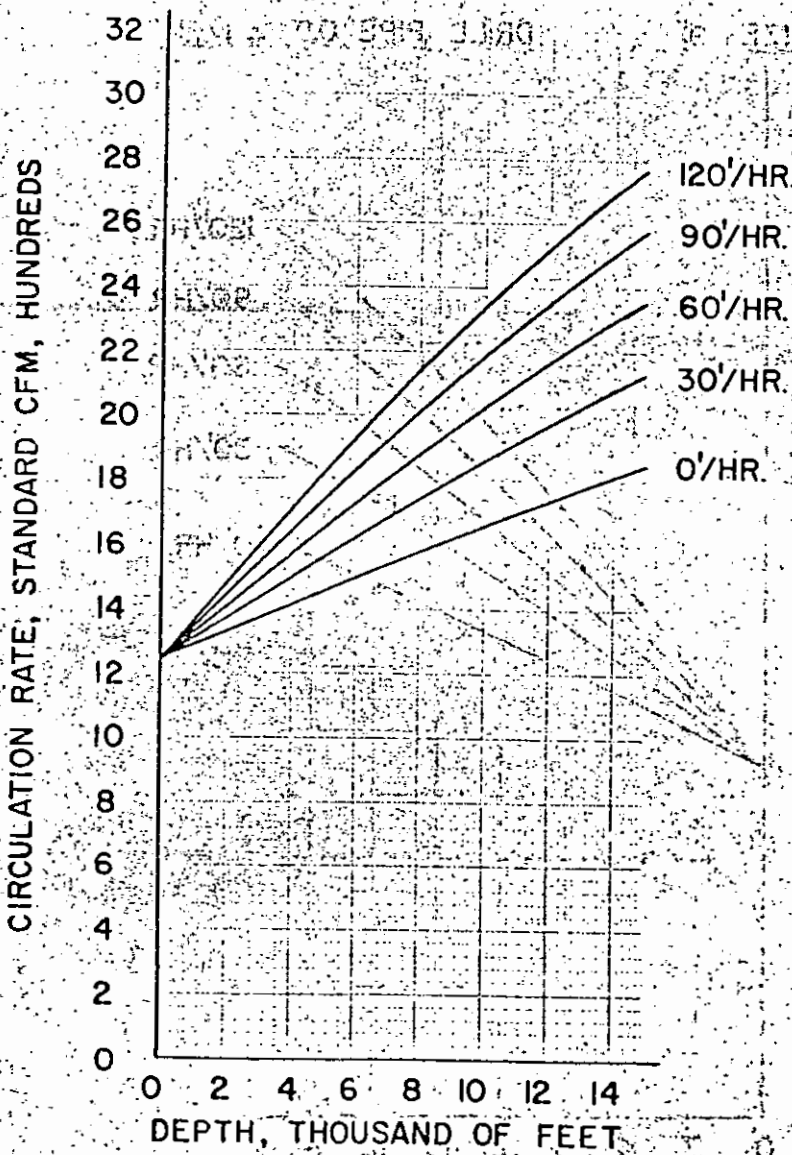
DRILL PIPE O.D. 4 1/2"

CIRCULATION RATE, STANDARD CFM, HUNDREDS



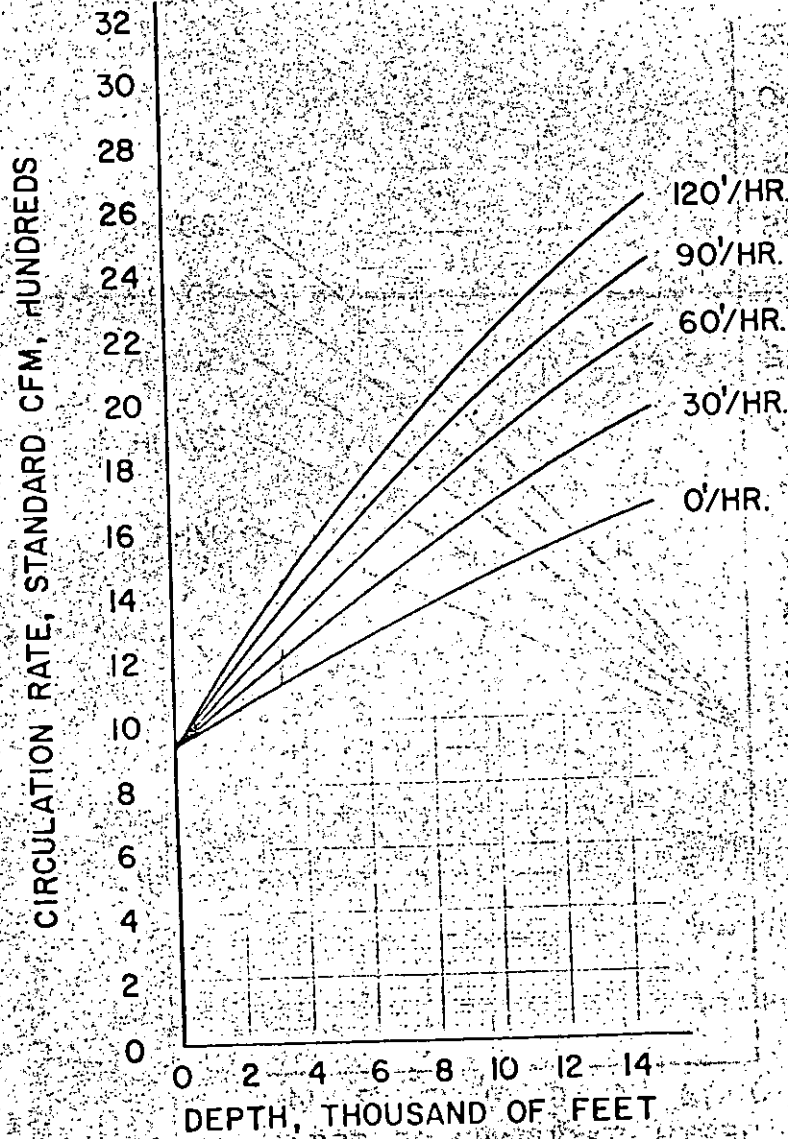
GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 9" DRILL PIPE O.D. 3 1/2"



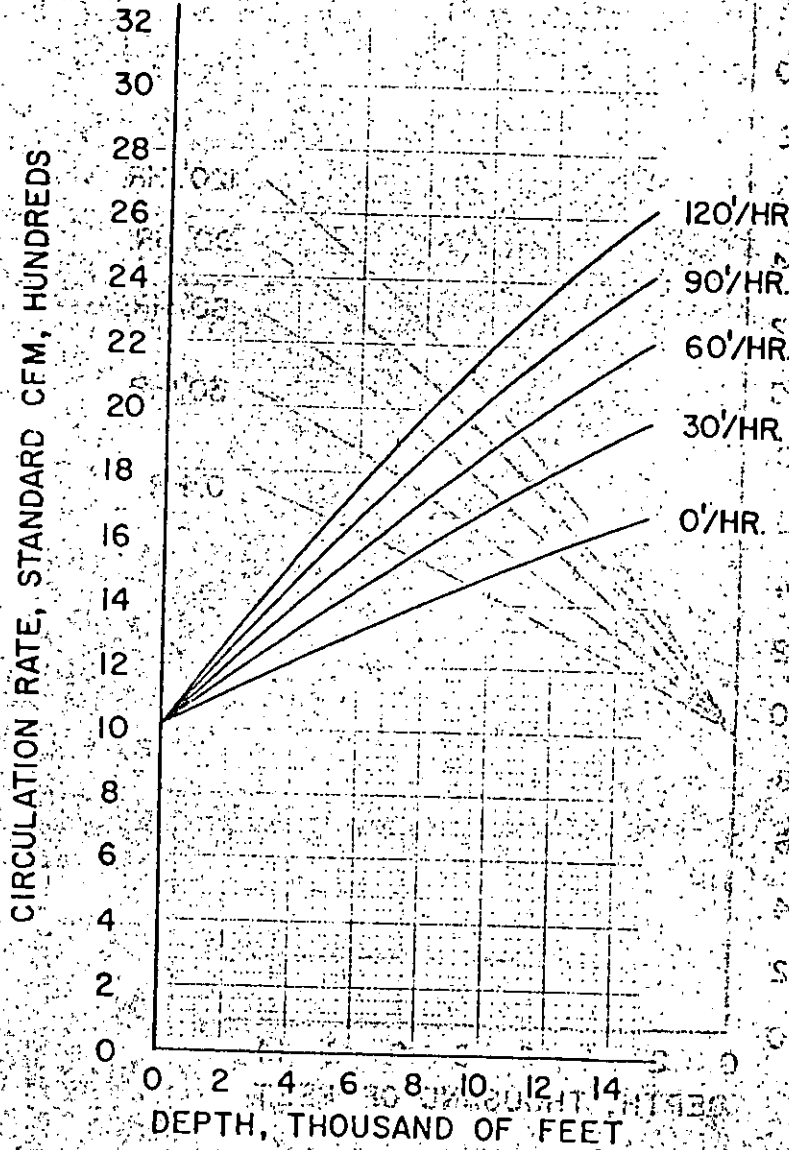
GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 8 3/4" DRILL PIPE OD 5"



GAS GRAVITY 0.8

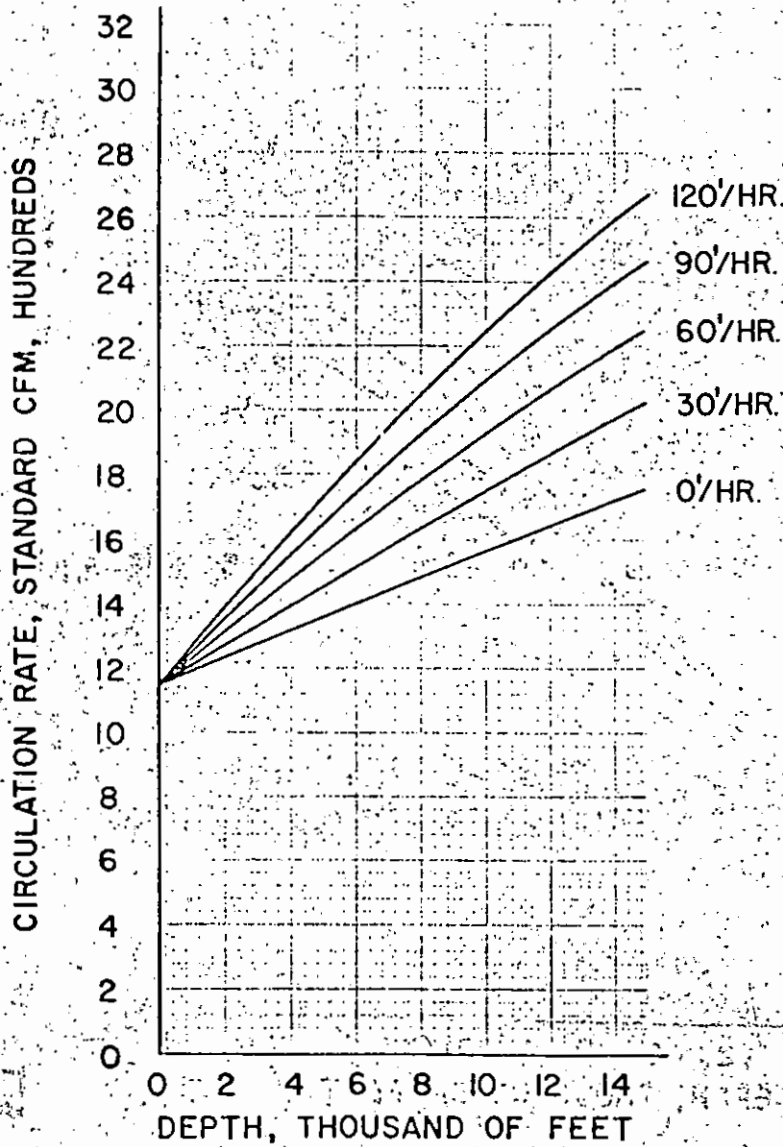
HOLE SIZE 8 3/4" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



50 - VOLUME REQUIREMENTS

GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 8 3/4" DRILL PIPE O.D 3 1/2"





GAS GRAVITY 0.8

HOLE SIZE 7 7/8"

DRILL PIPE O.D. 4 1/2

